Projektiranje in konstrukcija tekstilij in oblačil

Danilo Jakšić
Nikola Jakšić

Danilo Jakšić in Nikola Jakšić

Projektiranje in konstrukcija tekstilij in oblačil

Ljubljana, 2023

Naslov dela:	Projektiranje in konstrukcija tekstilij in oblačil
Avtorja:	prof. dr. Danilo Jakšić doc. dr. Nikola Jakšić
Oblikovanje naslovnice:	Jernej Strmec, mag. inž. el.
Založnik:	Samozaložba Danilo Jakšić
Kraj:	Ljubljana
Leto:	2023
Izdaja:	1. elektronska izdaja na podlagi 3. popravljene izdaje

© Danilo Jakšić in Nikola Jakšić

Brez soglasja založnika je prepovedano vsakršno
reproduciranje ali prepis v katerikoli obliki.

Kataložni zapis o publikaciji (CIP) pripravili v Narodni in univerzitetni knjižnici v Ljubljani

COBISS.SI-ID 170017283

ISBN 978-961-07-1799-7 (PDF)

Kazalo

Predgovor **vii**

1 Uvod **1**
1.1 Literatura 4

2 Podnebje **5**
2.1 Parametri podnebja, ki jih moramo upoštevati pri izbiri vrste in količine oblačil 6
2.2 Podnebje v Sloveniji 19
2.3 Splošno o podnebju na zemlji 28
2.4 Seznam oznak poglavja 30
2.5 Literatura 31

3 Uravnavanje telesne temperature **33**
3.1 Uvod 34
3.2 Proizvodnja toplote 35
3.3 Uravnavanje telesne temperature 39
3.4 Seznam oznak poglavja 59
3.5 Literatura 59

4 Znojenje **65**
4.1 Izločanje znoja 65
4.2 Sestava znoja, mehanizem znojenja in prilagoditev vročemu podnebju . . 74
4.3 Seznam oznak poglavja 84
4.4 Literatura 85

5 Prilagoditev na nizke in visoke temperature **87**
5.1 Prilagoditev na nizke temperature 87
5.2 Literatura 99

6 Izhodišča za projektiranje oblačil **101**
6.1 Namembnost oblačil 102
6.2 Projektni zahtevki za oblačila 102
6.3 Osnovni parametri, ki jih moramo upoštevati pri konstrukciji oblačil . . . 109
6.4 Seznam oznak poglavja 119
6.5 Literatura 120

7 Termoizolacijska vrednost oblačila in čas tolerance **123**
7.1 Uvod 123
7.2 Jakšićeva metoda ugotavljanja toplotne izolacije oblačila 124

7.3 Jakšićeva metoda ugotavljanja časa tolerance . . . 132
7.4 Seznam oznak poglavja . . . 152
7.5 Literatura . . . 153

8 Ugotavljanje poroznosti ploskih tekstilij 155
8.1 Uvod . . . 155
8.2 Jakšićeva metoda ugotavljanja velikosti, števila in porazdelitve velikosti por v ploskih tekstilnih izdelkih . . . 156
8.3 Seznam oznak poglavja . . . 174
8.4 Literatura . . . 175

9 Pretok vodne pare skozi oblačila 177
9.1 Uvod . . . 178
9.2 Teoretične osnove . . . 180
9.3 Močenje oblačila . . . 183
9.4 Metode za preizkušanja vodo odbojnega učinka na tkaninah in primernost njihove uporabe . . . 193
9.5 Primernost metod . . . 197
9.6 Seznam oznak poglavja . . . 200
9.7 Literatura . . . 201

10 Odpornost proti drgnjenju in pojav svaljkov 203
10.1 Uvod . . . 204
10.2 Mehanizem pojave svaljkov . . . 204
10.3 Kinetični modeli tvorbe svaljkov (piling) . . . 205
10.4 Faze tvorbe svaljkov in lastnosti vlaken . . . 210
10.5 Nagnjenost h kosmatenju in tvorbi svaljkov . . . 210
10.6 Vpliv posameznih parametrov kakovosti vlaken na tvorbo svaljkov . . . 211
10.7 Vpliv parametrov kakovosti preje na pojav svaljkov . . . 216
10.8 Vpliv vrednosti parametrov kakovosti tkanine na pojav svaljkov . . . 217
10.9 Seznam oznak poglavja . . . 221
10.10 Literatura . . . 222

11 Odpornost preje in tkanin proti deformacijam 223
11.1 Uvod . . . 224
11.2 Odpornost proti skrčenju . . . 224
11.3 Jakšićev model transformacije dolžine niti v volnenih tkaninah . . . 226
11.4 Jakšićeva študija grbančenja pol volnenih tkanin . . . 233
11.5 Analiza eksperimentalnih rezultatov v nagrbančeni tkanini . . . 239
11.6 Vrste in obstojnost barv . . . 244
11.7 Seznam oznak poglavja . . . 244
11.8 Literatura . . . 245

12 Teorija fazne strukture volne 247
12.1 Uvod . . . 247
12.2 Vpliv procesa rasti volnenega vlakna na njegovo fazno strukturo . . . 248
12.3 Eksperimentalna tehnika . . . 252
12.4 Eksperimentalni rezultati . . . 254
12.5 Analiza rezultatov . . . 255
12.6 Namesto sklepov . . . 257

12.7 Seznam oznak poglavja . . . 257
12.8 Literatura . . . 257

13 Projektiranje tekstilij za opremo stanovanj in bivalnih prostorov 259
13.1 Uvod . . . 260
13.2 Tekstilije za posteljnino in za blazinjenje pohištva . . . 260
13.3 Zavese, stenske in talne obloge . . . 263
13.4 Seznam oznak poglavja . . . 270
13.5 Literatura . . . 270

14 Projektiranje tekstilij za tehnične namene 273
14.1 Uvod . . . 274
14.2 Tekstilije za filtracijo . . . 274
14.3 Suha filtracija . . . 274
14.4 Mokra filtracija . . . 284
14.5 Seznam oznak poglavja . . . 290
14.6 Literatura . . . 291

15 Teorija filtracije nano delcev 293
15.1 Uvod . . . 293
15.2 Medicinska maska . . . 294
15.3 Nov pristop teoriji filtracije . . . 300
15.4 Numerično modeliranje obnašanja virusa v ravni cevi (pori) . . . 301
15.5 Razparava o mehanizmu filtracije v medicinskih maskah . . . 310
15.6 Seznam oznak poglavja . . . 318
15.7 Literatura . . . 319

16 Tekstilije namenjene za zaščito pred balističnimi izstrelki in več–aksialne tkanine 321
16.1 Področja uporabe . . . 322
16.2 Karakteristike materialov za izdelavo zaščitnih oblačil . . . 322
16.3 Matematična analiza penetracije izstrelka . . . 324
16.4 Vpliv lastnosti tekstilij na upor penetraciji izstrelka . . . 326
16.5 Nekatere moderne rešitve na področju neprebojnih tkanin . . . 328
16.6 Jakšićeva pet, šest in sedem aksialna tkanina, ki bi se lahko uporabile za izdelavo neprobojnih jopičev . . . 335
16.7 Medsebojna primerjalna analiza uporabnosti 2, 3, 4, 5, 6 in 7 aksialnih tkanin za izdelavo neprebojnih jopičev . . . 350
16.8 Seznam oznak poglavja . . . 357
16.9 Literatura . . . 358

17 Tekstilije za posebne tehnične namene 359
17.1 Ribiške in druge mreže [1] . . . 360
17.2 Tkanine za šotore [2] . . . 360
17.3 Tkanina za jadra - jadrovina . . . 362
17.4 Transportni trakovi in pogonski jermeni . . . 363
17.5 Padala . . . 363
17.6 Seznam oznak poglavja . . . 377
17.7 Literatura . . . 378

18 Konstrukcija tekstilij **381**
18.1 Splošno . . . 382
18.2 Izbor vlaken . . . 383
18.3 Konstrukcija preje . . . 390
18.4 Konstrukcija tkanin . . . 395
18.5 Konstrukcija pletenin . . . 408
18.6 Vlaknovine . . . 418
18.7 Seznam oznak poglavja . . . 427
18.8 Literatura . . . 429

19 Osnove barvnega sistema **431**
19.1 Splošno . . . 432
19.2 Teorije mešanja barvne svetlobe in barv . . . 433
19.3 Modeli barvnih sistemov . . . 440
19.4 Barvni standardi in merilna tehnika . . . 456
19.5 Praktična uporaba barvnih teorij in barvnih sistemov [16] . . . 458
19.6 Seznam oznak poglavja . . . 473
19.7 Literatura . . . 473

20 Nekatere prvine estetike oblačil **475**
20.1 Človeško telo kot izhodišče . . . 475
20.2 Kultura . . . 477
20.3 Likovna umetnost . . . 479
20.4 Likovna umetnost kot oblika duhovne in materialne proizvodnje . . . 480
20.5 Estetika . . . 482
20.6 Oblikovanje in estetika v pogojih industrijske proizvodnje . . . 485
20.7 O čem govorijo oblačila . . . 488
20.8 Slikovna priloga . . . 493
20.9 Literatura . . . 502

Stvarno kazalo **503**

Predgovor

Projektiranje in konstrukcija tekstilij je interdisciplinarno področje in zaradi tega precej zahtevno. Tako kot drugi proizvodi imajo tudi tekstilni izdelki določeno namembnost. Tekstilni izdelek je lahko specifičen, namenjen natanko določeni uporabi, lahko pa je tudi večnamenski. Enonamenske izdelke projektiramo in konstruiramo tako, da imajo optimalne parametre kakovosti za določeno namembnost. Takemu proizvodu praviloma ne moremo spremeniti namembnosti. Če pa moramo zaradi kakršnegakoli vzroka spremeniti namembnost tekstilnega izdelka, se navadno izkaže, da je ta za novo namembnost preveč ali premalo kakovosten ali celo neuporaben. Nekateri tekstilni izdelki so večnamenski. To je vsekakor pozitivno, saj jih lahko uporabimo za različne namene, odvisno pač od trenutnih okoliščin. Toda takšni izdelki navadno nimajo optimalnih lastnosti za nobeno od predvidenih namembnosti. To je pač pomanjkljivost univerzalnosti.

Tekstilne izdelke lahko po namembnosti v grobem razdelimo v dve osnovni skupini:

- blago za oblačila v širšem pomenu besede (v to skupino lahko štejemo tudi blago za posteljnino in gospodinjski tekstil) in
- blago za tehniške namene (filtri za suho in mokro filtracijo, kord za gume, blago za taborniško opremo, blago za opremo notranjosti transportnih sredstev - avtomobilov, avtobusov, letal, potniških vagonov, pohištveno blago, blago za padala, armatura kompozitov in laminatov in podobno).

Tekstilni izdelek naj ima optimalne vrednosti parametrov kakovosti, do katerih pridemo na podlagi projektnih zahtevkov. V projektnih zahtevkih morajo biti upoštevane razmere, v katerih se določeni tekstilnia proizvod uporablja. Če gre, na primer, za delovno obleko za monterje daljnovodov, moramo vsekakor upoštevati delovne pogoje dela. Ker je delo v glavnem na prostem, moramo upoštevati:

- temperaturo zraka in nihanje temperature,
- hitrost vetra,
- relativno vlažnost zraka , vrsto, količino, pogostost in trajanje padavin,
- vrsto in intenziteto gibov (kar je pomembno za kroj in obliko oblačila),
- količino toplote in znoja, ki ju uporabnik oblačila proizvaja na enoto površine telesa v enoti časa,
- intenziteto drgnjenja posameznih delov oblačila,
- intenziteto umazanosti oblačila in podobno.

Poleg tega je potrebno poznati vrsto dela, ki ga uporabnik opravlja z rokami, zaradi ustrezne konstrukcije rokavic. Poznati je potrebno tudi vrsto obutve, ki so specifične za takšna dela, in sicer zaradi optimalne konstrukcije nogavic. Pri konstrukciji tehničnih izdelkov, na primer filter medijev za suho filtracijo prahu), morajo biti postavljeni projektne zahtevki, ki navadno obsegajo:

- učinkovitost filtracije,
- velikost delcev prahu,
- obremenitev,
- življenjsko dobo,
- kapaciteto - količino plinov, ki na enoto časa gredo skozi enoto površine filter medija in,
- primerno temu površino filtra,
- količino vodnih hlapov,
- temperaturo prahu,
- agresivnost plinov in podobno.

Pri konstruiranju določenega tekstilnega izdelka izberemo le tiste parametre kakovosti, ki so po projektnih zahtevkih bistveni za določeno uporabo. Na vrednosti izbranih parametrov sloni konstrukcija opazovanega proizvoda.

Kakovost tekstilnega izdelka opredelimo, zaradi praktičnih razlogov, le z nekaj osnovnimi parametri kakovosti. Posamezni parametri kakovosti so v določeni medsebojni odvisnosti. Če bi na primer hoteli popolnoma opisati kakovost nekaterih vrst tkanin, ne bi zadostovalo niti 50 različnih parametrov kakovosti. Razen v začetni fazi razvoja izdelka, je neracionalno in neekonomično operirati s takšnim številom parametrov. V takšnih primerih se na podlagi dobljenih rezultatov izberejo le najvažnejši parametri kakovosti, ki bodo v zadostni meri opredelili kakovost proizvoda glede na njegovo namembnost.

Za uspešno projektiranje in konstrukcijo tekstilij je nujna sinteza vsega znanja, ki ga diplomirani univerzitetni inženir tekstilne tehnologije dobi tekom celotnega študija. Poleg tega papotrebuje še dodatno znanje s področja, kateremu je tekstilni proizvod namenjen.

Snov v pričujoči knjigi daje osnove, ki bodo omogočile projektantu tekstilij, da se bo lahko hitreje poglobil v določeno problematiko v zvezi s projektiranjem in konstrukcijo tekstilij.

V knjigi so obdelana številna področja uporabe tekstilij, ki jih lahko delimo v šest sklopov.

Prvi sklop predstavljajo poglavja od 1 do 5. V tem sklopu predstavimo različne termoizolacijske plasti, s katerimi se je prvobitni človek zaščitil pred neugodnimi vremenskimi razmerami. Le-te so v 2. poglavju tudi podrobneje predstavljene tako za Slovenijo kot za svet v celoti.

Temperatura okolja, veter in dež so med najpomembnejšimi parametri projektiranja oblačil. Ker je izredno pomembno, da se človeško telo nahaja v coni ugodja, se v 3. poglavju posvetimo mehanizmu uravnavanja telesne temperature in njegovim dejavnikom.

Pri tem v 4. poglavju posebno pozornost posvetimo znojenju kot zelo pomembni komponenti regulacije telesne temperature. V 5. poglavju pa opišemo prilagoditve človeka na nizke in visoke temperature.

Drugi sklop je namenjen projektiranju oblačil. V 6. poglavju so opisana izhodišča za projektiranje oblačil, ki zajemajo analize namena oblačila in okoliščin njegove uporabe. Posebno pozornost posvečamo termoizolacijski vrednosti oblačil in času tolerance, čemur je posvečeno 7. poglavje. V 8. in 9. poglavju je razložen fenomen poroznosti ploskih tekstilnih izdelkov in pa hitrost pretoka vodne pare skozi oblačilo.

Tretji sklop naslavlja probleme odpornosti tkanin in oblačil. Študiju mehanske odpornosti je namenjeno 10. poglavje, odpornosti preje in tkanin proti deformacijam je namenjeno 11. poglavje. 12. poglavje pa je namenjeno specifičnim problemom predelave volnenih vlaken v tekstilni izdelek.

Četrti sklop je namenjen projektiranju različnih skupin tekstilij, in sicer tekstilij za opremo stanovanj (13. poglavje), tekstilij za tehnične namene (14. poglavje), s posebnim poudarkom na mehanizmu filtracije nano-delcev v medicinski maski (15. poglavje), pri čemer smo nagovorili tudi okoliščine pandemije COVID-19 v letih 2020–2022.

Peti sklop obravnava pester nabor posebnih tekstilij. 16. poglavje je namenjeno specifičnim aspektom uporabe tekstilij kot zaščite pred balističnimi izstrelki in tako obravnava multiaksialne tkanine. V 17. poglavju so prikazani postopki projektiranja tekstilij za posebne namene, kot so npr. ribiške mreže, jadra in ponjave, pogonski trakovi itd.

Zadnji, šesti sklop je namenjen seznanjanju s konstrukcijo tekstilij – izboru vlaken, konstrukciji preje in tkanin ter pletenin in nazadnje vlaknovin (18. poglavje), osnovam barvnih sistemov (19. poglavje), nekaterim prvinam estetike oblačil (20. poglavje).

Zahvala

Najprej se zahvaljujem soavtorju dr. doc. Nikoli Jakšiću za uspešan razvoj "Teorije filtracije mikrobov in virusov z medicinsko masko". Ta teorija postavi vsebine tega učbenika na višjo znanstveno raven.

Zahvalo sem dolžan mojima prijateljema, Milanu Stepišniku in Pavlu Ledineku, ki sta ves čas našega prijateljevanja podpirala moje ideje, jih strogo presojala in mi postavljala zahtevna vprašanja. Posebno zahvalo sem dolžan tudi podjetju Lestro-Ledinek, d.o.o., kjer so mi omogočili nemoteno eksperimentalno delo.

Zahvala gre sporogi Katji za vse prevožene kilometre in prve korekcije besedila. Hvala tudi vnukinji Živi, ki me je ves čas spodbujala, da sem pričujoče delo dokončal in pa Jerneju Strmecu za grafično oblikovanje platnic pričujoče knjige.

Danilo Jakšić

V Ljubljani, junija 2023

POGLAVJE 1

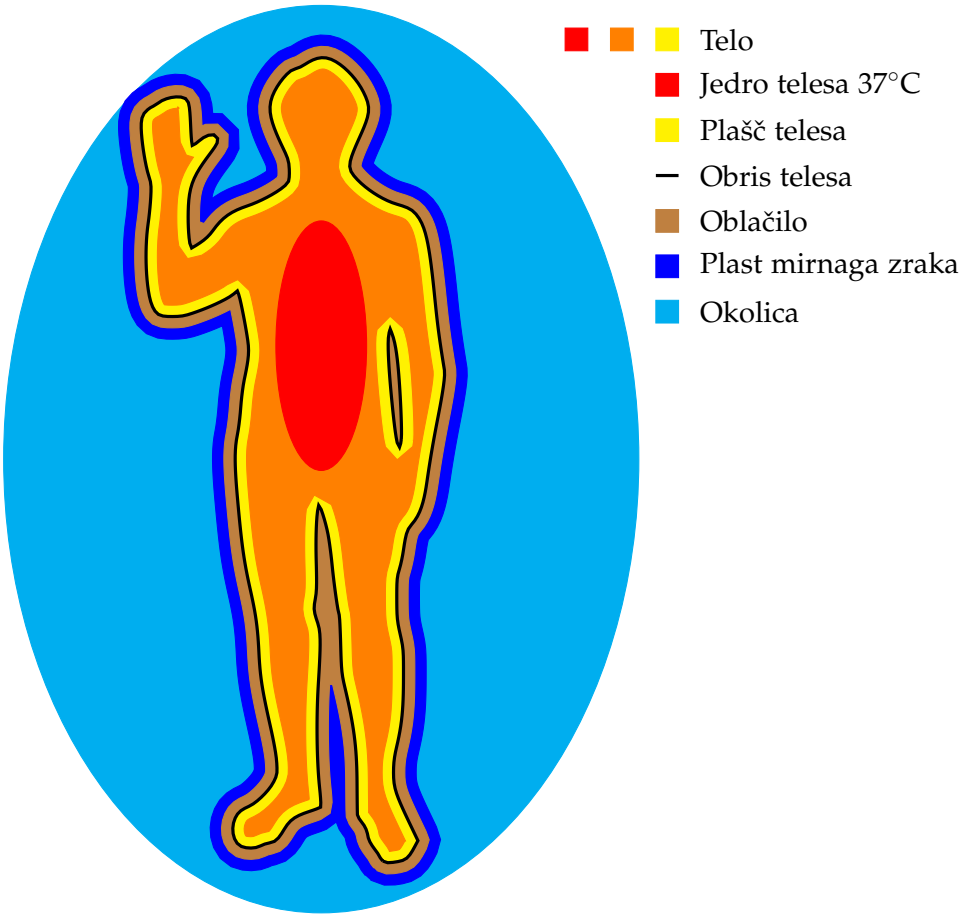
Uvod

Človek v svoji prvotni domovini, centralni Afriki, ni rabil oblačil. Postopoma pa je prišel v območja, v katerih je bilo podnebje bolj neprijazno. Naslednji korak je bila uporaba živalskih kož za zaščito pred mrzlim okoljem. Kot lovec je imel na razpolago kože, ki pa jih je bilo potrebno strojiti in potem sešiti. V tistih časih je šlo za »visoke tehnologije«. Ko ni bilo dovolj kož, se je moral preleviti v pravega tekstilca. Pri tem se je zgledoval po pajkih in posnemal njihovo delo pri »pletenju« mreže. Človek je bil očitno intelektualno že sposoben posnemati takšen dogodek v naravi.

Pred več kot 4.000 leti zasledimo uporabo tkanin za izdelavo oblačil iz volne. Dolgo časa je bila izdelava tekstilnih izdelkov ročna in precej enostavna. Postopoma se je povečalo število uporabnih tekstilnih surovin (volna, bombaž, stebelna vlakna). Končno je v Evropo prinesena tudi naravna svila, ki je bila za Kitajsko strateška surovima. Predelava teh surovin v tekstilne izdelke je zahtevala le spretne roke izdelovalcev. Zato sodi izdelava tekstilnih izdelkov med prve predelovalne dejavnosti. Zaradi preprostosti ročne izdelave tekstilij so, na primer v Kraljevini Jugoslaviji, po vaseh izdelovali oblačila in tudi posteljnino ročno po stari tehnologiji, čeprav so že bili na razpolago izdelki tekstilne industrije. Vas je bila torej tekstilno samozadostna. Tekstilna industrija tistega časa pa je v več fazah proizvodnje posnemala “prastaro tehnologijo”. Za sodobno tekstilno industrijo pa velja, da je daleč od rokodelstva. Enako kot vse druge predelovalne industrijske panoge se lahko potrjuje z inovacijami, izdelke z visoko dodano vrednostjo, odličnim oblikovanjem, novimi področji rabe in podobno. Brez znanosti in znanstvenega pristopa tega pač ni mogoče doseči. Zato je pričujoče delo namenjeno prav znanstveni obravnavi tekstilstva.

Naj uvodoma opozorimo na raven nekaterih problemov, ki so obdelani v tem učbeniku. Na sliki 1.1 je shematično prikazano telo človeka in plasti, ki ga obdajajo. Človeško telo je izredno kompleksno. Seveda ga ne bomo obravnavali v detajlih. To je naloga medicine. Za tekstilca sta pomembna jedro telesa in plašč telesa oziroma koža in podkožno tkivo. Zaradi presnove, telo proizvaja določeno količino toplote pod določenimi pogoji. Telo je lahko v coni ugodja, ko ima jedro telesa temperaturo 37 °C in površina telesa temperaturo povprečno 33 °C. Če so te temperature nižje, se telo ohlaja. Če so pa višje, se pregreva. Proizvodnja toplote je pri zdravem človeku odvisna predvsem od vrste in intenzitete aktivnosti. Proizvodnja in izguba toplote v okolje pa morata biti uravnoteženi.

Zaradi spremembe stanja okolja, kot so npr. sprememba temperature okolja, spremembe hitrosti vetra, padavine in drugo, se lahko poveča izgube toplote. Če pa se



Slika 1.1: Sistem človek – oblačilo – okolje

temperature okolja povečajo, se izguba toplote zmanjša. Da bi vnaprej predvideli ta stanja, moramo imeti na razpolago metode, s katerimi lahko ugotovimo potrebne plasti oblačila, da se telo subjekta vrne v cono ugodja.

Zanimiva je izkušnja pri proučevanju vpliva hitrosti vetra na termoizolacijsko vrednost oblačila. Ta problem so v sedemdesetih letih prejšnjega stoletja proučevali na primeru polarne uniforme armade ZDA, ki so jo testirali v vojaški bazi na Grenlandiji.

Odstopanje med eksperimentalnimi (izmerjenimi) in teoretičnimi rezultati je bilo celo do 60 %. To odstopanje so pripisali pretoku zraka skozi oblačilo, kar je tudi res. Niso pa razvili metode, s katero bi dokazali izgube. Ustrezno metodo smo razvili na podlagi naših lastnih raziskav. Pri naši metodi [1] so odstopanja le $\pm$2,5 %. Ta primer kaže, da je tekstil lahko pravi izziv in še kako zanimiv.

Pomembno je tudi ugotoviti čas tolerance, ki ga bo preživel subjekt v določenem okolju in določeni sestavi oblačila, da ne pride v nevarnost, predvsem podhladitve. Kot rezultat tega lahko nastopi tudi smrt subjekta. Enačba, ki prikazuje čas tolerance, enačba (7.31), je zelo kompleksna. Vsebuje vse parametre, ki vplivajo na čas tolerance. Iz nje pa je tudi razvidno, da je potrebno imeti poleg znanja iz več različnih področij, tudi intuicijo, kako to vse skupaj združiti v celoto, ki se bo na koncu ujemala z realnostjo.

Zanimiv je tudi razvoj teorije fazne strukture volne. Suha volna je zalo dober termo izolator. Za zaščito telesa od podhladitve v mrzlih območjih se je začela uporabljati že pred več tisoč leti. Prvi poskus razlage strukture volne je leta 1931 podal Astbury [2], in sicer pod naslovom "$\alpha - \beta$ transformacija." Razlaga je bila zmotna. Novo teorijo smo razvili pred več kot dvajsetimi leti v devetdesetih letih in jo leta 1996 objavili na

mednarodni konferenci o volni [3]. Domači javnosti pa smo jo predstavili že tri leta prej [4].

Dejansko je izdelava in uporaba tekstilnih kemičnih vlaken in tekstilnih izdelkov na sploh, postala zelo kompleksna. To velja tako za tekstilije, ki so namenjene človeku neposredno (oblačila, posteljnina in podobno), kot tudi za tehnične tekstilije. Pri prvih moramo razumeti in zelo dobro poznati sistem človek – oblačilo – okolje, kar nam omogoča, da človeka ohranjamo v coni ugodja.

Pri tehničnih tekstilijah pa rešujemo drugačne probleme. Če proizvajamo tkanino za padala, kot tudi samo padalo, moramo poznati maso padalca, sile, ki delujejo na padalo, hitrost padanja, rezultanto vodoravnega in navpičnega gibanja, hitrost vetra in njegov vpliv na gibanje padala, poroznost padala ipd. Prav poroznost padala je posebnega pomena, tako pri odpiranju, kot pri spuščanju. Ker nobena od obstoječih metod ni bila primerna za merjenje poroznosti na tkaninah, smo razvili Metodo za ugotavljanje števila, velikosti in porazdelitve por v tekstilijah kot tudi Metodo merjenja vpliva hitrosti vetra, na pretok zraka skozi tekstilije [1], kar lahko uporabimo kot eden od vplivov velikosti por v tkaninah padala na hitrost padanja [2], ki omogoča izmero hidravličnega premera por (najmanjši premer kanala skozi katerega se giblje zrak) v velikosti mikrometra, če to omogoča aparatura za merjenje poroznosti. Hidravlični premer pore je najmanjši premer pore (kanala) To pomeni, da hidravlični premer pore vpliva na pretok količine zraka skozi poro pri določenem tlaku. S tem smo se izognili merjenju vpliva spremembe premera kanala vzdolž kanala. To je način, kako lahko rešimo navidez nerešljiv problem.

Tekstilije se uporabljajo tudi kot filtrski medij, kjer je izredno pomemben hidravlični premer por. Priporočljivo je, da je hidravlični premer pore večji od največjega premera delca, ki ga želimo filtrirati. Če bi bilo obratno, bi pora bila takoj zamašena. Pri vsem tem se pod razumeva, da kanal pore spreminja smer. Zaradi razlike hitrosti toka med centralno osjo in stenam kanala se pojavi radialna sila, ki odriva delec tako, da se izloči na površino kanala (pore) oziroma, na površino vlaken, ki tvorijo steno kanala.

Metoda za ugotavljanje števila, velikosti in porazdelitve por v tekstilijah je uporabna tudi za ugotavljanje števila, velikosti in porazdelitve por v vlakninah, kot so na primer vlaknine, ki jih uporabljajo za izdelavo medicinskih mask. Proizvajalec medicinskih mask je moral izpeljati serijo poskusov pri filtraciji zelo majhnih delcev, kot so mikrobi in virusi. Da bi bilo možno filtrirati mikrobe in viruse, mora biti maska izdelana iz mikrovlaken, ki imajo premer okrog 2 μm. Maska je sestavljena iz treh plasti. Zunanje plasti so izdelane iz normalnih vlaken premera okrog 18 μm. Vmesna plast pa je izdelana iz mikrovlaken premera okrog 2 μm. (poglavje 15). To je primer, kako je mogoče uporabiti teorijo filtracije pri vlaknini, ki nima nobene vidne pore, in to z pomočjo številnih poskusov in tudi nekaj intuicije.

Projektiranje in izdelava neprebojnega zaščitnega jopiča je za tekstilca enako zahtevna naloga. Problem je v tem, da preja, iz katere je izdelana tkanina, ne učinkuje na zmanjševanje hitrosti projektila vse dokler se popolnoma ne izravnajo niti v tkanini. Takrat se začne rušiti notranja struktura vlaken v preji. Za pretrg preje potrebujemo silo. To silo da projektil in pri tem zgublja hitrost. Da se projektil zaustavi, rabimo več plasti tkanine. Potrebno število plasti je mogoče izračunati pod določenimi predpostavkami, ki ponavadi niso popolnoma realne. Kljub temu se dobijo uporabni rezultati (poglavje 20).

Problem pa je mogoče rešiti tudi drugače. Namesto biaksalne tkanine lahko uporabimo pet ali celo sedem aksialno tkanino. Stroj za izdelavo štiri, pet in sedem aksialnih tkanin smo projektirali na Oddelku za tekstilstvo v Ljubljani. Izdelali smo prototip za

izdelavo štiri aksialne tkanine. Kot prototip je stroj še vedno v preizkušanju, pri čemer pa se je pokazalo, da je mogoče konstruirati in izdelati statve za izdelavo pet, šest in sedam aksialnih tkanin. Trenutno izdelujejo tetra aksialne tkanine le na Japonskem. Statve za izdelavo pet in več aksialna tkanin pa je popolna konceptualna inovacija, ki nakaže, kako je mogoče s pomočjo teorije in intuicije najti rešitve za še tako zapletene praktične primere.

1.1 Literatura

[1] D. Jakšić. Razvoj nove metode za ugotavljanje števila, velikosti in porazdelitve por v tekstilnih izdelkih 4. del. Technical report, VTOZO Tekstilna tehnologija, Ljubljana, 1978.

[2] M. K. Rudal. *Keratin and Keratinization – An essay in molecular biology*, volume 12. Pergamon Press, Oxford, 1961.

[3] D. Jakšić. New approach to wool phase structure. In *Proceedings of the 9th International Wool Textile Research Conference*, pages 12–18, Biella, Italy, 1995. Textile Research Institute.

[4] D. Jakšić. 3. nova teorija fazne strukture volne. *Tekstilec*, 36(4/5):135–142, 1993.

POGLAVJE 2

Podnebje

Kazalo

2.1 Parametri podnebja, ki jih moramo upoštevati pri izbiri vrste in količine oblačil **6**
2.1.1 Temperatura zraka, tal in vode 6
2.1.1.1 Prenos toplote v globino tal 6
2.1.1.2 Prenos toplote v atmosfero 8
2.1.2 Vlažnost zraka 15
2.1.3 Padavine 17
2.1.3.1 Sneg 17
2.1.3.2 Dež 18
2.1.3.3 Druge padavine 18
2.1.3.4 Veter 18
2.2 Podnebje v Sloveniji **19**
2.2.1 Splošno 19
2.2.2 Temperaturna območja 20
2.2.3 Količina padavin 23
2.2.4 Vremenski ekstremi 26
2.2.5 Projekcije podnebja za Slovenijo 26
2.3 Splošno o podnebju na zemlji **28**
2.3.1 Temperatura 28
2.3.2 Padavine 29
2.4 Seznam oznak poglavja **30**
2.5 Literatura **31**

Podnebje obravnavamo le toliko detajlno, kolikor je to nujno potrebno za pravilno projektiranje oblačila.

2.1 Parametri podnebja, ki jih moramo upoštevati pri izbiri vrste in količine oblačil

Podnebje opredeljujejo številni meteorološki parametri, kot so: temperatura zraka, sončno obsevanje in vrsta padavin, relativna vlaga v zraku, hitrost in smer vetra, oblačnost, zračni tlak ipd. Povprečne vrednosti teh parametrov v daljšem časovnem obdobju, vsaj v 30 letih, nam pokažejo značilnosti podnebja določenega območja. Vrednosti teh parametrov se spreminjajo v teku dneva in noči. Na naši zemljepisni širini pa so tudi posebno močno odvisni od letnih časov. Spremembe vrednosti nekaterih meteoroloških parametrov moramo upoštevati pri oblačenju. Oblačilo moramo prilagoditi stanju okolja. Optimalno oblačilo je tisto, v katerem se uporabnik (človek) v danem stanju okolja ugodno počuti.

V večini primerov problem ni v tem, kako doseči ugodje, problem je obdržati organizem v stanju ugodja dalj časa, če se spreminjajo parametri, ki vplivajo na ugodje. Da to dosežemo, moramo poznati spremembe in vzroke sprememb vrednosti posameznih parametrov, kot tudi njihov vpliv na ugodje.

2.1.1 Temperatura zraka, tal in vode

Temperatura zraka, tal in vode je predvsem odvisna od količine energije – sončnega sevanja, ki pade na enoto površine tal ali vode, od vrste tal, kota, pod katerim sončni žarki padajo na površino in od časa obsevanja. Količina geotermalne energije pa je zanemarljivo majhna.

Spekter sončnega sevanja ni monokromatičen, ampak je sestavljen iz ultravijoličnega dela spektra, ki ga v pretežni meri absorbira ozonska plast, vidnega dela (vijolično modra, rumena, oranžna, rdeča) in infrardečega dela spektra, ki ga deloma absorbirata voda in ogljikov dioksid v atmosferi.

Ko se na primer temperatura tal dvigne nad temperaturo zračne plasti, ki je v neposrednem stiku s površino tal, se ta začne ogrevati. Na naši geografski širini se bolj segrejejo prisojni kot osojni deli tal, kar ponazarja enačba (2.1):

$$I = I_0 \cos \varphi \tag{2.1}$$

kjer sta: I_0 gostota energijskega toka sevanja, ki pade na ploskev, katere normala je vzporedna s smerjo sončnih žarkov, in I gostota energijskega toka sevanja, ki pade na ploskev, katere normala oklepa s smerjo sončnih žarkov kot φ.

Energija, ki doseže površino tal, se porabi za segrevanje tal. Ko se temperatura tal poveča nekaj nad temperaturo plasti zraka, ki je neposredno nad površino tal, začnejo tla segrevati zrak. Ker sta temperaturi tal in plasti zraka, ki obdajajo človeka, ki se giblje po površini tal, sedi ali leži na njih, zelo važni pri projektiranju oblačil, bomo nekoliko podrobneje obravnavali to problematiko.

2.1.1.1 Prenos toplote v globino tal

Zanima nas predvsem temperatura tenkega sloja tal na površini. Pri tem ne bomo upoštevali tal v bližini vulkanov ali termalnih vrelcev, ker je delež površine takšnih tal v naši državi zanemarljivo majhen in s stališča oblačenja nimajo nobenega praktičnega pomena. Sestava tal je lahko različna (pesek, zemlja, kamen, suho listje). Pri tem mislimo predvsem na tenak sloj tal neposredno pri njihovi površini. Tudi stanje tal je lahko različno in se pogosto spreminja (suho, vlažno, mokro, močvirnato). Površinski sloj tal sestoji iz treh osnovnih komponent: trde, plinaste (zrak, vodna para) in tekoče (voda).

Toplotna prevodnost λ je odvisna od deleža treh navedenih komponent in njihove porazdelitve, kakor tudi od vrste trde komponente. Če je v globini z temperatura T in, če ta raste z globino, potem ima gostota toplotnega toka G smer proti površini tal in je sorazmeren hitrosti spremembe temperature z globino, enačba (2.2).

$$G = \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \tag{2.2}$$

Če je globina z podana v m, temperatura v K in λ v J/m.s.K, je toplotni tok G podan v J/m^2.s. Temperatura tal ni odvisna samo od sprejete količine toplote, ampak tudi od specifične volumenske toplote c. Ta pa je odvisna od specifičnih volumenskih toplot prej omenjenih treh komponent in njihovih volumenskih deležev. Če upoštevamo specifično volumensko toploto, lahko izrazimo hitrost spremembe gostote toplotnega toka G z globino tal z, z jo enačbo (2.3).

$$\frac{\partial G}{\partial z} = c \frac{\partial T}{\partial t} \qquad ; \qquad c = \rho c_p \tag{2.3}$$

kjer je $\partial T/\partial t$ hitrost spremembe temperature T v času t. c specifična toplota na enoto volumna, c_p specifična toplota pri konstantnem tlaku in ρ gostota. Če G v enačbi (2.2) odvajamo po z in vrednost na desni strani vstavimo v enačbo (2.3) namesto izraza na levi strani ter enačbo uredimo, dobimo parcialno diferencialno enačbo paraboličnega tipa, enačba (2.4).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \qquad ; \qquad a = \frac{\lambda}{c} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \tag{2.4}$$

Specifična toplota enote volumna c je podana v J/m^3.K. Koeficient a se imenuje temperaturna prevodnost oziroma termična difuzivnost in je podana v enoti m^2/s. Njena vrednost je zelo različna za različne snovi. Tako ima na primer železo vrednost termične difuzivnosti $260 \cdot 10^{-9}$, stene od $6 \cdot 10^{-9}$ do $23 \cdot 10^{-9}$, star sneg z gostoto približno 0,8 g/cm^3 od $8 \cdot 10^{-9}$ do $14 \cdot 10^{-9}$, suh pesek $2 \cdot 10^{-9}$ do $5 \cdot 10^{-9}$, suh les 10^{-9} do $5 \cdot 10^{-9}$ in mirujoč zrak od $150 \cdot 10^{-9}$ do $250 \cdot 10^{-9}$ J/m^3.K, glej tudi preglednico 2.1.

Enačba (2.3) nam pove, da je sprememba gostote toplotnega toka z globino tal sorazmerna spremembi temperature tal po času. Faktor sorazmernosti je specifična toplota enote volumna tal. Po drugi strani je hitrost spremembe temperature po času enačba (2.4) sorazmerna drugemu odvodu temperature po globini. Faktor sorazmernosti pa je temperaturna prevodnost ali termična difuzivnost a.

Temperatura tal se v glavnem spreminja v harmoničnem ritmu. To je lahko dnevna sprememba, ker je čas nihanja $t = 24$ ur, ali pa letna, ko lahko opazujemo spremembe temperature tal v odvisnosti od letnih časov. Z enačbo (2.5) lahko izrazimo odvisnosti temperatur T_1 in T_2 na različnih globinah z_l in z_2.

$$T_2 = T_1 \mathrm{e}^{-\sqrt{(z_2 - z_1)\frac{\pi}{a t_n}}} \tag{2.5}$$

Predpostavimo, da temperatura na površini tal ($z_1 = 0$ m) v času dneva niha za 38 K. Če predpostavimo, da so tla iz suhega peska, ki ima termično difuzijo $a = 0,0013$ cm^2/s, bo dnevna sprememba temperature $T_2 = 9,97$ K na globini $z_2 = 0,08$ m. Iz tega primera vidimo, da se lahko zaščitimo pred preveliko dnevno spremembo temperature tako, da se zakopljemo v bunker v pesku, če na primer izvajamo dela v puščavskih predelih srednjega vzhoda ali v Sahari. Podobno velja za snežne razmere, ko smo prisiljeni

Preglednica 2.1: Okvirne vrednosti koeficientov toplotne prevodnosti λ in termične difuzivnosti a. [1, 2, 3, 4]

Gradivo	Toplotna prevodnost λ [W/m.K]	Termična difuzija a [mm^2/s]
Pesek, prod	0,77	0,45
Mulj	1,67	0,6
Glina	1,11	0,54
Ilovica	0,91	0,49
Z vodo nasičen pesek	2,50	0,93
Z vodo nasičen mulj	1,67	0,66
Bazalt	1,80	0,685
Granit	3,30	1,0
Gnajs	3,01	1,224
Lapor	2,69	1,118
Apnenec	2,73	1,054
Peščenjak	2,80	1,645
Kremenjak	1,43	1,4
Zlato	310	127
Srebro (99,9%)	429	165,63
Baker	400	111
Aluminij	230	84,18
Železo	80	23
Voda (25°C)	0,598	0,143
Alkohol	0,17	0,07
Zrak (300K)	0,026	19

prespati izven pokritih objektov, posebno še, če piha mrzel veter. Izračunamo lahko tudi časovni interval, v katerem vrednost temperature v eni globini (z_1) doseže naslednjo globino (z_2), enačba (2.6).

$$t_2 = t_1(z_2 - z_1)\frac{t_n}{2\pi}\sqrt{\frac{\pi}{a\,t_n}} \tag{2.6}$$

kjer sta t_1 čas, v katerem doseže temperatura ekstremno vrednost (maksimum ali minimum) v globini tal z_1, in t_2 čas, v katerem doseže temperatura ekstremno vrednost v globini z_2. Če je na primer na površini tal ($z_1 = 0$ m) dosežena maksimalna temperatura podnevi v 12 urah in 30 minutah, bo v globini 10 cm dosežena maksimalna temperatura 12.260 sekund pozneje (3 ure in 26 minut), $a = 0,0013$ cm^2/s.

Enačbo (2.6) lahko uporabimo za ugotavljanje globine, do katere sežejo dnevna ali letna nihanja temperature v različnih tleh. Ta globina je definirana kot globina, na kateri nihanje temperature doseže le 1 % vrednosti nihanja temperature na površini tal. Globino dnevnega in letnega nihanja temperature v različnih tleh so prikazane v preglednici 2.2. Pri teh izračunih predpostavljamo, da se termična difuzija tal a ne spreminja z globino. To v dejanskih razmerah ne drži popolnoma.

2.1.1.2 Prenos toplote v atmosfero

Če stojimo ali hodimo, obdaja naše telo zrak. Le podplati so deloma ali v popolnem stiku s tlemi, odvisno od oblike površine tal. Večina toplote, ki jo oddajamo v okolje,

Preglednica 2.2: Globine dnevnega in letnega nihanja temperature. [5]

Vrsta tal	Termična difuzija a [mm^2/s]	Globina [m] Dnevna	Letna
Pesek, prod	0,45	0,51	9,79
Mulj	0,60	0,59	11,3
Glina	0,54	0,56	10,72
Ilovica	0,49	0,53	10,21
Z vodo nasičen pesek	0,93	0,74	14,07
Z vodo nasičen mulj	0,66	0,62	11,85
Bazalt	0,685	0,63	12,08
Granit	1,0	0,76	14,59
Gnajs	1,224	0,84	16,14
Lapor	1,118	0,81	15,43
Apnenec	1,054	0,78	14,98
Peščenjak	1,645	0,98	18,71
Kremenjak	1,4	0,9	17,26

se prenaša s sevanjem, del pa s konvekcijo v mirno plast zraka, ki nas obdaja. Količina toplote, ki jo oddajamo v okolje, je odvisna od količine proizvedene toplote, temperature kože, razlike temperatur obdajajočega zraka in površine kože ter gibanja zraka. Zaradi tega je zelo važno, da poznamo dnevna in letna nihanja temperature zraka ter odvisnost temperature zraka od oddaljenosti od površine tal.

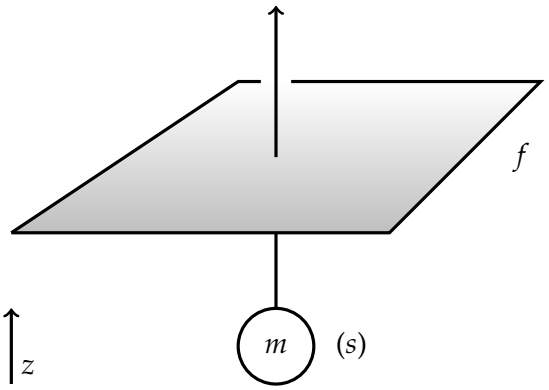
Ker je termična difuzija a mirnega zraka velika (od 0,15 do 0,25 cm^2/s) in specifična toplota c_p ($c_p = 1003,5$ J/kg.K), se bo zrak relativno hitro segrel kljub majhni vrednosti toplotne prevodnosti λ ($\lambda = 0,024$ W/m.K). Če izračunamo, namesto globine tako kot pri tleh, višino dnevnega nihanja temperature z enačbo (2.6) dobimo vrednost okrog 3 m, kar je približno trikrat večja vrednost kot tista v tleh z najvišjo vrednostjo termične difuzije (stene). Tako izračunano nihanje je posledica konduktivnega prenosa toplote (prevajanja toplote) s površine tal v zrak, ki leži nad njimi. Če bi se toplota s tal zares prenašala v zrak samo s kondukcijo, ne bi smelo biti nihanje temperature zraka na večji višini od 3 m. Toda dnevna temperatura mirnega zraka niha tudi na višinah, ki so višje od 1.000 metrov, kar pomeni, da je vpliv konduktivnega načina prenosa toplote s tal v atmosfero majhen.

Neposredno na površini trde faze (tla, stene, površina oblačila, površina kože) pa tudi na površini tekoče faze (morje, reke, jezera) se nahaja nekaj milimetrov debela plast zraka, skozi katero se prenaša toplota z kondukcijo in vodna para z difuzijo. Nad to plastjo zrak ni več negiben, ampak se giblje v obliki vrtincev in to gibanje prenaša toploto iz tal v atmosfero. Takšno gibanje zraka je v glavnem turbulentno. Pri turbulentnem gibanju se smer vetra lahko spreminja od ene do druge točke. Nas zanima predvsem vertikalna komponenta gibanja.

Predpostavimo, da je smer gibanja zraka (vetra) pravokotno na vodoravno ravnino, ki je v določeni razdalji od površine tal. Na ravni te zamišljene horizontalne ravnine imamo povprečno hitrost gibanja zraka navzgor. Opazujmo nedefinirano splošno karakteristiko s, ki jo merimo na enoto mase in ni odvisna od razmer v neposrednem okolju. Ta karakteristika je lahko količina prahu, količina vodne pare ali celo gibalna količina. Temperatura je odvisna od višine, ker se s povečanjem višine zmanjšuje tlak.

Pri opazovanju prenosa toplote lahko vzamemo karakteristiko s kot količino toplote

v enem gramu zraka (J/g), ki je enaka produktu c_pT, kjer je c_p specifična toplota zraka pri konstantnem tlaku ($c_p = 1,01$ J/g.K) in T potencialna temperatura zraka v Kelvinih. Potencialno temperaturo ima zrak, če je tlak 1.000 mb. Nekaj metrov nad površino tal ni bistvene razlike med dejansko in potencialno temperaturo, zato lahko operiramo z dejansko temperaturo brez večje napake. Na sliki 2.1 je prikazana shema za izpeljavo osnovne enačbe vrtinčne difuzije.



Slika 2.1: Shema vertikalne vrtinčne difuzije skozi horizontalno ravnino. [6]

Vprašanje navpičnega prenosa karakteristike s se pojavi samo takrat, ko se karakteristika spreminja z višino. Vzemimo začetno višino na ravnini f ($z = 0$ m, slika 2.1). Na nivoju z ima karakteristika s vrednost s_0. Sprememba s v bližini f se lahko dovolj natančno izrazi z dvema členoma Taylerjeve vrste (parabola).

$$s = s_0 + \frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}z}z + \frac{1}{2}\frac{\mathrm{d}^2s}{\mathrm{d}z^2}z^2 \tag{2.7}$$

Turbulentno gibanje zraka prinaša delce z nivoja z, skozi površino f. V času t naj bo m' masa volumenskih elementov, ki gredo skozi opazovano ravnino. Ta masa bo prinesla s seboj z nivoja z' povprečno vrednost karakteristike s, s'. Količina karakteristike s, ki gre v času t skozi površino f, bo $m's'$. To količino bomo vzeli kot pozitivno, če je usmerjena k površini tal. Skupna količina bo enaka vsoti posameznih količin ($\sum m's'$). V istem časovnem intervalu bo skupna količina, ki se prenaša v nasprotni smeri, enaka $\sum m''s''$. Potemtakem bo prenesena neto količina D karakteristike s skozi enoto površine f v enoti časa t podana z enačbo (2.8).

$$D = \frac{1}{tf}\left(\sum m's' - \sum m''s''\right) \tag{2.8}$$

Če upoštevamo enačbo (2.7), lahko enačbo (2.8) napišemo v obliki (2.9).

$$\begin{aligned} D = \frac{1}{tf}\Big(& s_0\left(\sum m' - \sum m''\right) \\ & + \frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}z}\left(\sum m'z - \sum m''z\right) \\ & + \frac{1}{2}\frac{\mathrm{d}^2s}{\mathrm{d}z^2}\left(\sum m'z^2 - \sum m''z^2\right)\Big) \end{aligned} \tag{2.9}$$

Ker turbulentno gibanje ne povzroči spremembe splošne porazdelitve mase, gre enaka količina mase skozi ravnino f navzgor in navzdol. Zaradi tega je razlika vsot mas v prvem členu na desni strani enačbe (2.9) enaka nič. Pri tem upoštevamo dejstvo, da je s_0 povprečna vrednost, ki se na ravnini f ne spreminja.

Nadalje predpostavljamo, da nastajajo spremembe simetrično na ravnino f: masa m', ki prihaja iz razdalje z', mora biti enaka masi m'', ki prihaja iz razdalje z''. Ta predpostavka ne velja za neposredno bližino tal. Toda če jo sprejmemo, bo tudi razlika v zadnjem oklepaju tretjega člena enaka nič. Zaradi tega se enačba (2.9) poenostavi in ostane samo drugi člen na desni strani, enačba (2.10).

$$D = \frac{1}{tf}\left(\sum m'z - \sum m''z\right)\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}z} \tag{2.10}$$

Koeficient pred faktorjem ($\mathrm{d}s/\mathrm{d}z$) ni odvisen od lastnosti zračne mase v turbulentnem gibanju in popolnoma opisuje hitrost gibanja. Enačbo (2.10) lahko poenostavimo z uvedbo turbulentne viskoznosti oziroma koeficienta izmenjave A (kg/m.s)

$$A = \frac{1}{tf}\left(\sum m'z - \sum m''z\right) \tag{2.11}$$

oziroma

$$D = A\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}z}. \tag{2.12}$$

Količina Q, enačba (2.13) ima enoto (P.m^2/s), kjer je P enota ene od lastnosti, ki jo lahko opišemo z enačbami od (2.8) do (2.12). Enačbo (2.12) lahko prilagodimo tako, da z njo izrazimo pretok (prenos) toplote Q. Namesto D bomo vstavili Q in namesto s količino c_pT ($\mathrm{d}s = c_p\mathrm{d}T$), dobimo enačbo (2.13).

$$Q = Ac_p\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}z} \tag{2.13}$$

Enačba (2.13) ima lahko isto obliko kot enačba (2.2), le koeficient λ zamenja produkt Ac_p. Potemtakem se prenos toplote v zrak po podobnem zakonu kot prenos toplote skozi tla; le red velikosti je zaradi razlik med λ in Ac_p drugačen.

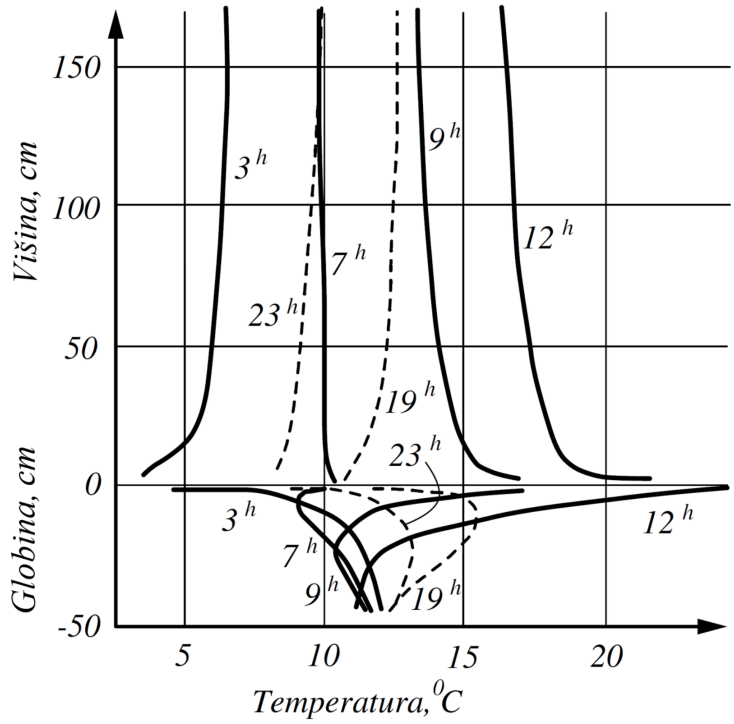
Prenos toplote s pomočjo turbulentne difuzije se imenuje tudi psevdo-kondukcija. Faktor A se zelo spreminja v prostoru in času. V mejnem sloju, le nekaj milimetrov od površine tal, kjer v glavnem velja mehanizem molekulske kondukcije, je A reda velikosti 10^{-5} kg/m.s. V atmosferi kot celoti so možni različni redi velikosti tudi milijonkrat večji.

Globalno sončno sevanje, ki doseže tla, se deloma odbije nazaj v atmosfero, deloma pa se absorbira v tla. Ker se moč sončnega sevanja čez dan spreminja, se bo spreminjala zaradi tega tudi temperatura tal in zraka. Na sliki 2.2 so prikazane dnevne temperaturne spremembe ob določenih urah v odvisnosti od višine zračne plasti in globine tal [6].

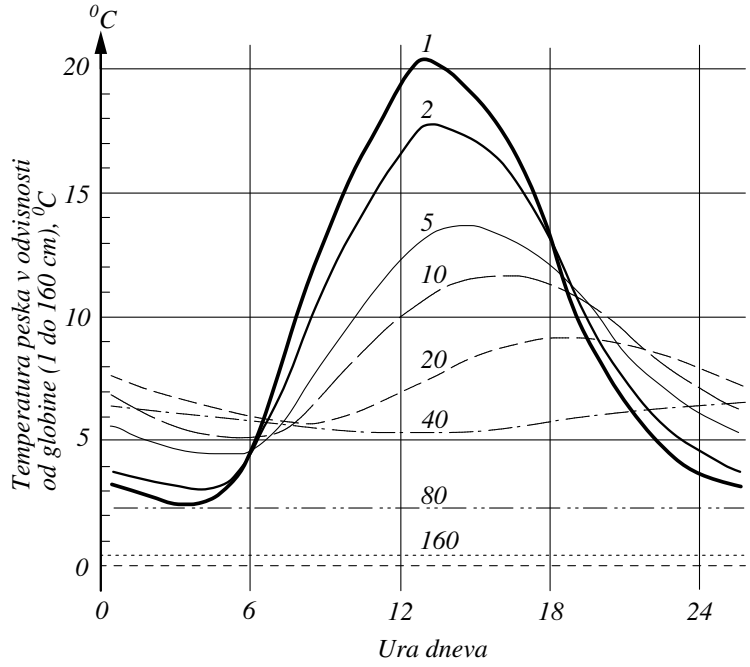
Ob 3 h zjutraj je temperatura tal okrog 4 °C. Tudi zračna plast, ki je neposredno na površini tal, ima enako temperaturo. Na višini enega metra ima zrak za okrog 3 °C višjo temperaturo kot na površini tal. Ko pa gremo v globino tal, se temperatura veča in na globini 0,5 m doseže temperaturo 12 °C. Ob 12 h pa je položaj obraten. V globini 0,5 m imajo tla temperaturo okrog 11 °C in na površini okrog 24 °C. Zračna plast nad površino ima ob tem času temperaturo okrog 22 °C, na višini 1 m pa le okrog 17 °C.

Temperatura tal se lahko tudi drugače spreminja, kot je videti na sliki 2.2. Na sliki 2.3 je prikazano desetletno povprečje majskih temperature v Pavlovsku (Rusija) v odvisnosti od globine in ure dneva [7]. Že na globini 0,8 m je temperatura tal konstantna in ni odvisna od dnevnega nihanja temperature na površini tal. Okrog 13 h doseže temperatura tal v globini 1 cm okrog 20 °C, medtem ko ima na globini 0,8 m le okrog 2 °C in v globini 1,6 m le nekaj več kot 0 °C.

Če tla niso večno zmrznjena, je lahko v določeni globini položaj popolnoma drugačen od tega, ki je prikazan na sliki 2.3. Na sliki 2.4 je prikazana letna sprememba

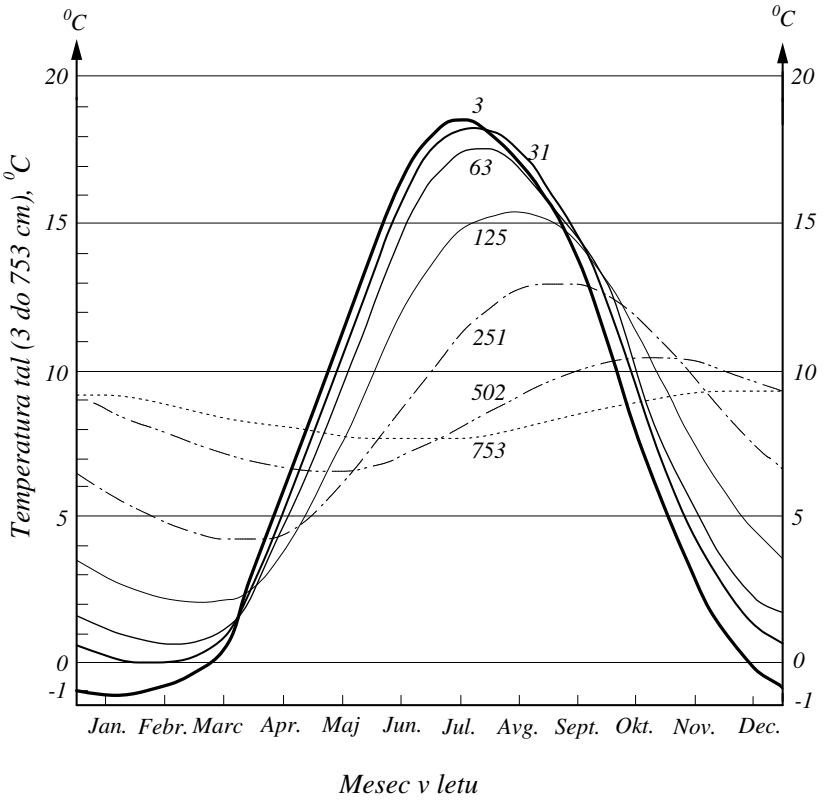


Slika 2.2: Primer spremembe dnevne temperature v odvisnosti od višine zračne plasti in globine tal. [5]



Slika 2.3: Dnevno nihanje temperature tal v mesecu maju v Pavlovsku (Rusija) v odvisnosti od globine tal in ure dneva. [7]

temperature tal v odvisnosti od globine tal in letnega časa v Kaliningradu (Rusija), kjer ima precejšen vpliv Baltiško morje [8]. Takšen potek spremembe temperature tal ne odstopa dosti od teoretičnih predpostavk in ga lahko v precejšnji meri apliciramo na naše razmere.



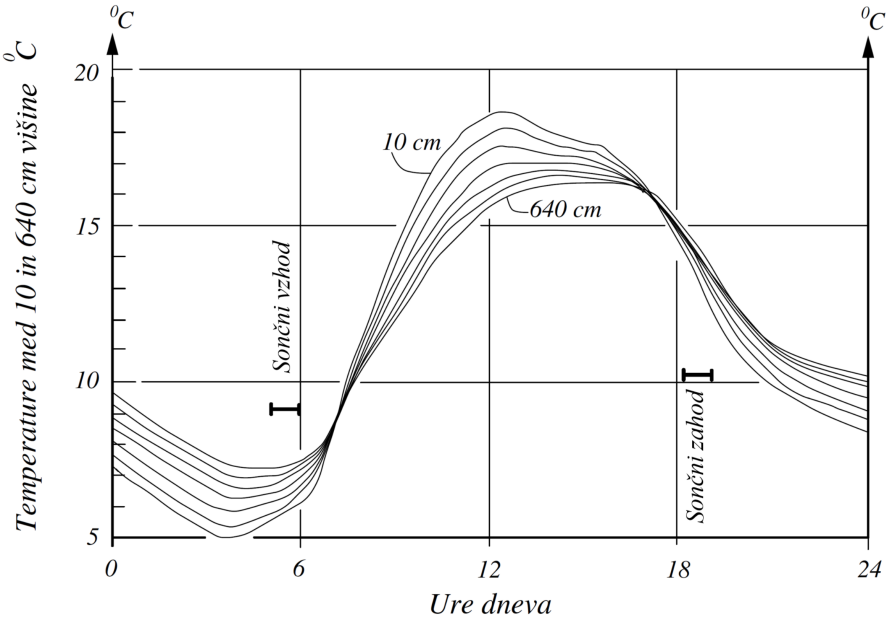
Slika 2.4: Letne spremembe temperature v Kaliningradu (Rusija) v odvisnosti od letnega časa in globine tal. [9]

Na sliki 2.5 je prikazana sprememba temperature zraka med višinama 0,1 m in 6,4 m v odvisnosti od ure dneva [6]. Inverzija nastane nekaj trenutkov po sončnem vzhodu in nekaj trenutkov preden sonce zaide. Potek temperaturne spremembe med površino tal in višino 10 cm ob določeni uri pa je prikazan na sliki 2.2, ki se nanaša na ista merjenja.

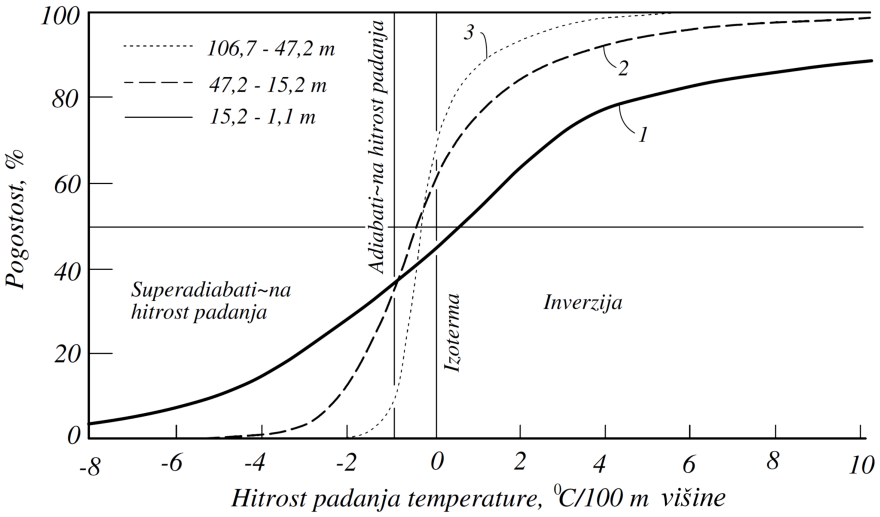
Kot je razvidno s slike 2.5, so v zračni plasti v bližini tal precejšnja nihanja temperature. Ker človek dela in živi v glavnem v tej plasti, je s stališča oblačenja poznavanje teh sprememb zelo pomembno. Pod določenimi pogoji lahko že padec temperature za nekaj stopinj povzroči resne probleme v zvezi z zaščito organizma pred podhladitvijo. Pa tudi zvišanje temperature samo za nekaj stopinj lahko povzroči neprijetno potenje in zmanjšanje delovne sposobnosti.

Spremembo temperature zraka v odvisnosti od višine, slika 2.6, lahko definiramo kot spremembo temperature na vsakih 100 m višine (°C/100 m). Dva centimetra nad tlemi je na primer temperatura zraka ob 12 h 30 °C, na višini 27 cm pa le 28 °C. Če to razliko preračunamo na 100 m višine, bomo dobili padec temperature za 800 °C. Seveda to ne drži, saj so spremembe temperature velike le pri tleh in se v višjih plasteh temperatura v povprečju spreminja le za 0,6 °C na vsakih 100 m višine. Kljub velikim nihanjem temperature v bližini tal se smatra, da je takšno stanje še zmeraj stabilno [9].

Ob vodi, posebno ob velikih vodnih gmotah (morje, jezera), so dnevna in letna nihanja temperature zraka manjša kot v področjih, ki so daleč od vodnih gmot. Po drugi



Slika 2.5: Sprememba temperature zraka v odvisnosti od višine (od 0,1 m do 6,4 m) in ure dneva.



Slika 2.6: Sprememba temperature zraka v odvisnosti od višine. [6]

strani pa je v zraku nad vodo in ob njej večja količina vlage. Vlaga v zraku pa negativno vpliva na termoizolacijsko vrednost oblačila (jo zmanjšuje). Poleg tega pa povečana količina vlage v zraku zmanjšuje hitrost izhlapevanja znoja, kar lahko povzroči neprijetno počutje, če so izpolnjeni pogoji za povečano izločanje znoja.

2.1.2 Vlažnost zraka

Vlažnost zraka ima določeno vlogo pri konstrukciji oblačil in opreme, ki jo uporabljamo za bivanje na prostem (šotori, spalne vreče, pregrinjala in podobno). Gostoto vodne pare ali absolutno vlago v zraku merimo v g/m^3; lahko jo izrazimo kot relativno vlažnost zraka v %. Tlak vodne pare, izražen v mb, se razlikuje od absolutne vlage v zraku. Tlak se spreminja s temperaturo. V praksi se največkrat srečamo s temperaturo zraka med 0 °C in 20 °C. Faktor konverzije tlaka v absolutno vlažnost je pri 0 °C 1,06 g/m^3.kPa in pri 20 °C 0,99 g/m^3.kPa. Zaradi tega lahko v tem območju temperatur uporabljamo absolutno količino vodne pare v zraku namesto njenega parcialnega tlaka. Faktor konverzije je 1 g/m^3.kPa.

Relativna vlaga ima pomembno vlogo pri predelavi vlaken in preje v tekstilne izdelke. Poleg tega vpliva na spremembo nekaterih parametrov kakovosti oblačila. S povečanjem relativne vlage se poveča vrednost koeficienta toplotne prevodnosti oblačila in se zmanjšuje hitrost pretoka vodne pare (izhlapelega znoja) s površine kože skozi oblačilo v okolje. Glede na temperaturo obstaja zgornja meja parnega tlaka, ki se imenuje nasičen parni tlak E. Ta je pri čisti vodi le funkcija temperature; iz termodinamike izhaja enačba (2.14).

$$E = a\ 10^{b\left(1-\frac{T_0}{T}\right)} \tag{2.14}$$

kjer so: a =6,1 hPa; b =8,61 (za vodo) in T_0 =273,16 K.

Tik nad vodno (ali ledno) površino vlada pri mirujočem zraku vedno nasičen parni tlak, ker je le tako njena površina obstojna in uravnotežena z okolico. Če je parni tlak manjši od nasičenega, se poveča hitrost izhlapevanja vode, če pa je večji, se poveča hitrost kondenzacije. Kot je razvidno iz enačbe (2.14) je to odvisno od temperature. S spremembo temperature se spreminja vrednost nasičenega tlaka E. Če so temperaturne spremembe počasne, praktično ni odstopanj od nasičenega parnega tlaka pri določeni temperaturi. Če pa so temperaturne spremembe hitre, izhlapevanje ali kondenzacija ne moreta slediti hitrosti spremembe temperature in se to na zunaj pokaže kot odstopanje od nasičenega tlaka toliko časa, dokler se zopet ne vzpostavi ravnotežje, oziroma nasičeni parni tlak.

Delni (parcialni) parni tlak ali tlak vodne pare v atmosferi lahko izrazimo s plinsko enačbo stanja za vodno paro (2.15).

$$e = \rho_v R_v T \tag{2.15}$$

kjer sta: ρ_v gostota vodne pare in R_v =461 m^2/s.K.

Absolutna vlaga v zraku ni nič drugega kot gostota vodne pare ρ_v in jo lahko izračunamo iz enačbe (2.15). Kot smo že omenili, je za nas predvsem važna relativna vlaga f. Ta je določena z razmerjem med dejanskim in nasičenim parnim tlakom. Izražamo jo v odstotkih, enačba (2.16).

$$f = 100\frac{e}{E} \tag{2.16}$$

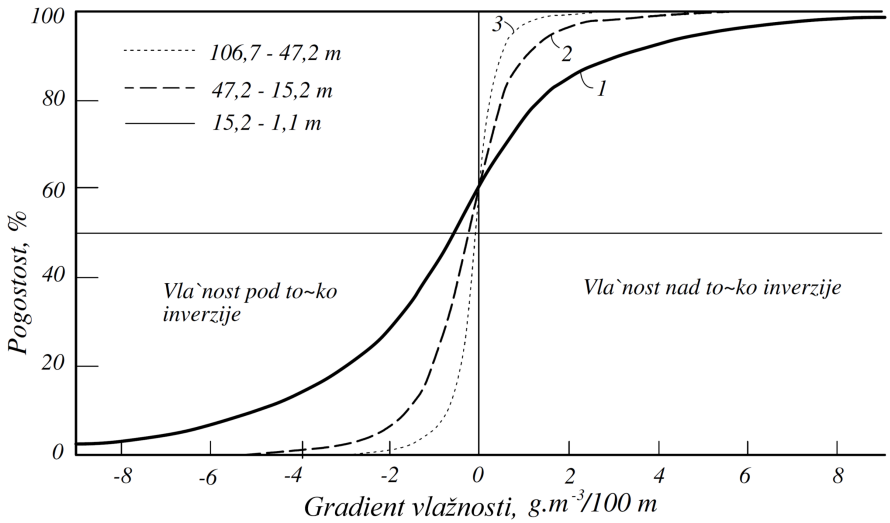
Zanimiva je še temperatura rosišča. To je tista temperatura zraka, pri kateri je delni (parcialni) parni tlak enak nasičenemu. Ta temperatura je torej predvsem odvisna od

količine vlage v zraku, zato je rosišče tudi neka mera za vlažnost zraka. Če je količina vodne pare v zraku izražena s parcialnim parnim tlakom v hPa, lahko zapišemo

$$T_d = \frac{a(\log e - b)}{1 - c(\log e - b)} \tag{2.17}$$

kjer so: $a = 31{,}6$ °C, $b = 0{,}785$ in $c = 0{,}116$. V praksi poiščemo temperaturo rosišča v preglednicah, termodinamičnih diagramih in monogramih.

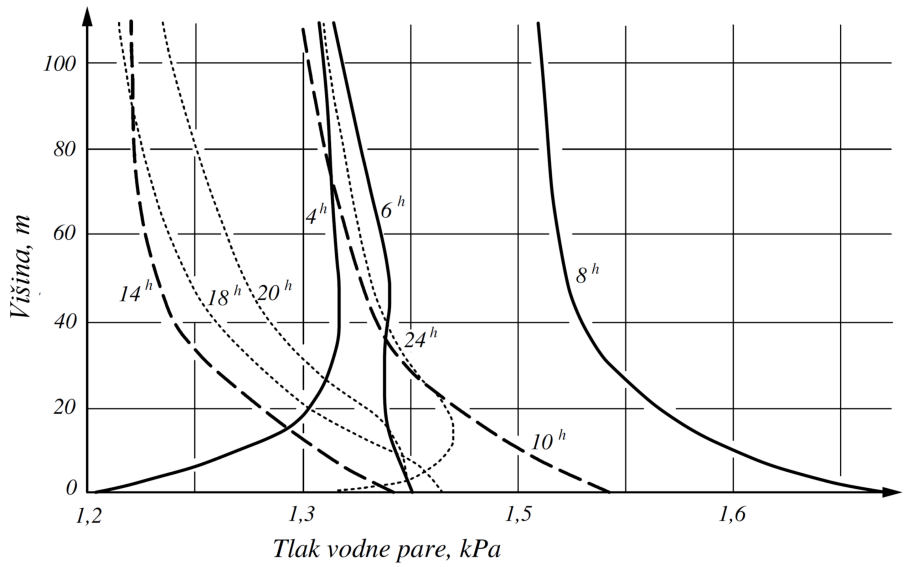
V večini primerov se vodna para prenaša od tal navzgor. To velja seveda za jasne dneve. Obstaja pa tudi inverzija. To pomeni, da je tok vodne pare usmerjen navpično proti površini tal. Običajno je tlak večji pri tleh kot v višjih zračnih plasteh. Gradient vodne pare na 100 m višine (g/m^3.100 m) je v tem primeru negativen. Če pa imamo nasprotni primer (inverzija), bo gradient pozitiven. Gradient postane pozitiven navadno proti jutru. Zaradi tega nastaja na travi rosa. Rosa nastane včasih tudi takrat, ko je gradient negativen. To izjemo lahko pojasnimo le s splošnim pojavom v tleh in sicer, da vodna para prodira iz globine tal na površino, kjer se kondenzira. Na sliki 2.7 je v % prikazana pogostost različnih vrednosti gradienta vodne pare v odvisnosti od višine [10]. Sprememba gradienta vodne pare, računane na 100 m višine, na višini med 47 m in 107 m, je med -2 g/m^3.100 m in +2 g/m^3.100 m. Toda na višini med 1 m in 15 m pa so vrednosti med -41 g/m^3.100 m in +22 g/m^3.100 m, kar ni popolnoma zajeto na sliki 2.7. Normalno stanje (negativni gradient) se javlja v 60 % primerov. Ekstremne vrednosti pa imajo zelo majhen delež – redko nastopajo. Tako je bila na primer pogostost nastopanja vrednosti gradienta gostote vodne pare, med -4 g/m^3.100 m in -5 g/m^3.100 m v višinskem intervalu med 15 m in 47 m, manjša od 1 %.



Slika 2.7: Porazdelitev gradienta vlažnosti v treh slojih zraka do višine 107 m. [11]

Sprememba tlaka vodne pare v odvisnosti od višine zračne plasti in ure poletnega dneva je prikazana na sliki 2.8. Ob 4 h zjutraj je tlak vodne pare na površini tal 2 hPa in se postopoma dvigne nekaj nad 13 hPa na višini 40 m. V večjih višinah do 100 m nimamo praktično nobene spremembe tlaka vodne pare. To je inverzna situacija in vodna para se giblje navpično proti tlom (pozitivni gradient vodne pare). To so pogoji za nastajanje rose na travnatih tleh. Ob 8 h pa že imamo normalno stanje. Pri tleh je tlak vodne pare večji od 16,7 hPa, na 100 m višine pa je le nekaj večji od 14,7 hPa. V tem primeru se vodna para giblje navpično (mirno vreme) od tal navzgor.

Delni ali parcialni tlak vodne pare v atmosferi je povprečno le 1 % celotnega tlaka, ki znaša okrog 1000 kPa; to pomeni, da je parcialni tlak vodne pare le okrog 10 kPa. Pomemben je zato, ker se v sklopu faznih sprememb vode v atmosferi močno spreminja.



Slika 2.8: Sprememba tlaka vodne pare v odvisnosti od višine zračne plasti in ure poletnega dne. [12]

2.1.3 Padavine

Za padavine lahko rečemo, da so ena od karakteristik okolja, ki jih moramo upoštevati pri projektiranju tekstilij, namenjenih za oblačila, kot tudi za tehnične izdelke, kot so šotori, cerade in druga pregrinjala, ki so namenjeni predvsem za zaščito pred dežjem. Za nas so zanimive predvsem padavine v obliki dežja ali snega. Pogosto moramo upoštevati tudi roso, ki nastane predvsem na travnatih površinah, ko so ponoči dosežene razmere za kondenzacijo vodne pare. Včasih igra določeno vlogo tudi slana.

2.1.3.1 Sneg

Sneg je lahko suh ali moker. Suh sneg pada takrat, ko je temperatura zraka vsaj nekaj stopinj pod ničlo (manj kot 0 °C). Podobno je tudi, ko veter dviga sneg s snežnih površin. Moker sneg pada takrat, ko je temperatura zraka 0 °C ali nekoliko višja od te vrednosti. Ko pada moker sneg, je temperatura v plasti mirnega zraka na površini oblačila višja od 0 °C. Moker sneg se lepi na površino oblačila in topi, zaradi česar se oblačilo navlaži.

Praktične posledice takega navlaženja oblačila vidimo iz dejstva, da imajo volnene tkanine in pletenine toplotno prevodnost λ je od 0,17 do 0,21 kJ/m.h.K, kar je odvisno od strukture in gostote tkanine ali pletenine. Voda v porah tkanine [6] pa ima toplotno prevodnost 2,1 kJ/m.h.K. Če ta voda zmrzne zaradi zunanjih nizkih temperatur, se prevodnost poveča za štirikrat, in sicer na 8,4 kJ/m.h.K. Toplotna prevodnost zraka pa znaša le 0,105 kJ/m.h.K oziroma je 80 krat manjša od toplotne prevodnosti ledu.

V tekstilijah imamo s stališča toplotne prevodnosti tri komponente: vlakno, zrak in vodo. Če primerjamo s toplotno prevodnostjo zraka, ima volna 7,3, bombaž 17,5, viskoza 11,0 in sintetične folije 6,3 do 13,8-krat višjo vrednost slednje [12]. Iz vseh teh podatkov vidimo, da se bo s povečanjem deleža vode v oblačilu povečevala vrednost

toplotne prevodnosti. Zaradi tega je priporočena obdelava zgornjih delov oblačila z vodo odbojno impregnacijo.

2.1.3.2 Dež

Dež lahko pada z različno intenziteto. Zaradi tega bo tudi kinetična energija kapelj, ki dosežejo površino oblačila, različna. Od kinetične energije pa je odvisen hidrodinamični udarec kapelj dežja na površino oblačila. To dejstvo moramo nujno upoštevati pri konstrukciji tkanin, ki jih namenjamo za zgornje dele oblačil. Pri tem je pomemben predvsem premer por v tkanini. Nekaj najpomembnejših parametrov kapelj dežja različne intenzitete je podanih v preglednici 2.3.

Preglednica 2.3: Vrednost nekaterih parametrov kapelj dežja različne intenzitete. [13]

Vrsta dežja	Polmer kapelj [mm]	Hitrost kapelj pri tleh [m/s]	Kinetična energija kapelj [μJ]
Neurje	1,5	7	360
Nevihta	1,05	6	87
Močan dež	0,75	5	22
Srednje močan dež	0,5	4	4,2
Lahek dež	0,255	2	0,92
Pršenje	0,1	0,75	0,012

2.1.3.3 Druge padavine

Pomembna je predvsem rosa, ki se nabira na travi ali grmičevju. Če hodimo po takšnem terenu, se nam omoči obutev, pa tudi spodnji del hlač. Tudi spanje na takšnem terenu ni priporočljivo. V megli se lahko zgodi, da se nam v obleki poveča količina vlage. Če je obleka vlažna ali celo mokra, se poveča njena toplotna prevodnost.

2.1.3.4 Veter

Veter definiramo z dvema osnovnima parametroma: hitrostjo in smerjo, ki se pogosto spreminjata. V posameznih območjih pihajo vetrovi v približno isti smeri: fen, burja, jugo, maestral ipd. Pri nas pihajo vetrovi redko z večjo hitrostjo kot 90 km/h (22,2 m/s). Veter lahko zavira gibanje, kar pomeni, da za gibanje porabimo več energije kot sicer v mirnem ozračju. Poleg tega prodira skozi oblačilo in pri tem odnaša s seboj določeno količino toplote. V hladnem ozračju povzroča veter povečanje količine toplote, ki gre skozi oblačilo v okolje in v določenih okoliščinah pospešuje ohladitev organizma uporabnika.

Veter lahko tudi blagodejno vpliva na počutje. Če je relativno toplo in je zrak zasičen z vodno paro, povečuje hitrost izhlapevanja znoja in s tem hlajenje organizma. Za izhlapevanje enega grama vode potrebujemo okrog 2,52 kJ (pri 20 °C). Veter vpliva blagodejno tudi, če je temperatura okoliškega zraka višja od temperature površine kože (33 °C do 34 °C). V tem primeru veter zelo pospešuje izhlapevanje znoja in obenem preprečuje nabiranje večjih količin ogljikovega dioksida neposredno na površini kože. To je pomembno za hitrosti vetra do približno 60 km/h (16,7 m/s). Če je hitrost vetra večja od 60 km/h, je v takšnem okolju, na prostem, otežkočeno delo in gibanje.

Zrak prehaja skozi oblačilo zaradi tega, ker se pod vplivom hitrosti vetra ustvarja razlika tlakov. Na površini oblačila je tlak večji kot v neposredni bližini površine kože.

V takih pogojih teče zrak skozi oblačilo. Med hitrostjo zraka (vetra) in tlakom, ki ga ta hitrost ustvarja na površini, ki je postavljena pravokotno na smer hitrosti vetra, obstaja zakonitost, enačba (2.18) [14].

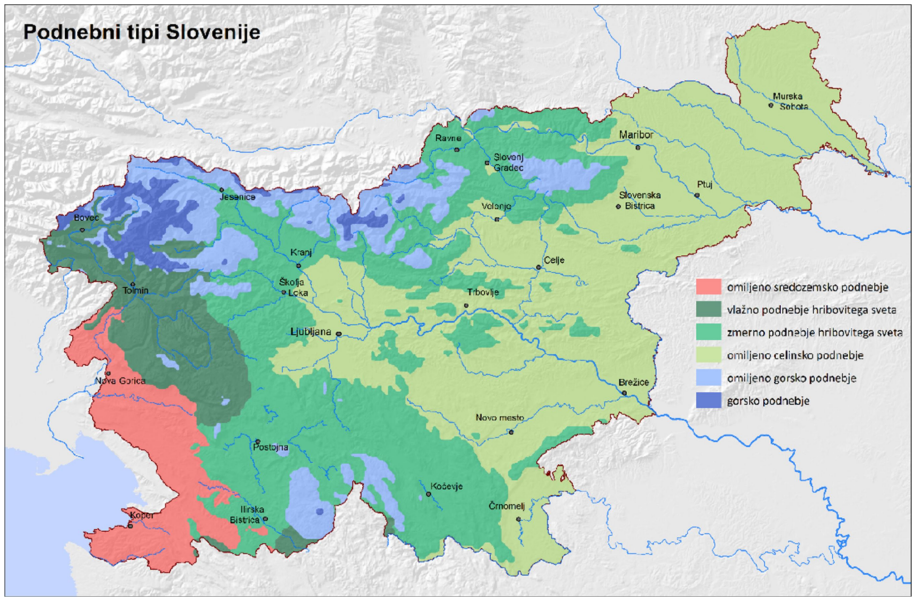
$$v = 1,33\sqrt{h} \tag{2.18}$$

kjer so: v hitrost vetra, izražena v m/s; h tlak, izražen v Pa; 1,33 in 0,5 sta empirični konstanti ustreznih dimenzij.

2.2 Podnebje v Sloveniji

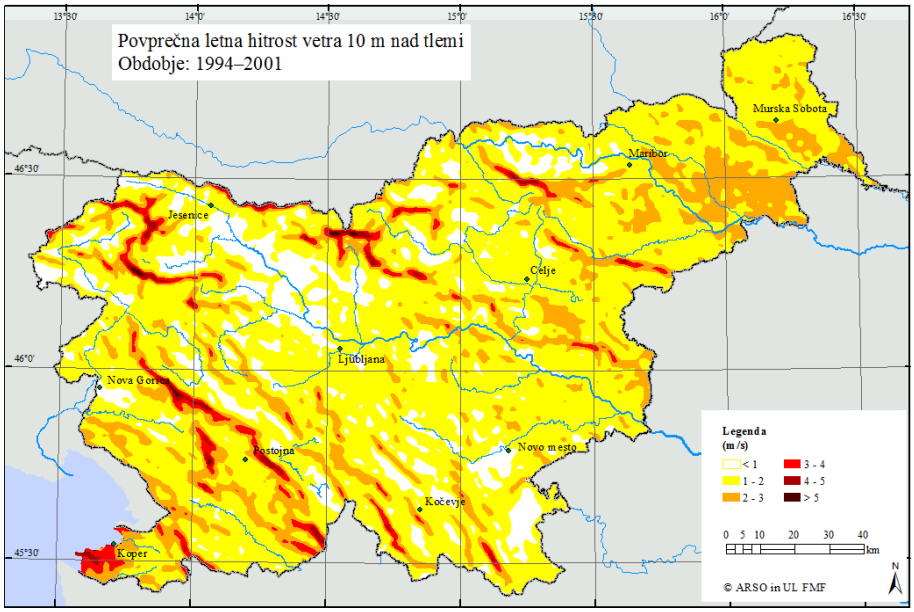
2.2.1 Splošno

Podnebje v Sloveniji [15, 16], slika 2.9, lahko členimo v tri podnebne tipe, in sicer zmerno celinsko, primorsko in gorsko. Za zmerno celinsko podnebje je značilno, da so povprečne temperature najhladnejšega meseca nižje od 0 °C. Na vzhodnem delu tega podnebja se pojavlja že poletni presežek padavin, ki je značilen za podnebje celinske Evrope. Zime so hladne in poletja dokaj vroča. Naše primorsko podnebje se od pravega mediteranskega razlikuje po tem, da je količina padavin večja in temperature nižje. Zanj pa so značilne mile zime in največ sončnih dni v državi. Vplivi morja blažijo tako zimski mraz kot tudi poletno vročino. Gorsko podnebje je najbolj ostro podnebje v državi. Temperature so čez vse leto nižje kot drugod. Istočasno so to območja z največ padavinami, ki v hladni polovici leta padejo praviloma v obliki snega.



Slika 2.9: Podnebni tipi v Sloveniji. [16]

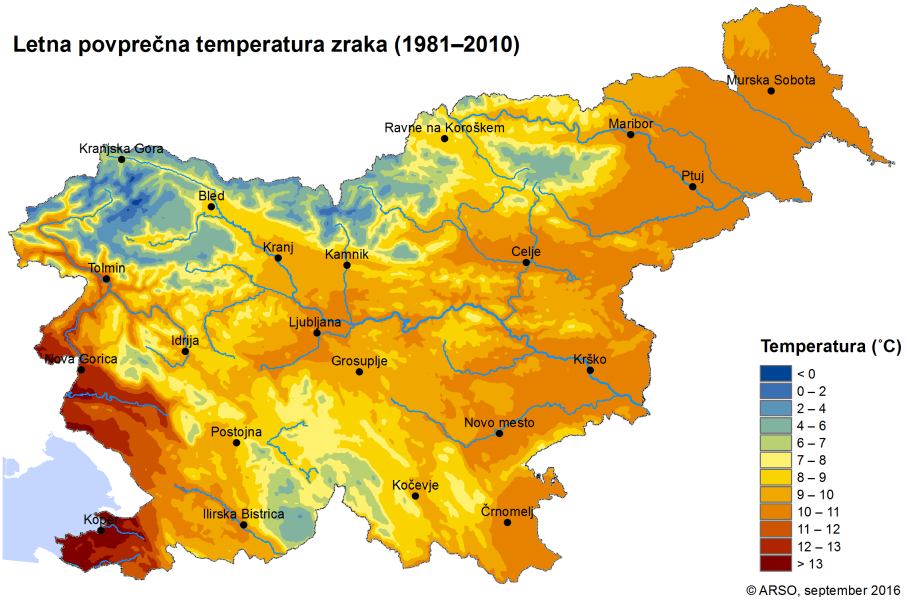
Slovenija v primerjavi z zahodno Evropo ni zelo vetrovna, slika 2.10, saj jo Alpe ščitijo pred prevladujočimi vetrovi nad Evropo. Nad Evropo v zmernih širinah in tudi nad Slovenijo v splošnem prevladujejo zahodni vetrovi, ki se zaradi valovanja zračnega toka, odklanjajo proti severu in jugu. Na vetrovne razmere vplivajo tudi območja visokega in nizkega zračnega tlaka, površinska razgibanost in poraščenost ozemlja. Za lokalne razmere pa so pomembne še porazdelitve vodnih površin in dnevno ogrevanje in ohlajanje ozračja.



Slika 2.10: Povprečna letna hitrost vetra na 10 m višine za obdobje 1994-2001. [17]

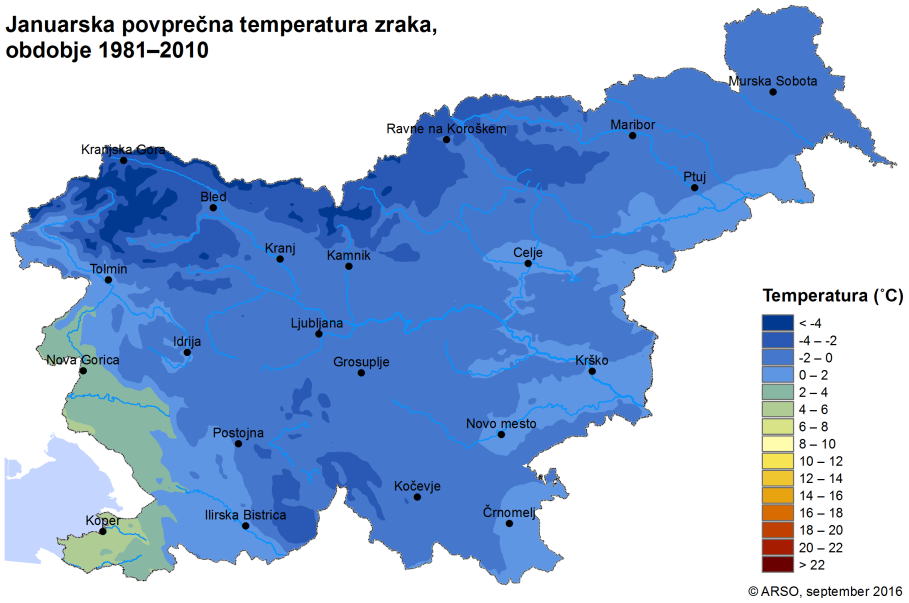
2.2.2 Temperaturna območja

Temperatura zraka v Sloveniji ima značilen dnevni in letni hod, slike 2.11, 2.12 in 2.13. Maksimalne dnevne vrednosti temperatura doseže zgodaj popoldne, običajno med 14. in 15. uro, najnižje vrednosti pa tik pred sončnim vzhodom. Najpogosteje je najtoplejši mesec v letu julij, najnižje temperature pa običajno zabeležimo v januarju z izjemo visokogorja, kjer je temperaturni minimum dosežen v mesecu februarju. Temperatura zraka v splošnem z nadmorsko višino pada, v povprečju se povprečna letna temperatura zraka na vsakih 1000 m zniža za 5,3 °C. [18]

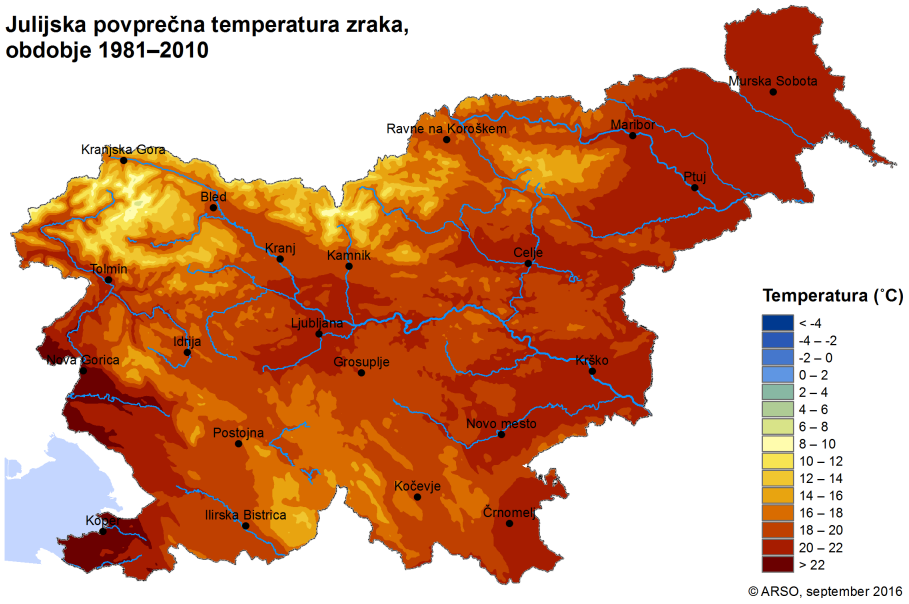


Slika 2.11: Letna povprečna temperatura zraka v obdobju 1981-2010 [17]

Poleg nadmorske višine, slika 2.14, na temperaturo vplivajo še relief oziroma mikrolokacija postaje, vpliv večjih vodnih površin in vpliv poseljenosti. Vpliv mikrolokacije

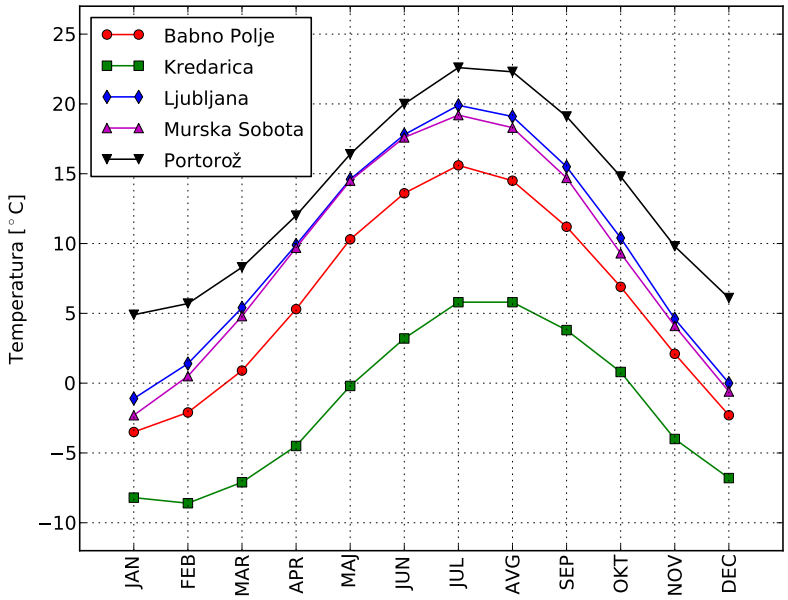


Slika 2.12: Januarska povprečna temperatura zraka v obdobju 1981-2010 [17]



Slika 2.13: Julijska povprečna temperatura zraka v obdobju 1981-2010 [17]

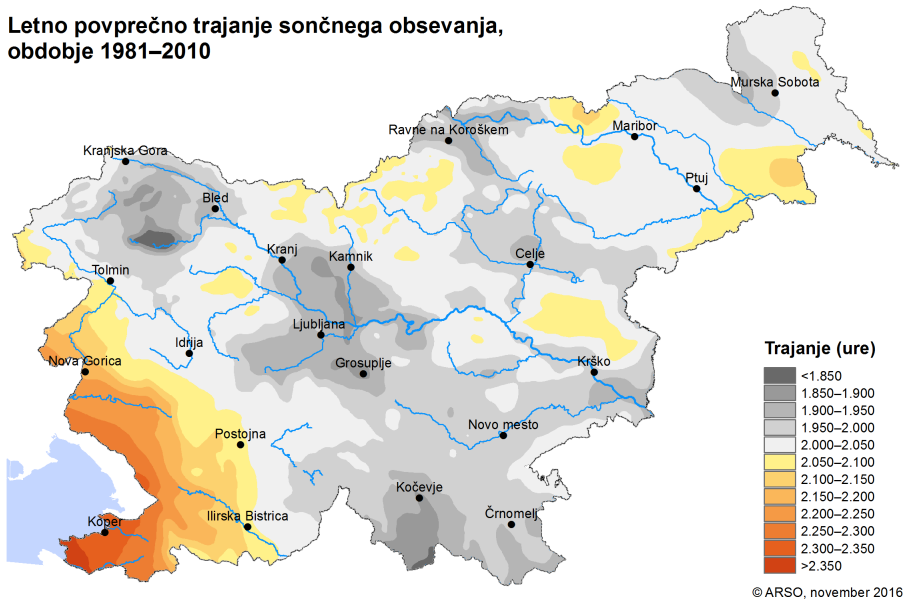
je najbolj izrazit pri minimalni, posredno pa tudi pri povprečni temperaturi zraka. Ob jasnih in mirnih nočeh je v kotlinah in dolinah pogost pojav nastanka tako imenovanih jezer hladnega zraka. Pojav temperaturne inverzije je zlasti opazen pozimi, neredko se zgodi tudi, da jezera hladnega zraka v kotlini vztrajajo tudi več dni in tako vplivajo tudi na povprečno in maksimalno temperaturo zraka. V topli polovici leta je vpliv kotlinske lege manj izrazit. Vpliv večjih vodnih površin na temperaturo zraka v Sloveniji je omejen predvsem na vpliv morja. Vpliv morja zajema celo Primorsko ter sega po dolini reke Soče vse do Trente. Jeseni in pozimi so zato tam temperature višje, kot v krajih s podobno lego v notranjosti Slovenije. Spomladi pa vpliv morja nekoliko zavira segrevanje, kar je še posebej opazno pri najvišjih dnevnih temperaturah. Na temperaturo zraka vpliva tudi gostota poseljenosti. V povprečju je temperatura zraka v mestih zaradi večje gostote izvorov toplote (kurišča, promet, industrija in podobno) in drugačnih fizikalnih lastnosti asfaltnih in betonskih površin (manjši albedo, večja toplotna kapaciteta) nekoliko višja kot v okolici. Večje ko je mesto, bolj očiten je ta vpliv. [18]



Slika 2.14: Povprečna temperature izmerjene na petih meteoroloških postajah v posameznem mesecu [19]

Temperature ozračja so odvisne tudi od sončnega obsevanja. Povprečno sončno obsevanje na kvadratni meter horizontalne površine je v Sloveniji večje od 1.000 kWh/m^2, slika 2.15. Desetletno merjeno povprečje (1993-2003) letnega globalnega obsevanja je med 1.053 kWh/m^2 in 1.389 kWh/m^2, pri čemer približno polovica Slovenije prejme med 1.153 kWh/m^2 in 1.261 kWh/m^2. Povprečno obsevanje poljubne nesenčene lokacije v Sloveniji ne odstopa veliko od državnega povprečja, kljub temu pa lahko Slovenijo razdelimo na posamezna področja. V osrednji Sloveniji znaša povprečno sončno obsevanje na horizontalno površino okoli 1.195 kWh/m^2, v severovzhodni Sloveniji in severni Dolenjski okoli 1.236 kWh/m^2, na Primorskem in Goriškem pa presega vrednost 1.300 kWh/m^2. Večje vrednosti obsevanja (preko 1.250 kWh/m^2) lahko opazimo tudi v Posavskih hribih in na Kozjanskem.

Meteorološki podatki s Kredarice, kjer so praviloma izmerjene najnižje povprečne temperature, so pomembne predvsem ali le za gornike, ki v enem letu obiščejo Kreda-



Slika 2.15: Letno povprečno trajanje sončnega obsevanja v obdobju 1981-2010 [17]

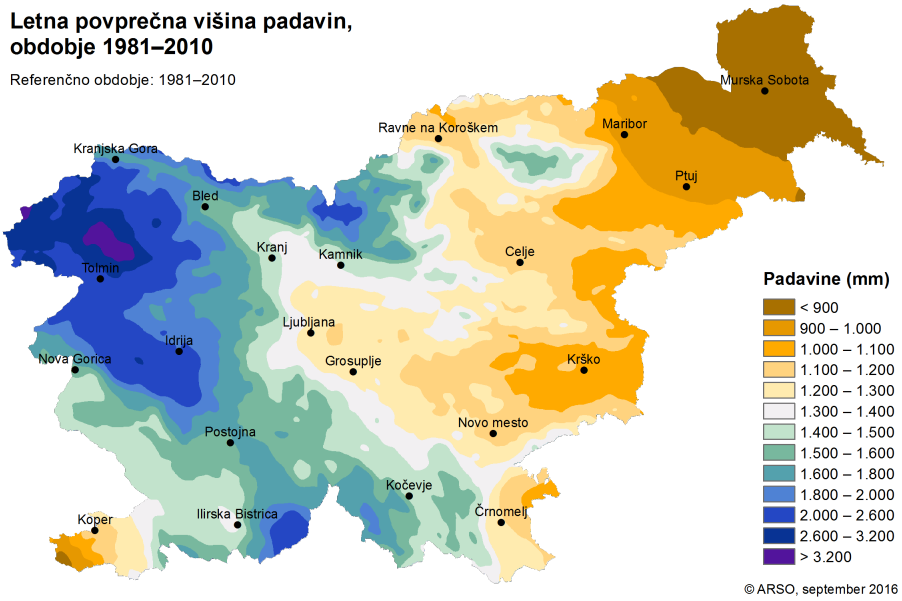
rico in Triglav. Le-teh pa je v primerjavi s splošno populacijo, relativno malo. Oblačilo, ki je primerno za visokogorje, se izdeluje v relativno majhnih količinah, tako da ga prištevamo k unikatni oziroma maloserijski proizvodnji.

Skupaj s temperaturo moramo opazovati tudi vpliv hitrosti vetra in količino proizvedene toplote uporabnika oblačila v enoti časa. Poleti ima večja hitrost vetra lahko pozitivna učinek. Telo lahko proizvede preveč toplote oziroma je v danih razmerah termoizolacija oblačila prevelika. Pozimi pa je ravno obratno.

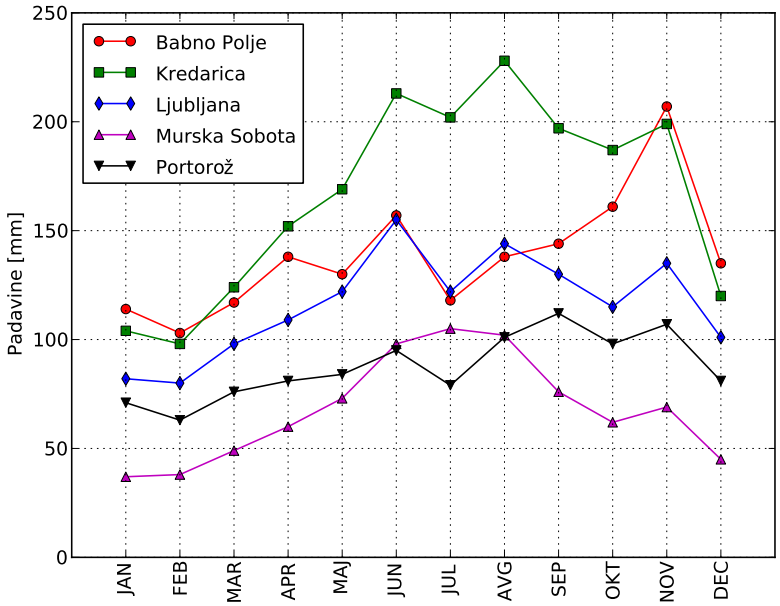
2.2.3 Količina padavin

Porazdelitev padavin na območju Slovenije, slika 2.16, je lokalno pogojena z gorsko pregrado gorske verige nad Bohinjem, ki se razteza od Črne Prsti do Krna in naprej do Kanina, kot tudi z Dinarskim gorstvom. Na teh pregradah se srečata mediteransko in kontinentalno oziroma alpsko visokogorsko podnebje. Po drugi strani pa je vzorec padavin pogojen z globalnim vremenskim vzorcem Evrope. Ljudsko reklo pravi, da "vreme k nam prihaja od zahoda," in tako so v Sloveniji porazdeljene tudi padavine. Največ jih je na zahodu in najmanjša vzhodu države, izjema je le obalna regija,slika , slika 2.17.

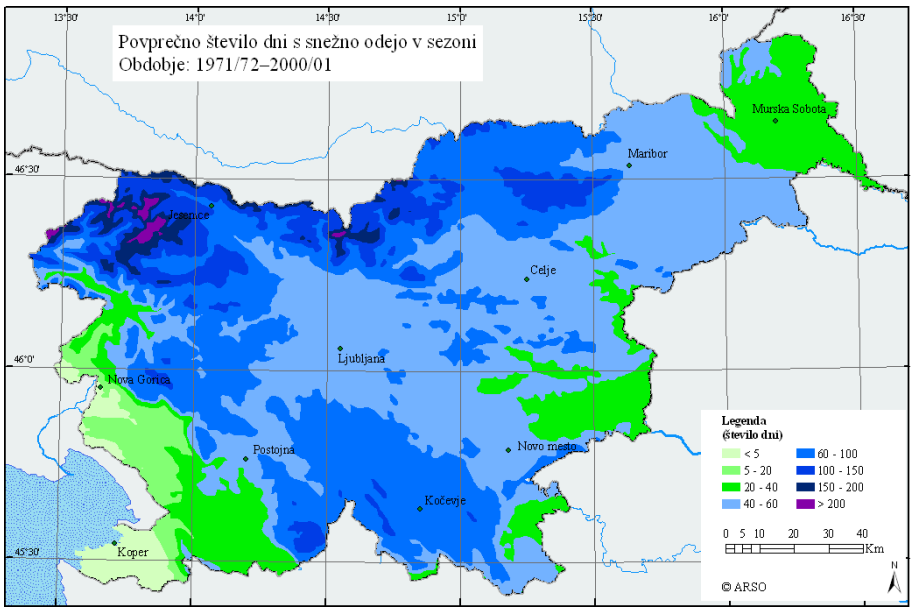
Porazdelitev povprečnega števila dni s snežno odejo na leto, slika 2.18, in povprečnega števila ledenih dni sledi vzorcu temperaturne porazdelitve, slika 2.19, veliko bolj kot vzorcu količine padavin. Saj so omenjeni vzorci predvsem odvisni od reliefa tal.



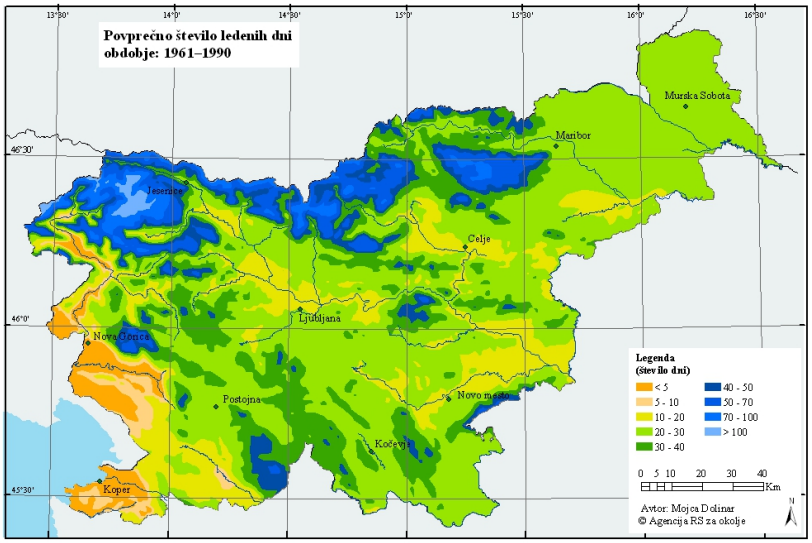
Slika 2.16: Letno povprečna višina padavin v obdobju 1981-2010 [17]



Slika 2.17: Povprečna količina padavin izmerjene na petih meteoroloških postajah v posameznem mesecu [19]



Slika 2.18: Letno povprečna število dni s snežno odejo v sezoni v obdobju 1971/72-2000/01 [17]



Slika 2.19: Letno povprečna število ledenih dni v obdobju 1961-1990 [17]

2.2.4 Vremenski ekstremi

Vremenski ekstremi definirajo skrajni interval parametrov, ki so pomembni za konstrukcijo oblačil. V preglednici 2.4 so zbrani ekstremi temperaturni ekstremi v Sloveniji, v preglednici 2.5 ekstremi dežja in v preglednici 2.6 ekstremi snega. V preglednici 2.4 lahko vidimo, da je ekstremni razpon temperatur na območju Slovenije večji od 70 °C. Podatki v tej preglednici nas tudi opozarjajo, da je lahko v visokogorju tudi do 9 mesecev v letu zelo hladno.

Preglednica 2.4: Temperaturni ekstremi – temperatura v °C, 2 m nad tlemi. [20]

Vrsta ekstrema	Vred.	Postaja	Čas
Najvišja temperatura	40,6	Črnomelj	5.7.1950
Najnižja temperatura	-34,5	Babno Polje	15.2.1956, 16.2.1956, 13.1.1968
Najvišja povp. mesečna temp.	26,1	Letališče Portorož	avg. 2003
Najnižja povp. mesečna temp.	–17,2	Kredarica	feb. 1956
Najvišja večletna povp. temp.	14,0	Koper	1971–2000
Najnižja večletna povp. temp.	–1,3	Kredarica	1971–2000
Najvišja povp. letna temp.	14,6	Koper	1961
Najnižja povp. letna temp.	–2,6	Kredarica	1956, 1962
Najvecje letno število vročih dni (najvišja dnevna temp. $\geq 30°C$)	79	Slap (Vipava), Bilje	2003
Največje letno število hladni dni (najnižja dnevna temp. $< 0°C$)	281	Kredarica	1972

Vir: [20]

2.2.5 Projekcije podnebja za Slovenijo

V gradivu *Podnebne spremembe v Sloveniji* [21] so prikazane pričakovane spremembe v obdobju 2021 -2050. Pričakovani temperaturni dvig za Slovenijo naj bi bil v obdobju 2021–2050 v primerjavi z obdobjem 1961–1990 poleti in pozimi od 1 °C do 2,5 °C, jeseni od 1 °C do 2 °C in pomladi od 0,5 °C do 1,5 °C. Predvidena sprememba padavin je precej bolj nezanesljiva, pričakovati pa je zmanjšanje padavin v topli polovici leta in povečanje v hladni polovici leta. Dvig temperature in (verjetno) zmanjšanje padavin poleti bo imelo za posledico pogostejša in izrazitejša sušna obdobja. Možna pa je tudi okrepitev temperaturnih ekstremov zaradi sprememb v vlažnosti tal (vročinski valovi!). V viru *Značilnosti podnebja v Sloveniji* [15] najdemo opise vplivov podnebnih sprememb glede na letne čase. Ugotovitve obeh del so skladne.

Ekstremni vremenski dogodki v podnebju prihodnosti bodo daljši in bolj intenzivni (poletni) vročinski valovi, kot tudi večja spremenljivost temperature in padavin poleti. Pričakovati je tudi okrepitev hidrološkega cikla oziroma kroženja vode, in sicer več močnih padavinskih dogodkov (na splošno več vodne pare v ozračju), kot tudi večje izhlapevanje. Pogostejše bodo zdajšnje 100-letne poplave, znatno pa se bo povečala pogostost poletne suše. Verjetno pa se bo povečalo tudi število dni z ugodnimi razmerami za nastanek poletnih neurij.

Preglednica 2.5: Padavinski ekstremi – dež v mm. [20]

Vrsta ekstrema	Vred.	Postaja	Čas
Največje večletno povp. letne višine padavin	3016	Žaga pri Bovcu	1971–2000
Največja letna višina pad.	4605	Breginj	1960
Najmanjše večletno povp. letne višine padavin	743	Veliki Dolenci	1971–2000
Najmanjša letna višina pad.	477	Vučja Gomila	1971
Največja mes. višina pad.	1494	Soča	nov. 2000
Največja 2-dnevna višina padavin (2880-minutna)	584	Bovec	12.11.1969 7.00 14.11.1969 7.00
Največja dnevna višina padavin (1440-minutna)	363	Bovec	13.11.1969 7.00 14.11.1969 7.00
Največja 12-urna višina padavin (720-minutna)	286	Bovec	4.8.1987 13.00 5.8.1987 1.00
Največja 6-urna višina padavin (360-minutna)	275	Bovec	4.8.1987 15.40 4.8.1987 21.40
Največja 3-urna višina padavin (180-minutna)	191	Kekec nad N. Gorico	21.8.1988 8.45 21.8.1988 11.45
Največja 2-urna višina padavin (120-minutna)	157	Kneške Ravne	18.9.2007 13.35 18.9.2007 15.35
Največja urna višina padavin (60-minutna)	141	Kekec nad N. Gorico	21.8.1988 8.50 21.8.1988 9.50
Največja polurna višina padavin (30-minutna)	84	Kekec nad N. Gorico	21.8.1988 9.00 21.8.1988 9.30
Največja četrturna višina padavin (15-minutna)	57	Lisca	19.5.2009 22.40 19.5.2009 22.55
Največja 10-min. višina pad.	51	Lisca	19.5.2009 22.45 19.5.2009 22.55

Vir: [20]

Preglednica 2.6: Padavinski ekstremi – sneg v cm. [20]

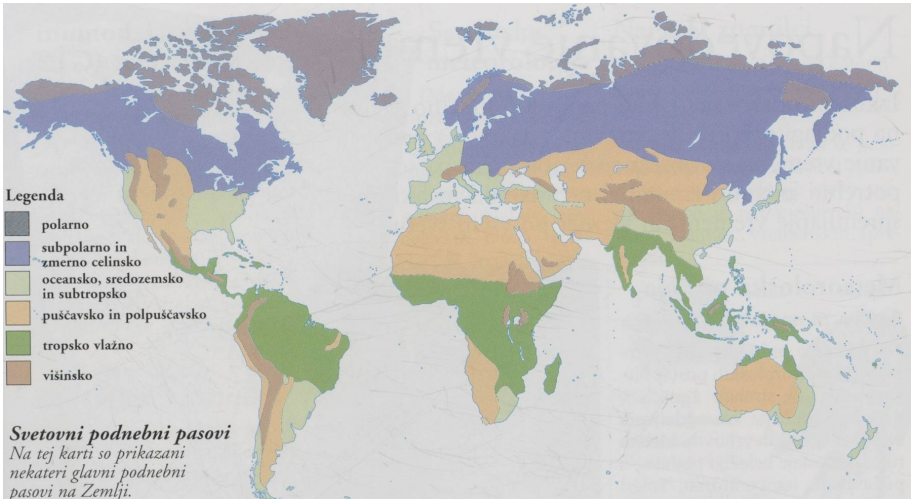
Vrsta ekstrema	Vred.	Postaja	Čas
Največja višina snežne odeje	700	Kredarica	22.4.2001
Največja višina novozapadlega snega	125	Dom na Komni	29.3.1951, 4.3.1970
Največja višina novozapadlega snega v krajih pod 500m n.v.	105	Soča	4.3.1970
Največja vsota višin novo-zapadlega snega v eni sezoni	1662	Kredarica	2000/2001
Povprečno najdaljše sezonsko trajanje snežne odeje (št. dni)	265	Kredarica	1972/1973, 2000/2001
Najdaljše sezonsko trajanje snežne odeje (št. dni)	290	Kredarica	1984/1985, 1976/1977

Vir: [20]

2.3 Splošno o podnebju na zemlji

V novejšem času se pospešeno razvija globalizacija trga. Naša država je članica Svetovne trgovske organizacije in to pomeni možnost trgovanja in proizvodnega sodelovanja s številnimi državami. Zaradi tega je dobro razpolagati z informacijami glede podnebja na interesantnih lokacijah v svetu, na katere bi lahko plasirali naše proizvode ali naše znanje.

Glede na vrsto dela in klimatske razmere, slika toplotnih pasov Zemlje 2.20, bi moral biti izvajalec del primerno oblečen. Primerno oblačilo pomeni tudi večjo produktivnost in zmanjšanje števila nezgod ali pa celo zmanjšanje obolenj na splošno. Če želimo konstruirati res primerno obleko za takšna podnebja, moramo poznati naravo dela in vsaj globalno tudi podnebne razmere. Za nas je lahko zanimiva predvsem Evropska unija, Rusija in druge države bivše Sovjetske zveze, Afrika, Bližnji ter Srednji vzhod. Bolj podrobno bomo pogledali podnebje Afrike, Srednjega in Bližnjega vzhoda. V teh predelih se podnebje spreminja od puščavskega do tropskega. Na kratko si bomo ogledali temperature in količine padavin.

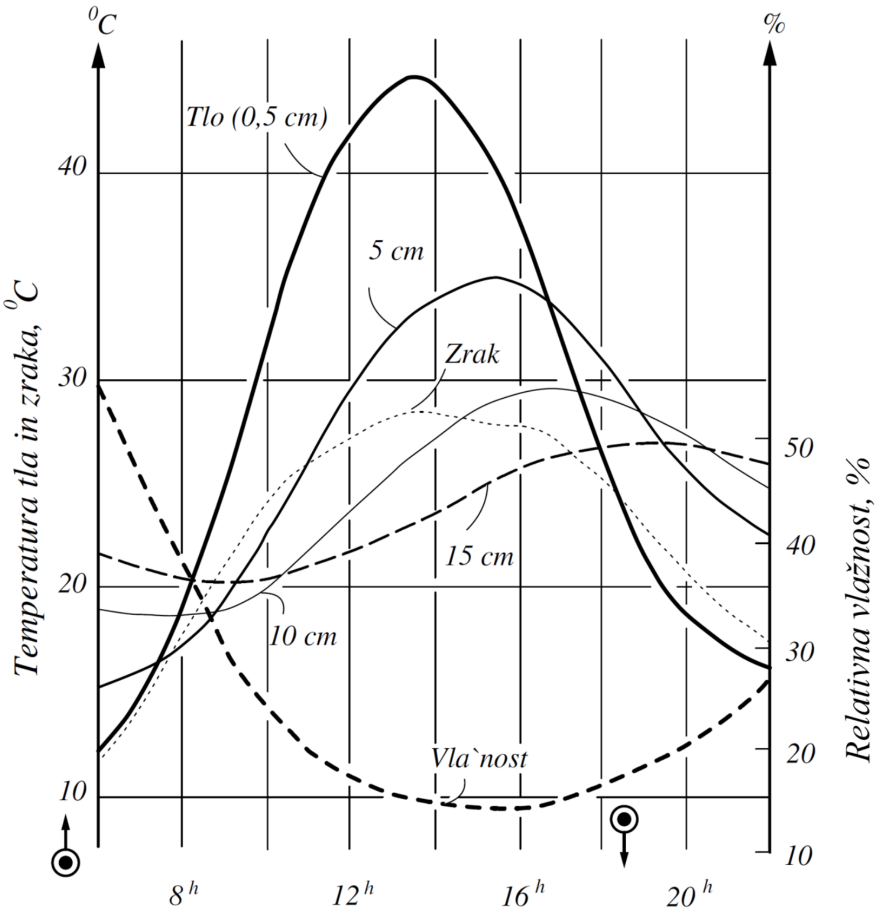


Slika 2.20: Svetovni toplotni pasovi [22]

2.3.1 Temperatura

Zemplja je razdeljena na nekaj toplotnh pasovPovprečne januarske temperature v severni Afriki ter na Srednjem in Bližnjem vzhodu (severno od severnega povratnika) so med 10 °C in 20 °C. Hkrati je v puščavi Kalahari in okolici temperatura nad 30 °C. Na preostalem delu afriške celine so januarske temperature med 20 °C in 30 °C. Povprečne junijske temperature na puščavskih območjih (Sahara, Arabska puščava, Velika Slana puščava) so višje od 35 °C. Na obrobjih puščav nihajo med 30 °C in 35 °C. V Južnoafriški republiki in Namibiji so junijske temperature med 15 °C in 20 °C. V Centralni Afriki, priobalnih območjih Indijskega in Atlantskega oceana ter Sredozemskega morja so povprečne junijske temperature med 20 °C in 30 °C, kar velja tudi za tisti del Bližnjega vzhoda, ki je v bližini Sredozemskega morja.

Povprečne dnevne temperature nam ne povedo dovolj. S stališča oblačenja so zelo pomembna dnevna nihanja temperatur zraka in površinske plasti tal, zlasti v puščavskih in pol puščavskih predelih, kar kaže slika 2.21.



Slika 2.21: Nihanja dnevnih temperatur tal in zraka ter relativne vlažnosti zraka v delu Sahare. [23]

Na sliki 2.21 so prikazane povprečne vrednosti meritev od 7. do 14. aprila 1955 v Vadiju Faregh, ki je na 24 stopinjah in 47 minutah severne širine ter 16 stopinjah in 53 minutah vzhodne dolžine na nadmorski višini 400 m (v jugovzhodni Libiji). Povprečna maksimalna temperatura v globini 5 mm je bila 45 °C. Maksimalna temperatura je dosegla celo 53,5 °C. Temperatura tal ob šesti uri je bila le okrog 11 °C, kar pomeni, da je bila povprečna razlika temperatur celih 34 °C. Če upoštevamo absolutno maksimalno dnevno temperaturo tal, je ta razlika okrog 42 °C. Temperatura zraka in relativna vlaga sta merjeni na višini 95 cm. Nihanje temperature zraka je bilo manjše od nihanja temperature tal in je znašalo povprečno okrog l8 °C. Maksimalna temperatura zraka nekoliko zaostaja za maksimalno temperaturo tal, ujema pa se z minimalno relativno vlažnostjo zraka, ki je okrog šestnajste ure znašala povprečno le približno 15 %. V takšnih podnebnih razmerah mora biti obleka vsekakor večplastna, da omogoča prilagoditev zelo velikim nihanjem dnevne temperature. Če upoštevamo dejstvo, da so to predeli brez vode in da je relativna vlažnost zraka zelo nizka, mora oblačilo preprečiti hitro izhlapevanje znoja. To pa dosežemo tako, da daje oblačilo čim večji upor pretoku vodne pare.

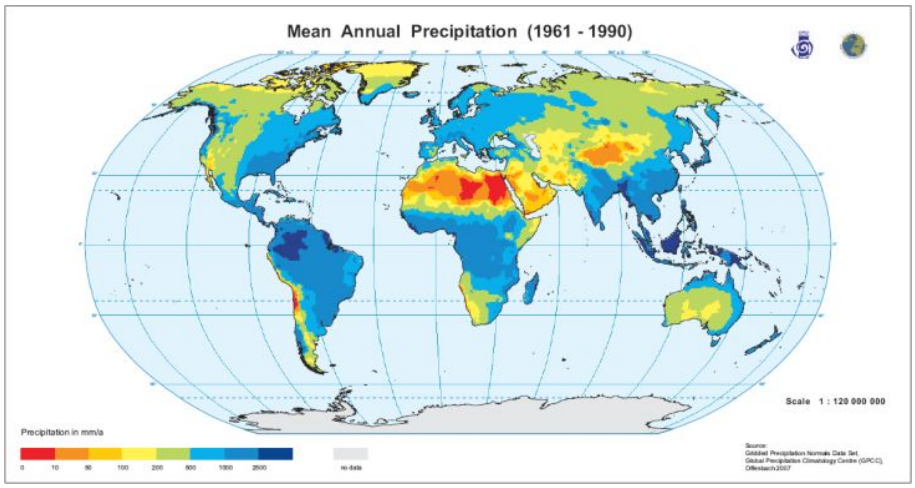
2.3.2 Padavine

V puščavskih predelih (Sahara, Arabija, Velika slana puščava, Kalahari) je zelo malo padavin – manj kot 250 mm letno. Predeli južno od Sahare in severni deli Bližnjega in

Srednjega vzhoda ter predeli na obrobju puščav v južni Afriki dobijo povprečno 250 mm do 500 mm padavin na leto. Del sredozemske obale Afrike in Bližnjega vzhoda ter predeli savane v severnem in južnem delu Afrike dobijo od 500 mm do 1.000 mm padavin letno. V centralni Afriki pade 1.000 mm do 2.000 mm (tropi). Ob delu Gvinejskega zaliva in na področju gore Ruwenzori pa je letna količina padavin večja od 2.000 mm.

Če istočasno opazujemo temperaturo in padavine, ki so večinoma v obliki dežja, vidimo, da ima ekvatorialna Afrika tropsko podnebje (visoke temperature in veliko vlage). Za to podnebje je zelo težko konstruirati adekvatno oblačilo.

Ne glede na podnebne razmere je oblačilo le ena od komponent, je pa zelo pomembna. Druga komponenta je prilagoditev organizma podnebnim razmeram v določeni deželi. Ker potrebujemo za prilagoditev nekaj časa, nam ustrezno oblačilo pomaga, da to dosežemo brez večje škode za zdravje.



Slika 2.22: Svetovna karta padavin. [24]

2.4 Seznam oznak poglavja

Oznaka	Enota	Opis
a	m^2/s	temperaturna prevodnost zo. termična difuzivnost
A	kg/m.s	turbulentna viskoznost oz. koeficient izmenjave
b		konstanta
c	$J/m^3.K$	specifična volumska toplota
c		konstanta
c_p	J/kg.K	specifična toplota pri konstantnem tlaku
D		količina karakteristike
e	Pa	parni tlak
E	Pa	nasičen parni tlak
f	m^2	površina
f	%	relativna vlaga
G	W/m^2	gostota toplotnega toka
h	Pa	tlak
I_0	W/m^2	gostota energijskega toka sevanja sončnih žarkov, ki padajo pravokotno na ploskev

Nadaljevanje na naslednji strani

Nadaljevanje s prejšnje strani

Oznaka	Enota	Opis
I	W/m^2	gostota energijskega toka sevanja sončnih žarkov
K	m^2/s	turbulentna difuzija
φ	$^\circ$	ostri kot med smerjo sončnih žarkov in normalo ravnine na katero padajo
λ	W/m.K	koeficient toplotne prevodnosti
m	kg	masa
Q	$P.m^2/s$	količina odvisna od karakteriastike
Q	J	toplota
ρ	kg/m^3	gostota
ρ_v	kg/m^3	gostota vodne pare
R_v	$m^2/s.K$	plinska konstanta
s		karakteriastika
t	s	čas
T	K	absoultna temperatura
T_0	K	absolutna temperatura pri 0°C = 273,16K
v	m/s	hitrost vetra
z	m	globina ali višina

2.5 Literatura

[1] I. Gale. Gshp site characterisation. Technical report, Carbon Trust research, development and demonstation projects, 2004.

[2] K. E. Rollin. Assessment of bgs data for ground source heat pump installations in the uk. Technical report, British Geological Survey, 2002.

[3] M. Brown. *Introduction to Heat Transfer*. McGraw-Hill, 1958.

[4] F. P. Incropera and D. P. DeWitt. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons, 1996.

[5] C. W. Thornthwaite and et al. Micrometeorology of the surface layer of the atmosphere. interim reports 4-12. Technical report, The Johns Hopkins Univ., Laboratory of Climatology, Seabrook, New Jersey, 30 Sept. 1948–30 Dec. 1950.

[6] C. W. Thornthwaite and et al. Micrometeorology of the surface layer of the atmosphere: Interim reports 1-18. Technical report, The Johns Hopkins Univ., Laboratory of Climatology, Seabrook, New Jersey, 1952.

[7] E. Leyst. Über die bodentemperatur in pawlowsk. *Rep. Meteorol.*, 13(7):1–311, 1890. Citirano po Günter Buntebarth (2002) Temperature Measurements Below the Earth's Surface: A History of Records. Earth Sciences History 21(2): str. 190-198.: https://doi.org/10.17704/eshi.21.2.f3172611m54158h4 (4.maj 2019).

[8] A. Schmidt. Theoretische verwertung der königsberger bodentemperaturbeobachtungen. *Schriften der Physikalisch-ökonomische Gesellschaft (Königsberg Physical-. Economical Society)*, 32:97–168, 1891.

[9] W. A. Baum. Note on the theory of super-autoconvective lapse rates near the ground. *J. Met.*, 8:196–198, 1951. https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0469(1951)008(4.maj 2019).

[10] A. C. Best, E. Knighting, R. H. Pedlow, and K. Stormonth. Temperature and humidity gradient in the first 100m over south-east england. Technical report, HMSO London, Met. Off. Geophys. Mem. 89 str., 1952.

[11] P. A. Kolesnikov. *Teplozaščitnye svojstva odeždy.* Legkaja industrija: str. 124-125, Moskva, 1965.

[12] S. Baxter. The thermal conductivity of textiles. *Proc. Phys. Soc.*, 58(1):105, 1946. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0959-5309/58/1/310/meta (5.maj 2019).

[13] W. J. Humphreys. *Physics of the air.* McGraw-Hill, New York, 1940.

[14] P. A. Kolesnikov. *Teplozaščitnye svojstva odeždy.* Legkaja industrija: str. 146, Moskva, 1965.

[15] G. Vertačnik and R. Bertalanič. Značilnosti podnebja v sloveniji - podnebna spremenljivost slovenije v obdobju 1961–2011. Technical report, Agencija Republike Slovenije za Okolje, 2017.

[16] Dolinar M. Kozjek, K. and and G. Skok. Objektivna opredelitev podnebnih regij slovenije. In *Zbornik: Raziskave s področja geodezije in geofizike 2017.* Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko., 2017. http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/SUGG/referati/2017/10(27. september 2022).

[17] ARSO. https://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/maps/. Technical report, Agencija Republike Slovenije za Okolje.

[18] ARSO. https://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/maps/description/temperature/. Technical report, Agencija Republike Slovenije za Okolje.

[19] ARSO. https://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/tables/. Technical report, Agencija Republike Slovenije za Okolje.

[20] ARSO. Slovenski vremenski rekordi. Technical report, Agencija Republike Slovenije za Okolje, 2010. http://www.arso.gov.si/vreme/podnebje/slo_vremenski_rekordi.pdf.

[21] ARSO. Podnebne razmere v sloveniji (obdobje 1971–2000. Technical report, Agencija Republike Slovenije za Okolje, 2006. https://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/text/sl/publications/podnebne_razmere_

[22] Toplotni pasovi. Technical report. https://dijaski.net/gradivo/geo_ref_toplotni_pasovi_01__predstav

[23] R. Geiger. *The climate near the ground.* Harvard University Press: str. 161, 1973.

[24] GPCC. Global precipitation climatology centre (DWD - Deutscher Wetterdienst). Technical report. https://www.dwd.de/EN/ourservices/gpcc/gpcc.html.

POGLAVJE 3

Uravnavanje telesne temperature

Kazalo

3.1 Uvod **34**
3.2 Proizvodnja toplote **35**
3.3 Uravnavanje telesne temperature **39**
3.3.1 Splošno 39
3.3.2 Uravnavanje toplotnega ravnovesja 41
3.3.2.1 Uravnavanje proizvodnje toplote 41
3.3.2.2 Uravnava toplotnih izgub 42
3.3.2.2.1 Splošno 42
3.3.2.2.2 Toplotna izolacija mirne (negibne) plasti zraka na površini kože (ali oblačila) 44
3.3.2.2.3 Izolacijska vrednost tkiva 45
3.3.2.2.4 Vloga znojenja pri kontroli telesne temperature 46
3.3.3 Telesna temperatura 47
3.3.3.1 Mehanizem uravnavanja telesne temperature 47
3.3.3.2 Povprečna telesna temperatura 48
3.3.3.3 Porazdelitev telesne temperature 49
3.3.3.4 Vloga živčnih centrov pri uravnavanju telesne temperature 51
3.3.3.5 Vloga senzornih in refleksnih (efektornih) faktorjev pri uravnavanju višine temperature 52
3.3.3.6 Občutljivost za vročino in mraz 56
3.3.4 Prilagoditev mrazu in vročini 56
3.3.4.1 Prilagoditev mrazu 56
3.3.4.2 Prilagoditev vročini 58
3.4 Seznam oznak poglavja **59**
3.5 Literatura **59**

3.1 Uvod

Uravnavanje telesne temperature je zelo zapleten proces. Toplokrvne živali, ki imajo razvit sistem znojnih žlez in človek imajo sposobnost uravnavanja telesne temperature na nekem določenem – normalnem nivoju. Človekova telesna temperatura je 37 °C. To je temperatura v jedru telesa. Ne bomo se spuščali v podrobnosti mehanizma regulacije telesne temperature, vendar mora projektant oblačila poznati vsaj nekaj osnovnih dejstev. Regulacija telesne temperature se lahko pojasni z enostavnim mehanizmom. Na površini kože so receptorji – konice živcev, ki so občutljivi za mraz in toploto oziroma na spremembo temperature na površini telesa.

Ti receptorji ali senzorji pošiljajo sporočila glede spremembe temperature efektorjem oziroma organom, ki sprožijo določene spremembe, nujne za termostatiranje jedra telesa. Za pravilno medsebojno delovanje receptorjev in efektorjev skrbi center za regulacijo telesne temperature, ki igra vlogo centralne procesne enote. Ta analizira vhodne podatke – spremembe temperature na površini kože oziroma na plašču telesa. Če se podatki nanašajo na znižanje temperature, center aktivira efektorje, ki sprožijo mehanizme za povečanje proizvodnje toplote in zmanjšanje izgub le-te. Če pa senzorji pošiljajo sporočila o povečanju temperature na površini kože oziroma na plašču telesa, center aktivira efektorje, ki aktivirajo mehanizme za zmanjšanje proizvodnje toplote, povečanje hitrosti odvajanja toplote iz telesa proti površini kože (povečanje cirkulacije krvi in razširitev ožilja), in povečanje hitrosti odvajanja toplote s površine kože (znojenje in izhlapevanje znoja).

Človeško telo izžareva toploto v okolje. Na količino proizvedene toplote vpliva precejšnje število dejavnikov, kot so: aktivnost in intenziteta aktivnosti človeka, splošno zdravstveno stanje, prehranjenost, okolje ipd.

Oddajanje toplote v okolje pa je vsekakor v prvi vrsti odvisno od proizvodnje toplote, stanja okolja, termoizolacijske vrednosti podkožnega tkiva, oblačila in mirne plasti zraka na površini oblačila.

Vidimo, da sta tako proizvodnja kot tudi poraba oziroma oddajanje toplote v okolje odvisni od velikega števila različnih dejavnikov. Stalnost temperature je odvisna od ravnovesja med proizvodnjo in porabo toplote. To ravnovesje je zelo težko doseči, saj niha dnevna temperatura okolja pri nas včasih celo za 20 °C in več, pa tudi človek pogosto spreminja vrsto in intenziteto svoje aktivnosti, zaradi česar se lahko spreminja količina proizvedene toplote v zelo širokem intervalu vrednosti.

K uravnavi telesne temperature vsekakor pripomore oblačilo. Vendar termoizolacijske vrednosti oblačila ne moremo spreminjati zvezno. Oblačilo je običajno večplastno. Pogosto se zgodi, da so pri določenih aktivnostih tri plasti premalo, štiri pa preveč. To pomeni, da nas bo po določenem času začelo zebsti, če smo oblečeni v tri-plastno oblačilo in da nam bo prevroče v štiri-plastnem oblačilu. Skratka, ne v prvem in ne v drugem primeru se ne počutimo več tako ugodno kot takrat, ko je temperatura na površini kože okrog 33 °C in ko je temperatura jedra telesa 37 °C. V tej coni ugodja je možno ostati le, če je obenem doseženo ravnovesje med proizvodnjo in izžarevanjem toplote in če se to ravnovesje ne spreminja. Iz povedanega lahko sklepamo, da je zelo težko doseči cono ugodja in v njej obdržati organizem dalj časa.

Kljub velikim spremembam intenzitete in vrste aktivnosti ter okolja (temperatura, vlažnost, veter, oblačnost ipd.) pa se temperatura jedra telesa in možganov bistveno ne spreminja. To pa zaradi delovanja mehanizma, ki uravnava proizvodnjo in oddajanje toplote v okolje. Ta mehanizem odpove le pri ekstremno nizkih in ekstremno visokih temperaturah okolja.

Kar smo povedali za jedro in možgane, pa ne velja za površino kože in ude. Kot bomo videli pozneje, se lahko temperatura na teh delih telesa spreminja v zelo širokem intervalu brez kakršnihkoli trajnih poškodb. V ekstremnih okoliščinah (predvsem zelo nizke temperature okolja) pa lahko pride do trajnih poškodb teh organov.

3.2 Proizvodnja toplote

Proizvodnja toplote je v neposredni zvezi z aktivnostjo subjekta in uravnavanjem telesne temperature glede na stanje subjekta in okolja. Človeško telo ima že samo po sebi določene termoizolacijske lastnosti, saj koža in podkožno tkivo delujeta kot termoizolacijski plašč. Vrednost termoizolacije tega "plašča" pa se spreminja glede na stanje organizma in stanje okolja. V naših klimatskih razmerah ta izolacije ne zadostuje.

Zaradi tega uporabljamo oblačilo kot dodatno termoizolacijsko plast. Termoizolacijska vrednost te plasti mora biti optimalna; to pomeni, da gre skozi to plast toliko toplote, kolikor jo subjekt izžareva skozi površino kože. V tem primeru se telesna temperatura (temperatura jedra) ter temperatura površine kože ne spreminjata.

Proizvodnja toplote ni konstantna, ampak se spreminja predvsem v odvisnosti od vrste in intenzitete aktivnosti. Po drugi strani se spreminja tudi temperatura in drugi parametri okolja. Okolje je definirano s parametri, kot so: temperatura, vlažnost zraka, hitrost vetra ipd. Če želimo obdržati nespremenjeno temperaturo telesa, ki obenem pomeni temperaturo ugodja, moramo spreminjati termoizolacijsko vrednost oblačila tako, da obdržimo temperaturo telesa v coni ugodja.

Navadno je enostavno izmeriti vrednosti parametrov okolja, kot so: temperatura, relativna vlažnost, hitrost vetra in zračni tlak. Pri tem moramo imeti ustrezne instrumente. Nekoliko težje je ugotoviti količino toplote, ki jo človek izžareva skozi površino kože. Lahko si pomagamo s približno oceno, ki podaja količino toplote, ki jo povprečen človek izžareva skozi površino kože v okolje pri dani vrsti in intenziteti aktivnosti.

Skozi površino kože se odda v okolje okrog 76 % celotne proizvedene toplote. Preostala toplota se porabi za mehanično delo mišic in notranjih organov, segrevanje vdihnjenega zraka ipd. Proizvodnjo toplote lahko ugotovimo posredno s pomočjo merjenja porabe kisika. En liter porabljenega kisika ustreza 20,265 kJ. Sicer se giblje v mejah od 19,681 za maščobo (izkoristek 70,7 %) do 21,197 kJ za ogljikove hidrate (izkoristek 100 %). Povprečno vzamemo izkoristek 82 %, kar da 20,265 kJ na liter porabljenega kisika. Nujno moramo še definirati, kaj je povprečni človek ali povprečna oseba. Povprečna oseba je visoka 178 cm, ima maso 63 kg in površino kože 1,8 m^2. Poznavanje teh parametrov je nujno zaradi tega, ker včasih najdemo v literaturi podatek za proizvodnjo toplote kJ/kg ali pa kJ/m^2 površine kože. Ko preračunavamo toplotno bilanco pri konstrukciji oblačila, navadno uporabljamo povprečne vrednosti, kot je na primer osnovna velikostna številka oblačila ipd.

Proizvodnja toplote je predvsem odvisna od stanja organizma osebe, kot to vidimo iz preglednice 3.1.

Ti podatki so le orientacijski, lahko pa nam koristijo pri ugotavljanju termoizolacijske vrednosti oblačila za različna stanja organizma osebe in različna stanja okolja. Proizvodnja energije ni odvisna samo od stanja organizma glede na vrste in intenzitete aktivnosti, ampak tudi od starosti in spola, kot to vidimo iz preglednice 3.2. V tej preglednici je prikazana proizvodnja toplote med spanjem. Iz rezultatov vidimo, da prej omenjenih 168 kJ/m^2.h velja za moškega med 20. in 30. letom starosti ter žensko med 16. in 18. letom. Mlajši od teh proizvajajo več, starejši pa manj toplote.

Preglednica 3.1: Odvisnost generacije toplote od vrste aktivnosti subjekta. [1, 2]

Vrsta aktivnosti	Generacija toplote [kJ/m^2.h]
Spanje	168
Sedenje	210
Stajanje	315
Počasna hoja po ravnem: 3 km/h	420
Hoja po ravnem: 4 km/h	630
Hoja po ravnem: 6,3 km/h	840
Precej težko nepretrgano delo	1050
Občasno zelo intenzivno delo	2100

Preglednica 3.2: Proizvodnja toplote med spanjem v odvisnosti od starosti in spola subjekta. [3]

Starost	Generacija toplote [kJ/m^2.h]	
v letih	Moški	Ženske
14 – l6	193	181
16 – 18	181	168
18 – 20	172	160
20 – 30	166	155
40 – 50	162	151
50 – 60	158	147
60 – 70	153	143
70 – 80	149	139

Človek ne oddaja toplote v okolje enakomerno s površine kože. Količina toplote, ki jo človek izžareva v okolje s površine glave, se bo razlikovala od količine toplote, ki jo izžareva, na primer, s prsi ali hrbta – računano na enoto površine kože v enoti časa. Te razlike moramo poznati zaradi tega, da posamezne dele telesa v pogojih mrzlega okolja zaščitimo le s tolikšno količino oblačila, ki bo, v danih pogojih, dala optimalni učinek oziroma omogočila ustvarjanje območja ugodja.

Iz preglednici 3.3 vidimo, da je najbolj intenzivno izžarevanje s površine glave, računano na enoto površine; najmanjše pa skozi površino trupa. Če primerjamo glavo in vrat s trupom, vidimo, da je izžarevanje toplote s površine glave in vratu približno za štirikrat večje, računano na enoto površine kože v enoti časa. Ta razlika je približno takšna, kot je razlika med povprečnim izžarevanjem toplote med spanjem in izžarevanjem med hojo po ravnem s hitrostjo 6,3 km/h. Zaradi te razlike je nujno v mrzlem okolju bolj izolirati trup kot glavo. Hitrosti, navedene v preglednici 3.3, se nanašajo na hojo po ravnem.

Za ude, stopala in pesti s prsti je stanje zelo kompleksno. Količine toplote, navedene v preglednici 3.3, se nanašajo na optimalno stanje – cono ugodja. Če pa se poruši ravnovesje med proizvodnjo in oddajo toplote, se stanje spremeni. Če je temperatura okolja višja od temperature površine kože, se poveča hitrost izžarevanja toplote z ekstremitetov (roke, noge), če pa je temperatura okolja nižja in se poruši ravnovesje, izžareva se več toplote, kot se je proizvaja, potem se hitrost izžarevanja s površine udov zmanjša.

Zanimivo je še pogledati razlike izžarevanja toplote s površine posameznih delov

Preglednica 3.3: Topografija izžarevanja toplote s površine posameznih delov telesa oblečenega moškega, v odvisnosti od stanja organizma. [4, 5]

Del	Površina kože		Izžarevanje toplote v okolje [kJ/m^2.h]			
telesa	m^2	%	Spanje	Sedenje	Hoja 3 km/h	Hoja 6,3 km/h
Trup	0,630	35	96	121	256	511
Glava	0,126	7	432	543	900	1800
Pesti	0,090	5	144	181	386	773
Nogi	0,576	32	199	249	534	1068
Roki	0,252	14	162	203	393	786
Stopali	0,126	7	175	219	336	672
Telo	1,800	100	168	210	420	840

telesa moškega in ženske, kakor tudi vpliv strmine in obremenitve subjekta, na količino izžarjene toplote.

V preglednicah 3.3 in 3.4 se rezultati oblečenih oseb nanašajo na normalno zimsko obleko pri zunanji temperaturi 5 do 11 °C in hitrosti vetra 1 m.

Preglednica 3.4: Odstotni delež izžarevanja toplote s površine posameznih delov telesa pod določenimi pogoji; hoja je po ravnem s hitrostjo 4 km/h. [5]

	Sedenje				Hoja	
Del	Goli		Oblečeni		Oblečeni	
telesa	Moški	Ženske	Moški	Ženske	Moški	Ženske
Trup	31,2	34,4	19,9	23,2	21,2	21,8
Roki	15,9	14,9	13,3	13,4	13,1	12
Pesti	3,5	5	4,1	6,1	4,6	4,4
Nogi	33,2	25,7	37,7	37,1	40,5	43,8
Stopali	4	10,2	7,1	7,6	5,6	6,4
Glava	12,2	9,8	17,9	12,6	15	11,6
Telo	100	100	100	100	100	100

Iz preglednice 3.4 vidimo, da je med žensko in moškim precejšnja razlika v izžarevanju toplote s površine glave. Pri moških je izguba toplote precej večja. To razliko lahko pripišemo predvsem količini las na glavi, ki so dober toplotni izolator; vzrok za razliko je lahko delno tudi različen delež površine kože na glavi moškega in ženske. Proizvodnja toplote pri hoji po ravnem je odvisna tudi od kakovosti površine poti. Ta odvisnost je prikazana v preglednici 3.5.

Prav tako ni vseeno, ali se gibljemo z obremenitvijo ali brez nje. V preglednici 3.6 je prikazana odvisnost proizvodnje toplote (energije) od hitrosti gibanja in obremenitve.

Naša država je pretežno gorata. Pogosto se gibljemo po bolj ali manj strmih pobočjih. Pri tem so okoliščine drugačne, kot če se gibljemo po ravnem. Pri hoji v hrib je proizvodnja toplote večja, gibanje pa se upočasni. V preglednicah 3.5 do 3.7 je enaka izžarevanju toplote s površine kože v pogojih energetskega ravnovesja. V preglednici 3.7 pa je prikazana odvisnost proizvodnje toplote od hitrosti gibanja, strmine in velikosti obremenitve.

Preglednica 3.5: Odvisnost generacije toplote (energije) subjekta, ki je oblečen v terensko obleko, od kvalitete poti. [6]

Vrsta poti na ravnem terenu	Hitrost hoje [km/h]	Generacija toplote [kJ/m^2.h]
Makadam	4	420
Trava	4	504
Strnišče in njive	4	588
Peščeno in glinasto zemljišče	3,5	588
Globoko zorano zemljišče	3	714

Preglednica 3.6: Odvisnost generacije toplote od hitrosti gibanja in obremenitve. [6]

Obremenitev [kg]	Hitrost gibanja [km/h]	Generacija toplote [kJ/m^2.h]
10	4,0	504
30	4,0	756
50	4,0	1134
70	3,5	1638
100	3,0	2100

Preglednica 3.7: Odvisnost generacije toplote od strmin, hitrosti vzpona in obremenitve. [6]

Vzpon [°]	Hitrost vzpenjanja [km/h]	Obremenitev [kg]	Proizvodnja toplote [kJ/m^2.h]
10	0,43	0	672
10	0,43	20	840
10	0,43	50	1302
16	0,69	0	1176
16	0,69	20	1386
16	0,69	50	2226
25	1,05	0	1848
25	1,05	20	2394
25	1,05	50	3780

3.3 Uravnavanje telesne temperature

3.3.1 Splošno

Uravnavanje telesne temperature je v neposredni zvezi z uravnavanjem ravnovesja med proizvodnjo in porabo energije. Ukvarjali se bomo predvsem s proizvodnjo in porabo toplote. Od vse proizvedene toplote se okrog 14 % porabi za izhlapevanje znoja in 10 % za segrevanje vdihnjenega zraka ter za izhlapevanje vodne pare, ki jo izdihnemo. Preostalih 76 % toplote se sprosti – izžari s površine kože. Ta količina je odvisna od vrste in intenzitete aktivnosti, poglavje 3.2 na strani 35.

Za projektanta oblačila je predvsem zanimiva količina toplote, ki se odda v okolje s površine kože, ker to količino upoštevamo pri projektiranju in izračunu termoizolacijske vrednosti oblačila. To je bistveno v razmerah, ko odpovedo vsi mehanizmi povečanja proizvodnje toplote zaradi prenizkih temperatur okolja, oziroma v primeru, ko so izgube večje od dotoka toplote in te razlike ne more izravnati center, ki regulira telesno temperaturo.

V našem podnebju zaradi relativno nizkih temperatur v večjem delu leta potrebujemo, glede na temperaturo površine kože, dodatno termoizolacijsko plast – oblačilo, da preprečimo podhladitev organizma. Redkeje pridemo v stanje, ko preti nevarnost pregretja organizma. Zaradi tega bomo več prostora posvetili problemu zaščite organizma pred podhladitvijo, kot pregretjem, čeprav lahko nastopi smrt ne samo zaradi podhladitve, temveč tudi zaradi toplotnega šoka – pregretja organizma.

V okoliščinah, v katerih lahko pride do pregretja organizma, lahko tekstilec pomaga le s tenko plastjo oblačila, ki naj človeka zavaruje pred zunanjo toplotno obremenitvijo. Pri golem človeku, katerega organizem se pregreje zaradi prevelike proizvodnje toplote – velikega fizičnega napora, tekstilec nima kaj početi. Takšen problem je v izključni domeni medicine.

Količino toplote, ki jo človek odda s površine kože v okolje v enoti časa, lahko opredelimo z enačbo (3.1).

$$Q = \frac{\lambda}{d} (T_1 - T_2) St \tag{3.1}$$

kjer so: Q [kJ] količina toplote, λ [kJ/m.h.°C] koeficient toplotne prevodnosti podkožnega tkiva subjekta, ki ima vlogo termoizolacijskega plašča; d [m] debelina podkožnega tkiva, T_l [37 °C] temperatura jedra telesa – subjekta, T_2 [°C] temperatura okolja, S [m^2] površina kože in t [h] čas merjenja izžarevanja toplote.

Enačba (3.1) velja za golo telo. Lahko pa bi veljala tudi za oblečen subjekt. V tem primeru bi opisovala stanje na površini kože in površini oblačila. Koeficient toplotne prevodnosti bi se nanašal na oblačilo, d na debelino oblačila in T_l na temperaturo površine kože. Ostanimo pri golem subjektu. Zgornja meja temperature površine kože je 36 °C. Območje ugodja pa je takrat, ko je povprečna temperatura površine kože okrog 33 °C. Če predpostavimo, da je debelina izolirnega plašča – kože in podkožnega tkiva povprečno okrog 1,3 cm, bo temperaturni gradient v območju ugodja okrog 3 °C/cm izolirnega plašča.

Predpostavili bomo, da je debelina izolirnega plašča enaka po vsem telesu in da ima na vseh delih enako vrednost koeficienta toplotne prevodnosti v območju ugodja v stanju spanja. Ta predpostavka dejansko ne drži, ker je izolirni plašč na posameznih delih pretežno iz mišičnega, dobro prekrvavljenega tkiva, na drugih delih pa je tudi maščoba. Maščoba je boljši toplotni izolator kot mišično tkivo. Kljub temu lahko uporabljamo povprečno vrednost, ki se pa spreminja v odvisnosti od stanja organizma in

stanja okolja v mejah od približno 3,023 kJ/m.h.°C do 0,3790 kJ/m.h.°C [7]. Ta interval nam pove, da se vrednost koeficienta toplotne prevodnosti spreminja tudi za faktor 8 v odvisnosti od stanja okolja in stanja organizma subjekta, v izjemnih primerih pa je sprememba vrednosti tudi za faktor 10. To pomeni, da se je organizem sposoben prilagoditi zelo velikim spremembam stanja okolja. Pozneje bomo videli, da je bolj ugodno operirati z toplotnim uporom. Ker smo predpostavili, da je povprečna debelina izolirnega plašča telesa okrog l,3 cm, bo njegov toplotni upor v mejah 0,0043 m^2.h.°C/kJ do 0,0343 m^2.h.°C/kJ. Med toplotnim uporom in koeficientom toplotne prevodnosti obstaja enostavna povezava, enačba (3.2).

$$R_c = \frac{d}{\lambda} \tag{3.2}$$

kjer so R_c [m^2.h.°C/kJ] toplotni upor, d [m] debelina termoizolacijske plasti in λ [kJ/m.h.°C] koeficient toplotne prevodnosti termoizolacijske plasti.

V porah tekstilnega proizvoda je na primer vrednost koeficienta toplotne prevodnosti vode 2,l kJ/m.h.°C in ledu 8,4 kJ/m.h.°C. Iz tega izhaja, da je zgornja vrednost koeficienta toplotne prevodnosti tkiva večja kot pri vodi. To lahko pojasnimo s tem, da je takrat, ko ima koeficient toplotne prevodnosti največjo vrednost, ožilje razširjeno in da je v teh razmerah kroženje krvi najhitrejše. Kri prinaša toploto iz jedra telesa in mišičnega tkiva. Bistvena je torej razlika stanja sistema glede na mirujočo vodo. Tukaj moramo povedati, da je povprečna debelina termoizolacijskega plašča telesa izračunana na osnovi temperaturnega gradienta 3 °C/cm, ki velja za območje ugodja v stanju spanja. Iz mejnih vrednosti koeficienta toplotne prevodnosti je očitno, da temperaturni gradient ni konstantna vrednost.

Spodnja vrednost koeficienta toplotne prevodnosti termoizolacijskega plašča pa je že v območju srednje dobrih toplotnih izolatorjev, saj je le za okrog 50 % višja od vrednosti, ki jo imajo nekatere vrste bombažnih tkanin. Ta vrednost se doseže samo takrat, ko se ožilje zoži in se pretok krvi skozi podkožno tkivo zmanjša na minimum. Toplota, ki je s pomočjo kondukcije prišla iz notranjosti telesa na površino kože, se izgubi v okolje. Del toplote se prenese v okolje s pomočjo sevanja, del pa s pomočjo konvekcije. Prenos toplote s površine kože ni enostaven. Obstaja še ena ovira – plast mirujočega zraka na površini kože. Ta plast deluje kot toplotni izolator. V normalnih okoliščinah, med spanjem, ko smo v območju ugodja in se zrak v okolju ne giblje, doseže plast mirujočega zraka toplotni upor 0,0356 m^2.h.°C/kJ [8].

Toplotni upor mirujoče plasti zraka se spreminja v odvisnosti od hitrosti gibanja subjekta, hitrosti vetra, intenzitete izhlapevanja ter intenzitete izžarevanja toplote. Če se vrednosti naštetih faktorjev povečujejo, potem se zmanjšuje toplotni upor mirujoče plasti zraka na površini kože. Če je relativna hitrost zraka v m/s in toplotni upor plasti mirujočega zraka R_a, potem naslednja enačba dobro opisuje spremembo toplotnega upora v odvisnosti od hitrosti vetra v, enačba (3.3) [8].

$$R_a = \frac{0,0429}{0,4 + 2,0\sqrt{v}} \tag{3.3}$$

kjer so R_a [$m^2$2.h.°C/kJ] toplotni upor in v [m/s] začetna hitrost delca pred vhodom v kanal.

Prej omenjeno vrednost toplotnega upora 0,0356 m^2.h.°C/kJ dosežemo pri hitrosti vetra 0,162 m/s. To nam pove, da enačba (3.3) ne velja za hitrosti vetra, ki se približujejo ničli. Saj bi pri $v = 0$ m/s, R_a imel vrednost 0,1073, kar je trikrat več, kot je dejanska izmerjena vrednost. Zaradi tega je pri enačbi (3.3) nujno postaviti omejitev. Enačba (3.3)

velja, če je $v \geq 1$ m/s. Natančnost izračunanih rezultatov je ± 2 %. Upor plasti zraka na površini kože se lahko tudi poveča v primeru, ko subjekt dobi kurjo polt. S tem se dlake postavijo bolj pokonci, površina kože postane manj gladka, kar zavira gibanje zraka. Toda pri tem pojavu se poveča površina kože, kar pomeni povečanje toplotnih izgub. Vendar prevladuje učinek povečanje izolacije zaradi povečanja debeline mirujoče zračne plasti. Omenili smo že, da nekaj milimetrov debela plast zraka neposredno nad površino zemlje prenaša toploto s pomočjo kondukcije, poglavje 2. Enako velja za površino kože.

3.3.2 Uravnavanje toplotnega ravnovesja

3.3.2.1 Uravnavanje proizvodnje toplote

V stanju mirovanja se proizvaja toplota v glavnem v jedru telesa. V tem stanju se le okrog 20 % toplote proizvede v mišičnem tkivu in okrog polovice v okončinah. Presnova je približno linearno odvisna od mase telesa; medtem ko se predpostavlja, da količina proizvedene toplote ni odvisna od površine kože osebe [9]. Če mišice delajo, se položaj bistveno spremeni. Proizvodnja toplote naraste za 10 do 15-krat, pa tudi več. To povečanje gre v glavnem na račun dela mišic, delno pa tudi na račun povečanja intenzitete dela srca, mišic v pljučih in znojnih žlez ter mogoče delno na račun centralnega živčnega sistema. V pogojih intenzivne aktivnosti mišic se proizvede 85 do 90 % toplote v mišicah. Obenem se 50 do 60 % toplote lahko sprosti – izgubi v okolje skozi površino okončin. Iz tega vidimo, da se precejšen delež celotne proizvedene energije pojavlja v obliki toplotne energije. Ta količina pa je tolikšna, da otežuje uravnavanje med proizvodnjo in izgubami, kar lahko poveča splošno raven telesne temperature.

Če je temperatura okolja precej nižja od temperature površine kože, lahko pride do deficita toplote. V primeru deficita (večje izgube toplote, kot je njena proizvodnja) bi po določenem času lahko nastopilo znižanje splošne ravni telesne temperature, posebno še na prstih rok in nog. Zaradi tega bi lahko nastale številne negativne posledice, med drugim zmrzovanje posameznih delov telesa in izjemoma celo smrt. V takšnih primerih organizem aktivira določene mehanizme, ki vplivajo na povečanje proizvodnje toplote in zmanjšanje izgub toplote skozi površino kože v okolje.

V mrazu, ko je organizem v nevarnosti, da se podhladi, začnejo adrenalinske žleze izločati v kri adrenalin . Adrenalin povečuje metabolizem. Pospeši se izgorevanje ogljikovih hidratov in količina sladkorja v krvi se poveča. Rezultati preiskav na miših, ki so jim vbrizgali adrenalin, kažejo, da se pri temperaturi 4 °C poveča presnova za l70 % [10]. Ta vrednost presnove se ni spremenila, dokler se temperatura okolja ni dvignila na 29 °C. Celo če eno adrenalinsko žlezo odstranimo, se presnova še vedno poveča za 130 %. Če odstranimo obe adrenalinski žlezi, se zniža telesna temperatura in tudi presnova. Zaradi tega se je takšna miš podhladila in zmrznila. Pri ljudeh je verjetno vgrajen podoben mehanizem.

Adrenalinske žleze ne povečajo izločanja adrenalina samo v mrazu, ampak tudi takrat, ko smo razburjeni – ne glede na to, kakšna je zunanja temperatura. Če se poveča izločanje adrenalina in s tem tudi proizvodnja toplote v primeru, ko je temperatura okolja relativno visoka, nastanejo lahko nezaželene posledice – znojenje in povečanje telesne temperature nad zgornjo mejno temperaturo območja ugodja. Obstajajo določene razlike med moškimi in ženskami. Preizkusi so pokazali, da imajo ženske v Indiji nižji metabolizem kot ženske v zmernem klimatskem pasu [11]. Opaženo je tudi, da se presnova začenja zmanjševati po treh dneh prebivanja v tropskih predelih in se zmanjša za približno 10 % na koncu prvega tedna [12].

V eksperimentalnih pogojih pa je težko ugotoviti spremembo presnove pri povišanih temperaturah, ker se takrat poveča telesna temperatura, ki sama po sebi pospešuje metabolizem. To pa zakrije učinek, ki ga ima eventualno zmanjšanje aktivnosti tiroidne žleze.

Kot vidimo iz preglednice 3.1, imajo ženske počasnejšo presnovo kot moški. To pa je lahko vzrok, da so ženske bolj občutljive na mraz ponoči v spanju kot moški. Po drugi strani pa ženske lažje prenašajo mrzlo kopel kot moški in na splošno kaže podkožno tkivo žensk višjo termoizolacijsko vrednost. To pa verjetno zaradi plasti maščobe, ki je boljši toplotni izolator kot mišično tkivo. Pri ženskah je tudi manjša izguba toplote zaradi izhlapevanja; verjetno zaradi nižje temperature na površini kože.

Te predpostavke potrjuje tudi primer iz Narodno-osvobodilne vojne. V zimskem nočnem maršu partizanov v Gorskem Kotarju je zmrznilo več kot 30 borcev. V koloni je bilo tudi 37 partizank, od katerih nobena ni podlegla mrazu. Sicer ni natančnih podatkov o količini in kakovosti oblačil, ki so jih imeli posamezniki; vendar glede na tedanje razmere lahko s precejšnjo zanesljivostjo menimo, da ženske niso bile kaj boljše oblečene kot moški. Iz tega lahko sklepamo, da so ženske na splošno bolj odporne proti mrazu kot moški. Pri tem vsekakor igra važno vlogo plašč človeškega telesa, ki pri ženskah vsebuje več maščobe kot pri moških in ima zaradi tega tudi večjo termoizolacijsko vrednost.

Na splošno lahko rečemo, da se pri človeku poveča presnova in s tem tudi proizvodnja toplote pri nizkih temperaturah zaradi dveh glavnih vzrokov: zaradi dviga količine adrenalina in povečane endokrine aktivnosti nasploh ter drugič zaradi drgetanja in drugih aktivnosti mišičevja.

3.3.2.2 Uravnava toplotnih izgub

3.3.2.2.1 Splošno Telo proizvaja toploto. Telo oddaja proizvedeno toploto v glavnem skozi površino kože v okolje. To je možno le takrat, ko je temperatura okolja nižja od temperature površine kože. Čim večja je temperaturna razlika, tem večjo količino toplote je možno oddati v okolje, glej enačbo (3.1). Pri tem se lahko poruši ravnovesje med proizvodnjo in izgubo toplote. Če izgube presegajo proizvodnjo, se zmanjša povprečna temperatura površine kože čela na 30 °C in manj. Pri tem oseba čuti mraz. Pri zelo nizki temperaturi površine kože posameznega dela telesa pa se lahko občutek mraza spremeni celo v bolečino. To posebej velja za prste rok in nog. V preglednici 3.8 so navedeni občutki pri določeni temperaturi površine kože ter odstotek površine kože, ki je pri dani temperaturi kože prekrit s tekočino – znojem.

Preglednica 3.8: Odvisnost počutja subjekta in vlažnosti kože od temperature površine kože. [13]

Temperatura kože [°C]	Subjektivno počutje subjekta	Odstotek kože, ki je prekrit z znojem
28,0 – 29,9	zelo mrzlo	10 – 18
30,0 – 32,1	mrzlo	10 – 20
32,2 – 33,2	ugodno	12 – 25
33,3 – 34,3	toplo	15 – 30
34,4 – 35,5	zelo vroče	30 – 90
35,6 – 36,6	vroče	100

Iz preglednice 3-8 vidimo, da ima sprememba temperature površine kože le za nekaj stopinj zunaj intervala območja ugodja (32,2 °C do 33,2 °C) zelo neugodne posledice na počutje človeka. Temperature, navedene v preglednici 3.8, veljajo za temperaturo čela. Istočasno je lahko temperatura površine kože drugih delov telesa drugačna, kar je prikazano v preglednici 3.9.

Preglednica 3.9: Temperatura kože na posameznih delih telesa v odvisnosti od temperature okolja. [13]

Temperatura	Temperatura kože [°C]			
zraka [°C]	čela	prsi	pesti	stopal
16	33,0	33,2	27,2	23,9
20	33,4	33,6	30,4	27,0
24	34,1	35,6	34,5	32,1

Če primerjamo preglednici 3.8 in 3.9, vidimo, da je temperatura okončin pri temperaturi okolja 16 °C precej nižja od temperature čela ali prsi. To obenem pomeni, da so okončine manj občutljive za znižanje temperature površine kože kot glava ali trup. Pri nižjih temperaturah je le del kože prekrit z znojem, in to v neposredni okolici znojnih žlez. Takšno stanje je ugodno, ker se bistveno ne poveča vrednost koeficienta toplotne prevodnosti plasti, ki je neposredno na površini kože. Povedali smo že, da se z znižanjem temperature površine kože in s tem tudi temperature podkožnega tkiva povečuje toplotni upor podkožnega tkiva, kar pomeni manjšo izgubo toplote. Poleg tega se zmanjša temperaturna razlika med temperaturo površine kože in temperaturo okolja, kar tudi vpliva na zmanjšanje izgub toplote.

Pri razmišljanju o toplotnih izgubah je nujno analizirati izgubo toplote skozi okončine. Pri tem moramo upoštevati obnašanje mirne plasti zraka na površini kože. Ta plast ima večji toplotni upor na ravni kot na valjasti površini. Čim manjši je premer valja, tem večja je gibljivost te plasti in tem manjši je toplotni upor, ki ga ima ta plast. Trup (torzo) lahko opazujemo kot približni ravno površino. Ko se odmikamo od ravne površine in sekamo zračne plasti paralelno z opazovano površino, se velikost površine ne spreminja. To velja tudi za število molekul, ki sprejemajo toplotno energijo od opazovane površine telesa, ki ima višjo temperaturo kot zrak, ki ga obdaja. Če pa ima telo valjasto obliko, kot na primer prst na roki, potem se velikost površine plasti zraka, ki obdaja prst na določeni oddaljenosti poveča sorazmerno s povečanjem polmera opazovane plasti. Posledica tega je povečanje števila molekul zraka, ki sprejemajo toploto s površine opazovanega prsta. Na zunaj se to kaže kot zmanjšanje toplotnega upora oblačila na opazovanem valjastem delu telesa. Pri sferični površini, kot so na primer konice prstov, je to zmanjšanje toplotnega upora še bolj drastično, ker je površina sfere zraka na določeni oddaljenosti od sfernega dela telesa sorazmerna kvadratu polmera opazovane sfere. Primerno temu se poveča tudi število molekul, ki sodelujejo v procesu prenosa toplote s površine telesa v okolje. To vidimo tudi iz preglednice 3.3. Največje izgube na enoto površine kože se pojavijo pri stopalih, najmanjše pa skozi površino kože, ki obdaja trup. Stopala zavzemajo približno 10 % celotne površine telesa, toda skoznje se izgubi okrog 13 % toplote, kar je za 30 % več kot povprečno s celotne površine telesa. To velja predvsem za tople razmere. V mrzlih razmerah pa je položaj popolnoma drugačen: skozi stopala se izgubi le 7 % toplote ali 30 % manj, kot so povprečne izgube s celotnega telesa [14]. Te spremembe so posledica spremembe hitrosti kroženja krvi ter širjenja in krčenje ožilja. Temperatura na površini stopal se lahko zniža tudi na 20 °C in

še manj. S tem pa so celotne izgube še manjše od 7 %.

Pri običajnih srednjih temperaturah se izgublja toplota v glavnem s pomočjo konvekcije in le delno zaradi izhlapevanja znoja. Pri visokih temperaturah raste delež izgub zaradi izhlapevanja znoja; zmanjša pa se delež izgub zaradi konvekcije.

Zelo pomembno je, da so roke in noge dobro toplotno izolirane, ker se arterijska kri lahko shladi za 10 °C do l5 °C, preden sploh priteče do prstov. Del toplote, ki se izgubi, se izkoristi za segrevanje venozne krvi, kar je pozitivno glede ekonomije telesne toplote. Ta princip omogoča, da se tkivo oskrbuje s ohlajeno krvjo. Zaradi tega se upočasni izguba toplote, ker ostaja temperatura okončin nižja in je tako razlika med temperaturo kože in temperaturo okolja manjša. V toplem okolju povečamo izgubo toplote tako, da povečamo površino telesa s tem, da razširimo okončine in tudi prste. V mrzlem okolju, kjer je potrebno zmanjšati izgubo toplote, pa to naredimo tako, da damo roke k telesu in stisnemo noge skupaj. Pri spanju ali sedenju pa se skrčimo, kolikor je pač mogoče.

Pri izgubah toplote moramo upoštevati tudi izgube zaradi izhlapevanja. V normalnih razmerah se porabi za izhlapevanje okrog 24 % vseh izgub toplote; 10 % odpade na izgube, ki so posledica segrevanja zraka, ki ga izdihavamo, in 14 % na izhlapevanje znoja s površine kože. Če človek ne deluje v normalnih razmerah (nizke temperature ali povečana aktivnost), se te vrednosti spremenijo.

S spremembo aktivnosti se ne spreminja samo proizvodnja toplote, ampak tudi izgube. Če se na primer gibljemo, se poveča relativna hitrost zraka; ta pa zmanjšuje debelino negibnega zraka na površini kože oziroma oblačila. S tem se zmanjša termoizolacijska vrednost te plasti in tudi koncentracija vodnih molekul, ki se pojavijo pri znojenju. To pa pomeni povečano hitrost izhlapevanja in povečano količino izgube toplote s pomočjo konvekcije, kar vse skupaj pomeni precejšnje povečanje izgube toplote.

S povečanjem intenzitete aktivnosti se povečuje tudi proizvodnja toplote, s tem pa se nujno povečajo tudi izgube. Le tako je možno vzpostaviti ravnovesje med proizvodnjo toplote in oddajanjem toplote v okolje. Poleg omenjenega se izgube toplote povečujejo tudi zaradi zmanjšanja termoizolacijske vrednosti podkožnega tkiva. Ta se v spanju poveča za 30 % do 50 % glede na vrednosti v normalnih okoliščinah. Novo stanje, ki je posledica povečane aktivnosti, se doseže v 30 do 45 minutah in se nadalje ne spreminja, če se ne spreminja aktivnost in njena intenziteta.

Če je intenziteta aktivnosti takšna, da izgube ne sledijo proizvodnji, se lahko zgodi, da se celo poveča temperatura jedra telesa. Če delavec pri določenem delu porabi 1 liter kisika na minuto, se poveča temperatura jedra telesa na 37,3 °C do 37,6 °C; če pa je delo bolj intenzivno in porabi subjekt 3 litre kisika na minuto, na primer med tekom, se poveča temperatura jedra telesa na 38,7 °C do 39,6 °C [15].

Na splošno se torej uravnavajo toplotne izgube s pomočjo spremembe termoizolacijske vrednosti plasti zraka na površini kože, spremembe termoizolacijske vrednosti podkožnega tkiva in spremembe hitrosti znojenja in izhlapevanja znoja.

3.3.2.2.2 Toplotna izolacija mirne (negibne) plasti zraka na površini kože (ali oblačila) Mirna plast zraka na površini kože ima relativno visoko termoizolacijsko vrednost. Ta vrednost ni konstantna, ampak je odvisna od kakovosti površine kože (gladka, hrapava, kosmata) in njene geometrije (ravna, valjasta ali sferična). Videz površine kože se lahko precej spremeni zaradi pilo-motorične aktivnosti (kurja polt). Koža postane bolj hrapava in dlake se postavijo bolj pokonci. Posledica takšnega stanja površine kože je povečanje termoizolacijske vrednosti mirne plasti zraka neposredno na površini kože. To vrednost izražamo kot toplotni upor in ima v mirnem vremenu vrednost 0,034 m^2.h.°C/kJ. Ko koža dobi kurjo polt, se ta vrednost poveča na 0,0471 m^2.h.°C/kJ

do 0,0514 m^2.h.°C/kJ. Ti toplotni upori so približno enakovredni toplotnim uporom, ki jih imajo srednje topla oblačila, ki omogočajo območje ugodja pri sedenju pri temperaturi približno 20 °C brez vetra. Takšne lastnosti plasti zraka na površini kože so zelo ugodne v mrzlem vremenu, ko proizvodnja toplote komaj dohaja izgube. V toplem vremenu ali pri povečani proizvodnji toplote pa ima ta lastnost površinske plasti zraka dejansko negativen vpliv. Saj zavira izgubo toplote ne glede na proizvodnjo. S tem se lahko poruši toplotno ravnovesje in pojavi se pregretje organizma z vsemi negativnimi posledicami.

Toplotni upor površinske plasti zraka je precej občutljiv na hitrost gibanja zraka v okolju. Saj že hitrost vetra 30 km/h zmanjša toplotni upor površinske plasti zraka na 0,0081 m^2.h.°C/kJ. Dejansko spremembo toplotnega upora površinske plasti zraka daje enačba (3.3) za hitrosti vetra, ki so večje kot 1 m/s. Pri hitrosti vetra 30 km/h je z enačbo 3.3 izračunana vrednost upora 0,0069 m^2.h.°C/kJ. Vidimo, da je vrednost toplotnega upora, izračunana z enačbo (3.3), manjša za približno 15 % od omenjene izmerjene vrednosti [16]. Ta razlika je verjetno posledica razlike v kakovosti površine, na kateri je bila plast zraka, katerega upor je merjen.

Po drugi strani pa je takšna sprememba toplotnega upora pod vplivom vetra v mrzlem okolju lahko zelo negativna, ker pospešuje izgube toplote. V določenih primerih poruši namreč toplotno ravnovesje – nastopi postopno ohlajevanje organizma.

3.3.2.2.3 Izolacijska vrednost tkiva Sprememba izolacijske vrednosti tkiva je posledica spremembe hitrosti kroženja krvi. To je v bistvu glavni mehanizem regulacije toplotnih izgub (tukaj ne upoštevamo oblačil). Kot smo že prej omenili, se pri podkožnem tkivu spreminja toplotni upor v intervalu 0,0343 m^2.h.°C/kJ do 0,0086 m^2.h.°C/kJ. Če je metabolizem na nivoju bazalnega metabolizma (spanje), se vrednost upora tkiva izjemoma poveča tudi do 0,0729 m^2.h.°C/kJ. Največkrat pa je okrog 0,0471 m^2.h.°C/kJ [17].

Povečanje toplotnega upora tkiva ni odvisno samo od zmanjšanja krvnega obtoka v tkivu, ki prenaša večji del toplote, ampak tudi od spremembe uporabljenih poti. Izmerjeno je, da je hitrost pretoka krvi v rokah pri nizkih temperaturah le 0,15 ml/min na 100 ml tkiva [17]. Takšno stanje omogoča, da podkožno tkivo prevzame vlogo termoizolacijske plasti, ki bi imela približno enak toplotni upor kot enako debela plast plutovine, če bi popolnoma prenehala cirkulacija v tem tkivu. En centimeter debela plutovina daje upor približno 0,0643 m^2.h.°C/kJ. Če bi l cm debelo podkožno tkivo imelo enak upor, bi bile toplotne izgube okrog 46 kJ/m^2.h v primeru, ko je temperaturni gradient 3 °C/cm. To velja le za primer, ko je krvni obtok zelo upočasnjen. En cm debela podkožna maščoba ima upor okrog 0,0343 m^2.h.°C/kJ.

Izgub toplote skozi pesti in prste rok ne dosežemo z visoko vrednostjo toplotne izolacije podkožnega tkiva, ki ima na rokah relativno majhno debelino, ampak s pomočjo manjše vrednosti temperaturnega gradienta, ki je med 1,5 °C/cm in 2,0 °C/cm. Poleg tega ima določeno vlogo tudi temperaturna razlika med temperaturo na površini kože roke (pesti in prsti) in temperaturo okolja. Če je temperatura na površini kože rok le l6 °C in temperatura okolja 16,6 °C, je hitrost izgube toplote le okrog 26 kJ/m^2.h [17].

Kot smo že omenili, se pri izmenjavi toplote v mrzlem okolju ohlaja arterijska kri. K temu precej pripomore venozna kri, ki potuje s površine prstov proti srcu. Na tej poti hladi arterijsko kri in se sama segreva. S pomočjo takšnega mehanizma je možno obdržati kroženje krvi na primer v pesteh in prstih rok pri relativno majhni izmenjavi toplote z mrzlim okoljem. S tem se tudi obdrži nizek nivo temperature v globini podkožnega tkiva rok.

V mrzlih razmerah se arterijska kri bolj ohlaja s pomočjo venozne krvi. Stanje pa se lahko tudi spremeni. Če je mišičevje aktivno, se njegovi venozni krvi lahko temperatura celo zviša. Vroča venozna kri, ki zapušča mišičevje, se bo ohlajala zaradi izmenjave toplote z arterijsko krvjo (če ima ta nižjo temperaturo), ki se pretaka iz globine telesa proti površini. Zaradi takšnega delovanja se zmanjša toplotna izolacija mišičnega tkiva. Podobno se dogaja pri drgetanju. Nezaželeno je ohlajevanje arterijske krvi v vročem okolju. V tem primeru je temperatura okolja zelo visoka; včasih je višja kot temperatura površine kože ali celo jedra telesa. V takšnem primeru je možno oddajanje toplote v okolje v glavnem z izhlapevanjem znoja. Če je mišičevje aktivno in se skozenj pretaka arterijska kri, bo ta v bližini površine kože predala del toplote venozni krvi, ki se segreta vrača v notranjost telesa. S tem se dejansko del toplote konzervira – ne izmenjuje se z okoljem. Posledica takšnega mehanizma je postopno povečanje temperature celotnega telesa, kar ima lahko negativne posledice – toplotni šok.

3.3.2.2.4 Vloga znojenja pri kontroli telesne temperature Približno 24 % celotnih izgub toplote telesa je posledica izhlapevanja znoja s površine kože in izgub pri dihanju [18, 19, 20]. Te izgube nihajo z nihanjem proizvodnje toplote. Izguba toplote zaradi izhlapevanja skozi dihalne organe je odvisna od nasičenosti izdihanega zraka pri 35 °C. Če je parcialni tlak vodne pare v tem zraku 5,6 kPa, izhlapi v stanju mirovanja subjekta okrog 16 g vode na uro. Zrak, ki ga vdihavamo, vsebuje tudi določeno količino vodne pare. Navadno je delni (parcialni) tlak vodne pare v zraku med 0,67 kPa in 2,00 kPa in pod temi pogoji vdihne subjekt v stanju mirovanja 2 g/h do 6 g/h vode. Če to upoštevamo, potem je neto količina izhlapele vode 10 g/h do 14 g/h. S to količino se izgubi 24,4 kJ/h do 33,6 kJ/h. Čim večji je subjekt in čim večja je hitrost presnove – metabolizma, tem večja je količina vdihnjenega in izdihnjenega zraka in s tem so tudi večje izgube toplote skozi dihalne organe. V povprečju se skozi dihalne organe izgubi 8 % do 10 % toplote zaradi izhlapevanja vode v stanju mirovanja subjekta. Ostale izgube toplote pa so posledica izhlapevanja znoja s površine kože.

V znoju je razredčena raztopina NaCl – 0,1 % do 0,2 % in še bolj razredčena raztopina KCl. Pri intenzivnem znojenju lahko pride do precejšnjih izgub teh soli [21, 22]. Z aklimatizacijo na visoke temperature dosežemo izločanje znoja z manjšo koncentracijo omenjenih soli.

Če so potrebe po znojenju velike (zaradi stanja okolja in organizma), pride do hipertrofije mehanizma izločanja znoja – znojnih žlez [21]. S tem se precej poveča učinkovitost znojenja. Znojne žleze se razvijajo v prvih dveh letih življenja. Otroci, ki so bili izpostavljeni vročemu okolju, imajo večje število znojnih žlez kot otroci iz okolja z zmerno klimo [21].

Večje število znojnih žlez pomeni boljšo porazdelitev le-teh v bližini površine telesa. Posledica tega je večja površina, iz katere izhlapeva znoj. To obenem pomeni hitrejše izhlapevanje in boljše hlajenje organizma. Čim večje je število znojnih žlez, tem manj očitno je potenje. To verjetno zaradi tega, ker je hitrost izhlapevanja znoja večja, saj izhlapeva z večje površine in je pri enaki hitrosti znojenja manj verjetno, da se bo prekrila koža z znojem, če je več znojnih žlez, kot če jih je manj. Iz tega lahko sklepamo, da se bo v vročem okolju bolj hladila tista oseba, ki ima večje število znojnih žlez.

Ko se na površini kože izoblikuje plast znoja v tekočem stanju, se spremenijo razmere oddajanja toplote v okolje. Znoj še zmeraj izhlapeva; toda hitrost izločanja znoja je večja od hitrosti izhlapevanja. Opazujmo golo osebo. Plast vode na površini kože ima večjo vrednost koeficienta toplotne prevodnosti kot plast mirnega zraka, ki je pred tem bil neposredno na površini kože. To pomeni, da se bo toplota s površine kože hitreje

prenašala v okolje, če je ta prekrita z znojem, kot če je suha. To je ugodno v vročem okolju, v relativno mrzlem okolju pa je to nezaželeno. Poleg tega obstaja še ena pomembna sprememba pri izgubi toplote glede na suho površino kože. Površina plasti vode je gladka in je mirna plast zraka neposredno na površini plasti znoja bolj gibljiva. Zaradi tega se pojavita dva učinka. Prvič, mirujoča plast zraka je manj debela oziroma daje manjši toplotni upor kot ustrezna plast na površini suhe kože, in drugič, pri enaki relativni hitrosti gibanja zraka na površini kože je plast mirnega zraka nad površino znojne kože laže gibljiva kot na površini suhe kože. Moramo upoštevati še dejstva, da je mirna plast zraka nasičena z vodno para. Posledica vsega tega je manjši toplotni upor, zaradi česar se več toplote izgubi v okolje. Skupni učinek teh sprememb je povečanje izgube toplote.

Če je oseba oblečena, se stanje nekoliko spremeni. V tem primeru je kos oblačila v neposrednem stiku s površino kože. Ko je hitrost izločanja znoja večja od hitrosti izhlapevanja, se začne površina kože prekrivati s tekočim znojem, ta pa začne pronicati v oblačilo. Pri procesu močenja se sprosti določena količina energije, ki ima negativno vlogo v vročem in pozitivno v mrzlem okolju. V vlažnem in mokrem oblačilu se zmanjša toplotni upor, kar je pozitivno v toplem okolju, ni pa primerno za mrzlo okolje, ker se poveča izguba toplote.

Pri projektiranju oblačila moramo upoštevati interakcijo znoja z oblačilom. Pri tem ni važna le sprememba termoizolacijske vrednosti oblačila, temveč tudi vpliv znoja na estetski videz (mečkanje in vidne površine, na katerih so ostali madeži zaradi nehlapljivih komponent znoja – soli). Poleg tega v oblačilu zaostajajo tudi aminokisline, ki se razkrajajo in povzročajo neprijeten vonj. Ker je znojenje izredno pomembno tako s fiziološkega stališča kot tudi s stališča pravilne izbire plasti oblačil, ga bomo podrobneje obravnavali v naslednjem poglavju.

3.3.3 Telesna temperatura

3.3.3.1 Mehanizem uravnavanja telesne temperature

V hipotalamusu možganov sta dva živčna centra; eden v sprednjem in drugi v zadnjem delu. Prvi reagira na zmanjšanje temperature organizma, drugi pa deluje v primeru, ko se temperatura organizma poveča. Če se organizem znajde v mrzlem okolju in se zaradi tega začne ohlajati, sproži prvi center reakcije, ki upočasnijo ohlajanje organizma, kot so: kurja polt (pilo-motorična reakcija), krčenje kapilar v bližini površine telesa in drgetanje. Posledica teh reakcij je stabiliziranje temperature v jedru telesa ali vsaj upočasnitev hitrosti zmanjševanja ohlajevanja. Obenem se znižava temperatura na površini kože.

Če organizmu grozi pregretje, se aktivira drugi živčni center, ki sproži nekatere aktivnosti, ki imajo ohlajevalni učinek, kot so: pospešeno dihanje pri živalih (na primer psih), razširitev kapilar v neposredni bližini površine telesa ter znojenje pri človeku. Te reakcije oziroma aktivnosti pospešujejo izgubo toplote. Iz tega lahko sklepamo, da aktivnost enega centra zavira aktivnost drugega. V normalnih okoliščinah sta oba centra v ravnovesju: to je takrat, ko doseže organizem območje ugodja.

Možgani se ne odzivajo samo na podlagi informacij (impulzov) s površine kože, ampak reagirajo tudi na spremembe lastne temperature, ki nastopi zaradi bolezni ali kakšnega drugega vzroka. Saj se včasih tresemo in dobimo kurjo polt, kljub temu da je temperatura površine kože v območju ugodja.

Ta kontrolni mehanizem ne deluje, če je prekoračena meja občutljivosti. Tako se na primer, če je organizem izpostavljen ekstremno nizkim temperaturam, zniža tempera-

tura jedra telesa pod 33 °C in se zmanjša intenziteta drgetanja. Če je srednja temperatura telesa med 27 °C in 30 °C, se človek počuti zaspanega. Če pa se srednja temperatura telesa zniža pod 27 °C, se upočasnita srčni utrip in dihanje. To stanje je zelo nevarno, ker lahko nastopi zamrznitev.

Telesna temperatura raste kot rezultat porušenega ravnovesja med proizvodnjo in izgubo toplote. Proizvodnja je večja od izgub. Zaradi tega se toliko časa povečuje intenziteta znojenja, dokler se ta mehanizem ne "izrabi" oziroma preneha učinkovati. S povečanjem telesne temperature se zaradi splošnega povečanja aktivnosti kemičnih reakcij v organizmu, pospeši metabolizem.

S povečanjem temperature v organizmu se povečuje tudi proizvodnja toplote, in to po logaritemski skali. Če se na primer poveča temperatura organizma za 10 °C, se poveča proizvodnja toplote za 2,3 do 2,9-krat. Če se srednja temperatura telesa poveča s 35,5 °C na 39,5 °C, se temperatura jedra telesa poveča s 37 °C na 40 °C. V tem primeru lahko izračunamo količino proizvedene toplote Q z enačbo (3.4) [23].

$$Q = \frac{10}{39,5 - 35,5} (Q_2 - Q_1) \tag{3.4}$$

kjer je Q_2 hitrost generacije toplote pri višji temperaturi telesa in Q_1 pri nižji temperaturi telesa. Če je $Q_1 = 210$ kJ/m^2.h (37 °C temperatura jedra telesa), je generacija toplote pri višji temperaturi (40 °C temperatura jedra telesa, kar je v tem primeru to tudi povprečna temperatura telesa) 294 kJ/m^2.h do 315 kJ/m^2.h.

V primeru, ko se zaradi nizke temperature okolja začne zniževati temperatura organizma, sproži prvi center pilo-motorično reakcijo podkožnega tkiva, zaradi česar se na koži pojavi kurja polt. Ta zmanjša gibljivost zraka na površini kože. Posledica tega je večji toplotni upor te plasti zraka, kljub temu da se je povečala površina kože.

Druga reakcija na mraz, ki jo sproži prvi center, je drgetanje. Pri tem sodelujejo mišice v treh različnih tipih reakcij. Prvi tip reakcije je hitro krčenje in sprostitev mišičnih vlaken. Pri tem se porabi energija za mehanično delo, proizvede pa se relativno majhna količina toplote. Pri drugem tipu reakcije povzroči kontrakcija mišičevja minimalno drgetanje in maksimalno mehanično učinkovitost. Tretji tip reakcije je drgetanje. Pri tem se porabi malo energije za opravljanje mehaničnega dela, proizvaja pa se maksimalna količina toplote za dano stopnjo aktivnosti. To je verjetno zato, ker pri tem tipu reakcije mišice delno rotirajo in vibrirajo (nihajo) in se le počasi krčijo. Posledica počasnega krčenja pa je majhna mehanična učinkovitost in majhna utrujenost.

Posledica reakcije na mraz omenjenega živčnega centra je tudi povečano izločanje adrenalina; to pa povzroča povečanje metabolizma. Intravenozno vbrizgavanje adrenalina poveča metabolizem 20 % do 30 %, kadar počivamo [24]. Izločeni adrenalin ne poveča samo metabolizma, ampak učinkuje tudi na podkožno tkivo tako, da širi ožilje v mišicah. S tem spodbuja tretji tip reakcije mišic – drgetanje, ki proizvaja največ toplote.

3.3.3.2 Povprečna telesna temperatura

Telesna temperatura je na določenem nivoju. Normalna temperatura jedra telesa je 37 °C, temperatura površine kože pa navadno med 33 °C in 34 °C. Temperaturni gradient je okrog 3 °C/cm. To velja predvsem za trup. Pri okončinah so lahko določena odstopanja, zlasti pri nizkih temperaturah ali pa pri intenzivnem delu mišičevja. Zaradi tega lahko rečemo, da okončine niso del centralne površine, pri kateri ostane temperatura na konstantnem nivoju tudi pri relativno, velikih spremembah vrednosti parametrov okolja ali intenzitete aktivnosti.

Ker ima površina kože nižjo temperaturo od jedra telesa, temperatura raste, ko gremo s površine proti notranjosti. Z drugimi besedami, če telo opazujemo kot valj, potem ima plašč tega valja nižjo temperaturo od jedra. Pri računanju povprečne temperature moramo upoštevati deleža obeh teh delov. Povprečno temperaturo telesa lahko izračunamo z enačbo (3.5).

$$T = aT_1 + bT_2 \tag{3.5}$$

kjer so T povprečna temperatura telesa, T_1 temperatura jedra telesa in T_2 povprečna temperatura površine kože.

Vrednosti koeficientov a in b se razlikujejo glede na metodo merjenja. Če merimo tako, da potopimo golo osebo v tekočo vodo, dobimo naslednje vrednosti koeficientov: a = 0,65 in b = 0,35 [25]. Če pa gola oseba leži na rjuhi, pokrita z ribiško mrežo pri temperaturi okolja 22 °C do 35 °C, potem sta vrednosti koeficientov a = 0,8 in b = 0,2 [26].

Če vzamemo, da sta specifični toploti plašča in jedra telesa približno enaki, potem nam koeficient a kaže delež mase jedra in koeficient b – delež mase plašča. Kot se vidi iz vrednosti koeficientov a in b, je delež mase plašča večji tedaj, ko je oseba oziroma njeno telo potopljeno v tekočo vodo, kot če je v zračnem okolju. To pa zaradi tega, ker oddaja telo toploto v okolje hitreje, če je okolje voda, kot če je zrak. V obeh primerih se razume, da je temperatura okolja nižja od temperature jedra telesa. Zaradi tega se bo meja začetka spremembe temperature jedra telesa pomaknila bolj v globino, posebej še v okončinah. Ta sprememba se kaže pri spremembi vrednosti koeficientov a in b v enačbi (3.5).

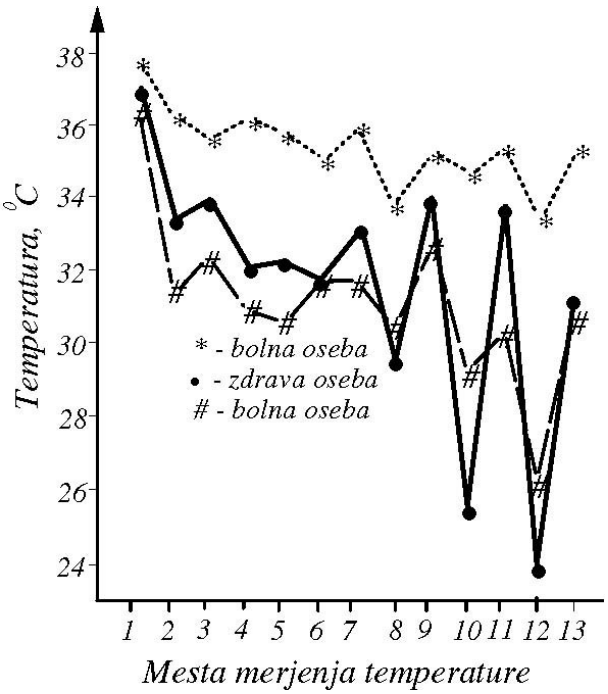
3.3.3.3 Porazdelitev telesne temperature

Povečanje hitrosti gibanja zraka skupaj z znojenjem ima prevladujočo vlogo pri zmanjšanju temperature površine kože [27, 28, 29]. Posledica tako zmanjšane temperature kože je povečanje deležev toplotnih izgub s pomočjo konvekcije in izhlapevanja znoja in zmanjšanje izgub s pomočjo radiacije. Izjemoma se lahko zmanjšajo izgube toplote s pomočjo konvekcije kljub povečanju hitrosti zraka; toda istočasno se povečajo izgube zaradi izhlapevanja znoja. Med težkim delom mora biti najvišja temperatura v mišicah in ne v jedru telesa. V tem primeru dobi jedro dodatno toploto od mišičevja.

Pri teku na dolge proge blizu svetovnega rekorda se dvigne temperatura v jedru telesa na 41 °C; v posameznih skupinah mišičevja, ki zelo intenzivno delajo pri teku, pa mora biti temperatura še višja – od 42 °C do 43 °C [30].

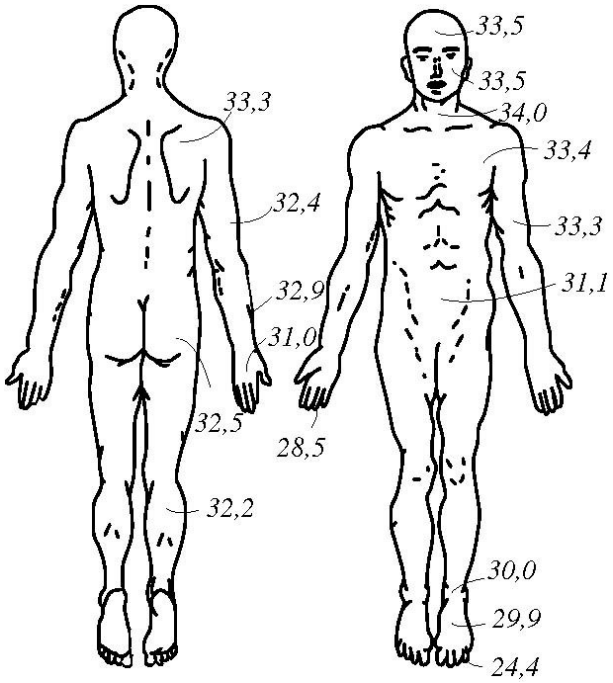
Na sliki 3.1 je prikazana porazdelitev temperature na površini kože. Obenem je prikazana temperatura jedra telesa. Te temperature so izmerjene na goli osebi v zaprtem prostoru. Temperatura zraka v tem prostoru je bila 24 °C. Temperature na prikazanih lokacijah so merjene eno uro potem, ko je bila oseba že eno uro gola v prostoru [31]. Mesta merjenja: 1 – rektum, 2 – trup, 3 – glava, 4 – roka, 5 – stegno, 6 – komolec, 7 – zapestje, 8 – noga, 9 – roka, 10 – stopalo, 11 – prsti roke, 12 – prsti noge in 13 – povprečna temperatura na površini kože. Krivulja * se nanaša na hiper-tiroidnega pacienta, ki ima bazalni metabolizem 72 % nad normalno vrednostjo. Krivulja • se nanaša na zdravo osebo. Krivulja # se nanaša na hiper-tiroidnega pacienta, ki ima bazalni metabolizem 47 % pod normalno vrednostjo.

Na sliki 3.2 je prikazana porazdelitev temperature na površini telesa gole osebe z natančno označenimi mesti, na katerih je bila merjena temperatura površine kože [32]. Porazdelitev temperature, prikazane na sliki 3.1 (polna linija) in 3.2, veljajo za normalnega zdravega človeka. Meritve so izvršene v približno enakih okoliščinah. Nekatere

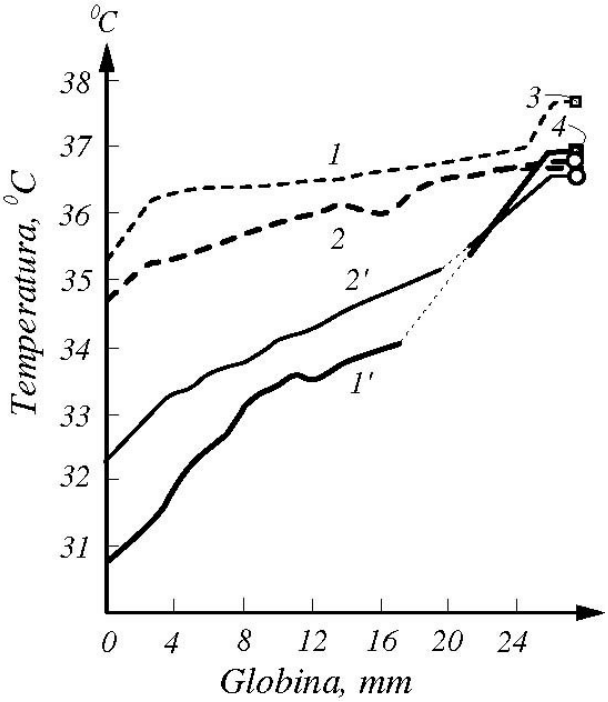


Slika 3.1: Porazdelitev temperature na površini kože in v jedru telesa gole osebe. [31]

vrednosti se med seboj nekoliko razlikujejo. Na sliki 3.2 je več merilnih mest kot na sliki 3.1. Sprememba temperature v odvisnosti od globine je prikazana na sliki 3.3. Krivulji 1 in 2 veljata za dve osebi, pri katerih je bila merjena temperatura notranjosti podlakti (0 mm temperatura površine kože) v vročem poletnem dnevu pri temperaturi 29,1 °C. Spodnji krivulji 1′ in 2′ veljata za isti osebi, meritev pa je potekala jeseni pri temperaturi 19 °C, 3 – temperatura v rektumu, 4 – temperatura urina [33]. Na desni strani slike sta prikazani še temperatura jedra telesa, točka 3 in temperatura urina točka 4.



Slika 3.2: Porazdelitev temperature (°C) na površini kože gole osebe v coni ugodja. [32]



Slika 3.3: Sprememba temperature v odvisnosti od globine na podlakti (0 mm je temperatura na površini kože). [33]

3.3.3.4 Vloga živčnih centrov pri uravnavanju telesne temperature

Funkcije živčnih centrov moramo opazovati povezano z visokim nivojem metabolizma tkiva centralnega živčnega sistema. Med počitkom sprejme centralni živčni sistem 0,75 l krvi na minuto in koristno izrabi 46 ml/min kisika glede na sprejeto količino 150 ml/min [34, 35, 36]. Centralni živčni sistem tehta le okrog 2 % celotne mase telesa, porabi pa okrog 20 % celotne porabljene količine kisika. Kljub temu da je metabolizem možganov relativno velik zaradi velikega pretoka krvi skozi možgane, ne more bistveno vplivati na povečanje temperature krvi. Izjemoma se to lahko zgodi le na posameznih lokacijah. Preračuni kažejo, da je venozna kri, ki zapušča možgane, le 0,2 °C do 0,3 °C toplejša od arterijske krvi, ki prihaja v možgane. Temperatura možganov se lahko hitro spremeni kot posledica spremembe temperature krvi. Tudi lokalno segrevanje okončin lahko povzroči določeno povečanje temperature arterijske krvi v jedru telesa. Ta sprememba temperature se zgodi v 3 do 4 minutah. Temperatura krvi, ki zapušča lobanjo – merjena v predelu vratu, je le nekoliko višja od temperature arterijske krvi.

Centralni kontrolni center regulira delovanje dvojnih pomožnih centrov. Hipotalamus je sam po sebi velik center, ki koordinira številne življenjske funkcije. Tukaj se kontrolira temperatura, količina vode v organizmu, dotok in poraba goriva (ogljikovi hidrati in maščobe), vazo-motorična uravnava transportnega sistema, uravnava kemičnih produktov notranjega izločanja ipd. Te funkcije so med seboj povezane. Celice, ki so sestavni del centra kontrole temperature, se ne izključijo pri delovanju delov centra, ki uravnavajo vodno ravnovesje v organizmu pri delovanju vazo-motoričnega transportnega sistema. Z drugimi besedami, vsi centri medsebojno sodelujejo tako, da vse funkcije organizma delujejo optimalno.

Prej omenjeni podatek o teži centralnega živčnega sistema in deleža porabe kisika nam pove, da centralni živčni sistem porabi okrog 10-krat več goriva kot povprečno

celotni organizem. Zaradi tega morata biti tudi dotok hranljivih snovi (goriva) in hitrost izgorevanja (presnova) temu primerna. Povedali smo že, da se presnova povečuje s povečanjem temperature, tako da se poveča 2 do 3-krat pri povečanju temperature za vsakih 10 °C. Posledica takšne povezave je, da v določenih pogojih odpove termo-statika. Namreč, čim višja je temperatura, tem večja je proizvodnja toplote. To lahko pripelje do pregretja organizma oziroma do toplotnega šoka.

Pri presnovi potekajo različne kemične reakcije. Ene so termo-stabilne, druge pa ne. Pri tem mislimo na interval temperatur, ki jih lahko ima jedro telesa. Nekatere kemične reakcije se upočasnijo pri višjih temperaturah. Če je določena kemična reakcija odvisna od termo-labilnega katalizatorja, se mora takšna reakcija upočasniti ali prenehati na temperaturi, pri kateri se razkroji katalizator.

Temperaturo uravnava sprednji (anterior) center s pomočjo izhlapevanja znoja. Zadnji (posterior) center je verjetno precej bolj primitiven kot sprednji. Zadnji center je sposoben uravnavati temperaturo telesa celo v primeru, ko je odsoten center, ki uravnava izgubo toplote. Le v primeru ekstremnih temperatur okolja (previsoke ali prenizke) odpove mehanizem kontrole temperature. S pomočjo refleksa hrbtnega mozga pri mački je izmerjeno, da je za pravilno uravnavanje temperature optimalna temperatura jedra telesa 35 °C do 38 °C. Zunaj tega intervala se občutljivost reakcije na spremembo temperature zmanjšuje [37].

Če se temperatura jedra zniža pod 35 °C, se ožilje skrči in drgetanje se lahko nadaljuje. Ker je površina kože mrzla, je čutni učinek dovolj intenziven, da se lahko nadomesti vsaka začetna izguba občutljivosti v živčnem centru. Zvišanje aktivnosti pri visokih temperaturah se lahko omeji z neadekvatnim dovajanjem kisika. To posebej velja za zadnji center. Nasprotno pa sprednji center, ki je zelo občutljiv za spremembo temperature in ustrezno prekrvavitev, lahko uravnava temperaturo precej učinkoviteje pri višjih temperaturnih nivojih.

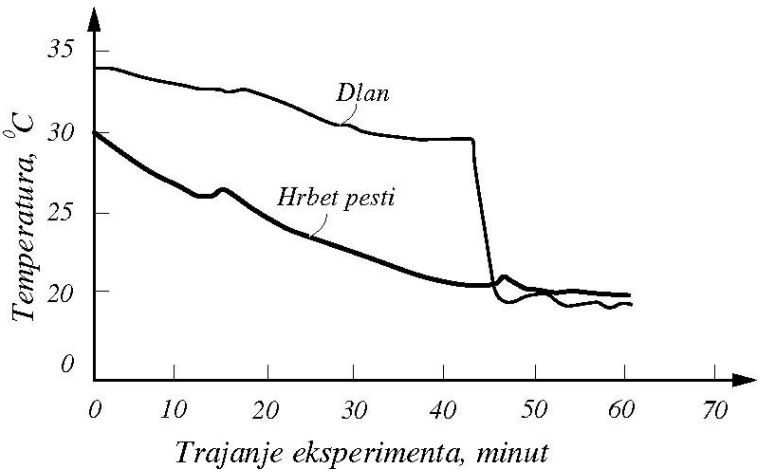
3.3.3.5 Vloga senzornih in refleksnih (efektornih) faktorjev pri uravnavanju višine temperature

Novejša dognanja o hitrosti pretoka krvi v možganih in visokem metabolizmu v njih, teoretično omogočajo povečanje temperature v možganih celo takrat, ko se zniža temperatura jedra telesa. V začetni fazi ohlajevanja pride do zožitve ožilja, zaradi česar se upočasni dotok ohlajene krvi iz plašča telesa (koža in podkožno tkivo). Posledica tega je lahko prehodno povečanje temperature jedra telesa in temperature krvi v aortah. V tem primeru se lahko poveča temperatura možganov hitreje kot temperatura jedra telesa.

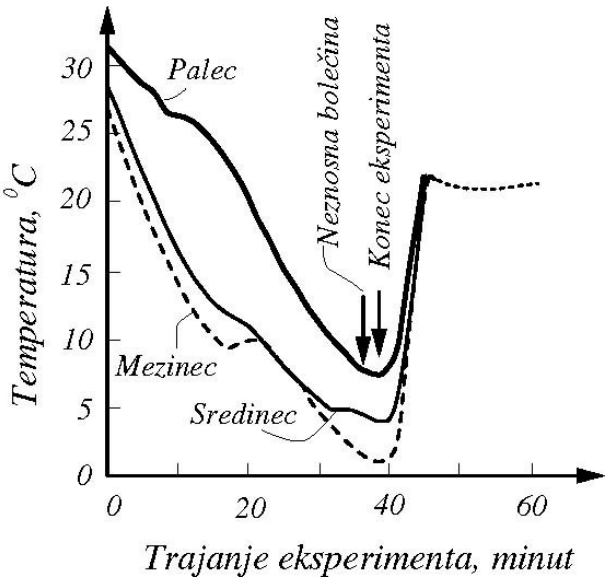
Zaradi ohlajevanja površine kože se zmanjša razlika temperature med površino kože in okoljem, kar povzroči zmanjšanje hitrosti oddajanja toplote s površine kože v okolje. Kot smo že omenili, se zmanjšajo izgube toplote podkožnega tkiva. Ta upor se poveča zaradi zoženja ožilja in upočasnjenega krvnega obtoka v podkožnem tkivu. Posledica vseh teh sprememb je postopno in upočasnjeno ohlajevanje organizma. Če ne bi nastopile omenjene spremembe, se ne bi zmanjšala hitrost izmenjave toplote z okoljem. V tem primeru bi lahko v kratkem času nastopile velike razlike med proizvodnjo in izgubo toplote. Ta razlika bi se lahko nadomestila le z energijo, ki je nakopičena v tkivu. Posledica takšnega mehanizma bi bilo relativno hitro ohlajanje organizma.

Če se pod določenimi pogoji aktivira refleks širjenja ožilja, bo prišla večja količina krvi v podkožno tkivo. Pri tem se bo zmanjšal toplotni upor podkožnega tkiva. S tem se poveča prenos toplote s kondukcijo skozi to tkivo, pri čemer se povečajo toplotne izgube s površine kože [38]. Ohlajena kri se bo vrnila po venoznem ožilju v notranjost telesa

in bo ohlajala arterijsko kri. Ta mehanizem zakrije povečanje temperature na periferiji telesa. Ilustriran je na slikah 3.4 do 3.6 [39, 40].



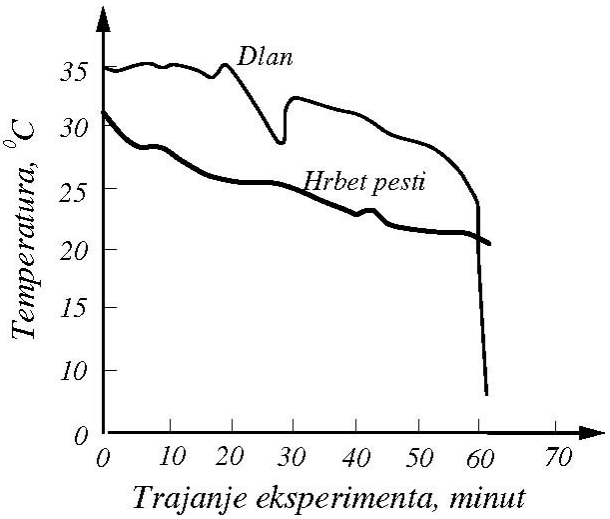
Slika 3.4: Sprememba temperature dlani in hrbta pesti leve roke v odvisnosti od časa, ko sta bili v hladilni skrinji (do 40 minut) in pri sobni temperaturi (po 42 minutah). [39, 40]



Slika 3.5: Sprememba temperature na nekaterih prstih leve roke poskusne osebe v odvisnosti od temperature okolja in časa izpostavljenosti tej temperaturi. [39, 40]

Tehnolog (projektant oblačila) ne pozna fiziologije, kar velja tudi za fiziologa glede lastnosti oblačila. Zaradi tega bi morala ta dva profila strokovnjakov tesno sodelovati. To se običajno tudi realizira pri različnih projektih, ki se nanašajo na zaščito človeka v določenih okoljih (ekstremno nizke temperature okolja, specifična delovna mesta: kozmonavtka, potapljanje, zaščita pred strupenimi plini ipd. V vsakdanjem življenju tega sodelovanja v glavnem ni. Zaradi tega naj bi se projektant oblačil, ki jih uporabljamo pri več ali manj "normalnih" pogojih, se pravi pri temperaturah približno +40 °C do -40 °C, seznanil vsaj informativno s tistim delom fiziologije, ki zadeva problematiko oblačenja.

Da bi projektant oblačila dobil občutek o pojavih pri ohlajevanju in segrevanju organizma, bomo opisali eksperiment ohlajanja in segrevanja pesti, ki je bila zaščitena



Slika 3.6: Sprememba temperature dlani in hrbta pesti desne roke v odvisnosti od časa držanja pesti v hladilni skrinji in spremembe po nekaj minutah pri sobni temperaturi. [39, 40]

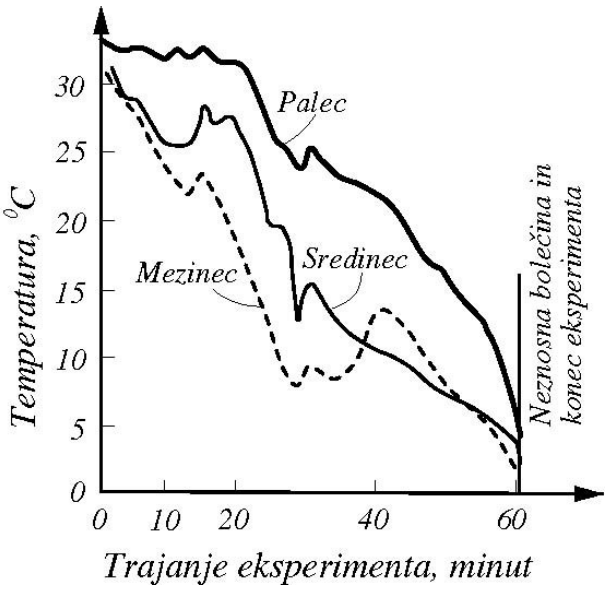
z rokavico. Na splošno je najbolj problematična zaščita roke pri nizkih temperaturah, zlasti če poskušamo obdržati nezmanjšano funkcionalnost prstov in pesti.

Oseba je sedela v topli sobi s temperaturo 20 °C. Roke (pesti) je imela določen čas v mrzli skrinji pri temperaturi -16 °C. Na rokah je imela rokavice. Rokavica na levi roki je imela manjši toplotni upor kot rokavica na desni roki. Leva roka je bila v hladilni skrinji 42 minut, desna pa 61 minut. V levi roki je oseba začutila neznosno bolečino po 42 minutah, v desni pa po 61 minutah bivanja v hladilni skrinji.

V trenutku, ko je dala oseba levo roko v zamrzovalnik (čas nič), je bila temperatura dlani nekaj manj kot 34 °C in temperatura na hrbtni strani dlani nekaj več kot 30 °C. Po 42 minutah se je temperatura notranje strani dlani znižala na 30 °C in temperatura površine hrbtne strani dlani na 20 °C. Naslednjih 20 minut se pri temperaturi okolja 20 °C temperatura hrbtne strani dlani ni spremenila. Štiri minute potem, ko je oseba izvlekla dlan iz zamrzovalnika in se je zelo hitro znižala temperatura dlani s 30 °C na nekaj manj kot 20 °C kljub temu, da se je temperatura okolja zvišala s -16 °C na +20 °C. To spremembo temperature dlani pojasnimo s porazdelitvijo toplote v dlani. Kot vidimo iz slike 3.5, je bila temperatura na površini mezinca le nekaj nad 0 °C, sredinca okrog 4 °C in palca okrog 7 °C. Te temperature so bile izmerjene, ko je bila dlan že 42 minut v zamrzovalniku in je oseba začutila bolečino, ki je ni mogla več prenašati. Ko pa je bila dlan zunaj hladilne skrinje, so se prsti začeli ogrevati. pri tem je prišlo do razširjanja ožilja in iz prstov se je vračala mrzla venozna kri, ki je ohladila arterijsko kri v dlani. Zaradi tega je prišlo do drugačne porazdelitve toplote v dlani. Iz slike 3.5 je tudi razvidno, da se v 20 minutah pri sobni temperaturi 20 °C temperatura dlani ni dvignila nad temperaturo okolja. Iz tega sledi, da potrebujemo dalj časa, da se normalizira temperatura podhlajenega dela telesa oziroma v našem primeru roke (dlani). Zanimivo je tudi dejstvo, da se na primer temperatura na površini malega prsta zniža skoraj na 0 °C brez resnejših poškodb.

Po 10 minutah držanja pesti v zamrzovalniku, je oseba čutila mraz v prstih; po 20 minutah jo srednje zeblo v celotni dlan; po 30 minutah pa jo je v dlani zelo močno zeblo in po 42 minutah je čutila neznosno bolečino. Približno v tem času je bila tudi dosežena najnižja temperatura v prstih.

Na slikah 3.6 in 3.7 je prikazan potek spremembe temperature desne pesti v odvisnosti od časa v že opisanem preizkusu. Slika 3.6 se razlikuje od slike 3.4 v tem, da se zniža temperatura dlani na okrog 7 °C, in sicer zaradi porazdelitve toplote, potem ko oseba izvleče roko iz hladilne skrinje. Temperature mezinca, sredinca in palca so na koncu preizkusa približno izenačene in so le nekaj nad 0 °C. Ta preizkus nam jasno kaže, pri kateri temperaturi je meja občutljivosti in kako vpliva termoizolacijska plast (rokavice) v času, v katerem se doseže ta točka.



Slika 3.7: Spremembe temperature na nekaterih prstih desne roke v odvisnosti od časa držanja pesti v hladilni skrinji in temperature okolja. [39, 40]

Pri testih občutljivosti na mraz vidimo, da mraz povzroči neznosno bolečino, slabost ali celo nezavest. Kot vidimo iz slik 3.5 in 3.7, je bolečina dejansko indikator hitrosti hlajenja. Bolečina se ne pojavi pri določeni temperaturi; bolj verjetno je, da se pojavi pri določeni hitrosti spremembe temperature. Če na primer zelo hitro potopimo pesti v ledeno mrzlo vodo, se pojavi takoj zelo močna bolečina. Če pa se hitrost hlajenja upočasni, se lahko prsti roke shladijo na 4 °C v času od 15 do 30 minut brez neznosne bolečine. Če pa se roke postopoma ohladijo v zaprtem prostoru pri temperaturi 7 °C, tako da oseba sedi oblečena 30 ali več minut, je možno potopiti roke v ledeno mrzlo vodo in jih pustiti v njej brez občutka bolečine, kljub temu, da je pri takšni temperaturi običajno bolečina neznosna.

Bolečina je manj znosna v primeru, ko je večja površina telesa izpostavljena hlajenju. Če je izpostavljena hlajenju majhna površina – vrh prsta v ledeno mrzli vodi, se pojavi sicer močna bolečina, ki pa je še znosna. Če se ud hitro shladi, se bolečina pojavi neposredno po veliki hitrosti znižanja temperature na tem mestu.

Hitrost pretoka krvi se upočasni zaradi zožitve ožilja in zaradi povečanja viskoznosti krvi. Hitro širjenje ožilja, verjetno povzročeno kot reakcija na bolečino, privede do zvišanja temperature opazovanega dela telesa, ki ga damo v okolje z višjo temperaturo. Točka občutljivosti za bolečino zaradi vročine (prenos toplote z radiacijo), se pojavi pri hitrosti sprejemanja toplote 0,916 J/cm^2.s, toda le takrat, če se toplota sprejema najmanj tri sekunde [41]. Mogoče obstaja podobna točka občutljivosti za mraz [42], ni pa nujno, da ima enako vrednost.

3.3.3.6 Občutljivost za vročino in mraz

Dejanska občutljivost za temperaturo se razlikuje od občutljivosti za bolečino zaradi vročine. Ta razlika je v tem, da se prag občutljivosti za temperaturo doseže že pri dosti manjših temperaturnih spremembah. Točka občutljivosti za spremembo toplote (temperature) je približno 1/1900 točke občutljivosti za bolečino, ki jo povzroči vročina. Sprememba toplote se lahko zaznamuje že pri sprejemu 0,00063 J/cm^2.s [43, 44, 45] pod pogojem, da stimulacija traja vsaj tri sekunde. Točka občutljivosti je bila ugotovljena z radiacijo toplote kot stimulatorjem. Ta hitrost dovajanja toplote ustreza hitrosti povečanja temperature 0,001 °C/s za toploto. Enaka hitrost pa je ustrezna zmanjšanju temperature 0,004 °C/s za mraz. Tako občutljivosti za toploto lahko izračunamo z enačbo (3.6) [43].

$$\log\left(\frac{I}{4,2}\right) + 0,78(\log A) = 2,09 \tag{3.6}$$

kjer je I intenziteta radiacije, J/cm2.s in A površina, izpostavljena radiaciji, cm^2.

Dejstvo, da intenziteta občutka za spremembo toplote ni odvisna samo od intenzitete radiacije, ampak tudi od površine kože, ki je izpostavljena radiaciji, je zelo pomembno pri kontroli občutljivosti za spremembe temperature v času hitre prilagoditve v novih okoliščinah.

3.3.4 Prilagoditev mrazu in vročini

3.3.4.1 Prilagoditev mrazu

Predpostavimo, da je oblečena oseba izpostavljena temperaturi okolja 30 °C in se ta nenadno zniža pod 20 °C. V tem okolju z nižjo temperaturo pustimo osebo dalj časa. Začetno hlajenje površine kože poveča temperaturni gradient, obenem pa se stimulirajo čutila za zaznamovanje mraza. Ta reakcija nastopi v nekaj minutah po spremembi temperature okolja. Posledice te reakcije so krčenje ožilja neposredno pod površino kože, pilo-motorične reakcije, kurja polt, ki zmanjšujejo gibljivost zračne plasti neposredno nad površino kože, pilo-motorične reakcije, kurja polt, ki zmanjšujejo gibljivost zračne plasti neposredno nad kože in celo drgetanje. Temperatura površine kože se počasi začne zniževati. Proces ohlajevanja je počasen zaradi vpliva precej visoke toplotne kapacitete kože in podkožnega tkiva. Pri tem ohlajevanju se lahko zgodi, da se nekoliko poveča temperatura jedra telesa in možganov kot posledica spremenjene porazdelitve krvi in upočasnjenega gibanja venozne krvi. Kljub upočasnjenemu gibanju bo ohlajena kri, ki se vrača s površine, sčasoma le znižala temperaturo centralnih delov telesa. Temperatura jedra telesa se bo znižala na normalni nivo ali celo niže, zlasti, če je ta nivo v vročem okolju višji od povprečnega nivoja telesne temperature.

Vene v površini kože se skrčijo in so skoraj zunaj krvnega obtoka. Ohlajena venozna kri se vrača k srcu in hladi arterijsko kri, ki se giblje k površini telesa. Pri tem se venozna kri segreva. Takšna izmenjava toplote omogoča, da mrzla venozna kri ne pride v globino telesa in se temperaturi ene in druge krvi postopoma izenačita. V nogah pingvina je arterija v veni, kar omogoča hitrejše izenačenje temperatur ene in druge vrste krvi. Pri takšnem sistemu se kroženje krvi ne zaustavi. Izgube toplote so relativno majhne zaradi zmanjšanja temperaturne razlike glede na temperaturo okolja in zaradi tega, ker je le majhna površina stopal v neposrednem stiku s tlemi oziroma snegom. Ko pingvin stoji pri miru na snegu, dvigne prste nog v zrak. Zaradi tega sta le zadnja dela stopal v neposrednem stiku s snegom ali ledom.

Pri človeku je venozno in arterijsko ožilje drugo poleg drugega. Zato prenos toplote ni tako učinkovit, kot če bi bilo ožilje drugo v drugem, vendar dovolj učinkovit za

ekonomijo toplote. Postopoma pa se arterijska kri, ki se transportira v neposredno bližino površine ohladi na temperaturo, ki je le nekoliko višja od temperature površine kože. To velja posebej za okončine, ki jih doseže ohlajena arterijska kri. Ta prinaša kisik in hranljive snovi. Pri tem je izmenjava toplote z okoljem na najnižji možni ravni [46].

V procesu adaptacije se venozno ožilje krči v neposredni bližini delov površine kože, na katerih se je znižala temperatura. Zaradi tega pride do zmanjšanja količine krvi v prizadetih delih plašča telesa. V začetku se poveča krvni tlak, toda po nekaj urah vpliva mrzlega okolja se lahko zniža, verjetno zaradi povečanja prostornine vranice. Potek krčenja ožilja v koži se tudi lahko upočasni, verjetno zaradi težav pri porazdelitvi krvi v druge organe. Če pa se ožilje skrči in se pri tem ne razširi prostornina vranice, mora priti do zmanjšanja prostornine krvi. Da bi bila ta predpostavka uresničena, bi morala biti najprej odstranjena tekočina, ki povzroča povečanje koncentracije proteinske plazme. V resnici se v nekaj urah odstrani precej proteinske plazme; to omogoča postopno uresničitev predpostavke o zmanjšanju prostornine krvi z normalno koncentracijo proteina v nekaj dneh [47]. Zmanjšanje toplotnih izgub pri prej omenjeni prilagoditvi je posledica zmanjšanja temperaturne razlike med površino kože in okoljem ter povečanja toplotnega upora podkožnega tkiva. Vrednost upora navadno ne presega 0,034 $m^2.h.^\circ C/kJ$, razen pri osebah, ki imajo več mastnega tkiva. Toplotni upor se lahko poveča zaradi povečanega toplotnega upora plasti zraka na površini kože pod določenimi pogoji. Toplotni upor plasti zraka se poveča zaradi zmanjšanja gibljivosti zraka na površini kože, zaradi zmanjšanega izhlapevanja s površine kože, ki je posledica zmanjšanja temperature površine kože in podkožnega tkiva in zaradi zmanjšanja sevanja in konvekcije. Izjema so lahko pesti in stopala, pri katerih se arterijska kri ohladi, preden sploh pride do površine prstov. Zaradi tega se zmanjša temperaturni gradient, kar povzroči, da se zmanjšajo izgube toplote s sevanjem in konvekcijo na zelo majhne vrednosti. V tem primeru se izhlapevanje ne spreminja sorazmerno s spremembo temperaturnega gradienta. Delež izgube toplote zaradi izhlapevanja je lahko na teh površinah relativno velik.

Ne spreminja se samo izguba toplote, ampak tudi njena proizvodnja. Če nastopi drgetanje, se lahko poveča proizvodnja toplote kot posledica povečanega izločanja adrenalina , kar pa zaenkrat pri človeku še ni dokazano. Po določenem času se zniža temperatura na površini kože, ohladi se podkožno tkivo, občutki so lahko napačni. Konice živcev na površini kože ne reagirajo normalno, posebno pri bolnem subjektu, in ne povzročajo refleksa drgetanja. Na spremembe temperature v globini telesa lahko telo ne reagira in se ne aktivira mehanizem drgetanja, ali pa se ne aktivira, kljub podhladitvi. Če je aktiviran, preneha delovati pri veliki ohladitvi telesa. Počasen pretok krvi pod kožo in v podkožnem tkivu ima mogoče neposreden vpliv na znižanje temperature v ožilju podkožnega tkiva ter na povečanje viskoznosti krvi. Pod temi pogoji lahko preneha drgetanje in s tem dodaten vir toplote.

Ni popolnoma jasne indikacije za povečanje aktivnosti žleze ščitnice pri človeku, ki bi bila reakcija na mraz. Obstaja pa posredna indikacija za zmanjšanje njene aktivnosti v toplem okolju. Če je bilo zmanjšanje aktivnosti spodbujeno v začetku pojava vročine, se lahko pričakuje normalno stanje njene aktivnosti v nekaj dneh. V času prilagajanja se zmanjša prostornina proteinske plazme. Ta mehanizem olajša zmanjšano kroženje krvi, ki je posledica krčenja podkožnega tkiva.

Večje ugodje se doseže v nekaj dneh ali tednih od izpostavitve mrzlemu okolju. V tem času se, v glavnem, doseže prilagoditev. Popolna prilagoditev mrazu se doseže v nekaj mesecih ali celo v nekaj letih. Zaenkrat še premalo vemo o poteku in stopnji prilagoditve mrazu.

3.3.4.2 Prilagoditev vročini

Za študij procesa prilagajanja na vročino, bomo opazovali osebo, ki se je aklimatizirala na temperaturo okolja 21 °C. Naenkrat zvišamo temperaturo okolja na 32 °C ali več. Začetni učinek se kaže v segrevanju površine kože in v ustreznem zmanjšanju temperaturnega gradienta v plitvi coni (neposredno pod kožo), ki je v zvezi z občutkom za mraz. Poleg tega se obratno spreminja temperaturni gradient v globini telesa, kar je v zvezi z občutkom toplote. Sprememba – zmanjšanje temperaturnega gradienta v plitvi coni bo olajšalo de-aktiviranje čutil za mraz, kar bo povzročilo postopno širjenje skrčenega ožilja. Po drugi strani bo to širjenje vplivalo na spremembo temperaturnega gradienta v globini telesa in na popolno odstranitev občutka mraza.

Širjenje ožilja povzroča povečan dotok krvi v mrzlo površinsko cono telesa. Ta kri se shladi in pri vrnitvi v globino telesa hladi arterijsko kri, ki teče proti površini kože. Ta proces upočasni dvig temperature na površini kože. Poleg tega se venozna kri ne segreje dovolj, preden pride do srca. Posledica tega je znižanje temperature jedra telesa in verjetno temperature možganov. Takšno stanje je podobno stanju, ki povzroči močan mraz in lahko nastane celo drgetanje.

Toplotna regulacija v vročini je bolj odvisna od spremembe temperature notranjosti telesa kot od reakcije čutil. Zaradi tega se razlikuje od delovanja centra za konzerviranje toplote. Posledica tega je zakasnitev reakcije, ki sproži potenje; izjemoma se lahko pojavi brez povečanja temperature notranjosti.

Vpliv, ki ga povzroča segrevanje, se hitro širi skozi tkivo. Ravnovesje se doseže hitreje kot med hlajenjem. Širjenje ožilja in hitri obtok krvi izenačujeta temperaturo v celem telesu. Površinska plast telesa, ki je bila v prejšnjem procesu ohlajena, se segreva tako zaradi sprejemanja toplote iz toplega okolja kakor tudi zaradi sprejemanja toplote iz notranjosti telesa. Če ni bilo telo preveč ohlajeno, se segreje v eni uri, takrat se že začenja znojenje.

Znojenje se nadaljuje tako dolgo, dokler je oseba izpostavljena toplemu okolju, ki ne dovoljuje vrnitve v cono ugodja. Znojenje se zmanjša, ko se telo vsaj delno prilagodi toplemu okolju ali ko se zmanjša količina oblačila ali intenzivnost aktivnosti oziroma proizvodnja toplote.

Precejšnja razširitev ven površinskega ožilja povzroča povečanje količine krvi v koži, to pa zopet povzroči precejšnje skrčenje vranice. Srednje toplo okolje lahko povzroči padec krvnega tlaka. Toplota, ki povzroča širjenje in napetost, pa povzroči povečanje krvnega tlaka.

Le tedaj, ko se poveča prostornina krvi, se lahko napolnijo razširjene vene, ne da bi istočasno prišlo do intenzivnejšega krčenja vranice. Širjenje površinskih ven doseže maksimum morda po nekaj dneh, ko je prostornina krvi že spremenjena. Začetno povečanje prostornine krvi je odvisno od absorpcije tekočine, toda brez povečanja skupne količine hemoglobina in z majhno spremembo skupne količine proteinske plazme.

Začetne spremembe so hitre, toda omejene. Po nekaj dneh se občutno poveča količina proteinske plazme. Povečanje količine proteina ni tako hitro, kot njegovo zmanjšanje v mrzlem okolju [47]. V eksperimentalnih razmerah povečanje količine hemoglobina ni bilo ugotovljeno [48].

S povečanjem prostornine krvi in širjenjem površinskega ožilja se vrača večina krvi iz okončin prej v površinske vene kot v glavne vene. Potemtakem doseže površino telesa brez poprejšnje podhladitve in lahko ugotovimo visoko površinsko temperaturo pesti in stopal. Temperatura na tej stopnji segrevanja je nižja v conah, ki so nekoliko oddaljene od površine. V tej fazi segrevanja se ne segreva venozna kri, ko se vrača v notranjost,

ampak se hladi. Pod temi pogoji je lahko površinska temperatura prstov rok večja kot površinska temperatura komolca.

Prilagoditev na vročino se doseže v enem tednu, popolnoma pa se prilagodi telo verjetno šele v nekaj mesecih. Poleg sprememb v ožilju in krvi verjetno zajema prilagoditev tudi hipertrofijo znojnih žlez kot rezultat njihove aktivnosti. Izločeni znoj vsebuje manj soli, kar omogoča, da se le-ta ohrani v organizmu. Včasih se zmanjša bazalni metabolizem kot rezultat zmanjšane aktivnosti ščitnice. To zmanjšanje pa je relativno majhno.

3.4 Seznam oznak poglavja

Oznaka	Enota	Opis
λ	J/m.h.°C	koeficient toplotne prevodnosti podkožnega tkiva subjekta
a	/	koeficient
A	cm^2	površina izpostavljena radiaciji
b	/	koeficient
d	m	debelina podkožnega tkiva
I	$J/cm^2.s$	intenziteta radiacije
Q	J	količina toplote
Q_1	J	količina generirane toplote pri nižji temperaturei telesa
Q_2	J	količina generirane toplote pri višji temperaturei telesa
R_a	m^2.h.°C/J	toplotni upor mirujoče plasti zraka
R_c	m^2.h.°C/J	toplotni upor
S	m^2	površina kože
t	h	čas merjenja izžarevanja toplote
T	°C	povprečna temperatura telesa
T_1	°C	temperatura jedra telesa
T_2	°C	temperatura okolja
T_2	°C	povprečna temperatura površine kože
v	m/s	relativna hitrost zraka

3.5 Literatura

[1] et al. Barton, A. C. *Čelovek v uslovijah holoda*. Inostranaja literatura, 1957.

[2] A. P. Gagge and J. A. J. Stolwijk. Comfort and thermal sensations and associated physiological responses during exercise at various ambient temperatures. *Environmental Research*, 2(3):209–229, 1969. https://doi.org/10.1016/0013-9351(69)90037-1 (13. april 2018).

[3] et al. Bykov, K. M. *Učbenik fizoologii*. Medgis, 1951.

[4] D.J. Hardy, Du Bois F. E., and G. F. Soderstrom. The technic of measuring radiation and convection: one figure. *The Journal of Nutrition*, 15(5):461–475, 1983. https://doi.org/10.1093/jn/15.5.461 (13. 4. 2018).

[5] et al. Kričagin, V. I. *Razrabotka metodov higieničeskoj ocenki odeždi letnogo i tehničeskogo sestava VVS v polevih i laboratornyh usloviah*. Otčet, 1960.

[6] I. Đuričić and M. , Savićević, editors. *Medicina rada. Izdanje 2., dopunjeno i prerađeno izd.* Nakladnik Beograd; Zagreb, 1966.

[7] L. H. Newburgh, editor. *Physiology of Heat Regulation and the Science of Clothing*. W. B. Saunders Co. Philadelphia & London, 1949.

[8] D. M. Kerslake, editor. *Textiles for comfort. 3th Shirley International Seminar*. Manchaster, 1971.

[9] P. E. Galvão. Heat production in relation to body weight and body surface. inapplicability of the surface law on dogs of the tropical zone. *American Journal of Physiology*, 148:478–489, 1947. https://doi.org/10.1152/ajplegacy.1947.148.2.478 (13.4.2018).

[10] S. M. Horvath, F. A. Hitchcock, and F. A. Hartman. Response to cold after reduction of adrenal tissue. *American Journal of Physiology*, 121(1):178–184, 1937. https://doi.org/10.1152/ajplegacy.1937.121.1.178 (13.4.2018).

[11] L. H. Newburgh, F. H. Wiley, and F. H. Lashmet. A method for the determination of heat production over long periods of time. *Journal of Clinical Investigation*, 10(4):703–721, 1931. https://dm5migu4zj3pb.cloudfront.net/manuscripts/100000/100377/JCI31100377.pdf (17.4.2108).

[12] E. D. Mason. Daily measurements of basal metabolism, body temperature and pulse rate during a journey to the tropics. *Indian J. Med. Res.*, 32(1):27–30, 1944. https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19452900402 (12.4.2018).

[13] G. V. Cicenko. Radiacionnyj balans poverhnosti tela čeloveka v različnyh klimatičeskih uslovijah na territorii sssr. *Trudy GGO*, pages 122–129, 1967.

[14] L. H. Love. Heat loss and blood flow of the feet under hot and cold conditions. *Journal of Applied Physiolgy*, 1(1):20–34, 1948. https://doi.org/10.1152/jappl.1948.1.1.20 (12.4.2018).

[15] M. Nielsen. Die regulation der körpertemperatur bei muskelarbeit. *Skandinavisches Archiv – Physiologie*, 79(2):13–51, 1938. https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.1938.tb01246.x| (13.2.2018).

[16] A. P. Gagge, A. C. Burton, and H. C. Bazett. A practical system of units for the description of the heat exchange of man with his environment. *Science. New Series*, 94(2445):428–430, 1941. https://www.jstor.org/stable/1668557?seq=1#page_scan_tab_contents (14.4.2018).

[17] R. E. Forster, B. G. Ferris Jr., and R. Day. The relationship between total heat exchange and blood flow in the hand at various ambient temperatures. *American Journal of Physiology*, 146(4):600–609, 1946. https://www.physiology.org/doi/abs/10.1152/ajplegacy.1946.146.4.600?journalCode=ajplegacy (12.4.2018).

[18] F. G. Benedict and H. F. Root. Insensible perspiration: Its relation to human physiology and pathology. *Archives of Internal Medicine*, 38(1):1–35, 1926. https://jamanetwork.com/journals/jamainternalmedicine/article-abstract/535154 (12.4.2018).

[19] M. W. Johnston and L. H. Newburgh. The determination of the total heat eliminated by the human being. *Journal of Clinical Investigation*, 8(2):147–160, 1930. https://dm5migu4zj3pb.cloudfront.net/manuscripts/100000/100258/JCI30100258.pdf (12.4.2018).

[20] L. H. Newburgh and M. W. Johnston. Measurement of total water exchange. *Journal of Clinical Investigation*, 8(2):161–196, 1930. https://dm5migu4zj3pb.cloudfront.net/manuscripts/100000/100259/JCI30100259.pdf (12.4.2018).

[21] B. Bloch, F. Pinkus, and W. Spalteholz, editors. *Anatomie der Haut – Blutgefäße der Haut*. Springer, Heidelberg, 379–433, 1927. https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-50669-7#about (15.4.2018).

[22] O. Mickelsen and A. Keys. The composition of sweat, with special reference to the vitamins. *Journal of Biological Chemistry*, 149:479–490, 1943. https://pdfs.semanticscholar.org/b395/ccaf7cc30db2c871190696caf25e716d9f02.pdf (25.4.2018).

[23] T. Ohhashidag, M. Sakaguchiddag, and T. Tsuda. Human perspiration measurement. *Physiological Measurement*, 19(4):499–510, 1998. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0967-3334/19/4/001/pdf (26.4.2018).

[24] A. C. Burton and O.G. Edholm. *Man in a cold environment. Physiological and pathological effects of exposure to low temperatures.* Edward Arnold, London, 1955. https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-50669-7#about (15.4.2018).

[25] A. C. Burton. Human calorimetry: Ii. the avarage temperature of the tissues of the body: three figures. *The Journal of Nutrition*, 9(3):261–280, 1935. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0967-3334/19/4/001/pdf (26.4.2018).

[26] R. T. Grant and H. E. Holling. Further observations on the vascular responses of the human limb to body warming; evidence for sympathetic vasodilator nerves in the normal subject. *Clinical Science*, 3:273–285, 1938.

[27] M. Steggerda and F. G. Benedict. The basal metabolism of some browns and blacks in jamaica. *American Journal of Physiology*, 85(3):621–633, 1928. https://www.physiology.org/doi/abs/10.1152/ajplegacy.1928.85.3.621?journalCode=ajplegacy (25.4.2018).

[28] A. C. Burton. The application of the theory of heat flow to the study of energy metabolism: five figures. *The Journal of Nutrition*, 7(5):497–533, 1934. https://academic.oup.com/jn/article-abstract/7/5/497/4726374?redirectedFrom=fulltext (26.4.2018).

[29] B. B. Rubenstein. *Endocrinology*, 12:41–, 1928.

[30] E. Asmussen and O. Bøje. Body temperature and capacity for work. *Acta Physiologica Scandinavica*, 10(1):1–22, 1945. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1748-1716.1945.tb00287.x (27.4.2018).

[31] L. H. Newburgh, editor. *Physiology of heat regulation and the science of clothing.* Hafner Publishing Co, New York, 1968.

[32] P. A. Kolesnikov. *Physiology of heat regulation and the science of clothing.*

[33] H. C. Bazett and B. McGlone. Temperature gradients in the tissues in man. *American Journal of Phsiology*, 82(2):415–451, 1927. https://www.physiology.org/doi/abs/10.1152/ajplegacy.1927.82.2.415?journalCode=ajplegacy (5.5.2018).

[34] S. S. Kety and C. F. Schmidt. The determination of cerebral blood flow in man by the use of nitrous oxide in low concetration. *American Journal of Phsiology*, 143(1):53–66, 1945. https://www.physiology.org/doi/pdf/10.1152/ajplegacy.1945.143.1.53 (25.5.2018).

[35] S. S. Kety and C. F. Schmidt. The effects of active and passive hyperventilation on cerebral blood flow, cerebral oxygen consumption, cardiac output, and blood pressure of normal young men. *The Journal of Clinical Investigation*, 25(1):107–119, 1946. https://www.jci.org/articles/view/101680 (25.5.2018).

[36] E. G. Zobl, F. N. Talmers, R. C. Christensen, and L. J. Baer. Effect of exercise on the cerebral circulation and metabolism. *Journal of Applied Physiology*, 20(6):1289–1293, 1965. https://www.physiology.org/doi/abs/10.1152/jappl.1965.20.6.1289.

[37] W. S. van Leeuwen and M. van der Made. Über den einfluss der temperatur auf die reflexfunktionen des rückenmarkes von warmblütern und kaltblütern. *Pflüger's Archiv für die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere*, 165(1–3):37–83, 1916. https://link.springer.com/article/10.1007(25.5.2018).

[38] K. J. Friston, C. D. Frith, R.J. Dolan, C. J. Price, S. Zeki, J. T. Ashburner, D. William, and W. D. Penny, editors. *Human brain function.* Elsevier Science, 2004.

[39] H. C. Bazett, E. S. Mendelson, L. Love, and B. Libet. Precooling of blood in the arteries, effective heat capacity and evaporative cooling as factors modifying cooling of the extremities. *Journal of Applied Physiology*, 1(2):169–182, 1948. https://www.physiology.org/doi/abs/10.1152/jappl.1948.1.2.169.

[40] E. S. Mendelson and et.al. Osrd report. Technical report, OSRD, 1945.

[41] J. D. Hardy, H. G. Wolff, and H. Goodell. Studies on pain. a new method for measuring pain threshold: observations on spatial summation of pain. *The journal of clinical investigation*, 19(4):649–657, 1940. https://dm5migu4zj3pb.cloudfront.net/manuscripts/101000/101168/JCI40101168.pdf (25.5.2018).

[42] S. Wolf and J. D. Hardy. Studies on pain. observations on pain due to local cooling and on factors involved in the "cold pressor" effect. *The journal of clinical investigation*, 20(4):521–533, 1941. https://dm5migu4zj3pb.cloudfront.net/manuscripts/101000/101245/JCI41101245.pdf (25.5.2018).

[43] J. D. Hardy and T. W. Oppel. Studies in temperature sensation. iii. the sensitivity of the body to heat and the spatial summation of the end organ responses. *The journal of clinical investigation*, 16(4):533–540, 1937. https://dm5migu4zj3pb.cloudfront.net/manuscripts/100000/100879/JCI37100879.pdf (25.5.2018).

[44] H. E. Harrison and D. C. Darrow. The distribution of body water and electrolytes in adrenal insufficiency. *The journal of clinical investigation*, 17(1):77–86, 1938. https://dm5migu4zj3pb.cloudfront.net/manuscripts/100000/100931/JCI38100931.pdf (26.6.2018).

[45] J. D. Hardy and T. W. Oppel. Studies in temperature sensation. ii. the temperature changes responsible for the stimulation of the heat end organs. *The journal of clinical investigation*, 16(4):525–531, 1937. https://dm5migu4zj3pb.cloudfront.net/manuscripts/100000/100878/JCI37100878.pdf (26.6.2018).

[46] C. Sheard, M. M. D. Williams, and B. T. Horton. *Skin temperatures of the extremities under various environmental and physiological conditions. V: Temperature, its measurement and control in science and industry.* Reinhold Publishing Corporation, New York, 1941. https://doi.org/10.1002/jps.3030310310 (3.7.2018).

[47] C. R. A. Spealman. Characteristic of human temperature regulation. *Proceedings of the society for experimental biology and medicine*, 60(1):11–12, 1945. https://doi.org/10.3181/00379727-60-15076P (25. 6.2018).

[48] R. L. Post and C. R. A. Spealman. Variation of total circulating hemoglobin and reticulocyte count of man with season and following hemorrhage. *Journal of applied physiology*, 1(3):227–233, 1941. https://www.physiology.org/doi/abs/10.1152/jappl.1948.1.3.227 (26.5.2018).

POGLAVJE 4

Znojenje

Kazalo

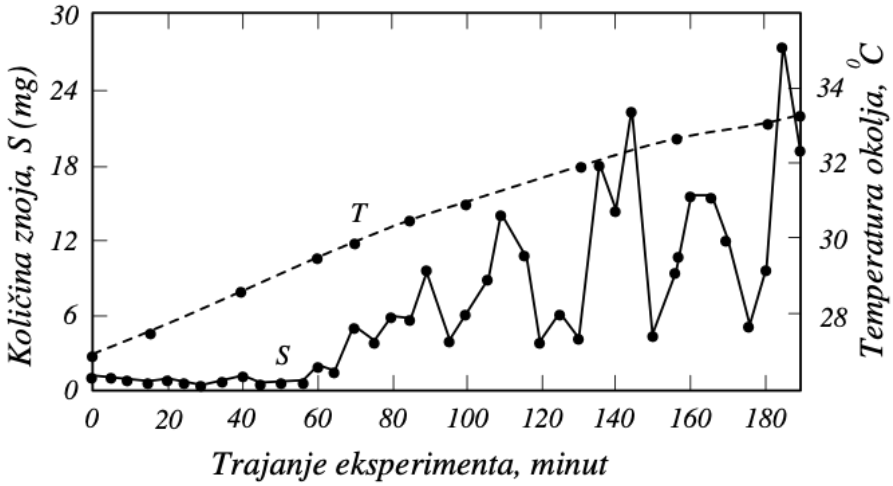
4.1 Izločanje znoja **65**
4.2 Sestava znoja, mehanizem znojenja in prilagoditev vročemu podnebju **74**
4.2.1 Sestava znoja 74
4.2.2 Mehanizem znojenja in prilagoditev vročemu okolju 75
4.2.3 Izhlapevanje znoja 79
4.3 Seznam oznak poglavja **84**
4.4 Literatura **85**

4.1 Izločanje znoja

Znoj izločajo znojne žleze. S stališča oblačenja ni zanimiv aparat, ki proizvaja znoj, temveč so pomembna predvsem tista stanja organizma, v katerih se izločajo večje količine znoja, povečuje hitrost izločanja znoja in se morebiti spreminja sestava znoja. Ugotovljeno je, da se lahko poveča izločanje znoja kot posledica psihičnega stanja ali kot posledica povečane temperature organizma [1, 2].

Znojenje je pomembno kot mehanizem, ki pomaga uravnavati temperaturo organizma. Poleg tega je indikator ustreznosti količine oblačil, ki jih oseba nosi v danih razmerah okolja in intenzitete aktivnosti. Če smo se v danih okoliščinah oznojili in je oblačilo premočeno z znojem, se lahko pojavijo nezaželene posledice, in sicer podhladitev organizma. Intenzivno delo v relativno mrzlem ozračju lahko, na primer, povzroči precejšnje znojenje. Če zaradi kakršnegakoli vzroka prenehamo delati, se bo sicer zmanjšala hitrost znojenja, toda znoj, ki je ostal v oblačilu, zmanjša vrednost toplotne izolacije, s čemer se poveča možnost hitrejšega ohlajevanja organizma. Ta vpliv bomo podrobneje obravnavali pozneje. V tem poglavju bomo prikazali nekaj primerov vpliva spremembe stanja v organizmu ali spremembe stanja okolja na hitrost izločanja znoja. Hitrost izločanja znoja, ki je prikazana na slikah od 4.1 do 4.10, je merjena v 5-minutnih intervalih na površini 20 cm^2 na določenem delu telesa.

Na sliki 4.1 je prikazana odvisnost hitrosti izločanja znoja od povečanja sobne temperature. Količina izločenega znoja precej niha. V prvih 60 minutah oseba praktično ne reagira na spremembo temperature okolja in to kljub temu, da se je ta zvišala za



Slika 4.1: Povečanje hitrosti znojenja na prsih v odvisnosti od povečanja temperature okolja: S – hitrost izločanja znoja, T – temperatura okolja. [1]

približno 3 °C. Potem se začenja naglo povečevati hitrost izločanja znoja. To pomeni, da odziv aparata za izločanje znoja nekoliko zaostaja za zunanjim stimulatorjem – temperaturo. Hitrost izločanja ni enakomerna, toda kljub temu lahko, kot prvo informacijo, predpostavimo linearno odvisnost od temperature okolja.

Glede na rezultate, ki so prikazani na sliki 4.1, je linearna regresijska krivulja predstavljena z enačbo (4.1),

$$S = a + bT \tag{4.1}$$

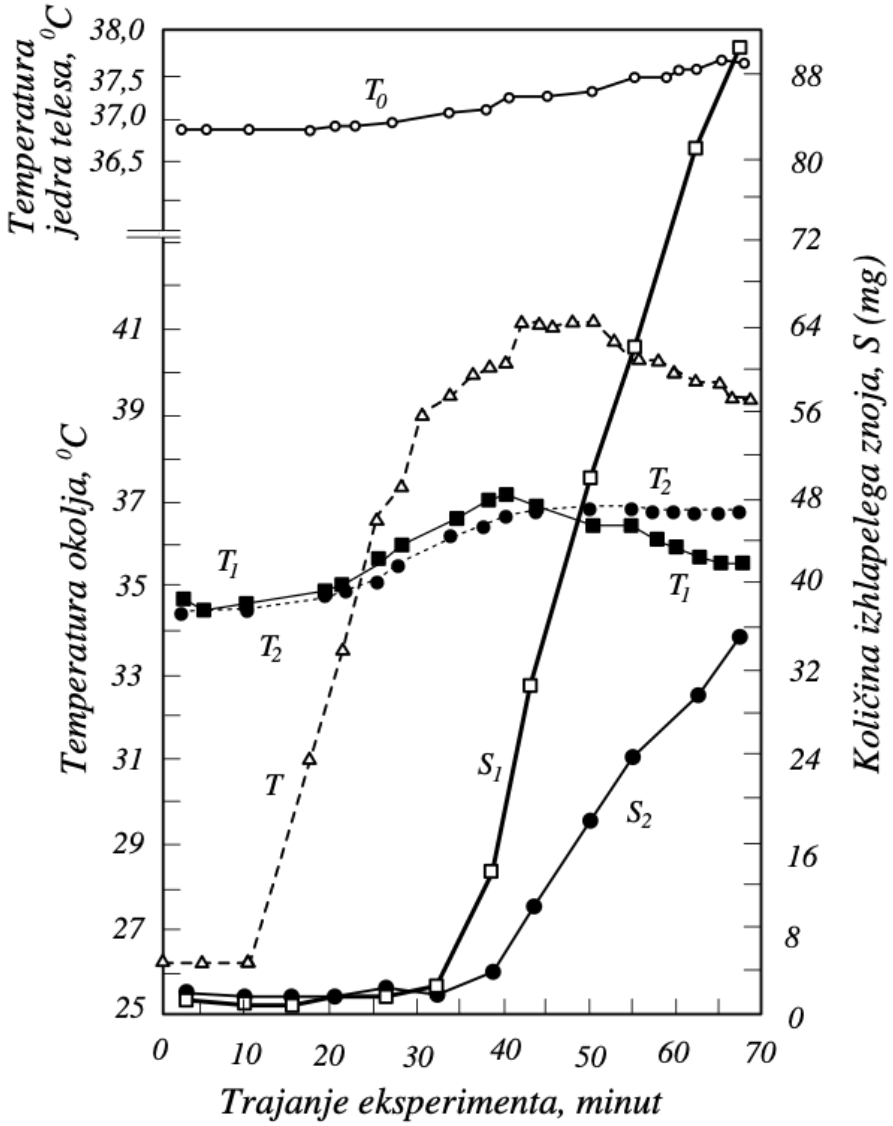
kjer so S [mg] količina izločenega znoja, T [°C] temperatura okolja in a, b ter r koeficienti z vrednostmi: $a = 519$ in b = 18,79 ter koeficient korelacije r = 0,86.

Hitrost znojenja se povečuje s povečanjem temperature. Vrednost koeficienta korelacije pa pove, da je korelacija precej močna. Vsekakor bi dosegli boljše ujemanje, če bi krivuljo S razdelili na dva sektorja. Prvi do 60. minute eksperimenta in drugi sektor po 60. minuti.

Na sliki 4.1 je povečanje temperature okolja počasno in ne preseže vrednosti temperature površine kože. Zaradi tega je tudi relativno počasna sprememba hitrosti znojenja kot tudi sama hitrost znojenja. Spremembo hitrosti znojenja nam kaže smerni koeficient v enačbi (4.1), ki ima relativno nizko vrednost. Enačba (4.1) se dobro ujema z eksperimentalnimi rezultati (slika 4.1), saj je hitrost znojenja pri 27 °C zanemarljivo majhna. Iz enačbe (4.1) lahko sklepamo, da bo znojenje prenehalo pri temperaturi 27,6 °C, ker je S = 0.

Če pa je hitrost povečanja temperature okolja velika, se poveča tudi hitrost izločanja znoja. Na sliki 4.2 je prikazan takšen primer. Očitno je, da se s povečanjem temperature okolja povečava temperatura jedra telesa. To povečanje je le okrog 0,5 °C in zaostaja za povečanjem temperature okolja. Temperaturi na površini prsi in stegna pa precej pravilno sledita spremembi temperature okolja, kar je tudi logično, saj so temperature merjene na golem subjektu. Temperatura na površini prsi se dvigne s 34,5 °C na 37,5 °C, kar pomeni razliko borih 3 °C, in to kljub temu, da se je povečala temperatura okolja v istem časovnem obdobju za celih 15 °C.

Očitna je zakasnitev povečanja izločanja znoja glede na spremembo temperature okolja. Mera za to zakasnitev bi bila lahko vrednost koeficienta korelacije ustrezne linearne regresijske krivulje. Na sliki 4.1 je tudi očitna zakasnitev začetka spremembe hitrosti

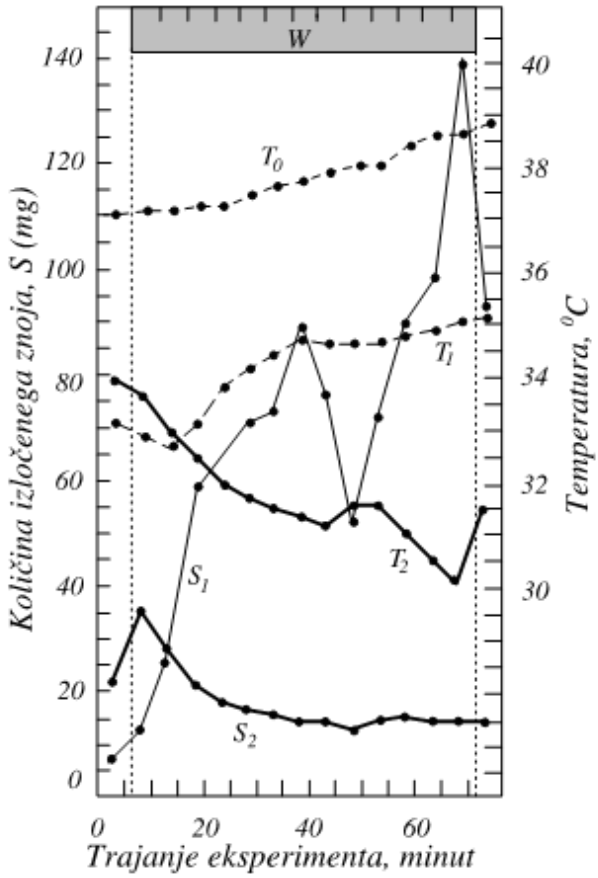


Slika 4.2: Znojenje v primeru hitrega povečanja spremembe temperature okolja T_0 – temperatura jedra telesa, T – temperatura okolja, T_1 – temperatura na površini prsi, T_2 – temperatura na površini stegna, S – hitrost izločanja znoja, g/m^2.h, S_1 – hitrost izločanja znoja s površine prsi, S_2 – hitrost izločanja znoja s površine stegna. [1]

znojenja glede na začetek spremembe temperature okolja, toda meritve so bile končane, preden se je temperatura okolja začela zniževati. Vrednosti koeficientov linearne regresijske krivulje znojenja na površini prsi, slika 4.2, so: a = –555; b = 20,27 in r = 0,75 in za hitrost znojenja s površine stegna: a_1 = –184; b_1 = 7,04 in r_1 = 0,72. Če pa upoštevamo meritve do časa 50 minut, ko je temperatura okolja dosegla maksimalno vrednost, bomo dobili primerljive vrednosti s stanjem na sliki 4.1. V tem primeru bi bili koeficienti: a = –164; b = 6,16; r = 0,76 za prsi in a_1 = –32; b_1 = 1,60; r_1 = 0,75 za stegno. Iz navedenih vrednosti koeficientov korelacije je razvidno, da se hitrost izločanja znoja slabše ujema s spremembo temperature na sliki 4.2 kot na sliki 4.1.

Na sliki 4.2 tudi vidimo, da aparat za izločanje znoja ne reagira pravočasno samo na začetek povečanja temperature okolja, ampak ima določeno vztrajnost in povečuje hitrost izločanja znoja, kljub temu, da se je začela zniževati temperatura okolja po 50 minutah trajanja eksperimenta. Obenem vidimo, da je hitrost izločanja znoja na prsih približno dvakrat večja kot na površini stegna.

Na sliki 4.3 je prikazana sprememba hitrosti znojenja v odvisnosti od opravljenega dela W, ki velja za interval merjenja med 5. in 70. minuto. Opravljeno delo se nanaša na zaporedno dviganje uteži mase 7,5 kg. Kot posledica opravljanja dela se povečuje temperatura jedra telesa T_0 in temperatura površine dlani T_2, medtem ko se zmanjšuje temperatura prsi T_1.

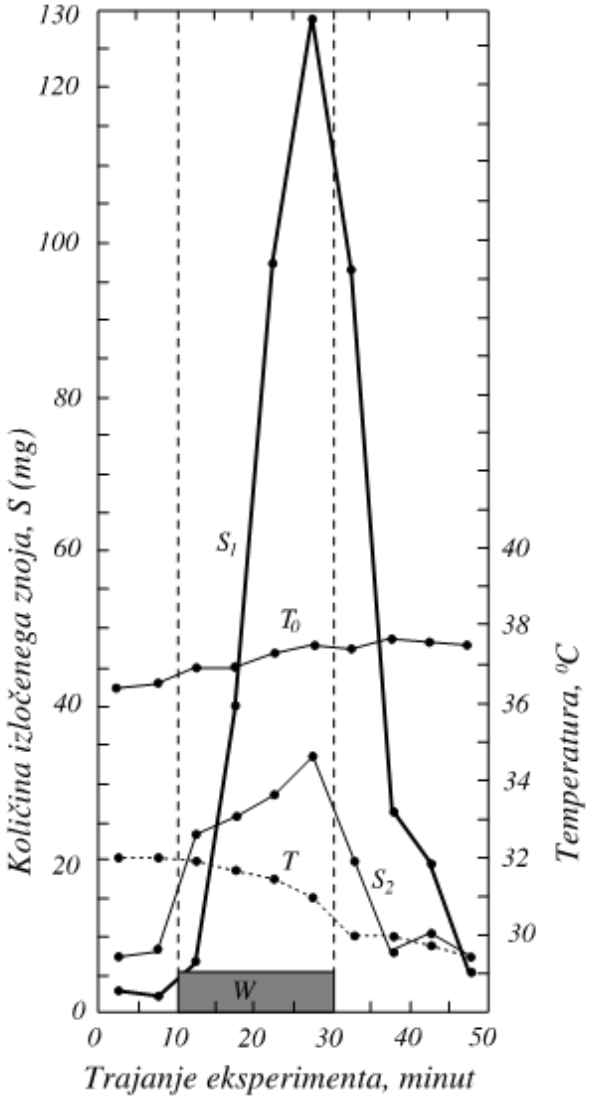


Slika 4.3: Izločanje znoja v času trajanja težkega dela. [1]

Po pravilu se poveča tudi hitrost izločanja znoja S_1 s površine prsi, medtem ko se v začetni fazi poveča hitrost izločanja znoja na površini dlani S_2, nakar se počasi zmanjšuje. Takšna sprememba tendence hitrosti izločanja znoja s površine dlani razložimo z

dognanjem, da izločanje znoja s površine dlani kakor tudi s površine stopal ni v zvezi s povečanjem temperature telesa, ampak ga povzročajo psihološki faktorji. Med 45. in 50. minuto trajanja eksperimenta je prišlo do precejšnjega zmanjšanja hitrosti izločanja znoja. To je verjetno posledica zmanjšanja tekočine v organizmu. W je trajanje eksperimenta.

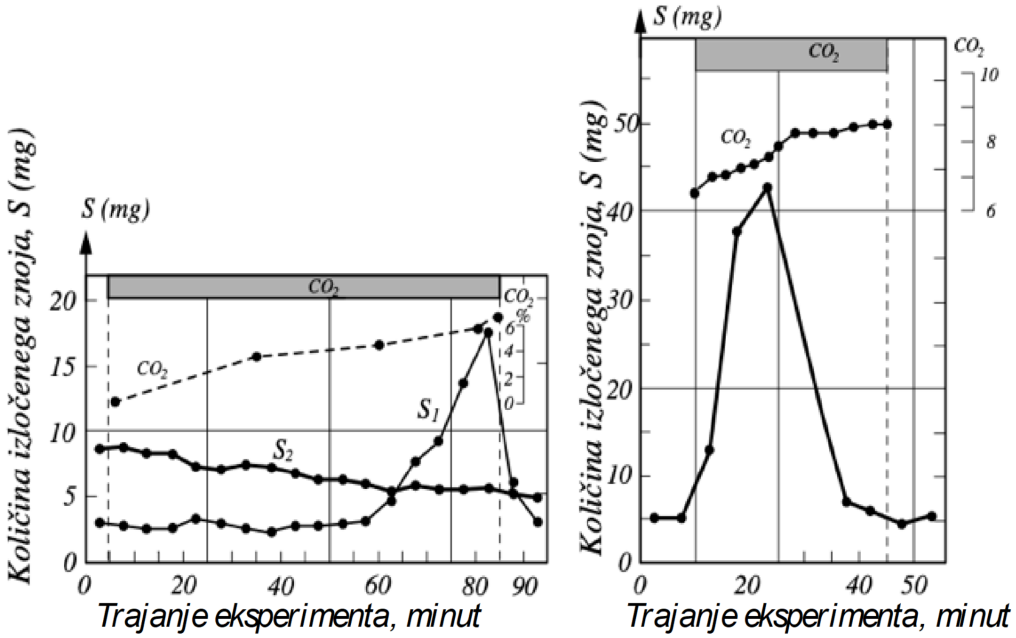
Na sliki 4.4 je prikazana hitrost izločanja znoja v odvisnosti od hitrosti teka 160 m/min v času 20 minut (W na sliki 4.4). S_1 in T_1 veljata za meritve na prsih in S_2 na dlani. Kot vidimo iz slike 4.4, hitrost izločanja znoja na prsih hitro narašča, istočasno pa se zmanjšuje temperatura površine kože na prsih; temperatura jedra telesa pa se postopoma dviga. Narašča tudi hitrost izločanja znoja na površini dlani, toda ta je več kot 4-krat manjša kot na prsih.



Slika 4.4: Hitrost izločanja znoja v odvisnosti od časa in intenzitete teka. [1]

Na povečanje hitrosti izločanja znoja vpliva tudi povečana količina CO_2 v okolju. To se lahko zgodi v zaprtem prostoru, kjer je precej ljudi in je slaba izmenjava zraka. Kot vidimo s slike 4.5 (a) se poveča izločanje znoja le postopoma. Hitrost izločanja znoja s prsi (S_1) je nekajkrat manjša kot pri povečanju temperature okolja, medtem ko hitrost izločanja znoja (S_2) na površini dlani pada s povečanjem odstotka CO_2 v okolju. Če pa

se količina CO_2 poveča na 7 % do 9 %, slika 4.5 (b), se nekoliko poveča hitrost izločanja znoja s prsi (S_2).



Slika 4.5: Vpliv koncentracije CO_2 v okolju na hitrost izločanja znoja. [1]

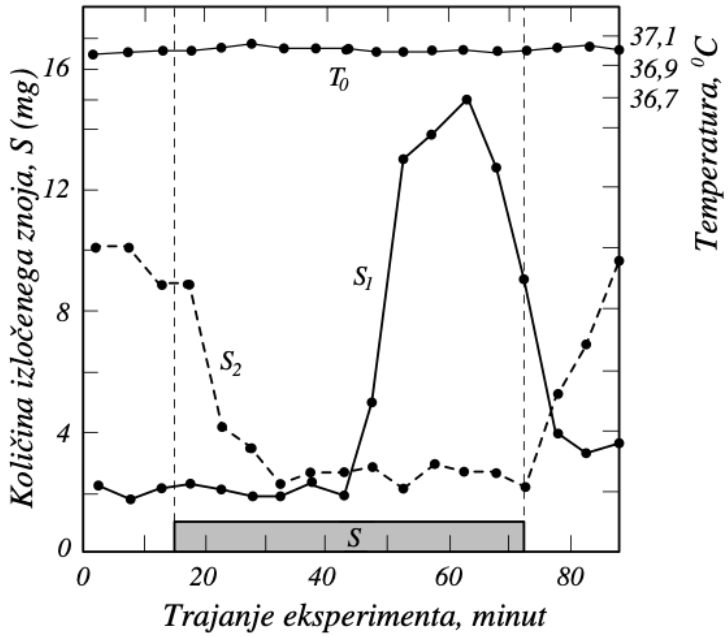
S slike 4.5 (b) tudi vidimo, da se hitrost izločanja znoja, potem ko je dosegla maksimum, vrne na normalen nivo kljub nadaljnjemu povečanju koncentracije CO_2 v okolju. Ni lahko pojasniti, zakaj sploh pride do povečanja hitrosti izločanja znoja s povečanjem koncentracije CO_2 v okolju in nato vpliv izgine. Sprememba hitrosti izločanja znoja je podobna spremembi pri vplivu vročine, vsaj v začetni fazi. Potemtakem je najbolj verjetno, da površina kože zazna povečanje koncentracije CO_2 kot povečanje toplote, zaradi česar se tudi poveča hitrost izločanja znoja. Čez čas se občutljivost površine kože zmanjša in posledica tega je zmanjšanje hitrosti izločanja znoja kljub povečanju koncentracije CO_2, slika 4.5 (b). Glede znojenja lahko razdelimo površino človekovega telesa na tri dele. V prvi del lahko uvrstimo dlani in stopala, kjer se izloča znoj zaradi mentalne ali senzorne stimulacije in ne toliko zaradi vpliva toplote. V drugi del uvrstimo podpazduho in eventualno čelo, ki izločajo znoj tako zaradi senzorne stimulacije, kakor tudi zaradi vpliva toplote.

Tretji del tvori preostala površina telesa, na kateri se izloča znoj zaradi toplotne stimulacije in nanj nimata nobenega vpliva mentalna ali senzorna stimulacija. Razlike med mentalnim in termalnim znojenjem lahko obrazložimo z razliko reagiranja znojnih centrov. Center, ki krmili termalno znojenje, ima majhno občutljivost tako dolgo, dokler je oseba v okolju, ki ima nizko temperaturo; brž ko se temperatura okolja zviša, postane zelo aktiven. Termalni center potrebuje določen čas, da se aktivira. Zaradi tega sprememba hitrosti znojenja zaostaja za spremembo temperature okolja. Ko je center enkrat aktiviran, ne reagira samo na spremembo temperature okolja, ampak tudi na mentalne in senzorne stimulacije.

V nasprotju s tem pa je center, ki uravnava mentalno znojenje, zmeraj aktiviran in se zdi, da se njegova aktivnost le malo spreminja. Toda čas aktiviranja je zelo kratek. Ves

čas, ko je oseba zbujena, sprejema emocionalni center za znojenje nenehno dražljaje, ki vzpodbujajo znojenje. Center, ki uravnava izločanje znoja na površini dlani in stopal, ne reagira na termično (toplotno) stimulacijo.

Zanimive so spremembe hitrosti izločanja znoja v spanju in v budnem stanju pozimi in poleti. Na sliki 4.6 je prikazana sprememba hitrosti izločanja znoja (S) z dlani in prsi med spanjem v sobi, ki ima temperaturo 29 °C pozimi. V budnem stanju (prvih 15 minut trajanja eksperimenta) je večja hitrost izločanja znoja z dlani (S_2), kot s prsi (S_1). Pred spanjem se zmanjša izločanje znoja (S_1) z dlani in se po 30-minutnem spanju hitro poveča znojenje s prsi. Pri tem se temperatura okolja in temperatura jedra telesa (T_0) ne spreminjata.

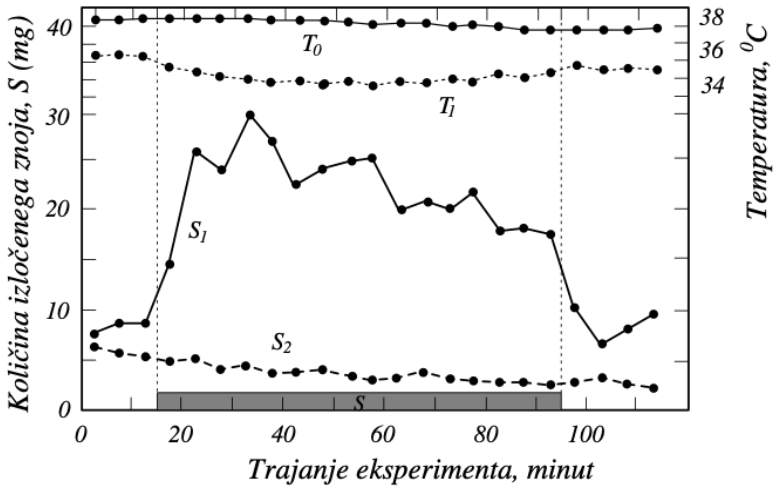


Slika 4.6: Sprememba hitrosti izločanja znoja z dlani (S_2) in prsi (S_1) v budnem stanju in med spanjem (S) pri sobni temperaturi 29 °C pozimi. [1]

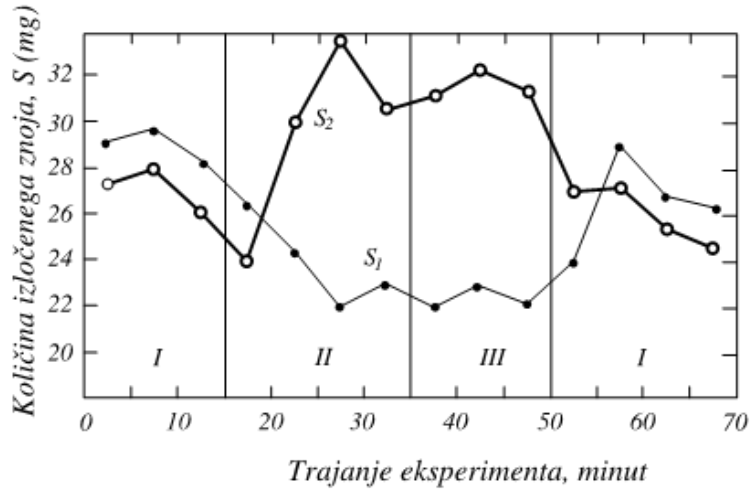
V poletnem času, slika 4.7, pa je podoba nekoliko spremenjena. V začetku eksperimenta se hitrosti izločanja znoja z dlani (S_2) in prsi (S_1) bistveno ne razlikujeta. Hitrost izločanja znoja z dlani se zmanjšuje in se ustali približno na nivoju hitrosti izločanja znoja s prsi v budnem stanju. V nasprotju s tem se precej poveča hitrost znojenja s površine prsi po približno 30 minutah spanja. V poletnem času, slika 4.7, je v stanju mirovanja hitrost izločanja znoja s prsi (S_1) nekoliko večja kot z dlani (S_2), vendar se precej zviša med spanjem (S). Hitrost izločanja znoja z dlani med spanjem se postopoma zmanjšuje. Nekoliko se zmanjšata temperaturi jedra telesa (T_0) in površine prsi (T_1).

Pri spanju v topli poletni noči prihaja do zanimivega pojava glede izločanja znoja. Na tisti strani telesa, na kateri ležimo, se zmanjša izločanje znoja, istočasno pa se poveča na nasprotni strani telesa oziroma na površini, ki ni pod pritiskom. Zaradi tega se povprečno izločanje znoja ne zmanjša.

Na sliki 4.8 je prikazan primer meritve izločanja znoja s površine kože osebe, ki spi. S_1 je hitrost izločanja znoja z zgornje strani desne pesti in S_2 z zgornje strani leve pesti. Eksperiment sestoji iz treh faz: *I* – oseba je spala na hrbtu; *II* – oseba je spala na desnem boku; *III* – oseba je spala na desnem boku in je imel glavo obrnjeno v levo stran.



Slika 4.7: Sprememba hitrosti znojenja s površine prsi (S_1) in dlani (S_2) pri prehodu v spanje. Prikazani sta tudi spremembi temperature jedra telesa (T_0) in površine prsi (T_1). [1]

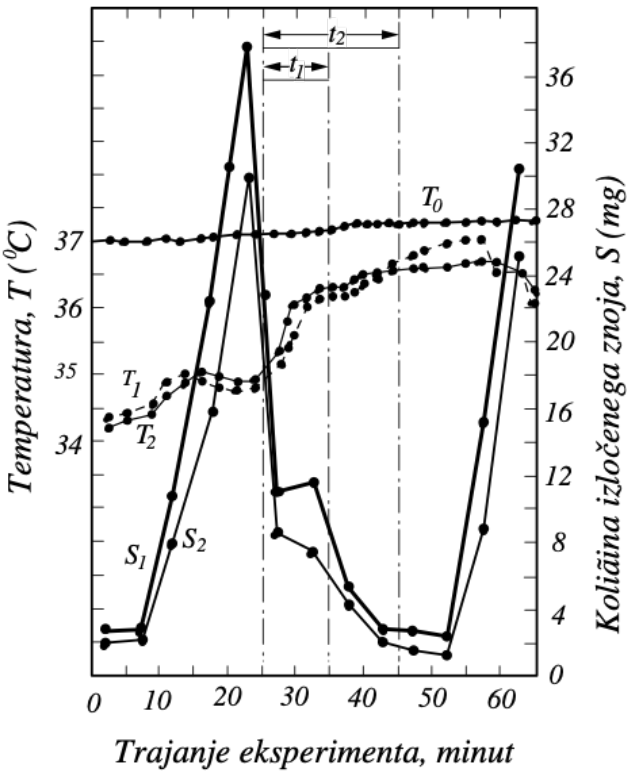


Slika 4.8: Vpliv pritiska pri ležanju na hitrost izločanja znoja. [1]

Hitrost znojenja na zgornjih površinah leve in desne dlani, ko leži oseba na hrbtu, se bistveno ne razlikuje. Če oseba leži na desnem boku, se je upočasnilo izločanje znoja na zgornji površini desne dlani; obenem se je povečala hitrost izločanja na zgornji površini leve dlani – *II* in *III*. Ko se je po 50 minutah ležanja obrnila na hrbet – *I*, se je zopet vzpostavilo stanje, kot je bilo v začetni fazi.

Na splošno so znojne žleze aktivne takrat, ko je temperatura površine kože med 26 °C in 45 °C. Aktivnost znojnih žlez se povečuje v tem temperaturnem intervalu, če temperatura raste. Zunaj tega temperaturnega intervala pada aktivnost znojnih žlez. Za aktivno delovanje znojnih žlez v daljšem časovnem obdobju je zelo pomembno, da so te normalno prekrvavljene. V prej omenjenem temperaturnem intervalu nihanje hitrosti kroženja krvi ne vpliva bistveno na delovanje znojnih žlez. Celo če preneha kroženje krvi, se izločanje znoja nadaljuje še 20 minut ali celo dlje. Če je del telesa, na primer dlani, izpostavljen nizki temperaturi, se hitro izločanje znoja zmanjša na celotni površini telesa. Učinkovitost zaviranja niha v odvisnosti od intenzitete znojenja, ki je potekalo pred ohladitvijo, in intenzitete hlajenja. Na sliki 4.9 je prikazana sprememba hitrosti

izločanja znoja s prsi in podlakti leve roke v odvisnosti od zmanjšanja hitrosti kroženja krvi in hlajenja. V času t_1 se je zmanjšalo kroženje krvi v desni roki, ki je bila v času t_2 potopljena v vodo, ki je imela 10 °C. Temperatura okolja se je dvigala, dokler se oseba ni začela znojiti. Rezultati meritev so prikazani na sliki 4.9. T_0 je temperatura rektuma, T_1 prsi in T_2 podlakti leve roke; S_1 je hitrost izločanja znoja na prsih in S_2 na podlakti leve roke.

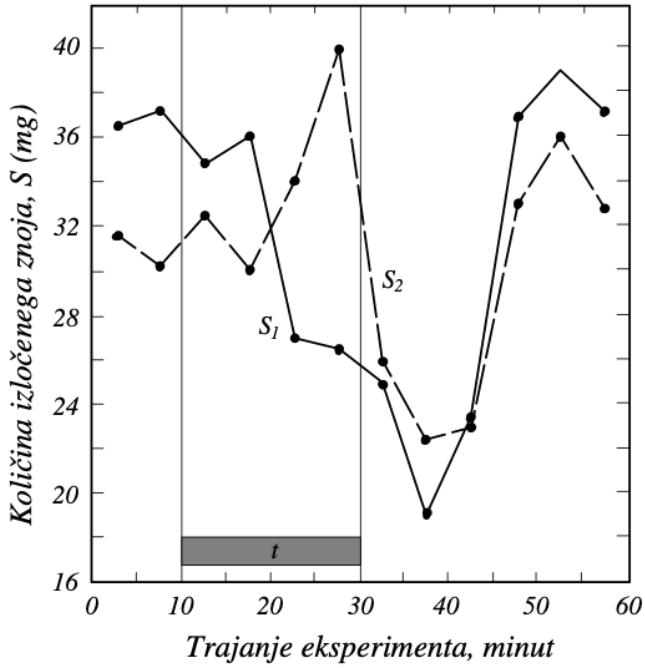


Slika 4.9: Spremembe hitrosti znojenja na površini telesa v odvisnosti od ohladitve desne roke in zmanjšanja hitrosti kroženja krvi v njej. [1]

Ko se je oseba začela vidno znojiti (maksimalna hitrost izločanja znoja), so ji obvezali desno roko (zmanjšanje kroženja krvi) in jo takoj potopili v mrzlo vodo, ki je imela temperaturo 10 °C. To je povzročilo hitro zmanjšanje izločanja znoja na prsih in podlakti leve roke, kjer so bila meritvena mesta. Nekaj časa (7 do 8 minut) potem, ko je oseba potegnila roko iz vode (obveza je bila odstranjena še pred tem), se je začela povečevati hitrost znojenja.

Ta eksperiment ilustrira dejstvo, da se zelo zmanjša hitrost znojenja, če se telo ohladi. Ta pojav je pozitiven zaradi ohranitve toplote; saj vlažna površina kože in vlažna obleka omogočata hitrejšo izgubo toplote oziroma hitrejše hlajenje organizma. Že v poglavju 3 smo omenili, da se zmanjša kroženje krvi v podhlajenih delih telesa. Zmanjšanje hitrosti kroženja krvi zmanjšuje aktivnost znojnih žlez oziroma zmanjšuje hitrost znojenja, kar slika 4.10 kaže bolje kot slika 4.9.

S_1 je hitrost izločanja znoja z zgornje površine desne dlani, ki je bila v času t povezana, zaradi česar se je zmanjšala hitrost kroženja krvi. S_2 je hitrost izločanja znoja na zgornji površini leve dlani, v kateri je bila hitrost kroženja krvi normalna (ni bila povezana).



Slika 4.10: Vpliv spremembe hitrosti kroženja krvi na hitrost izločanja znoja. [1]

4.2 Sestava znoja, mehanizem znojenja in prilagoditev vročemu podnebju

4.2.1 Sestava znoja

Voda je glavna sestavina znoja, le 0,3 % do 0,8 % je drugih sestavin. Poznavanje teh sestavin je potrebno zaradi več razlogov:

- lahko vplivajo na slabo počutje in celo bolj ali manj intenzivno dražijo kožo;
- proizvajajo vonj, ki je lahko neprijeten, zlasti še za druge osebe;
- izločajo se v oblačilu in tam v glavnem ostanejo, ko izhlapi vodna komponenta;
- lahko se zmanjša koncentracija nekaterih soli v krvi, če je znojenje intenzivno in traja precej časa.

Količina posameznih elementov, ki tvorijo neorganske spojine, niha, kar je predvsem odvisno od posamezne osebe, intenzitete in časa znojenja. Izmerjene količine posameznih elementov nihajo v naslednjih mejah, izraženih v tisočinkah odstotka: Cl od 36 do 995; Na od 17 do 400; K od 7 do 145; Ca od 0,3 do 11,8; Mg od 0,02 do 3,32; P od 0,0 do 4,8; S v sledovih do 7,37; SO_4 od 4 do 17; J od 0,0007 do 0,00095; Cu do 0,006; Mn do 0,006 in Fe od 0,024 do 0,2.

Očitno je, da je v znoju največ Cl, Na in K, to pa pomeni, da je največ NaCl in KCl. Vsekakor so zanimive tudi dušikove spojine, to pa zaradi tega, ker imajo nekatere od njih neprijeten vonj. Izmerjena celotna količina dušika je v mejah od 17 do 196 tisočink odstotka. Nastopa v obliki dušikovih spojin, ki niso proteini od 66 do l08, aminokislin od 1 do 8, amoniaka od 1 do 34, urina od 7,5 do 128 in urinske kisline od 0,0 do 1,2. Razen tega vsebuje znoj še lipide in glukozo od 1 do 22 tisočink odstotka, mlečno kislino od 33 do 300 tisočink odstotka ter vitamine in hormone.

Osnovne sestavine znoja lahko razvrstimo glede na njihovo koncentracijo v znoju in krvni plazmi ter glede na spremembe njihove koncentracije v odvisnosti od spremembe hitrosti znojenja. Koncentracija Na in Cl v znoju se povečuje s povečanjem hitrosti izločanja znoja; njuna koncentracija v znoju je manjša kot v krvni plazmi. Nasprotno pa se koncentracija glukoze in aminokislin v znoju zmanjšuje s povečanjem hitrosti izločanja znoja. Te so pomembne kot energetski vir za znojne žleze. Zaradi tega se zmanjša njihova koncentracija v znoju, ker je za intenzivnejše delovanje znojnih žlez potrebno več energije.

So tudi komponente, ki imajo visoko koncentracijo v začetni fazi znojenja, toda ta se zmanjšuje s povečanjem hitrosti izločanja znoja. V to skupino lahko uvrstimo komponente, ki imajo večjo koncentracijo v znoju kot v krvni plazmi: kalij, amoniak, mlečna kislina in piruvična kislina. Znojne žleze vsebujejo te substance ali jih tvorijo v procesu znojenja in jih prenesejo iz celic v znoj. Tudi povrhnjica (epidermij) jih vsebuje v velikih količinah in njihove velike koncentracije v znoju v začetni fazi znojenja so verjetno posledica prehoda teh substanc s povrhnjice v znoj. Izjema je ureja (sečnina), katere koncentracija v znoju je enaka koncentraciji v krvni plazmi. Povprečne koncentracije posameznih substanc v znoju in krvni plazmi, izražene v tisočinkah odstotka, so prikazane v preglednici 4.1.

Preglednica 4.1: Povprečne koncentracije substanc v znoju in krvni plazmi [‰]. [1]

Substanca	Znoj	Plazma
Cl	320	360
Na	200	340
K	20	18
Ca	2	10
Mg	1	2,5
Sečnina	15	15
Aminokisline	1	5
Amonijak	5	0,05
Glukoza	2	100
Mlečna kislina	35	15

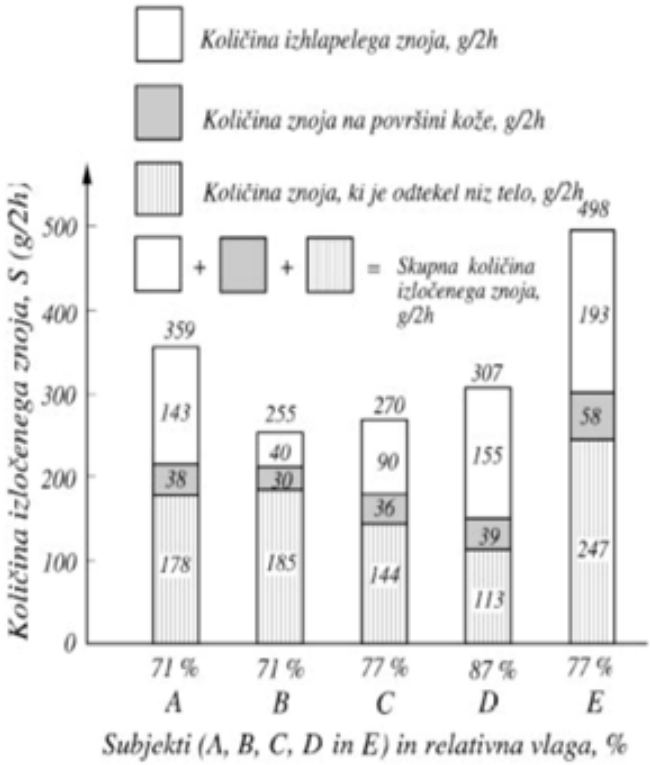
4.2.2 Mehanizem znojenja in prilagoditev vročemu okolju

Na splošno je hitrost izločanja znoja odvisna od stanja okolja (višina tlaka vodne pare v okoliškem zraku, temperatura zraka in hitrost gibanja zraka), intenzitete in vrste aktivnosti, individualnih osebnostnih razlik subjektov in dejanskega stanja opazovanega subjekta med merjenjem.

Pri delu v laboratoriju, v katerem je temperatura zraka 29 °C, izgubi oseba od 3 kg do 3,3 kg vode na dan. To velja za osebo z maso 65 kg. Od skupne količine 3 kg izhlapi skozi površino kože (znoj) okrog 75 % ali 2,3 kg. Pri tem je površina kože le občasno mokra. V nekaterih premogovnikih v Angliji izgubijo rudarji v peturnem delu od 4,5 kg do 8,5 kg znoja. Na splošno niso redke izgube 10 kg mase v obliki znoja v vročih delovnih prostorih, v tropih pa celo 15 kg in več. Maksimalna hitrost znojenja je lahko manjša v suhem vročem okolju kot v vlažnem mokrem okolju, do česar pride verjetno zaradi razlike temperature površine kože. V suhem vročem okolju znoj hitreje izhlapeva. Zaradi tega se hladi koža, ki pa ima redko višjo temperaturo kot 35 °C, medtem ko v vlažnem vročem okolju doseže nekaj stopinj več. Ker temperatura kože

vpliva na hitrost znojenja, je hitrost izločanja znoja manjša v vročem suhem okolju, kot v vlažnem vročem okolju.

Če opazujemo potek znojenja lahko vidimo, da del znoja izhlapi, del se obdrži na površini kože, del pa steče po koži. To velja seveda le tedaj, če je hitrost znojenja večja od hitrosti izhlapevanja. Deleži posameznih komponent so pač odvisni od stanja okolja in organizma, ki izloča znoj. Na sliki 4.11 so prikazani deleži vseh treh omenjenih komponent pri petih golih osebah, ki so dvigale 10 kg težko utež 30 minut. Osebe od *A* do *D* so bile po konstituciji približno izenačene, oseba *E* pa je bila zelo poraščena. Razlike so očitne v deležih posameznih delov znoja kot tudi v količini izločenega znoja, ne glede na relativno vlažnost. Oseba *E* kaže največjo količino izločenega znoja, verjetno zaradi poraščenosti.



Slika 4.11: Deleži izhlapelega znoja in znoja, ki se drži na površini kože ter znoja, ki teče po koži pri petih subjektih pri različni relativni vlažnosti. [1]

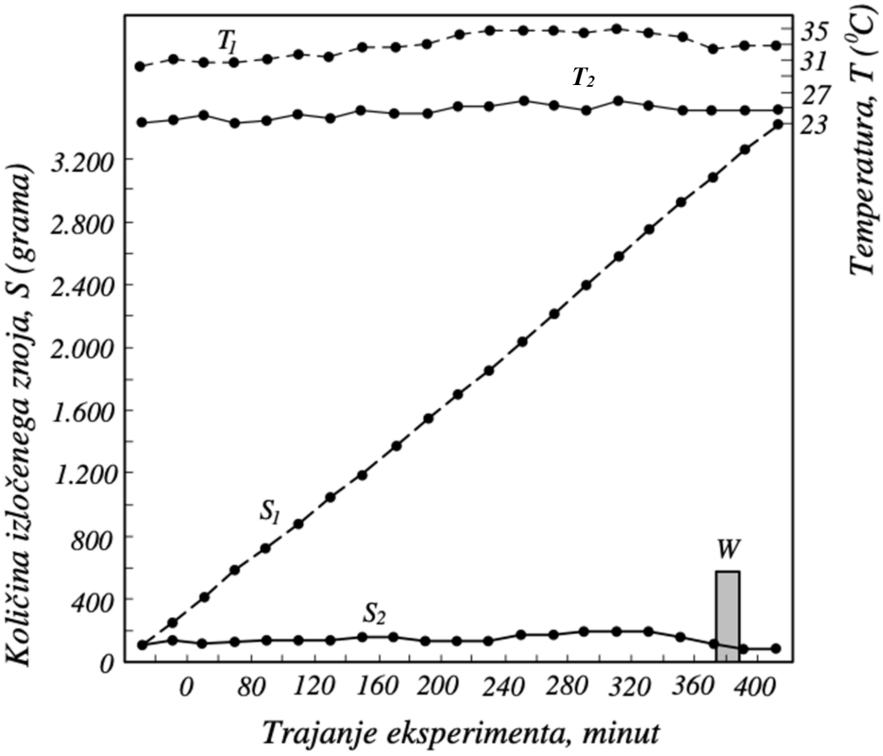
Organizem ni sposoben takoj nadomestiti vse količine vode, ki jo je izgubil med znojenjem. V začetku lahko nadomesti le okrog 34 % izgubljene tekočine in približno po 6 urah okrog 70 %. V preglednici 4.2 je prikazan primer razmerja med izgubami in količino nadomeščene vode pri enem vnosu vode (pitju).

Na sliki 4.12 je prikazana razlika med izgubami znoja in vnašanjem vode. S_1 je kumulativna premica izgub znoja v 400 minutah, pri čemer so izgube merjene vsakih 5 minut. S_2 so posamezne izgube znoja vsakih 5 minut. W je količina vode, ki jo je opazovana oseba popila med eksperimentom. T_1 je temperatura suhega termometra in T_2 temperatura mokrega termometra.

Sprememba temperature površine kože vpliva na živčne končiče. Ko se poveča temperatura površine kože, te prenašajo refleksi v center za termično znojenje in ga aktivirajo. Po drugi strani pa zavirajo reflekse, ki jih pošiljajo živčni končiči s površine kože

Preglednica 4.2: Izgube in sprejemanje vode s pitjem. [1]

Hoja [ur]	Izguba vode [kg]	Vnašanje vode (pitje) [kg]	Nadomeščene izgube vode [%]
3	0,84	0,00	0
3	0,92	0,00	0
3,5	1,16	0,20	17
3,5	1,37	0,20	15
3	1,40	0,00	0
3	1,69	0,25	15
6	1,94	0,30	16
3	2,25	0,15	7
6	2,29	0,20	9
3	2,39	0,20	8
6	2,44	0,15	7
3	2,45	0,40	16
6	2,50	0,50	20
6	2,58	0,40	16
8	2,68	0,40	11

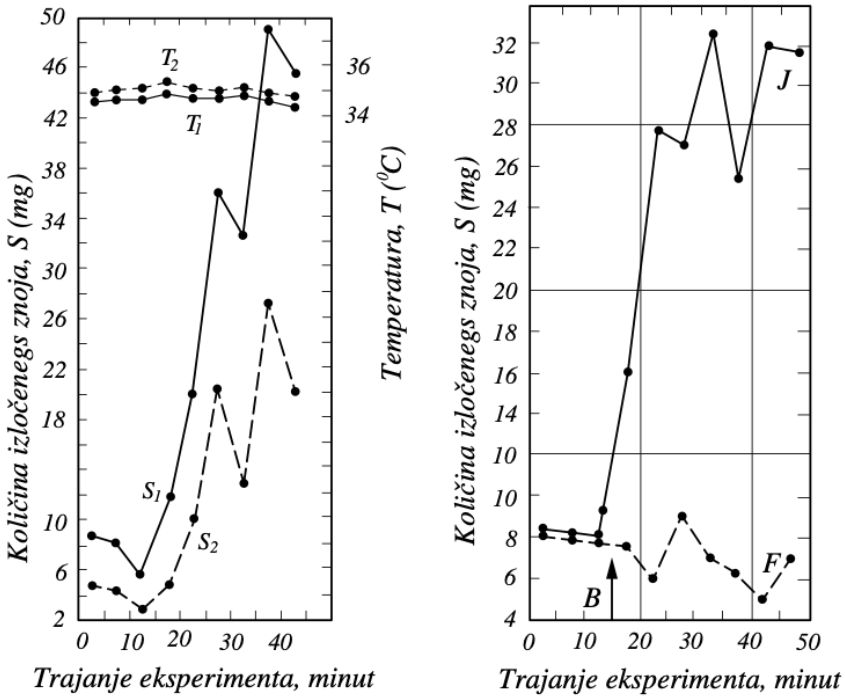


Slika 4.12: Maksimalna razlika med količino izločenega znoja in v organizem vneseno vodo v opazovanem časovnem intervalu; S_1 – kumulativna premica izgub, S_2 – posamezne meritve izgube znoja, T_1 – temperatura suhega termometra, T_2 – temperatura mokrega termometra. [1]

v primeru, ko se ta ohladi in tako zmanjšajo intenziteto delovanja centra, ki uravnava potenje. Primer za to je prikazan na sliki 4.9. Kljub temu, da je bila le dlan potopljena v mrzlo vodo, so bili refleksni signali dovolj močni, da se je zmanjšala intenziteta delovanja centra, ki uravnava delovanje znojnih žlez v primeru spremembe temperature površine kože.

Kot vidimo na sliki 4.9, se je zmanjšala hitrost izločanja znoja s celotne površine kože kljub temu, da se je nekoliko povečala temperatura jedra telesa.

Hitrost izločanja znoja se lahko poveča s pomočjo treninga, kar je razvidno na sliki 4.13 (a). Desna roka je bila predhodno osemkrat izpostavljena vroči zračni kopeli. Petdeset ur po tem je bil izveden eksperiment, katerega rezultati so prikazani na sliki 4.13 (a). Eno stopalo je bilo potopljeno v vodo, ki je imela 44 °C. Hitrost izločanja znoja (S_1) s podlakti desne roke, ki je bila trenirana, je bila precej večja kot s podlakti leve roke (S_2), ki ni bila izpostavljena vroči kopeli. S povečanjem hitrosti izločanja znoja se zmanjšuje temperatura podlakti desne (T_1) in leve (T_2) roke. To je posledica izhlapevanja izločenega znoja.



(a) (b)

Slika 4.13: Razlike hitrosti izločanja znoja: (a) kot posledica treninga, (b) in kot posledica življenja v različnem podnebju. [1]

Prej opisani eksperiment je vrsta prilagoditve, ki je verjetno kratkotrajna. Kot je bilo že omenjeno, nastanejo dejanske razlike glede števila znojnih žlez že v otroštvu. Če oseba živi v tropih, bo drugače reagirala na spremembo temperature površine kože, kot če živi v zmernem pasu: manj bo občutljiva za spremembe temperature. To tudi vidimo na sliki 4.13 (b). Če primerjamo Japonca (J), ki živi v zmernem pasu, in Filipinca (F), ki živi v tropih, vidimo, da prvi izloča nekajkrat več znoja po potopitvi enega stopala v vročo vodo 44,5 °C, to je čas B na sliki 4.13 (b), kot drugi.

4.2.3 Izhlapevanje znoja

Ob povečani temperaturi površine kože se povečuje hitrost izločanja znoja. To je najbolj učinkovit mehanizem uravnavanja telesne temperature. Ta deluje le, če znoj izhlapeva. Za izhlapevanje enega grama znoja s površine kože porabimo približno 2,5 kJ. Kot vidimo s slike 4.11, izhlapi le del izločenega znoja, ki tako sodeluje v procesu hlajenja površine kože oziroma celotnega organizma. Količina znoja, ki ne izhlapi, nima pomembnejše vloge pri uravnavanju telesne temperature. Količino toplote, ki se porabi za izhlapevanje znoja s površine kože, lahko izračunamo z enačbo (4.2) [3].

$$Q = \alpha W F (p_1 - p_2) \tag{4.2}$$

kjer so: Q [kJ/h] – količina toplote, ki se porabi za izhlapevanje znoja s površine kože, W – delež kože, ki je omočen z znojem, F [m^2] – celotna površina kože subjekta, p_1 [Pa] – parcialni tlak vodne pare v zraku na površini kože, p_2 [Pa] – parcialni tlak vodne pare v okoliškem zraku, α [kJ/m^2.h.Pa] – koeficient prenosa toplote v okolje pri izhlapevanju znoja s površine kože.

V normalnih okoliščinah, ko je oseba v območju ugodja, je W = 0,2. Če pa je temperatura okolja visoka in se oseba vidno znoji, je W = 1,0. Vrednost koeficienta α je odvisna od termoizolacijske lastnosti oblačil in hitrosti zraka v okolju. Za oblečeno osebo velja

$$\alpha = 0,0394\lambda \tag{4.3}$$

kjer je λ koeficient toplotne prevodnosti, ki ga, pri goli osebi, določimo z enačbo (4.4).

$$\alpha = 0,329 + 0.27v \tag{4.4}$$

kjer je v hitrost okoliškega zraka v m/s.

Kot je razvidno iz enačb (4.2), (4.3) in (4.4), je količina izhlapelega znoja odvisna od hitrosti vetra, deleža kože, ki je prekrita z znojem in od razlike parcialnih tlakov na površini oznojene kože in v okoliškem zraku. Razlika tlakov pa je odvisna od temperature in relativne vlažnosti. Vrednost tlaka p_1 se zelo malo spreminja, ker je temperatura površine kože relativno konstantna. Spreminja se le v ozkem temperaturnem intervalu, medtem ko se vrednost p_2 precej spreminja. Odvisna je namreč od temperature okoliškega zraka in njegove relativne vlažnosti.

Oba tlaka se lahko izenačita le v primeru, če je temperatura okoliškega zraka enaka temperaturi kože in je obenem relativna vlažnost v zraku 100 %. Tudi v tem primeru se izhlapevanje nadaljuje, dokler se ne zniža temperatura okoliškega zraka pod temperaturo površine kože.

Maksimalno možno količino izhlapevanja znoja s 1,65 m^2 (poleg 1,8 m^2 se v literaturi kot povprečna površina kože subjekta navaja tudi ta vrednost) v gramih na minuto lahko izračunamo na podlagi naslednje enačbe (4.5) [4]:

$$P = 0,00188(p_1 - p_2)(0,5 + \sqrt{v}) \tag{4.5}$$

kjer so: P [g/1,65m^2.min] – maksimalno možna količina izhlapevanja znoja, p_1 [Pa] – maksimalen možni tlak vodne pare pri temperaturi površine kože, p_2 [Pa] – tlak vodne pare v okoliškem zraku. Količina $(p_1 - p_2)$ se imenuje fiziološki deficit nasičenja. Tega lahko izračunamo na podlagi preglednic 4.3 in 4.4.

Z uporabo preglednic 4.3 in 4.4 lahko izračunamo maksimalno količino znoja, ki lahko izhlapi pod določenimi pogoji. Če je na primer temperatura zraka 20 °C, relativna vlaga 65 % in temperatura površine kože 32 °C, iz preglednice 4.4 odčitamo vrednost

parcialnega tlaka zraka: p_2 = 1467 Pa, maksimalno možni parcialni tlak pri temperaturi površine kože 32 °C: p_1 = 3066 Pa; $(p_1 - p_2)$ = 1599 Pa. Če je hitrost zraka v = 1,0 m/s, potem je možno, da s površine kože 1,65 m^2 izhlapi 4,32 g znoja na minuto, preglednica 4.3.

Preglednica 4.3: Količina izhlapelega znoja [g/1,65m^2.min] v odvisnosti od fiziološkega deficita nasičenja (p_1˘p_2) [Pa] in hitrosti vetra [m/s]. [3]

$p_1 - p_2$	Količina izhlapelega znoja s površine kože pri hitrosti vetra [m/s]									
[Pa]	0,0	0,05	0,10	0,20	0,50	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
1333	1,20	1,88	1,92	2,25	2,88	3,60	4,50	5,22	6,00	6,50
1467	1,32	1,85	2,11	2,47	3,17	3,96	4,95	5,74	6,60	7,15
1600	1,44	2,02	2,30	2,70	3,47	4,32	5,40	6,26	7,20	7,80
1733	1,56	2,19	2,50	2,92	3,75	4,68	5,85	6,79	7,80	8,45
1866	1,68	2,35	2,69	3,15	4,03	5,04	6,30	7,31	8,40	9,10
2000	1,80	2,52	2,88	3,37	4,32	5,40	6,75	7,83	9,00	9,75
2133	1,92	2,69	3,08	3,59	4,62	5,78	7,20	8,35	9,60	10,40
2266	2,04	2,86	3,27	3,81	4,90	6,12	7,65	8,87	10,20	11,05
2400	2,16	3,02	3,45	4,04	5,20	6,50	8,10	9,39	10,80	11,70
2533	2,28	3,19	3,67	4,27	5,48	6,84	8,55	9,92	11,40	12,35
2666	2,40	3,36	3,84	4,50	5,76	7,20	9,00	10,44	12,00	13,00
2800	2,52	3,52	4,03	4,72	6,06	7,58	9,45	10,97	12,60	13,65
2933	2,64	3,96	4,22	4,95	6,35	7,82	9,90	11,50	13,20	14,30
3066	2,76	3,86	4,42	5,19	6,63	8,30	10,35	12,02	13,80	14,95
3200	2,88	4,03	4,61	5,30	6,83	8,75	10,80	12,54	14,40	15,60
3333	3,00	4,20	4,80	5,63	7,21	9,00	11,25	13,05	15,00	16,25

Za vsak gram izhlapelega znoja se pod temi pogoji porabi 2,550 kJ. To pomeni, da lahko pod temi pogoji oseba porabi za izhlapevanje znoja največ 11,017 kJ/min ali 661 kJ/h.

Omenjeni primer velja za ugodne vremenske razmere. Oglejmo si manj ugoden primer, ko je površina kože prekrita z znojem. To se zgodi takrat, ko je temperatura površine kože 35,6 °C do 36,6 °C, preglednica 3.8.

Vzemimo na primer, da je temperatura površine kože 36 °C, temperatura zraka 40 °C in relativna vlažnost v zraku 65 %. Na površini kože je zrak nasičen (100 % relativna vlaga). Maksimalni parcialni tlak v zračni plasti neposredno na površini kože je 5893 Pa, v okoliškem zraku pa 4746 Pa. V tem primeru je fiziološki deficit nasičenja $(p_1 - p_2)$ = 1147 Pa.

Pri hitrosti vetra 1 m/s bi lahko izhlapelo v eni minuti okrog 3,2 g znoja, enačba (4.5). Za vsak izhlapeli gram znoja bi pod temi pogoji porabili 8,107 kJ/min ali 486 kJ/h. V primerjavi s prejšnjim primerom so v tem primeru manj ugodne razmere za dodatno hlajenje organizma s pomočjo izhlapevanja znoja. Stanje bi se poslabšalo, če bi bila relativna vlažnost zraka še višja. Na sliki 4.14 je prikazan potek krivulj maksimalne možne količine izhlapevanja znoja pri določenem fiziološkem deficitu nasičenosti v odvisnosti od hitrosti zraka. Krivulje od 1 do 4 na sliki 4.14 se nanašajo na razlike tlakov p_1 in p_2. (1 = 1,3 kPa; 2 = 2,0 kPa; 3 = 2,7 kPa; 4 = 3,3 kPa)

Voda se ne izloča samo kot znoj, izdihavamo jo tudi v obliki vodne pare. V preglednici 4.5 so prikazane hitrosti izhlapevanja vode v g/min skozi površino kože in preko dihalnih organov v odvisnosti od temperature zraka in njegove relativne vlage. S po-

Preglednica 4.4: Parcialni tlak vodne pare v Pa v odvisnosti od temperature T_1 zraka in relativne vlažnosti zraka 30 % do 100 %. [3]

T_1	Parcialni tlak vodne pare v zraku pri določenem % relativne vlažnosti zraka													
[°C]	30	35	40	45	50	55	60	65	70	80	90	100		
5	267	307	347	373	427	467	520	560	613	693	787	867		
10	360	427	480	533	613	667	720	787	840	960	1093	1227		
12	413	480	560	627	693	760	827	907	973	1107	1253	1387		
14	467	547	627	720	800	880	933	1013	1093	1253	1440	1560		
16	533	627	720	800	893	987	1080	1173	1253	1440	1720	1800		
18	600	693	800	893	1000	1093	1200	1307	1400	1600	1786	2000		
20	667	800	907	973	1133	1240	1360	1467	1587	1813	1946	2266		
22	773	907	1040	1173	1307	1440	1560	1693	1813	2093	2306	2613		
24	893	1040	1173	1333	1480	1627	1786	1946	2080	2373	2666	2960		
26	1000	1160	1333	1467	1627	1786	2000	2160	2333	2666	2933	3333		
28	1120	1307	1493	1680	1866	2053	2240	2426	2613	2986	3360	3746		
30	1253	1467	1680	1893	2106	2320	2506	2693	2933	3373	3786	4200		
32	1413	1640	1893	2106	2346	2586	2840	3066	3066	3786	4213	4706		
34	1640	1840	2106	2373	2640	2906	3280	3520	3813	4213	4746	5266		
36	1773	2066	2360	2666	2946	3240	3546	3733	4133	4720	5333	5893		
38	1973	2293	2626	2946	3280	3613	3946	4280	4586	5253	5893	6573		
40	2186	2546	2973	3293	3653	4026	4386	4746	5093	5946	6586	6093		
42	2426	2826	3240	3653	4053	4453	4853	5253	5653	6479	7306	8093		
44	2680	3133	3686	4053	4493	4946	5373	5799	6266	7186	8106	8986		
46	2986	3480	3986	4480	4960	5506	5973	6506	6959	7973	8359	9959		
48	3226	3840	4413	4960	5506	6053	6599	7146	7693	8826	9919	11026		
50	3706	4293	4933	5546	6159	6773	7399	8026	8599	9866	11092	12332		

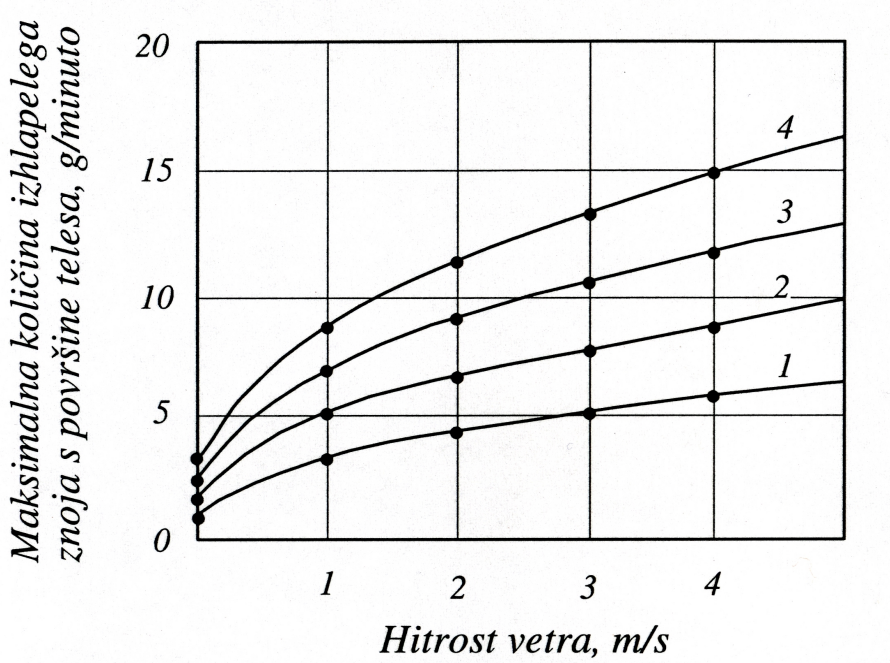
večanjem temperature zraka in z zmanjšanjem njegove relativne vlažnosti se zmanjšuje hitrost izhlapevanja vode preko dihalnih organov, povečuje pa se izhlapevanje s površine kože.

Ker je hitrost izhlapevanja odvisna od temperature zraka in istočasno od njegove relativne vlage, lahko hitrost izhlapevanja prikažemo z multiplo linearno regresijsko enačbo (4.6).

$$V = a_0 + a_1 T + a_2 f \tag{4.6}$$

kjer so V [g/min] – hitrost izhlapevanja vodne pare, T [°] – temperatura zraka, f [%] – relativna vlažnost zraka.

Hitrost izhlapevanja vode, ki jo izdihamo preko dihalnih organov označimo z V_d, s površine kože z V_k in skupno hitrost izhlapevanja z V_s. To pa v primeru, če ločeno merimo hitrost izhlapevanja znoja.



Slika 4.14: Odvisnost maksimalne hitrosti izhlapevanja znoja [g/min] od fiziološkega deficita nasičenja [Pa] in hitrosti vetra [m/s]. [3]

Preglednica 4.5: Odvisnost hitrosti izhlapevanja vode skozi dihalne organe in površino kože od temperature zraka ter njegove relativne vlažnosti pri mirovanju subjekta. [3]

Temperatura	Relativna vlažnost	Hitrost izhlapevanja znoja [g/min]		
zraka [°C]	zraka [%]	Skozi dihalne organe	Skozi kožo	Skupaj
10	76	0,18	0,42	0,60
18	70	0,17	0,57	0,74
28	55	0,13	1,56	1,69
35	50	0,11	3,14	3,25
45	35	0,09	6,11	6,20

Ker so v preglednici 4.5 navedene hitrosti izhlapevanja le pri določenih temperaturah in določenih vrednostih relativne vlage, moramo izračunati vrednosti koeficientov a_0, a_1 in a_2 v enačbi (4.6), da bi lahko izračunali hitrost izhlapevanja pri katerikoli temperaturi in relativni vlagi v intervalih, navedenih v preglednici 4.5. Vrednosti teh koeficientov so prikazane v preglednici 4.6. Parameter r je koeficient korelacije ali koeficient ujemanja hitrosti izhlapevanja glede na temperaturo in relativno vlago zraka ter vrednosti koeficientov v enačbi (4.6).

Glede na dejstvo, da je koeficient a_1 pri vseh hitrostih izhlapevanja negativen, je bolj primerno operirati z absolutno temperaturo v K. Drugače bi se glede na enačbo (4.6) povečevala hitrost izhlapevanja, ko temperatura pade pod 0 °C. Če preidemo na K, se bo bistveno spremenila vrednost koeficienta a, vrednosti drugih koeficientov pa se ne spremenijo. Nove vrednosti koeficienta a_0 so pri V_s = 39,2315; pri V_d = 0,5243 in pri V_k = 38,7072 in so vsi pozitivni kot v preglednici 4.6.

Trend spremembe količine izdihane vodne pare, preglednica 4.5, se zdi nelogičen. Toda prikazane so dejanske neto količine. Med počitkom izdihavamo približno enako količino vodne pare na enoto časa. Pri vdihavanju zraka vdihavamo tudi vodno paro,

Preglednica 4.6: Vrednosti koeficientov multiple linearne krivulje (enačba 4.6) in koeficientov korelacije odvisnosti hitrosti izhlapevanja od temperature in relativne vlažnosti zraka. [3]

Hitrost izhlapevanja	Vrednosti koeficientov			
[g/min]	a_0	a_1	a_2	r
V_s	16,4800	-0,083390	-0,204844	0,9499
V_d	0,1154	-0,001073	0,001073	0,9902
V_k	16,3645	-0,081841	0,205920	0,9517

ki je v zraku. Čim več je pare v zraku, tem manjša bo neto količina izdihane pare. Ne bomo se preveč zmotili, če vzamemo, da parcialnemu tlaku vodne pare v vrednosti 1 Pa ustreza absolutna količina pare približno 0,0075 g/m^3 zraka. Iz preglednice 4.4 je razvidno, da je v kubičnem metru zraka pri temperaturi 10 °C in 76 % relativni vlagi okrog 6,9 g vodne pare v 1 m^3 zraka. Pri temperaturi 28 °C in relativni vlagi 55 % pa celo okrog 15,4 g/m^3.

Vrednosti koeficienta a_1 so negativne, kar se zdi nelogično, saj se s povečanjem temperature povečuje hitrost izhlapevanja. To se nanaša na V_k in V_s. Toda tukaj je približno $a_2 = 2{,}5a_1$ in ima prevladujočo vlogo posebno pri temperaturah, ki so nižje kot 40 °C. Te pa so za naše podnebje zanimive. Hitrost porabe toplote zaradi izhlapevanja znoja s površine kože oblečene osebe glede na razliko tlakov in odstotka kože, ki je prekrite z znojem, lahko izračunamo z naslednjo enačbo (4.7) [3].

$$Q = \frac{E}{S} = W\mu\frac{p_1 - p_2}{100} \tag{4.7}$$

kjer so: E [kJ/h] – hitrost porabe toplote zaradi izhlapevanja znoja, S [m^2] – površina kože subjekta, W [%] – del površine kože, ki je prekrit z znojem, μ – konstanta za mokro površino, ki je po obliki podobna obliki površine človeškega telesa, p_1 [Pa] – parcialni tlak vodne pare na površini kože (nasičeni parni tlak), p_2 [Pa] – parcialni tlak vodne pare v zraku.

Parni tlak na površini kože je odvisen od več parametrov in ga lahko izračunamo z empirično enačbo (4.8).

$$p_1 = \frac{p_3 T_1 + (100 - W)p_2}{100} \tag{4.8}$$

kjer sta: p_3 – nasičeni parni tlak vodne pare na površini kože in T_1 – temperatura površine kože.

Relativno vlažnost f na površini kože [%] lahko izračunamo z enačbo (4.9).

$$f = W + 0{,}027(100 - W)p_2 \tag{4.9}$$

Vrednost parametra W lahko izračunamo na podlagi eksperimentalno ugotovljenega nasičenega tlaka vodne pare p_4 pri dani temperaturi kože nad omočenimi deli površine kože

$$W = 100\frac{p_1 - p_2}{p_4 - p_2}. \tag{4.10}$$

Če konstanto $W\mu$ v enačbi (4.7) zamenjamo z recipročno vrednostjo – uporom difuziji vodne pare R, dobi ta naslednjo obliko:

$$Q = \frac{E}{S} = \frac{p_1 - p_2}{R} \tag{4.11}$$

kjer je R vsota uporov prehodu (difuziji) vodne pare.

$$R = R_0 + R_z \tag{4.12}$$

kjer sta: R_0 – upor oblačila pretoku vodne pare in R_z – upor zraka pretoku vodne pare.

4.3 Seznam oznak poglavja

Oznaka	Enota	Opis
α	kJ/m^2.h.Pa	koeficient prenosa toplote v okolje pri izhlapevanju znoja s površine kože
a	mg	regresijski koeficient
a_0		regresijski koeficient
a_1		regresijski koeficient
a_2		regresijski koeficient
b	mg/°C	regresijski koeficient
E	kJ/h	hitrost porabe toplote zaradi izhlapevanja znoja
f	%	relativna vlažnost zraka
F	m^2	celotna površina kože
λ	kJ/m.s.K	koeficient toplotne prevodnosti
μ		konstanta za mokro površino, ki je po obliki podobna obliki površine človeškega telesa
p_1	Pa	parcialni tlak vodne pare v zraku na površini kože
p_1	Pa	maksimalen možni parcialni tlak vodne pare v zraku na površini kože
p_2	Pa	parcialni tlak vodne pare v okoliškem zraku
p_3	Pa	nasičeni parni tlak vodne pare na površini kože
p_4	Pa	nasičeni parni tlak vodne pare na omočeni površini kože
P	g/1,65m^2.min	maksimalno možna količina izhlapevanja znoja
Q	kJ/h	količina toplote, ki se porabi za izhlapevanje s površine kože
r		koeficient korelacije
R	m^2.h.°C/kJ	upor difuziji vodne pare
R_0	m^2.h.°C/kJ	upor oblačila pretoku vodne pare
R_z	m^2.h.°C/kJ	upor zraka pretoku vodne pare
S	mg	količina znoja
S	m^2	površina kože subjekta
T	°	temperatura zraka
T_1	°	temperatura površine kože
v	m/s	hitrost zraka
V	g/min	hitrost izhlapevanja vodne pare
V_d	g/min	hitrost izhlapevanja vodne pare skozi dihalne organe
V_k	g/min	skupna hitrost izhlapevanja vodne pare s površine kože

Nadaljevanje na naslednji strani

Nadaljevanje s prejšnje strani

Oznaka	Enota	Opis
V_s	g/min	skupna hitrost izhlapevanja vodne pare
W		delež kože, ki je namočen z znojem
W	%	delež kože, ki je namočen z znojem

4.4 Literatura

[1] Y. Kuno. *Human perspiration*. Charles C. Thomas, Springfield, Illinois, 1956.

[2] D. Oppel and M. Jokl. *Metodika izmerenija mikroklimatičeskih uslovij v gigieničeskoj praktike*. Medgis, Moskva, 1962.

[3] P. A. Kolesnikov. *Teplozaščtnie svojstva odeždi*. Legkaja industria, Moskva, 1965.

[4] N. H. Vitte. *Teplovoj obmen čeloveka i ego gigieničeskie značenie*. Grosmedizdat, Kijev, 1956.

POGLAVJE 5

Prilagoditev na nizke in visoke temperature

Kazalo

5.1 Prilagoditev na nizke temperature **87**
5.1.1 Inuiti (Eskimi) 88
5.1.2 Sibirci 90
5.1.3 Gola ljudstva, izpostavljena mrazu 91
5.1.4 Prilagoditev na visoke temperature 93
5.1.4.1 Toplo in suho podnebje 94
5.1.4.2 Toplo in vlažno podnebje 96
5.2 Literatura **99**

5.1 Prilagoditev na nizke temperature

Na nizke temperature se morajo prilagoditi predvsem ljudstva, ki živijo ob severnem tečajniku in na jugu Južne Amerike, delno pa tudi domorodci v Avstraliji. Razvila sta se v glavnem dva tipa prilagajanja. Prvi tip lahko pripišemo Inuitom (Eskimom) in ljudstvom severne Sibirije [1], ki so nizkim temperaturam prilagodili predvsem oblačila in bivališča. Drugi tip pa ljudstvom juga Južne Amerike in avstralskim domačinom [2], ki so nizkim temperaturam prilagodili organizem.

Z izrazom nizka temperatura se lahko pojmuje zelo širok temperaturni interval. V območju severnega tečajnika in na splošno v Sibiriji so te temperature pozimi pogosto nižje od -50 °C. Na skrajnem jugu Južne Amerike (otok Ognjena zemlja) pa so temperature pozimi v povprečju celo višje od 0 °C.

Kot kažejo izkušnje, je pri takšnih temperaturah možno doseči prilagoditev organizma in živeti brez oblačila. Pri -50 °C pa to vsekakor ni mogoče, ampak je nujno uporabiti dodatno toplotno izolacijo – oblačilo. Prilagoditev neprijetnemu okolju, ki je trajala verjetno več tisoč let, je zanimiva za študij oblačenja in tudi bivanja. Marsikatero dognanje, ki temelji na tisočletnih izkušnjah, se popolnoma sklada z moderno znanostjo, ki se ukvarja s problemom oblačenja v različnih podnebnih okoljih.

5.1.1 Inuiti (Eskimi)

Inuiti (Eskimi) so avtohtono severnoameriško ljudstvo azijskega izvora, ki živi na severu Severne Amerike in na Grenlandiji. Zanimivo je predvsem njihovo oblačilo, slika 5.1 [3], in način stanovanja, slika 5.2 [4], v polarni noči pozimi. Takrat se temperatura zniža tudi do -65 °C. Poleti je temperatura tudi na Severnem tečaju lahko okrog +7 °C, na Aljaski (Fort Yukon) pa celo do +38 °C.

Nas zanima predvsem način oblačenja in stanovanja Inuitov pozimi, ko so temperature največkrat med -40 °C do -50 °C, v bližini obal in v notranjosti Grenlandije pa celo -60 °C do -67 °C. Primerno takšnim temperaturam je oblačilo, ki je izdelano iz krzna kot edinega dosegljivega materiala. Med ženskim in moškim oblačilom ni nobene razlike. Oblačilo je praviloma dvoplastno. Zunanja plast (obleka) je dvodelna (hlače in bluza), s krznom navzven. Ta zunanja plast je precej ohlapna. Če so razmere zelo ostre (nizke temperature), je mogoče roke izvleči iz rokavov in jih skriti pod bluzo, da so čisto ob telesu. Na ta način se zmanjša izguba toplote in sta roki zaščiteni pred podhladitvijo. To je možno le takrat, ko se z rokami ne opravlja nobeno delo (sedenje na saneh in podobno). Oblačilo je največkrat izdelano iz krzna karibu jelenov. Druga plast oblačila je plast, ki se nosi na koži. Sestoji iz srajce, spodnjih dolgih hlač in nogavic. Pri tej plasti je krzno obrnjeno navznoter, k površini kože. Poleg tega so še škornji, pri katerih je krzno obrnjeno navzven, in rokavice palčniki. Rokavice so ponavadi dvoplastne. Krzno je obrnjeno navzven (zunanja plast) in navznoter (notranja plast). Škornji so iz tjulnje kože in so nepremočljivi.

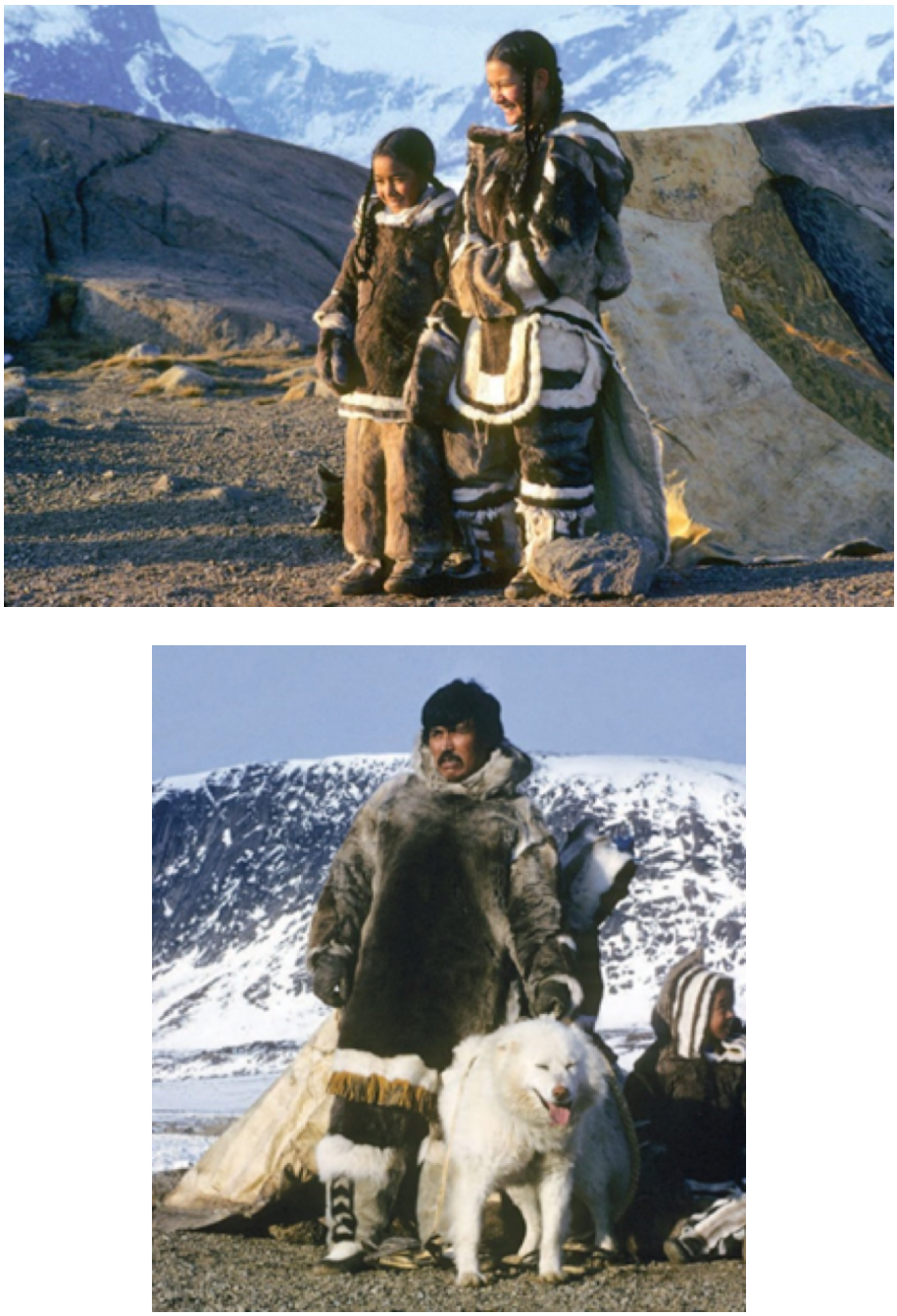
Na glavi je kapuca, ki je sestavni del bluze. Bluza se oblači čez glavo in je pri nošnji odprt samo del odprtine v predelu obraza. Le 5 % kože ali še manj je neposredno izpostavljeno zunanjim vplivom oziroma ni zaščiteno z oblačilom.

Obleka je sešita s kožnimi trakovi, ki zelo dobro tesnijo in pri šivih ne prodira mrzel zrak v notranjost oblačila. Tudi ostale odprtine (konci rokavov in hlačnic, pas ter območje prsi in obraza) so dobro zatesnjene. Zato so izgube toplote zaradi prodiranja mrzlega zraka v oblačilo zelo majhne. Po drugi strani pa omogoča tako izdelano oblačilo prenos vodne pare s površine kože v okolje.

Pri nekaterih indijanskih plemenih v severni Kanadi je pogost pojav slepote kot posledice vpliva ostrih ledenih kristalov, ki jih nosi veter. Ti se zarinejo v oči in sčasoma povzročijo slepoto. Tudi snežna belina negativno vpliva na vid. Za razliko od njih so Inuiti razvili "očala", ki to preprečujejo. Ta očala seveda nimajo nobenih leč, ampak sestoje iz dveh koščkov kož, ki sta oblikovana po očesih. Vsak košček ima majhno odprtino, ki prepušča dovolj svetlobe, toda ne preveč, in tudi onemogoča škodljivo delovanje majhnih ledenih kristalov.

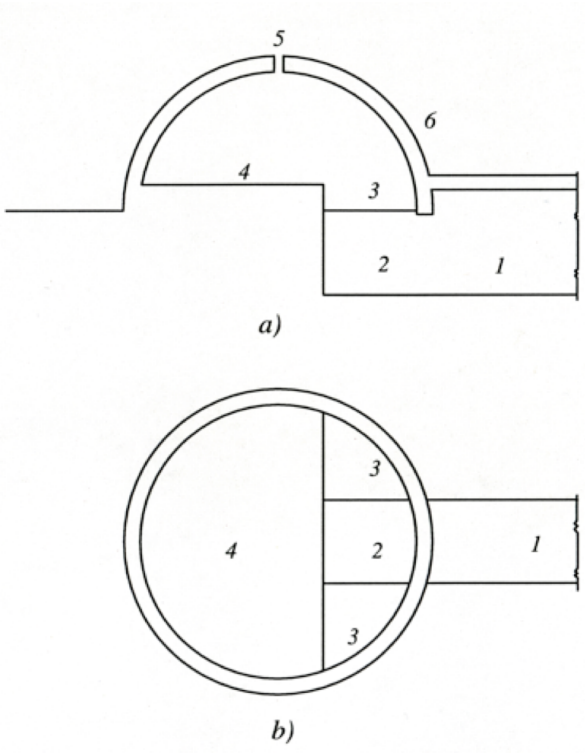
Lahko rečemo, da je zimsko eskimsko oblačilo konstruirano po vseh zahtevah moderne znanosti o oblačenju v zimskih okoliščinah. Koža ima precejšen upor prevajanju vodne pare. Če se oseba zaradi stanja okolja in organizma (temperatura okolja in intenziteta aktivnosti) preveč znoji, se oblačilo namoči z znojem. Zaradi tega se zmanjša toplotna izolacija oblačila in ustvarijo se ugodne okoliščine za razvoj bakterij, ki razkrajajo krzno. Obleka mora biti suha, oziroma se mora posušiti, če je mokra, da ne pride do gnitja kože in odpadanja dlak.

Inuitsko zimsko bivališče, tako imenovani iglu, je poglavje zase. Iglu je prikazan na slikah 5.2 in 5.3. Slika 5.2 (a) (vertikalni presek igluja) kaže, da je vhodni rov, označen z 1, 2, na precej nižjem nivoju kot nižja ploščad, označena s 3. V tem rovu je temperatura nižja kot na nižji ploščadi 3. Na tej ploščadi je odprto "ognjišče" oziroma gori sveča. Poleg toplote, ki jo izžarevajo stanovalci igluja, prihaja z ognjišča dodatna toplota. Na



Slika 5.1: Tradicionalna oblačila Inuitov. [3]

ta način se segreva zrak v igluju.



Slika 5.2: Inuitsko zimsko bivališče – iglu; a) naris; b) tloris. [4]

Ker se toplejši zrak dviga navzgor, je temperatura zraka na zgornji ploščadi, označeni s 4, višja kot na spodnji ploščadi 3. Zgornja ploščad je namenjena spanju in počitku. Temperatura zraka na zgornji ploščadi je praviloma med 26 °C in 32 °C. Zračnik, označen s 5, je le tolikšen, da omogoča dovolj hitro izmenjavo zraka v notranjosti igluja, da se njegova kemična sestava bistveno ne spremeni oziroma da se ne poveča bistveno količina CO_2. Na vhodu rova 1 je loputa iz kože, ki preprečuje nekontroliran vdor zunanjega mrzlega zraka v iglu. Temeljno konstrukcijo igluja tvori kupola, označena s 6, ki je sestavljena iz ledenih kock. Stene kupole so dovolj debele, da je konstrukcija stabilna. Poleg tega je tudi izguba toplote skozi takšno steno relativno majhna, kljub temu da je temperaturna razlika včasih več kot 30 °C. Na notranji strani kupole je temperatura okrog 0 °C, temperatura zunanjega zraka pa je -30 °C ali celo nižja.

Res je, da je koeficient toplotne prevodnosti ledu 8,4 kJ/m.°C.h, toda to velja le za čisti kompaktni led. Če je struktura ledu bolj porozna, je ta vrednost manjša. Zunaj se lahko nakopiči precej snega, tako da štrli iz snega le del kupole. Vse to povzroča boljšo toplotno izolacijo. Ker je specifična toplota zraka le okrog 1 kJ/kg.°C, se ta kljub relativno majhnemu izviru toplote hitro segreva, saj tudi prostornina igluja ni velika, slika 5.3. Vhod je zmeraj obrnjen v zavetje. Poleti uporabljajo šotor iz kož

5.1.2 Sibirci

Podobno kot Inuiti so sibirska plemena imela in še imajo oblačilo ali kose oblačila iz krzna, slika 5.4. V začetku devetnajstega stoletja je spodnji (notranji) del oblačila tvorila krznena srajca, pri kateri je bilo krzno obrnjeno navznoter proti koži, tako kot pri Inuitih. Zunanji del oblačila – obleka pa je imela krzno obrnjeno navzven. Povrh obleke je bila vetrovka – dolga krznena srajca iz lahke kože, ki je ščitila pred vetrom in snegom. Šotor

Slika 5.3: Notranjost inuitskega igluja. [4]

je izdelan iz kož. Na notranji strani se nabira vlaga, kar lahko negativno vpliva na kožo, ker se razvijajo bakterije.

Zunaj so pozimi pogosto temperature -50 °C. V tem primeru je temperatura v šotoru le okrog -11 °C. Krzna sušijo tako, da jih obesijo zunaj na mraz. Na splošno je takšen šotor slabša rešitev kot iglu. Oblačilo pa je precej podobno eskimskemu oblačilu.

5.1.3 Gola ljudstva, izpostavljena mrazu

To so bila nekatera ljudstva juga Južne Amerike (Ognjena zemlja, slika 5.5), Avstralije, slika 5.6, Tasmanije in Južne Afrike. Ko so ta ljudstva prišla v stik z Evropejci, so bila na stopnji paleolitske kulture. Danes so nekatera od teh ljudstev že izumrla. Čim bolj gremo proti jugu Južne Amerike (področje Ognjene zemlje), tem manj oblečena so bila ljudstva. Temu pojavu lahko pravimo fiziološka adaptacija na surove podnebne razmere. Na skrajnjem jugu Južne Amerike podnebje ni tako ostro kot na severnem tečaju, saj so povprečne letne temperature 6 °C, povprečne zimske temperature okrog 2 °C in poletne 10 °C. Vendar pa tam pihajo mrzli in vlažni vetrovi. Kljub takšnemu podnebju, ki je za naše razmere precej surovo, so pripadniki plemena Jagani nosili le prekrivalo iz kože preko ramen; pripadniki plemena Ona na Ognjeni zemlji pa so bili praktično popolnoma goli in so se greli ob ognju, od tod tudi ime Ognjena zemlja. Ko je Darwin plul skozi Magellanovo ožino, je opazoval skupino domorodcev, več mož in eno žensko, v kanuju, ki so bili popolnoma goli. Temperatura zraka je bila le okrog 6 °C. Ponoči so spali na vlažni zemlji, stisnjeni v skupino [6].

Avtohtono prebivalstvo v Avstraliji je tudi živelo brez oblačil. Vendar se v Avstraliji podnebje v marsičem razlikuje od podnebja juga Južne Amerike. V centralnem in zahodnem delu kontinenta je suho podnebje. Letna količina padavin (dež) je le okrog 28 mm.

Slika 5.4: Žene iz plemena Nenetov na tekmovanju narodnih noš v Nadimu. [5]

Slika 5.5: Prvotni prebivalci Ognjene zemlje. [6]

Slika 5.6: Nastop plesne skupine Gubbi Gubbi na festivalu Booin Gari. [7]

Za to podnebje je značilno zelo veliko nihanje dnevne temperature (puščavska klima). V januarju (poletje) niha povprečna temperatura med 12 °C in 28 °C. Nihanje dnevnih temperatur (temperature zraka podnevi in ponoči) je izredno veliko, saj je v mejah med -5 °C in +47 °C. Kljub takšnemu nihanju temperature, ki je ponoči pogosto pod ničlo, so spali domačini neposredno na tleh, brez kakršnekoli toplotne izolacije. Pri tem raziskovalci niso opazili povečanja metabolizma. Predpostavlja se, da je pri teh ljudstvih zelo razvit kontrolni mehanizem kroženja krvi v podkožnem tkivu. Pri hlajenju se spremeni kroženje krvi v podkožnem tkivu tako, da se zelo upočasni in se obenem ožilje skrči. Končni učinek tega mehanizma je povečanje toplotne izolacije podkožnega tkiva, ki preprečuje hitrejše ohlajanje organizma. Pri tem moramo upoštevati dejstvo, da je mrzlo le ponoči in da je golo telo izpostavljeno ohlajanju relativno kratek čas (okrog 8 ur) in da so nočne temperature le redkokdaj nižje kot -5 °C. Ker je možno znižati temperaturo na površini. prstov tudi do 5 °C brez resnejših posledic celo pri neprilagojeni osebi, se verjetno tudi Avstralcem precej zniža temperatura na površini kože med spanjem v relativno mrzli noči. Pri tem se zmanjša razlika temperatur zraka in površine kože, zaradi česar se zmanjša hitrost pretoka toplote s površine telesa v okolje. Po drugi strani se poveča toplotna izolacijska vrednost podkožnega tkiva zaradi prej omenjenega mehanizma v zvezi s kroženjem krvi, kar tudi zmanjšuje prehod toplote iz jedra telesa skozi podkožno tkivo in kožo v okolje. Na ta način se počasi hladi površina telesa in tudi podkožno tkivo, dokler se ne doseže ravnovesje med izgubami in proizvodnjo energije pri določeni temperaturi površine kože in določeni temperaturi zraka. Vse kaže, da se to ravnovesje doseže na višjem temperaturnem nivoju, kot je temperaturni prag občutljivosti osebe na mraz. Iz opazovanj sklepamo, da je ta precej nižji kot pri neprilagojeni osebi, na primer Evropejcu [8].

5.1.4 Prilagoditev na visoke temperature

Razlikujemo dve osnovni vrsti toplega podnebja: toplo in suho ter toplo in vlažno podnebje. Glede oblačenja zahtevata ti dve podnebji različne vrste oblačil, pa tudi različne stanovanjske prostore. Na kratko bomo opisali eno in drugo vrsto podnebja.

5.1.4.1 Toplo in suho podnebje

Tako podnebje je značilno predvsem za Egipt in Srednji ter Bližnji vzhod. V starem Egiptu so bili tekstilni izdelki v glavnem laneni, sliko 5.7. Volno so uporabljali precej manj. Bombaž in naravna svila do rimskih časov nista bila v uporabi. Od obutve so (pred 3200 letom pred našim štetjem) nosili le sandale. V času starega kraljestva (2780 do 2270 pred našim štetjem) so nosili haljo do kolen ali do tal iz belega lanenega platna. Belo oblačilo je imelo dve prednosti: ni ga bilo treba barvati, če so sploh poznali postopke barvanja, in reflektiralo je precejšen delež sončne svetlobe, zaradi česar se zmanjša toplotna obremenitev iz okolja. V času srednjega kraljestva (2100 do 1788 pred našim štetjem) je bila temu oblačilu dodana še srajca. V novem kraljestvu, imperiju (1580 do 1090 pred našim štetjem) je bila v modi kratka srajca z rokavi ali brez njih. Dostojanstveniki so ob državnih in verskih praznikih nosili celo lasulje. Kmetje so imeli le halje iz lanenega platna. V delti Nila so povprečne zimske temperature okrog 13 °C in poletne okrog 28 °C. V Zgornjem Egiptu je srednja temperatura zraka pozimi okrog 19 °C, poleti pa najvišja dnevna temperatura celo več kot 50 °C. V Egiptu je suho podnebje z malo padavin. Približno takšne podnebne razmere so bile tudi v starem Egiptu. Podnebje se od takrat ni bistveno spremenilo. Spremembe so nastopile pred tem časom, saj je bilo pred več kot 9 tisoč leti v Sahari dovolj padavin, kar je videti s slik na skalah v področju Tasili [2]. Še sedaj so jasno vidna suha korita rek (wadi) kot priče dovolj vlažnega podnebja, ki je omogočalo obstoj rastlinskega in živalskega sveta.

Slika 5.7: Tradicionalna oblačila v starem Egiptu. [9]

Drugo zanimivo področje je Mezopotamija, kjer je podobno podnebje kot v Egiptu, le

da je bolj mrzlo zaradi bližine velikih planinskih gmot na severu in vzhodu. V Bagdadu je v januarju povprečna temperatura 9 °C, minimalna pa 7 °C. V juliju je povprečna temperatura 35 °C maksimalna pa 50 °C. Pozimi pade manj kot 20 mm padavin. Podnebje pa se spreminja: temperatura se praviloma povečuje in količina padavin zmanjšuje.

Na teh območjih starih kultur, slika 5.8, žive sedaj večinoma Arabci. Beduini so nomadi v arabskem svetu, ki še vedno živijo v puščavi pod šotori. Njihovo oblačilo je primer dobre prilagoditve oblačila puščavskemu in pol puščavskemu podnebju. Moški nosijo pas iz gazelje kože čez široko srajco z dolgimi rokavi, ki sega do tal. Srajca ima spredaj razporek. Čez njo pride dolga bela halja do tal, ki je precej kosmata. Ima dolge široke rokave, ki segajo čez dlani Čez to se nosi pas iz volne ali kože. Na vrhu je zadnja plast – ogrinjalo (aba). To je spredaj odprto in sega do tal. Je precej širše od ramen uporabnika. Rokavi segajo nekaj čez komolec. Ogrinjalo je iz volnene tkanine ali ovčjega krzna. Obuti so ponavadi v sandale ali škornje. Na glavi nosijo okroglo kapo in čez njo prekrivalo. To je kos tkanine, ki ima površino okrog 0,4 m^2 in je pritrjeno na glavo in kapo s pomočjo traku.

Slika 5.8: Oblačila v Mezopotamiji. [10]

Ženske nosijo dolgo temnomodro srajco, ki je daljša od osebe in ima dolge rokave.

Okrog vratu je stisnjena. Tudi okrog pasu je srajca stisnjena s širokim tkanim pasom. Odvečna dolžina srajce visi čez pas. Povrhu pride plašč kot pri moških. Včasih je pod njim kratka jopa. Prekrivalo čez glavo je približno takšno kot pri moških, le da je običajno črne barve.

Kot vidimo, je oblačilo precej ohlapno in pokriva celo telo. Prekrivalo na glavi pa se lahko priredi tako, da pokrije tudi obraz. To prekrivalo deluje v peščenem viharju kot filter. Ker je oblačilo stisnjeno ob životu, se ne pojavi tako imenovani učinek predora, do katerega bi sicer prišlo pri tako širokem oblačilu. Ta učinek pomeni gibanje zraka od spodaj navzgor. To je sicer ugodno za hlajenje, toda v peščenem viharju bi pomenilo gibanje peska po isti poti, kar je vsekakor nezaželeno. Poleg tega se zaradi učinka predora poveča hitrost izhlapevanja, kar pomeni v puščavskih razmerah nevarno povečanje izgube tekočine. Ponoči se temperatura zraka zelo zniža in pri takšni temperaturi učinek predora ni zaželen, ker bi to pomenilo pospešeno ohlajevanje telesa. Kroj in oblika oblačila se zdita nepraktična. Ne smemo pa pozabiti, da so beduini predvsem živinorejci in pri tem opravilu jim takšno oblačilo ni v napoto. Oblačilo ni najbolj primerno za vročino. Zaradi tega je tri-plastno, kar omogoča prilagoditev povečani temperaturi. Pri visokih temperaturah podnevi je primerna le ena plast, ki pokriva celotno telo. Beduini, sliki 5.9, bivajo v šotorih, ki so precej veliki. Vhod v šotor je vedno v senci in v zavetju, da pride v šotor čim manj peska.

Slika 5.9: Tradicionalna oblačila Beduinov. [11]

5.1.4.2 Toplo in vlažno podnebje

Toplo in vlažno podnebje imajo Indonezija, Centralna Afrika, Srednja Amerika in Amazonija. Zanimivo je pogledati, kako so se ljudstva oblačila in kako so stanovala v takšnem podnebju. Na otoku Javi so moški nosili kos batik tkanine (barvane v batik tehniki) kot ogrinjalo, ki se ovije okrog pasu, slika 5.10 levo. Pod tem ogrinjalom so hlače in spodnje hlače. Okrog glave so nosili kos tkanine. Ogrinjalo sega približno do

kolen. Lahko se podaljša ali skrajša po potrebi, tako da se stisne ali popusti v pasu. Na zgornji polovici telesa se nosi jopič (suknjič).

Ženske nosijo sarong – dolg kos tkanine, slika 5.10 desno, katerega konca sta speta skupaj, tako da tvori tkanina širok in kratek valj. Telo prekrije od pazduhe do kolena in tvori haljo. Čez to se ponavadi nosi tesen suknjič. Povprečna temperatura v Džakarti je 26 °C v januarju, do 27 °C v oktobru. Maksimalna razlika temperatur je med 36 °C in 19 °C. Povprečna količina padavin je 1832 mm. Podobno podnebje je tudi v Srednji Ameriki, kjer so živeli Maji (polotok Jukatan, Guatemala, Belize). V teh krajih so povprečne letne temperature 27 °C. Najnižja temperatura, izmerjena v januarju, je 13 °C, najvišja v aprilu 41 °C. Povprečna letna količina padavin je 1767 mm. Srednja mesečna relativna vlažnost niha med 66 % v aprilu in 83 % v septembru. To v glavnem velja za Gvatemalo. Na Jukatanu so temperature podobne, le padavin je približno dvakrat manj kot v Gvatemali. Na Jukatanu so tla apnenčasta in reke tečejo v glavnem pod zemljo – ponikalnice.

Slika 5.10: Tradicionalna oblačila v Indoneziji: sarong in kebaja. [12, 13]

Stari Maji, slika 5.11 so nosili kos tkanine, podobno kot Javanci, ki so ga nekajkrat ovili okrog pasu. En konec te tkanine je visel spredaj, drugi zadaj. To je bila bombažna tkanina, ki je bila tkana zelo spretno v ornamentih. Ženske so se oblačile v vreči podobno krilo, odprto na obeh straneh. Prsi niso bile pokrite. Otroci so bili goli. Glede oblačenja in stanovanja je zelo veliko podobnosti med Maji in Javanci, kar pomeni, da so se podobno prilagodili podobnemu podnebju.

Iz opisanih oblačil lahko sklepamo na zelo veliko podobnost. Tudi glede stanovanja ni bistvenih razlik. Hiše so pritlične. Tla so nekoliko dvignjena glede na nivo tal okoli hiše, da ne bi prišlo do poplav. Okoli hiše je dvorišče. Streha je prekrita s slamo ali trsjem. Takšna streha je dober toplotni izolator. Stene so iz dračja ali rogoznice in omogočajo dobro ventilacijo, kar je v vlažnem in toplem podnebju zelo zaželeno. Dobra toplotna izolacija strehe omogoča zmanjšanje toplotne obremenitve, ki jo povzročajo sončni žarki. Streha ima torej vlogo dežnika in sončnika ali senčnika.

Kot vidimo, so se stare kulture razvile tako v vročem in suhem podnebju (Egipt, Mezopotamija), kot tudi v vročem in vlažnem podnebju (Java, Jukatan, Maji, delno Indija).

Slika 5.11: Tradicionalna oblačilo Majev. [14]

V vročem vlažnem podnebju se metabolizem ne zmanjša. Toda tako Javanci kot Maji so imeli zelo širok izbor prehrane, ki ni bila kalorična, in minimalno količino oblačila, kar vsekakor ugodno vpliva na fiziološko prilagoditev takšnemu podnebju.

Lahko omenimo še nekaj zanimivih podrobnosti v zvezi s prilagoditvijo podnebju. Depilacija je bila razširjena med starimi Egipčani. Uporabljajo jo moderni muslimani, kot tudi mnoga primitivna ljudstva Južne Amerike in Afrike. Mogoče izvira ta navada iz potrebe po prilagoditvi vročemu podnebju. Pot laže odteka, če ni dlak in tudi hitreje izhlapeva. Zaradi tega se zmanjša draženje kože in slabo počutje. Podobna je razlika med čevlji in sandalami. Sandale so odprte in omogočajo dobro izhlapevanje znoja, čevlji pa ne. Zato se v čevljih nabira znoj, povečuje se temperatura, omogoča je razvoj glivic in na splošno se poslabša počutje. Zaradi tega so v vročem podnebju sandale bolj primerne kot čevlji.

Zanimiva je še konstrukcijska rešitev klobuka. Ta je na južnem Kitajskem, slika 5.12 levo, in v jugovzhodni Aziji pleten in zaradi tega zelo porozen. Znotraj je obroč, ki sede na glavo, tako da je vrh (ali dno) klobuka oddaljen od površine glave za okrog 5 cm. To omogoča dobro izhlapevanje s površine (temena) glave in prenos vodnih hlapov v okolje. Na ta način je omogočeno idealno ohlajevanje glave in s tem tudi celotnega telesa. Obenem klobuk preprečuje dodatno toplotno obremenitev iz okolja zaradi sončnega sevanja. Klobuk ima pas, da ga kmet lahko obesi na hrbet, ko ga ne potrebuje več. V Mehiki je obod klobuka zelo velik, slika 5.12 desno, tako da daje senco praktično celotnemu telesu.

Južnoameriški Indijanci (Amazonija) so praktično goli in spijo v viseči mreži, drugi

Slika 5.12: Klobuk-slamnik z juga Kitajske in mehiški sombrero. [15, 16]

narodi pa na asuri ali na tleh. Ti načini so v vročem podnebju bolj ugodni (telo se bolj hladi) kot konvencionalna postelja.

Ravne strehe se pojavljajo v vseh območjih, ki imajo suho podnebje. V vročih nočeh so idealno mesto za spanje. Tradicionalne hiše v Iranu (nekoč Perziji) so pogosto napol vkopane v zemljo in v vkopanem delu je bolj hladno poleti in bolj toplo pozimi kot v zgornjem delu hiše.

Debele stene iz nežgane opeke, visok strop in visoko postavljena okna so zelo ugodni konstrukcijski elementi v suhem in vročem podnebju. Uporabljajo pa tudi dolgo pahljačo, ki počasi niha in tako omogoča gibanje zraka. Gibajoči se zrak pa omogoča povečanje izhlapevanja znoja s površine kože, kar pomeni povečanje količine oddane toplote v okolje in zaradi tega, bolj učinkovito hlajenje organizma.

Obleka je pod določenimi pogoji lahko celo škodljiva. V Polineziji in Mikroneziji so bila večina tamkajšnjih ljudstev brez oblačila. Misijonarji pa so menili, da to ni v skladu s krščansko vero in so jih oblekli. V teh predelih so pogoste tropske plohe in vetrovi. Če je oseba gola, se hitro posuši in je bolj toplotno izolirana, kot če ima na sebi mokro oblačilo, ker je zrak boljši toplotni izolator kot voda. Zaradi pihanja vetra se organizem bolj ohladi v mokrem oblačilu, kot če je popolnoma gol. Posledica tega oblačenja je bila povečanje obolelosti avtohtonega prebivalstva in tudi povečanje smrtnosti. To je le en primer, kako je dosežek ene kulture lahko poguben za druge, če uporaba dosežka ni smotrna.

5.2 Literatura

[1] R. D. Stenton. The adaptive significance of caribou winter clothing for arctic hunter-gatherers. *Études/Inuit/Studies*, 15(1):3–28, 1991.

[2] E. Bacon, editor. *Iščezle civilizacije: zaboravljeni narodi drevnog sveta.* Beograd, 1965.

[3] N. Newbery. Traditional inuit clothing. *Arctic Journal December 28*, 2018. http://arcticjournal.ca/featured/traditional-inuit-clothing/ (13.5.2019).

[4] O. G. Kløver. Lessons from the northwest passage: Roald amundsen's experiences in the canadian arctic. *Canadian Geografic Jul 6 2018*, 2018. https://www.canadiangeographic.ca/article/lessons-northwest-passage-roald-amundsens-experiences-canadian-arctic (14.5.2018).

[5] B. Alexsander and C. Alexsander. Nenets women competing in a traditional clothing competition during the reindeer herders' festival at nadym. yamal, western siberia, russia. 2016. https://www.naturepl.com/stock-photo-nature-image01556214.html (13.10.2022).

[6] E. Bacon. *The lost tribes of Tierra del Fuego : Selk'nam, Yamana, Kewesqar.* Thames & Hudson, London, 2015.

[7] H. Tatham. 2016-the gubbi gubbi dance group performs at the booin gari indigenous festival at noosaville. 2016. https://www.abc.net.au/news/2016-04-06/gubbi-gubbi-dance-group/7303856 (13.10.2022).

[8] I. Gilligan. Clothing and climate in aboriginal australia. *Current Anthropology*, 49(3):487–495, 2008.

[9] Ancient egyptian man and woman in traditional costumes. Technical report. https://alancientrivervalleycivilizations.weebly.com/clothing–family-life.html (13.10.2022).

[10] Mesopotamian clothing and family life. Technical report. https://previews.123rf.com/images/artbesouro/artbesouro1602/artbesouro160200035/52369525-ancient-egyptian-man-and-woman-in-traditional-costumes.jpg (13.10.2022).

[11] J. Robinson. The everyday lives of bedouins - 100 years ago: Black and white photos show nomadic arab tribes at the turn of the twentieth century. *Dailymail*, 2017-07-17. https://www.dailymail.co.uk/news/article-4703140/The-everyday-lives-Bedouins-100-years-ago.htm (13.10.2022).

[12] Sarong. Technical report. https://australiansarongs.com/sarongs-in-south-asia/ (13.10.2022).

[13] Kebaya. Technical report. https://australiansarongs.com/sarongs-in-south-asia/ (13.10.2022).

[14] Ancient mayan traditional clothing. Technical report. https://www.pinterest.com/pin/400046379372278105/ (13.10.2022).

[15] Chinese bamboo hat. Technical report. https://www.amazon.com/Sunnyhill-Chinese-Oriental-Bamboo-Fishing/dp/B01M7TVRN9 (13.10.2022).

[16] Discover ideas about mexican sombrero hat. Technical report. https://www.pinterest.com/pin/775252523329804091/ (13.10.2022).

POGLAVJE 6

Izhodišča za projektiranje oblačil

Kazalo

6.1 Namembnost oblačil **102**
6.2 Projektni zahtevki za oblačila **102**
6.2.1 Vsakdanja oblačila 103
6.2.1.1 Moška oblačila 103
6.2.1.1.1 Vpliv okolja 103
6.2.1.1.2 Funkcionalnost 103
6.2.1.2 Ženska oblačila 105
6.2.1.3 Otroška oblačila 105
6.2.2 Posebna oblačila 105
6.2.2.1 Uniforme 105
6.2.2.1.1 Uniformiranost 106
6.2.2.1.2 Univerzalnost 106
6.2.2.1.3 Funkcionalnost v ožjem smislu 106
6.2.2.1.4 Maskirnost 106
6.2.2.1.5 Zaščita pred fizičnimi, kemičnimi in biološkimi poškodbami 107
6.2.2.1.6 Zaščita pred neprijetnimi vplivi podnebja . 107
6.2.2.1.7 Specifičnosti 107
6.2.2.2 Delovna oblačila 108
6.3 Osnovni parametri, ki jih moramo upoštevati pri konstrukciji oblačil . **109**
6.3.1 Toplotna izolacija oblačila 109
6.3.1.1 Vpliv temperature 111
6.3.1.2 Vpliv vode 112
6.3.1.3 Vpliv vetra 115
6.3.1.4 Vpliv oblike površine oblačila 115
6.3.1.4.1 Prevajanje toplote skozi ravno površino . . 116
6.3.1.4.2 Prevajanje toplote skozi valjasto površino . 116

6.3.1.4.3 Pretok toplote skozi sferično površino . . . 117
6.3.1.4.4 Medsebojna primerjava toplotnih uporov . 118
6.4 Seznam oznak poglavja **119**
6.5 Literatura **120**

6.1 Namembnost oblačil

Ker je namembnost oblačil zelo pestra, je težko podati popolno klasifikacijo. To tudi ni naš namen. Obdelali bomo le nekaj najvažnejših skupin oblačil glede namembnosti. Z izrazom oblačilo razumemo vse, kar ima opazovana oseba na sebi v danim razmerjih. Pri tem mislimo tudi obutev in podobno. Ne bomo obravnavali v podrobnosti na primer konstrukcije čevljev in materialov, iz katerih so izdelani, temveč le njihovo funkcijsko vlogo v sestavi celotnega oblačila.

Prvo plast oblačil tvori spodnje perilo, ki je v neposrednem stiku s površino kože. Druga plast običajno je obleka v konvencionalnem pomenu besede. Tretja plast pa je vrhnji del oblačila – plašč in podobno. V našem podnebju zadostuje tri plastno oblačilo pozimi in dvoplastno poleti. To pa ne velja na splošno. V gorskih predelih tudi poleti navadno ne zadostuje dvoplastno oblačilo, vsaj ne na večjih višinah. Pri tem mislimo na čas, ko sije sonce. Pozimi večkrat ne zadostuje tri-plastno oblačilo, ampak potrebujemo dodatne plasti na posameznih delih telesa. Število plasti oblačila je odvisno od temperature okolja, vrste in intenzitete aktivnosti, ter vrste padavin ipd.

Po namembnosti lahko oblačila uvrstimo v več skupin: vsakdanja oblačila, delovna oblačila v zaprtem prostoru, delovna oblačila na odprtem, vojaška uniforma, športna oblačila, oblačila za posebne namene ipd. Vse te skupine oblačil morajo zadostiti nekaterim osnovnim zahtevam, kot so na primer: estetski videz, na katerega vplivajo kroj, oblika, kompozicija barv in videz površine reprodukcijskega materiala (tkanin, pletenin ipd.), ugodnost pri nošenju, odpornost proti mečkanju, umazaniji, obrabi ipd. To so bolj ali manj parametri kakovosti, ki so pomembni pri vsakdanjih oblačilih, ne glede na to, ali so to moška, ženska ali otroška oblačila. Poleg teh mora oblačilo zadovoljiti še druge potrebe, kot so: termoizolacija, prepustnost vodne pare, prepustnost zračnih mas (veter), fiziološko počutje, zaščita pred padavinami, funkcionalnost ipd. Našteti parametri kakovosti so različno pomembni glede na namembnost oblačila. Zaradi tega bomo upoštevali le tiste parametre, ki so najpomembnejši za dano vrsto oblačila. Skušali bomo upoštevati tudi vrednosti manj pomembnih parametrov, toda ne na škodo tistih, ki imajo temeljni pomen za dano vrsto oblačila. Vedno pa se bomo skušali čim bolj približati optimalni rešitvi.

6.2 Projektni zahtevki za oblačila

Projektni zahtevki so osnova za konstrukcijo oblačil. Ta naj bi upoštevala projektne zahtevke, tako da se dobi optimalna rešitev. Zakaj optimalna rešitev? Lahko dobimo, na primer, projektni zahtevek za oblačilo, ki mora biti prepustno za vodno paro, ki nastaja zaradi izhlapevanja znoja. Obenem pa se zahteva, da isto oblačilo ščiti pred dežjem oziroma, da naj se ne bi omočilo po določenem času izpostavljanja vplivu dežja. Lahko konstruiramo takšno oblačilo, ki bo imelo v danih okoliščinah dovolj veliko prepustnost za pretok izhlapelega znoja, obenem pa se bo hitro omočilo na dežju. Po drugi strani pa lahko konstruiramo nepremočljivo oblačilo in s tem izpolnimo zahtevek glede dežja, toda izhlapeli znoj se bo kondenziral v oblačilu in s tem izničil učinek neprepustnosti za

vodo iz okolja. Nobena od rešitev ne daje želenega učinka. Zaradi tega skušamo najti optimalno rešitev, ki bo upoštevala oba zahtevka, se pravi, da bo omogočila najmanjšo možno količino vlage v oblačilu v danih okoliščinah ne glede na to, ali ta vlaga izhaja s površine telesa ali iz okolja. Poskušali bomo določiti projektne zahtevke za posamezne skupine oblačil glede na namembnost.

6.2.1 Vsakdanja oblačila

Za to vrsto oblačil se ne zahteva nobena posebna lastnost. Zadovoljiti morajo nekaj osnovnih potreb glede vsakdanje aktivnosti, stanja okolja, navad ipd. V to skupino uvrščamo moška, ženska in otroška oblačila.

6.2.1.1 Moška oblačila

6.2.1.1.1 Vpliv okolja Oblačilo sestoji iz spodnjega perila, srajce, nogavic, obleke (hlač in suknjiča), plašča, kape, eventualno kravate in čevljev. V našem podnebju bi moralo to oblačilo ščititi uporabnika pri temperaturah okolja od -20 °C do +10 °C pozimi, od 10 °C do 20 °C spomladi, od 20 °C do 30 °C poleti in 0 °C do 15 °C jeseni.

Pri nas najbolj pogosto piha burja, ki je praviloma mrzel veter, zlasti jeseni in pozimi. Najbolj pogosta hitrost tega vetra je med 40 km/h in 80 km/h. Jugo in maestral sta manj mrzla vetrova in nimajo posebnega pomena za konstrukcijo oblačil. Pri konstrukciji oblačil moramo upoštevati tudi padavine, zlasti dež, in to predvsem takrat, ko dežnika zaradi vetra ali zaradi vrste aktivnosti na prostem, ko nimamo prostih rok, ne moremo uporabljati.

Intenziteta padavin – dežja je lahko zelo velika – včasih se oblačilo omoči v manj kot petih minutah. Ker se oseba giblje tudi dalj časa na prostem v vsakdanjem oblačilu, moramo navadnemu oblačilu dodati poseben del, ki ščiti pred močenjem, kot je npr. dežnik, dežni plašč ali pa moramo zgornje kose oblačila impregnirati s permanentno vodo-odbojno impregnacijo. Pri relativno nizkih temperaturah okolja in posebno, če še piha veter, bi moralo ostati navadno oblačilo nepremočljivo vsaj eno uro. Vsakdanje oblačilo mora biti prepustno za vodno paro – izhlapeli znoj. Ker v vsakdanjem oblačilu navadno ne opravljamo težkih del, pri katerih se izločajo večje količine znoja, naj to oblačilo omogoča vzpostavitev ravnotežja med zmerno hitrostjo izločanja znoja in hitrostjo izhlapevanja le-tega.

6.2.1.1.2 Funkcionalnost Pri oblačilu moramo upoštevati tudi funkcionalnost glede na udobnost pri nošenju. Spodnje perilo (spodnje hlače in majica) mora biti elastično in mehko, da se prilega telesu. Ne sme ovirati krvnega obtoka in tudi ne sme dražiti površine kože. Skratka, omogočiti mora kar naj bolj ugodno počutje. Kroj in oblika morata biti prilagojeni funkcionalnosti. Ne sme ovirati gibov, ki so običajni v vsakdanjem življenju. Vpliv vode ni velik, ker se dodatno lahko zaščitimo z vodo-odbojno vetrovko, ki ne bi smela negativno vplivati na funkcionalnost.

Srajca z dolgimi rokavi prekriva zgornji del telesa in predstavlja eno plast oblačila. Navadno je izdelana iz goste tkanine. Zaradi tega ima vlogo pregrade, na kateri je velik padec tlaka vodne pare, pod pogojem, da je v okolju tlak vodne pare nižji od nasičenega, če je preračunan na temperaturo, ki jo imamo na površini srajce. S tem se prepreči morebitna kondenzacija izhlapelega znoja v vrhnjih plasteh oblačila. Poleg tega ima srajca tudi nalogo, da zadrži izločene soli in maščobe, da ne prodrejo v vrhnje plasti oblačila. Srajca ima tudi delno funkcijo filtra, ki zmanjšuje hitrost prehoda nečistoč iz okolja k površini kože. Srajca s kratkimi rokavi ima približno enako funkcijo kot srajca z

dolgimi rokavi, le da se uporablja poleti. Zaradi tega mora biti izdelana iz bolj porozne tkanine ali pletenine, da omogoči hitrejšo difuzijo vodne pare in tudi hitrejšo izmenjavo zraka na površini kože, ki je bogata z ogljikovim dioksidom, z okoliškim zrakom. Večja koncentracija ogljikovega dioksida povzroči vsaj prehodno povečanje hitrosti izločanja znoja, kar je sicer v toplem okolju zaželeno. Znoj lahko draži površino kože.

Kravata ima dve osnovni funkciji: estetsko in termoizolacijsko. Kravata sama po sebi ne pokriva večje površine telesa, poveča pa tesnjenje ovratnika srajce okoli vratu. S tem se prepreči tako imenovani tunelski učinek. Zrak na površini kože ima namreč višjo temperaturo kot okoliški zrak v mrzlem vremenu. Zaradi tega se ogreti zrak s površine kože dviga. Velik delež tega zraka pa gre v okolje med ovratnikom srajce in vratom, če je vmes dovolj prostora. Namesto tega zraka prihaja mrzel zrak iz okolja skozi odprtine na oblačilu (rokavi, nogavice, hlače ipd.) kot tudi skozi površino kosov oblačila. Če je okrog vratu zavezana kravata, ni prostora za pretok toplega zraka med vratom in ovratnikom in poteka izmenjava skozi plasti oblačila. Oblačilo ima navadno precejšen zračni upor. S tem se zmanjšuje izmenjava toplega zraka z mrzlim. To pa pomeni upočasnitev izgube toplote. Če pa je temperatura okolja relativno visoka, je tunelski učinek zaželen, zaradi boljšega hlajenja organizma in izmenjave zraka na površini kože zaradi prej omenjenega vpliva ogljikovega dioksida, kot tudi zaradi pospešitve izhlapevanja znoja. Iz tega je razvidno, da je v vročini kravata nefunkcionalna. V posameznih primerih pa lahko seveda prevlada estetski motiv ali tradicija in protokol. V takšnih primerih se uporablja kravata kljub fiziološki neustreznosti.

Obleka v ožjem pomenu besede (suknjič in hlače) je najvažnejša plast oblačila. Praktično se nosi skozi vse leto. Odvisno od tkanine, iz katere je izdelana, ima lahko različne termoizolacijske vrednosti. Njena glavna funkcija je termoizolacija, na drugem mestu pa estetska funkcija. V vsakdanjem življenju ni zmeraj tako. Včasih je na prvem mestu "estetska" komponenta, ki je pogosto posledica trenutne mode. Moda pa redkokdaj upošteva funkcionalnost obleke glede na dejanske okoliščine uporabe, ampak sledi svoji logiki, ki je včasih celo škodljiva zdravju. Za mrzle zimske razmere vsekakor niso primerne "kavbojke" in suknjič iz bombažne tkanine, iz katere so izdelane tudi kavbojke. Poleg tega ima takšen suknjič pogosto tako imenovani angleški kroj, kar pomeni nezavarovan križ. Dodatna pomanjkljivost je, če se suknjič in kavbojke tesno prilegata površini kože. Takšna plast oblačila ima majhen toplotni upor v primerjavi z normalno volneno obleko, obenem pa tudi onemogoča normalne gibe in ni primerna za opravljanje nekaterih del.

Estetska funkcija je največkrat funkcija mode. Estetska merila se spreminjajo. Vplivajo na kroj in obliko, dezena, prevladujoč barvni odtenek, konstrukcijo tkanine, površinski videz tkanine, razne okrasne dodatke ipd. V primeru nizkih temperatur se doda dodatna plast oblačila med obleko in spodnjim perilom oziroma srajco. Ta dodatna plast oblačila je najbolj pogosto, pulover z rokavi ali brez rokavov. V območju vratu pa je lahko izoblikovan izrez v obliki črke V ali v obliki puli ovratnika, ki se lahko odpne na vratu ali ne. Spodnji del te dodatne plasti pa so navadno dolge spodnje hlače. Tako kot spodnje perilo je tudi ta plast izdelana iz pletenine, ki ima zaradi strukture relativno visoko vrednost toplotnega upora. Pulover je navadno bolj debel in ima večji toplotni upor kot spodnje dolge hlače. To pa zaradi tega, ker je izžarevanje toplote skozi površino nog (brez stopal) enkrat večja kot skozi trup (glej preglednico 3.2, na strani 36). Če se pulover nosi kot zgornji del oblačila, je pomembna tudi estetska funkcija.

Vrhnji del oblačila (razne vrste plaščev ali vetrovke) imajo različne funkcije. Vsekakor je estetska funkcija pomembna ne glede na specifične namembnosti. Toda pomembnejša je funkcija namembnosti. Ta je lahko termoizolacijska, vodo odbojna ali za vodo

neprepustna, zaščita proti vetru ipd. Če je vrhnji del oblačila namenjen za termoizolacijo, mora biti izdelan iz debelejše tkanine ali iz kombinacije goste srednje težke tkanine in vložka, ki je lahko umetno krzno (naravno le redko) ali pa vlaknina. Takšna kombinacija omogoča večstransko namembnost. Vložek ima vlogo termoizolacijske plasti, medtem ko ima plašč lahko vlogo zaščite proti vetru in vodo-odbojne plasti. Poleg tega pa ima lahko tudi kapuco za zaščito glave in vratu. Glavo zaščitimo s kapo, kučmo, klobukom ipd.

Spodnji del nog in stopala zaščitimo z nogavicami. Te pa so lahko debele za nizke temperature ali pa tenke za toplejša obdobja. V izjemnih primerih lahko uporabljamo več plasti nogavic. Nogavice, kot tudi pokrivala za glavo imajo termoizolacijsko in estetsko funkcijo. Enkrat prevladuje ena, drugič druga.

6.2.1.2 Ženska oblačila

V primerjavi z moškim oblačilom je bistvena razlika le v spodnjem perilu in krilu. Če je krilo dovolj dolgo in primerno široko, zajame precej zraka, ki ga segreva površina telesa. V mirnem vremenu ima krilo dobro termoizolacijo, ker se segreti zrak pod krilom le malo meša z zunanjim hladnejšim zrakom. V vetrovnem vremenu pa se zrak meša, krilo spreminja lego in se dviga. Zaradi tega je manj primerno za zaščito pred mrazom kot hlače. Pri ženskem oblačilu je močno poudarjena estetska funkcija, ki je zelo izpostavljena modnim spremembam. Sicer za ženska oblačila veljajo enaki kriteriji kot za moška.

6.2.1.3 Otroška oblačila

Tukaj mislimo na oblačila za predšolske otroke in posebej za dojenčke. Oblačila šolskih otrok se razlikujejo od oblačil odraslih le v nepomembnih detajlih in velikostnih številkah. Oblačila za dojenčke morajo biti mehka, hidrofilna, vložki ne smejo povzročati alergije na koži, zlasti v mokrem stanju. Toplotni upor mora biti primeren stanju okolja in stanju organizma otroka. Kroj in oblika morata biti funkcionalna, tako da obleka ne stiska in ne ovira otroka pri aktivnostih.

6.2.2 Posebna oblačila

Posebna oblačila lahko razvrstimo v dve osnovni skupini:

- uniforme in
- delovna oblačila.

Obe skupini imata večje število variant.

6.2.2.1 Uniforme

Uniforme so tudi delovne obleke, ker so v večini primerov službene uniforme (vojaške, policijske, gasilske ipd.). Z barvo, krojem in obliko ter raznimi dodatki poudarjajo pripadnost uporabnika določeni skupini (vojski, policiji, gasilcem, železnici itd.). Oseba v uniformi je največkrat uradna oseba (policaj, sprevodnik vlaka, vratar ipd.) in je z uniformo lahko opredeljen položaj uporabnika glede na druge občane. Z uniformo so lahko označene določene pravice pa tudi dolžnosti.

Poleg zunanje označbe pripadnosti, ima lahko uniforma tudi druge funkcije enako, kot vsako drugo oblačilo. Uniforma vratarja, ki ima službo v zaprtem ogrevanem prostoru se bo razlikovala po svoji funkcionalnosti od uniforme prometnega policaja, ki usmerja promet ali kontrolira dogajanja po mestu. Uniforma gasilca pa mora biti tudi negorljiva.

Najbolj množična je vojaška uniforma. Z vojaško uniformo moramo rešiti:

- uniformiranost,
- univerzalnost,
- funkcionalnost v ožjem smislu,
- maskirnost,
- zaščito pred fizičnimi, kemičnimi in biološkimi poškodbami,
- zaščito pred neprijetnimi vplivi podnebja in
- specifičnosti.

6.2.2.1.1 Uniformiranost Tradicionalno imajo kopenska vojska, letalstvo in mornarica uniforme različnih barv. Razlike so delno tudi v sestavi kompleta uniforme, kroju in obliki posameznih delov. V novejšem času imajo vsi maskirno uniformo, ne glede na državo, ki ji vojak pripada. Navadno imajo posebno uniformo le piloti vojaških in tudi civilnih potniških letal. To velja tudi za civilno mornarico, posebno za moštva potniških ladij. Uniforma policije v normalni službi se razlikuje od drugih uniform. Posebne protiteroristične enote običajno uporabljajo normalno maskirno obleko in nekatere dodatne dele, ki varujejo uporabnika pred napadi teroristov, kot tudi pred razjarjenimi množicami na raznih demonstracijah (čelade, neprebojni jopiči).

6.2.2.1.2 Univerzalnost Sestava kompleta uniforme mora biti takšna, da je uporabna v vseh letnih časih na vseh področjih, na katerih delujejo uporabniki uniforme. To pomeni, da se mora uniforma prilagajati spremembam parametrov podnebja (temperatura, dež, veter ipd.) in tudi spremembam dejavnosti oziroma spremembam hitrosti proizvodnje toplote in oddajanja le-te v okolje. Zaradi tega mora biti uniforma večplastna z morebitno zamenjavo posameznih delov uniforme v določenih letnih časih ali vrsti aktivnosti (boj, počitek, marš ipd.).

6.2.2.1.3 Funkcionalnost v ožjem smislu Kroj uniforme mora omogočiti optimalno funkcionalnost kompleta in posameznih delov za določene bojne aktivnosti glede na obremenitev, gibljivost in bojno sposobnost v celoti. Osnovni predmeti uniforme, kot so vetrovka, bluza in hlače, morajo omogočiti neovirano nošenje in uporabo osnovne oborožitve, nabojev in drugih bojnih in osebnih sredstev.

6.2.2.1.4 Maskirnost Barva uniforme (zgornja plast) mora biti takšna, da optimalno maskira na vseh vrstah terena v vidnem in infrardečem delu spektra. Glede na to maskirna uniforma ne more biti univerzalna. Puščavsko in pol-puščavsko okolje drugače odbija svetlobo kot okolje v zmernem pasu. Zaradi tega morajo biti enote, ki jih pošiljajo na Bližnji ali Srednji vzhod, opremljene s posebno maskirno uniformo, ki maskira v vidnem delu spektra na puščavskem in pol-puščavskem terenu.

6.2.2.1.5 Zaščita pred fizičnimi, kemičnimi in biološkimi poškodbami Uniforma mora ščititi pred neposrednimi fizičnimi poškodbami, ki bi lahko nastale pri manipulaciji in uporabi orožja, pri gibanju po neravnem terenu (kamenje, grmičevje, trnje, blato ipd.). Pri eksploziji atomske bombe (delna zaščita proti radioaktivnem sevanju in toplotnem udaru), pri uporabi bojnih strupov in bioloških agensov ne glede na agregatno stanje. Uniforma mora ščititi tudi pred neposrednim ognjem in prenesti do 42 J/cm^2.s, kot tudi pred opeklinam I. stopnje (8,4 J/cm^2.s) do 12,6 J/cm^2.s).

6.2.2.1.6 Zaščita pred neprijetnimi vplivi podnebja Za razliko od normalnih okoliščin, v katerih se uporabnik vsakdanjega oblačila ne izpostavlja ekstremnim stanjem okolja (zelo nizke ali zelo visoke temperature, padavine, močan veter ipd.) ali pa se jim izpostavlja relativno le kratek čas, vojak ne more svoje aktivnosti na prostem prilagajati stanju okolja, ampak jih prilagaja potrebam obrambe (vaje, boj ipd.). Zaradi tega mora uniforma omogočiti bojno pripravljenost uporabnika v temperaturnem intervalu od -25 °C do +30 °C ne glede na padavine in hitrost vetra. Ta zaščita naj bi trajala 6 in več ur. Šest ur je spodnja meja časovne tolerance. Če je vojak 6 ur v določenem okolju, pri določeni vrsti in intenziteti aktivnosti še zmeraj sposoben opraviti zadano nalogo, se šteje, da uniforma zadovoljuje dane pogoje. Če pa se, na primer, po štirih urah v določenih pogojih začne zmanjševati uporabnikova bojna pripravljenost, uniforma ni primerna za dane pogoje uporabe.

Da se uniforma ne omoči v deževnem vremenu, se zgornje plasti uniforme impregnirajo z permanentno vodo-odbojno impregnacijo ali pa se izdelajo iz vodo-odbojnih vlaken. Ta rešitev zadošča, če se bistveno ne spremeni teža uniforme, potem ko je bila izpostavljena dežju. Takšna zaščita uniforme je pomembna iz dveh osnovnih razlogov:

- ne poveča se teža uniforme zaradi močenja, kar je zelo pomembno, saj je uporabnik tudi brez tega dodatnega nekoristnega bremena dovolj obremenjen,
- ne zmanjša se toplotni upor uniforme, kar je zelo važno jeseni in pozimi pri nizkih temperaturah.

Šteje se, da uniforma dobro ščiti pred padavinami (dežjem), če se teža vodo-odbojne zunanje plasti uniforme ne poveča več kot za 30 % v treh urah pri intenziteti padavin 15 mm/h. Zaščitna plast proti vetru pa naj ne prepušča več zraka, kot 1 m^3/m^2.h., pod tlakom 100 Pa. Poleg tega mora uniforma omogočiti čim boljšo prepustnost vodne pare, ki nastane kot posledica izhlapevanja znoja. Gosta zaščitna plast proti vetru slabo prepušča vodno paro. Zaradi tega je nujno poiskati optimalno rešitev. To pa omogoča kroj in sestava uniforme oziroma kompleta. S povečanjem hitrosti vetra se povečuje hitrost izhlapevanja znoja, enačba (4.5), na strani 79. V takšnih okoliščinah ne pride pogosto do neravnovesja med znojenjem in izhlapevanjem znoja. Če pa je brezvetrje, mora kroj omogočiti zmanjšanje upora pretoku vodne pare s povečanjem odprtin, kar se največkrat doseže s pomočjo odpenjanja delov uniforme. Obstaja tudi možnost, da se zaščitna plast tudi sleče, ne da bi se pri tem bistveno poslabšale druge lastnosti uniforme.

6.2.2.1.7 Specifičnosti Kljub težnji k univerzalnosti se vojaška uniforma ne more uporabiti za vse namene. Včasih je potrebno dodati kakšen del ali pa obstoječega nadomestiti z drugim, bolj ustreznim. Uniformo je potrebno nekoliko modificirati za potrebe padalcev, tankistov, podmorničarjev, potapljačev, enot za dekontaminacijo ipd. Letalci imajo po navadi specifično uniformo, ki je prilagojena aktivnosti v tesni letalski kabini

(lovska letala) in mora omogočiti optimalno dejavnost in katapultiranja v primeru da letalo zadene izstrelek zaradi česar se letalo zruši.

Za zaščito pred bojnimi strupi je poleg plinske maske nujna posebna obleka, ki se obleče čez uniformo. Ta pa mora biti prepustna za vodne hlape in zrak, toda ne za hlape strupenih plinov. Takšna dodatna zaščitna obleka bi morala biti tri-plastna. Prva (zgornja) plast bi morala biti izdelana iz goste tkanine, obdelane z vodo-odbojno impregnacijo, ki je obenem tudi olje-fobna. To pa zaradi tega, da tekoči bojni strup ne prodre z vodo skozi vrhnjo plast zaščitnega oblačila. Velikost in število por morata biti takšna, da prodre zaradi hidrodinamičnega udara tekočih kapelj bojnih strupov skozi to plast največ 1 % količine bojnega strupa, ki je padla na površino zgornje plasti.

Ker so bojni strupi zelo močni, bi zadostoval tudi ta 1 % za resnejše poškodbe ali celo smrt. Zaradi tega mora obstajati še ena plast, ki absorbira to količino oziroma njene hlape, saj postopoma iz nje izhlapijo. Ta druga (notranja) plast pa mora imeti aktivno oglje ali zoglenelo PAN, bombažno ali viskozno tkanino. Takšno zaščitno oblačilo je možno uporabiti tudi pri škropljenju sadnih dreves s strupenimi škropili. Tretja plast je podloga, ki varuje notranjo absorpcijsko plast.

6.2.2.2 Delovna oblačila

Delovna oblačila so prilagojena vrsti dela in stanju okolja na delovnem mestu. V večini primerov je delovno oblačilo modificirano vsakdanje oblačilo, tako da je del oblačila zamenjan z delovno haljo, delovno obleko (hlače in bluza) ali pa delovni kombinezon. Včasih je vsakdanje oblačilo tudi delovno oblačilo in to na delovnih mestih, kjer ni posebnih vplivov okolja ali zahtevkov delovnega mesta, kot je delo v pisarni ipd.

Navadno govorimo o delovni obleki in ne o delovnem oblačilu. To pa zaradi tega, ker je navadno tisti del oblačila, ki smo ga dodali vsakdanjemu oblačilu ali smo z njim zamenjali del vsakdanjega oblačila, le enoplastno. Na splošno lahko rečemo, da ima delovna ali zaščitna obleka nekatere ali večino naslednjih funkcij oziroma da ščiti spodnje plasti oblačila ali uporabnike pred:

- umazanijo, agresivnimi substancami, drgnjenjem ipd.,
- agresivnim okoljem ,
- visokimi temperaturami in opeklinami,
- vlago,
- vetrom in nizkimi temperaturami,
- močno svetlobo,
- poškodbami ipd.

Omenjene funkcije oziroma parametri imajo različno vlogo ter vrednosti pri delovnih oblekah, namenjenih za različna opravila. Če uporabnik dela v kemičnem laboratoriju, mora imeti delovna halja, ki ima po navadi na takšnem delovnem mestu, vlogo delovne obleke, odporne proti bazam in kislinam. Če imamo opravka z lahko-vnetljivimi snovmi, mora biti delovna obleka ali pa celotno oblačilo nevnetljivo. Nevnetljivo je takrat, če ne gori v atmosferi, ki ima do 25 % kisika. Včasih se ta meja zviša celo na 27 % kisika. V gradbeništvu se pogosto uporabljajo čevlji, ki imajo nad prsti jekleno ploščo – abok, da zaščiti prste pred poškodbami v primeru, če pade kakšen težji predmet na nogo. Delovne rokavice v gradbeništvu so primer zaščite rok pred poškodbami zaradi

drgnjenja. Po drugi strani pa imajo rokavice na rokah kirurga vlogo zaščite bolnika pred okužbo.

Iz teh nekaj primerov vidimo, da je spekter funkcij delovnih oblačil, oblek ali posameznih predmetov obleke ali oblačila, dejansko zelo širok. V vsakem posameznem primeru moramo dobro preučiti namembnost oblačila, obleke ali posameznih predmetov, okolje in način uporabe. Skratka, preučiti moramo stanje okolja in stanje uporabnika glede na vrsto in intenziteto aktivnosti in na podlagi tega poiskati optimalno rešitev za zaščitno, ki jo mora imeti delovno oblačilo, obleka ali posamezen kos oblačila.

6.3 Osnovni parametri, ki jih moramo upoštevati pri konstrukciji oblačil

Kot reprodukcijski material za oblačila se uporabljajo predvsem tkanine, pletenine, vlaknine, trakovi, sukanec, gumbi, zadrge ipd. Tkanino lahko popolnoma opišemo z več kot 50 parametrov kakovosti. Nekateri od teh so v določeni medsebojni odvisnosti. Ta odvisnost navadno ni funkcijska, ampak stohastična. Zaradi tega je včasih treba predpisati vsaj interval vrednosti posameznega parametra kakovosti V praksi je zelo pomembna ekonomičnost kontrole kakovosti. Zaradi tega se predpisuje optimalno število parametrov za kontrolo kakovosti tkanine. Včasih je to število minimalno. To pa takrat, ko poteka proizvodnja nenormalno (motnje na trgu, vojna ipd.) in bi bila vsaka bolj detajlna kontrola kakovosti nesmotrna. Navadno zadostuje 10 do 20 parametrov kakovosti za dovolj detajlen opis kakovosti tkanine.

Pri konstruiranju reprodukcijskega materiala za posamezne plasti oblačila in uporabi določenega kroja in oblike posameznih kosov oblačila ter kompozicije oblačila bomo upoštevali le nekaj osnovnih parametrov, kot so: termoizolacija, upor pretoka vodne pare, močenje in estetski videz oblačila. Drugi parametri so specifični glede na vrsto in namembnost oblačila.

6.3.1 Toplotna izolacija oblačila

Osnovni parameter kakovosti oblačila v našem podnebju je vsekakor toplotna izolacija. Saj je bila zaščita pred mrazom osnovni vzrok, da se je človek začel oblačiti. Pomanjkljivo toplotno izolacijo lastnega krzna je torej nadomestil s krznom ulovljenih živali. Ker je začel obleko redno uporabljati, je bilo njegovo lastno dlakasto prekrivalo – krzno, vedno manj pomembno in ga je postopoma izgubil.

S toplotno izolacijo oblačila razumemo količino oblačila, ki v danih pogojih omogoča uporabniku ustvarjanje območja ugodja. Ta parameter bomo izrazili kvantitativno s toplotnim uporom. Kot je razvidno iz enačbe (3.2), je ta enak kvocientu debeline oblačila in toplotne prevodnosti oblačila. V primeru večplastnega oblačila predstavlja toplotni upor vsoto uporov vseh plasti oblačila in plasti negibnega zraka na površini oblačila. Vsoto uporov lahko izrazimo z enačbo (6.1).

$$R_s = R_a + \sum_{i=1}^{n} R_i = R_a + \sum_{i=1}^{n} \frac{d_i}{\lambda_i} \tag{6.1}$$

kjer so R_s [m^2.°C.h/kJ] skupni toplotni upor plasti oblačila in plasti mirnega zraka na površini oblačila, R_i [m^2.°C.h/kJ] toplotni upor i-te plasti oblačila, R_a [m^2.°C.h/kJ] toplotni upor plasti mirnega zraka na površini oblačila, d [m] debelina i-te plasti oblačila, λ_i [kJ/m.°C.h] koeficient toplotne prevodnosti i-te plasti oblačila, n število plasti oblačila.

Kot merilo zadostnosti določene vrednosti toplotnega upora v določenih razmerah, se jemlje toleranca šest in več ur. To pomeni, če oblačilo omogoča, da ostane uporabnik v območju ugodja šest in več ur v danih pogojih, oblačilo zadovoljuje glede toplotnega upora oziroma toplotne izolacije. Dejansko je zelo težko izračunati pravilno vrednost toplotnega upora v realnem oblačilu. To pa zaradi tega, ker se spreminja medsebojna lega plasti oblačila, posebno pri gibanju (hoja ali določeni gibi pri opravljanju določenega dela). Pri hoji je, na primer, najmanj oddaljena zunanja površina zunanje plasti oblačila od površine kolena, ko je to spredaj v najvišji legi. Istočasno je površina kolena druge noge, ki je v skrajnji zadnji legi, najbolj oddaljena od zunanje površine zunanje plasti oblačila. V tem primeru največkrat zunanja površina hlač. Na splošno je, na primer, v tri plastnem oblačilu dejansko sedem plasti, ki dajo določen toplotni upor. Prva plast je plast zraka neposredno na površini kože uporabnika. Potem pride prva plast oblačila, pa plast zraka med prvo in drugo plastjo oblačila in tako naprej. Na površini zadnje plasti oblačila pa je še ena plast mirnega zraka, katerega upor je Rz v enačbi (6.1). Ta zadnja plast mirnega zraka ima konstanten toplotni upor v mirnem ozračju. Če pa piha veter z več kot 1 m/s, se začne toplotni upor te plasti, enačba (3.3) na strani 40, precej hitro zmanjševati.

Realne razmere uporabe oblačila lahko simuliramo na lutki (manekinu), ki ima proporce povprečnega človeka in ima tudi gibljive ude, tako da je možno simulirati hojo pri različnih hitrostih gibanja in izmeriti toplotni upor. Če te možnosti nimamo, uporabimo laboratorijske metode. Pri tem vstavimo plast oblačila med dve plošči, ki imata različni temperaturi in merimo količino toplote, ki gre skozi plast oblačila (vzorec).

Na kratko bomo opisali eno izmed metod za ugotavljanje toplotne prevodnosti ploskih tekstilnih izdelkov. Aparat se sestoji iz dveh termostatov, v katerih je voda s temperaturo 60 °C in 20 °C, in iz valja, ki ga tvorijo zgornji cilinder, skozi katerega se pretaka voda temperature 60 °C, zgornje bakrene plošče, vzorca, srednje bakrene plošče, referenčne steklene plošče, spodnje bakrene plošče in spodnjega cilindra, skozi katerega se pretaka voda temperature 20 °C. Vse tri bakrene plošče so povezane s termoelementi z razdelilnim stikalom, ta pa z mili-voltmetrom in termostatom s temperaturo 0 °C.

Cilindrski stolp je izoliran s plutovino ali stiroporom. Po dveh urah se vzpostavi stacionarni toplotni tok. Zaradi razlike temperatur nastane v termoelementih električni tok, ki ga merimo z mili-voltmetrom. S pomočjo umerjenih krivulj odčitamo ustrezne temperature (vsaki napetosti ustreza določena temperatura).

Metoda je zasnovana na predpostavki, da je količina toplotnega toka, ki gre skozi vzorec, enaka količini toplotnega toka, ki gre skozi referenčno stekleno ploščo, katere koeficient toplotne prevodnosti poznamo. Predpostavko enakega toplotnega toka lahko ilustriramo z naslednjimi enačbami.

$$Q_x = \frac{\lambda_x}{d_x}(T_2 - T_3)St \tag{6.2}$$

$$Q_n = \frac{\lambda_n}{d_n}(T_3 - T_n)St \tag{6.3}$$

$$Q_x = Q_n \qquad \rightarrow \qquad \lambda_x = \lambda_n \frac{d_x}{d_n}\frac{T_3 - T_n}{T_2 - T_3} \tag{6.4}$$

V enačbah (6.2), (6.3) in (6.4) so Q_x [kJ] količina toplote, ki gre v času t skozi plast oblačila (vzorec), Q_n [kJ] količina toplote, ki gre v času t skozi referenčno stekleno ploščo, λ_x [kJ/m.°C.h] koeficient toplotne prevodnosti plasti oblačila (vzorca), λ_n

[kJ/m.°C.h] koeficient toplotne prevodnosti referenčne steklene plošče, ki je znan, d_x [m] debelina plasti oblačila (vzorca), d_n [m] debelina referenčne steklene plošče, S [m^2] površina prečnega preseka valjastega stolpa oziroma površina plasti oblačila (vzorca), ki je enaka površini steklene referenčne plošče, T_2 [°C] temperatura zgornje bakrene plošče, T_3 [°C] temperatura srednje bakrene plošče, T_n [°C] temperatura spodnje bakrene plošče.

Temperature se merijo na sredini debelin plošč in ne na površini vzorca oziroma referenčne plošče. Poleg tega je med vzorcem in referenčno ploščo srednja bakrena plošča. Skozi plašč teh plošč se izgubi določena količina toplote, kar pomeni, da ima dejansko Q_x nekoliko večjo vrednost kot Q_n in zaradi tega bo realna vrednost λ_x nekoliko višja, kot je izračunano z enačbo (6.4). Če je koeficient toplotne prevodnosti referenčne steklene plošče ugotovljen na podlagi znanega koeficienta toplotne prevodnosti vzorca. Potem so izgube toplote skozi plašč valja že v veliki meri upoštevane.

6.3.1.1 Vpliv temperature

Ko smo izmerili koeficient toplotne prevodnosti in debelino plasti oblačila, izračunamo toplotni upor opazovane plasti z enačbo (3.2) na strani 40. Toda, koeficient toplotne prevodnosti je odvisen od temperature; potemtakem je od temperature odvisen tudi toplotni upor. To odvisnost lahko opišemo z naslednjo empirično enačbo (6.5) [1].

$$\lambda_T = \lambda_0(1 + k_T \Delta T) \tag{6.5}$$

kjer so λ_T [kJ/m.°C.h] koeficient toplotne prevodnosti pri temperaturi T, λ_0 [kJ/m.°C.h] koeficient toplotne prevodnosti pri temperaturi 0 °C, ali pri temperaturi, ki jo ima standardna atmosfera (20 °C), odvisno od dogovora, k_T [1/°C] empirična konstanta, ki ima vrednost 0,0025 °C^{-1}.

Glede na vrednost empirične konstante k se s povečanjem temperature zelo počasi povečuje vrednost koeficienta toplotne prevodnosti. Če ima, na primer, določena tkanina koeficient toplotne prevodnosti 0,0119 kJ/m.°C.h, pri 0 °C, se bo ta vrednost povečala pri 100 °C na 0,0149 kJ/m.°C.h ali za okrog 25 %. Če pa toplotno prevodnost merimo pri 40 °C, kot je to v prej opisani metodi, bo izmerjena vrednost koeficienta toplotne prevodnosti 0,0131 kJ/m.°C.h, kar je za 10 % več kot bi bila pri 0 °C. Kot vidimo iz tega primera, so odstopanja precejšnja. To dejstvo je treba upoštevati pri konstruiranju oblačila. Glede na enačbi (3.1) in (3.2) na strani 39, lahko napišemo skupni toplotni upor v naslednji obliki, enačba (6.6).

$$R = \frac{(T_1 - T_2)St}{Q} \tag{6.6}$$

kjer so Q [kJ] toplota, ki se prenaša s kondukcijo s površine telesa do površine oblačila, R [m^2.°C.h/kJ] skupni toplotni upor, T_1 [°C] temperatura na notranji površini oblačila, T_2 [°C] temperatura na zunanji površin oblačila, S [m^2] opazovana površina kože uporabnika in t [h] čas opazovanja.

Toplota Q, definirana z enačbo (3.1), je dejansko toplota, ki se prenaša s kondukcijo od površine telesa do površine oblačila. Naprej se toplota prenaša v okolje s konvekcijo in sevanjem. Predpostavili bomo, da gre vsa toplota, ki jo subjekt izžari, skozi površino kože v okolje, če je istočasno subjekt v območju ugodja. To pa ne pomeni, da je Q v enačbi (6.6) enak količini toplote, ki jo subjekt izžareva skozi površino kože. Dejansko je ta lahko manjši za količino toplote, ki jo sprejme površina oblačila iz okolja. Potemtakem

se zaradi dodatne količine toplote, ki prihaja iz okolja, poveča skupna količina toplote, ki je na razpolago in zaradi tega dosežemo ravnovesje pri manjši vrednosti toplotnega upora.

6.3.1.2 Vpliv vode

Kot smo že omenili v poglavju 3, voda bolj prevaja toploto kot tekstilno vlakno oziroma tekstilni izdelki ali zrak. Ploski tekstilni izdelek sestoji iz treh komponent: vlaken, vode in zraka. Količina vlaken je konstantna. Celo ko se jim poveča prostornina zaradi nabrekanja, lahko povečanje pripišemo vodi, ki so jo vpila. S povečanjem količine vode v tekstilnem izdelku se torej zmanjšuje količina zraka in obratno. Ker je koeficient prevajanja toplote vode 20 krat večji od zraka, se bo povečeval skupni koeficient prevajanja toplote tekstilnega izdelka obenem s povečanjem količine vode v njem.

Glede na tri-komponentno sestavo prostornine ploskega tekstilnega izdelka in dejstva, da se s povečanjem količine vode v njem zmanjšuje količina zraka, je realno pričakovati linearno povečanje vrednosti skupnega koeficienta toplotne prevodnosti s povečanjem količine vode v tekstilnem izdelku. To spremembo lahko izrazimo z enačbo (6.7).

$$\lambda_W = a_0 + a_1 \Delta W = \lambda_0 (1 + k_W \Delta W) \quad ; \quad \lambda_0 = a_0 \quad ; \quad k_W = \frac{a_1}{a_0} \tag{6.7}$$

kjer so a_0 [kJ/m.°C.h] koeficient toplotne prevodnosti absolutno suhega ploskega izdelka, a_1 smerni koeficient premice ($a_1 > 0$) in W [%] količina vode v ploskem tekstilnem izdelku na suho maso izdelka, ali delež relativne vlage okoliškega zraka ter λ_0 [kJ/m.°C.h] začetna vrednost koeficienta toplotne prevodnosti pri absolutno suhem izdelku.

Začetna vrednost koeficienta λ pri absolutno suhem izdelku in vrednost smernega koeficienta a_1 sta lahko različni pri različnih tekstilnih ploskih izdelkih, kar je odvisno od strukture izdelka, surovinske sestave ipd. Ker je zelo težko dobiti absolutno suh vzorec tekstilije, je najbolj primerno, da se začetna vrednost koeficienta toplotne prevodnosti nanaša na standardno atmosfero, kar pomeni, da ima vzorec toliko vlage, kot je predpisana v standardni atmosferi za dano vrsto surovine.

V preglednici 6.1 je prikazana sprememba vrednosti koeficienta toplotne prevodnosti v odvisnosti od količine vode v izdelku [2]. S povečanjem količine vode se povečuje toplotna prevodnost. Pri 100 % relativni vlagi, vpije ne impregniran vzorec 13,9 % vode; medtem ko vpije impregnirani le 11,9 %. Absolutno suh impregnirani vzorec ima za približno 9 % večjo prevodnost toplote kot ne impregniran. Ker ne impregnirani vzorec vpije več vode pri določeni relativni vlagi okoliškega zraka, se ta razlika zmanjšuje s povečanjem relativne vlage zraka. Pri 100 % relativni vlagi ima impregnirani vzorec približno 1 % nižjo vrednost koeficienta toplotne prevodnosti. To je tudi razumljivo glede na vsebnost vode v opazovanih vzorcih.

V ne impregniranem vzorcu je večji delež vode v vlaknih in preji, medtem ko so pore med nitmi osnove in votka še zmeraj izpolnjene z zrakom. Ker se prenaša toplota skozi trde snovi in tekočine zaradi nihanja atomov, skupine atomov in molekul, se bo toplota prenašala s plasti vode, ki je na površini vzorca, skozi vlakna in vodo, ki je v njih in skozi plast vode na površini ter potem celo skozi plast zraka, ki upočasni prenos toplote. Koncentracija molekul v zraku (gostota zraka), ki prenašajo energijo, je manjša od koncentracije molekul v vodi ali vlaknu.

Preglednica 6.1: Vpliv količine vode in vodo odbojne impregnacije na spremembo vrednosti koeficienta toplotne prevodnosti λ [kJ/m.°C.h] v volneni česani tkanini za moške obleke (f je % relativne vlage v zraku, v je % vode); I je impregnirano in N je neimpregnirano. [2]

Stanje	λ [kJ/m.°C.h]		Deb. tkanine [mm]		Količina vode [%]	
Vzorca	I	N	I	N	I	N
0 % f	0,2418	0,5521	0,598	0,685	0,0	0,0
25 % f	0,2583	0,2629	0,579	0,681	1,6	1,7
50 % f	0,2709	0,2538	0,561	0,662	5,5	6,8
75 % f	0,2793	0,2631	0,579	0,681	9,4	10,4
100 % f	0,2883	0,2912	0,572	0,675	11,9	13,9
50 % v	0,6452	0,8060	0,592	0,741	50,0	50,0
75 % v	0,9387	0,9030	0,630	0,722	75,0	75,0
100 % v	1,0893	0,9425	0,641	0,761	100,0	100,0

V impregniranem vzorcu je bolj verjetno, da je voda med nitmi osnove in votka ter na površini vlaken. Tako tvori povezano mrežo, ki je primernejša za prevajanje toplote, kot je to primer v ne impregniranem vzorcu. Od tod verjetno razlike v hitrosti prevajanja toplote.

Enačba (6.7) je bila testirana na večjem številu različnih tkanin [2]. Ugotovili smo, da je bila najmanjša vrednost koeficienta korelacije večja od 0,93 pri testiranju odvisnosti koeficienta toplotne prevodnosti od relativne vlage (interval od 0 % do 100 %). Bolj zanimivo je opazovati spremembo vrednosti koeficienta toplotne prevodnosti v odvisnosti od vsebnosti vode v tkanini ali drugem ploskem tekstilnem izdelku. Testiranje veljavnosti enačbe (6.7) pri vsebnosti vode v vzorcu 0 % do 100 % je pokazalo, da je najmanjša vrednost koeficienta korelacije večja od 0,96. Poleg tega testirano je tudi ujemanje sprememb s polinomom regresijske krivulje, enačba (6.8),

$$\lambda = a_0 + a_1 W + a_2 W^2 + \ldots + a_n W^n \tag{6.8}$$

in ugotovili, da je $a_3 = 0$. Vrednost koeficienta a_2 pa je praviloma precej manjša kot a_1. Ker pa se a_2 množi s kvadratom vsebnosti vode v % ali relativne vlage zraka v %, ni zanemarljiv. Najmanjša vrednost koeficienta korelacije pa je večja od 0,99. Potemtakem se enačba (6.7) bolj prilega eksperimentalnim rezultatom kot enačba (6.8). Toda s praktičnega stališča je primernejša enačba (6.7) kot (6.8) in nam njena natančnost v praksi zadostuje. V preglednicah 6.2 in 6.3 so prikazani rezultati testiranja enačbe (6.7).

V preglednici 6.2 so vzorci 1, 2 in 3 volnene česane tkanine za moške obleke. Vzorec 2 je identičen vzorcu 1, le da je obdelan z vodo odbojno impregnacijo. Pri vzorcih 4 in 5 je na vzorec 3 prilepljena lahka bombažna tkanina (vzorec 4) oziroma zelo tanka vlaknina (vzorec 5). Pri vzorcih 6 do 9 so na česano tkanino (vzorec 1) nalepljene vlaknine, ki so enake pri vzorcih 6 in 7 in tudi pri vzorcih 8 in 9; vzorca 7 in 9 sta impregnirana z vodo odbojno impregnacijo. Vzorec 10 je fresko česana tkanina, izdelana iz volne in PES vlaken (45/55). Pri vzorcu 11 je na fresko nalepljena lahka bombažna tkanina. Podobno je pri vzorcu 12, samo da je nalepljena tkanina bolj gosta. V preglednici 6.3 so enaki vzorci, kod v preglednici 6.2.

Preglednica 6.2: Vrednost koeficientov linearne regresijske krivulje, enačba (6.7) odvisnosti spremembe vrednosti koeficienta toplotne prevodnosti od % relativne vlažnosti zraka (r je koeficient korelacije). [2]

Vzorec	$a_0 \cdot 10^{-3}$	$a_1 \cdot 10^{-3}$	r
1	233	0,529	0,64
2	245	0,454	0,99
3	251	0,369	0,98
4	276	0,550	0,97
5	264	0,378	0,95
6	263	0,445	0,93
7	256	0,790	0,99
8	239	0,605	0,98
9	263	0,328	0,94
10	239	0,302	0,99
11	288	0,386	0,99
12	246	0,634	0,99

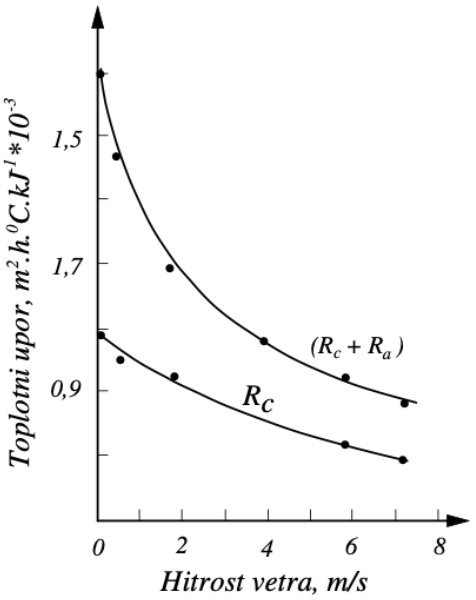
Preglednica 6.3: Vrednost koeficientov linearne regresijske krivulje, enačba (6.7), v odvisnosti od spremembe vrednosti koeficienta toplotne prevodnosti v odvisnosti od vsebnosti vode v vzorcu (0 do 100 %); r je koeficient korelacije. [2]

Vzorec	$a_0 \cdot 10^{-3}$	$a_1 \cdot 10^{-3}$	r	a_1/a_0
1	175	8,97	0,98	0,0513
2	218	8,99	0,99	0,0412
3	258	8,19	0,97	0,0317
4	271	11,59	0,99	0,0428
5	215	9,28	0,97	0,0432
6	247	9,49	0,99	0,0384
7	242	11,68	0,99	0,0483
8	220	7,31	0,99	0,0332
9	230	6,80	0,98	0,0296
10	209	10,00	0,99	0,0478
11	293	9,28	0,99	0,0317
12	265	10,08	0,99	0,0380
Povprečna vrednost				0,0398

6.3.1.3 Vpliv vetra

Veter ima precejšen vpliv na spremembo toplotnega upora oblačila. Enačba (3.3) na strani 40 daje kvantitativno odvisnost spremembe toplotnega upora skozi plast mirujočega zraka, na primer na površini kože osebe, če je ta gola. Če je oseba oblečena, se upošteva plast mirujočega zraka na površini zunanje plasti oblačila. Pri tem so razmere precej drugačne kot pri goli osebi.

Koža ni prepustna za zrak, obleka pa je. To pomeni, da veter ne bo vplival samo na spremembo toplotnega upora mirne plasti zraka na površini oblačila, temveč tudi na spremembo toplotnega upora oblačila. To vidimo iz slike 6.1 [3]. Veter prodira skozi oblačilo, se pri tem segreva in tako segret zapušča oblačilo. Posledica tega je povečanje toplotnih izgub. To pa se na zunaj kaže kot zmanjšanje toplotnega upora oblačila. Zmanjšanje skupnega toplotnega upora R_s danega oblačila v odvisnosti od hitrosti vetra je podano v preglednici 6.4.



Slika 6.1: Vpliv hitrosti vetra na spremembo skupnega toplotnega upora oblačila in mirne plasti zraka na površini oblačila in toplotnega upora oblačila R_c. [3]

Rezultati v preglednici 6.4 potrjujejo predpostavko, da prodira zrak pri določeni hitrosti vetra skozi oblačilo in s tem pospešuje izgubo toplote, in sicer v primeru, če je hitrost vetra večja kot 1,3 m/s. S povečanjem hitrosti vetra se te izgube povečujejo, saj je pri hitrosti vetra 10,7 m/s ta razlika že 60 %. Na ta problem se bomo vrnili pri obravnavi približnega izračuna skupnega toplotnega upora oblačila.

6.3.1.4 Vpliv oblike površine oblačila

Oblika oblačila je prilagojena obliki telesa. Posamezne dele površine telesa obravnavamo kot ravne ploskve (deli trupa, stopal in dlani), drugi so valjasti (noge, roke in prsti), obstaja pa tudi sferična oblika površine (vrh prstov, lobanja). Izguba toplote skozi ravno površino je manjša kot skozi valjasto ali sferično površino [4, 5]. Te razlike se po-

Preglednica 6.4: Vpliv hitrosti vetra na skupni upor oblačila prevajanju toplote. [3]

Toplotni upor oblačila	Hitrost vetra [m/s]		
[m^2.°C.h/kJ]	1,3	6,3	10,7
Izmerjeni R_a	0,1457	0,1144	0,057
Izračunani R_a z enačbo (3.3)	0,1457	0,1384	0,1357
Odstopanja [%]	0,0	21,3	60,0

večujejo z zmanjšanjem premera valja oziroma cilindra. Zaradi tega se pojavijo precejšnji problemi glede toplotne izolacije dlani oziroma prstov rok v mrzlem okolju.

6.3.1.4.1 Prevajanje toplote skozi ravno površino To stanje opisuje enačba (3.1) na strani 39. Pri tem se samo po sebi razume, da je površina, skozi katero opazujemo pretok toplote, mnogo večja kot robna površina, ki je enaka produktu obsega robnikov opazovane površine in debeline telesa, katerega površino opazujemo. Če je, na primer, površina ploskega tekstilnega izdelka, na katerem opazujemo pretok toplote, krog s premerom 0,5 m in debelino 1 mm, ima površino 0,785 m^2 in stranska površina 0,003142 m^2 ali le 0,4 % od površine, skozi katero opazujemo pretok toplote. V tem primeru lahko zanemarimo količino toplote, ki se izgubi skozi rob opazovanega tekstilnega izdelka. Ker proizvodnjo ali izgube toplote podajamo pogosto v enoti časa, bomo enačbo (3.1) spremenili v enačbo (6.9).

$$Q = \frac{\lambda S}{d}\,(T_1 - T_2) \tag{6.9}$$

kjer so Q [kJ/h] količina toplote, ki preteče skozi ploski tekstilni izdelek, λ [kJ/m.°C.h] koeficient toplotne prevodnosti opazovanega tekstilnega izdelka, S [m^2] površina opazovanega tekstilnega izdelka, d [m] debelina opazovanega tekstilnega izdelka, T_1 [°C] temperatura na notranji strani opazovanega tekstilnega izdelka in T_2 [°C] temperatura na zunanji strani opazovanega tekstilnega izdelka.

Enačbo (6.9) lahko preuredimo in eksplicitno izrazimo toplotni upor R_r opazovanega tekstilnega izdelka, ki je obenem njegova toplotna izolacijska vrednost, enačba (6.10).

$$R_r = \frac{\lambda}{d} = \frac{S}{Q}\,(T_1 - T_2) \tag{6.10}$$

R_r je podan v [m^2.°C.h/kJ]. Enačba (6.10) velja v primeru, ko s tekstilnim izdelkom toplotno izoliramo ravno površino, kot je na primer hrbet.

6.3.1.4.2 Prevajanje toplote skozi valjasto površino Če je debelina ploskega tekstilnega izdelka, s katerim smo ovili (toplotno izolirali) valjasto telo, d in lahko zanemarimo izgube toplote na obeh koncih cilindra, bo skozi valjasto površino tekstilnega izdelka pretekla količina toplote v enoti časa kot jo zapišemo z enačbo (6.11).

$$Q = \frac{2\pi L\lambda}{\ln \frac{r+d}{r}}\,(T_1 - T_2) \tag{6.11}$$

kjer sta L [m] dolžina valja in r [m] polmer valja.

Enačbo (6.11) lahko preuredimo tako, da je pomnožimo z r/r in dobimo

$$Q = \frac{2\pi L r \lambda}{r \ln \frac{r+d}{r}} (T_1 - T_2) = \frac{S\lambda}{r \ln \frac{r+d}{r}} (T_1 - T_2) . \tag{6.12}$$

Iz enačbe (6.12) lahko eksplicitno izrazimo toplotni upor opazovanega tekstilnega proizvoda v obliki votlega valja:

$$Rv = \frac{S}{Q} (T_1 - T_2) = \frac{r}{\lambda} \ln \frac{r+d}{r} \tag{6.13}$$

6.3.1.4.3 Pretok toplote skozi sferično površino Toplotno upor je funkcija sfere in dimenzij ploskega tekstilnega izdelka, ki je oblikovan v sfero. Enačbo za izračun upora R_k lahko razvijemo na podlagi osnovne enačbe za stacionarni pretok toplote:

$$Q = -\lambda S \frac{dT}{dr} \tag{6.14}$$

kjer je dT temperaturni padec na poti skozi debelino dr opazovane toplotne izolacijske plasti (tekstilnega ploskega proizvoda). Površina krogle (sfere) je:

$$S = 4\pi r^2 \tag{6.15}$$

$$Q = -4\pi r^2 \lambda \frac{dT}{dr} \tag{6.16}$$

$$dT = -\frac{Q}{4\pi\lambda} \frac{dr}{r^2} \tag{6.17}$$

$$\int_{T_2}^{T_1} dT = -\frac{Q}{4\pi\lambda} \int_{R}^{r} \frac{dr}{r^2} \tag{6.18}$$

$$T_2 - T_1 = \frac{Q}{4\pi\lambda} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right) \tag{6.19}$$

kjer so: T_1 [°C] temperatura na notranji površini toplotne izolacijske plasti, T_2 [°C] temperatura na zunanji površini toplotne izolacijske plasti, r [m] polmer krogle, izračunan do notranje površine toplotne izolacijske plasti, R [m] polmer krogle, računan do zunanje površine toplotne izolacijske plasti.

Potemtakem je debelina toplotne izolacijske plasti $d = R - r$. Če upoštevamo dejstvo, da je $d = R - r$, potem enačbo (6.19) lahko napišemo v obliki (6.20).

$$T_2 - T_1 = \frac{Qd}{4\pi\lambda r R} \tag{6.20}$$

Če enačbo (6.20) pomnožimo z r/r in upoštevamo enačbo (6.15), dobimo

$$T_2 - T_1 = \frac{Qrd}{\lambda S R}. \tag{6.21}$$

Iz enačbe (6.21) lahko eksplicitno izrazimo toplotni upor R_k toplotne izolacijske plasti

$$R_k = (T_2 - T_1) \frac{S}{Q} = \frac{rd}{\lambda R} = \frac{d}{\lambda} \frac{r}{r+d}. \tag{6.22}$$

6.3.1.4.4 Medsebojna primerjava toplotnih uporov Toplotni upor R_r na ravni površini, enačba (6.10), lahko primerjamo z uporom na valjasti površini R_v, enačba (6.13) in na sferični (kroglasti) površini R_k, enačba (6.22). Te primerjave so potrebne, da dobimo boljši vpogled v spremembe toplotnega upora v odvisnosti od oblike površine. To pa predvsem zaradi razumevanja problemov, ki nastanejo pri konstrukciji rokavic za zaščito dlani in posebej prstov. Če so rokavice izdelane iz tekstilnega materiala, ki ima debelino 1 cm in je ta idealen toplotni izolator (λ = 0,1261 kJ/m^2.°C.h), bodo imele 0,0793 m^2.°C.h/kJ toplotnega upora [6]. To pomeni, da bi se preneslo skozi toplotno izolacijsko plast tekstilnega materiala, ki je debel 1 m in je temperaturna razlika na nasprotnih površinah 1 °C, v eni uri 1 kJ toplote in to skozi površino 0,0793 m^2.

Lahko delimo R_v z R_r in dobimo

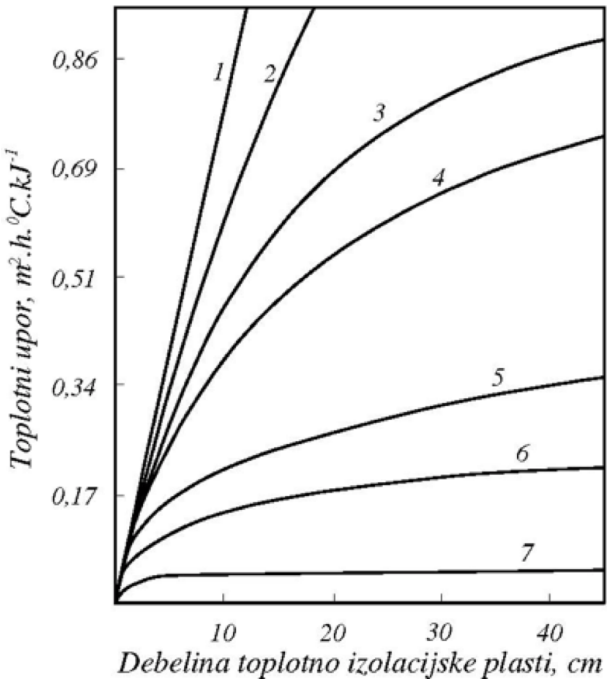
$$\frac{R_v}{R_r} = \frac{r}{d} \ln\left(1 + \frac{d}{r}\right). \tag{6.23}$$

Če pa R_r substituiramo z idealno vrednostjo upora na enoto debeline in ga obenem pomnožimo z dejansko debelino, da dobimo dejansko vrednost idealnega toplotnega upora, dobimo

$$\frac{R_v}{0.0793d} = \frac{r}{d} \ln\left(1 + \frac{d}{r}\right) = 0.0793r \ln\left(1 + \frac{d}{r}\right) \tag{6.24}$$

kjer sta d in r podana v cm.

Enačba (6.24) ni dovolj nazorna. S povečanjem polmera valja se vsekakor veča R, toda z zmanjšanjem r se povečuje vrednost logaritma in zmanjšuje vrednost produkta 0,0793r. Zaradi tega je na sliki 6.2 prikazana sprememba R_v v odvisnosti od debeline toplotne izolacijske plasti pri konstantnih vrednostih r na posameznih krivuljah.



Slika 6.2: Odvisnost R_v od premera valja oziroma krogle (sfere), r in debeline toplotne izolacijske plasti na valju oziroma krogli. Legenda: 1 – ravna površina, 2 – valj premera 30 cm, 3 – krogla premera 30 cm, 4 – valj premera 7,6 cm, 5 – valj premera 2,5 cm, 6 – valj premera 1,3 cm, 7 – krogla premera 1,3 cm. [3]

Lahko primerjamo tudi toplotni upor na krogli R_k s toplotnim uporom na ravni površini R_r in dobimo

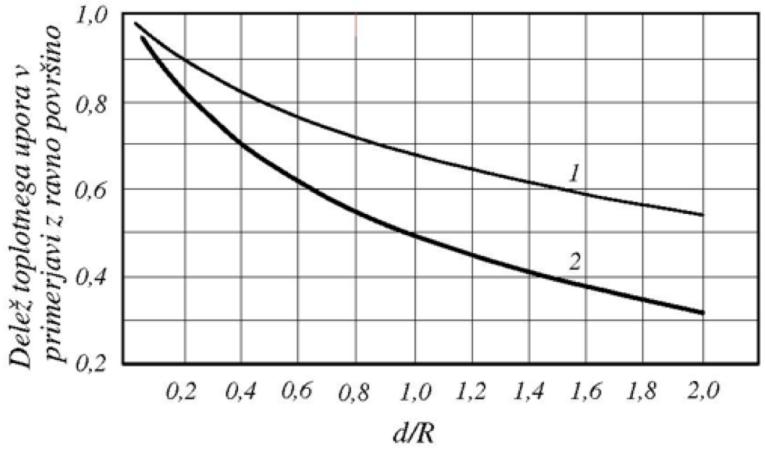
$$\frac{R_k}{R_r} = \frac{r}{r+d} = \frac{1}{1+\frac{d}{r}}. \tag{6.25}$$

Če za R uporabimo maksimalno vrednost na enoto debeline kot v enačbi (6.24) in pomnožimo z dejansko debelino d, dobimo

$$R_k = \frac{0,0793r}{1+\frac{r}{d}}. \tag{6.26}$$

Če je d neskončen, potem je R_k = 0,0793r. Ker je premer krogle na vrhu prsta približno 1,9 cm, bo maksimalni toplotni upor, ki ga je mogoče doseči z idealnim toplotnim izolacijskim tekstilnim materialom, ki ima neskončno debelino, le 0,0793*1,9 = 0,1501 m^2.°C.h/kJ.

Na sliki 6.3 so prikazani deleži uporov R_v in R_k glede na vrednost R_r v odvisnosti od razmerja d/R, kjer je d debelina toplotne izolacijske plasti in R polmer valja ali krogle, merjen do zunanje površine toplotne izolacijske plasti. Pri ravni površini je R neskončen in d/R = 0.



Slika 6.3: Delež upora glede na ravno toplotno izolacijsko plast (R_v/R_r in R_k/R_r) v odvisnosti od razmerja debeline toplotne izolacijske plasti in zunanjega polmera valja ali krogle (d/R). Legenda: 1 – valj, 2 – krogla. [3]

6.4 Seznam oznak poglavja

Oznaka	Enota	Opis
a_0		regresijski koeficient
a_0	kJ/m.°C.h	koeficient toplotne prevodnosti absolutno suhega ploskega izdelka
a_1		regresijski koeficient
a_1		smerni koeficient premice
a_2		regresijski koeficient
a_3		regresijski koeficient

Nadaljevanje na naslednji strani

Nadaljevanje s prejšnje strani

Oznaka	Enota	Opis
d	m	debelina tekstilnega izdelka
d_i	m	debelina i-te plasti oblačila
d_n	m	debelina steklene plošče
d_x	m	debelina plasti oblačila
k_w		kvocient a_1/a_0
λ	kJ/m.°C.h	koeficient toplotne prevodnosti tekstilnega izdelka
λ_0	kJ/m.°C.h	koeficient toplotne prevodnosti pri 0 °C ali 20 °C (odvisno od dogovora)
λ_i	kJ/m.°C.h	koeficient toplotne prevodnosti i-te plasti oblačila
λ_T	kJ/m.°C.h	koeficient toplotne prevodnosti pri temperaturi T
λ_n	kJ/m.°C.h	koeficient toplotne prevodnosti referenčne steklene plošče
λ_x	kJ/m.°C.h	koeficient toplotne prevodnosti plasti oblačila
L	m	dolžina valja
n		število plasti oblačila
Q	kJ	toplota, ki se prenaša s kondukcijo s površine telesa do površine oblačila
Q	kJ/h	količina toplote, ki preteče skoti tekstilni izdelek
Q_x	kJ	količina toplote, ki gre v času t skozi plast oblačila
Q_n	kJ	količina toplote, ki gre v času t skozi referenčno stekleno ploščo
R	m	polmer krogle, izračunan do zunanje površine toplotne izolacijske plasti
R	m^2.h.°C/kJ	skupni toplotni upor
R_i	m^2.h.°C/kJ	toplotni upor i-te plasti oblačila
R_k	m^2.h.°C/kJ	toplotni upor okroglega (sferičnega) tekstilnega izdelka
R_r	m^2.h.°C/kJ	toplotni upor ravnega tekstilnega izdelka
R_s	m^2.h.°C/kJ	skupni toplotni upor tekstilnega izdelka
R_s	m^2.h.°C/kJ	skupni toplotni upor plasti oblačila in plasti mirnega zraka na površini oblačila
R_v	m^2.h.°C/kJ	toplotni upor valjastega tekstilnega izdelka
R_z	m^2.h.°C/kJ	toplotni upor plasti mirnega zraka na površini oblačila
r	m	polmer krogle, izračunan do notranje površine toplotne izolacijske plasti
r	m	polmer valja
S	m^2	površina tekstilnega izdelka
T	°	temperatura
T_1	°	temperatura na notranji strani tekstilnega izdelka
T_2	°	temperatura na zunanji strani tekstilnega izdelka
T_2	°	temperatura zgornje bakrene plošče
T_3	°	temperatura srednje bakrene plošče
T_n	°	temperatura spodnje bakrene plošče
t	h	čas opazovanja
W	%	relativna vlažnost zraka

6.5 Literatura

[1] P. A. Kolesnikov. *Teplozaščitnye svojstva odeždy.* Legkaja industrija, Moskva, 1965.

[2] D. Jakšić. Studija uticaja vlage i vodo-odbojne impregnacije na termo-izolacijsku vrednost oblačila. Technical report, Univerza v Ljubljani, VTOZD Tekstilna tehnologija, 1978.

[3] D. Kerslake. *Textiles for comfort*. Shyrley Institute, Manchester, 1971.

[4] M. W. Zemansky. Temperatures very low and very high: Some physical considerations on the performance of cold weather clothing. Technical report, Armoded Med. Res. Lab., Fort Knox, Kentucky, 1971.

[5] L. H. Newburgh and sodelavci. *Physiology of Heat Regulation and The Science of Clothing*. Hafner Publishing Co., New York, London, 1968.

[6] A. C. Burton. Insulation by reflection and development of a reflecting cloth. Technical report, Banting and Best Department of Med. Res.

POGLAVJE 7

Termoizolacijska vrednost oblačila in čas tolerance

Kazalo

7.1 Uvod **123**
7.2 Jakšićeva metoda ugotavljanja toplotne izolacije oblačila **124**
7.3 Jakšićeva metoda ugotavljanja časa tolerance **132**
7.3.1 Uvod 132
7.3.2 Teoretične osnove 133
7.3.3 Razprava o teoretičnih osnovah 136
7.3.3.1 Potek eksperimenta 137
7.3.4 Primer uporabnosti enačbe (7.31) za izračun časa tolerance . . 137
7.3.4.1 Definiranje kompleta oblačila 137
7.3.4.2 Komplet oblačila in njegove lastnosti 139
7.3.4.3 Uporabnik oblačila 139
7.3.4.4 Stanje organizma uporabnika 140
7.3.4.5 Okolje 141
7.3.4.6 Ohlajevanje organizma 142
7.3.4.7 Pregrevanje organizma 147
7.3.5 Jakšićeva metoda ugotavljanja časa tolerance v diferencialni izvedbi 150
7.4 Seznam oznak poglavja **152**
7.5 Literatura **153**

7.1 Uvod

Sistem človek – obleka – okolje je izredno kompleksen. Saj se vrednosti komponent tega sistema pogosto spreminjajo. Če smo zunaj zaprtega prostora, moramo se prilagajati stanju okolja, da telo obdržimo v coni ugodja. Ta je takrat, ko nam ni ne vroče in ne mraz. Na stanje okolja (temperatura okolja, hitrost vetra, vlaga) ne moremo vplivati. Delno lahko vplivamo na količino izžarjene toplote iz telesa v okolje. To tudi zmeraj

ni mogoče. Da uravnotežimo količino izžarjene toplote iz telesa z količino toplote, ki se odvede v okolje, moramo uporabiti posrednika. To je oblačilo. Komplet oblačila se ponavadi sestoji iz spodnjega perila, obleke, nogavic, čevljev, eventualno rokavic po zimi, zunanje plasti, ki je prilagojena stanju okolja, po navadi vetrovka in pokrivalo glave. Očitno je, da ni mogoče z enim kompletom obdržati telo uporabnika oblačila v coni ugodja pri vseh možnih stanjih okolja in vseh spremembah intenzitete aktivnosti uporabnika oblačila. Vendar je možno obdržati znosno stanje v določenem intervalu nihanja le tega, okrog cone ugodja, ne da bi telo uporabnika oblačila utrpelo resne poškodbe v določenem času.

7.2 Jakšićeva metoda ugotavljanja toplotne izolacije oblačila

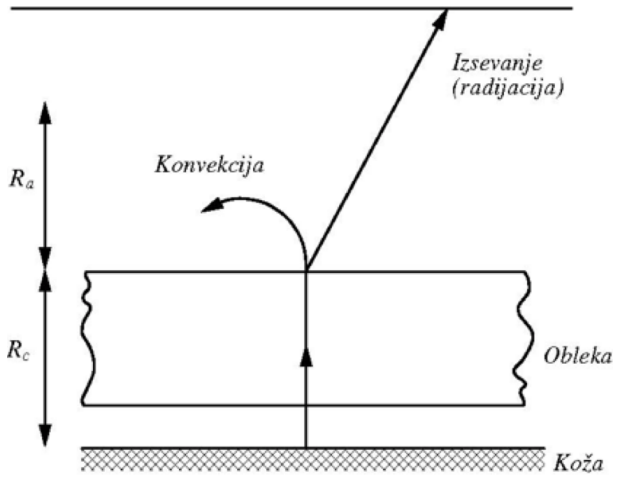
Ta metoda omogoča precej širok spekter uporabe. Saj upošteva vpliv hitrosti vetra in količine vlage v oblačilu. To pomeni, da je možno precej natančno izračunati potrebno toplotno izolacijo oblačila v vseh možnih stanjih okolja in stanjih organizma uporabnika.

Iz izkušenj vemo, da se hitreje ohlajamo, če piha mrzel veter, kot če vetra ni. Pri tem predpostavljamo, da sta v obeh primerih temperatura zraka in temperatura na površini oblačila enaka. Vprašanje je, kako vpliva hitrost vetra na spremembo vrednosti toplotne izolacije oblačila. Na sliki 6.1, stran 115, lahko spremljamo spremembo toplotnega upora ali vrednosti toplotne izolacije. V preglednici 6.4 so podane nekatere vrednosti toplotne izolacije v odvisnosti od hitrosti vetra. Vrednosti toplotnega upora R_a, izračunani z enačbo (3.3) na strani 40, zelo odstopajo od izmerjenih vrednosti, saj je to odstopanje pri hitrosti vetra 10,7 m/s celo 60 %. Ker je natančnost enačbe (3.3) približno ± 2 % [1, 2] se predpostavlja, da mrzel zrak prodira skozi oblačilo in tako zmanjšuje toplotno izolacijo oblačila.

Spremembo toplotne izolacije oblačila lahko merimo na človeku ali lutki (manikinu) v klimatski komori, v kateri je možno uravnavati temperaturo, relativno vlažnost, proizvodnjo toplote osebe in hitrost gibanja zraka – hitrost vetra. Takšna oprema je zelo draga. Meritve na ljudeh pa so dolgotrajne, drage in tudi včasih celo nevarne. Zmeraj obstaja namreč določena verjetnost poškodbe ljudi zaradi zmrzovanja posameznih delov telesa, predvsem prstov rok in nog.

V našem podnebju je veter zelo pogost. Zaradi tega je pri projektiranju oblačila nujno treba upoštevati vpliv vetra na toplotno izolacijo in ugotoviti, v katerih klimatskih razmerah je oblačilo primerno in v katerih ne. Poleg tega pa je potrebno tudi ugotoviti, koliko časa lahko uporabnik oblačila opravlja določeno aktivnost pod določenimi pogoji v danem oblačilu. Ker je klimatska komora draga, drage pa so tudi meritve in lutke, tako imenovani manikini, moramo uporabiti bolj enostavne in cenene metode meritve toplotne izolacije oblačila pri določenih hitrostih vetra. Če uporabimo Jakšićevo metodo, je možno hitro in poceni ter dovolj natančno ugotoviti vrednost toplotne izolacije oblačila v odvisnosti od hitrosti vetra, spremembi temperature okolja in vsebnosti vode v oblačilu. Pri tem je možno upoštevati tudi obliko površine posameznega dela oblačila. Najprej bomo obdelali vpliv hitrosti vetra na toplotni upor oblačila.

Oddaja toplote s površine kože v okolje je prikazana na sliki 7.1. Vrednost toplotne izolacije vseh plasti oblačila je R_c. Plasti mirnega zraka pa R_a. Predpostavimo, da se zrak, ki se nahaja med površino kože in mejno plastjo med oblačilom in zunanjim zrakom, ne giblje. Ta predpostavka približno velja, če je oseba v stanju mirovanja in če ni vetra. Zaradi tega lahko predpostavimo, da se toplota prenaša skozi oblačilo s kondukcijo, kot je to označeno na sliki 7.1. Z zunanje površine oblačila pa se toplota prenaša v okolje s konvekcijo in sevanjem.



Slika 7.1: Prenos toplote skozi oblačilo in plast mirnega zraka na površini oblačila.

Osnovna predpostavka, na kateri sloni metoda, je v tem, da je izguba toplote v mirnem vremenu pri določeni temperaturni razliki med površino kože in okoliškim zrakom Q_c. Q_c je v bistvu toplota ravnovesja. To obenem pomeni, da je Q_c toplota, ki jo oseba odda skozi površino kože in skozi oblačilo v okolje. Pod temi pogoji se seveda ne spreminja temperatura na površini kože. Ker je okolje zelo velik toplotni rezervoar, se ne spremeni njegova temperatura zaradi sprejete količine toplote Q_c.

Po drugi strani pa slika 6.1 na strani 115 in preglednica 6.4 na strani 116 kažeta, da se s povečanjem hitrosti vetra zmanjšuje toplotna izolacija oblačila ter plasti mirnega zraka na zunanji površini oblačila. Ta pojav si razlagamo tako, da se s povečanjem hitrosti vetra povečuje možnost pretoka toplote kljub temu, da se ni povečala temperaturna razlika in spremenila debelina oblačila. Pogojna debelina plasti mirnega zraka na površini oblačila se je zmanjšala, kar pomeni, da se je zmanjšala vrednost njene toplotne izolacije, enačba (3.3) na strani 40. Navedeni rezultati v preglednici 6.4 kažejo, da se s povečanjem hitrosti vetra zmanjšuje tudi toplotna izolacija oblačila.

Pri oblečeni osebi zrak navadno lahko prodira skozi oblačilo, če to ni neprepustno za zrak (gumirana obleka). Pri tem gre mrzel zrak skozi plasti oblačila na eni strani telesa, pride do površine kože – vsaj del te količine, se ogreje na temperaturo plasti oblačila, skozi katero gre, nakar ta ogreti zrak zapusti oblačilo na drugi strani telesa. Pri tem odnese določeno količino toplote, ki jo bomo označili s Q_a.

Če želimo, da se ne zniža temperatura na površini kože pri določeni hitrosti vetra, ki pomeni dodatno izgubo toplote Q_a, mora oseba povečati proizvodnjo toplote za vrednost Q_a. Lahko dosežemo konstantno temperaturo na površini kože tudi tako, da povečamo debelino oblačila in s tem njegovo toplotno izolacijo.

Če je toplota podano v enotah kJ/m^2.h in razliko temperature označimo z ΔT potem lahko definiramo toplotno izolacijo oblačila R_c (brez zunanje plasti mirnega zraka) z enačbo (7.1); glej enačbi (6.10) in (6.11) na strani 116.

$$R_c = \frac{\Delta T}{Q_c} \tag{7.1}$$

Enačba (7.1) velja za stanje brezvetrja. Če pa piha veter z določeno hitrostjo, kar povzroči povečan pretok toplote skozi oblačilo v količini Q_a, se zmanjša toplotna izolacija danega oblačila. Pri tem upoštevamo, da je Q_a odvisna od hitrosti vetra. Čim večja je hitrost vetra, tem večja je vrednost Q_a, obenem pa se zmanjša vrednost R_c. To odvisnost lahko

napišemo z enačbo (7.2).

$$R_c = \frac{\Delta T}{Q_c + Q_a} \tag{7.2}$$

Če upoštevamo enačbi (3.2) in (7.2), lahko Q_c izrazimo z enačbo (7.3).

$$Q_c = \frac{\lambda \Delta T}{d} \tag{7.3}$$

Količina Q_a je sorazmerna specifični toploti zraka c, masi zraka na enoto volumna, γ, volumnu zraka, ki gre skozi oblačilo, V, ter povprečni razliki temperatur zraka, pred vstopom v oblačilo in po izstopu iz njega. To odvisnost zapišemo z enačbo (7.4).

$$Q_a = c\gamma V \Delta T \tag{7.4}$$

Ob upoštevanju enačb (7.3) in (7.4) lahko enačbo (7.2) napišemo v naslednji razviti obliki

$$R_c = \frac{\Delta T}{\frac{\lambda \Delta T}{d} + c\gamma V \Delta T} = \frac{1}{\frac{\lambda}{d} + c\gamma V} = \frac{d}{\lambda + c\gamma V d} \tag{7.5}$$

Enačba (7.5) velja za plosko obliko oblačila, pri katerem gre zrak samo skozi plasti oblačila, medtem ko vse odprtine dobro tesnijo. Ker dejansko oblačilo ne tesni popolnoma, je treba zadnji člen v imenovalcu enačbe (7.5) korigirati s koeficientom b, $b \geq 1$. Če oblačilo popolnoma tesni, potem je $b = l$; to je predpostavljeno v enačbi (7.5), zaradi tega koeficient b ni napisan. Če oblačilo ne tesni, je $b > 1$. To dejansko pomeni, da gre skozi oblačilo pri določeni hitrosti vetra večja količina zraka, kot je laboratorijsko izmerjena količina skozi plasti oblačila na površini, kjer ni šivov ali drugih odprtin. Poleg tega lahko še drugi dejavniki vplivajo na toplotno izolacijo R_c. Tukaj bi lahko našteli medsebojno spremembo lege plasti oblačila, spremembo oblike zunanje površine oblačila, gibanje zraka na površini oblačila ipd. Zaradi tega bi lahko v enačbo (7.5) vpeljali še dodatni korekcijski koeficient a, s katerim bi pomnožili števec omenjene enačbe, $a \geq 1$. Vendar je spremembo medsebojne lege plasti oblačila pri gibanju subjekta težko ugotovljiva. Uporaba koeficienta a nima praktičnega pomena in ga ne bomo upoštevali v enačbi (7.6). Če enačbo (7.5) preuredimo in upoštevamo koeficient b, dobimo

$$R_c = \frac{d}{\lambda + bc\gamma V d} \tag{7.6}$$

R_c je toplotna izolacija oblačila, R_a, enačba (3.3), pa je toplotna izolacija plasti mirnega zraka na površini oblačila. Skupno toplotno izolacijo R_s pa lahko napišemo z naslednjo enačbo:

$$R_s = R_c + R_a \tag{7.7}$$

Ob upoštevanju enačb (7.6) in (3.3), lahko enačbo (7.7) napišemo v razviti obliki

$$R_s = \frac{d}{\lambda + bc\gamma V d} + \frac{0,0429}{0,4 + 2,0\sqrt{v}} \tag{7.8}$$

kjer so R_s [m^2.°C.h/kJ] skupna toplotna izolacija, b brezdimenzijski koeficient, d [m] debelina oblačila, λ [kJ/m.°C.h] koeficient toplotne prevodnosti oblačila, c [kJ/kg.°C] specifična toplota zraka, γ [kg/m^3] gostota zraka, V [m^3/m^2.h] volumska hitrost pretoka zraka skozi oblačilo pri določeni hitrosti vetra in v [m/s] hitrost vetra.

Vrednosti koeficienta b je možno ugotoviti na človeku ali posebno konstruirani lutki (manikinu). Če nam zadostujejo manj natančne meritve, ali oblačilo dobro tesni, potem lahko vzamemo, da je $b = 1$. V tem primeru merimo d in V, medtem ko c in γ lahko najdemo v standardnih tabelah; c = 0,966 kJ/kg.°C in γ = 1,2 kg/m^3. Specifična toplota zraka je funkcija temperature; vendar pa v intervalu temperatur, ki so zanimive glede oblačenja, lahko računamo s konstantno vrednostjo. Gostota zraka je odvisna od tlaka in temperature. Glede na naše potrebe pa lahko računamo z vrednostjo 1,2 kg/m^3. Ostale parametre lahko merimo s pomočjo standardnih laboratorijskih aparatov oziroma instrumentov.

Obstaja še en problem, to je odvisnost volumenske hitrosti pretoka zraka od hitrosti vetra. To je zelo težko ugotoviti. Zrak prodira skozi oblačilo zaradi razlike tlakov. To pomeni, da je volumska hitrost pretoka zraka skozi oblačilo funkcija razlike tlakov na nasprotnih površinah oblačila. Po drugi strani pa veter povzroča določen tlak na površini, na katero so usmerjene njegove tokovnice. Čim večja je hitrost vetra, tem večji tlak povzroča. V aerodinamičnih preračunih se jemlje naslednja odvisnost

$$v = \sqrt{\frac{2gh}{\gamma}} \approx= 4\sqrt{h} \tag{7.9}$$

kjer so v [m/s] hitrost vetra, g [m/s^2] gravitacijski pospešek (9,81 m/s^2), h [mm VS] tlak (vodnega stolpca) za [Pa] glej enačbo (7.10) in γ [kg/m^3] gostota zraka. Za tlak h v enoti Pa je potrebno uporabiti enačbo (7.10).

$$v = 1,28\sqrt{h} \tag{7.10}$$

Enačba (7.9) oziroma (7.10) nam povesta, kakšen tlak povzroča določena hitrost vetra na površino jadra. Pri laboratorijskih meritvah volumenske hitrosti pretoka zraka skozi oblačilo je stanje nekoliko drugačno. Ustvarimo lahko poljubno razliko tlakov v intervalu, ki je zanimiv glede realnih hitrosti vetra. Pri tem dobimo določen volumenski pretok zraka skozi oblačilo ali tkanino. Volumska hitrost pretoka je res odvisna od razlike tlakov na nasprotnih površinah tkanine, toda odvisna je še od velikosti, števila in oblike por v tkanini, kakovosti sten por, dolžine por ipd. Zaradi tega je volumska hitrost pretoka zraka pri določenih tlakih različna pri tkaninah različne konstrukcije. To se jasno vidi na sliki 7.2.

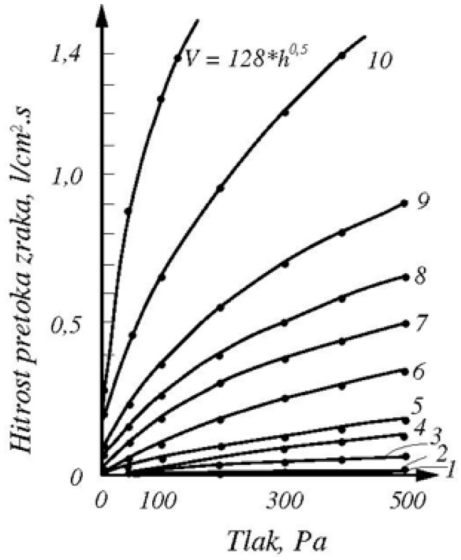
Iz slike 7.2 vidimo, da je volumska hitrost pretoka zraka skozi tkanine 1 do 4 približno linearno odvisna od tlaka. Te tkanine so zelo goste. Tkanina 10 je precej redka in je odvisnost volumske hitrosti pretoka zraka skozi takšno tkanino eksponentna. Eksponent je manjši od 1 in večji od 0,5. Krivulja 11 ponazarja enačbi (7.9) in (7.10).

Naše raziskave [1, 2] kažejo, da lahko volumsko hitrost pretoka opišemo z enačbo (7.11).

$$V = Ah^b = Pah^b \tag{7.11}$$

kjer so V [m^3/m^2.h] volumska hitrost pretoka zraka, A je koeficient ($A = Pa$), P [m^2] odprta površina v tkanini, skozi katero se pretaka zrak pri razliki tlakov h [Pa], b eksponent, ki v precejšnji meri ponazarja pogoje pretoka zraka skozi pore v tkanini ($1 \geq b \geq 0,5$) in a koeficient.

Pri raziskavah smo opazili, da se vrednost eksponenta b povečuje z gostoto tkanine in je zato na splošno otežen pretok zraka skozi njo. Če pa tkanina ni gosta in je poleg tega izdelana iz mono ali multi filamentnih niti, se vrednost eksponenta b zmanjšuje. Vendar v nobenem primeru nismo dosegli vrednosti 0,5 ali 1; vrednost b je bila vedno v mejah



Slika 7.2: Volumenske hitrosti pretoka zraka skozi tkanine v odvisnosti od tlaka. [3]

$1 > b > 0,5$. To dejansko pomeni, da je upor pretoku zraka skozi goste tkanine zelo velik in da potrebujemo večji tlak, da dosežemo enako linearno hitrost pretoka zraka kot skozi manj goste tkanine. To pa predvsem zaradi tega, ker imajo pore pri gostih tkaninah manjše premere in so ponavadi daljše kot pri manj gostih; oziroma razmerje med premerom pore (predpostavljamo, da ima približno okrogel prečni presek) in njeno dolžino je večje pri manj gostih tkaninah kot pri gostih. Linearna hitrost pretoka zraka skozi oblačilo oziroma ploske tekstilne izdelke je približno sorazmerna hitrosti vetra pri zelo redkih ploskih izdelkih in približno kvadratu hitrosti vetra pri zelo gostih ploskih izdelkih.

Enačbo (7.8) lahko testiramo na podlagi eksperimentalnih rezultatov, navedenih v preglednici 7.1. Toplotni upori, ki so prikazani v preglednici 7.1), se nanašajo na polarno uniformo armade ZDA, ki se ponavadi uporablja v bazah na Grenlandiji. Ker tam pihajo močni mrzli vetrovi, ne sme uniforma prepuščati preveč zraka in tudi odprtine na uniformi morajo dobro tesniti. Glede prepustnosti zraka zadošča, da je le zunanja plast slabo prepustna, da ščiti pred vetrom.

Predpostavimo, da velja enačba (7.8) (z upoštevanjem koeficienta a) pri hitrosti vetra 10,7 m/s ($a = b = 1$). Poleg tega lahko uporabimo še naslednje vrednosti: Q_c = 314 kJ/m^2.h; d = 0,0214 m; λ = 0,168 kJ/m.°C.h; T_1 = 33 °C; T_2 = -7 °C; ΔT = 40 °C; c = 0,966 kJ/kg.°C; γ = 1,2 kg/m^3 in površina S = 1 m^2. Vrednost Q_c nam pove, da subjekt, ki je oblečen v polarno uniformo, stoji brez koncentracije – sproščeno. Debelina 2,14 cm je precejšnja, vendar še zmeraj bistveno ne zmanjšuje funkcionalnosti uniforme. Koeficient toplotne prevodnosti je precej nizek in je približno enak vlaknini iz volnenih vlaken, ki ima relativno majhno maso na enoto volumna. Temperatura T_1 je temperatura ugodja na površini kože, T_2 pa je temperatura zunanjega zraka. Nujno je še predpostaviti, da se ves zrak, ki prodre v notranjost uniforme, segreje na temperaturo kože, 33 °C. Če enačba (7.8) popolnoma velja pri hitrosti vetra 10,7 m/s, potem gre skozi uniformo 4,04 m^3/m^2.h zraka pri hitrosti vetra 10,7 m/s. Če je volumenska hitrost pretoka sorazmerna hitrosti vetra ali kvadratnemu korenu pritiska, ki ga ta veter povzroča, potem bo skozi uniformo preteklo 2,38 m^3/m^2.h zraka pri hitrosti vetra 6,3 m/s in 0,49 m^3/m^2.h pri hitrosti vetra 1,3 m/s. Rezultati testiranja enačbe (7.8) pod temi predpostavkami so prikazani v prvem delu preglednice 7.1, $V \propto v$.

Preglednica 7.1: Primerjava vrednosti R_s, izračunanih z enačbo (7.8), z eksperimentalno izmerjenimi vrednostmi, preglednica 6.4

Parameter	Predpostavka						
		$V \propto v$			$V \propto v^2$		
Hitrost vetra [m/min]	1,3	6,3	10,7	1,3	6,7	10,7	
Eksperimentalna vrednost R_s	0,1457	0,1144	0,0857	0,1457	0,1144	0,0857	
Izračunata vrednost R_s z (7.8); $a = b = 1$	0,1348	0,1021	0,0875	0,1421	0,1133	0,0857	
Odstopanje [%]	−7,5	−10,8	0,0	−2,5	−1,0	0,0	
a = 1,0262; b = 1,0809				0,1455	0,1148	0,0857	
Odstopanje [%]				−0,2	+0,2	0,0	
a = 1,635; b = 1,0236	0,1421	0,1079	0,0907				
Odstopanje [%]	−2,5	−2,8	+8,5				

V primeru, da hitrost pretoka zraka skozi omenjeno uniformo ni sorazmerna hitrosti vetra, ampak pritisku, ki ga povzroča hitrost vetra ali kvadratu hitrosti vetra, enačbi (7.9) in (7.10, povzroča hitrost vetra 10,7 m/s pritisk 70,17 Pa, enačba (7.10). Pri tem gre skozi oblačilo 4,04 m^3/m^2.h zraka kot v prejšnjem primeru, saj smo predpostavili, da velja enačba (7.8) pri hitrosti 10,7 m/s, ne glede na to, kakšna je odvisnost volumenske hitrosti pretoka od hitrosti vetra. Pri hitrosti vetra 6,3 m/s (24,33 Pa) bo hitrost pretoka zraka skozi uniformo 1,40 m^3/m^2.h. Pri hitrosti vetra 1,3 m/s (1,04 Pa) pa bo hitrost pretoka zraka skozi oblačilo le 0,06 m^3/m^2.h. Rezultati testiranja enačbe (7.8) pod to predpostavko so prikazani v drugem delu preglednice 7.1, $V \approx v^2$.

Kot je razvidno iz rezultatov, preglednica 7.1, ima omenjena uniforma dejansko zelo dobro zaščitno plast proti vetru – vetrovko in tudi hlače iz podobnega materiala, ki zelo slabo prepuščajo zrak. Poleg tega uniforma zelo dobro tesni, saj so vrednosti koeficientov a in b zelo blizu 1.

Odstopanja izračunanih vrednosti toplotnega upora oziroma toplotne izolacije kažejo, da je volumenska hitrost pretoka zraka sorazmerna kvadratu hitrosti vetra ali pa sorazmerna pritisku, ki ga povzroča hitrost vetra na površini uniforme, kar se dobro ujema z eksperimentalnimi rezultati. Če predpostavimo, da se popolnoma ujemajo eksperimentalni rezultati toplotnega upora pri hitrosti vetra 10,7 m/min [2], potem odstopajo izračunate vrednosti toplotnega upora 2,5 % pri hitrosti vetra 1,3 m/min in pri hitrosti 6,3 m/min pa le 1 %.

Če predpostavimo, da je $b = 1$ (oblačilo dobro tesni), odstopanja toplotnega upora, niso večja kot 2,5 %. To praktično pomeni, da lahko zelo enostavno in poceni ugotovimo toplotno izolacijo oblačila s tem, da izmerimo debelino oblačila, koeficient toplotne prevodnosti oblačila in volumensko hitrost pretoka zraka skozi oblačilo. Te meritve lahko izvrši laborant v osmih urah s pomočjo mikrometra, rotometra in aparata za ugotavljanje koeficienta toplotne prevodnosti.

V preglednici 7.2 je predpostavljeno, da polarna uniforma popolnoma tesni, zaradi česar smo vzeli, da je $b = 1$. Upoštevana je enačba (7.8) brez koeficienta a.

Preglednica 7.2: Primerjanje vrednosti toplotnih uporov, ki so izmerjeni eksperimentalno na ameriški polarni uniformi z vrednostmi, izračunanih z modificirano enačbo (7.8), $b = 1$

	Skupni toplotni upor R_s		
Hitrost vetra [m/s]	Izmerjen na uniformi	Izračunan z enačbo (7.8)	Odstopanje [%]
1,3	0,1462	0,1427	−2,4
6,3	0,1144	0,1144	0,0
10,7	0,0857	0,0881	+2,4

Kot smo že omenili, velja enačba (7.8) za ravno površino. Če obdržimo simbole iz enačb od (6.11) do (6.26), lahko napišemo

$$R_r = R_s, \tag{7.12}$$

za valjasto površino velja

$$R_v = R_s \frac{r}{d} \ln\left(1 + \frac{d}{r}\right) \tag{7.13}$$

in za okroglo

$$R_k = \frac{R_s}{1 + \frac{d}{r}}. \tag{7.14}$$

Pri tem ima Rs vrednost, kot je definirana z enačbo (7.8). Če želimo ugotoviti, pri kateri zunanji temperaturi ščiti oblačilo, lahko uporabimo enačbo (6.10), ki jo lahko transformiramo v naslednjo obliko

$$R_r = R_s = \frac{T_1 - T_2}{Q} \tag{7.15}$$

kjer je Q [kJ/m32.h] toplotni tok, R_s je funkcija hitrosti vetra, enačba (7.8), temperature, enačba (6.6) in vlage, enačba (6.8). Q je funkcija intenzitete in vrste aktivnosti. Če enačbo (7.15) rešimo po T_2, za ravno površino dobimo

$$T_2 = T_1 - R_s Q, \tag{7.16}$$

za valjasto površino

$$T_2 = T_1 - R_s Q \frac{r}{d} \ln\left(1 + \frac{d}{r}\right) \tag{7.17}$$

in za okroglo

$$T_2 = T_1 - \frac{R_s Q}{1 + \frac{d}{r}}. \tag{7.18}$$

V preglednici 7.2 smo predpostavili, da skupni toplotni upor R_s ne odstopa od izmerjenega. Prej smo obravnavali vpliv temperature, vlage (vode), vetra in oblike površine na koeficient toplotne prevodnosti oziroma na toplotni upor R_s. Iz enačbe (6.6) vidimo, da je koeficient toplotne prevodnosti sorazmeren spremembi temperature. Če se temperatura poveča za 1 °C, se poveča vrednost koeficienta toplotne prevodnosti za produkt 0,0025·λ_0, kJ/m.°C.h.

Voda ima velik vpliv na spremembo vrednosti koeficienta toplotne prevodnosti. Enačba (6.8) daje zadostno natančnost. Lahko jo napišemo tudi v obliki enačbe (6.6), $\lambda = \lambda_0(1 + k_w \cdot \Delta W)$. Pri tem je $\lambda_0 = a_0$ in pomeni vrednost koeficienta toplotne prevodnosti absolutno suhega vzorca. Lahko pa je vrednost v standardni atmosferi, kar je bolj primerno. Koeficient k_w je $k_w = a_1/a_0$.

Iz preglednice 6.3 na strani 114 je razvidno, da so vrednosti koeficienta k med 0,0296 in 0,0513. Povprečna vrednost koeficienta k_w pri 12 vzorcih je 0,0398 ali približno 0,04. Variacijski koeficient pa je 18 %. Na splošno lahko rečemo, da se z vsakim odstotkom povečanja vode v tkanini ali ploskem tekstilnem izdelku, poveča vrednost koeficienta toplotne prevodnosti za okrog 4 %, kar je 16 krat hitrejša sprememba, kot je sprememba zaradi vpliva temperature.

V enačbi (7.8) se vrednosti nanašajo na merjenja koeficienta toplotne prevodnosti v standardni atmosferi; 20 °C in 65 % relativne vlage. Ker se temperatura in vlaga spreminjata in je lahko obleka občasno mokra, moramo v enačbi (7.8) upoštevati tudi te spremembe, saj je vpliv vlage na λ izrazit. Če je vrednost koeficienta toplotne prevodnosti vzorca v mirnem ozračju in v standardni atmosferi enak λ_0, in je vrednost koeficienta, s katerim prikažemo vpliv temperature k_T in koeficienta, k_w, s katerim prikažemo vpliv vode na koeficient toplotne prevodnosti, lahko λ v enačbi (7.8) izrazimo z $\lambda = \lambda_0(1 + k_T\Delta T + k_w\Delta W)$ in lahko enačbo (7.8) napišemo v naslednji obliki

$$R_s = \frac{d}{\lambda_0(1 + k_T\Delta T + k_w\Delta W) + bc\gamma Vd} + \frac{0,0429}{0,4 + 2,0\sqrt{v}}. \tag{7.19}$$

Enačba (7.19) velja za ravno površino. Za valjasto površino velja enačba (7.13) in za sferno površino velja enačba (7.14) pa ni simboličnih sprememb, le R_s se nanaša na enačbo (7.19) Skupni toplotni upor R_s, kot je definiran z enačbo (7.19), pomeni popolno posplošitev algoritma za ugotavljanje vrednosti R_s v vseh možnih realnih pogojih. Upoštevani so vsi bistveni parametri okolja (temperatura, vlaga, veter) in oblika površine oblačila.

Enačba (7.19) pomeni sintezo dosedanjih raziskav na področju ugotavljanja skupnega toplotnega upora in ne pomeni le vrhunski teoretični dosežek na tem področju, ampak je tudi zelo učinkovito orodje pri projektiranju oblačil za katerekoli pogoje okolja in delovanja človeka.

7.3 Jakšićeva metoda ugotavljanja časa tolerance

7.3.1 Uvod

V realnem življenju smo pogosto prisiljeni delovati v izredno nevarnem okolju. To se predvsem nanaša na gašenje požarov in reševanje ljudi iz gorečih objektov, delo na prostem pri nizkih temperaturah, delo v kontaminirani coni na prostem ali v zaprtih prostorih ipd. V teh stanjih najbolj pogosto nimamo možnosti prilagoditve količine oblačila stanju okolja in potrebni intenziteti aktivnosti (količini oddane toploti iz telesa v okolje), kar pomeni, da nimamo na razpolago dodatnih plasti oblačila, če se začenjamo ohlajevati. V zastrupljenem okolju ne moremo spreminjati količine oblačila zaradi možnosti zastrupitve dihalnih organov in kože (bojni strupi ipd.). V teh primerih je bistveno realno predvideti čas, ki ga bomo poimenovali čas tolerance bivanja in delovanja oseb, v katerem ne bo prišlo do resnejših poškodb telesa.

Izredno težko je natančno ugotoviti čas tolerance. Nanj vpliva veliko število parametrov, kot so: temperatura in vlaga okolja, hitrost vetra in njegova smer pihanja, količina in kakovost plasti oblačila, kroj in oblika oblačila, stanje oblačila (suho ali mokro), kakovost površine zgornje plasti oblačila, karakteristike zgornja plasti oblačila (propustnost za zrak in vodno paro, prepustnost ali neprepustnost za vodo), vrsta in intenziteta dela, ki ga opravlja oseba v izrednih pogojih, psihofizično stanje ipd.

Seveda meritve lahko izpeljemo na ljudeh, vendar ne v zastrupljenem okolju, ker obstoji določena verjetnost zastrupitve. Zaradi tega je v tem primeru težko izpeljati verodostojen eksperiment. Kljub temu je možno testirati vsa druga stanja. Teh pa je preveč. Že manjša sprememba v oblačilu terja nov preizkus. Zaradi tega je bolj enostavno in tudi bolj poceni, izračunati čas tolerance za vsa stanja, ki bodo najpogosteje nastopila v realnem življenju v izrednih razmerah in testirati na ljudeh le nekaj najbolj tipičnih stanj.

Razvili smo metodo ugotavljanja časa tolerance [4] v kateremkoli stanju okolja, stanju oblačila in stanju organizma človeka. Pri tem so upoštevane nekatere domneve, ki se zmeraj popolnoma ne ujemajo z realnim stanjem, kot je na primer kot pihanja vetra, zaščita ekstremitet, termoizolacijska vrednost plašča telesa (koža in podkožno tkivo), vpliv kakovosti zunanje plasti oblačila na hitrost izhlapevanja znoja ipd. Kljub tem pomanjkljivostim je možno metodo uporabiti v realnih situacijah, posebno, če se še dodatno izpeljejo preizkusi na ljudeh za nekatera najbolj pogosta stanja, ki bi lahko nastopila v izjemnih okoliščinah.

7.3.2 Teoretične osnove

Obravnavali bomo primere, v katerih lahko pride do pregrevanja in ohlajevanje organizma. Začetno stanje naj bo stanje ugodja: človek naj bo v stanju ugodja v okolju, v katerem bo deloval. Čez čas se stanje lahko spremeni in oseba se lahko začne segrevati ali ohlajevati, pri čemer pa je sestava oblačila konstantna: oseba nima dodatnih delov oblačila, če se začne ohlajati in ne more odvreči oblačil, če se začne segrevati (n.pr. v kontaminiranem okolju). Pri tem oseba neprekinjeno opravlja določeno aktivnost z določeno intenziteto in zaradi tega izžareva v okolje konstantno količino toplote skozi površino kože. Drugi deli telesa in okončine so ustrezno zaščiteni.

Vsi izračuni se nanašajo na ravno površino, skozi katero se sicer izžareva manj toplote kot čez valjasto ali sferno površino.

Toplotni upor oblačila izrazimo z enačbo (7.20).

$$R_c = \sum_i \frac{d_i}{\lambda_i} = \frac{d_c}{\lambda_c} \tag{7.20}$$

kjer so R_c [m^2.h.°C/kJ] toplotni upor oblačila, d_c [m] debelina oblačila in λ_c [kJ/m.h.°C] koeficient toplotne prevodnosti oblačila.

Negibna plast zraka na površini oblačila, ima tudi določen toplotni upor, ki ga lahko izrazimo z znano, eksperimentalno preizkušeno enačbo, ki velja pri hitrosti vetra, ki je večja od 1 m/s. Ta odvisnost je prikazana z enačbo (7.21).

$$R_a = \frac{0,0429}{0,4 + 2,0\sqrt{v}} \tag{7.21}$$

kjer sta R_a [m^2.h.°C/kJ] toplotni upor plasti zraka neposredno na površini oblačila in v [m/s] hitrost vetra.

Skupni toplotni upor R_s, lahko izrazimo z enačbo (7.22).

$$R_s = R_c + R_a \tag{7.22}$$

kjer je R_s [m^2.h.°C/kJ] skupni toplotni upor oblačila in mirne plasti zraka na površini oblačila.

Toplotni upor oblačila se spreminja v odvisnosti od hitrosti vetra, količine vlage v oblačilu in spremembe temperature oblačila. Spremembe v toplotnem uporu oblačila lahko izrazimo s spremembo koeficienta toplotne prevodnosti, λ. To odvisnost lahko za ravno površino izrazimo z enačbo (7.23):

$$\lambda = \lambda_0(1 + k_T\Delta T_c + k_w\Delta G_c) + bc_a\gamma_a V_a d_c \tag{7.23}$$

kjer so:

- λ_c [kJ/m.h.°C] koeficient toplotne prevodnosti oblačila,
- λ_0 [kJ/m.h.°C] koeficient toplotne prevodnosti suhega oblačila v standardni atmosferi v mirnem vremenu,
- k_T [] smerni koeficient (k_T = 0,0025) krivulje odvisnosti koeficienta toplotne prevodnosti od temperature oblačila;
- ΔT_c [°C] sprememba temperature oblačila
- k_W [%] smerni koeficient krivulje odvisnosti koeficienta toplotne prevodnosti oblačila od količine vode v oblačilu (k_W = 0,04),

- ΔG_c [%] povečanje mase oblačila zaradi povečanja količine vode v oblačilu, odstotek vode v oblačilu,
- b [/] koeficient, ki ponazarja tesnjenje oblačila (pri oblačilu, ki dobro tesni, kot je v našem primeru, ima koeficient b vrednost 1), če oblačilo ne tesni, potem je $b > 1$,
- c_a [kJ/kg.°C] specifična toplota zraka (0,966 kJ/kg.°C),
- γ_a [kg/m^3] gostota zraka (1,2 kg/m^3),
- V_a [m^3/m^2.h] volumenska hitrost pretoka zraka skozi oblačilo pri določeni hitrosti vetra in
- d_c [m] debelina oblačila.

Če upoštevamo enačbe od (7.20) do (7.23), lahko skupni toplotni upor oblačila in mirne plasti zraka na njegovi površini, enačba (7.22) izrazimo z enačbo (7.24).

$$R_s = \frac{d_c}{\lambda_0(1 + k_T\Delta T_c + k_w\Delta G_c) + bc_a\gamma_a V_a d_c} + \frac{0,0429}{0,4 + 2,0\sqrt{v}} \tag{7.24}$$

V enačbi (7.24) smo upoštevali oziroma opisali tesnitev oblačila s koeficientom b, glej tudi enačbo (7.23). V coni ugodja je temperatura na površini prsi okrog 33 °C, temperatura jedra telesa 37 °C in povprečna temperatura telesa je 36,6 °C. Pregrevanje ali ohlajevanje organizma človeka nastopi takrat, ko pride do neravnotežja med proizvodnjo toplote v telesu in oddajo le-te v okolje. Če je proizvodnja toplote v organizmu manjša, kot so njene izgube skozi površino kože oziroma zunanjo površino oblačila v okolje, se bo začela zniževati povprečna temperatura telesa opazovane osebe. V nasprotnem primeru se bo toplota začela "skladiščiti" v telesu in se bo začela dvigovati telesna temperatura. Če so nam znani povprečni temperaturi telesa v začetnem stanju (cona ugodja) in končnem stanju (mejna temperatura ohlajevanja telesa opazovane osebe), teža osebe in specifična toplota telesa c_b, lahko primanjkljaj ali presežek toplote izračunamo z enačbo (7.25).

$$\Delta Q_b = c_b G_b (T_{av_2} - T_{av_1}) \tag{7.25}$$

kjer so ΔQ_b [kJ/m^2.h.°C] razlika med količino proizvedene toplote, ki ni uporabljena za delo mišic in notranjih organov, ter izžarjene toplote v okolje (v coni ugodja velja $\Delta Q_b = 0$ kJ/m^2.h.°C), c_b [kJ/kg.°C] specifična toplota telesa, G_b [kg] masa telesa, T_{av_2} [°C] povprečna aktualna temperatura telesa, T_{av_1} [°C] povprečna temperatura telesa v coni ugodja (36,6 °C).

Iz enačbe (7.25) je razvidno, da je debalans toplote pozitiven v primeru, ko se toplota kopiči v telesu osebe in negativen, če se toplota črpa iz telesa subjekta, tako da se zmanjšuje srednja temperatura telesa. Ta debalans je posledica izgub toplote, ki so lahko večje ali manjše, kot je proizvodnja toplote, ki se izžareva skozi površino kože in kot se porabi za izhlapevanje znoja in segrevanje ali ohlajevanje vdihanega zraka. Če je debalans negativen, se oseba ohlaja, če je pozitiven, se pregreva. Če je bila oseba pred meritvijo v coni ugodja in če ni bilo debalansa toplote, bo oseba še zmeraj v coni ugodja. V primeru, da ni debalansa velja $\Delta Q = 0$ kJ/m^2.h.°C. Debalans lahko izrazimo tudi z enačbo (7.26).

$$\Delta Q_b = Q_1 - (Q_2 + Q_3 + Q_4) \tag{7.26}$$

kjer so ΔQ_b [kJ/m^2.h.°C] razlika med količino proizvedene toplote, ki ni uporabljena za delo mišic in notranjih organov, ter izžarjene toplote v okolje (v coni ugodja velja $\Delta Q_b = 0$ kJ/m^2.h.°C), Q_1 [kJ/m^2.h.°C] proizvedena toplota, Q_2 [kJ/m^2.h.°C] del proizvedene toplote ki se izžari skozi površino oblačila v okolje, Q_3 [kJ/m^2.h.°C] del proizvedene toplote, ki se porabi za izhlapevanje znoja, Q_4 [kJ/m^2.h.°C] del proizvedene toplote, ki se porabi zaradi vpliva hitrosti vetra, če je vreme vetrovno. Posamezne toplote iz enačbe (7.26) so definirane z enačbami od (7.27) do (7.30).

$$Q_1 = \frac{T_{skc} - T_{en}}{R_{s1}} St \tag{7.27}$$

kjer so T_{skc} [°C] temperatura na površini kože v coni ugodja, T_{en} [°C] temperatura okolja, R_{s1} [m^2.h.°C/kJ] skupni toplotni upor oblačila v coni ugodja, S [m^2] površina kože in t [h] čas trajanja eksperimenta in obenem čas tolerance.

$$Q_2 = \frac{T_{sk} - T_{en}}{R_{s2} + \Delta R_{ti}} St \tag{7.28}$$

kjer so T_{sk} [°C] temperatura na površini kože, T_{en} [°C] temperatura okolja, R_{s2} [m^2.h.°C/kJ] skupni toplotni upor oblačila v aktualnih pogojih, ΔR_{ti} [m^2.h.°C/kJ] sprememba toplotnega upora plašča telesa glede na stanje v coni ugodja, S [m^2] površina kože in t [h] čas trajanja eksperimenta in obenem čas tolerance.

$$Q_3 = c_w \varphi \left[a_0 + a_1 \frac{T_{sk} + T_{en}}{2} + a_2 v \right] St \tag{7.29}$$

kjer so c_w [kJ/kg.°C.h] specifična toplota izhlapevanja vode, $\varphi = (100 - RH)/100)$, kjer je RH [%] relativna vlaga zraka, a_0 , a_1 in a_2 koeficienti regresijske krivulje, T_{sk} [°C] temperatura na površini kože, T_{en} [°C] temperatura okolja, v [m/s] hitrost vetra, S [m^2] površina kože in t [h] čas trajanja eksperimenta in obenem čas tolerance.

$$Q_4 = (T_k - T_{en}) V_a (c_w \varphi G_{aw} + c_a \gamma_a) t \tag{7.30}$$

kjer so T_k [°C] temperatura jedra telesa, T_{en} [°C] temperatura okolja, V_a [m^3/m^2.h] volumenska hitrost pretoka zraka skozi oblačilo pri določeni hitrosti vetra, c_w [kJ/kg.°C.h] specifična toplota izhlapevanja vode, $\varphi = (100 - RH)/100)$, kjer je RH [%] relativna vlaga zraka, G_{aw} [kg/m^3.h] količina vode v izdihanem zraku, t [h] čas v urah, ki je potreben, da se doseže kritična temperatura ohlajevanja ali segrevanja telesa oziroma, čas v katerem dosežemo vnaprej izbrano srednjo temperaturo telesa, c_a [kJ/kg.°C] specifična toplota zraka (0,966 kJ/kg.°C), γ_a [kg/m^3] gostota zraka (1,2 kg/m^3), t [h] čas trajanja eksperimenta in obenem čas tolerance.

Enačba (7.27) velja za cono ugodja v primeru, ko zanemarimo izgube toplote v procesu dihanja in izgube zaradi izhlapevanja znoja. Če vstavimo v enačbo (7.26) izraze za posamezne toplote, enačbe od (7.27) do (7.30) in enačbo (7.26) rešimo po času t, dobimo splošno rešitev za izračun časa tolerance, enačba (7.317.31).

$$t = \frac{\Delta Q_b}{\left[\frac{T_{src} - T_{en}}{R_{s1}} - \frac{T_{sk} - T_{en}}{R_{s2} - \Delta R_{ti}} \right] S - c_w \varphi \left[a_0 + a_1 \frac{T_{sk} + T_{en}}{2} + a_2 v \right] S - (T_k - T_{en}) V_a (c_w \varphi G_{aw} + c_a \gamma_a)} \tag{7.31}$$

Spremenljivke enačbe (7.31) so že obrazloženi pri enačbah od (7.27) do (7.30).

V enačbi (7.27) se toplota Q_1 nanaša na del proizvedene toplote v telesu, ki ne zajema toplote, ki se porabi za delo mišic in notranjih organov. Toplota Q_2, enačba (7.28),

se nanaša na del toplote, ki jo oseba izžareva skozi površino kože in potem skozi površino oblačila neposredno v okolje v kateremkoli stanju organizma, kar pomeni tudi v območju ugodja, ali v procesu pregrevanja oziroma ohlajevanja organizma. Nekaj proizvedene toplote se porabi za izhlapevanje znoja, Q_3, enačba (7.29), nekaj pa v procesu dihanja, Q_4, enačba (7.30). V procesu ohlajevanja organizma se relativno malo toplote porabi za izhlapevanje znoja, ker se v tem stanju organizma pač izloča in izhlapeva zanemarljiva količina znoja. V procesu pregrevanja organizma, pa je izguba toplote zaradi izhlapevanja znoja bistvenega pomena za preprečevanje pregrevanja organizma in omogoča daljše delovanje v pogojih, ki pripeljejo do pregrevanja organizma. Zaradi tega bomo te izgube upoštevali v procesu pregrevanja.

Toplota Q_4, ki jo oseba oddaja med dihanjem pa je odvisna od razlike temperature med jedrom telesa in okoljem, relativne vlage v okolju, vrste in intenzitete aktivnosti osebe oziroma števila vdihov in izdihov v enoti časa in količine vdihnjenega zraka. Te izgube skrajšujejo čas kritičnega stanja med časom ohlajevanja. V času pregrevanja organizma pa podaljšujejo čas doseganja kritičnega stanja. Izgube toplote Q_3 bomo upoštevali le v procesu pregrevanja organizma opazovane osebe.

Proizvedeno toploto Q_1 lahko izmerimo oziroma vzamemo podatke iz literature. V kontaminiranem (strupenem) okolju, opravlja oseba različna dela z različno intenziteto in pri tem proizvaja različne količine toplote v določenih časovnih presledkih. Vendar lahko uporabimo določeno srednjo vrednost, ki je najbolj verjetna glede na vrsto in intenziteto dela, ki ga opravlja opazovana oseba. V kontaminiranem okolju ne moremo neposredno meriti količine izžarjene toplote skozi površino kože, če nismo opremljeni s posebno laboratorijsko opremo. Seveda lahko simuliramo podobne pogoje, kot jih bo imela oseba v kontaminiranem okolju.

Vsota izgub toplote, $Q_2 + Q_3 + Q_4$, je lahko enaka količini proizvedene toplote (cona ugodja), večja (ohlajevanje organizma) ali pa manjša od količine proizvedene toplote (pregrevanje organizma). V coni ugodja bomo v prvi aproksimativnosti zanemarili Q_3 in eventualno tudi Q_4 in bomo predpostavili, da je termoizolacijska vrednost zaščitnega oblačila, ki ga ima oseba na sebi, enaka potrebni termoizolacijski vrednosti, da se drži cona ugodja v brezvetrju v suhem oblačilu.

V coni pregrevanja organizma ima toplota Q_3 pomembno vlogo. V tej coni ima pozitivno vlogo zmanjšanje termoizolacije plašča telesa in oblačila ter povečanja hitrost vetra. Pozitivno vlogo ima tudi toplota Q_4, vendar bi jo lahko zanemarili. V coni ohlajevanja pa ima pozitivno vlogo le povečanje termoizolacijske vrednosti plašča telesa. Zrak, ki ga vdihavamo, se zasiti z vodno paro in se segreje ali ohladi na temperaturo jedra telesa T_k, odvisno od temperature zraka, ki ga vdihavamo.

7.3.3 Razprava o teoretičnih osnovah

Enačba (7.31) je splošna rešitev v diferenčni obliki za izračun časa (časa tolerance), v katerem lahko oseba brez škodljivih posledic opravlja določeno delo v posebnih pogojih, v katerih lahko pride do podhladitve, organizma ali njegovega pregrevanja. ΔQ_b, enačba (7.25), je količina toplote, ki jo smemo dodatno izčrpati iz organizma, da se ta ohladi na kritično srednjo vrednost, na primer 30 °C, ali da se v organizmu ne nakopiči več dodatne toplote, kot je potrebno, da se srednja temperatura telesa dvigne na kritično vrednost, na primer 39 °C, glej enačbo (3.1) na strani 39. Predpostavimo, da zaščitno oblačilo dobro tesni na odprtinah (konec rokavov, pas, oba konca hlač, pas in ovratnik ipd.), drugače pa je zaščitno oblačilo prepustno za zrak in vodno paro. Strupene pline, če smo v kontaminirani (strupeni) coni, pa absorbira aktivno oglje v filtru maske in

posebna aktivna plast (aktivirana grafitirana tkanina ipd.). Vse odprtine na oblačilu so hermetično zaprte. Zaradi tega je vrednost koeficienta $b = 1$. Če odprtine na oblačilu ne tesnijo, potem je $b > 1$. Problematično je ugotavljanje hitrosti izhlapevanja znoja. V prvi aproksimaciji smo predpostavili, da v coni ugodja in pri ohlajevanja telesa lahko zanemarimo znojenje in izhlapevanje znoja. V coni segrevanja (kopičenje toplote v telesu) je znojenje intenzivno in se oblačilo prepoji z znojem. Zunanja površina oblačila je mokra.

7.3.3.1 Potek eksperimenta

Hitrost izhlapevanja v mirnem ozračju smo merili v standardni atmosferi (20 °C in 65 % RH). Hitrost izhlapevanja v odvisnosti od temperature in hitrosti vetra smo merili tako, da smo postopno povečevali vrednosti temperature od 20 °C do 45 °C in hitrost vetra od 0 m/s do 5 m/s. Izbrali smo določene kote pihanja vetra na normalo površine oblačila. Pri merjenju smo simulirali oblačilo, prepojeno znojem in oblačilo, ki je na ovlaženi površini kože. Voda (znoj) hitreje izhlapeva s površine bombažne tkanine kot s površine volnene tkanine. Če je zunanja tkanina oblačila popolnoma premočena, ne prepušča zrak skozi pore v tkanini in zaradi tega ni dodatne površine (notranja površina por) za izhlapevanje znoja. Hitrosti izhlapevanja znoja ni možno enoznačno ugotoviti za vsa stanja in sestavo oblačila in ga je nujno eksperimentalno ugotoviti za vsak komplet oblačila posebej.

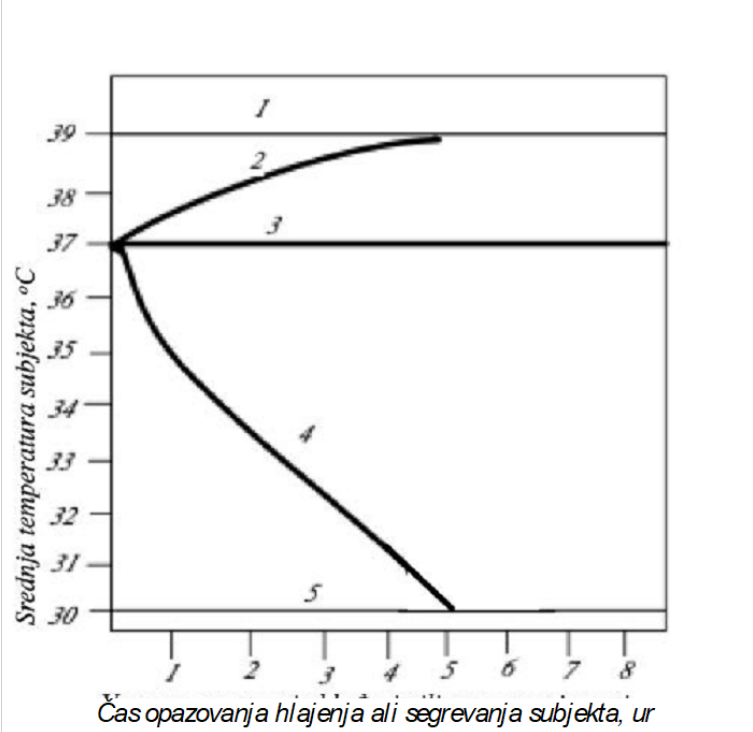
Na sliki 7.3, ki prikazuje proces segrevanja in ohlajevanja organizma uporabnika oblačila. Prikazana je tudi vodoravna premica 3, ki se nanaša na cono ugodja. Zgornja meja segrevanja je 39 °C. Če se ta meja prekorači, nastanejo trajne poškodbe, ali celo nastopi smrt uporabnika oblačila. Najnižja meja temperature telesa v procesu hlajenja, pa je 30 °C. Čas, ki ga rabimo, da dosežemo te vrednosti je odvisen od številnih parametrov, ki so zajeti v enačbi (7.31). Premica 3 je posebno poudarjena, ker se nahaja v coni ugodja. Ko števec in imenovalec dosežeta ničelno vrednost in se potem ne spreminjajo vrednosti parametrov, ostaja uporabnik v coni ugodja toliko časa, dokler se ne spremeni vrednost enega ali več parametrov, ki so zajeti v enačbi (7.31).

Parametre, ki so potrebni za izračun časa tolerance z enačbo (7.31), lahko izmerimo s pomočjo nekaj osnovnih laboratorijskih aparatov, kot so: aparat za ugotavljanje koeficienta toplotne prevodnosti, porozimeter (merilo hitrosti vetra), merilo debeline oblačila, precizna tehtnica ipd. Za vse meritve so potrebni dva do tri dneva. V enačbi (7.31) so praktično zajeti vsi parametri, ki pomembno vplivajo na toplotno ravnovesje v organizmu človeka. Eni imajo pomembno vlogo pri ohlajevanju organizma, drugi pri pregrevanju le-tega; tretji so pomembni tako v procesu ohlajevanja kot v procesu pregrevanja organizma. Pa tudi nekateri parametri imajo dvojno vlogo. V procesu pregrevanja organizma ima znojenje in močenje oblačila pozitivno vlogo – ohlajajo organizem. Pri tem se predpostavlja, da vsaj del izločenega znoja izhlapi. Hitrost vetra pospešuje izhlapevanje znoja in s tem tudi ohlajevanje pregretega organizma človeka. Če pa je organizem v stanju ohlajevanja, imata povečevanje znojenje in povečevanje hitrost vetra negativen vpliv – pospešujeta hitrost ohlajevanja telesa subjekta.

7.3.4 Primer uporabnosti enačbe (7.31) za izračun časa tolerance

7.3.4.1 Definiranje kompleta oblačila

V vsakdanjih pogojih življenja lahko spreminjamo komplet po potrebi. Če je njegova termoizolacija prevelika za dane pogoje uporabe (pregrevanje organizma), določene dele odložimo, s čimer zmanjšamo skupno vrednost toplotne izolacije oblačila in lahko ohra-



Slika 7.3: Ilustracija skupnega prikaza zagrevanja in hlajenja organizma ter stanja ugodja. Legenda: 1 – premica, ki loči področje segrevanja telesa od področja v katerem bi bilo telo pregreto in bi lahko nastopila smrt; 2 – krivulja, ki kaže postopno povečanje temperature telesa nad temperaturo ugodja, v odvisnosti od časa opazovanja; 3 – premica na temperaturi ugodja; 4 – krivulja, ki kaže krivuljo ohlajevanja telesa v odvisnosti od časa opazovanja; 5 – premica, ki loči področje ohlajevanja telesa od področja v katerem bi bilo telo nevarno ohlajeno in bi lahko nastopila smrt.

nimo organizem na temperaturi ugodja (ravnovesje med izgubami toplote in proizvodnjo toplote v območju ugodja). Če je termoizolacijska vrednost kompleta oblačila v danih pogojih premajhna – izguba toplote je večja od proizvodnje le te (hlajenje organizma), dodamo kakšno plast kompleta. Če te možnosti nimamo, se pred podhladitvijo branimo s povečanjem proizvodnje toplote (povečana intenziteta aktivnosti). Ta obramba pred podhladitvijo ima svoje meje. Organizem se utrudi, volja do življenja slabi in je v časih zaradi podhladitve organizma končni rezultat smrt.

V življenju se lahko zgodi, da v danih pogojih ne moremo spreminjati sestave kompleta. To velja zlasti za gasilce, potapljače, reševalce v primeru nesreč v kemičnih tovarnah in ko imamo opravka s strupenimi snovmi (tekočinami in predvsem s plini) v vojnem času, ko gredo reševalci zavestno v kontaminirano področje ipd.

Za ilustracijo takih problemov bomo obravnavali komplet zaščitnega oblačila, ki je primeren za uporabo v strupeni atmosferi. Sem sodijo uporaba plinske maske, neprepustnih obuval (gumijastih škornjev ipd.), zaščitnih rokavic in dr. Šivi oblačil morajo biti izdelani tako, da strupeni plini nimajo neposredne možnosti stika s površino kože. Enako velja tudi za vse odprtine na oblačilu. Ugodno je tudi, da je tako oblačilo hidrofobno ali celo oleofobno, če atmosfera vsebuje razpršene tekoče delce strupenih snovi. To je še zlasti pomembno pri obrambi pred tako imenovanimi bojnimi strupi, ki jih v tekočem ali plinastem stanju absorbira površina kože in delujejo paralizno na živčni sistem. Enako velja tudi za številne druge izdelke kemične industrije. Saj lahko zelo po-

gosto beremo o ladjah, ki jih nihče noče sprejeti v svoja pristanišča, ker so natovorjene z izredno strupenimi odpadki.

Naš namen ni študij potrebnih lastnosti zaščitnih oblačil, marveč ugotavljanje možnosti izračuna časa tolerance, v katerem uporabnik določenega oblačila lahko opravlja določene aktivnosti pod določenimi pogoji, ne da bi pri tem dobil resnejše telesne in morebitne duševne okvare.

7.3.4.2 Komplet oblačila in njegove lastnosti

Pri preiskavi zaščitne vrednosti oblačila moramo upoštevati dejstvo, da vsi deli telesa ne izžarevajo enako količino toplote. Temu dejstvu prilagajamo konstrukcijo oblačila tako, da so okončine, vrat in glava enako toplotno izolirane kot trup v smislu hitrosti hlajenja in pregrevanja. Sicer pa je obravnava glave, vratu in okončin, posebno še pesti oziroma dlani in stopal na rokah in nogah, izredno zahtevna.

Zaščitno oblačilo sestoji iz prekrivne tkanine, grafitirane tkanine (oksidirana in aktivirana tkanina, ki je izdelana iz PAN multifilamentne preje, ki absorbira strupene pline, oziroma tekočine, in podloge, preglednica 7.3.

Za realno analizo sistema je zelo pomembna poroznost kompleta. To velja tako za dve ekstremni stanji (pregrevanje in ohlajevanje) kakor tudi za stanje ugodja. S poroznostjo je v precejšnji meri povezan upor prevajanju pare skozi oblačilo, kar je pomembno v pogojih pregrevanja organizma. V pogojih ohlajevanja organizma, posebno če piha veter, prevelika poroznost pospešuje hitrost ohlajevanja organizma. Tudi ni zanemarljiva velikost por. Pri enaki volumenski hitrosti pretoka pod enakim tlakom je lahko odprta površina za pretok sestavljena iz velikega števila por, ki imajo majhen povprečni hidravlični premer ali pa iz manjšega števila por, ki imajo relativno velik povprečni hidravlični premer por. Take možnosti pa ne smemo zanemariti. Skozi pore, ki imajo velik hidravlični premer, lažje prodirajo strupeni plini in strupene tekočine. Lahko se zgodi, da skozi poro spolzi drobna kaplja strupene snovi. Parametre poroznosti, preglednica 7.4, lahko ugotovimo s pomočjo Jakšićeve metode za ugotavljanje števila, velikosti in porazdelitve por v ploskih tekstilijah, glej poglavje 8.

Preglednica 7.3: Vrednosti koeficientov toplotne prevodnosti in vsebine vlage v posameznih plasteh oblačila v standardni atmosferi ter debelina posameznih plasti

Plast oblačila	Debeline [mm]	Toplotna prevodnost λ [kJ/m.h.°C]	Vsebina vlage [%]
Prekrivna tkanina	0,35	0,1234	5,1
Grafitirana tkanina	0,87	0,1	1,0
Podloga	0,41	0,7751	6,1

Koeficient A in b v preglednici 7.4, sta definirana z regresijsko enačbo (7.11), r je koeficient korelacije, D_{max} je maksimalni hidravlični premer por in D_s je povprečni hidravlični premer por.

7.3.4.3 Uporabnik oblačila

Oblačilo je lahko namenjeno otrokom, odraslim ženskim ali odraslim moškim. Slednji (odrasli) se lahko razlikujejo ne samo po spolu, temveč tudi po višini, teži, površini kože, intenzivnosti presnove, občutljivosti na temperaturo ipd. Jasno je, da ne moremo obravnavati širše palete razlik med uporabniki. Zato bomo vpeljali pojem povprečnega

Preglednica 7.4: Vrednosti nekaterih pomembnejših parametrov poroznosti posameznih plasti oblačila

	Parametri enačbe (7.11)			Parametri poroznosti	
Plast oblačila	A	b	r	D_{max} [μm]	D_s [μm]
Prekrivna tkanina	12,91	0,768	0,999	97	21,6
Grafitirana tkanina	19,88	0,683	0,998	267	85,4
Podloga	17,59	0,779	0,993	141	29,1

uporabnika. Ta ima maso 70 kg in površino kože 1,8 m^2 ter proizvaja naslednje količine toplote, odvisno, kako težko delo opravlja: lahko delo 417 kJ/m^2.h, zmerno težko delo 697 kJ/m^2.h, težko delo 1.047 kJ/m^2.h in zelo težko delo 1.397 kJ/m^2.h. Hoja 3 km/h z 420 kJ/m^2.h je primerljiva z lahkim delom 417 kJ/m^2.h.

7.3.4.4 Stanje organizma uporabnika

Organizem uporabnika je v kateremkoli stanju med dvema ekstremoma povprečnih temperatur telesa, 30 °C oziroma 39 °C. Povprečne telesne temperature ni lahko izračunati, saj moramo upoštevati dejstvo, da je na primer temperatura ugodja na površini čela ali prsi okrog 33 °C, medtem ko je temperatura ugodja na konicah prstov nog le okrog 24 °C. Razlika je okrog 11 °C. Temperatura jedra telesa, ki zajema večji del mase telesa, je 37 °C.

Glede stalnosti temperature lahko človekovo telo ločimo na dva dela. Zunanja plast je plašč telesa (koža in podkožno tkivo), katerega temperatura ni stalna. Znotraj za plaščem je jedro telesa, ki ima stalno temperaturo. Seveda se tudi temperatura notranjosti telesa spreminja v izjemnih pogojih – je večja ali manjša kot 37 °C. Temperaturni gradient plašča je približno 3 °C/cm. To pomeni, da se temperatura telesa povečuje, ko gremo od površine telesa proti njegovi notranjosti za 3 °C na globini l cm. To ne velja za vse dele telesa, je le povprečna vrednost za telo v celoti. Ker je temperatura ugodja na prsih okrog 33 °C, bo debelina plašča, če upoštevamo temperaturni gradient, okrog 1,3 cm. Srednjo temperaturo telesa lahko izračunamo s pomočjo enačbe (3.5) na strani 49.

Glede prevajanja toplote se plašč telesa dobro prilagaja spremembi stanja telesa. Saj se vrednosti njegovega koeficienta toplotne prevodnosti gibljejo v mejah od 3,023 kJ/m.h.°C (pregret organizem) do 0,3790 kJ/m.h.°C (podhlajen organizem). To pomeni, da se njegova termoizolacijska vrednost spremeni za okrog osemkrat. Če upoštevamo debelino plašča in vrednosti koeficienta toplotne prevodnosti, lahko z enačbo (6.1) na strani 6.1 izračunamo mejne vrednosti termoizolacije plašča telesa, ki so 0,0471 m^2.h.°C/kJ (organizem v coni ugodja) do 0,0729 m^2.h.°C/kJ (podhlajen organizem).

Kaj praktično pomenijo omenjene vrednosti? V stanju pregretosti organizma plašč telesa prevaja toploto bolj kot voda, kar je bistvenega pomena za hiter prehod toplote iz notranjosti telesa na njegovo površino in naprej v okolje. V procesu prenosa toplote skozi plašč telesa je takšno stanje posledica razširitve ožilja (kapilar) in pospešenega kroženja krvi s površine telesa proti notranjosti (ohlajena venozna kri) in iz notranjosti proti površini telesa (vroča arterijska kri).

Če je organizem podhlajen, se ožilje skrči, kroženje krvi se izredno upočasni, s čimer se tudi zelo poveča termoizolacijska vrednost plašča telesa. Ta je približno na ravni termoizolacije plutovine enake debeline. Zaradi povečanja termoizolacijske vrednosti

plašča telesa in znižanja temperature na površini kože telesa v pogojih hlajenja organizma se upočasni izguba toplote, s tem pa se povečajo možnosti za preživetje tudi v pogojih, ko bi sicer hitro prišlo do znižanja telesne temperature, če bi plašč telesa imel enako termoizolacijsko vrednost kot v primeru pregretega organizma. Zgornja kritična temperatura v jedru telesa znaša okrog 39 °C, kritični utrip pa 180 utripov/min. Pri teh vrednostih pride lahko do toplotnega šoka. V teh pogojih se temperatura v notranjosti jedra telesa in plašča telesa izenačita. Nižja temperature je neposredno na površini kože, s katere izhlapeva znoj. V primeru podhladitve (brez upoštevanja stanja ušes, nosu in okončin ali njihovih delov – pesti in stopala, ki so lahko nepopravljivo poškodovani) se človek počuti zaspan, če se temperatura jedra telesa zniža pod 30 °C ali celo do 27 °C. Temperatura jedra telesa lahko pade pod 27 °C, se upočasni dihanje in srčni utrip. V takšnem stanju lahko zaradi podhladitve nastopi smrt.

Sodijo, da se v organizmu ne bi smelo nakopičiti toplote za več kot 8,7 kJ/kg mase telesa. Omenjena količina toplote zviša telesno temperaturo na kritičnih 39°C. Praktično pomemben je čas tolerance ali čas, ki je potreben, da v danih pogojih organizem pride v kritično območje (ohlajevanje ali pregrevanje organizma). V tem časovnem obdobju prehoda iz območja ugodja v območje kritičnega stanja organizma je možna bolj ali manj normalna dejavnost človeka.

Hitrost segrevanja ali ohlajevanja organizma je odvisna tudi od vrednosti povprečne specifične toplote organizma. Ta znaša približno 3,5 kJ/kg.°C. Sedaj so nam na razpolago vsi parametri, ki so potrebni za izračun neravnovesja med proizvodnjo in izžarevanjem toplote. To lahko izračunamo z enačbo (7.25). Iz te enačbe je razvidno, da ima ΔQ_b v procesu hlajenja negativno vrednost $T_{av_1} > T_{av_2}$ (telo oddaja toploto v okolje) in pozitivno vrednost v procesu segrevanja, $T_{av_1} < T_{av_2}$ (v telesu se akumulira energija predvsem iz lastne proizvodnje, lahko pa tudi delno na račun zunanjih obremenitev – gašenje požarov). Če pa je doseženo ravnovesje na ravni temperature ugodja, $T_{av_1} = T_{av_2}$ in $\Delta Q_b = 0$, ni neravnovesja pri izmenjavi energije (toplote).

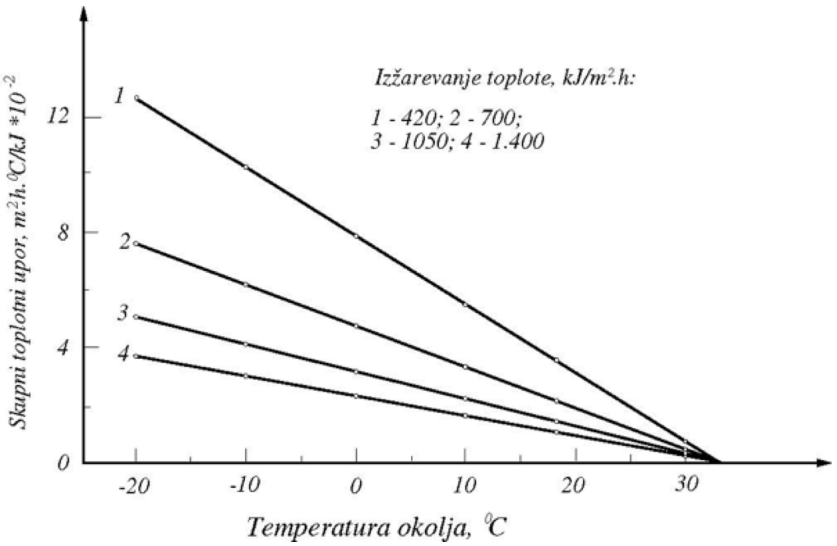
7.3.4.5 Okolje

Stanje okolja in uporabnika sta tista dejavnika, ki narekujeta vrsto in količino oblečenega oblačila zaradi ohranjanja organizma v območju ugodja in zaščite pred zastrupitvijo, ognjem ipd.

V mirnem in suhem ozračju (relativna vlaga 65 %) je količina oblačila odvisna od temperature okolja in količine toplote, ki jo uporabnik oblačila izžareva skozi površino kože. Na sliki 7.4 je ilustriran primer pri temperaturnem intervalu od -20 °C do +33 °C in količini izžarevanja toplote od 420 kJ/m^2.h do 1.400 kJ/m^2.h.

Kadar uporabnik oblačila opravlja težko delo, potrebuje najmanjšo količino oblačil. Vse štiri krivulje (premice) se stikajo na abscisi pri 33 °C. To je temperatura ugodja na površini kože. Temperatura sama po sebi vpliva na spremembo vrednosti koeficienta toplotne prevodnosti oblačila. Ta raste s povečanjem temperature. Vendar so spremembe majhne, zato je trend spremembe glede na posledice spremembe temperature pozitiven (zaželen).

Vlaga (voda) zelo vpliva na spremembo vrednosti koeficienta toplotne prevodnosti. Naše raziskave kažejo, da se v območju od 0 do 100 % vode v tkaninah spreminja (raste) vrednost koeficienta toplotne prevodnosti v povprečju 4 % za vsak povečan odstotek deleža vode v tkanini. Vpliv temperature in vlage smo upoštevali pri vrednosti λ v enačbi (7.23) na strani 133; vendar je upoštevanje vsebnosti vode v procesu pregrevanja izredno težavno, ker na hitrost izhlapevanja vpliva fiziološki koeficient nasičenja zraka,



Slika 7.4: Odvisnost R_s od temperature in proizvedene toplote. Legenda: Krivulja 1 kaže stanje, ko uporabnik opravlja lahko delo (420 kJ/m^2.h), krivulja 2 kaže zmerno težko delo (720 kJ/m^2.h), krivulja 3 težko delo (1.050 kJ/m^2.h) in krivulja 4 zelo težko delo, pri katerem uporabnik izžareva skozi površino kože 1.400 kJ/m^2.h.

sam komplet glede na surovinsko sestavo, poroznost oblačila in hitrost vetra.

Če zaščitno oblačilo nima odprtin za pretok plinov, potem je v enačbi (7.23) $b = 1$, pri tem upoštevamo še vrednosti parametrov iz preglednic 7.3 in 7.4, da lahko izračunamo R_s za komplet zaščitnega oblačila.

Na sliki 7.4 je prikazana sprememba R_s v odvisnosti od temperature okolja i proizvedene toplote iz telesa subjekta. Vrednosti, ki so izračunane za hitrost vetra 1 m/s, veljajo kot vrednost v mirnem vremenu. Parametra A in b v preglednici 7.4 se nanašata na prostorninsko hitrost pretoka zraka, izraženega v cm^3/cm^2.s in tlaka v cm vodnega stolpca, enačba (7.24).

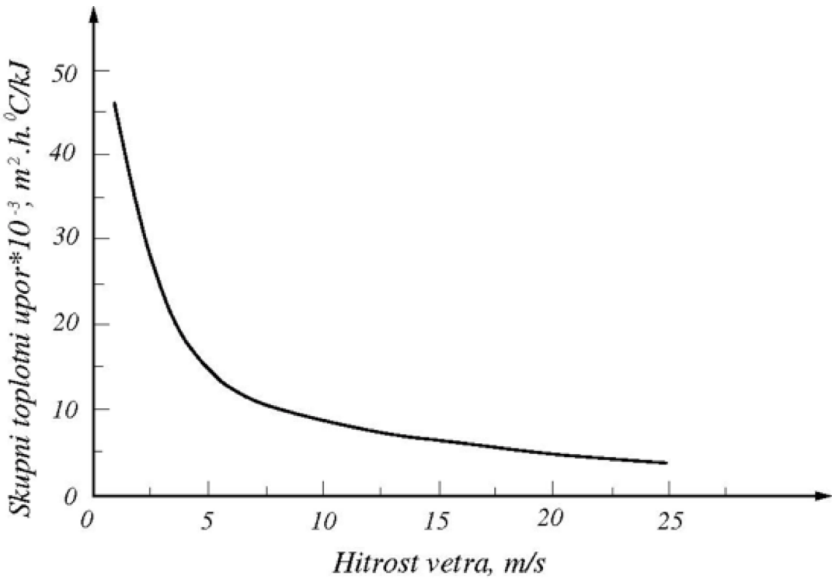
Kot je razvidno iz preglednice 7.4, je eksponent b večji kot 0,5. Kot smo že prej omenili, za b dejansko velja naslednja omejitev: $0,5 \leq b \leq 1$. Čim gostejša je tkanina, tem večja je vrednost eksponenta b.

Prostorninsko (volumensko) hitrost dobimo, če linearno hitrost pretoka zraka pomnožimo z odprto površino v tkanini, ki jo tvorijo pore med nitmi osnove in votka, oziroma volumenski pretok zraka izračunamo s pomočjo enačbe (7.21).

Poroznost oblačila je zelo velika, kar ugodno vpliva na hlajenje – izhlapevanje znoja, vendar ima pri nižjih temperaturah in pri vetrovnem vremenu negativne učinke. Pa ne samo na termoizolacijo oblačila, temveč tudi na filtracijo (tudi pri višjih temperaturah). Strupene hlape nese veter skozi oblačilo. S tem se obremenjuje filtracijska plast, ki se hitreje zasiti kot takrat, kadar ni vetra. To lahko sklepamo iz količine zraka, ki gre skozi oblačilo pri določeni hitrosti vetra. Podoben učinek ima znoj, kjer absorpcijska plast, premočena z znojem, nima več takšne sposobnosti absorpcije kot v suhem stanju. Na sliki 7.5 je prikazana sprememba R_s v odvisnosti od hitrosti vetra. Drastično je zmanjšanje vrednosti toplotnega upora.

7.3.4.6 Ohlajevanje organizma

Povprečna temperatura organizma se lahko zniža do 30 °C in več. Pri tem je temperatura na površini kože precej nižja – vsaj 28 °C ali še manj na prsih. Kot je razvidno iz



Slika 7.5: Odvisnost R_s kompleta zaščitnega oblačila od hitrosti vetra.

preglednice 3.6, je v takšnem stanju organizma subjektivni občutek boleč – zelo mrzel. Če se organizem ohlaja še naprej, bolečine postopno prenehajo, telo otrpne, zmanjša se število srčnih utripov na enoto časa, človek postaja zaspan in, če se organizem še naprej ohlaja, nastopi smrt. Znižanje temperature jedra telesa pod 30 °C pa pomeni izredno nevarnost. Zaradi tega bomo to temperaturo upoštevali kot spodnjo povprečno mejno temperaturo organizma, pri kateri so še možne določene aktivnosti subjekta. Oziroma bomo upoštevali srednjo spodnjo temperaturo telesa okrog 29 °C pri temperaturi na prsih 28 °C.

Plašč telesa ima najvišjo termoizolacijsko vrednost, ko praktično preneha krožiti kri v njem. To je stanje, ki pomeni tudi odmiranje tkiva, če traja dovolj dolgo. Sicer pa se zmanjša gibljivost prstov rok, če pade na konici prstov temperatura pod 15 °C.

Realno lahko domnevamo, da se v procesu hlajenja povečuje temperaturni gradient plašča telesa. Prej omenjene vrednosti koeficientov a in b v enačbi (3.5) veljajo za golo telo, obdano z zrakom. Če pa golo osebo potopimo v vodo, se vrednosti obeh koeficientov spreminjata. Povprečna debelina plašča se poveča. Izmerjeni in izračunani vrednosti pa sta $a = 0{,}35$ in $b = 0{,}65$. To pa zaradi tega, ker se v vodi organizem hitreje ohlaja in se meja stabilne temperature pomakne bolj v notranjost telesa. Če upoštevamo omenjene vrednosti koeficientov, bi bila pri povprečni temperaturi telesa 29,3 °C, povprečna temperatura plašča telesa 28 °C, temperatura v jedru telesa pa 30 °C. Ker pa nam ni znana navidezna debelina plašča telesa in tudi njegov temperaturni gradient, ne moremo računati s povprečno temperaturo telesa, ampak s temperaturo jedra telesa, ki jo lahko izmerimo v rektumu (odprtina za odvajanja odpadkov iz telesa). Ne glede na to, kje je meja med plaščem in jedrom telesa v pogojih ohladitve organizma, smemo trditi, da je razlika temperatur na površini kože in v notranjosti večja kot v območju ugodja. Pri tem bomo izvzeli glavo, vrat in okončine. Opazujemo le trup (torzo). Če je bilo v območju ugodja ta razlika 4 °C, bo v podhlajenem stanju, ne glede na znižano temperaturo jedra telesa, nekoliko višja. To pa predvsem zaradi povečane termoizolacijske vrednosti plašča enake debeline. Če je temperatura jedra telesa 30 °C, je na površini prsi verjetno nižja kot 27 °C. To je že območje, v katerem počasi nastopa otrplost – bolečine prenehajo zaradi znižane temperature. Če temperatura v jedru telesa pade pod 30 °C in se nadalje znižuje vse do 27 °C, nastopi občutek zaspanosti, zmanjša se število utripov srca, kar

so vse to že prvi znaki bližajoče se smrti zaradi podhladitve. V tem stanju se začne zmanjševati tudi razlika med temperaturo na površini kože in temperaturo jedra telesa, ki je najmanjša tik pred koncem življenja.

V procesu ohlajevanja proizvede telo določeno količino toplote Q_1 in odda v okolje toploto Q_2, Q_3 in Q_4 Pri tem je vsota $Q_2 + Q_3 + Q_4 > Q_1$. Dejanski primanjkljaj energije ΔQ_b lahko izračunamo z enačbo (7.26). V procesu ohlajevanja organizma, lahko zanemarimo Q_3, ker je količina toplote, ki se porabi za izhlapevanje znoja zanemarljiva v primerjavi s toploto Q_2, ki se izžareva skozi površino kože in skozi oblačilo v okolje.

Toplota Q_4 pa ne moremo zanemariti, vsaj pri nizkih temperaturah. Kot je razvidno iz enačbe (7.30) je ta sorazmerna z vsakokratno razliko temperature v jedru telesa in temperaturo okolja. V coni ugodja je temperatura jedra telesa 37 °C. Ta se lahko zniža do 30 °C in celo več v primeru podhladitve. Pri tem ni nujno, da je temperatura okolja pod 0 °C. Količina izdihanega zraka, ki ima enako temperaturo kot jedro telesa, je odvisna od števila izdihov in količine zraka pri enem izdihu. Število vdihov in izdihov pa je odvisno od vrste in intenzitete aktivnosti osebe. Zrak, ki ga izdihavamo je nasičen z vodno paro. Če izdihamo 15 litrov zraka v minuti ali 900 litrov na uro in je razlika med temperaturo jedra telesa in temperaturo okolja 40 °C, specifična toplota zraka 0,966 kJ/kg. °C in specifična teža zraka 1,2 kg/m^3, bomo porabili za zagrevanje zraka okrog 42 kJ/h. Človek v večini primerov v eni uri izdihne 10 do 14 gramov vode, kar pomeni, da toliko vode tudi izhlapi. To bi pomenilo izgubo toplote 24 kJ/h do 34 kJ/h. Dejansko moramo nekoliko modificirati realen izračun izgub toplote zaradi segrevanja vdihnjenega zraka. Računamo le razliko, ki jo dobimo, če telo ohladimo v mirnem vremenu na nižjo temperaturo, kot je temperatura ugodja.

Lahko vzamemo povprečno vrednost toplotnega upora plašča telesa v coni ugodja 0,0471 m^2.h.°C/kJ. Toplotni upor plašča telesa med spanjem, ko telo miruje in je presnova na osnovni ravni (bazalni metabolizem), doseže vrednost okrog 0,0729 m^2.h.°C/kJ. To vrednost bomo vzeli kot spodnjo možno vrednost, ko temperatura jedra telesa pade na 30 °C. V tem primeru je ΔR_{ti} = 0,0258 m^2.h.°C/kJ. Če predpostavimo, da je delež plašča telesa 0,35 kot v primeru, ko je telo potopljeno v vodo in je povprečna temperatura na površini kože 28 °C, bo srednja temperatura telesa 29,3 °C.

Čas tolerance bomo računali v intervalu zunanjih temperatur od -20 °C do +20 °C. Ta temperaturni interval bomo razdelili na pod-intervale po 5 °C. Bomo predpostavili, da je cona ugodja pri zunanji temperaturi 15 °C, oziroma to vrednost daje naš komplet za cono ugodja, v primeru, če je izžarevanje toplote 600 kJ/m^2.h. Pri izračunu toplotnega upora bomo upoštevali hitrosti vetra 0 m/s, 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s in 20 m/s.

Za ilustracijo problema ugotavljanja časa tolerance, bomo operirali s 45 rezultatov časa tolerance, ker bomo vzeli 9 različnih temperatur okolja in 5 hitrosti vetra vključno s stanjem, ko ni vetra. Pri vsakem tem stanju moramo ugotoviti, ali je toplotni upor našega kompleta premajhen (ohlajevanje), optimalen (cona ugodja) ali pa je prevelik (pregrevanje organizma). Primerno temu bomo uporabljali enačbo (7.31). V primeru ohlajevanja organizma bomo uporabili ΔR_{ti}. Praviloma bomo upoštevali izgube toplote v procesu dihanja Q_4. Vendar smo prej ocenili, da bomo naredili manjšo napako kot 2 %, če te izgube v obravnavanem primeru ne upoštevamo. Saj so najnižje temperature -20 °C.

V procesu pregrevanja organizma pa bomo upoštevali Q_3, ki se nanaša na izgubo toplote zaradi izhlapevanja znoja. Tukaj pa se pojavi določen problem. Lahko sicer izračunamo potrebno količino znoja, ki mora izhlapeti, da dosežemo ravnovesje med proizvodnjo in oddajo toplote v okolje. Lahko tudi ugotovimo pogoje, pri katerih bo ta količina znoja zares izhlapela. V tem primeru bi bil čas tolerance neskončen. Dejansko

pa moramo upoštevati najbolj verjetno stanje okolja in organizma in pod temi pogoji izračunati maksimalno možno količino izhlapelega znoja, ki je v večini primerov manjša, kot je optimum. Kljub temu izredno podaljša čas tolerance, oziroma čas, v katerem dosežemo kritično stanje organizma (39 °C in 180 utripov srca/minuto).

Če je povprečna temperatura telesa 30 °C, povprečna temperatura ugodja 36,6 °C, specifična toplota 3,5 kJ/kg.°C in masa uporabnika oblačila 70 kg, izračunamo z enačbo (7.27), da je ΔQ_b = 1.789 kJ. To je maksimalna količina toplote, ki jo lahko izčrpamo iz telesa, da se ohladi s 36,6 °C na 29,3 °C in je le en parameter v enačbi (7.31) kjer se R_{s1} nanaša na skupni toplotni upor, ki je potreben, da oseba ostane v coni ugodja ne glede na dejanske pogoje. R_{s1} je enak realnemu toplotnemu uporu R_{s2} v coni ugodja.

Za izračun toplotnega upora R_{s2} uporabimo enačbe od (7.20) do (7.22). V preglednicah 7.3 in 7.4 so podane vrednosti parametrov kakovosti tkanin, ki so potrebni za izračun toplotnega upora zaščitnega oblačila. Toplotni upor R_c kompleta v brezvetrju je 0,012068 m^2.h.°C/kJ. Debelina kompleta je 0,00163 m in koeficient toplotne prevodnosti λ = 0,135068 kJ/m.h.°C. Toplotni upor plasti mirnega zraka R_a na površini oblačila je 0,017875 m^2.h.°C/kJ. Skupni toplotni upor kompleta R_{s2} = 0,029943 m^2.h.°C/kJ.

Naslednji korak je ugotavljanje temperature okolja v brezvetrju, ko komplet omogoča doseganje temperature ugodja, T_{skc} = 33 °C. Za ta namen uporabimo enačbo (7.32).

$$R_{s1} = \frac{T_{skc} - T_{en}}{Q_2} \tag{7.32}$$

Z enačbo (7.32) ugotovimo potrebni toplotni upor pri dani količini izžarjene toplote Q_2 in temperaturi okolja T_{en}, da telo ostane v coni ugodja. Če je toplotni upor R_{s1} večji od dejanskega R_{s2}, se bo ohlajevalo telo opazovane osebe. Če sta oba toplotna upora izenačena, je oseba v coni ugodja. Če pa je $R_{s1} < R_{s2}$, se bo kopičila toplota v telesu opazovane osebe in se ji bo zvišala tudi temperatura. Ker pa se povprečna temperatura telesa ne sme povečati nad kritično temperaturo 39 °C, morajo biti izpolnjeni pogoji, ki omogočajo pretok izhlapelega znoja v okolje. V tem primeru lahko z enačbo (7.33) ugotovimo količino znoja, ki mora izhlapeti v enoti časa, da se temperatura na površini prsi ne poveča nad, na primer, 35 °C. Pri tej temperaturi je skoraj vsa površina telesa prekrita z znojem.

$$R_{s2} = \frac{T_{sk*} - T_{en}}{Q_{2*}} \quad ; \quad Q_{2*} = Q_1 - Q_3 \quad ; \quad T_{en} = T_{sk*} - R_{s2} Q_{2*} \tag{7.33}$$

kjer so R_{s2} realni toplotni upor suhega oblačila, Q_{2*} del proizvedene toplote ki se izžari skozi površino oblačila v okolje, Q_1 proizvedena toplota, Q_3 del proizvedene toplote, ki se porabi za izhlapevanje znoja in T_{sk*} temperatura na površini prsi, pri kateri je skoraj celotna površina telesa prekrita z znojem; v opazovanem primeru je to temperatura 35 °C.

V našem primeru ima toplota Q_1 vrednost 600 kJ/m^2. Vsa ta toplota mora biti izžarjena skozi površino kože in površino oblačila v okolje. Če je vrednost toplotnega upora realnega oblačila v danih pogojih previsoka, se bo toplota kopičila v telesu opazovane osebe. V našem primeru ima Rs2 v brezvetrju vrednost 0,02994 m^2.h.°C/kJ. Če je na primer temperatura okolja T_{en} 30 °C, je T_{sk*} 35 °C. Vprašanje je, koliko toplote se bo izžarelo v okolje skozi oblačilo? Odgovor je 167 kJ/h, kar je vrednost Q_{2*}. Vsa preostala toplota se mora porabiti za izhlapevanje znoja, da se ne bi začela kopičiti v telesu, kar bi povzročilo dvig povprečne temperature telesa. Toplota Q_3, ki je na razpolago za izhlapevanje znoja, ima vrednost 433 kJ/h. Specifična toplota telesa je okrog 3,5 kJ/kg.°C. Toplota izhlapevanja vode je 2.260 kJ/kg. Voda vre pri 100 °C pri tlaku 101,324 kPa

(1 atmosfera). Vrenje je posledica izhajanja mehurjev vodne pare. To pomeni, da je energetsko stanje nekaterih molekul višje od drugih.

Če je povprečna temperatura telesa 37 °C, potrebujemo 4,4 kJ za segrevanje 1 grama vode (znoja) na 100 °C. Za izhlapevanje tega grama znoja potrebujemo 2,26 kJ. Skupaj potrebujemo 6,66 kJ toplote za izhlapevanje enega grama znoja. Da porabimo 433 kJ/h, mora izhlapeti 65 gramov znoja v eni uri. Če so pogoji za takšno hitrost izhlapevanja izpolnjeni, bo ostala nespremenjena temperatura na površini prsi. Ker je pod temi pogoji hitrost izločanja znoja precej večja, glej poglavje 4, ne bo primanjkovalo znoja za izhlapevanje. Zunanja površina oblačila je okrog 2 m^2. To pomeni, da morajo biti izpolnjeni pogoji za izhlapevanje 33 gramov znoja na m^2 v eni uri. Na sliki 4.11 je prikazana hitrost izločanja in izhlapevanja znoja pri petih osebah pri relativni vlagi od 71 % do 87 %. Kljub visoki relativni vlagi je hitrost izhlapevanja od 20 g/h do 248 g/h. Iz tega lahko sklepamo, da v večini primerov hitrost izhlapevanja 33 g/h ne bo nedosegljivo, posebno, če še upoštevamo, da je oblačilo vsaj delno omočeno z znojem. Realni pretok toplote skozi oblačilo bo verjetno večji kot 300 kJ/h. To pomeni, da v realnih razmerah (omočena vsaj spodnja plast oblačila) ne bo potrebe za večjo hitrost izhlapevanja znoja, kot okrog 20 g/h.

Naš komplet zaščitnega oblačila omogoča doseganje ravnovesja med toplotama Q_1 in Q_2 pri temperaturi okolja T_{en} = 15 °C. Pri temperaturi okolja 15 °C sta R_{s1} in R_{s2} izenačena – imata enako vrednost. Toda imamo še ΔR_{ti} in enačba (7.31) velja. Toplotni upor oblačila v določenih pogojih v procesu ohlajevanja računamo s pomočjo enačbe (7.20) s tem, da koeficient toplotne prevodnosti računamo s pomočjo enačbe (7.23). Ker upoštevamo le suho oblačilo, bo $\Delta G = 0$. Obenem ne bomo upoštevali vpliva spremembe temperature okolja na R_{s2}. V primeru ohlajevanja telesa moramo upoštevati spremembo toplotnega upora plašča telesa ΔR_{ti}. Ta toplotni upor prištejemo skupnemu toplotnemu uporu R_{s2}. Temperatura na površini kože T_{sk} je pri kritični temperaturi podhladitve 28 °C. V tem primeru je $\lambda_0 = \lambda$. Realni skupni toplotni upor oblačila R_{s2} računamo z enačbo (7.24). Koeficient toplotne prevodnosti λ kot tudi debelino oblačila izračunamo z enačbo (7.20).

Predpostavili bomo, da se vrednost koeficienta toplotne prevodnosti ne spreminja ne glede na spremembo temperature okolja in hitrosti vetra. Pri vsakokratni spremembi temperature okolja, temperatura na površini kože se ne spreminja, je 33 °C, debelino oblačila prilagodimo novem stanju, tako da R_{s1} (primerjalni toplotni upor) v novih pogojih zadostuje za ustvarjanje cone ugodja. Debelino oblačila izračunamo z enačbo (7.34), ki se nanaša na stanje brez vetra. Kadar je vetrovno, začetni vrednosti koeficienta toplotne prevodnosti λ prištejemo vrednost, ki je posledica vpliva vetra. Primerjalni toplotni upor R_{s1} se nanaša na toplotni upor, ki je potreben, da se obdrži cona ugodja ne glede na spremembo temperature okolja in spremembo hitrosti vetra. Za primer vzamemo temperaturo okolja -10 °C pri hitrosti vetra 1 m/s, kar pomeni stanje okolja brez vetra. Za ugotavljanje potrebnega toplotnega upora oblačila za cono ugodja uporabimo enačbo (7.32). Izračunana vrednost je 0,071667 m^2.h.°C/kJ. Če želimo ugotoviti R_{s1} pri katerikoli hitrosti vetra, moramo najprej izračunati toplotni upor primerjalnega oblačila v mirnem vremenu, da ugotovimo debelino oblačila. Debelino oblačila potrebujemo, da izračunamo skupni toplotni upor oblačila pri določeni hitrosti vetra. V mirnem vremenu debelino oblačila pri določeni temperaturi okolja, temperatura T_{skc} je 33 °C, izračunamo z enačbo (7.34).

$$d = (R_{s1}(T, v) - R_a)\,\lambda \tag{7.34}$$

V našem primeru (T_{en} = -10 °C; T_{skc} = 33 °C; λ = 0,135068 kJ/m.h.°C; $R_{s1}(T, v) =$

$R_{s1}(-10,10)$ = 0,071667 m^2.h.°C/kJ; R_a = 0,017875 m^2.h.°C/kJ), parametri poroznosti oblačila niso spremenjeni. Za ta primer je potrebna debelina oblačila 0,007266 m. Pri hitrosti vetra 10 m/s se vrednost toplotnega upora zmanjša in znaša 0,013117 m^2.h.°C/kJ. To pomeni, da je $R_{s1}(-10,10)$ = 0,013117 m^2.h.°C/kJ. Ta skupni toplotni upor ne zadostuje za doseganje cone ugodja. Zaradi tega moramo povečati skupni toplotni upor $R_{s1}(-10,10)$ na skupni toplotni upor $R^*_{s1}(-10,10)$, kjer je $R^*_{s1}(-10,10)$ potreben skupni toplotni upor, da je oseba v coni ugodja na temperaturi okolja -10 °C in hitrosti vetra 10 m/s. Potrebni skupni toplotni upor $R^*_{s1}(-10,10)$ v teh pogojih lahko izračunamo z enačbo (7.35).

$$R^*_{s1}(-10,10) = R_{s1}(-10,0) + \Delta R_{s1}[(-10,0) - (-10,10)] = 2R_{s1}(-10,0) - R_{s1}(-10,10) \tag{7.35}$$

kjer so $R^*_{s1}(-10,10)$ potrebni toplotni upor oblačila za cono ugodja pri okoljski temperaturi -10 °C in hitrosti vetra 10 m/s, $R_{s1}(-10,0)$ potrebni upor oblačila za cono ugodja pri temperaturi -10 °C v mirnem vremenu, $\Delta R_{s1}[(-10,0) - (-10,10)]$ zmanjšanje vrednosti toplotnega upora (temperatura okolja -10 °C) pri hitrosti vetra 10 m/s v primerjavi s toplotnim uporom oblačila v mirnem vremenu (zaradi vpliva vetra) in $R_{s1}(-10,10)$ skupni toplotni upor opazovanega oblačila pri temperaturi okolja -10 °C in hitrosti vetra 10 m/s.

Z enačbo (7.35) izračunamo potrebni toplotni upor, da oseba ostane v coni ugodja pri katerikoli hitrosti vetra pri dani temperaturi okolja. Pri uporabi enačbe (7.34) upoštevamo koeficient toplotne prevodnosti realnega oblačila, R_c v mirnem vremenu brez vetra in vrednost $R_{s1}(T,v)$, ki smo ga izračunali s pomočjo enačbe (7.34). Potrebni skupni toplotni upor $R^*_{s1}(-10,10)$ = 2*0,071667 - 0,013117 = 0,130217 m^2.h.°C/kJ. Vrednost potrebnega potrebnega toplotnega upora pri hitrosti vetra 10 m/s se izredno poveča.

Ko smo izračunali vrednosti toplotnih uporov Rs1 in Rs2 pri vseh temperaturah okolja in vseh hitrostih vetra, s pomočjo enačbe (7.31) izračunamo čase tolerance. Pod temi pogoji (T = -10 °C, v = 10 m/s) je realna vrednost toplotnega upora oblačila R_{s2} = 0,010846 m^2.h.°C/kJ. V brezvetrju je 0,029943 m^2.h.°C/kJ, oziroma se zmanjša na 36 % zaradi vpliva vetra. Na to razliko precej vpliva izredna sprememba toplotnega upora plasti mirnega zraka Ra na površini oblačila. V teh pogojih se telo človeka ohlaja. Zaradi tega moramo dodati polovico povečane vrednosti toplotnega upora plašča telesa ΔR_{ti}. Ta ima vrednost 0,0129 m^2.h.°C/kJ. V tem primeru bo čas tolerance le 1,41 ur ali 85 minut. K tako kratkemu času tolerance precej prispeva poroznost oblačila. Ta je pri hitrosti vetra 10 m/s zelo velika in znaša 112 m^3/m^2.h.

7.3.4.7 Pregrevanje organizma

Pregrevanje organizma se pojavi takrat, ko se začne kopičiti toplota v organizmu, oziroma takrat, ko sta hitrosti proizvodnje toplote in zunanje – dodatne toplotne obremenitve večje, kot je hitrost oddajanja toplote v okolje. Posledica tega stanja je povečevanje povprečne temperature telesa. V pregretem stanju telesa se spremeni koeficient toplotne prevodnosti plašča telesa. Zaradi pospešenega kroženja krvi postane plašč celo slabši termo-izolator kot voda. Na ravni kritične temperature telesa – okrog 39 °C in še prej, pri povprečni temperaturi telesa 37 °C – se izenačita temperatura plašča telesa in temperatura jedra telesa in smemo predpostaviti, da je temperatura jedra telesa, enaka povprečni temperaturi telesa. Temperatura okolja je celo lahko višja, enaka ali nižja kot temperatura na površini kože.

V primerih, ko se telo pregreva – kopičenje toplote v telesu ΔQ_b je pozitiven. Pri računanju časa tolerance ne upoštevamo ΔR_{ti}, ker pač več ne obstoji toplotni upor plašča telesa, saj praktično prevaja toploto bolj kot voda, ker v koži in podkožnem tkivu hitro kroži kri in prinaša toploto iz notranjosti telesa v smeri njegove površine.

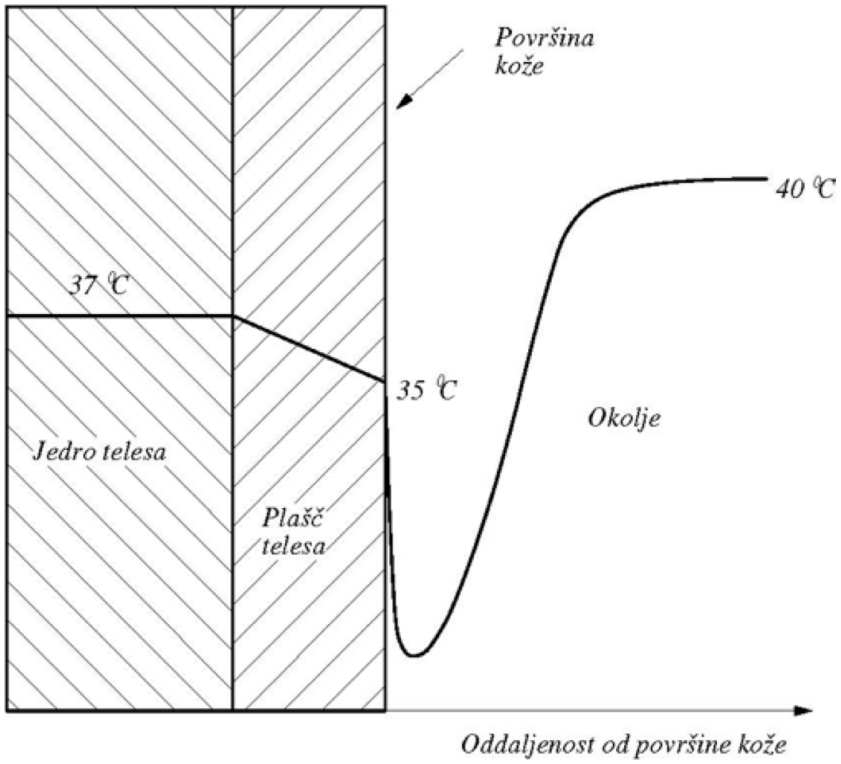
Pri pregrevanju telesa subjekta je $Q_1 > Q_2$, kar pomeni, da se toplota kopiči v telesu. Izhlapevanje znoja omogoča podaljšanje časa tolerance v pogojih pregrevanja organizma. Če ni omogočeno izhlapevanje znoja, je čas tolerance lahko zelo kratek. To je primer uporabe kaširanega ali gumiranega oblačila, ki ni prepustno ne za zrak ne za vodno paro. Ker je naš komplet zaščitnega oblačila zelo porozen, bodo hlapi znoja transportirani v okolje. Hitrost pretoka vodne pare (deleža izhlapelega znoja) bo odvisna od relativne vlage v okolju, temperature okolja in hitrosti vetra. To pomeni, da bomo upoštevali toploto Q_3, ki je potrebna za izhlapevanje znoja v določenem stanju okolja.

V enačbi (7.33) je temperatura T_{sk*} temperatura na površini prsi, ki je dovolj visoka, da se praktično vsa površina telesa – koža prekrije z znojem. Ta temperatura je 35 °C. Pri tej temperaturi je osebi zelo toplo. Kljub temu lahko opravlja določeno aktivnost v kontaminiranem okolju. Do 90 % površine kože je prekrito z znojem, preglednica 3.8 na strani 42. Delež plašča telesa se je zmanjšal. Verjetno ni večji kot 0,1 celotnega deleža telesa, oziroma 10 % celotne mase osebe. V tem primeru bi znašala povprečna temperatura telesa 36,8 °C, kar je skoraj izenačena temperatura plašča in temperatura jedra telesa. toda znoj izhlapeva s površine kože. Posledica tega je hlajenje površine kože. Lokalna temperatura na površini kože je nižja kot povprečna temperatura telesa. Ta razlika omogoča pretok toplote proti površini telesa. Celo v primeru, ko je temperatura okolja višja kot temperatura na površini kože, je temperatura zraka neposredno na površini kože, nižja od povprečne temperature telesa in temperature okolja. Zaradi tega je možen pretok toplote s površine kože, ki ima nižjo temperaturo kot okolje na določeni razdalji od površine kože. Za izhlapevanje določene enote mase znoja (vode) potrebujemo določeno količino toplote. To toploto dobimo iz telesa (telo se hladi) in zraka na neposredni površini kože oziroma površini oblačila. Zaradi tega se ta zrak ohladi na nižjo temperaturo, kot je povprečna temperatura telesa, kar omogoča pretok toplote iz pregretega telesa v še bolj vroče okolje. Ta proces je ilustriran na sliki 7.6.

V preglednici 7.5 so podani izračunani časi tolerance, ki veljajo za pogoje ohlajevanja telesa. Kadar ni vetra, se doseže ravnovesje med proizvodnjo in izžarevanjem toplote pri temperaturi okolja 15 °C in proizvodnji toplote 600 kJ/m^2.h. Ko smo enkrat dosegli srednje vrednost temperature telesa 33,35 °C oziroma 32 °C, se v teh pogojih, več ne znižuje srednja temperatura telesa in smo lahko pod temi pogoji neomejen čas. Zaradi tega te vrednosti ne sodijo v časovno toleranco kot je ta v tem delu definirana, ker smo lahko v tem stanju neskončno dolgo, če se temperatura okolja ne spreminja. Toda, lahko relativno hitro pride do dehidracije telesa.

Pri 5 °C, 0 m/s v preglednici 7.5 se v tem času temperatura na površini telesa zmanjša s 33 °C na 30 °C in srednja temperatura telesa s 36,6 °C na 33 °C; ΔR_{ti} = 0,00516 m^2.h.°C/kJ. Pri 10 °C, 0 m/s se v tem času temperatura na površini telesa zmanjša s 33 °C na 32 °C in srednja temperatura telesa s 36,6 °C na 35 °C; ΔR_{ti} = 0,00258 m^2.h.°C/kJ. Pri 10 °C, 0 m/s se v tem času temperatura na površini telesa zmanjša s 33 °C na 30 °C in srednja temperatura telesa s 36,6 °C na 32 °C; ΔR_{ti} = 0,00774 m^2.h.°C/kJ. V praznih celicah preglednice 7.5 enačba (7.31) ni smiselna.

Ko smo izračunali vse vrednosti R_{s1} in R_{s2} pri vseh temperaturah in hitrostih vetra, izračunamo čase tolerance za vsa ta stanja. V primerih ko se telo pregreva, bomo predpostavili, da so izpolnjeni pogoji, da se odvečna toplota sprosti v okolje s pomočjo izhlapevanja znoja. Osebi je precej vroče, vendar je sposobna opravljati potrebna dela



Slika 7.6: Mehanizem pretoka toplote s površine kože v okolje visokih temperatur; ker izhlapevanje znoja zmanjša temperaturo na površini kože, ki je nižja kot temperatura okolja in se zaradi tega poveča čas tolerance.

Preglednica 7.5: Čas tolerance osebe v urah za komplet zaščitnega oblačila v odvisnosti od temperature okolja in hitrosti vetra pri proizvodnji toplote Q_1, ki znaša 600 kJ/h.

Temp.	Hitrost vetra [m/s]				
[°C]	0	5	10	15	20
−20	3,45	1,66	1,05	0,87	0,79
−15	4,45	1,95	1,21	0,99	0,90
−10	6,26	2,37	1,41	1,14	1,04
−5	10,57	3,02	1,69	1,36	1,23
0	25,33	4,16	2,13	1,68	1,50
5	14,13	6,66	2,87	2,20	1,96
10	2,16	16,21	4,43	3,20	2,80
15		44,12	9,87	5,93	4,91
20		27,14	95,31	44,15	21,27

(aktivnosti) vsaj še 60 minut.

7.3.5 Jakšićeva metoda ugotavljanja časa tolerance v diferencialni izvedbi

Metoda za ugotavljanje časa tolerance, ki smo jo prikazali zgoraj, temelji na diferenčnih spremembah vrednosti posameznih parametrov. Pri tem smo predpostavili, da so spremembe linearne. Predpostavka o linearnih spremembah ne drži. Vpliv vetra na skupni toplotni upor, enačba (7.24), ni linearen. To velja tudi za hitrost izhlapevanja. Problem je tudi sprememba toplotnega upora plašča telesa. Enačbi (7.26) in (7.25) bomo zapisali v diferencialni obliki, enačbi (7.36) in (7.37).

$$\mathrm{d}Q_b = \mathrm{d}Q_1 - (\mathrm{d}Q_2 + \mathrm{d}Q_3 + \mathrm{d}Q_4) \tag{7.36}$$

$$\mathrm{d}Q_b = c_b G_b \mathrm{d}T \tag{7.37}$$

Tudi posamezne toplote, Q_1, Q_2, Q_3 in Q_4 bomo definirali v diferencialni obliki.

$$dQ_1 = \frac{T_{skc} - T_{en}}{R_{s1}} S\mathrm{d}t = q_1 S\mathrm{d}t \tag{7.38}$$

$$dQ_2 = \frac{T - T_{en}}{R_{s2} + \Delta R_{ti}} S\mathrm{d}t = q_2(T) S\mathrm{d}t \tag{7.39}$$

$$dQ_3 = H(T - T_{evc}) c_w \varphi \left[a_0 + a_1 \frac{T + T_{en}}{2} + a_2 v \right] S\mathrm{d}t = q_3(T) S\mathrm{d}t \tag{7.40}$$

$$dQ_4 = \frac{p_a V_a}{R_{da}(273 + T_{en})} \left[h(T) - h(T_{en}) \right] \mathrm{d}t = q_4 S\mathrm{d}t \tag{7.41}$$

kjer so

$$q_1 = \frac{T_{skc} - T_{en}}{R_{s1}} \tag{7.42}$$

$$q_2 = \frac{T - T_{en}}{R_{s2} + \Delta R_{ti}} \tag{7.43}$$

$$q_3 = H(T - T_{evc}) c_w \varphi \left[a_0 + a_1 \frac{T + T_{en}}{2} + a_2 v \right] \tag{7.44}$$

$$q_4 = \frac{p_a V_a}{R_{da}(273 + T_{en}) S} \left[h(T) - h(T_{en}) \right] \tag{7.45}$$

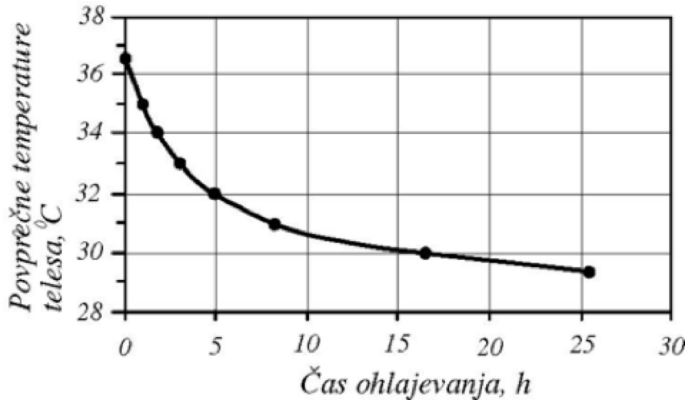
$$h(T) = (c_a + x c_w)(T - T_{en}) + x r \tag{7.46}$$

Spremembo temperature s časom popiše diferencialna enačba (7.47).

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} = \frac{S}{c_b G_b}\left[q_1 - q_2(T) - q_3(T) - q_4\right] \tag{7.47}$$

V enačbi (7.47) hitrost spremembe temperature po času je negativna, ko se telo ohlaja in pozitivna, ko se povečuje povprečna temperatura uporabnika oblačila. Diferencialna enačba (7.47) omogoča ugotavljanje povprečne temperature telesa človeka v kateremkoli času, ki ne presega kritične vrednosti intervala povprečnih temperatur telesa. Kot smo že omenili, je spodnja meja (ohladitev) 29 °C in zgornja meja (segrevanje) 39 °C. Če se v tem intervalu doseže ravnovesje med proizvodnjo toplote in izgubami, $\mathrm{d}Qb = 0$, lahko, v takem okolju ostane oseba nedoločen čas oziroma čas ni omejen. Te vrednosti se nanašajo na srednje temperature telesa , ki pomenijo temperature v coni ugodja.

Toplota Q_3, ki se porabi za izhlapevanje znoja, ima zelo pomembno vlogo v procesu segrevanja. Če so izpolnjeni pogoji za zadostno hitrost izhlapevanja znoja, lahko dosežemo ravnovesje, preden se povprečna temperatura telesa približa kritični vrednosti. V procesu ohlajevanja telesa pa praviloma to toploto lahko zanemarimo, ker so zanemarljive toplotne izgube zaradi izhlapevanja znoja. Kot je razvidno iz enačbe (7.40), vpeljemo Heaviside-vo funkcijo H. Za ilustracijo tega procesa, bomo prikazali diagram ohlajanja organizma subjekta v odvisnosti od časa trajanja ohlajevanja. Oseba proizvaja toploto q_1 = 600 kJ/m^2.h; debelina oblačila d_c = 0,00163 m in koeficient toplotne prevodnosti λ_0 = 0,135068 kJ/m.h.°C. To oblačilo bi v mirnem vremenu brez vetra omogočilo cono ugodja pri okrog 15 °C. Temperatura okolja T_{en} = 0 °C. Iz diagrama na sliki 7.7 je razvidno, da se bo telo subjekta ohladilo na povprečno temperaturo 29,3 °C v času 25,33 ur. To je obenem čas tolerance. Predpostavili smo, da je oseba bila v coni ugodja pred začetkom eksperimenta ohlajevanja. To je le prvi poskus uporabe diferencialne metode. Dejanske razlike bodo pokazale nadaljnje raziskave in primerjave na enem te istem oblačilu. Vsekakor je diferencialna metoda bolj natančna kot diferenčna. To velja predvsem, če sprememba toplotnega upora plašča ni linearno odvisna od povprečne temperature telesa.



Slika 7.7: Ilustracija ugotavljanja časa tolerance za osebo, ki je oblečena v naše zaščitno oblačilo v okolju, ki ima temperaturo -20 °C.

Na sliki 7.7 je skupaj prikazan proces ohlajevanja do telesne temperature 29 °C, ki je obenem maksimalna temperatura do katere se telo lahko ohladi brez resnih poškodb. Potek krivulje je samo prikaz procesa. Telo uporabnika oblačila v teh pogojih doseže tekom 25 ur kritično temperaturo ohladitve. To je obenem čas tolerance.

7.4 Seznam oznak poglavja

Oznaka	Enota	Opis
A		koeficient
a		koeficient
a_0		regresijski koeficient
a_1		regresijski koeficient
a_2		regresijski koeficient
b		koeficient tesnenja oblačila, eksponent
c	kJ/kg.°C	specifična toplota zraka
c_a	kJ/kg.°C	specifična toplota zraka
c_b	kJ/kg.°C	specifična toplota telesa
c_w	kJ/kg.°C.h	specifična toplota izhlapevanja vode
D_{max}	μm	največji hidravlični premer pore
D_s	μm	srednji hidravlični premer pore
d	m	debelina oblačila
d_c	m	debelina oblačila
d_i	m	debelina i-te plasti oblačila
φ		vlažnost zraka
γ	kg/m^3	gostota zraka
γ_a	kg/m^3	gostota zraka
G_{aw}	kg/m^3.h	količina vode v izdihanem zraku
G_c	%	povečanje mase oblačila zaradi povečanja količine vode v oblačilu, odstotek vode v oblačilu
G_b	kg	masa telesa
g	m/s^2	standardni zemeljski pospešek
$H()$		Heaviside-ova funkcija
h	Pa	tlak
k_T	1/°C	koeficient vpliva temperature na toplotno prevodnost oblačila
k_w		koeficient vpliva vlage na toplotno prevodnost oblačila
λ	kJ/m.°C.h	koeficient toplotne prevodnosti oblačila
λ_0	kJ/m.°C.h	koeficient toplotne prevodnosti oblačila pri standardni atmosferi
λ_c	kJ/m.°C.h	koeficient toplotne prevodnosti oblačila
λ_i	kJ/m.°C.h	koeficient toplotne prevodnosti i-te plasti oblačila
P	m^2	odprta površina tkanine skozi katero se pretaka zrak
ΔR_{ti}	m^2.h.°C/kJ	sprememba toplotnega upora plašča telesa glede na stanje v coni ugodja
R_a	m^2.h.°C/kJ	toplotni upor mirujoče plasti zraka
R_c	m^2.h.°C/kJ	toplotni upor oblačila
RH	%	relativna vlaga
R_k	m^2.h.°C/kJ	toplotni upor okroglega (sferičnega) tekstilnega izdelka
R_s	m^2.h.°C/kJ	skupni toplotni upor
R_{s1}	m^2.h.°C/kJ	skupni toplotni upor v coni ugodja
R_{s2}	m^2.h.°C/kJ	skupni toplotni upor v aktualnih pogojih
R_v	m^2.h.°C/kJ	toplotni upor valjastega tekstilnega izdelka
r	m	polmer krogle
r	m	polmer valja

Nadaljevanje na naslednji strani

Nadaljevanje s prejšnje strani

Oznaka	Enota	Opis
r		koeficient korelacije
ΔQ_b	kJ/m^2.h.°C	razlika med količino proizvedene toplote, ki ni uporabljena za delo mišic in notranjih organov, ter izžarjene toplote v okolje
Q_1	kJ/m^2.h.°C	proizvedena toplota
Q_2	kJ/m^2.h.°C	toplota, izžarjena skozi površino oblačila
Q_{2*}	kJ/m^2.h.°C	toplota, izžarjena skozi površino oblačila
Q_3	kJ/m^2.h.°C	toplota, ki se porabi za izhlapevanje znoja
Q_4	kJ/m^2.h.°C	toplota, ki se izgubi zaradi vpliva vetra
Q_a	kJ/m^2.h	izgubljen toplotni tok zaradi vetra
Q_c	kJ/m^2.h	izgubljen toplotni tok v mirnem vremenu
q_1	kJ/m^2.h	proizvedena specifična toplota
q_2	kJ/m^2.h	specifična toplota, izžarjena skozi površino oblačila
Q_3	kJ/m^2.h	specifična toplota, ki se porabi za izhlapevanje znoja
Q_4	kJ/m^2.h	specifična toplota, ki se izgubi zaradi vpliva vetra
S	m^2	površina kože
ΔT	°C	razlika temperatur
ΔT_c	°C	sprememba temperature v oblačilu
T	°C	temperatura
T_{av_1}	°C	povprečna temperatura telesa v coni ugodja
T_{av_2}	°C	povprečna aktualna temperatura telesa
T_{en}	°C	temperatura okolja
T_k	°C	temperatura jedra telesa
T_{sk}	°C	temperatura na površini kože
T_{sk*}	°C	temperatura na površini kože prekriti z znojem
T_{skc}	°C	temperatura na površini kože v coni ugodja
t	h	čas, čas tolerance
V	m^3/m^2.h	volumska hitrost pretoka zraka skozi oblačilo pri določeni hitrost vetra
V_a	m^3/m^2.h	volumska hitrost pretoka zraka skozi oblačilo pri določeni hitrost vetra
v	m/s	hitrost vetra
ΔW		sprememba vlažnosti zraka glede na standardno vrednost atmosfere

7.5 Literatura

[1] D. Jakšić. Uticaj brzine vetra na prenos toplote kroz tekstilne materijale. *Tekstil*, 11:815–824, 1975.

[2] D. Jakšić. The method of calculation of the effect of wind on the total thermal resistance of clothing. *J. Tex. Inst.*, 66(3):129–131, 1975.

[3] P. A. Kolesnikov. *Teplozaščitnie svojstva odeždi*. Legkaja industrija, Moskva, 1965.

[4] D. Jakšić and Jakšić N. Metoda ugotavljanja časa tolerance v ekstremnih razmerah podhlajanja ali pregrevanja organizma. *Tekstilec*, 49(10–12):175–200, 2006.

POGLAVJE 8

Ugotavljanje poroznosti ploskih tekstilij

Kazalo

8.1 Uvod **155**
8.2 Jakšićeva metoda ugotavljanja velikosti, števila in porazdelitve velikosti por v ploskih tekstilnih izdelkih **156**
8.2.1 Teoretične osnove 156
8.2.2 Postopek merjenja volumenske hitrosti pretoka v odvisnosti od tlaka 158
8.2.3 Postopek izračuna števila, velikosti in porazdelitve velikosti por 159
8.2.3.1 Število por je znano 159
8.2.3.2 Število por ni znano 160
8.2.4 Testiranje metode 161
8.2.4.1 Razvoj 161
8.2.4.2 Testni vzorci 162
8.2.4.3 Rezultati testiranja metode 165
8.2.4.4 Razprava o metodi 172
8.3 Seznam oznak poglavja **174**
8.4 Literatura **175**

8.1 Uvod

Na splošno poznamo v tekstilnih izdelkih tri tipe por: pore med nitmi osnove in votka ali nitmi v pletenini in tkanini, pore med vlakni v preji ali vlaknini in pore v vlaknu. S praktičnega stališča so najbolj zanimive pore med nitmi osnove in votka v tkaninah ali pore med nitmi v pleteninah ter pore med vlakni v vlakninah [1, 2, 3]. Hidravlični premer teh por (najožji del kanala pore) je navadno večji od 10 μm oziroma večji od premera najfinejših vlaken. Izjema so mikrovlakna. Ugotavljanje poroznosti ploskih tekstilnih izdelkov je pomembno posebej, če se le-ti uporabljajo za filtre, šotore in oblačila (upor pretoka zraka in vodne pare).

Do sedaj je bilo razvitih več metod za merjenje poroznosti materialov, kot so: živosrebrna porozimetrija [4, 5], metode, ki slone na iztiskanja tekočine iz por [6, 7], rentgenografske metode [8, 9], absorpcijske metode [10, 11] in difuzijska metoda [12]. Nekatere med njimi so primerne za ugotavljanje poroznosti ploskih tekstilnih izdelkov, vendar ne dajo dovolj natančnih rezultatov za realen sistem, ali pa onemogočajo ugotavljanje vseh parametrov poroznosti, ki so za dani primer zanimivi. Zaradi tega smo razvili novo metodo, ki naj bi bila enostavna, poceni in bi omogočala ugotavljanje čim večjega števila parametrov poroznosti v ploskih tekstilnih izdelkih, ki obenem ne bi bistveno odstopali od realnih vrednosti.

V nadaljevanju si bomo ogledali Jakšićevo metodo določanja velikosti, števila in porazdelitve velikosti por v ploskih tekstilnih izdelkih [13, 14].

8.2 Jakšićeva metoda ugotavljanja velikosti, števila in porazdelitve velikosti por v ploskih tekstilnih izdelkih

Sledeča podpoglavja sledijo raziskavam objavljenim v [1, 3] in predvsem v [13], kjer je vsebina podana kot celotno poglavje v znanstveni publikaciji.

8.2.1 Teoretične osnove

Če ploski tekstilni izdelek potopimo v tekočino, se bo omočil. Pri tem bo tekočina izpodrinila zrak iz por tekstilnega izdelka. V tekstilnih izdelkih so številne pore, ki povezujejo nasprotne površine izdelka. V tkaninah so to v glavnem pore med nitmi osnove in votka. V vlakninah imajo pore bolj nedoločeno geometrijsko obliko. Prečni presek por lahko idealiziramo s krogom ali pravokotnikom. Predpostavili bomo, da so pore cilindri, ki imajo določen hidravlični premer, enačba (8.1).

$$d = \frac{f}{o} = \frac{2wl}{w+l} \tag{8.1}$$

kjer so d [m] hidravlični premer pore, w [m] širina prečnega preseka pore, l [m] dolžina prečnega preseka pore, f [m^2] ploščina prečnega preseka pore in o [m] obseg prečnega preseka pore.

Če je na nasprotnih površinah tekstilnega izdelka razlika tlakov p_i in je površinska napetost tekočine v porah α, lahko predpostavimo, da se bo iztisnila tekočina iz por, ki imajo hidravlični premer d_i. Ta proces lahko opišemo z znano enačbo (8.2).

$$d_i \geq \frac{4\alpha}{p_i} \tag{8.2}$$

Če razliko tlakov merimo z vodnim manometrom, potem velja enačba (8.3).

$$p_i = \rho g h_i \quad ; \quad d_i \geq \frac{4\alpha}{\rho g h_i}, \tag{8.3}$$

kje so d_i [cm] hidravlični premer por v velikostnem razredu i, ρ [g/cm^3] gostota vode, h [Pa] višina vodnega stolpa v cm oziroma ustrezni tlak v Pa.

Najprej se iztisne voda iz pore, ki imajo največji hidravlični premer. Skozi to prazno poro bo pretekel v enoti časa določen volumen zraka. Na splošno lahko opišemo volumensko hitrost pretoka zraka skozi ploski tekstilni izdelek z enačbo (8.4) [8].

$$V_i = A p_i^b = Pa p_i^b = P v_i, \tag{8.4}$$

kjer so V_i [cm^3/cm^2.s] volumenska hitrost pretoka zraka skozi ploski tekstilni izdelek pri razliki tlakov p_i, P [cm^2] odprta površina, v_i [cm/s] linearna hitrost pretoka zraka, p_i [Pa] razlika tlaka.

V idealnem – mejnem primeru, ko ni izgub hitrosti zaradi trenja ob stene por, velja zakonitost (8.5).

$$v = a_0 p^{b_0} = 1,28 p^{0,5} \tag{8.5}$$

kjer so v [cm/s] linearna hitrost pretoka zraka, p [Pa] razlika tlakov, a_0 mejna teoretična vrednost koeficienta a v enačbi (8.9), b_0 mejna vrednost eksponenta b (b_0 = 0,5) v enačbi (8.9).

Če merimo tlak v cm vodnega stolpca, enačbo zapišemo kot $v = 1265 p^{0,5}$. Eksperimentalni rezultati [1, 2, 3] kažejo, da eksponent b ni večji od l. Potemtakem velja $0,5 \leq b \leq l$.

Če je pri razliki tlakov p_1 iztisnjena voda iz por d_1, ki imajo največji hidravlični premer od vseh por v tekstilnem izdelku in je število teh por n_1, bo skozi te pore pretekel v enoti časa volumen zraka V_1:

$$V_1 = \pi a p_1^b \frac{n_1 d_1^2}{4} \tag{8.6}$$

Če tlak povečamo, se bo pri tlaku p_2 ($p_2 > p_1$) odprlo dodatnih n_2 por, ki imajo hidravlični premer d_2. Zaradi tega se bo povečala volumenska hitrost pretoka zraka na V_2 glede na V_1, in to zaradi povečanja tlaka in zaradi povečanja odprte površine, skozi katero teče zrak.

$$V_2 = \pi a p_2^b \frac{n_1 d_1^2 + n_2 d_2^2}{4} \tag{8.7}$$

Če nadalje zvišamo tlak na p_3 ($p_3 > p_2$), lahko izračunamo V_3 po analogiji z enačbo (8.7).

$$V_3 = \pi a p_3^b \frac{n_1 d_1^2 + n_2 d_2^2 + n_3 d_3^2}{4} \tag{8.8}$$

Na splošno pri tlaku p_i lahko izračunamo volumensko hitrost pretoka V_i z enačbo (8.9).

$$V_i = \frac{\pi a p_i^b}{4} \sum_{j=1}^{i} n_j d_j^2 \quad ; \quad i = 1, 2 \ldots n \tag{8.9}$$

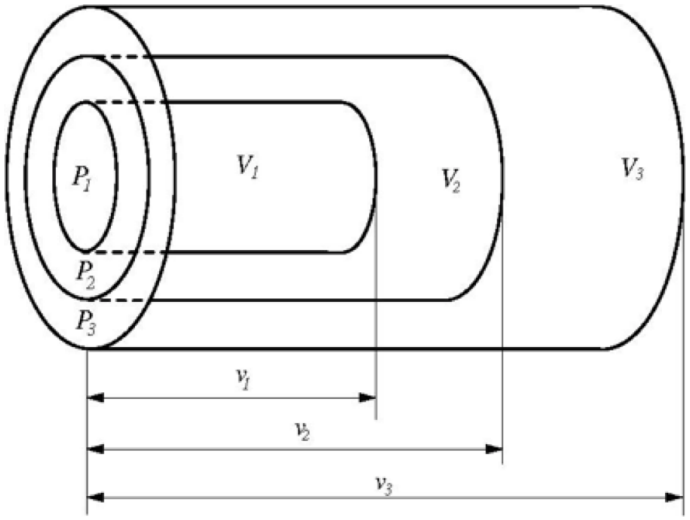
Grafična ilustracija povečanja volumenske hitrosti pretoka je prikazana na sliki 8.1.

Število por n_1, ki imajo hidravlični premer d_1, lahko izračunamo iz enačbe (8.10).

$$n_1 = \frac{4 V_1}{\pi a p_1^b d_1^2} \tag{8.10}$$

Splošno rešitev za izračun por v določenem velikostnem razredu lahko dobimo iz enačbe (8.9). Za izračun števila por n_i, ki imajo hidravlični premer d_i, je potrebno izračunati del volumna V_i^*, ki se nanaša zgolj na pore premera d_i. Ta del volumna bomo označili z V_i^*. Ta volumen je dejansko razlika med volumnom V_i in volumnom, ki pod tlakom p_i preteče skozi pore, ki imajo hidravlični premer od d_1 do d_{i-1}. Glede na to lahko izrazimo volumen V_i^* z enačbo (8.11).

$$V_i^* = \frac{\pi a p_i^b}{4} \left[\sum_{j=1}^{i} n_j d_j^2 - \sum_{j=1}^{i-1} n_j d_j^2 \right] \quad ; \quad i = 1, 2 \ldots n \tag{8.11}$$



Slika 8.1: Grafični prikaz parametrov enačb od (8.6) do (8.8).

Prvi člen na desni strani enačbe (8.11) je V_i. Če želimo drugi člen na desni strani enačbe (8.11) transformirati v določen volumen, moramo enačbo (8.11) pomnožiti in deliti s p_{i-1}^b.

$$V_i^* = p_i^b \left[\frac{V_i}{p_i^b} - \frac{V_{i-1}}{p_{i-1}^b} \right] \tag{8.12}$$

Po analogiji z enačbo (8.12) izračunamo število por n_j, ki imajo hidravlični premer d_j, z naslednjo enačbo

$$n_j = \frac{4V_1^*}{\pi a p_i^b d_j^2}. \tag{8.13}$$

Z upoštevanjem enačbe (8.13) lahko enačbo (8.12) transformiramo v naslednjo obliko

$$n_j = \frac{4\left(p_{i-1}^b V_i - p_i^b V_{i-1}\right)}{\pi a p_{i-1}^b d_j^2}. \tag{8.14}$$

Če v enačbi (8.12) indeks j nadomestimo z indeksom i in upoštevamo enačbo (8.2), lahko enačbo (8.9) transformiramo v naslednjo obliko:

$$n_i = \frac{p_i^2}{4a\pi\alpha^2} \left[\frac{V_i}{p_i^b} - \frac{V_{i-1}}{p_{i-1}^b} \right]. \tag{8.15}$$

Popravljen koeficient a_j lahko zapišemo kot:

$$a_j = 1,28\frac{n_{cj}}{n_t} = \frac{1,28}{a^*} \quad ; \quad a^* = \frac{n_t}{n_{cj}} \tag{8.16}$$

kjer so n_t realno število por in n_{cj} izračunano število por in a_j koeficient enačbe (8.4).

8.2.2 Postopek merjenja volumenske hitrosti pretoka v odvisnosti od tlaka

Na rotametru izmerimo volumenske hitrosti pretoka zraka pri različnih razlikah tlakov skozi določeno površino suhega vzorca (krivulja 1 na sliki 8.6 – vzorec a). Iz parov

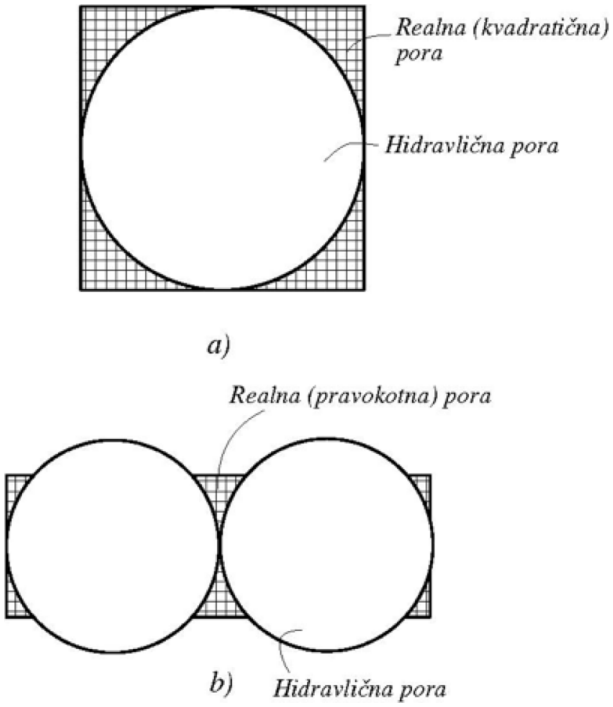
vrednosti p_i in V_i, bomo izračunali koeficient A in eksponent b, enačba (8.4). Koeficient korelacije je navadno večji od 0,98. Potem vzorec potopimo v tekočino znane gostote in površinske napetosti (na primer destilirana voda ali normalni butil alkohol). Tekočina ne sme biti lahko hlapljiva in naj ima čim manjšo vrednost koeficienta površinske napetosti. Ko se vzorec popolnoma omoči (ni zračnih mehurjev v vzorcu), ga vstavimo v merilno glavo rotametra, počasi povečujemo razliko tlakov, dokler se ne pojavi prvi zračni mehur (iztisnjena tekočina iz pore, ki ima največji hidravlični premer). Odčitamo razliko tlakov in z enačbo (8.2) oziroma (8.3) izračunamo hidravlični premer največje pore. Potem naprej večamo tlak in odčitamo vrednost tlaka pri vnaprej izbranih volumenskih hitrostih pretoka ali pa vključimo risalnik (ploter), ki riše krivuljo odvisnosti volumenske hitrosti pretoka od tlaka (krivulja 2 na sliki 8.6 – vzorec a). Merjenje končamo, ko se krivulji 1 in 2 združita oziroma zelo približata (tekočina je iztisnjena tudi iz najmanjših por). Pri tem moramo upoštevati dejstvo, da teče zrak skozi suh vzorec tudi skozi pore med vlakni v preji. Hidravlični premer teh por je lahko zunaj območja, ki ga pokriva rotameter in tudi lahko niso pomembne za območje velikosti hidravličnih premerov por, ki jih preiskujemo. Zaradi tega ni nujno, da se krivulja 1 – pretok skozi suh vzorec in krivulja 2 – pretok skozi omočen vzorec, zelo približata na koncu meritev pri največjih tlakih.

Izmerjene pare vrednosti tlak -– volumenska hitrost pretoka skozi suh in omočen vzorec vnesemo v računalnik. Parametre poroznosti izračunamo s pomočjo računalniškega aplikacijskega programa, ki je razvit za testiranje te metode [14]. Možno je tudi "peš" računati parametre poroznosti vendar le približno. Postopek bi bil dolgotrajen in zaradi tega neuporaben. Za tak izračun bi bilo treba precejšnje znanje iz numerične analize. Osnovni problem je v tem, da sta v enačbi (8.4) dve neznanki: odprta (prosta) površina P in koeficient a. Zaradi tega ima enačba (8.4) neskončno število rešitev. Ta problem smo rešili tako, da smo upoštevali teoretične omejitve vrednosti koeficienta a in eksponenta b, enačba (8.5).

8.2.3 Postopek izračuna števila, velikosti in porazdelitve velikosti por

8.2.3.1 Število por je znano

V vzorcu je lahko znano število por, ki so pore v tkanini med nitmi osnove in votka. Število por je enako produktu gostote osnove in votka na 1 cm^2. Poroznost ploskega tekstilnega izdelka merimo na površini enega cm^2 na 5 do 10 vzorcev. Lahko merimo tudi na manjši ali večji površini, odvisno od zmogljivosti rotametra (volumenska hitrost pretoka zraka) in manometra (višine vodnega stolpa ali manometra, ki je zasnovan na drugem načinu merjenja tlaka). Kljub temu da je v tkanini znano število por med nitmi osnove in votka, ni nujno, da je število hidravličnih por enako številu por. Če imamo opravka s kvadratno tkanino (enaka preja in gostota v osnovi in votku), ki je tkana v vezavi platno, potem je presek pore kvadrat in presek hidravlične pore vrisani krog v tem kvadratu, enačba (8.1). V tem primeru je število hidravličnih por enako številu por med nitmi osnove in votka. Če je oblika pore pravokotnik in je razmerje stranic 3:1 ali več, potem sta v eni pori dve ali več hidravličnih por. Ta primer je prikazan na sliki 8.2. Če ima pora obliko kvadrata, slika 8.2 a), potem je hidravlični premer pore enak stranici kvadrata in je površina hidravlične pore enaka površini vrisanega kroga, enačba (8.1). Če je razmerje stranic na primer 60:30 mikrometrov, potem je hidravlični premer pore 30 mikrometrov. V eno poro med nitmi osnove in votka lahko umestimo dve hidravlični pori, slika 8.2 b).



Slika 8.2: Vpliv oblike pore med nitmi osnove in votka na število hidravličnih por v opazovani pori. Legenda: a) kvadratna pora, b) pravokotna pora.

Aplikacijski računalniški program je nameščen na več računalnikov. Je preveč obširen in ni primeren za prikaz v tem učbeniku. Je samo orodje, ki nam omogoča hiter in natančen izračun parametrov poroznosti. Po aplikacijskem računalniškem programu pridemo do okna "Izračun" in ugotovimo vrednost a_0. Če je a_0 manjši od 1,28, gremo do konca in ugotovimo vrednost tlaka na koncu zadnjega velikostnega razreda. Vrednost koeficienta a je prilagojen številu por. Ker se eksponent b nanaša na celoten interval merjenih vrednosti in ne samo na interval, v katerem so pore, moramo njegovo vrednost korigirati razen v primeru, če so pore v celotnem intervalu meritev. To pa je malo verjetno. Ko korigiramo vrednost eksponenta b, obenem korigiramo tudi vrednost koeficienta a, ki pripada istemu intervalu meritev. Ponovimo izračun od začetka. Pri ponovljenem postopku v oknu "Izračun" program ne upošteva pare meritev tlak -– volumenska hitrost pretoka, ki so večje od vrednosti največje izmerjene vrednosti na zgornji meji zadnjega velikostnega razreda por. To je najmanjši hidravlični premer. Ko pri računanju parametrov poroznosti pridemo do "Izračuna", še enkrat kontroliramo vrednost koeficienta a_0, ki mora biti enak ali manjši od 1,28. V tej enačbi je tudi eksponent b_0, b_0 = 0,5. Aktiviramo okno "Rezultati" in gremo do konca programa. Potem iztiskamo "Poročilo". Če ugotovimo, da je vrednost koeficienta a_0 večja od vrednosti 1,28 pomeni, da je v tkanini več hidravličnih por, kot je por med nitmi osnove in votka. V tem primeru gremo na začetek programa in v okno "Število por" vstavimo "Število por ni znano" in nadalje računamo po postopku, ko število por ni znano.

8.2.3.2 Število por ni znano

Če število por na enoto površine ni znano (vlaknine, večina pletenin, tkanine izdelane iz predene preje ipd.), ni možno direktno izračunati pravo vrednost koeficienta a. To izhaja iz dejstva, da v regresijski enačbi (8.4) nista znana dva parametra: odprta površina P in koeficient a. Znana je vrednost njihovega produkta, $A = aP$. Kljub temu ne

moremo formulirati dveh neodvisnih enačb. Iz tega izhaja, da imamo eno enačbo in dve neznanki. Enačba ima neskončno število rešitev. Vendar problem ni nerešljiv. Lahko uporabimo mejne vrednosti za linearno hitrost pretoka, $v = a_0 p^{b_0}$.

Ko smo vnesli v računalniški program meritve pretoka skozi suh in omočen vzorec v odvisnosti od tlaka, aktiviramo okno za število por in vstavimo "Število por ni znano". Nadaljujemo izračun po korakih, ki nam jih narekuje program. Ko pridemo do okna "Izračun", je v oknu za koeficient a, ki sodi k eksponentu b, maksimalna teoretična vrednost koeficienta, 1,28. Zaradi tega dobimo minimalno možno število por. S tem smo tudi ugotovili minimalno možno odprto površino. Sedaj vzamemo minimalno vrednost eksponenta b, b_0 = 0,5. Ker je tudi minimalna odprta površina fiksirana, moramo povečati vrednost koeficienta a^*, ki sodi k eksponentu, ki ima vrednost 0,5, da zadostimo merjenim parom vrednosti V_i in p_i in tudi prej ugotovljeni minimalni odprti površini. Tukaj je potrebno omeniti predpostavko, da je režim pretoka (turbulenten, laminaren ali mešan) skozi suh in omočen vzorec enak pri enakem tlaku. Ta predpostavka je dokazana z rezultati testiranja metode, preglednica 8.1. To nam omogoča, da v enačbi (8.15) uporabimo eksponent b, ki smo ga izračunali z eksponentno regresijsko enačbo (8.4).

S pomočjo programa izračunamo tudi koeficient a^*, ki sodi k eksponentu b_0. Ta ima večjo vrednost kot 1,28, kar je več, kot je maksimalna teoretična vrednost. Kot je razvidno iz enačbe (8.16), je to obenem razmerje med dejanskim številom por in najmanjše možnim številom por, ki smo ga dobili tako, da smo koeficientu a_j predpisali največjo teoretično vrednost.

Ena od lastnosti enačbe (8.15) je ta, da vrednost koeficienta a ne vpliva na povprečni hidravlični premer por. V oknu za koeficient a je vrednost 1,28. Obenem program izračuna tudi koeficient a^*, ki sodi k eksponentu b_0. Ta je po pravilu večji kot 1,28. Nadaljujemo z aktiviranjem okna "Rezultati". Ugotovimo največji tlak, pri katerem so še pore. Ni nujno, da je v zadnjem razredu, ki ima najmanjši hidravlični premer por, cela pora. V zadnjem razredu je na primer realno 5 por. Koeficient a^* ima vrednost 10, kar pomeni, da je realni koeficient a_j 10-krat manjši od predpisanega, ki ima vrednost 1,28. Zaradi tega bo ne korigirano število por v zadnjem razredu le 0,5. Gremo do konca programa in se vrnemo na začetek.

V naslednjem krogu ne upoštevamo meritev, ki smo jih dobili pri večjih tlakih od največjega tlaka pri, katerem smo ugotovili obstoj por. S to korekcijo dobimo realno vrednost koeficienta b. V oknu "Izračun" so navedeni vsi potrebni parametri (največji in najmanjši hidravlični premer por). Vstavimo število razredov in dobimo širino razreda. V oknu koeficient a ima še zmeraj vrednost 1,28. To vrednost delimo s koeficientom a^* in dobimo realno vrednost koeficienta a_j, enačba (8.16). Dobljeno vrednost vstavimo v okno za koeficient a namesto vrednosti 1,28. Aktiviramo okno "Rezultati", gremo do konca programa (na koncu je diagram porazdelitve por) in iztiskamo poročilo.

8.2.4 Testiranje metode

8.2.4.1 Razvoj

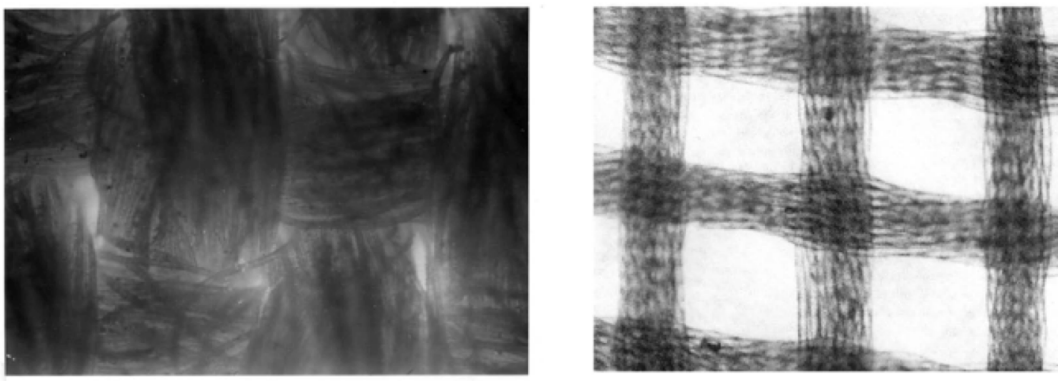
Metodo smo začeli razvijati od leta 1973. To delo ni bilo neprekinjeno, ampak občasno. Prvi resnejši popravek je bil zamenjava standardne enačbe hitrosti vetra, 1,28 $p^{0,5}$ s splošnim izrazom ap^b. Primerjava eksperimentalno izmerjenih in izračunanih rezultatov z rezultati, ki so bili izmerjeni pod mikroskopom pri 100-hkratni povečavi, je pokazala dobro ujemanje posebno pri vzorcih, ki so imeli povprečni hidravlični premer por manjši od 100 mikrometrov. Pri takšnih vzorcih smo dobili vrednosti eksponenta b večje kot 0,70, enačba (8.4). Pri izračunih smo ta eksponent korigirali na b^*. Tega smo definirali

z naslednjo enačbo: $b^* = (1 + b)/2$. S to korekcijo smo dobili boljše ujemanje eksperimentalnih vrednosti parametrov poroznosti z dejanskimi vrednostmi. Čim manjši je hidravlični premer por, tem večja je vrednost eksponenta b in zaradi tega manjša razlika med b in b^*. Pri nadaljnjih raziskavah smo ugotovili, da smo pri računanju regresijske krivulje za pretok zraka skozi suh vzorec, enačba (8.4), upoštevali celoten interval merjenja, kar je sicer normalno. Vendar je ta interval bolj širok kot interval tlakov pri omočenem vzorcu, v katerem so pore. Kot je razvidno iz postopka, smo korigirali regresijsko krivuljo pretoka zraka skozi suh vzorec tako, da smo omejili rezultate le do tlaka, pri katerem so še pore, ki smo jih ugotovili pri mokrem vzorcu. Eksponent b, izračunan z regresijsko krivuljo pri meritvah na suhem vzorcu, lahko uporabimo v enačbi (8.15) le v primeru, da velja predpostavka, da je režim pretoka zraka skozi moker vzorec enak režimu pretoka zraka skozi suh vzorec pri enakih tlakih. Dobro ujemanje eksperimentalnih rezultatov z realnimi, ki smo jih izmerili s pomočjo svetlobnega mikroskopa in tudi scanning elektronskega mikroskopa potrjujejo predpostavko o enakem režimu pretoka zraka skozi suh in omočen vzorec.

8.2.4.2 Testni vzorci

Testirali smo večje število vzorcev. Tukaj bomo prikazali le 4 vzorce, ki so reprezentančni za večino tkanin, ki so primerni za testiranje metode. Bombažna tkanina, slika 8.3 a), tkana v vezavi platno, ki pokriva področje ploskih tekstilij, v katerih število por ni znano, ker štrleča vlakna delijo poro med nitmi osnove in votka na večje število por, ki imajo manjši hidravlični premer, kot bi jo imela pora brez štrlečih vlaken.

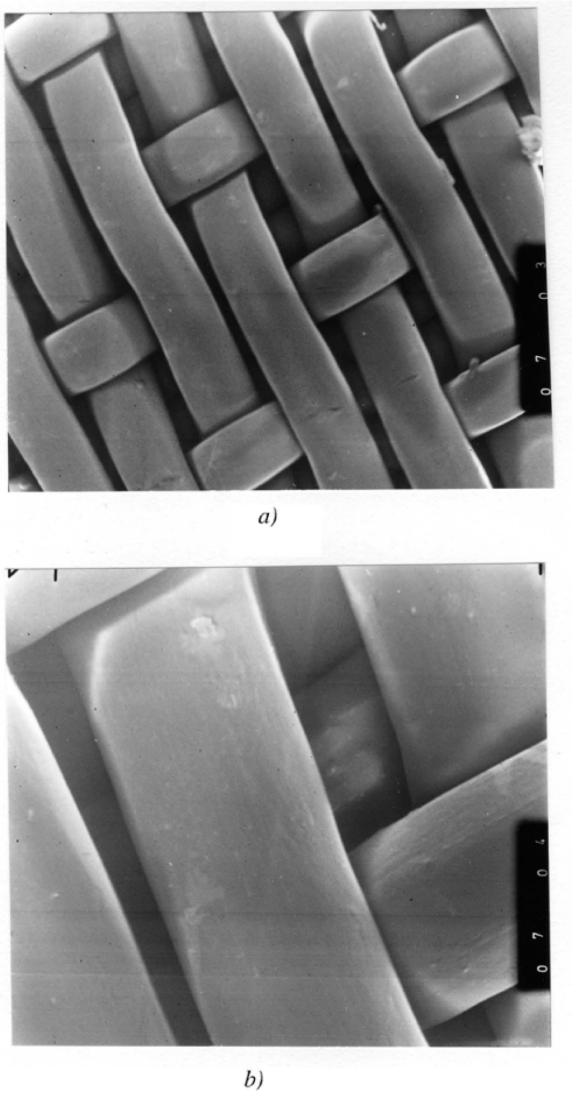
Druga tkanina, slika 8.4, je gosta monofilamentna tkanina. Pri tej tkanini ni možno izmeriti hidravlične premere por z navadnim svetlobnim mikroskopom. Tkana je v 5-veznem atlasu. Potrebujemo večje povečave, ki nam jih omogoča scanning elektronski mikroskop.



a) b)

Slika 8.3: Videz testiranih vzorcev: a) vzorec a: bombažna tkanina, in b) vzorec c: multifilamentna tkanina.

Tretja tkanina je izdelana iz multifilamentne preje, slika 8.3 c). Ima približno kvadrataste pore, ki imajo povprečni hidravlični premer okrog 200 mikrometrov. Druga tkanina, vzorec b, sliki 8.4 in 8.5, je zelo gosta monofilamentna tkanina povečana do 630 krat. Omogoča testiranje metode tudi za tkanine, ki imajo manjši hidravlični premer kot 20 mikrometrov. Fotografija vzorca d ni prikazana. Osnovni parametri pa so prikazani v preglednici (8.1).

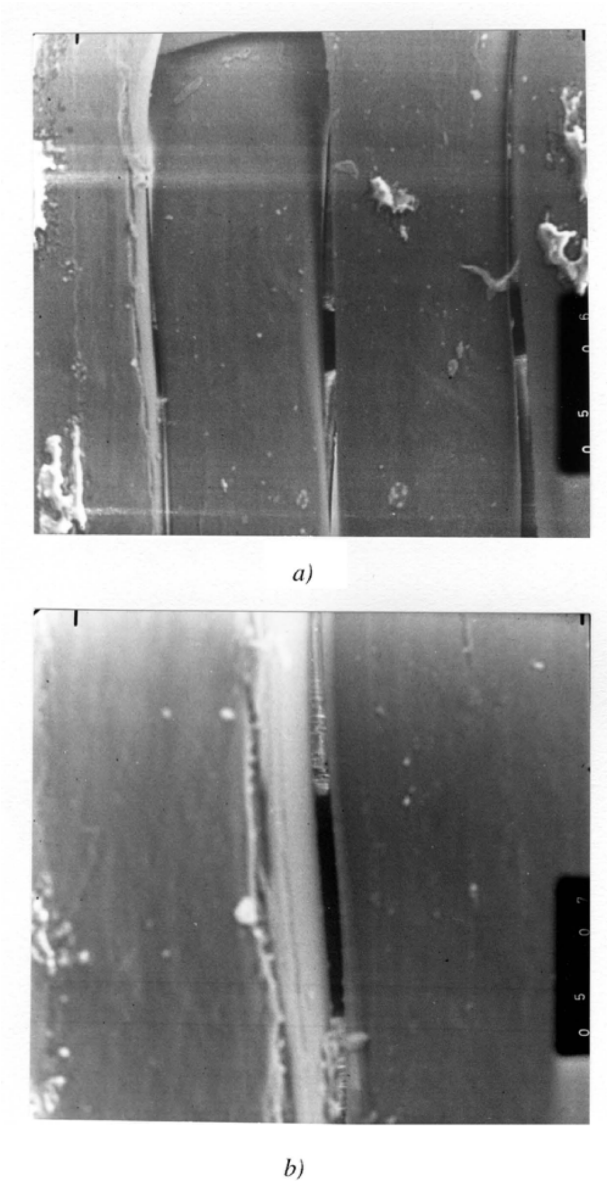


Slika 8.4: Slike vzorca b pri povečavi: a) 63 krat in b) 190 krat.

Kot je razvidno s slike 8.3 a), je vidno nekaj por. Na levi in desni strani slike sta pori podolgovati, kar pomenita, da sta v vsaki pori verjetno po dve ali več hidravličnih por. Pora v spodnjem srednjem delu slike pa je popolnoma "zamrežena". Lahko definiramo vsaj tri pore.

Zaradi takšnega stanja vlaken v preji, in s tem tudi v tkanini, dejansko število hidravličnih por v njej ni znano. Multifilamentna tkanina, ki je prikazana na sliki 8.3 b), ima dve skupini por. Prvo skupino tvorijo pore med nitmi osnove in votka. Ta skupina ima povprečni hidravlični premer okrog 200 μm. Zgoraj ob srednji niti osnove je viden monofilament, ki je odmaknjen od zgornjega votka. Poleg tega so vidne pore med multifilamentnimi nitmi osnove in votka. Te pore tvorijo drugo skupino por. Teh por je zelo veliko število in jih nismo upoštevali pri testiranju metode. Na sliki 8.4 je prikazan vzorec b. Kljub povečavi 190-krat ni možno videti por med nitmi osnove in votka. To je možno na sliki 8.5, ki je povečana do 630 krat. Na sliki 8.5 b), povečava 630 krat, je razvidno, da je pora zelo podolgovata. Razmerje med stranmi pravokotnika je približno 1:6. Iz tega razmerja lahko sklepamo, da je v tej tkanini precej več hidravličnih por, kot je število por med nitmi osnove in votka.

V vzorcu d je gostota po osnovi in votku enaka. Zaradi tega imajo pore kvadratast



Slika 8.5: Slike vzorca b pri povečavi: a) 190 krat in b) 630 krat.

presek in je število hidravličnih por enako številu por med nitmi osnove in votka.

V vzorcu a, bombažna tkanina, ima okrog 45 % por hidravlični premer okrog 30 mikrometrov. Nekaj por ima hidravlični premer okrog 150 mikrometrov. Razpon je izjemno velik. Vzorec b, monofilamentna gosta tkanina, ima precej ožji interval sipanja velikosti hidravličnih premerov. Največji delež por ima hidravlični premer okrog 17 mikrometrov. 12 % por pa ima hidravlični premer okrog 45 mikrometrov. Vmes je minimum na okrog 35 mikrometrov, kar pomeni, da sta v tem vzorcu dve skupini por glede na velikost hidravličnega premera.

Kot je razvidno s slike 8.3 b), je v vzorcu c okrog 60 % por, ki imajo hidravlični premer okrog 20 mikrometrov. To so dejansko pore med monofilamenti. Kot smo že omenili, teh nismo upoštevali pri testiranju metode. Upoštevali smo samo pore med nitmi osnove in votka. Povprečni hidravlični premer teh por je okrog 200 mikrometrov. S slike 8.3 b), vzorec c, so vidne tudi odprtine med monofilamenti v multifilamentni preji. Tudi na sliki 8.5 se jasno vidita dve področji, v katerih so pore.

8.2.4.3 Rezultati testiranja metode

Preglednica 8.1: Tkanine, ki so uporabljene za testiranje metode.

Vzorec	Opis vzorca: tkanina	Interval meritev [μm]	Število pos na 1 cm^2	Gostota osnova/votek
a	Bombažna	160 – 20	452	22/21
b	Gosta monofilamentna	80 – 10	2.200	55/40
c	Multifilamentna	270 – 140	960	32/30
d	Zelo gosta monofilamentna	24 – 12	32.400	180/180

Preglednica 8.2: Vzorec a: bombažna tkanina.

	Suha meritev		Mokra meritev	
Zap. št.	Tlak [cm VS]	Pretok [l/h]	Tlak [cm VS]	Pretok [l/h]
1	1,0	60	6,8	60
2	1,6	150	7,2	150
3	1,8	200	7,6	200
4	2,2	250	8,0	250
5	2,6	300	9,2	300
6	3,2	400	10,6	400
7	4,2	500	12,1	500
8	5,2	600	14,0	600
9	6,4	700	15,8	700
10	8,6	800	17,6	800
11	10,6	900	18,4	900
12	11,8	1000	20,8	1000
13	15,4	1200	24,0	1200
14	18,8	1400	28,0	1400
15	25,4	1600	32,6	1600
16	31,4	1800	35,6	1800
17	37,8	2000	40,0	2000
18	42,6	2200	45,8	2200
19	50,0	2400	52,0	2400
20	60,4	2600	62,6	2600
21	70,2	2800	71,2	2800
22	80,0	3000	80,6	3000

Prvo območje, vzorec c, slika 8.8 je levo na diagramu in se nanaša na pore, ki so med nitmi osnove in votka. Drugo območje je bolj na sredini diagrama in se nanaša na pore med monofilamenti, ki so odmaknjeni proč od multifilamentne preje. Tretje območje (desno) so pore med monofilamenti v nitmi osnove in votka.

V vzorcu d so praktično vse pore skoncentrirane v intervalu med 18 in 19 mikrometrov. Na to kaže tudi krivulja 2 na sliki 8.9 in porazdelitev por, slika 8.13. Ta zelo gosta tkanina ima 32.400 por/cm^2.

V preglednici 8.6 so sumarno prikazani parametri poroznosti. V prvem delu preglednice so prikazane vrednosti parametrov poroznosti v primerih, ko je število por znano;

Preglednica 8.3: Vzorec b: monofilamentna gosta tkanina.

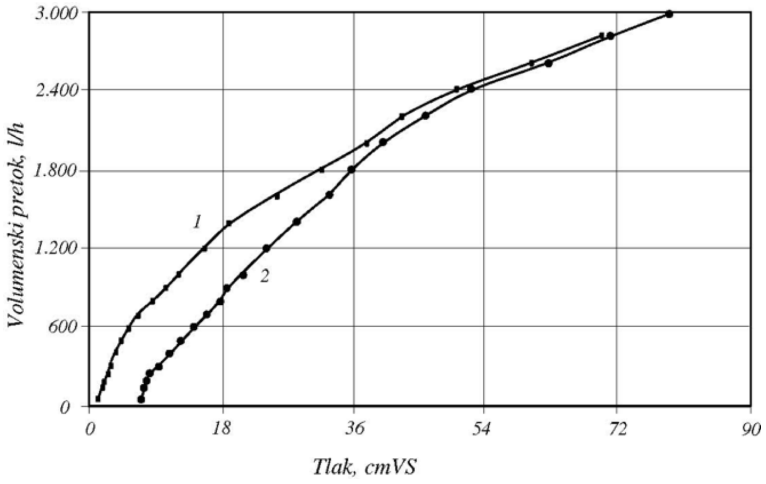
	Suha meritev		Mokra meritev	
Zap. št.	Tlak [cm VS]	Pretok [l/h]	Tlak [cm VS]	Pretok [l/h]
1	182	14	1479	4,1
2	216	29	1661	16
3	333	43	1861	30
4	451	59	1961	42
5	565	73	2028	57
6	865	85	2143	71
7	1345	113	2292	86
8	1879	143	2859	113
9	2492	170	3340	141
10	3147	196	4404	195
11	3938	226	5036	221
12	4936	255	5683	251
13	5616	281	6879	282
14	7795	333	8758	333
15	9938	392	10901	390
16	11135	414	12082	414

Preglednica 8.4: Vzorec c: monofilamentna tkanina.

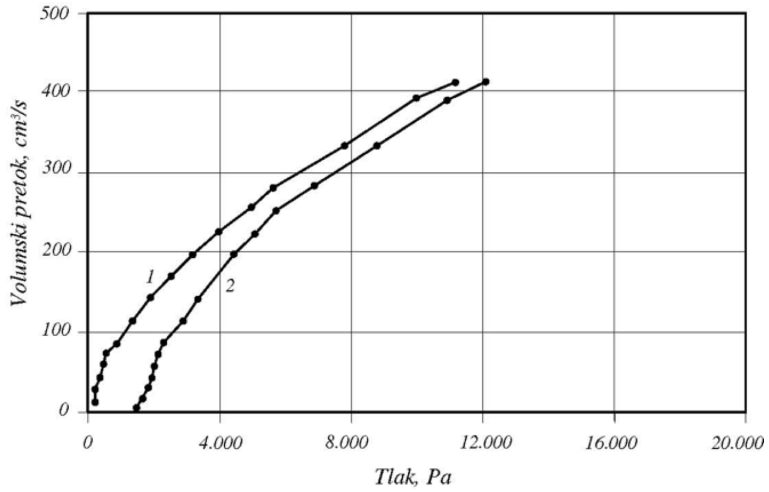
	Suha meritev		Mokra meritev	
Zap. št.	Tlak [cm VS]	Pretok [l/h]	Tlak [cm VS]	Pretok [l/h]
1	1,4	200	4,2	200
2	2,0	300	5,0	300
3	2,6	400	5,2	400
4	3,2	500	5,4	500
5	4,0	600	5,9	600
6	5,0	700	6,5	700
7	6,0	800	7,2	800
8	7,2	900	8,0	900
9	8,4	1000	10,2	1000
10	11,2	1200	13,6	1200
11	15,2	1400	17,4	1400
12	19,2	1600	23,4	1600
13	22,8	1800	27,0	1800
14	27,2	2000	32,1	2000
15	33,8	2200	36,6	2200
16	39,2	2400	40,6	2400
17	46,4	2600	46,8	2600
18	52,8	2800	53,6	2800
19	60,2	3000	60,6	3000

Preglednica 8.5: Vzorec d: monofilamentna zelo gosta tkanina.

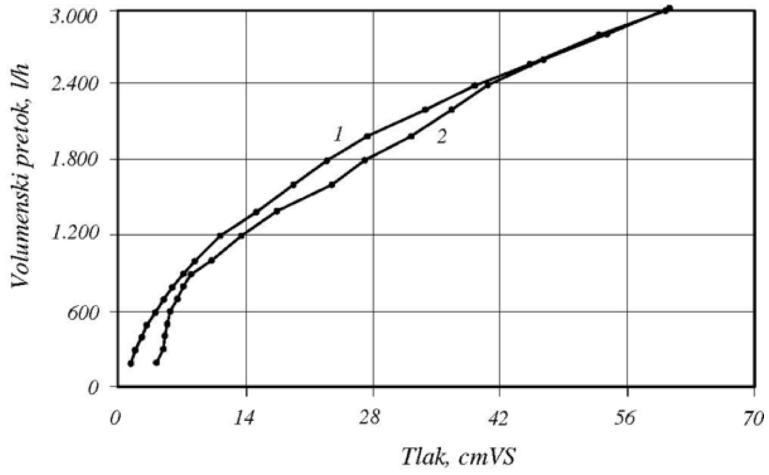
	Suha meritev		Mokra meritev	
Zap. št.	Tlak [cm VS]	Pretok [l/h]	Tlak [cm VS]	Pretok [l/h]
1	0,52	13,89	42,26	0,1
2	1,06	27,78	43	0,5
3	1,46	41,67	44	1
4	1,92	55,56	45	2
5	2,74	69,44	47	3
6	3,34	83,33	48,54	5,56
7	4,54	111,11	49,4	16,67
8	6	138,89	52,06	554
9	7,2	166,67	52,5	555,56
10	8,74	194,44	53,5	560
11	10,66	222,22	53,8	563
12	12,78	250	54	567
13	14,98	277,78	54,5	575
14	19,38	333,33	55	580
15	24,46	388,89	59,66	611,11
16	30,06	444,44	67,34	666,67
17	36,32	500	76,74	722,22
18	43,06	555,56	87,4	777,78
19	50,86	611,11	99,14	833,33
20	59,72	666,67		
21	69,32	722,22		
22	79,12	777,78		
23	89,46	833,33		



Slika 8.6: Diagram odvisnosti hitrosti pretoka zraka od razlike tlakov pri vzorcu a. Legenda: 1 – pretok zraka skozi suh vzorec, 2 – pretok zraka skozi vzorec namočen z n-butanolom.



Slika 8.7: Diagram odvisnosti hitrosti pretoka zraka od razlike tlakov pri vzorcu b. Legenda: 1 – pretok zraka skozi suh vzorec, 2 – pretok zraka skozi vzorec namočen z n-butanolom.

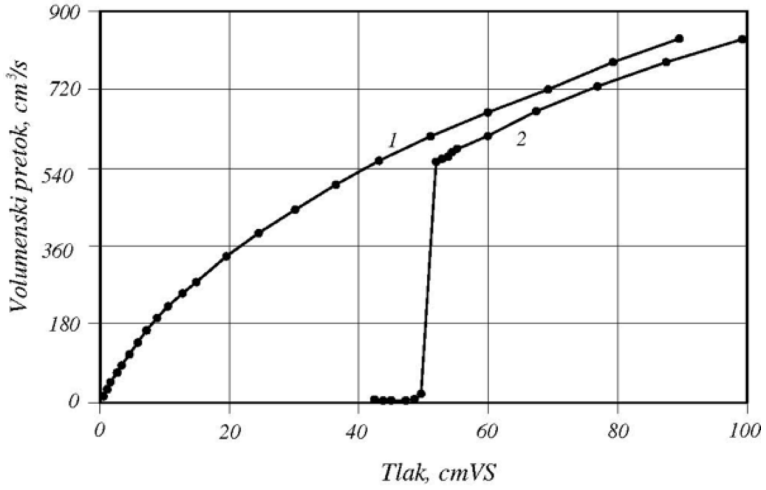


Slika 8.8: Diagram odvisnosti hitrosti pretoka zraka od razlike tlakov pri vzorcu c. Legenda: 1 – pretok zraka skozi suh vzorec, 2 – pretok zraka skozi vzorec namočen z n-butanolom.

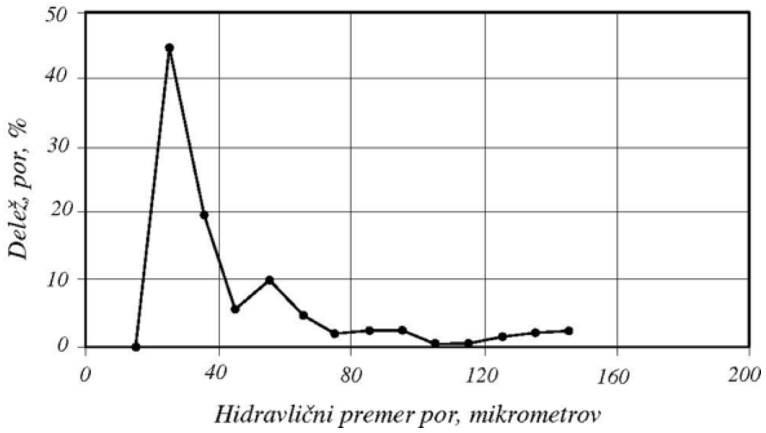
v programu je aktivirana prva procedura. V drugem delu preglednice so prikazane vrednosti parametrov poroznosti vzorcev a in b pri katerih je prevelika vrednost mejnega koeficienta a_0. V vzorcu a je previsoka vrednost koeficienta a_0 posledica delitve por med nitmi osnove in votka na večje število por, ki imajo manjši hidravlični premer (bombažna tkanina). V primeru vzorca d pa je previsoka vrednost koeficienta a_0 posledica oblike por. Posamezne pore imajo tudi več kot 6-krat večjo dolžino kot širino pore. Zaradi tega je število hidravličnih por večje kot število por med nitmi osnove in votka. Dokaz za to trditev so rezultati meritev dolžin in širin por, ki so prikazane v preglednici 8.7.

Parametri v preglednici 8.6 pomenijo:

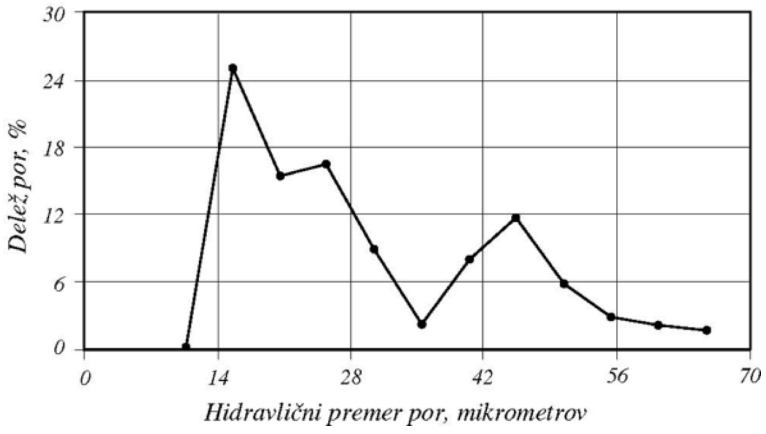
- b – eksponent iz enačbe (8.4),
- h [μm] – širina intervala, v katerem so porazdeljene velikosti hidravličnih premerov por,
- m – število velikostnih razredov porazdelitve por,



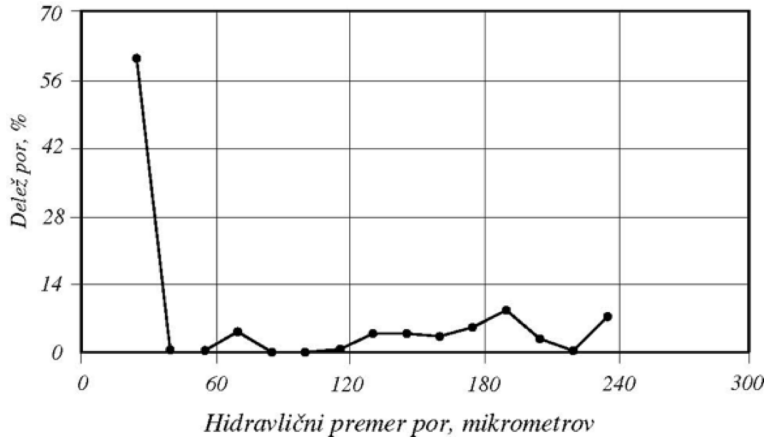
Slika 8.9: Diagram odvisnosti hitrosti pretoka zraka od razlike tlakov pri vzorcu d. Legenda: 1 – pretok zraka skozi suh vzorec, 2 – pretok zraka skozi vzorec namočen z n-butanolom.



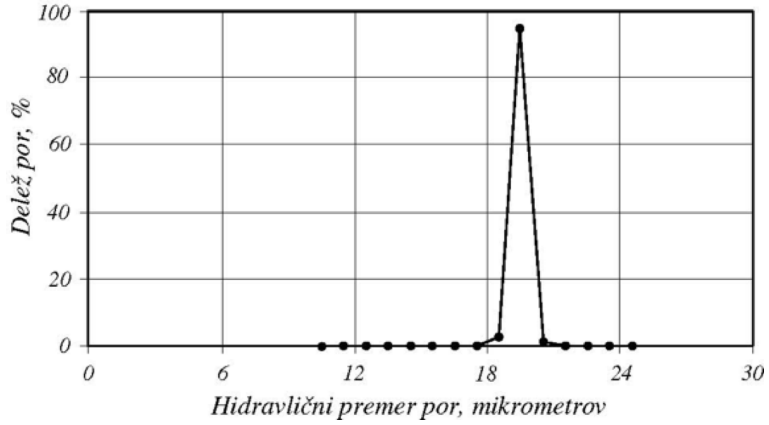
Slika 8.10: Diagram porazdelitve por v vzorcu a.



Slika 8.11: Diagram porazdelitve por v vzorcu b.



Slika 8.12: Diagram porazdelitve por v vzorcu c.



Slika 8.13: Diagram porazdelitve por v vzorcu d.

Preglednica 8.6: Vrednosti parametrov poroznosti testnih tkanin.

		Vzorec			
Postopek testiranja	Parameter	a	b	c	d
	b	0,5794	0,6647	0,8329	0,7174
	h [μm]	14	10	13	2
	m	10	7	10	7
Vrednost parametrov	n_t	452*	2.200	960	32.400
poroznosti, ko je	d [μm]	45,04	31,37	200,45	18,84
število por znano	d_t [μm]	53**	30	199	18,78
(prva procedura)	P [%]	0,98	2,07	31,32	9,06
	P_t [%]	1,00**	3,43	29,84	8,98
	a_0	9,4074	2,3872	0,2800	0,8791
Vrednost parametrov	d_1 [μm]	45,00	31,35		
poroznosti, ko število	P_1 [%]	6,96	3,87		
por ni znano	n_1	3.314	4.115		
(druga procedura)	a_0	1,28	1,28		

- n_t – dejansko število por med nitmi osnove in votka na cm^2 (produkt gostote niti po osnovi in gostote po votku na 1 cm širine oziroma dolžine tkanine; prva procedura – število por je znano),
- n_l – izračunano število hidravličnih por med nitmi osnove in votka na 1 cm^2, ko število por (ali število hidravličnih por) ni znano (druga procedura – število por ni znano),
- d [μm] – povprečni hidravlični premer por,
- d_t [μm] – realni, optično izmerjeni povprečni hidravlični premer por; za vzorce b, c in d; pore v vzorcu a so slabo definirane,
- P [%] – povprečna odprta hidravlična površina za pretok fluida,
- P_1 [%] – povprečna odprta hidravlična površina (druga procedura),
- P_t [%] – povprečna odprta hidravlična površina, ki je izračunana na podlagi rezultatov optičnih meritev velikosti por;
- a_0 – koeficient a enačba (8.5) pod predpostavko, da ima eksponent b minimalno vrednost (b = 0,5),
- * – število por, ki smo ga dobili na osnovi produkta gostot osnove in votka,
- ** – ta povprečni hidravlični premer se nanaša na 452 por med nitmi osnove in votka s tem, da je v vsaki pori med nitmi osnove in votka upoštevana le ena tipična pora.

V preglednici 8.7 so prikazane dimenzije 50 por v vzorcu b. Iz nadaljnje analize teh rezultatov lahko ugotovimo, da drži predpostavka, da sta lahko v eni pori med nitmi osnove in votka dve ali več hidravličnih por. Število por med nitmi osnove in votka v vzorcu b) je 2.200 (prva procedura).

Preglednica 8.7: Rezultati merjenja dimenzij petdesetih por na fotografijah vzorca b, ki so bile posnete na scanning elektronskem mikroskopu pri povečavi 640-kr.

Statistični parameter	w [μm]	l [μm]	d_t [μm]	P_{real} [μm^2]	P_{hidr} [μm^2]	l/d
Srednja vrednost	20,13	66,06	30,00	1.364,67	786,29	2,50
Standardna deviacija	7,77	13,75	10,19	664,13	461,38	1,19
Minimum	4,76	23,81	8,82	287,12	61,07	1,04
Maksimum	34,92	87,30	46,91	2.519,68	1.727,43	6,84
Vsota				68.233,43	39.314,56	

Korigirano število por (druga procedura) je 4.115, kar je približno 2-krat več. Vrednost koeficienta a_0, ki smo ga izračunali po prvi proceduri, je 2,3872, kar je precej več od teoretično maksimalne vrednosti. Po korekciji (druga procedura) je njegova vrednost 1,28, kar je maksimum. Po drugi strani razmerje med dolžino pore in povprečnim hidravličnim premerom pore je 2,50. Če upoštevamo to dejstvo, potem lahko sklepamo, da sta v eni pori med nitmi osnove in votka v povprečju vsaj dve hidravlični pori. To se dobro ujema s korigiranim številom por. Pri tem moramo upoštevati, da je bilo izmerjenih le 50 por ali 2,3 % vseh por na 1 cm^2 med nitmi osnove in votka. Kot je razvidno

iz preglednice 8.7, je sipanje rezultatov izredno veliko. Saj je minimalna vrednost $l/d =$ 1,04 in maksimalna 6,84. Minimalna vrednost predstavlja kvadratasto poro, v kateri je le ena hidravlična pora. Maksimalna vrednost pa predstavlja poro, v kateri je možno spraviti več kot dve hidravlični pori, ki imata povprečni hidravlični premer.

8.2.4.4 Razprava o metodi

Zakaj razprava o metodi in ne o rezultatih. Razprava o metodi je lahko bolj kompleksna kot o nekaj rezultatov, ki so predstavljeni v tej knjigi. Pri razvoju metode je imela osnovno vlogo intuicija. Če izvzamemo dobro znane enačbe od (8.1) do (8.5), je vse drugo daleč od hidrodinamike, ki je bila razvita pretežno v 19. in prvi polovici 20. stoletja. Znanost kot tehnika se razvijata evolucijsko, kar pomeni nadgrajevanje in poglabljanje že doseženega. Praviloma se zmeraj nekje začne (Arhimedova spirala, Pitagorov teorem, Mendeljejev sistem elementov, sferna geometrija Lobačevskega, Boollova algebra ipd.).

Preden smo se lotili razvoja "Metode za ugotavljanje parametrov poroznosti v ploskovnih tekstilijah," so že obstajale številne metode za ugotavljanje poroznosti snovi in izdelkov. Vendar ni bila nobena dovolj primerna za ugotavljanje poroznosti ploskovnih tekstilij. Avtorja sta ubrala svojo pot in poskušala rešiti problem ugotavljanja poroznosti ploskih tekstilij po drugi poti. Pri tem sta uporabila znano mejno enačbo iz aerodinamike , $v = 4\sqrt{h}$, kar se je izkazalo za veliko sistemsko pomanjkljivost. To je eden od primerov napačne uporabe rezultatov obstoječe teorije. Čez čas je bila metoda modificirana tako, da je za linearno hitrost pretoka fluida (zraka) uporabljena bolj splošna rešitev, $v = ah^b$. Modificirana metoda je dala rezultate, ki so se dobro ujemali z eksperimentalnimi rezultati, ki so jih dale meritve na optičnem mikroskopu in scanning elektronskem mikroskopu. Posebno je dobro bilo ujemanje pri vzorcih tkanin, ki so imeli dobro definirane pore med nitmi osnove in votka in je bil povprečni hidravlični premer por manjši kot 100 μm. V teh primerih je bila tudi višja vrednost eksponenta b, ki se je gibala med 0,7 in 0,85. Dejansko se v zelo gostih tkaninah vrednosti eksponenta b približuje vrednosti 1. To velja za pretok skozi suh vzorec.

Ker ni druge možnosti, je bila upoštevana vrednost eksponenta b, ki smo ga dobili pri regresijski krivulji suhega pretoka, pri računanju števila por v določenih velikostnih razredih na podlagi meritev pretoka skozi omočen vzorec. Ker pa je v omočenem vzorcu pri določenem tlaku odprt delež por, ki imajo določen hidravlični premer in so pore, ki imajo manjši hidravlični premer pri opazovanem tlaku še zmeraj zapolnjene s tekočino, je bilo pričakovati, da so pogoji pretoka nekoliko spremenjeni. Pri suhem vzorcu so vse pore odprte za pretok, ne glede na velikost hidravličnih premerov.

Če smo vzeli vrednost eksponenta b kot srednjo vrednost med 1 in izmerjeno vrednostjo b pri suhem pretoku $(1 + b)/2$, smo dobili boljše ujemanje z eksperimentalnimi rezultati, kot če smo vzeli b, ki smo ga dobili pri regresijski analizi pretoka skozi suh vzorec. Ta operacija ni imela solidne teoretične podlage. Pri uporabi eksponenta b je bila storjena še ena napaka. Pri regresijski analizi je upoštevan celotni interval meritev, kar je korektno. Če pa uporabimo tako izračunan eksponent b pri računanju števila por v določenih velikostnih razredih, pa praviloma ni pravilen. Izjema je, če obstoje pore tudi pri tlaku, ki smo ga uporabili na koncu intervala merjenja pretoka zraka skozi suh vzorec. Ker vnaprej ne vemo, kje so najmanjše pore, v našem primeru med nitmi osnove in votka, moramo to najprej ugotoviti in na podlagi tega korigirati interval meritev pretoka skozi suh vzorec tako, da upoštevamo zgornjo mejo intervala meritev le do tlaka, pri katerem smo še ugotovili obstoj por (pore, ki imajo najmanjši hidravlični premer).

Eksponent b, ki smo ga izračunali za korigirani interval meritev pretoka zraka skozi suh vzorec, uporabimo pri računanju števila por na podlagi rezultatov meritev skozi omočen vzorec. Pri tem smo predpostavili, da je enak režim pretoka (laminaren, turbulenten ali mešan) skozi suh in omočen vzorec pri enakem tlaku. Če ta predpostavka drži, potem bomo uporabili dejansko vrednost eksponenta b in ne srednje vrednosti med b in 1. Ni posebno težko postaviti določeno hipotezo. Vendar mora imeti ta jasno teoretično podlago in kar je še bolj pomembno, hipoteza (predpostavka) mora biti potrjena z eksperimentalni rezultati.

V enačbi (8.4) ne poznamo vrednosti parametrov a in P. Znan je le njihov produkt A. Pri izračunu števila por v določenem velikostnem razredu, ko število por poznamo, izberemo vrednost koeficienta a, ki nam da znano število por. To pomeni, da vrednost koeficienta a vpliva na število por. Po drugi strani vrednost eksponenta b vpliva na vrednost povprečnega hidravličnega premera por. Glede na velikost por med nitmi osnove in votka smemo predpostaviti, da je pretok zraka skozi pore laminaren.

Kriterij za oceno režima pretoka je Reynoldsovo število Re, enačba (8.17).

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu}, \tag{8.17}$$

kjer so ρ gostota fluida, u hitrost fluida, d notranji premer pore in μ dinamična viskoznost fluida (kinetična viskoznost je $\ni = \mu/\rho$). S terminom fluid razumemo pline in tekočine. Če je njegova vrednost večja kot 2.000, je pretok turbulenten. Pri manjših vrednostih pa laminaren. Obstoji tudi vmesno območje, ki ni popolnoma definirano. Ker je kinematična viskoznost zraka $1{,}48{\cdot}10^{-5}$ m^2/s in so premeri por d od 10^{-5} m do 10^{-4} m, bi morala biti hitrost zraka okrog 3.000 m/s, da dosežemo turbulentno gibanje zraka skozi pore. To je seveda izjemna, praktično nedosegljiva hitrost.

Re je premo sorazmeren produktu linearni hitrosti pretoka zraka in premera por ter obratno sorazmeren kinetični viskoznosti zraka. Če vzamemo maksimalno možno hitrost pretoka zraka skozi pore, enačba (8.5), pri tlaku 9,80665 kPa (1.000 mmVS), bi dobili vrednost 126 m/s. Pod tem tlakom bi se odprle pore, ki imajo hidravlični premer okrog 30 mikrometrov in večji; pod pogojem, da je tkanina omočena z vodo. Kot vidimo, ta tlak zadostuje za naše testiranje. Če je višji, bi se odprle manjše pore. Zaradi tega ne bi bistveno vplival na povečanje vrednosti Re. Pod temi pogoji bi bile naslednje vrednosti Re pri naših vzorcih:

- vzorec a: $Re = 383$
- vzorec b: $Re = 267$
- vzorec c: $Re = 1.706$
- vzorec d: $Re = 160$

Pri opazovanih vzorcih so dejanske linearne hitrosti precej manjše kot 126 m/s. Iz tega izhaja, da je pretok skozi opazovane vzorce laminaren.

Če je pretok laminaren, potem je linearna hitrost pretoka zraka enaka pri enakem tlaku skozi suh in omočen vzorec. Razlika je lahko v volumenski hitrosti pretoka, če pri opazovanem tlaku niso vse pore odprte (ni iz vseh por iztisnjena tekočina). V začetni fazi merjenja pretoka skozi omočen vzorec se odprejo največje pore in je njihov povprečni hidravlični premer večji, kot je povprečni hidravlični premer vseh por v tkanini, kar je obenem povprečni hidravlični premer por v suhem vzorcu. Vendar se odprejo pore v nekaj začetnih razredih pri nižjem tlaku, kot je tlak, ki je potreben za odpiranje

por v velikostnem razredu, ki pomeni povprečje vseh hidravličnih por razen v primeru, ko obstoja majhno sipanje velikosti por, ki so le v nekaj velikostnih razredih.

Bolj primerno je, če opazujemo hitrosti pri tlakih, ki so potrebni za iztiskanje tekočine iz por, ki imajo enako vrednost, kot je vrednost povprečja por. Poleg tega smo v zgornjem primeru uporabili vodo, ki ima površinsko napetost 72 dyn/cm (0,072 cN/cm). Dejansko uporabljamo n-butil alkohol, ki ima za približno 3-krat manjšo površinsko napetost, to je 25 dyn/cm (0,025 cN/cm). V tem primeru bi imel naslednje vrednosti *Re*:

- vzorec a: $Re = 18,2$
- vzorec b: $Re = 15,3$
- vzorec c: $Re = 38,7$
- vzorec d: $Re = 11,9$

To so zanemarljive vrednosti v primerjavi z 2.000, ki je mejna vrednost med laminarnim in turbulentnim gibanjem zraka. Prej omenjeno predpostavko o enakem režimu pretoka zraka skozi suh in omočen (če je tekočina iztisnjena iz vseh por) vzorec bi lahko dopolnili tako, da velja naslednja predpostavka: "Linearna hitrost pretoka zraka skozi suh in omočen vzorec je enaka pri enakem tlaku."

8.3 Seznam oznak poglavja

Oznaka	Enota	Opis
α	cN/cm	površinska napetost fluida v pori
A		koeficient
a		koeficient
a_0		minimalna vrednost koeficienta a
a^*		koeficient
b		koeficient, eksponent
b_0		minimalna vrednost koeficienta b
b^*		koeficient
d	μm	hidravlični premer pore
d_i	μm	srednji hidravlični premer por v i-tem velikostnem razredu
d_t	μm	optično izmerjen srednji hidravlični premer por
f	μm^2	ploščina prečnega preseka pore
g	m/s^2	standardni zemeljski pospešek
h	μm	širina intervala razreda velikosti por
l	μm	dolžina prečnega prereza pore
m		število razredov por
n_{cj}		računsko število por
n_i		število por i-tega velikostnega razreda por
n_l		izračunano število hidravličnih por med nitmi osnove in votka na 1 cm^2
n_t		realno število por na 1 cm^2
o	μm	obseg prečnega prereza pore
P	%	povprečna odprta hidravlična površina za pretok fluida

Nadaljevanje na naslednji strani

Nadaljevanje s prejšnje strani

Oznaka	Enota	Opis
P_1	%	povprečna odprta hidravlična površina za pretok fluida (druga procedura)
P_t	%	povprečna odprta hidravlična površina za pretok fluida izračunana iz optičnih meritev
P_{real}	μm^2	realna velikost odprte površine na 1 cm^2
P_{hidr}	μm^2	velikost odprte površine na 1 cm^2 izmerjena z metodo
p	Pa	tlak
p_i	Pa	srednji tlak i-tega velikostnega razreda por
ρ	g/cm^3	gostota fluida v pori
w	m	širina prečnega prereza pore
V_i	$cm^3/cm^2.s$	volumski pretok zraka skozi vse velikostne razrede do vključno i-tega
V_i^*	$cm^3/cm^2.s$	volumski pretok zraka skozi i-ti velikostni razred por
v	cm/s	hitrost
v_i	cm/s	linearna hitrost pretoka zraka skozi i-ti velikostni razred por

8.4 Literatura

[1] D. Jakšić. Razvoj nove metode za ugotavljanje števila, velikosti in porazdelitve por v tekstilnih izdelkih iv.del. Technical report, Univerza v Ljubljani, VTOZD Tekstilna tehnologija, 1978.

[2] N. A. Arhangeljskij. *Vozduhopronicaernost tkanej. Ekspluatacionye svojstva tkanej i sovremennije metody ih ocenki*. Rostehizdat, Moskva, 1960.

[3] D. Jakšić. Projektiranje odeće. *Zbornik radova plenarnih i sekcijskih predavanja; II. Jugoslovenski simpozijum o hemiji i tehnologiji vlakana i tekstila; Beograd*, 1982.

[4] E. W. Washburn. Note on a method of determining the distribution of pore sizes in a porous material. *Procceedings of the National Academy of Science of the USA*, 7(4):115–116, 1921.

[5] H. L. Ritter and L. C. Drake. Macropore-size distributions in some typical porous substances. *Industrial & Engeneeting Chemistry Analitycal*, 17:782, 1945.

[6] E.C. Childs and N. Collis-George. The permeability of porous materials. *Proceedings of the Royal Society A*, 201(1066):393, 1950.

[7] H. L. Ritter and L. C. Erlich. Pore size distribution in porous materials. *Analitical Chemistry*, 20(7):665–670, 1948.

[8] C. G. Shull and L. C. Roess. X-ray scattering at small angles by finely-divided solids. i. general approximate theory and applications. *Journal of Applied Physics*, 18(3):295, 1947.

[9] E. P. Barrett, L. G. Joyner, and P. P. Halenda. The determination of pore volume and area distributions in porous substances. i. computations from nitrogen isotherms. *Journal of the American Chemical Society*, 73(1):373–380, 1951.

[10] M. Ternana and O. M. Fuler. On the determination of pore size from nitrogen adsorption measurements. *Industrial Engineering Chemistry Fundamentals*, 51(1):106–110, 1973.

[11] D. E. Felch and F. O. Shuck. Determination of pore-size distribution in porous materials. test of a proposed method. *Industrial Engineering Chemistry Fundamentals*, 10(2):299–303, 1971.

[12] S. Torquato and M. Avellaneda. Diffusion and reaction in heterogeneous media: Pore size distribution, relaxation times, and mean survival time. *The Journal of chemical physics*, 95(9):6477–6489, 1991.

[13] D. Jakšić and N. Jakšić. Porosity of the flat textiles. *Dubrovski P. (ur.), Woven Fabric Engineering.*, pages 255–307, 2010.

[14] N. Jakšić. Računalniški aplikacijski program za ugotavljanje parametrov poroznosti. Technical report, Turboinštitut, Ljubljana.

POGLAVJE 9

Pretok vodne pare skozi oblačila

Kazalo

9.1 Uvod **178**
9.2 Teoretične osnove **180**
9.3 Močenje oblačila **183**
9.3.1 Teoretične osnove močenja oblačila 183
9.3.1.1 Uvod 183
9.3.1.2 Vpliv poroznosti na prodiranje vode v tkanino 185
9.3.1.3 Proces močenja v realnih razmerah 187
9.3.1.4 Ilustracija mehanizma močenja oblačila 188
9.4 Metode za preizkušanja vodo odbojnega učinka na tkaninah in primernost njihove uporabe **193**
9.4.1 Metode preizkušanja vodo odbojnega efekta na tkaninah 193
9.4.1.1 Spray test metoda 193
9.4.1.2 Hidrostatična metoda – "mulda" 193
9.4.1.3 Hidrostatična metoda na Šoperjevem aparatu 193
9.4.1.4 Hidrostatična metoda 2 na Šoperjevem aparatu . . . 194
9.4.1.5 Metoda potapljanja vzorca 194
9.4.1.6 Bundesmannova metoda 194
9.5 Primernost metod **197**
9.5.1 Spray test metoda 197
9.5.2 Hidrostatična metoda – "mulda" 197
9.5.3 Hidrostatična metoda na Šoperjevem aparatu 199
9.5.4 Hidrostatična metoda 2 na Šoperjevem aparatu 199
9.5.5 Metoda potapljanja vzorca 200
9.5.6 Bundesmannova metoda 200
9.6 Seznam oznak poglavja **200**
9.7 Literatura **201**

9.1 Uvod

Hitrost pretoka vodne pare skozi oblačilo je zelo pomemben parameter za oceno uporabne vrednosti oblačila. S hitrostjo pretoka razumemo hitrost pretoka vodne pare s površine kože skozi plasti oblačila v okolje. Na površini kože izhlapeva izločeni znoj. Če je izločanje znoja večje kot je hitrost izhlapevanja, potem izhlapi le določen delež izločenega znoja. Če je stanje organizma takšno, da se poveča hitrost izločanja znoja, potem je navadno zaželeno, da izhlapi ves izločeni znoj. Kot smo že omenili v četrtem poglavju, se povečuje hitrost izločanja znoja kot reakcija na segrevanje organizma.

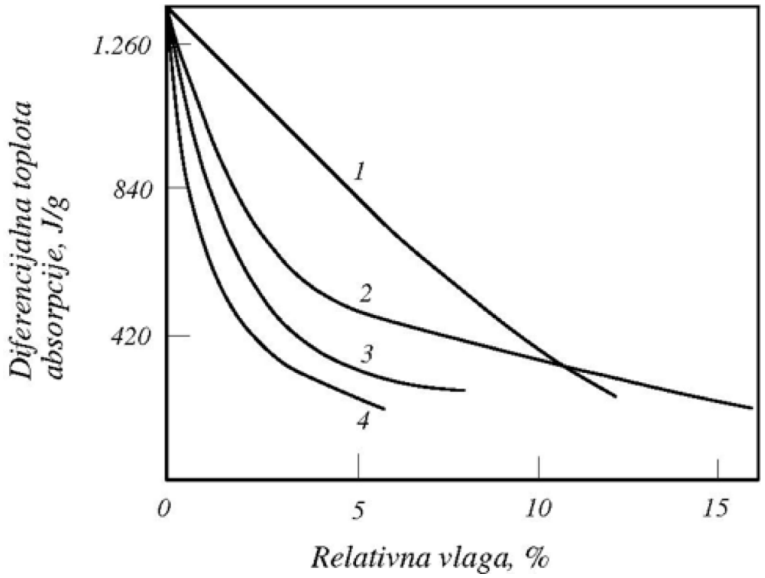
Za izhlapevanje izločenega znoja se porabi določena količina energije. Posledica tega je hlajenje površine kože in podkožnega tkiva. Zaradi tega se ohlaja kri, ki iz notranjosti telesa priteka v podkožno tkivo. Ko se venozna kri vrača v notranjost skozi segrete mišice, ima vlogo hladilne tekočine. Na ta način obdrži vsaj notranjost organizma približno konstantno temperaturo na ravni 37 °C. Ta se lahko poveča le, če je organizem izpostavljen zelo intenzivnemu fizičnemu delu, visokim temperaturam okolja ali pa med boleznijo, ko je termo-statika nemočna glede na intenziteto procesov v organizmu, ki sproščajo preveč toplote. Znojne žleze delujejo tudi takrat, ko smo v območju ugodja ali celo, ko se organizem hladi. V teh primerih izločanje znoja ni intenzivno, zato so navadno okoliščine za izhlapevanje celotne količine izločenega znoja ugodne. Na hitrost izhlapevanja vpliva v precejšnji meri tudi oblačilo. To se pravi, da je možno v določeni meri uravnati hitrost izhlapevanja znoja z izbiro primernega oblačila glede na upor pretoku vodne pare, ki ga ima oblačilo.

V vročem in suhem okolju, kot je, na primer, pri nas (suhi) Kras poleti ali na splošno puščavska področja, je priporočljivo zmanjšati zunanjo toplotno obremenitev in hitrost izhlapevanja znoja, saj se pojavlja pri tem problem dehidracije organizma, ki ni nič manjši problem kot pregretje le-tega, zlasti če ni pitne vode v zadostnih količinah. S primernim oblačilom lahko dosežemo zmanjšanje toplotne obremenitve iz okolja kot tudi hitrost izhlapevanja znoja.

Predpostavimo, da je oseba oblečena v enoplastno oblačilo, ki nima visoke vrednosti toplotne izolacije. V tem primeru je lahko ta plast izdelana iz bombaža ali viskoznih vlaken. V primeru, da se opazovana plast oblačila namoči z znojem, ta ne bo izhlapeval s površine kože, ampak s površine oblačila, saj je v takšnih pogojih navadno temperatura okolja višja od temperature na površini kože. Zaradi tega bo izhlapeval znoj v glavnem s površine oblačila. Pri tem se ne uporabi samo toplota, ki je potrebna za izhlapevanje vode oziroma znoja, ampak moramo upoštevati tudi dejstvo, da je znoj vezan na vlakna in je potrebna še dodatna energija za premagovanje teh veznih sil. To lahko najbolj ilustriramo z diferencialno toploto močenja, ki je prikazana na sliki 9.1 [1].

Vidimo, da se pri absorpciji vode na 1 gram absolutno suhega vlakna sprosti 1,26 kJ toplote. Pri volni je ta vrednost nekoliko večja. Pri obratnem procesu – sušenju, moramo poleg toplote, ki je potrebna za izhlapevanje, privesti še toploto, ki je potrebna za razbitje vezi med vlaknom in molekulami vode. Pri popolnem sušenju bi bilo to 1,26 kJ/g vlaken.

To seveda velja za mono molekulsko plast vode, ki je neposredno absorbirana na površini vlaken oziroma na elementih strukture vlaken. Naslednje plasti imajo manjšo energijo vezi, kot vidimo tudi s slike 9.1. Pri približno 8 % relativne vlage zraka, ki obdaja bombažno plast oblačila, potrebujemo le še približno 0,3 kJ/g. Vlogo absorpcijske toplote lahko ilustriramo na nekaj primerih. Moški volneni jopič z maso 1,5 kg odda v okolje 945 kJ toplote, če ga damo iz prostora, v katerem je temperatura 18 °C in 45 % relativne vlage v prostor (na prosto), kjer je temperatura 5 °C in 95 % relativne vlage, bo



Slika 9.1: Odvisnost diferencialne toplote absorpcije od relativne vlage pri celuloznih vlaknih in volni. Legenda: 1 – volna, 2 – viskoza, 3 – bombaž, 4 – acetat.

oseba potrebovala približno eno uro, da proizvede to količino toplote pod pogojem, da se sprehaja po ravni stezi s hitrostjo 3 km/h. Prej omenjena toplota je toplota absorpcije vode. Pri obratnem procesu – desorpciji, ko oseba z omenjenim jopičem pride iz prostora, ki ima temperaturo 5 °C in 95 % relativne vlage, v prostor, ki ima temperaturo l8 °C in 45 % relativne vlage, se bo omenjeni jopič začel sušiti.Pri tem se bo porabila določena količina toplote, ki je nujna za izhlapevanje odvečne vode glede na temperaturo in relativno vlago okolja. Poleg tega se bo porabilo še 945 kJ za premagovanje vezi med molekulami vlakna in molekulami absorbirane vode. Ta dodatna količina ima pozitivno vlogo pri hlajenju organizma v vročem okolju. Poleg tega se zaradi tega upočasni izhlapevanje znoja s površine oblačila in tako zmanjša izguba tekočine.

Zaradi primerjave si oglejmo nekaj vrednosti. Če povečamo relativno vlago okoliškega zraka s 40 % na 70 % pri nespremenjeni temperaturi, odda, zaradi absorpcije vlage kg mase: volne l60 kJ; bombaža – 84 kJ; viskoznega rajona – 50 kJ; najlona – 42 kJ in terilena – 4,2 kJ. Iz tega vidimo (če opazujemo obratni proces), da izgubimo največ tekočine, če je omenjena plast oblačila izdelana iz PES vlaken in precej manj, če je izdelana iz viskoznega rajona, ki zelo ugodna – „hladi“ poleti, ko je temperatura visoka. Poleg tega ima večjo vrednost koeficienta toplotne prevodnosti kot ostala omenjena vlakna in v njej ne nastaja statična elektrika kot pri nekaterih sintetičnih vlaknih; ta pa lahko precej draži površino kože.

V mrzlem in vlažnem vremenu nam absorbirana toplota omogoča pridobitev dragocenega časa, ki ga potrebuje organizem, da se prilagodi spremembi okolja – prehodu iz toplega in suhega v mrzlo in vlažno okolje. Po končanem procesu absorpcije vlage se ta veže v oblačilu, posebno, če je to izdelano iz naravnih vlaken. Posledica tega je povečanje vrednosti koeficienta toplotne prevodnosti, kar pomeni tudi zmanjšanje vrednosti toplotne izolacije. Zaradi tega takšni materiali niso najbolj primerni v mrzlem in vlažnem okolju oziroma v mrzlem okolju, če je vsaj občasno intenziteta aktivnosti takšna, da pride do prevelike hitrosti izločanja znoja. Količina znoja, ki ni izhlapel, se nabira v oblačilu in povzroča zmanjšanje toplotne izolacije oblačila. V neposredni zvezi z omenjenimi pojavi je upor pretoku vodne pare skozi oblačilo. Upor pretoku vodne pare lahko izrazimo z debelino plasti mirnega zraka, izraženega v mm ali cm. Na upor

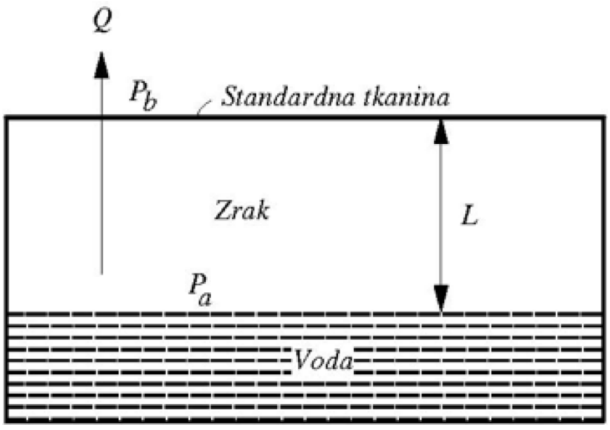
pretoku vodne pare vpliva v precejšnjem obsegu vrsta vlaken, iz katerih je dana tkanina izdelana; verjetno zaradi prej omenjenega mehanizma absorpcije vode. Tako so na primer pri različnih tkaninah izmerili naslednje vrednosti upora, izraženega v mm mirne plasti zraka [2]: bombažne tkanine 0,7 do 3,4; volnene 1,3 do 6; viskozne 0,9 do 4,9; PA 0,07 do 2,1; krzno 2,8 do 23,6 in tkanine iz različnih sintetičnih vlaken 0,7 do 5,8 mm. Kot vidimo iz rezultatov, vpliva verjetno na upor pretoka vodne pare poleg vrste vlaken tudi konstrukcija tkanin.

9.2 Teoretične osnove

Opazujmo stanje, ko je vsa površina kože prekrita z znojem. Na površini kože je nasičeni parni tlak tako kot nad vodno gladino, ki ima enako temperaturo. Ker je precej težje meriti hitrost izhlapevanja znoja oblečene kot gole osebe, poglavje 4, lahko hitrost izhlapevanja merimo s pomočjo posebne aparature. Osnovna shema je prikazana na sliki 9.2. V valjasti posodi, ki je prekrita s tkanino, je voda. Razdalja od površine vode do tkanine je označena z L. "Negibni" zrak v posodi in tkanina na vrhu posode, ki ju bomo imenovali standardna tkanina, se upirata pretoku vodne pare s površine vode v posodi, v okolje. Pri tem vodna para lahko prehaja le skozi tkanino. Da bi voda iz posode izhlapevala, mora biti parni tlak v posodi večji od parnega tlaka v okolju. Omenjeni upor lahko izračunamo z enačbo (9.1) [3].

$$R = \frac{d}{\mu} \quad ; \quad Q = (p_a - p_b)\frac{At}{R} \tag{9.1}$$

kjer so R upor pretoku vodne pare, μ difuzijski koeficient vodne pare, A ploščina (površina) skozi katero prodira vodna para, t čas meritve, p_a tlak vodne pare na površini vode v posodi, p_b tlak vodne pare na zunanji površini standardne tkanine, Q količina vodne pare, ki preide iz posode v okolje v času t.



Slika 9.2: Osnovna shema merjenja upora pretoku vodne pare.

Hitrost pretoka vodne pare na enoto površine v enoti časa lahko izrazimo z enačbo (9.2).

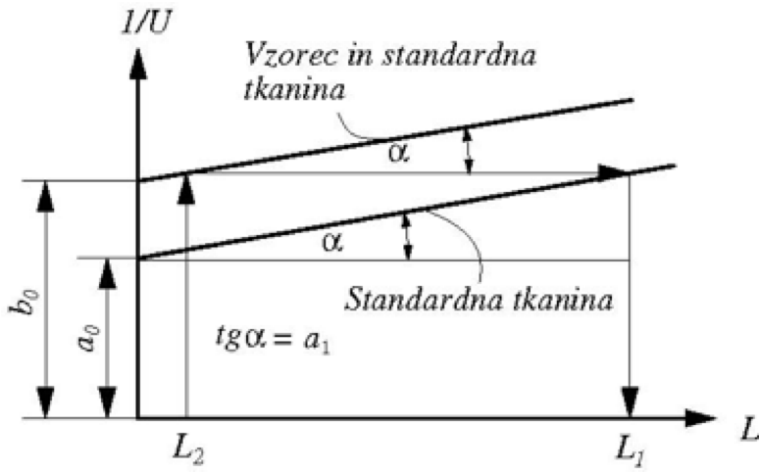
$$U = \frac{Q}{At} \tag{9.2}$$

Po drugi strani je hitrost pretoka vodne pare sorazmerna z razliko tlakov in obratno sorazmerna z vsoto uporov, tako da lahko napišemo

$$U = \frac{p_a - p_b}{R_L + R_m + R_c} \tag{9.3}$$

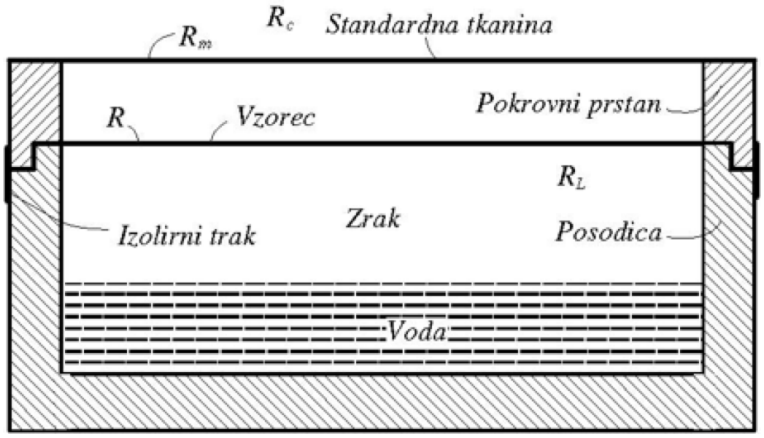
kjer so R_L upor plasti zraka v posodi, slika 9.2, R_m upor standardne tkanine, R_c upor zraka na zunanji strani standardne tkanine. Q je obratno sorazmeren višini zračne plasti L v posodi, če višina te plasti ni večja kot 20 mm. Če pa je višina zračne plasti v posodi večja, potem prej omenjena odvisnost ne velja več [2]. Pri višini (ali debelini) zračne plasti, ki je večja kot 2 cm, Q ni konstantna količina, ker pride do vrtinčnega gibanja zraka (gibanje zraka oziroma vodne pare ni laminarno). Če je razlika tlakov konstantna in če je R_c konstanten, potem je R_L sorazmeren višini zračne plasti L. Iz tega izhaja, da lahko upor pretoku vodne pare izrazimo kvantitativno v mm mirnega zraka. Ker je upor obratno sorazmeren s hitrostjo pretoka vodne pare, lahko narišemo diagram z umeritveno standardno premico, slika 9.3. S pomočjo tega diagrama lahko po grafični metodi hitro ugotovimo upor določenega vzorca, slika 9.3.

Ker ima ploski tekstilni izdelek večji upor pretoku vodne pare kot enako debela plast mirnega zraka, bo upor pretoku vodne pare večji, če je v posodi, ki je prekrita s standardno tkanino, vzorec slika 9.4, kot če ga ni, slika 9.2. Upor vzorca v mm mirnega zraka lahko ugotovimo iz diagrama na sliki 9.3. Premice na sliki 9.3 dobimo, tako da merimo hitrost pretoka vodne pare iz najmanj treh posod brez vzorca (samo standardna tkanina), v kateri so različne količine vode, tako da so višine zračne plasti med 20 mm in 7 mm. Na ordinato nanesemo recipročne vrednosti hitrosti pretoka vodne pare in na absciso višine zračnih plasti. S pomočjo treh ali več točk merjenja ugotovimo lego premice za standardno tkanino.



Slika 9.3: Grafična metoda ugotavljanja upora pretoku vodne pare skozi opazovani vzorec.

Če so tlak, temperatura in relativna vlažnost okoliškega zraka konstantni, potem to premico lahko imenujemo standardno. Sočasno merimo tudi hitrost pretoka vodne pare iz posodic, v katerih je še vzorec. Pri tem je primerna oddaljenost standardne tkanine od vodne gladine 10 mm, in vzorca od standardne tkanine 5 mm. V drugih posodicah je manj vode. Priporočljivo je uporabiti za obe meritvi po 8 posodic. Na ta način dobimo 8 meritev. Skozi dobljene točke pri merjenju potegnemo premici. Eno za standardno tkanino in drugo za standardno tkanino in za vzorec, ki je vzporedna s standardno premico. Hitrost pretoka se meri tako, da posode stojijo 2 uri, potem ko smo vanje natočili vodo in montirali vzorce ali dali vanje prstane s standardno tkanino. Po tem času se vzpostavi stacionarno stanje, izmeri se masa posod in pusti stati 16 do 20 ur, nato pa se ponovno stehta. Iz razlik mase Q, časa t in površine A se z enačbo (9.2) izračuna hitrost pretoka vodne pare.



Slika 9.4: Aparatura za merjenje hitrosti pretoka vodne pare skozi tekstilije.

Na sliki 9.1, standardna tkanina, "izolira" vodo v posodi od okolja. Bolj natančno je prikazana na sliki 9.4. Nalepljena je na obroč posodice. Znotraj posodice je montiran vzorec. Ta deli zračni volumen nad vodo na dva dela. Standardna tkanina mora imeti manjši upor za pretok vodne paro, kot vzorec in se lahko dolgo časa uporablja za preizkušanje upora pretoku vodne pare vsaj toliko časa dokler se pač ne poškoduje.

V principu lahko ugotovimo upor vzorca pri enakih hitrostih pretoka vodne pare. Če je višina zračne plasti v posodi z vzorcem L_2 in hitrost pretoka U, potem bi morali povečati višino zračne plasti v posodi brez vzorca, na primer, na L_1, da bi dobili enako hitrost pretoka U kot v posodi z vzorcem. Če je R upor vzorca in R_{L2} upor zračne plasti v posodi, potem lahko po analogiji z enačbo (9.3) napišemo enačbo (9.4).

$$U = \frac{p_a - p_b}{R_{L2} + R + R_m + R_c} \tag{9.4}$$

Če sta hitrosti pretoka v enačbah (9.3) in (9.4) enaki, potem lahko napišemo

$$R = R_{L1} - R_{L2} \tag{9.5}$$

in

$$R = L_1 - L_2. \tag{9.6}$$

Kot je razvidno s slike 9.3, grafično ugotovimo upor, tako da višino zračne plasti L_2 povežemo s premico vzorca in standardne tkanine z vzporednico z ordinato $1/U$. Potem to presečišče povežemo z vodoravno črto (vzporednica z absciso) s standardno premico, kar pomeni enako hitrost pretoka. V nadaljevanju postopka to presečišče z navpičnico povežemo z absciso (vzporednica z ordinato $1/U$), dobimo L_1 in z enačbo (9.6) izračunamo upor vzorca.

Grafična metoda sama po sebi ni dovolj natančna. Poleg tega smo pri naših raziskavah [4] ugotovili, da se smerni koeficient premice standardne tkanine in vzorca navadno razlikuje od smernega koeficienta standardne premice. Razlike niso velike, toda približek pri uporabi grafične metode precej vpliva na odstopanje rezultatov. Zaradi tega smo razvili analitično metodo [4], ki je bolj natančna kot prej omenjena grafična metoda [2] in je tudi bolj enostavna.Če izhajamo iz predpostavke, da je hitrost pretoka vodne pare obratno sorazmerna z višino zračne plasti L_1 v posodi brez vzorca, potem lahko zapišemo naslednjo enačbo linearne regresijske krivulje

$$\frac{1}{U_1} = a_0 + a_1 L_1. \tag{9.7}$$

S podobno enačbo lahko tudi opišemo hitrost pretoka iz posode z vzorcem

$$\frac{1}{U_2} = b_0 + b_1 L_2. \tag{9.8}$$

Višine zračne plasti lahko izberemo tako, da je $U_1 = U_2$. Poleg tega bomo predpostavili, da je smerni koeficient $b_1 = a_1$. Ta predpostavka je le približno realna, saj so pogoji pretoka močno spremenjeni. Zračna plast je s pomočjo vzorca pregrajena na dva dela, vzorec ni idealno homogen ipd. Pri analitični metodi merimo namreč sočasno hitrosti pretoka v 8 posodah brez vzorca in enakem številu posod z vzorcem pri različnih višinah zračne plasti med 7 mm in 20 mm. Izračunamo povprečno vrednost $1/U_2$, ki je na sredini merjenega intervala L_2, kar izhaja iz linearne odvisnosti. Na isti višini zračne plasti ($L_2 = L_1$) izračunamo z enačbo (9.7) vrednost ordinate $1/U_1$. Glede na navedeno in upoštevaje enačbi (9.7) in (9.8) ter sliko 9.4, velja naslednja odvisnost

$$\frac{1}{U_2} - \frac{1}{U_1} = \frac{b_0 - a_0}{a_1}. \tag{9.9}$$

Končno izračunamo upor vzorca R z naslednjo enačbo

$$R = L - 1 - L - 2 = \frac{b_0 - a_0}{a_1}. \tag{9.10}$$

Če želimo raziskovati vpliv posameznih parametrov kakovosti ploskovnega tekstilnega izdelka na vrednost njegovega upora pretoku vodne pare, potem lahko uporabimo linearno ali multiplo regresijsko krivuljo in ugotovimo koeficient korelacije glede na predpostavljeno odvisnost, ki je lahko linearna ali eksponentna. To odvisnost lahko napišemo v splošni obliki

$$R = f\left(s, \gamma, D, \frac{P}{d}\right), \tag{9.11}$$

kjer so s vrsta surovine, γ površinska gostota, D debelina, P odprta površina in d povprečni hidravlični premer por. Kot primer, bomo nakazali štiri kombinacije linearne odvisnosti. Če bi bila odvisnost eksponentna, bi pač uporabili logaritmiranje in jo tako predstavili kot linearno.

$$R = a_0 + a_1 D \tag{9.12}$$

$$R = a_0 + a_1 \gamma + a_2 D \tag{9.13}$$

$$R = a_0 + a_1 \frac{\gamma}{P} + a_2 \frac{D}{d} \tag{9.14}$$

9.3 Močenje oblačila

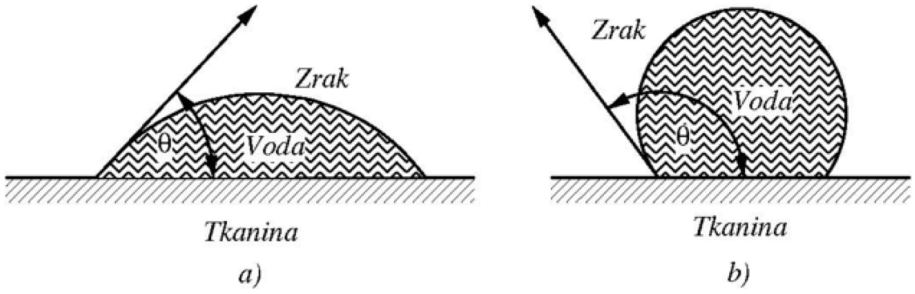
9.3.1 Teoretične osnove močenja oblačila

9.3.1.1 Uvod

Močenje je zelo zanimiv pojav, tako glede dodelave tekstilij kot tudi glede projektiranja in konstrukcije tekstilij, posebno oblačil. Če smo dalj časa izpostavljeni dežju pri

relativno nizkih temperaturah, je zelo pomembna hitrost močenja oblačila zaradi spremembe toplotnega upora.

Najlaže je opazovati močenje v statičnih razmerah. Iz pipete spustimo kapljo vode na površino tkanine, tako da ne povzročimo dinamičnega udarca. Ko je kaplja vode na površini tkanine, lahko opazujemo, kako se bo spremenila oblika kaplje. Če je tkanina hidrofilna, se bo kaplja v zelo kratkem času vpila v strukturo tkanine; če je ta manj hidrofilna, bo kaplja ostala nekaj časa na površini tkanine, preden jo bo tkanina vpila. V tem primeru bo navadno močilni kot manjši od 90 stopinj. Če pa je površina tkanine hidrofobna, bo oblika kaplje ostala nespremenjena in kot močenja bo večji od 90 stopinj. Ta dva primera sta prikazana na sliki 9.5.



Slika 9.5: Kot močenja na površini tkanine. Legenda: a) hidrofilna tkanina, b) hidrofobna tkanina.

Pri idealni hidrofilni tkanini kaplja praktično v hipu izgine v notranjost tkanine in je potemtakem (kontaktni ali stični) kot θ enak nič. V nasprotnem primeru, ko je tkanina oziroma njena površina popolnoma hidrofobna, ostane kaplja popolnoma okrogla, (če ni prevelika in se ne deformira zaradi lastne mase) in je kot močenja θ enak 180 stopinj. Na sliki 9.5 so prikazane vmesne vrednosti.

Vrednost kota močenja je odvisna od vrednosti adhezije med vodo in trdo fazo, v našem primeru tkanino ali drugim ploskovnim tekstilnim izdelkom, ter vrednosti kohezije v teh substancah. Če je adhezija med vodo in tkanino enaka ali večja od kohezije med molekulami vode, bo vrednost kota močenja θ enaka nič in tkanina se bo popolnoma omočila. Če pa je stanje obratno, bo imel kot močenja določeno vrednost večjo od nič stopinj, in ta vrednost bo tem večja, čim večja je relativna vrednost kohezije med molekulami vode glede na vrednost adhezije med vodo in tkanino. Ta odnos lahko izrazimo z Youngovo enačbo [5]

$$\gamma_T = \gamma_{TV} + \gamma_V \cos\theta, \tag{9.15}$$

kjer so γ_T prosta energija na enoto površine tkanine, γ_V prosta energija na enoto površine tekoče faze – vode, γ_{TV} prosta energija na enoto površine "mešane" faze voda – tkanina in θ kot močenja.

Ker je težko meriti prosto energijo površine tkanine, jo lahko substituiramo, če upoštevamo tudi Duprejevo enačbo [6], ki nam pove, koliko dela W_{TV} je potrebno za ločitev vode od tkanine.

$$W_{TV} = \gamma_T + \gamma_V + \gamma_{TV} \tag{9.16}$$

Pred ločenjem, slika 9.6 a), je prosta energija površine γ_{TV}, po ločenju, slika 9.6 b), pa $\gamma_T + \gamma_V$. Delo W_{TV}, ki je potrebno za ločenje, je razlika med tema dvema vrednostma. W_{TV} se imenuje "adhezijsko delo" med vodo in tkanino ali splošno med tekočo in trdo

fazo. Če kombiniramo enačbi (9.15) in (9.16), lahko dobimo

$$W_{TV} = 1 - \cos\theta. \tag{9.17}$$

Slika 9.6: Ločevanje vode od površine tkanine.

Enačba (9.17) je za razliko od enačbe (9.15) uporabna, ker je možno meriti vse parametre. Če želimo stolp vode, katerega presek ima enoto površine, razstaviti v dva dela, podobno kot smo ločili vodo od tkanine na sliki 9.6, moramo uporabiti "kohezijsko delo", katerega največja vrednost je γ_V. To dobimo v primeru, če je $\theta = 0$. Če pa je $W_{TV} < 2\gamma_V$, obstaja med vodo in tkanino kot močenja. Čim večja je vrednost W_{TV}, tem manjši je kot močenja θ in obratno. Iz tega sledi, da je močenje možno uravnavati s pomočjo spreminjanja kakovosti površine tkanine glede velikosti "adhezijskega dela", ki se dobi pri ločenju vode in tkanine, ki sta v stiku na stični površini. Če želimo povečati omočljivost tkanine, na primer, v fazah oplemenitenja, potem tekočini dodamo sredstva močenja, ki imajo to lastnost, da povečajo "adhezijsko delo" oziroma zmanjšajo velikost kota močenja med površino tekočine in površino tkanine.

Če pa želimo povečati hidrofobnost površine tkanine, obdelamo tkanino ali površino tkanine s hidrofobnim sredstvom. S tem zmanjšamo količino proste energije površine tkanine oziroma zmanjšamo količino "adhezijskega dela" med vodo in tkanino, kar obenem pomeni povečanje kota močenja. Površina tkanine ni uniformna, temveč se sestoji iz vlaken, ki štrlijo iz preje, delov preje, v kateri so vlakna zelo dobro paralelizirana in odprtin – por med nitmi osnove in votka. Iz tega sledi, da površina tkanine ni gladka, temveč zelo nagrbančena. Na takšni površini je zelo težko ugotoviti kot močenja. Zaradi tega je pravilneje, če pri ploskovnih tekstilnih izdelkih uporabljamo izraz "navidezni kot močenja" namesto "kot močenja". Lahko se zgodi, da se na primer zmoči površina zgornje plasti oblačila, pa kljub temu traja dalj časa, da voda popolnoma omoči zgornje plasti oblačila. To pomeni, da bodo v tem primeru spodnje plasti ostale suhe, kar je glede ekonomije toplote vsekakor pozitivno. Opisani pojav lahko nastane zaradi poroznosti oziroma kapilarne strukture ploskovnih tekstilnih izdelkov

9.3.1.2 Vpliv poroznosti na prodiranje vode v tkanino

Pore v ploskih tekstilnih izdelkih lahko, glede na njihove hidravlične premere, opazujemo kot kapilare. Potemtakem lahko pri procesu močenja ploskih tekstilnih izdelkov

upoštevamo kapilarne pojave. Predvsem nas zanimajo pogoji, pod katerimi bo voda prodrla skozi poro v tkanini ali drugem tekstilnem ploskem izdelku. Če je hidravlični polmer pore r relativno majhen in če je površina vode v pori del sfere, ki ima polmer R, potem lahko razliko tlakov ΔP, zaradi katere se oblikuje sfera na mejni ploskvi med vodo in zrakom, opišemo z enačbo (9.18)

$$\Delta P = \frac{2\gamma_{ZV}}{R} \tag{9.18}$$

kjer je γ_{ZV} površinska napetost vode.

Čeprav v tkanini pore nimajo cilindrične oblike, lahko uporabimo približno cilindrično obliko preseka por. Ko začne voda prodirati skozi poro, tvori površina vode s steno pore kot močenja θ. Če upoštevamo polmer pore r in kot močenja θ, lahko R izrazimo z enačbo (9.19).

$$R = \frac{r}{\cos\theta} \tag{9.19}$$

Če upoštevamo enačbo (9.19), lahko enačbo (9.18) napišemo v naslednji obliki

$$\Delta P = \frac{2\gamma_{ZV}\cos\theta}{r}. \tag{9.20}$$

Iz enačbe (9.20) vidimo, da bo voda prodirala skozi poro sama od sebe, kadar je kot močenja θ manjši ali enak 90 stopinjam. Če pa je večji od 90 stopinj, je površina sten por hidrofobna, moramo uporabiti razliko tlakov, da potisnemo vodo skozi poro. Po drugi strani pa je zanimiva tudi hitrost prodiranja vode skozi poro dolžine l. Če je μ viskoznost vode, lahko povprečno hitrost v prodiranja vode izrazimo s pomočjo Hagen-Poiseuilleovega zakona, enačba (9.21).

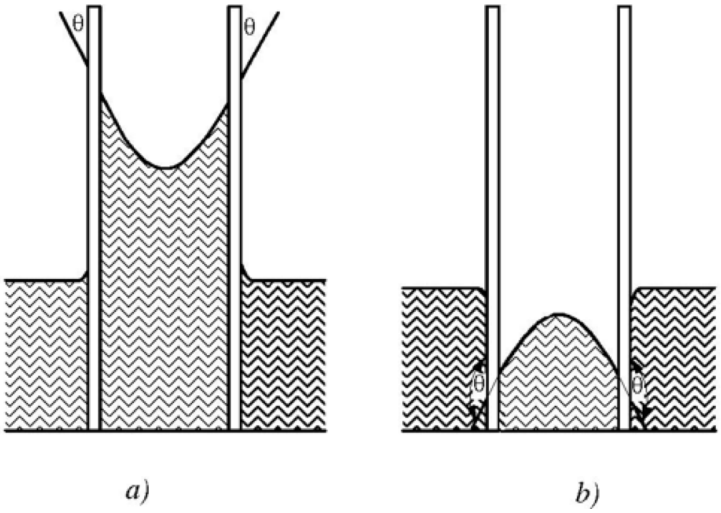
$$v = \frac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}t} = \frac{\Delta P r^2}{8\mu l} \tag{9.21}$$

Razliko tlakov ΔP lahko izrazimo z enačbo (9.20) in enačbo (9.21) zapišemo v naslednji obliki

$$\frac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}t} = \frac{r\gamma_{ZV}\cos\theta}{4\mu l}. \tag{9.22}$$

V enačbi (9.22) so spremenljivke polmer pore r, dolžina pore l in kot močenja θ, ki so lahko različni pri različnih vrstah izdelkov oziroma tkanin ali celo v isti tkanini. Čim daljša je pora oziroma čim debelejši je tkanina, tem manjša bo povprečna hitrost prodiranja vode skozi poro. Pri tem mislimo, da ostane vrednost kota močenja, ki je dejansko navidezni kot močenja, nespremenjena. Na sliki 9.7 sta prikazani dve različni vrednosti kota močenja v kapilari.

Če je kot močenja manjši od 90 stopinj, slika 9.7 a), prodira voda vzdolž kapilare z določeno povprečno hitrostjo. Z zmanjšanjem vrednosti kota močenja se povečuje hitrost. Če je $\theta = 90$ stopinj, potem voda ne prodira skozi poro (kapilaro) oziroma $\mathrm{d}l/\mathrm{d}t = 0$. Iz enačbe (9.22) še sledi, da dobimo negativno hitrost, če je $\theta > 90$ stopinj. Ta rezultat za realen sistem nima pomena v primeru, ko je tlak relativno majhen, oziroma njegova vrednost ni dovolj velika, da bi potisnila vodo skozi poro. Če pa je zaradi hidrodinamičnega udarca, na primer, velike kaplje dežja, del te kaplje potisnjen v poro, bo voda prodirala toliko časa, dokler traja pritisk. Če pritisk preneha delovati, preden pride voda na drugo stran pore, potem bo ta ostala v pori in se ne bo sama od sebe



Slika 9.7: Velikost kota močenja v kapilari v odvisnosti od oblike meniskusa. Legenda: a) konkavna površina vode, b) konveksna površina vode

iztisnila iz pore, in to kljub temu, da je na primer $\theta > 90$ stopinj. To pomeni, da enačba (9.22) velja za vse vrednosti $0 \leq \theta \leq 90$ stopinj. Z integriranjem enačbe (9.22) dobimo

$$l = \sqrt{\frac{rt\gamma_{ZV}\cos\theta}{2\mu}}. \tag{9.23}$$

Iz enačbe (9.23) vidimo, da je l sorazmeren času $\sqrt{t}$. Kolikšna dolžina pore se bo v času t omočila, je vsekakor odvisno od polmera pore in vrednosti navideznega omočilnega kota sten pore. Ker negativna dolžina fizikalno ni smiselna pomeni, da voda ne bo prodrla v poro, če je $\theta = 90$ stopinj.

9.3.1.3 Proces močenja v realnih razmerah

Če smo oblečeni izpostavljeni dežju, bo v določenem času omočena vsaj zunanja površina zunanje plasti oblačila. V večini primerov pa se oblačilo omoči v manj kot eni uri. Hitrost močenja je odvisna predvsem od intenzitete dežja, velikosti omočilnega kota, posebno vrhnje plasti oblačila, strukture površine oblačila ter od medsebojnega trenja delov površin oblačila in pritiska pri tem trenju.

Intenziteto dežja lahko definiramo kot količino padavin v mm v enoti časa. Pri tem lahko v veliki meri uporabimo preglednico 2.3 na strani 18. V tej preglednici je predvsem zanimiv polmer kapelj in energija le-teh. Ko je neurje, je povprečni polmer kapelj 0,15 cm in njihova energija 360 μJ, pri pršenju je polmer kapelj le 0,01 cm in njihova energija 0,0012 μJ. Razlika je zelo velika; v polmeru petnajstkrat in v energiji 303.333-krat. Kot se vidi, so lahko razlike v kinetični energiji posameznih kapelj dežja zelo velike. To pa tudi vpliva na hitrost močenja oblačila.

Ko se kaplja zaustavi na površini oblačila, se prej omenjena kinetična energija kaplje pretvori v ustrezno potencialno energijo

$$mgh \leq \frac{mv^2}{2} \quad \Rightarrow \quad h = \frac{v^2}{2g}. \tag{9.24}$$

Celotna kinetična energija se ne transformira v potencialno energijo, zaradi česar je v enačbi (9.24) znak $\leq$. Del kinetične energije se porabi za spremembo lege vlaken

na površini zunanje plasti oblačila, posebno če je ta površina kosmata; del kinetične energije se porabi za deformacijo same kaplje – poveča se površina kaplje pri razpadu v več manjših kapelj in del energije se uporabi za obvladovanje upora, ki se pojavlja pri prodiranju kapelj v notranjost tkanine. Ta upor je v precejšnji meri odvisen od vrednosti navideznega kota močenja θ in polmera pore r, glej enačbo (9.20).

Zaradi večjega energetskega potenciala bo prodrla velika kaplja globlje v strukturo tkanine kot majhna kaplja. Toda majhna kaplja ima manjši polmer – okrog 0,1 mm, in če je polmer pore večji od 0,1 mm, lahko gre takšna kaplja naravnost skozi tkanino pod pogojem, da gre pora naravnost na nasprotno stran tkanine. Navadno je srednji hidravlični premer por manjši od 0,1 mm in je potemtakem omenjeni dogodek zelo malo verjeten.

Če je kot močenja večji od 90 stopinj – se pravi, da je površina tkanine vodo odbojna, se bo večina kapelj skotalila s površine oblačila, posebno če ta ni vodoravna. Vodoraven je le del površine v območju ramen. To pomeni, da ne vpliva samo kot močenja na prodiranje kapelj v pore, ampak tudi plast vode, ki se zadržuje na površini tkanine oziroma oblačila.

Tudi struktura zunanje površine oblačila oziroma tkanine igra določeno vlogo pri njenem močenju. Če je površina gladka, kot v primeru goste tkanine, izdelane iz gladke (ne nakodrane) multifilamentne preje, bo stična površina kapelj neposredno s površino preje zelo velika, posebno v primeru, ko niti osnove flotirajo čez veliko število votkov, oziroma če je število osnovnih ali votkovih veznih točk relativno majhno, kot je to pri votkovih ali osnovnih atlasih, ki imajo veliko sosledje. Zaradi velike stične površine se poveča verjetnost hitrejšega močenja površine oblačila. Če je površina kosmata in vlakna štrlijo iz preje, se praviloma kaplje najprej dotaknejo štrlečih vlaken. Pri tem udaru se večina vlaken vsaj delno deformira – spremeni lego. Ta sprememba ali upogib je elastičen. To pomeni, da vlakna delujejo kot blažilo (amortizer). Če so vlakna dovolj dolga in če je njihovo število na enoto površine dovolj veliko, je malo verjetno, da bo kaplja prišla do osnovnega tkiva tkanine. Ko se kaplja ustavi, to je preneha hidrodinamični udar, se akumulirana energija v vlaknih sprosti in vlakna odvržejo kapljo nazaj in se ta skotali navzdol po obleki.

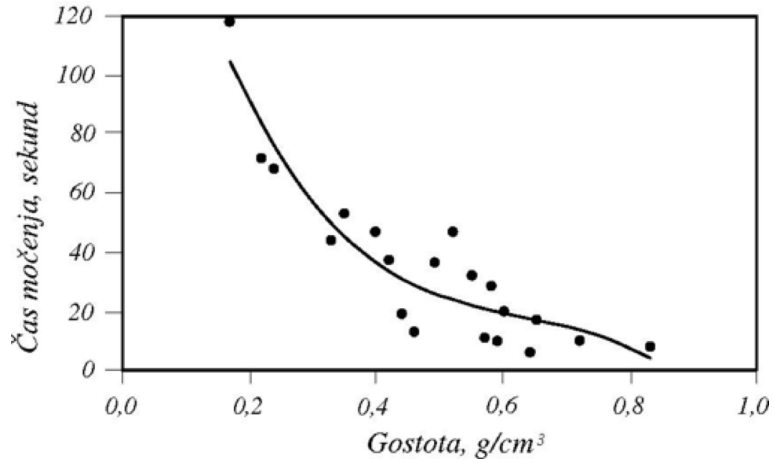
Na površini ostane določena količina vode tudi takrat, kadar je ta izredno dobro vodo-odbojna. Na delih, kjer se zliva voda s plašča na spodnji del hlač, pride do trenja med površino hlač in spodnjim robom plašča. To povzroča, da se kaplje vode "vtisnejo" v strukturo hlač. Posledica tega je hitrejša močenje na teh delih oblačila.

Na splošno ima velik vpliv na hitrost močenja tudi struktura tekstilnega izdelka, ki jo lahko izrazimo z gostoto. Čim manjša je gostota, tem več prostora je v izdelku, ki je napolnjen z zrakom. Ker je med vodo in zrakom velika površinska napetost (720 μN/cm), se upočasni hitrost močenja, kot je razvidno s slike 9.8.

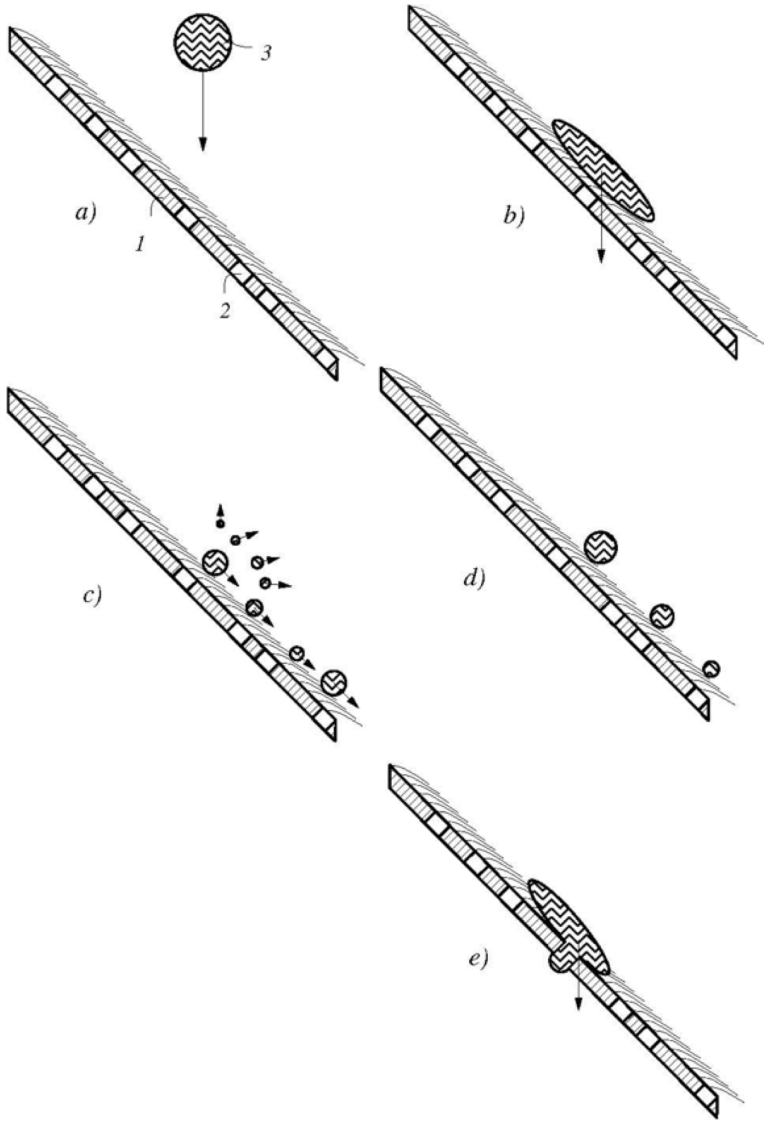
9.3.1.4 Ilustracija mehanizma močenja oblačila

Glede na kakovost tkanine in lego njene površine lahko opazujemo več mehanizmov močenja oblačil. Na sliki 9.9 so prikazane štiri faze močenja, a), b), c) in d), hidrofobne tkanine, ki ima poševno usmerjen las (ni paralelen normali na površino tkanine) in na njo padajo kaplje dežja 3 pod kotom 45 stopinj. Tkanina ima pore 2, med nitmi osnove in votka 1.

Večji del zgornje površine oblačila zaklepa s smerjo padanja kaplje še manjši kot v primeru, da kaplje padajo navpično na tla, na katerih stojimo. Ko kaplja doseže površino tkanine, deformira las in se tudi sama deformira, slika 9.9 b). Kinetična energija kaplje



Slika 9.8: Odvisnost hitrosti močenja volnene preje od njene gostote [7].



Slika 9.9: Močenje tkanine, ki ima las na površini in je postavljena poševno. Legenda: a) suha hidrofobna tkanina: 1 – tkivo tkanine, 2 – pora, b) deformacija deževne kaplje, c) razbijanje kaplje na več manjših, d) kotaljenje kapelj navzdol po površini tkanine, e) situacija na hidrofilni tkanini.

se uporabi za deformacijo lasu in povečanje površine kaplje. Končni rezultat je razbijanje kaplje v več manjših, slika 9.9 c), ki se skotalijo s površine tkanine. Vendar nekaj majhnih kapelj ostane na površini le-te, slika 9.9 d). Opisani mehanizem močenja se nanaša na hidrofobno tkanino.

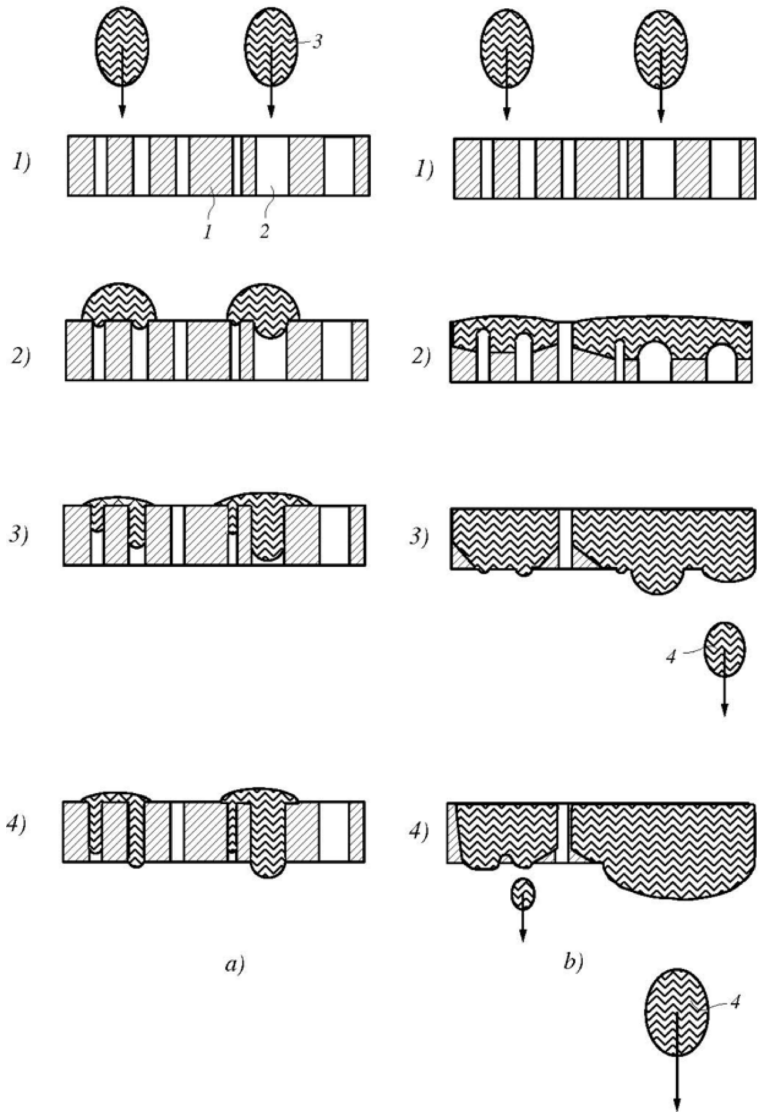
Osnovno tkivo tkanine ostane suho. Če pa je tkanina hidrofilna, slika9.9 e), prodre kaplja v poro zaradi dinamičnega pritiska, ki ga proizvaja pri padcu na površino oblačila. Če je kinetična energija kaplje dovolj velika in če je obenem dovolj velik hidravlični premer pore v tkanini, ne bo omočena le zgornja plast, ampak tudi naslednja, ki je pod njo, kot je to ilustrirano na sliki 9.9 e). V primeru gole površine, slika 9.10 je ta lahko hidrofobna, slika 9.10 a), ali hidrofilna, slika 9.10 b). V obeh primerih lahko vzporedno opazujemo štiri faze močenja. Prva faza je identična v obeh primerih. Površini sta suhi in kaplje 3 sta v legi, tik preden bosta padli na površino. V tem primeru smo predpostavili, da se nanaša na ramenski del oblačila in kaplje padajo normalno na površino le-tega. V drugi fazi so kaplje udarile na površino in se je del kinetične energije izrabil za deformacijo kapelj, del pa se je transformiral v potencialno energijo. Na sliki 9.10 so ilustrirane posledice tega procesa. Pri hidrofobni tkanini je del kaplje v pori, medtem ko se preja oziroma tkivo tkanine sploh ni omočilo. Pri hidrofilni tkanini sta obe kaplji praktično vsrkani v tkivo tkanine oziroma preje. Pore se bolj počasi polnijo z vodo. Ker sta kaplji dovolj narazen, je ena pora ostala ne omočena, oziroma v njej ni vode.

Ker pač naprej dežuje, obstaja velika verjetnost, da bo na teh mestih padlo še določeno število kapelj – faza tri. Realno je pričakovati, da bodo hidrodinamični pritiski dodatnih kapelj potiskali vodo skozi pore. V primeru hidrofilne tkanine lahko pričakujemo, da bodo ustvarjeni pogoji za curek kapelj 4 z nasprotne površine tkanine, slika 9.10 b3). Tkivo tkanine pa se še zmeraj ne bo omočilo v primeru, da je hidrofobnost permanentna, slika 9.10 a3). Pri hidrofilni tkanini pa bo že prva kaplja 4, zaradi medsebojnega trenja plasti, prešla na naslednjo plast oblačila. Še zmeraj predpostavljamo, da nobena kaplja ni padla na prej omenjeno prazno poro. V četrti fazi pa je voda zapolnila nekatere pore pri hidrofobni tkanini in se že pojavila na nasprotni površini tkanine. To se lahko zgodi tudi v drugi fazi pod pogojem, da je hitrost in masa kaplje dovolj velika in da pripadajoča kinetična energija zadostuje za stanje v četrti fazi. Predpostavljamo, da je hidrofobna le vrhnja plast oblačila. Če se spodnja plast drgne ob vrhnjo plast, bo ta vpila vodo, ki je na spodnji strani vrhnje tkanine oblikovana v polu sfero. Če poznamo kinetično energijo kapelj in dolžino por (debelino tkanine), lahko določimo zgornjo vrednost hidravličnega polmera por, skozi katere ne bo predrla voda na nasprotno površino tkanine.

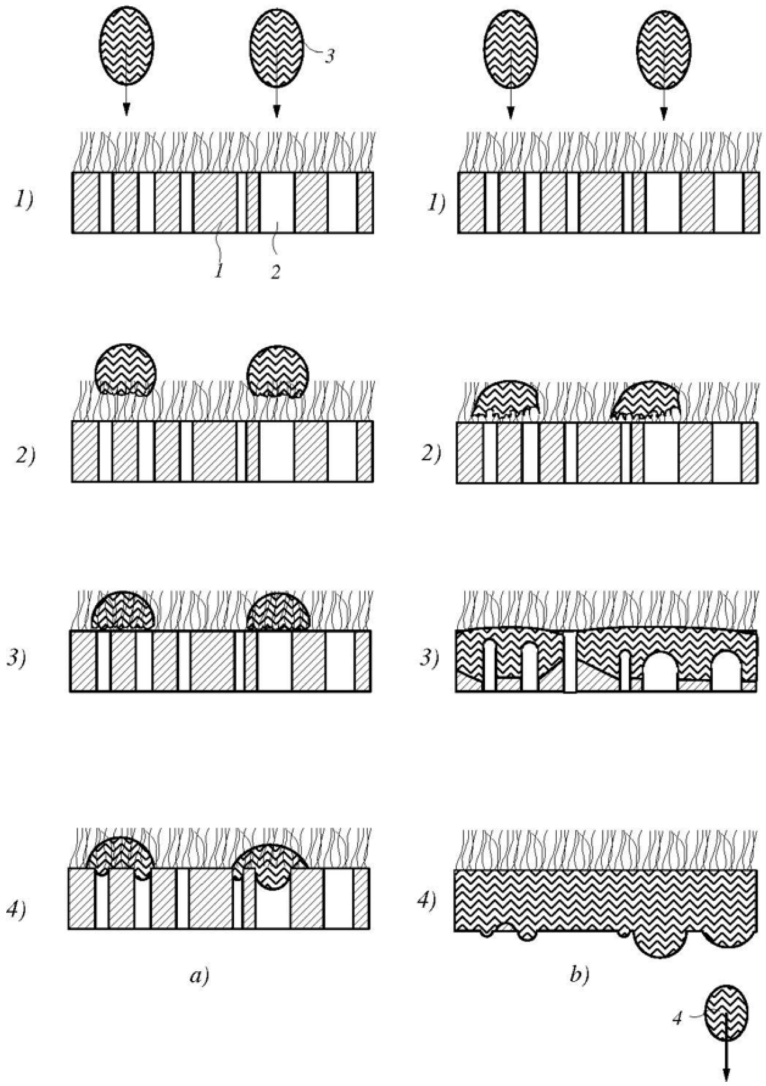
Če pogledamo hidrofilno tkanino, lahko ugotovimo, da so se združile polu sfere, ki jih oblikuje voda na konceh dveh sosednih por na desni strani slike 9.10 b, v četrti fazi. Zaradi tega dogodka se navidezni hidravlični premer pore poveča za nekajkrat. Poleg tega se zmanjša vrednost kota močenja. S tem se tudi zmanjša potreben hidrostatičen tlak kot posledica navideznega povečanja premera pore in predvsem zmanjšanja kota močenja na praktično ničelno vrednost. Posledica tega je povečanje hitrosti pretoka vode skozi to plast oblačila in povečanje hitrosti močenja spodnjih plasti le-tega.

V primeru kosmate površine z navpično usmerjenim lasom, slika 9.11, pa se proces močenja precej razlikuje od prej opisanega. V primeru, da je las zadosti gost (ena kaplja prekrije veliko število vlaken, ki štrlijo iz kompaktne površine tkanine), se kaplje nabodejo na štrleča vlakna. Pri tem se del energije kaplje porabi za deformacijo lege vlaken, del pa za deformacijo le-te.

Med površino tkanine in kapljo je plast zraka in osnovno tkivo tkanine ni omočeno niti pri hidrofobni niti hidrofilni tkanini, slika 9.11 a in slika 9.11 b druga faza. Vendar



Slika 9.10: Močenje tkanine, ki ima golo površino. Legenda: a) hidrofobna tkanina: 1) – suha tkanina, 2) – začetek močenja, 3) – stanje, preden je kaplja prišla na nasprotno površino tkanine, 4) – kaplja je prišla na nasprotno površino tkanine skozi največjo poro, b) hidrofilna tkanina: 1) – suha hidrofilna tkanina, 2) – prodor vode v tkivo tkanine, 3) – tkanina je popolnoma omočena razen najmanjše pore – prva kaplja se loči od nasprotne površine tkanine, 4 – na desni strani je tkanina popolnoma omočena in se obnaša kot, da je pora, ki ima velik premer.



Slika 9.11: Močenje tkanine, ki ima kosmato površino. Legenda: a) hidrofobna tkanina: 1) – suha tkanina, 2) – kaplji sta ujeti na lasni površini tkanine in nista dosegli tkiva tkanine, 3) – kaplji sta dosegli površino tkiva tkanine, 4) – začetek prodiranja kapi v pore tkanine, b) hidrofilna tkanina: 1) – suha tkanina, 2) – kaplji sta dosegli tkivo tkanine, 3) – kaplji sta skoraj dosegle nasprotno stran površine tkanine, 4) – voda je popolnoma omočila celotno tkivo tkanine in se je ena kaplja 4 ločila od tkanine.

je bistvena razlika v konfiguraciji spodnjega dela kaplje. Pri hidrofobni tkanini spodnji del kaplje, ki je med vlakni, tvori konveksne oblike površine; pri hidrofilni pa konkavne oblike površine vode, gledano od spodaj navzgor.

V tretji fazi pa se vzpostavi novo ravnovesje. Pri hidrofobni tkanini so kaplje tik nad površino tkanine, medtem ko je hidrofilna tkanina skoraj popolnoma vsrkala kaplje v tkivo tkanine. Ker voda hitreje potuje po tkivu (preji) tkanine kot vzdolž same pore, doseže nižji nivo v stenah por kot v samih porah. V četrti fazi so kaplje že delno vrinjene v pore hidrofobne tkanine; hidrofilna tkanina pa je praktično popolnoma omočena in voda kaplja že navzdol z nasprotne površine tkanine. Če primerjamo mehanizem močenja gole površine, slika 9.10, in kosmate površine, slika 9.11, lahko ugotovimo bistveno razliko v hitrosti močenja. V realnih pogojih uporabe, se las relativno hitro obrabi in v večini primerov uporabljamo za vrhnjo plast gladke ne kosmat-ene tkanine, ki se močijo približno po mehanizmu prikazanem na sliki 9.10.

9.4 Metode za preizkušanja vodo odbojnega učinka na tkaninah in primernost njihove uporabe

9.4.1 Metode preizkušanja vodo odbojnega efekta na tkaninah

Prej smo govorili o procesu močenja. Če je močenje zelo upočasnjeno, navadno pravimo, da ima tkanina vodo odbojne lastnosti. Te niso zaželene v fazah plemenitenja tkanin ali pri gotovih izdelkih, kot je na primer gaza. Toda vodo-odbojen učinek je vsekakor zaželen za zgornjo plast oblačila. Za merjenje tega učinka obstaja večje število različnih metod, kot so: spray test metoda, hidrostatična metoda, hidrostatična metoda na šoperjevem aparatu, hidrodinamična metoda na šoperjevem aparatu, metoda potopitve vzorca, Bundesmannova metoda ipd.

9.4.1.1 Spray test metoda

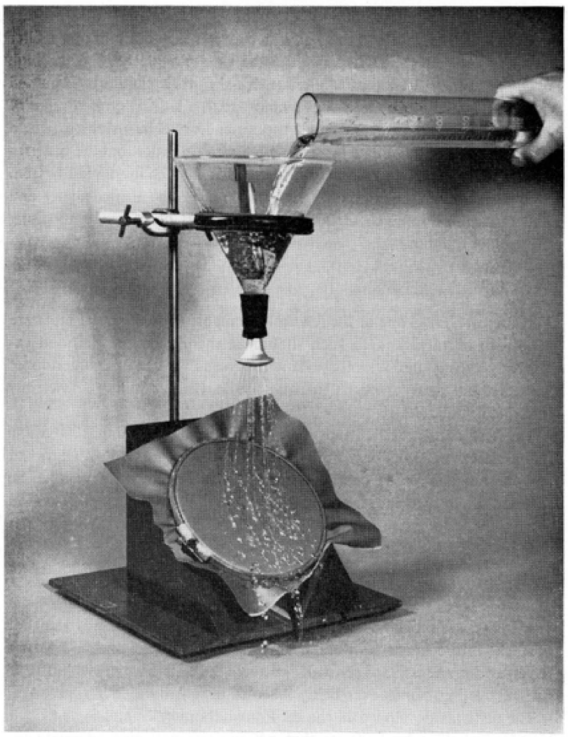
S spray test metodo, slika 9.12, ponazorimo stanje, ko dežuje. Z določene višine pustimo liter vode skozi lijak, ki ima perforirano dno, tako da voda pada na tkanino v obliki curkov. Tkanina je napeta na poseben okvir in površina tkanine je postavljena pod kotom 45 stopinj. Za rezultate bi prej rekli, da so kvalitativni kot kvantitativni in se primerjajo z etaloni. Če se vzorec sploh ne omoči, je ocena 100; malo omočena površina dobi oceno 90 ali 80; popolnoma omočena površina pa oceno 50, ki je obenem najnižja ocena.

9.4.1.2 Hidrostatična metoda – "mulda"

Vzorec pritrdimo na okvir 50 x 50 cm, tako da oblikuje obrnjeno piramido. V to obrnjeno piramido se nalije voda v višini 10 cm, računano od najnižje notranje točke vzorca (vrh piramide). Pustimo stati 24 ur in pregledamo, če je voda prodrla skozi tkanino. Če je voda prodrla skozi tkanino, sklepamo, da tkanina nima potrebnega vodo-odbojnega učinka. To pomeni, da s to metodo dobimo le kvalitativne rezultate.

9.4.1.3 Hidrostatična metoda na Šoperjevem aparatu

Hidrostatična metoda na Šoperjevem aparatu, slika 9.13, se v principu ne razlikuje od prejšnje metode. Tkanina izpostavimo tlaku 10 cm vodnega stolpca, kar znaša 981 Pa, in pustimo 24 ur pod tem tlakom. Če voda prodre skozi tkanino, pravimo, da tkanina



Slika 9.12: Spray test.

ni vodo-odbojna, če ne prodre, pravimo, da je tkanina vodo-odbojna. Omenjeni metodi se uporabljata za preizkušanje kakovosti vodo-odbojne impregnacije na tkaninah, ki so namenjene za šotore, šotorska krila, cerade (ponjave) ipd.

9.4.1.4 Hidrostatična metoda 2 na Šoperjevem aparatu

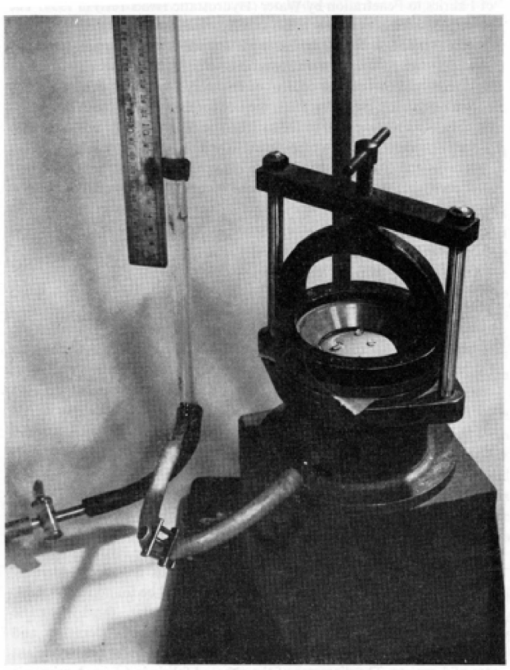
Vzorec je vpet v aparat kot pri prejšnji metodi. Za razliko od prejšnje metode povečujemo višino vodnega stolpca oziroma tlak z določeno hitrostjo, na primer, 20 cm/min. Ko se na površini vzorca pojavi prva kaplja ali prve tri kaplje, odčitamo višino vodnega stolpca oziroma tlak. To pomeni, da ta metoda daje kvantitativne rezultate. Čim višji tlak dosežemo, tem boljši je vodo-odbojni učinek oziroma tem večji je kot močenja, glej enačbo (9.20).

9.4.1.5 Metoda potapljanja vzorca

Vzorec potopimo v vodo, kjer ga pustimo določen čas. Potem ga vzamemo iz vode in pustimo med ožemalna valja, da se izenačijo pogoji preizkusa. Nato izmerimo odstotek absorbirane vode. To pomeni, da je metoda kvantitativna. Čim manj vode se vpije, tem manjša je omočljivost tkanine.

9.4.1.6 Bundesmannova metoda

S Bundesmannovo metodo [7] skušamo ponazoriti dež in obenem drgnjenje ob notranjo površino vzorca, glej sliki 9.14 in 9.15, kar pomeni dejansko stanje oblačila v neurju. Kaplje, ki padajo z višine 150 cm iz rešetke 9 na vzorce 2, imajo povprečni premer 0,64 cm, dosežejo hitrost 540 cm/s in imajo kinetično energijo 2.000 μJ, preden se dotaknejo po-



Slika 9.13: Preizkus vodo odbojnega učinka na Šoperjevem aparatu.

vršine vzorca. Ta energija kapelj je približno šestkrat večja od kinetične energije, ki jo imajo deževne kaplje pri neurju.

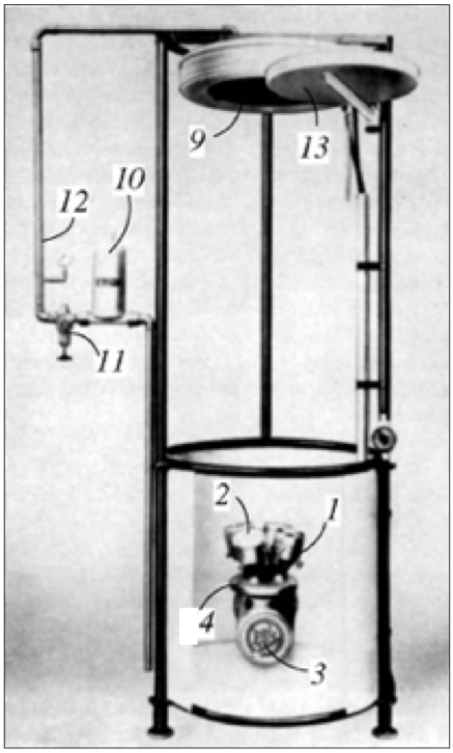
Premer posodice je 10 cm in premer vzorca 14,1 cm, kar pomeni, da je le polovica vzorca izpostavljena kapljam vode oziroma močenju. Štiri posodice, slika 9.15, so postavljene v obliki križa, tako da se istočasno preizkušajo štirje primerki enega vzorca. Preden se namestijo vzorci na vrh posodic, se izmeri hitrost pretoka vode.

Ta je predpisan v določenem standardu. Navadno se izbere hitrost okrog 65 ml/min vode, ki se nabere v eni posodici ali pa 65 ml/min na 78,5 cm^2. To je površina posodice. Ko je hitrost pretoka umerjena, se montirajo preizkušanci na posodice, zbiralni krožnik se odmakne, da padajo kaplje na preizkušance. Površina preizkušancev, ki je izpostavljena kapljam, je nagnjena 10 do 15 stopinj glede na vodoravno lego. Motor vrti križ, na katerega so pritrjene posodice, s petimi vrtljaji/min. V posodicah so pritrjeni križi za drgnjenje ob notranjo površino tkanine. Križi se zavrtijo v vsako smer približno za 100 stopinj in naredijo po 20 nihanj/min.

Primerki vzorcev se izpostavijo kapljam vode za 10 minut. Potem se zopet namesti zbiralni krožnik pod rešetko, izključi motor in snamejo drug za drugim primerke vzorcev. Primerek se vstavi na vodoravno okroglo ploščo centrifuge. Na plošči so štirje kratki žeblji, na katere se natakne primerek, da ne zleti s plošče, ko se začne vrteti v vodoravni legi. Vključi se motor centrifuge in primerek vzorca se centrifugira 15 do 30 sekund. Potem se primerek stehta na tehtnici z natančnostjo $\pm$0,01 gram

Preden so bili primerki vzorca izpostavljeni močenju, so bili klimatizirani in tehtani. Po preizkusu pridobijo primerki vzorca maso, ker navadno vpijejo večjo ali manjšo količino vode. Prirastek mase izrazimo v odstotkih glede na maso klimatiziranih suhih primerkov. Ker pa je bilo le 50 odstotkov površine vzorca izpostavljeno kapljam vode, je dejanska količina popite vode, ki je ostala v primerku po centrifugiranju, dvakrat večja. Poleg tega se izmeri tudi količina vode, ki je morebiti prodrla v posodico skozi primerek.

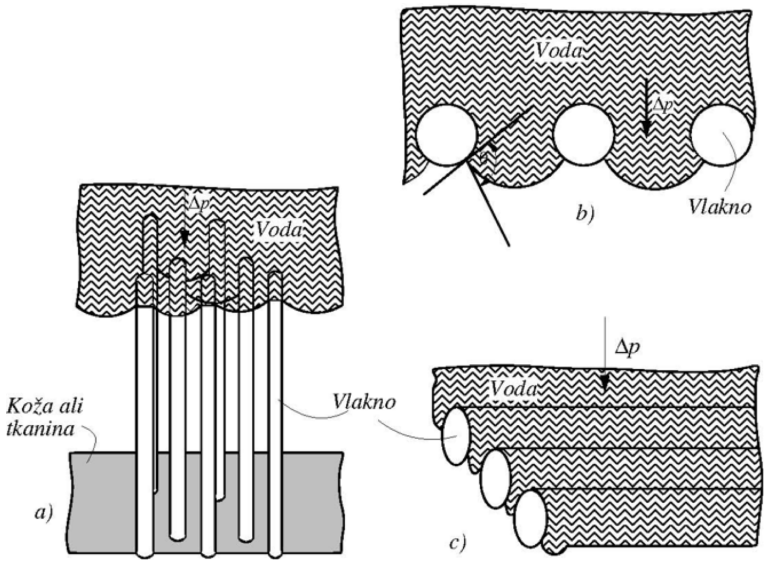
Na sliki 9.16 je ilustrirana lega vode med hidrofobnimi vlakni ali nitmi, ki so posta-



Slika 9.14: Slika Bundesmannovega aparata. Legenda: 1 – posodica, 2 – vzorec tkanine, 3 – motor, 4 – pritrdilni obroč, 9 – rešetka, 10 – filter, 11 – reducirni ventil, 12 – manometer, 13 – zbiralni krožnik [7].

Slika 9.15: Posodice za montiranje primerkov vzorca. Legenda: 1 – posodica, 2 – primerek vzorca, 3 – posodica brez vzorca, 4 – pritrdilni obroč, 5 – križ, ki niha in drgne vzorec z notranje strani, 6 – ventil, 7 – križ, 8 – stojalo križa [7].

vljene pokončno ali navpično. Razdalja med vlakni je takšna, da voda, ki je med vlakni v nižji legi, kot sama vlakna, slika 9.16 b). To se zgodi zaradi tlaka Δp in površinske napetosti vode, ter medsebojne oddaljenosti vlaken. Na delu spodnje površine niso omočena in na tem delu zaklepa z vodo kot β. Na sliki 9.16 a) lahko simuliramo stanje volnenih vlaken na ovci po dežju. Ker je površina vlaken prekrita z lanolinom, ki je hidrofoben, voda prodre v krzno le toliko kolikor ji omogoča hidro dinamični udar kapelj.



Slika 9.16: Ilustracija dveh hidrofobnih idealiziranih tipov las. Legenda: a) pokončni las, b) in c) vodoravno postavljeni las.

9.5 Primernost metod

9.5.1 Spray test metoda

Lahko predpostavimo, da se curki vode razpršijo v kaplje, preden se dotaknejo površine vzorca. Kaplje so zelo velike, lahko predpostavimo, da so tako velike kot pri Bundesmannovi metodi. Kaplje prosto padajo približno z višine 20 cm (ta višina se lahko spreminja). Pod temi pogoji bo kinetična energija kapelj okoli 110 μJ. Ta vrednost je med neurjem 360 μJ in nevihto 87 μJ, preglednica 2.3 na strani 18.

Na podlagi zgoraj omenjenih vrednosti lahko sklepamo, da se energija kapelj ujema z naravnimi razmerami. Toda trajanje preizkusa je zelo kratko le okrog 15 sekund, zaradi česar se morebitna razlika med različno vrednostjo vodo-odbojnih učinkov na tkanini ne pokaže dovolj.

9.5.2 Hidrostatična metoda – "mulda"

Na splošno preiskujemo vodo-odbojni učinek na tkaninah, ki so bile obdelane z vodo-odbojno impregnacijo. To pomeni, da ima kot močenja vrednost nad 90 stopinj. Pri tej metodi je razlika tlakov stalna. Glede na enačbo (9.20) so stalne vrednosti ΔP, γ in θ. Toda polmer por r se lahko razlikuje od enega do drugega vzorca. Dejansko je r hidravlični polmer por. Ta pa ima določeno porazdelitev. Tukaj je predvsem pomemben polmer največje pore (največji polmer) in njegova lega glede na tlak, ki ga povzroča voda v obrnjeni piramidi. Če je pora, ki ima največji hidravlični polmer na vrhu piramide – to je točka, v kateri je največji tlak (981 Pa) – se lahko zgodi, glede na enačbo (9.20), da

bo začela skozi takšno poro teči voda. Obstaja le majhna verjetnost, da je v tkanini tako velika pora. Vzroke, da začne kljub majhnim polmerom por voda teči skozi tkanino je treba iskati drugje.

Oplemenitene tkanine imajo kot močenja, manjši od 90 stopinj. To pomeni, da so v večjem ali manjšem obsegu hidrofilne. Če ne bi bile hidrofilne, bi bilo praktično onemogočeno oplemenitenje v mokri fazi. Potemtakem lahko hidrofobni učinek dosežemo s pomočjo impregnacije s hidrofobnimi sredstvi. Vodo-odbojno sredstvo navadno ni vezano na vlakno z močnimi kovalentnimi vezmi, temveč v večini primerov z vodikovimi vezmi in Van der Walsovimi silami. Vlakna, ki so vgrajena v tkanino, imajo zelo veliko površino. Malo je verjetno, da bi bila vsa ta površina prekrita z vodo-odbojno impregnacijo kot s filmom. Ker so vodo-odbojne molekule dolge, se lahko zgodi, da na posamezne dele površine nimajo dostopa; predvsem tam, kjer sta, na primer, dve vlakni tesno stisnjeni drugo ob drugem. Zaradi pregibanja tkanine se lahko spremeni medsebojna lega vlaken, tako da se odkrije nezaščiteni del površine in je v procesu močenja dostopen vodi. Voda lahko prodre v vlakno na nezavarovani površini in če pri tem vlakno nabreka, lahko poči vodo-odbojni film (plast) na površini vlakna, če ni dovolj elastičen. V vsakem primeru se vlakno omoči. Poleg tega ni nujno, da je vodo-odbojni film na površini vlaken dovolj odporen proti pregibanju in drgnjenju, kar ga tudi lahko poškoduje. Čim več je v tkanini vlaken, ki niso zaradi kakršnegakoli vzroka prekrita z vodo-odbojnim filmom, vsaj na zunanji površini tkanine, tem hitreje se tkanina omoči.

Potemtakem je verjetno, da ni vsa površina vlaken v tkanini prekrita z vodo-odbojnim filmom. Iz tega tudi sledi, da za takšno tkanino ne velja enačba (9.21) ter, da kot močenja dejansko nima konstantne vrednosti, ampak se spreminja s časom. Poleg tega omenjena enačba ne upošteva prenosa vode skozi vlakna zaradi delovanja hidrofilnih skupin v vlaknu (celulozna vlakna, volna). Na splošno lahko rečemo, da obstaja v tkanini določena porazdelitev velikosti premerov por in glede na omenjene možnosti obstaja tudi določena porazdelitev vrednosti kota močenja. To se pravi, da so na posameznih delih površine tkanine različni pogoji za močenje in pretok vode. Potemtakem je proces močenja tkanine stohastičen pojav. Predpostavimo, da ima hitrost pretoka vode skozi tkanino približno normalno porazdelitev. Verjetnost E, da se bo nahajala voda na določenem delu površine tkanine na razdalji x v času t v smeri nasprotne površine tkanine, lahko izrazimo z enačbo (9.25) [8].

$$E(x,t) = (\pi r d t)^{-\frac{2}{3}} \, \mathrm{e}^{\frac{x-\bar{x}}{4Dt}} \tag{9.25}$$

kjer sta D koeficient disperzije in $\bar{x}$ povprečna pot, ki jo preide voda na določeni površini v času t v smeri nasprotne površine.

Za razliko od koeficienta difuzije, koeficient disperzije ni v zvezi s termičnim gibanjem molekul, temveč se nanaša na mehanične učinke, ki se pojavijo pri prehodu vode skozi tkanine in druge ploske tekstilne izdelke. Enačba (9.25) je izpeljana na predpostavki, da je gibanje delcev vode v smeri, ki je nasprotna omočeni površini tkanine, neodvisno od ene do druge točke na tej poti. Če torej to pot od ene do druge površine tkanine razdelimo, na primer, na dolžine po 1 μm, je lahko hitrost gibanja vode različna na katerikoli dolžini enega mikrometra vzdolž pore in ni odvisna od hitrosti, ki jo je imela v predhodnem sektorju pore. Da je temu tako lahko sprejmemo, ker se spreminja polmer in smer pore kot tudi kakovost sten pore, če gremo po njej od začetka (ena površina) do konca (nasprotna površina tkanine).

Glede na prej omenjeno, lahko sklepamo, da je lahko prehod vode skozi zelo goste tkanine, ki so obdelane z vodo-odbojno impregnacijo in imajo relativno majhne hidravlične premere por, naključen pojav. To pa po drugi strani pomeni, da nam prej opisana

hidrostatična metoda (mulda) ne daje realnih rezultatov, ker ne vemo, kakšna je verjetnost prehoda vode na nasprotno površino na posameznih delih površine tkanine, oziroma, da tudi v primeru, ko se voda po 24 urah ne pojavi na nasprotni površini tkanine, to še ne pomeni, da je tkanina dejansko popolnoma vodo-odbojna. Problem je v tem, da je zelo težko ugotoviti potrebno število vzorcev za raziskavo vodo-odbojnega učinka za določeno količino tkanine, na v naprej izbrano statistično zanesljivost.

Metoda je primerna za raziskavo vodo-odbojnega učinka na tkaninah, namenjenih za ponjave (cerade) in druga prekrivala različnih predmetov, s katerimi jih varujemo pred mokroto. Pri teh pokrivalih se pogosto zgodi, da se voda nabira v posameznih vdolbinah, ki se tvorijo na površini prekrival, kar je z metodo dobro simulirano. Metoda ni primerna za zgornje (zunanje) plasti oblačila, ker v teh primerih ni vdolbin v katerih bi se nabirala voda. Poleg tega na notranji strani zgornje (zunanje) vodo-odbojne plasti oblačila ni plinske faze – zraka, temveč naslednja plast v trdi fazi, ki se drgne ob njo. Pri šotorih je tkanina napeta in z nasprotne (notranje) površine je poleg plinske faze (zraka) tudi trda faza – ogrodje.

9.5.3 Hidrostatična metoda na Šoperjevem aparatu

V bistvu je ta metoda podobna prej omenjeni metodi glede hidrostatičnega pritiska (višine vodnega stolpa) in časa preizkusa. Vzorec se vpne med dva gumijasta obroča in s spodnje strani vzorca se dovaja voda. Zaradi hidrostatičnega pritiska dobi sferno obliko tisti del površine vzorca, ki je v okrogli odprtini obroča. Tako kot "mulda" tudi ta metoda ni primerna za kontrolo vodo-odbojnega učinka na tkanini v sami proizvodnji, ker je čas preizkusa predolg. Rezultati so kvalitativni, ker se ugotavlja le, če je voda prodrla na nasprotno površino vzorca ali ne, tako kot pri prej omenjeni metodi ("mulda"). Pri tej in prejšnji metodi lahko potencialno energijo, ki jo ustvarja pritisk v višini 10 cm vodnega stolpca (981 Pa), primerjamo s kinetično energijo kapelj dežja ali kapelj pri Spray test metodi in Bundesmannovi metodi. Vodne kaplje premera 0,64 cm prekrijejo pri padcu na tkanino približno površino 0,32 cm^2. Valj, ki ima osnovo 0,32 cm^2 in višino 10 cm, zavzame 3,2 cm^3 prostornine. Če potencialno energijo vodnega stolpa transformiramo v kinetično energijo, dobimo v našem primeru okrog 320 μJ. Ta količina kinetične energije ustreza kinetični energiji (360 μJ), ki jo imajo kaplje dežja pri neurju. Glede na to je pravilno postavljena višina vodnega stolpa. Kljub temu se razlikuje učinek, ki ga povzroči kaplja dežja pri padcu na površino tkanine od učinka, ki ga ima statični vodni stolp. Metoda je primerna za ugotavljanje učinka vodo-odbojne impregnacije na tkanini, namenjeni za šotore, ker je pri preizkusu tkanina napeta in nima gub kot pri "muldi"; poleg tega je vzorec stisnjen med gumijasta obroča. Na mejni črti imamo približno takšno stanje kot na tistih delih površine tkanine, ki se opirajo na ogrodje šotora.

9.5.4 Hidrostatična metoda 2 na Šoperjevem aparatu

Razlikuje se od prej omenjene statične metode po tem, da daje kvantitativne rezultate. Vzorec se vpne v aparat kot pri prej omenjeni statični metodi, nato se dviga vodni stolpec, najbolj pogosto za 10 cm/min. Ko se na zgornji površini vzorca tkanine pojavi prva kaplja ali prve tri kaplje, kar je odvisno od predpisa v standardu, se odčita višina vodnega stolpca. Ta višina je v določeni meri odvisna od hitrosti dviganja vodnega stolpca. Pri večji hitrosti obstaja verjetnost, da bo tudi večja višina vodnega stolpca, pri katerem se bo pojavila prva kaplja na zgornji površini vzorca tkanine. Odvisnost pojava kapelj od hitrosti dviganja vodnega stolpa je v neposredni zvezi s hitrostjo prodiranja vode skozi tkanino. Tudi ta metoda, tako kot "mulda" in hidrostatična metoda, ne

simulira pogojev, ki nastanejo pri dinamičnem udarcu kapelj dežja na površino tkanine. Poleg tega se s to metodo ne more ugotoviti časa prodiranja vode skozi tkanino, ki je zelo pomemben element pri oceni vodo-odbojnega učinka. Toda metoda je časovno kratka in je primerna za sprotno kontrolo vodo-odbojnega učinka v sami proizvodnji, neposredno po fazi nanašanja vodo-odbojnega sredstva na tkanino.

9.5.5 Metoda potapljanja vzorca

Metoda omogoča ugotavljanje količine vode v odstotkih, ki jih tkanina lahko zadrži. Rezultati so reproduktivni, če je pravilno rešeno odvajanje vode, ki ni vezana na strukturo tkanine. Metoda ne simulira dežja in ni uporabna za ugotavljanje vodo-odbojnega učinka. Je pa zelo primerna za ugotavljanje hidrofilnosti posameznih izdelkov, kot so otroške plenice, vložki ipd.

9.5.6 Bundesmannova metoda

S to metodo se dobro simulira stanje, ki se pojavi na zunanji plasti oblačila, ko dežuje. Pogoji so strožji kot v naravi. Energija kapelj je približno šestkrat večja, kot jo imajo kaplje dežja v neurju. Križ, ki drgne vzorec z notranje strani, ponazarja drgnjenje plasti oblačila drugo ob drugo oziroma medsebojno drgnjenje posameznih delov zunanje plasti oblačila, kot je površina notranjega dela rokavov, ki je ob telesu, površina hlačnic med nogami ter drgnjenje hlačnic ob spodnji rob plašča. Primerna je tudi za ugotavljanje vodo-odbojnega učinka na tkaninah, ki so namenjene za šotore in tudi za cerade (ponjave), ki so dovolj napete, da se ne ustvarjajo vdolbine, v katerih se nabira voda.

9.6 Seznam oznak poglavja

Oznaka	Enota	Opis
A	$\mu\mathrm{m}^2$	površina skozi katero prodira para
a_0		koeficient
a_1		koeficient
b_0		koeficient
b_1		koeficient
d	μm	povprečni hidravlični premer por
D	μm	debelina tkanine
E		verjetnost, da se bo voda nahajala na določenem delu površine tkanine na razdalji x v času t
f		funkcija
γ		površinska gostota
γ_T	$\mathrm{J/m}^2$	prosta energija na enoto površine tkanine
γ_{TV}	$\mathrm{J/m}^2$	prosta energija na enoto površine tekoče faze
γ_V	$\mathrm{J/m}^2$	prosta energija na enoto površine "mešane" faze voda – tkanina
h	μm	višina (sorazmerna s potencialno energijo)
L	m	višina zračne plasti v posodi
L_1	m	višina zračne plasti v posodi brez vzorca
L_2	m	višina zračne plasti v posodi z vzorcem
l	m	dolžina pore
μ		difuzijski koeficient vodne pare

Nadaljevanje na naslednji strani

Nadaljevanje s prejšnje strani

Oznaka	Enota	Opis
μ	kg/m.s	viskoznost vode
m	kg	masa
ΔP	Pa	razlika tlakov
P	μm^2	odprta površina tkanine
p	Pa	tlak
p_a	Pa	tlak vodne pare na površini vode v posodi
p_b	Pa	tlak vodne pare na površini standardne tkanine
R	μm	upor pretoku vodne pare
R_L	μm	upor plasti zraka v posodi
R_{L1}	μm	upor plasti zraka v posodi brez vzorca
R_{L2}	μm	upor plasti zraka v posodi z vzorcem
R_m	μm	upor standardne tkanine
R_c	μm	upor zraka na zunanji strani standardne tkanine
r	μm	polmer pore
Q	g/s	količina vodne pare, ki preide iz posode v časovni enoti
s		surovina, material
θ	$^\circ$	kot omočitve, omočitveni kot
t	s	čas
U	g/μm^2.s	hitost pretoka vodne pare na enoto površine v enoti časa
U_1	g/μm^2.s	hitost pretoka vodne pare na enoto površine v enoti časa v posodi brez vzorca
U_2	g/μm^2.s	hitost pretoka vodne pare na enoto površine v enoti časa v posodi z vzorcem
v	m/s	hitrost
W_{VT}	J/m^2	delo na enoto površine, ki je potrebno za ločitev vode od tkanine
x	μm	pot, razdalja
$\bar{x}$	μm	povprečna pot, povprečna razdalja

9.7 Literatura

[1] W. E. Morton and et.al. *Physical Properties of Textile fibres.* The Textile Institute Butterworths, Manchester, London, 1962.

[2] M. Xelan and et.al. Diffusion of water vapor through laminae with particular referance to textile fabrics. *Text. Res. J.*, 25:197–223, 1955.

[3] D. Jakšić. Prenos vodne pare skozi tekstilne izdelke - i. faza. Technical report, VTOZD Tekstilna tehnologija, FNT, Univerza v Ljubljani, 1979.

[4] D. Jakšić. Prenos vodne pare skozi tekstilne izdelke - ii. faza. Technical report, VTOZD Tekstilna tehnologija, FNT, Univerza v Ljubljani, 1979.

[5] T. Young. . *Phyl. Trans. Roy. SOC. 84.*, 1:432, 1855.

[6] A. Dupre. *Theorie Mechanicque de la Chateur.* Paris, 1869.

[7] J. L. Moilliet, editor. *Waterproofing and water-repellency.* Elsevier Publishing Company, Amsterdam, London, New York, 1963.

[8] A. E. Schreideger. *The Physics of Flow Trough Porous Media.* Universita of Toronto Press, 1963.

POGLAVJE 10

Odpornost proti drgnjenju in pojav svaljkov

Kazalo

10.1 Uvod **204**
10.2 Mehanizem pojave svaljkov **204**
10.2.1 Kosmatenje površine 204
10.2.2 Modeli tvorbe svaljkov 205
10.3 Kinetični modeli tvorbe svaljkov (piling) **205**
10.3.1 Brand-Bohmfalkov kinetični model tvorbe svaljkov 205
10.3.2 Poenostavljeni kinetični model tvorbe svaljkov 208
10.4 Faze tvorbe svaljkov in lastnosti vlaken **210**
10.4.1 Formiranje kosmate – lasaste površine 210
10.4.2 Tvorjenje svaljkov pri vlaknih, ki tvorijo kosmato površino . . 210
10.4.3 Odpadanje svaljkov s površine tkanine 210
10.5 Nagnjenost h kosmatenju in tvorbi svaljkov **210**
10.6 Vpliv posameznih parametrov kakovosti vlaken na tvorbo svaljkov . . **211**
10.6.1 Vpliv trgalne trdnosti in odpornosti na upogib 211
10.6.2 Vpliv dolžine vlaken 213
10.6.3 Vpliv finosti vlaken 213
10.6.4 Vpliv oblike prečnega preseka vlaken 215
10.6.5 Vpliv togosti vlaken 216
10.6.6 Vpliv tornega koeficienta 216
10.7 Vpliv parametrov kakovosti preje na pojav svaljkov **216**
10.7.1 Vpliv velikosti stične površine 216
10.7.2 Vpliv števila zavojev 217
10.8 Vpliv vrednosti parametrov kakovosti tkanine na pojav svaljkov **217**
10.8.1 Vpliv vezave 218
10.8.2 Vpliv polstenja tkanine 218
10.8.3 Vpliv mešanice vlaken 219

10.9 Seznam oznak poglavja **221**
10.10 Literatura **222**

10.1 Uvod

Projektiranje oblačil mora zajeti tudi reprodukcijske materiale, katerih lastnosti upoštevamo glede na projektne zahtevke. Pri tem obstajata dva postopka: konstruiramo in izdelamo reprodukcijske materiale za izdelavo oblačil z optimalnimi lastnostmi ali pa projektiramo oblačilo na podlagi reprodukcijskih materialov, s katerimi pač razpolagamo. Ta drugi postopek je uporaben le v izrednih primerih pomanjkanja, na primer, med vojno. Poleg prej omenjenih osnovnih parametrov, ki jih moramo upoštevati pri projektiranju oblačila, jih lahko omenimo še nekaj, ki v določeni meri vplivajo na uporabno vrednost oblačila, kot so: odpornost proti drgnjenju, odpornost proti pojavi svaljkov, odpornost proti deformaciji (skrčenju), obstojnost barv, trdnost, odpornost proti mečkanju, hitrost umazanja ter možnost čiščenja ipd.

Odpornost proti drgnjenju je zelo pomemben parameter glede na trajnost oblačila. Pri projektiranju že lahko predpišemo tudi trajnost oblačila. To pa predvsem tam, kjer moramo načrtovati materialna in finančna sredstva za delovne obleke, uniforme ipd. Trajnost oblačila je odvisna od intenzitete drgnjenja pri uporabi in kakovosti reprodukcijskih materialov (tkanine, pletenine, vlaknine, sukanec), iz katerih je oblačilo izdelano. Intenziteto drgnjenja lahko ugotovimo s spremembo mase ali debeline ali pojava luknje v določenem časovnem obdobju. Uporabnost oblačila glede na stopnjo obrabe, lahko ugotovimo s pomočjo kriterijev, ki jih za določeno oblačilo lahko postavimo na podlagi izkušenj.

Pri obrabi se včasih pojavijo svaljki. Svaljki niso zaželeni in je oblačilo lahko zaradi pojave svaljkov neuporabno kljub temu, da je praktično še novo. Svaljki kvarijo površinski videz. Oblačilo je dejansko neuporabno zaradi estetskih kriterijev. Zaradi tega bomo nekoliko bolj podrobno obravnavali pojav svaljkov, kar nam bo omogočilo izbrati takšne konstrukcije tkanin ali pletenin, ki bodo onemogočale pojav svaljkov ali ga vsaj zmanjšale na najmanjšo možno mero pri dani konstrukciji tkanine ali pletenine.

10.2 Mehanizem pojave svaljkov

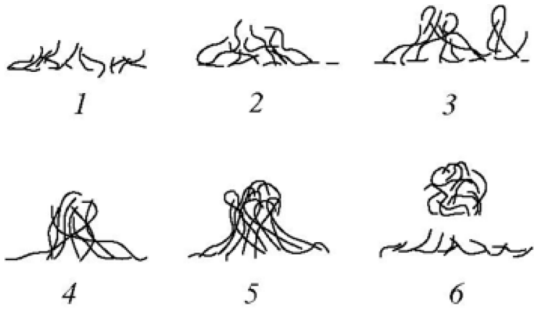
Mehanizem pojave svaljkov obsega vse faze od začetka tvorbe svaljkov (nastanek lasaste – kosmate površine) do odpadanja svaljkov s površine tkanine. Z mehanizmom pojave svaljkov, označujemo vse faze tvorbe svaljkov in njihovo odpadanje s površine tkanine. Za naše potrebe bo zadostovalo, če rečemo, da se tvorba svaljkov sestoji iz treh faz: tvorbe kosmate površine – kosmatenje površine, tvorbe svaljkov in odpadanja svaljkov s površine tkanine.

10.2.1 Kosmatenje površine

Opazujmo sedaj drugo vlakno, pri katerem nobeden od obeh koncev ne štrli iz površine tkanine. Vlakno je vgrajeno v prejo, tako da s površine štrli ven srednji del vlakna. Ker je vlakno "vpeto" v prejo z obema koncema, se pri "udarcu" (abrazija) ta srednji del bolj upira spremembi lege kot prej štrleči del opazovanega vlakna, zaradi česar je verjetnost, da bo počasi abraziv začel puliti vlakno iz površine. Če je vlakno dovolj dolgo, bo tvorilo zanko in se bo laže zavozlalo z drugimi vlakni v svaljek.

10.2.2 Modeli tvorbe svaljkov

Na sliki 10.1 [1, 2] so prikazane faze tvorbe svaljkov pri prvem primeru. V prvi fazi imamo že precej kosmato površino. Konci vlaken štrlijo iz površine tkanine. To je lahko neobdelana tkanina ali pa tkanina, ki je imela sicer videz gladke površine, vendar se je površina pod vplivom drgnjenja začela kosmatiti. V drugi fazi je površina tkanine zelo kosmata. Zaradi vpliva drgnjenja štrli iz površine tkanine precejšnja dolžina vlaken in se ti deli vlaken začnejo prepletati med seboj. V tretji fazi je medsebojno prepletanje štrlečih vlaken že tolikšno, da se pojavljajo obrisi bodočega svaljka. V četrti fazi nastane že svaljek, toda ta je s številnimi vlakni pritrjen na površino tkanine. V njem je namreč malo vlaken, ki so se popolnoma ločila od površine tkanine. V peti fazi se svaljek še vedno drži površine tkanine s pomočjo številnih vlaken, toda oblikovalo se je že "grlo" – izrazito zoženi del, ki veže svaljke s površino tkanine. V šesti fazi svaljek odpade s površine tkanine. Pri drgnjenju se namreč gibljeta dve površini druga ob drugi in sila deluje na svaljek približno vzporedno s površino tkanine. Zaradi tega so vlakna obremenjena na nateg in pregib. Vlakna se pri vsakem ciklusu pregibajo, nategnejo in razbremenijo. Pri tem se vlakna med seboj zapletajo in jim se zmanjšuje sila vpenjanja v prejo. V trenutku, ko je vsota sil vpetosti vseh vlaken v prejo, ki tvorijo "vrat" svaljka, manjša od trenutno delujoče natezne sile, se bo svaljek odtrgal od površine tkanine.



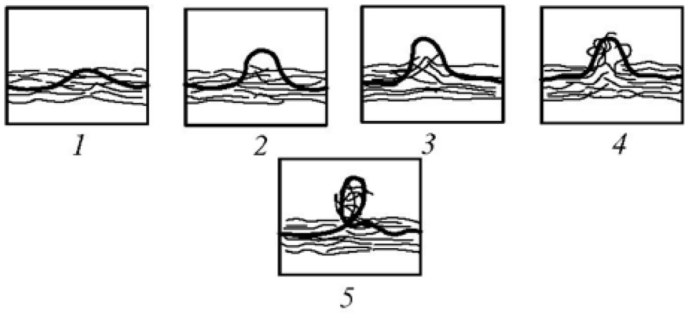
Slika 10.1: Hofmannov model tvorbe svaljkov. [1, 2]

V drugem primeru, ko je drgnjenju izpostavljen središčni del vlakna, je potek nekoliko drugačen. Ta je prikazan na sliki 10.2. Na tej sliki je prikazano eno samo debelo vlakno in to zaradi boljše preglednosti. Ta Albrechtov model [3] je glede faz identičen s prej opisanim modelom, samo da ni prikazana šesta faza – odpadanje svaljka. V prvi fazi je lega opazovanega vlakna takšna, da sta oba konca v tkanini (preji), toda srednji del vlakna leži v obliki loka v tkanini, najvišji del loka pa štrli iz tkanine. Ta del vlakna je neposredno izpostavljen vplivu abraziva. Abraziv "udarja" ob ta del vlakna. Ker je vlakno na obeh straneh "vpeto" v prejo, se močneje upira spremembi lege kot v primeru, ko štrli iz tkanine samo en konec vlakna. Zaradi tega bo večja tudi torna sila, ki nastane pri prehodu abraziva čez vlakno ki ga izvleče iz tkanine.

10.3 Kinetični modeli tvorbe svaljkov (piling)

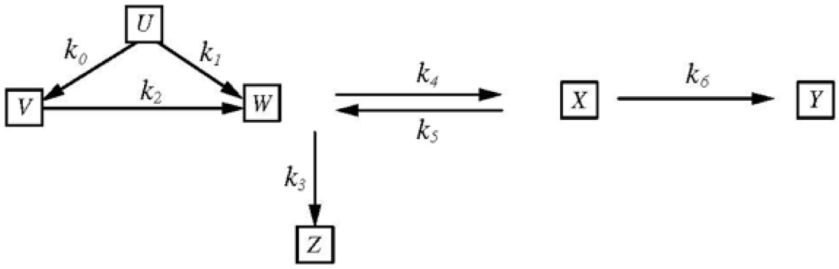
10.3.1 Brand-Bohmfalkov kinetični model tvorbe svaljkov

Brand-Bohmfalkov kinetični model [4] je bil razvit na podlagi analogije s kemično reakcijo. Predpostavljen je prej omenjeni mehanizem tvorbe svaljkov z dodatnimi stranskimi fazami. Svaljek se lahko tvori iz že obstoječe kosmate površine ali pa se ta kosmati zaradi procesa obrabe. Svaljek se tvori zaradi med seboj zavozlanih vlaken, lahko pa tudi



Slika 10.2: Albrechtov model tvorbe svaljkov. [3]

zaradi tujka, ki ga na površino privleče statična elektrika kot jedro, okrog katerega se tvori svaljek.



Slika 10.3: Brand-Bohnfalkov kinetični model tvorbe svaljkov. [4]

V modelu, ki je prikazan na sliki 10.3, oznake pomenijo:

- U je koncentracija (teža) tkanine;
- V je koncentracija (teža) kratkega lasu, ki ni zmožen takoj tvoriti svaljke;
- W je koncentracija (teža) dolgega lasu, iz katerega se tvorijo svaljki;
- Z je koncentracija (teža) vlaken, ki odpadejo s površine tkanine, preden se zavozlajo v svaljek;
- X je koncentracija (število ali teža) svaljkov, ki nastanejo na površini tkanine in
- Y je število svaljkov, ki odpadejo s površine tkanine. Celoten proces opazujemo v določenem časovnem intervalu.

Kot se vidi s slike 10.3, obstaja v modelu sedem "reakcijskih" (hitrostnih) konstant. Nekaterim med njimi je praktično nemogoče ugotoviti vrednost. Najprej si oglejmo, kako se spreminjajo posamezne koncentracije s časom.

$$\frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}t} = -\left(k_1 + k_0\right) U \tag{10.1}$$

$$\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t} = k_0 U - k_2 V \tag{10.2}$$

$$\frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t} = k_2 V + k_5 X - \left(k_3 + k_4\right) W + k_1 U \tag{10.3}$$

$$\frac{\mathrm{d}X}{\mathrm{d}t} = k_4 W - (k_5 + k_6)\, X \tag{10.4}$$

$$\frac{\mathrm{d}Y}{\mathrm{d}t} = k_6 X \tag{10.5}$$

$$\frac{\mathrm{d}Z}{\mathrm{d}t} = k_3 W \tag{10.6}$$

Če predpostavimo, da tvori tkanino neskončno število vlaken, tako da lahko zanemarimo izgubo teže tkanine v času testiranja, lahko napišemo, da je:

$$k_0 U = K_0, \tag{10.7}$$

$$k_1 U = K_1, \tag{10.8}$$

potem se enačbe od (10.1) do (10.3) transformirajo v naslednje oblike:

$$\frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}t} = -\left(K_0 + K_1\right), \tag{10.9}$$

$$\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t} = K_0 - k_2 V, \tag{10.10}$$

$$\frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t} = k_2 V + k_5 X - (k_3 + k_4)\, W + K_1. \tag{10.11}$$

Osnovna pomanjkljivost modela je v tem, da je nerealna predpostavka glede števila vlaken v tkanini, ker pri tvorbi svaljkov ne sodelujejo vsa vlakna. Pod določenimi pogoji lahko tkanina po določenem času obrabe nastopa kot stabilen sistem glede tvorbe svaljkov. Iz tega izhaja, da tkanina v večini primerov daje omejeno število vlaken za tvorbo svaljkov. Po drugi strani pa tudi navedene konstante niso konstantne v celotnem času opazovanja tvorbe svaljkov. To dejstvo zelo otežuje rešitev prej omenjenih diferencialnih enačb. Če ostanemo pri predpostavki, da so vrednosti prej omenjenih konstant dejansko konstantne, potem so splošne rešitve prej omenjenih diferencialnih enačb po času:

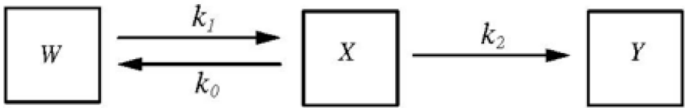
$$U = \mathrm{e}^{-(k_0 + k_1)t}, \tag{10.12}$$

$$V = \frac{K_0}{k_2} + V_0 - \frac{K_0}{k_2}\mathrm{e}^{-k_2 t}. \tag{10.13}$$

Rešitve naslednjih enačb so vse bolj zapletene in si jih bralec lahko ogleda v literaturi [4]. Vrednost posameznih kj so odvisne od lastnosti vlaken, preje in tkanine ali pletenine. Če poznamo vrednosti koeficientov k_j, $j = 1 \ldots 6$, se lahko zgodi, da je možno izračunati korelacije vpliva posameznih lastnosti vlaken, preje in tkanine ali pletenine na določeno fazo mehanizma tvorbe svaljkov. V prej omenjenih enačbah merimo koncentracije U, V, W, Z in Y v določenem času in izračunamo vrednosti posameznih konstant. Višina lasu, ki ga pripisujemo koncentraciji V, je od 1,6 mm do 6,4 mm. Las, ki ga pripisujemo koncentraciji W, pa je dolg več kot 6,4 mm. To je tudi kritična dolžina za tvorbo svaljkov.

10.3.2 Poenostavljeni kinetični model tvorbe svaljkov

Poenostavljeni kinetični model tvorbe svaljkov [5] je osnovan na predpostavki, da se tvori najprej ves las, iz katerega se potem tvorijo svaljki. To torej pomeni, da je hitrost tvorbe in odpadanja svaljkov manjša od hitrosti tvorbe kosmate površine. Dalje je predpostavljeno, da je tudi hitrost razvozlavanja svaljkov konstantna. To je prikazano na sliki 10.4.

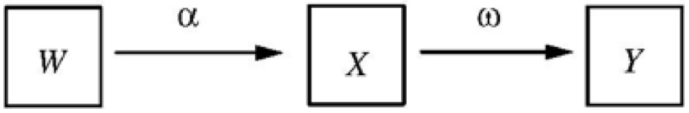


Slika 10.4: Poenostavljeni kinetični model mehanizma tvorbe svaljkov. [5]

Na sliki 10.4 parametri pomenijo:

- W je koncentracija lasu, iz katerega se tvorijo svaljki;
- k_1 je hitrostna konstanta tvorbe svaljkov;
- k_0 je hitrostna konstanta razvozlavanja svaljkov;
- X je koncentracija svaljkov;
- k_2 je hitrostna konstanta odpadanja svaljkov;
- Y je koncentracija odpadlih svaljkov.

Z nadaljevanjem abrazije (obrabe) je opažena sprememba oblika svaljkov – velikost svaljkov se povečuje. To pa verjetno zaradi tega, ker se sčasoma zmanjšuje vrednost konstante k_0, oziroma k_0 ni več konstantna. Če bi v model vpeljali še to hipotezo, bi bila zelo otežena matematična obdelava modela. Zaradi takšnih poenostavitev je težko dobiti zadostno ujemanje modela z eksperimentalnimi rezultati. Pod določenimi predpostavkami lahko model na sliki 10.4 nadomestimo z modelom na sliki 10.5.



Slika 10.5: Alternativni poenostavljeni kinetični model mehanizma tvorbe svaljkov. [6]

Če primerjamo modela na slikah 10.4 in 10.5, bomo videli, da po daljšem času drgnjenja nista več ekvivalentna. Nas pa s praktičnega stališča zanima predvsem razmerje med številom svaljkov na vzorcu in časom abrazije (drgnjenja). Konstanto α lahko označimo kot hitrost tvorjenja svaljkov in konstanto ω kot hitrost odpadanja svaljkov. Začetno količino lasu (W_0) lahko izrazimo s številom svaljkov, ki se tvorijo iz njega. Poenostavljeni model mehanizma tvorbe svaljkov temelji torej na naslednjih predpostavkah:

- da je na površini formiran las, iz katerega se tvorijo svaljki, še preden so ti formirani ali odpadli (na primer W_0 = konstantno);
- da odpadanje svaljkov ni tako pomembno; predvsem nas zanima las, iz katerega se tvorijo svaljki;

- da so hitrosti formiranja svaljkov α in odpadanja svaljkov ω konstantne v času, v katerem je sprejemljiv potek krivulje tvorbe svaljkov (to ne pomeni razvozlavanja vlaken, ampak da je tudi hitrost razvozlavanja konstantna).

Model lahko opišemo z naslednjimi diferencialnimi enačbami:

$$\frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t} + \alpha W = 0, \tag{10.14}$$

$$\frac{\mathrm{d}X}{\mathrm{d}t} + \omega X = \alpha W. \tag{10.15}$$

Ker je W količina lasu kot potencialno število svaljkov in X število svaljkov, dobimo pri času $t = 0$ začetne pogoje: $W = W_0$ in $X = 0$. Če integriramo diferencialni enačbi (10.14) in (10.15) upoštevajoč začetne pogoje dobimo:

$$X = A\left[\mathrm{e}^{-\omega t} - \mathrm{e}^{-\alpha t}\right], \tag{10.16}$$

$$A = \frac{\alpha W_0}{\alpha - \omega}. \tag{10.17}$$

Konstanta A, enačba (10.17) ima drugačen pomen pri vsakem od modelov. Druga varianta modela se lahko vzame kot "ekvivalentni model", ker kinetika formiranja in odpadanja svaljkov daje krivuljo tvorbe svaljkov, ki se ujema s tem modelom. Parametre krivulje tvorbe svaljkov lahko izrazimo s pomočjo kinetičnih parametrov. Če narišemo $\ln(X(t))$ v odvisnosti od t, dobimo premico – toda samo, če je vrednost parametra t enačba (10.16) dovolj velika. Smerni koeficient te premice bo $-\omega$, in premica seka Y os pri vrednosti $\ln(A)$. Torej lahko izračunamo konstanti A in ω. Enačbo (10.16) lahko napišemo tudi v obliki (10.18).

$$A\mathrm{e}^{-\omega t} - X(t) = A\mathrm{e}^{-\alpha t} \tag{10.18}$$

Če vrišemo $\ln[A\mathrm{e}^{-\omega t} - X(t)]$ v odvisnosti od t, bomo tudi dobili premico. Smerni koeficient te premice je α. Tudi ta premica kot prejšnja seka Y os na razdalji A od izhodišča.

Izračun parametrov prej omenjenih premic je sorazmerno lahek, ker ima α precej večjo vrednost od ω. Če pa α ni zadosti večja od ω, vrednosti $A\mathrm{e}^{-\omega t} - X(t)$ ne ležijo na premici (semilogaritemska krivulja). V tem primeru je nujno s pomočjo približkov najti dejansko premico, ki ima koordinate $\ln X(t)$ in Z. Pri tem je možno izračunati premico, pri kateri so koordinate $\ln[A\mathrm{e}^{-\omega t} - X(t)]$ in t ter smerni koeficient $-\alpha$. Enačba (10.16) je rešitev enačb (10.14) in (10.15) samo, če velja $\alpha \neq \omega$. Če je velja $\alpha = \omega$, potem dobimo:

$$X = \alpha W_0 t\mathrm{e}^{-\alpha t} \tag{10.19}$$

Enačba (10.19) je primerna aproksimativnost v primerih, ko sta vrednosti α in ω zelo blizu druga drugi. Vrednosti α in W_0 lahko poiščemo direktno tako, da narišemo $\ln(X(t)/t)$ v odvisnosti od t. Če pa časovna lestvica krivulje tvorbe svaljkov ne zajema celotnega območja dogajanj, na primer, ne zajema točke, v kateri so vsi svaljki odpadli, se analiza lahko izpelje z obratnim postopkom. Počasno odpadanje $X(t)$ pomeni, da je vrednost ω dosti manjša od vrednosti α. Potemtakem imamo v kratkih časovnih intervalih aproksimativno stanje $\mathrm{e}^{-\omega t} = 1$. Če upoštevamo to stanje, lahko napišemo enačbo (10.18) v naslednji obliki

$$A - X(t) = A\mathrm{e}^{-\alpha t}. \tag{10.20}$$

S pomočjo približkov je možno izračunati vrednost A, toda, tako da $\ln(A - X)$ v odvisnosti od t da premico, ki seka Y os v točki $\ln A$. Da ocenimo indeks ujemanja, lahko s pomočjo statistične analize izračunamo parameter σ z enačbo (10.21), kjer so:

- σ sipanje vrednosti rezultatov;
- X_i eksperimentalno število svaljkov v danem času;
- N število meritev (odčitavanj števila svaljkov);
- 3 število konstant v enačbi (10.18);
- $(N - 3)$ število stopenj prostosti;
- X_i/N predstavlja povprečno vrednost števila svaljkov.

Vrednost σ se ne more izračunati, če se eksperimentalni rezultati sipajo poljubno okrog teoretične krivulje ali pa, če eksperimentalni rezultati simetrično odstopajo od teoretične krivulje. Ujemanje je dobro, če je $\sigma < 0{,}20$.

$$\sigma = \frac{\sqrt{\frac{\sum_i (X_i - \bar{X})^2}{N-3}}}{\frac{\sum_i X}{N}} \tag{10.21}$$

10.4 Faze tvorbe svaljkov in lastnosti vlaken

Najprej bomo podali pregled vpliva posameznih lastnosti vlaken na določeno fazo tvorbe svaljkov.

10.4.1 Formiranje kosmate – lasaste površine

Pri tej prvi fazi tvorbe svaljkov igrajo važno vlogo: torne lastnosti površine vlakna (torni koeficient), togost (odpornost na pregibanje), trgalna trdnost in odpornost proti obrabi.

10.4.2 Tvorjenje svaljkov pri vlaknih, ki tvorijo kosmato površino

Na to fazo vplivajo: oblika povprečnega preseka vlaken, finost, togost, hitrost relaksacije, torne lastnosti površine vlaken (torni koeficient) in raztezek.

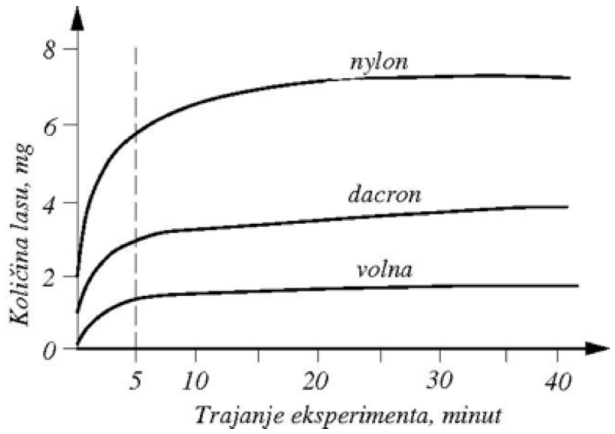
10.4.3 Odpadanje svaljkov s površine tkanine

Na to fazo vplivata trgalna trdnost in življenjska doba vlaken pri pregibu.

10.5 Nagnjenost h kosmatenju in tvorbi svaljkov

Ta lastnost ima odločilno vlogo pri tvorjenju svaljkov. Če se površina ne kosmati pri drgnjenju, ni na razpolago materiala – relativno prostih vlaken za tvorbo svaljkov, se na površini tkanine ne bodo pojavili svaljki. Na sliki 10.6 so prikazane krivulje, ki označujejo količino lasu, ki se tvori na enoti površine v odvisnosti od časa tretiranja in vrste vlaken. Brez te lastnosti ni pojave svaljkov. Zato je zelo pomembno preučiti vpliv posameznih parametrov kakovosti vlaken na pojav kosmate površine. Pri ugotavljanju tega, se pojavijo precejšnje težave. Nekateri parametri imajo vpliv na tvorbo svaljkov v eni fazi, medtem ko drugi lahko vplivajo v vseh treh fazah tvorbe svaljkov. Oglejmo si

sliko 10.6. Volna je manj nagnjena k tvorbi svaljkov kot dakron in najlon. Zakaj prihaja do tega? Kje so glavni vzrok takega obnašanja vlaken različnega izvora? Vidimo, da je hitrost prirastka količine lasu v začetni fazi, v prvih petih minutah kosmatenja oziroma obrabe zelo velika, se potem količina lasu relativno malo spreminja. Če kosmatimo tkanine, dosežemo komercialno kosmatost v prvih petih minutah kosmatenja. Nadaljnje kosmatenje ne poveča bistveno kosmatosti površine. Takšen rezultat je lahko posledica dveh vzrokov. Prvič, najprej izpulimo iz tkanine vlakna, ki so relativno slabo "vpeta" v preji. Pri nadaljnjem tretiranju porabimo precej časa, da izpulimo iz tkanine v prejo in tkanino bolj vezana vlakna. Drugič, vlakna odpadajo s tkanine in je hitrost puljenja novih vlaken iz tkanine le nekoliko večja od hitrosti odpadanja že izpuljenih vlaken.



Slika 10.6: Tipične krivulje formiranja lasu pri vlaknih različnega izvora. [6]

Pri normalni uporabi obleke se tvorijo svaljki, če je tkanina nagnjena k tvorbi svaljkov, ki končno odpadejo. To se pravi, ko večji del vlaken odpade v obliki svaljkov in le manjši del v obliki posamičnih vlaken. Če tkanina ni nagnjena k tvorbi svaljkov, potem bodo s površine tkanine odpadala posamična vlakna ali odtrgani kosi vlaken.

10.6 Vpliv posameznih parametrov kakovosti vlaken na tvorbo svaljkov

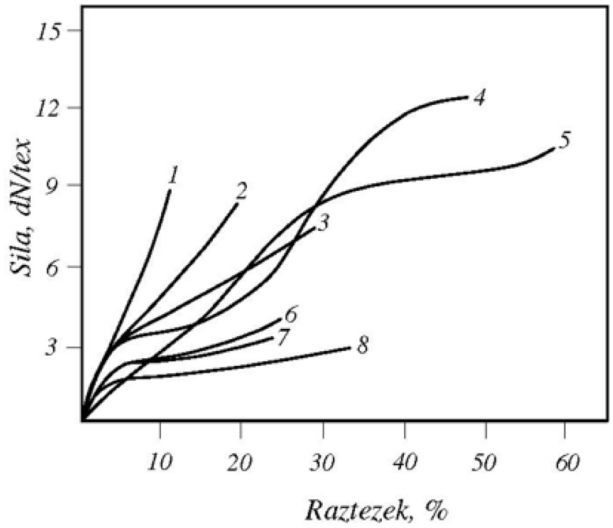
Oglejmo si, kako vplivajo posamezni parametri lastnosti vlaken na tvorbo svaljkov.

10.6.1 Vpliv trgalne trdnosti in odpornosti na upogib

Trgalne trdnost vlaken ima določen vpliv na tvorbo svaljkov. Na sliki 10.7 so prikazane krivulje napetost – raztezek za določene vrste vlaken.

Krivulje s slike 10.6 lahko primerjamo s krivuljami na sliki 10.7. Volna ima najmanjšo trgalne trdnost in tudi najmanjšo nagnjenost h kosmatenju površine; pri dakronu in najlonu je stanje obratno. Precejšnje so razlike trgalne trdnosti. Iz tega bi lahko sklepali, da večja trgalne trdnost vlaken pomeni tudi večjo nagnjenost h kosmatenju površine in s tem večjo nagnjenost k tvorbi svaljkov pri istočasnih drugih ugodnih pogojih.

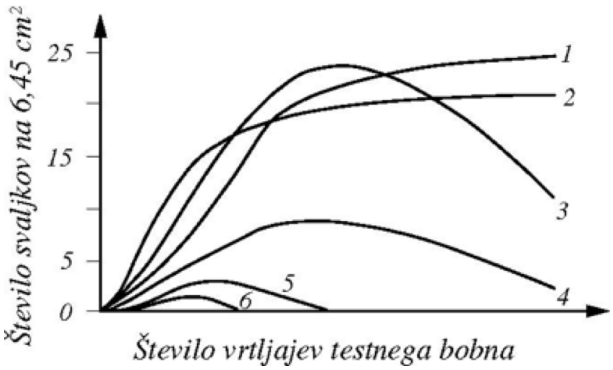
Oglejmo si ponovno prej opisana dva primera. Del vlakna z enim koncem štrli iz površine tkanine. Če ima vlakno istočasno relativno nizko trgalne trdnost in je močno "vpeto" v preji in tkanino, je torna sila, ki puli vlakno, manjša od tornih sil, ki držijo vlakno v preji in tkanini, obstajata dve možnosti. Del vlakna, ki je v preji in tkanini, ne spremeni lege; del, ki štrli iz tkanine, se lahko deformira, delno spremeni lego ali pa



Slika 10.7: Krivulje poteka sila-raztezek za nekatera vlakna. Legenda: 1 – bombaž, 2 – rejon, 3 – orlon, 4 – dakron, 5 – najlon, 6 – acetat, 7 – volna, 8 – vikara.

ostane v prvotni legi. To velja tedaj, ko je torna sila, ki jo povzroči abrazija, ko abrazer gre čez vlakna, manjša od trgalne trdnosti vlakna. Če je ta sila večja od trgalne trdnosti vlakna, kar pomeni, da je štrleči del vlakna trdno vpet z abrazijo, se bo vlakno odtrgalo in odpadlo s površine. Podobno velja tudi za drugi primer. Iz tega izhaja, da trgalna trdnost vpliva na hitrost odpadanja lasu in svaljkov, kar lahko ugotovimo po daljšem času drgnjenja. Število svaljkov na enoto površine je mera za svaljke na tkanini.

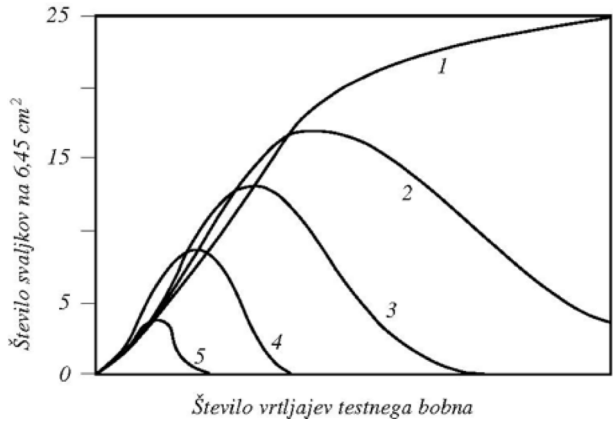
Če bi predpostavili, da je hitrost tvorbe lasu, ki ima dovolj višine, računano od površine tkanine, za tvorbo svaljkov na površini tkanine, odvisna od hitrosti odpadanja svaljkov s površine tkanine, potem bi število svaljkov ostalo nespremenjeno. Realno poteka proces drugače. Kot vidimo s slike 10.8, dosežemo pri volni maksimalno število svaljkov na površini tkanine le nekaj časa po formiranju lasu. Od te točke naprej je hitrost formiranja novih svaljkov manjša od hitrosti odpadanja svaljkov s površine tkanine. Pri dakronu in najlonu se to ne dogaja. Trgalna trdnost teh vlaken je namreč relativno velika, zato je hitrost tvorbe svaljkov večja od hitrosti odpadanja le-teh.



Slika 10.8: Odvisnost števila svaljkov na enoto površine od števila ciklov (obratov) aparata za ugotavljanje koncentracije svaljkov. [6] Legenda: 1 – dakron, 2 – najlon, 3 – rayon, 4 – orlon, 5 – volna, 6 – acetat.

Količino svaljkov lahko zmanjšamo z zmanjšanjem trgalne trdnosti vlaken, kar vidimo s slike 10.9. Vlakno se pretrga zaradi kombiniranega delovanja natezne sile in

upogiba. Zaradi upogibanja vlakno oslabi, s čimer se mu zmanjšuje tudi trgalna trdnost. Trdnost vlakna lahko torej merimo tudi s številom upogibov, ki jih prenese vlakno do pretrga. Na sliki 10.9 so prikazane krivulje koncentracije svaljkov neoslabljenega poliestrskega vlakna in oslabljenih poliestrskih vlaken.



Slika 10.9: Krivulje pilinga neoslabljenega poliestrskega vlakna in v določeni meri oslabljenih poliestrskih vlaken. [6]

Krivulja 1 na sliki 10.9 se nanaša na poliestrsko vlakno, ki ima trgalno trdnost 3,9 cN/tex in prenese 13.000 upogibov, krivulja 2 se nanaša na oslabljeno poliestrsko vlakno, ki ima trgalno trdnost 3,8 cN/tex in prenese 4.200 upogibov, krivulja 3 se nanaša na oslabljeno poliestrsko vlakno, ki ima trgalno trdnost 3,6 cN/tex in prenese 2.900 upogibov, krivulja 4 se nanaša na oslabljeno poliestrsko vlakno, ki ima trgalno trdnost 2,5 cN/tex in prenese 1.800 upogibov in krivulja 5 se nanaša na oslabljeno poliestrsko vlakno, ki ima trgalno trdnost 1,8 cN/tex in prenese 800 upogibov.

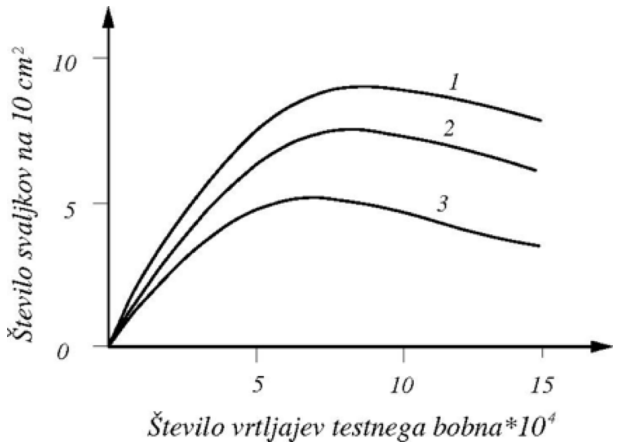
Kot vidimo na sliki 10.9, ima že krivulja 2 maksimum, po katerem je hitrost tvorbe svaljkov manjša od hitrosti odpadanja le-teh. To je doseženo predvsem z zelo velikim zmanjšanjem odpornosti proti upogibanju. Krivulja 5 hitro doseže maksimum in pri tem tipu praktično nimamo pojava svaljkov. Trdnost in odpornost oslabljenih PES vlaken – krivulj 5 sta podobna volnenem vlaken.

10.6.2 Vpliv dolžine vlaken

Ni težko zamisliti načina vpliva dolžine vlakna na pojav svaljkov. Čim daljše je vlakno, tem večja je verjetnost, da se mu poveča kontaktna površina s sosednim vlaknom v preji. S povečanjem kontaktne površine se povečuje tudi vsota tornih sil, ki nastajajo v procesu puljenja vlakna iz tkanine zaradi pritiska sosednjih vlaken na površino opazovanega vlakna. Če je vlakno daljše, moramo torej uporabiti večjo silo pri puljenju vlakna iz strukture tkanine kot v primeru, če je vlakno krajše. V začetni fazi obrabe razlike niso velike. Te se večajo po dosegu maksimuma, glej sliko 10.10.

10.6.3 Vpliv finosti vlaken

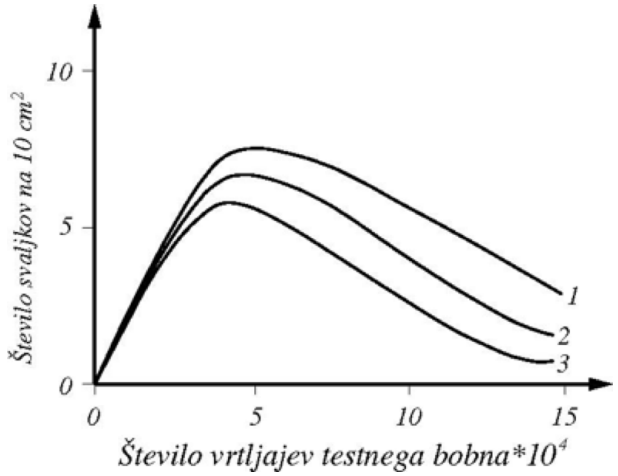
Ko razpravljamo o vplivu določenega parametra na koncentracijo svaljkov vedno predpostavljamo, da obstajajo vsi drugi parametri nespremenjeni. Abrazija vleče določen čas z določeno silo vlakna iz strukture tkanine. Abrazija v bistvu pritiska na določeno površino vlaken z določeno silo. Čim večja je površina, tem večja je skupna sila, ki vleče vlakno iz tkanine.



Slika 10.10: Vpliv dolžine vlaken na količino pilinga na tkanini iz poliestrskih vlaken. [7] Legenda: krivulja 1 – dolžina vlaken 60 mm, krivulja 2 – dolžina vlaken 80 mm in krivulja 3 – dolžina vlaken 120 mm.

Po drugi strani bo kontaktna površina grobega vlakna verjetno nekoliko večja od kontaktne površine finejših vlaken, ali pa vsaj ne bo manjša. Iz tega izhaja, da bodo finejša vlakna tvorila verjetno večjo količino svaljkov na površini tkanine kot groba vlakna. Tu je treba upoštevati še nekaj. Na enoti površine tkanine je namreč večje število finejših vlaken kot grobih vlaken, seveda pri tem predpostavljamo, da je konstrukcija tkanine iz bolj grobih vlaken identična tkanini, ki je izdelana iz finejših vlaken. Potem bo tudi število izvlečenih finejših vlaken večje od števila izvlečenih bolj grobih vlaken. Tudi razdalja med finejšimi vlakni bo manjša. Zaradi tega bomo potrebovali manjšo kritično dolžino vlaken za tvorbo svaljkov kot pri bolj grobih vlaknih, ki so med seboj bolj oddaljena.

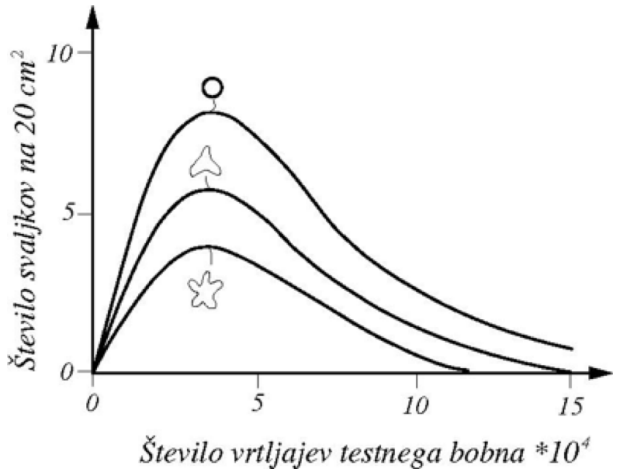
Na podlagi zgoraj omenjenih predpostavk lahko sklepamo, da bodo finejša vlakna tvorila večjo količino svaljkov kot bolj groba vlakna. To predpostavko potrjujejo rezultati na sliki 10.11.



Slika 10.11: Sprememba števila svaljkov v odvisnosti od števila vrtljajev testnega aparata in finosti vlaken na površini pletenine, ki je pletene na okroglih pletilnikih. [7] Legenda: 1 – finost vlaken 2 dtex, 2 – finost vlaken 4 dtex, 3 – finost vlaken 5 dtex.

10.6.4 Vpliv oblike prečnega preseka vlaken

Oblika prečnega preseka vlakna tudi vpliva na količino svaljkov na površini tkanine. Poznamo najmanj tri oblike prečnega preseka vlakna: okroglo, v obliki tri-krake zvezde in v obliki peterokrake zvezde. Zamislimo si, da je abrazer ravna plošča, ki pritiska na vlakno in obenem drsi čezenj. Če bo zunanji premer enak pri vseh treh vrstah prečnega preseka, kot je to prikazano na sliki 10.12, bo imelo največjo stično ploskev z abrazerjev vlakno, ki ima okrogel presek, najmanjšo pa vlakno, ki ima prečni presek v obliki peterokrake zvezde. To pa zaradi tega, ker je polmer ukrivljenosti površine pri okroglem prečnem preseku nekajkrat večji od polmera ukrivljenosti površine na vrhu kraka pri prečnem preseku v obliki peterokrake zvezde.



Slika 10.12: Vpliv oblike prečnega preseka in števila vrtljajev (časa delovanja) testnega aparata na količino svaljkov na površini tkanine iz 100 % poliestra. [7]

Silo, ki vleče okroglo vlakno iz tkanine, lahko primerjamo s silo, ki vleče vlakno iz zvezdastega prečnega preseka. Ker je pritisk na enoto površine pri obeh vlaknih enak in ker je pri vlaknu, ki ima okrogel presek, stična ploskev večja kot pri vlaknu zvezdastega prečnega preseka, bo tudi torna sila, ki vleče vlakna iz tkanine večja pri vlaknu, ki ima okrogel prečni presek kot pri vlaknu, ki ima zvezdast presek.

Čim večja je torna sila, ki vleče vlakna iz strukture tkanine, tem večja je verjetnost, da bo iz tkanine izvlečeno večje število vlaken in se bo tvorilo več svaljkov na enoto površine. Toda analizirati moramo še nasprotni učinek, ki ga povzroča velikost stične površine med vlakni v tkanini in preji. Če je pritisk, ki ga povzročajo sosednja vlakna na opazovano vlakno, v obeh primerih enak, potem je zelo pomembna velikost stične površine.

V tem primeru je odvisno od stične ploskve, kako velika bo torna sila, ki se upira puljenju vlaken iz strukture tkanine. V drugem primeru, kjer sosednja vlakna delujejo na opazovano vlakno z enako silo pri okroglem in zvezdastem preseku, ima stična površina nekoliko manjšo vlogo. Seveda predpostavljamo, da je torni koeficient med vlakni enak pri obeh oblikah prečnega preseka.

Če so v preji dobro paralelizovana vlakna, se celo lahko zgodi, da je pri zvezdasti obliki večjo stično ploskev kot pri okrogli. Iz prej povedanega izhaja, da je zelo težko sklepati o vrednosti tornih sil, ki preprečujejo puljenje vlaken iz strukture tkanine na njeno površino. Za enkrat bomo predpostavili, da so te sile enake, ne glede na obliko prečnega preseka. Na sliki 10.12 je prikazan vpliv oblike prečnega preseka vlaken na koncentracijo svaljkov (število svaljkov na enoto površine tkanine iz 100 % poliestra) .

Na sliki se jasno vidi, da večja kontaktna površina z abrazerjem pomeni večjo količino svaljkov in narobe, večja stična površina med vlakni (tri-kraka in peterokraka zvezda) pomeni manjšo nagnjenost tvorbi svaljkov.

10.6.5 Vpliv togosti vlaken

Za razliko od odpornosti proti upogibu, ki nam pove, koliko pregibov prenese vlakno (pregibi so pod kotom 90 °), preden se pretrga, nam togost pove, s kolikšno silo se vlakno upira spremembi lege – upogibu za 90 °. Čim manjši odpor nudi vlakno abrazerju, oziroma čim laže se prilagodi novi legi, ki jo zahteva lega površine abrazerja, s tem manjšo silo bo deloval abrazer na vlakno. Sila, ki vleče vlakno iz strukture tkanine na njeno površino, bo torej manjša pri lahko upogljivem vlaknu in tkanina bo imela manjšo nagnjenost k tvorbi kosmate površine in svaljkov.

10.6.6 Vpliv tornega koeficienta

Torni koeficient ima zelo važno vlogo pri tvorbi svaljkov. Čim večja je vrednost tornega koeficienta med vlakni, tem bolj je vlakno vpeto v strukturo tkanine, oziroma večje torne sile nastajajo pri vlečenju vlakna iz strukture tkanine, če ni spremenjena vrednost pritiska sosednjih vlaken in velikost torne (stične) površine. Po drugi strani pa večji torni koeficient vpliva tudi na povečanje torne sile, ki vleče vlakno iz strukture tkanine. Ne glede na to se s povečanjem vrednosti tornega koeficienta povečuje verjetnost zmanjšanja količine svaljkov na enoto površine tkanine, zlasti v primeru, ko je torni koeficient med abrazerjem in vlakni manjši od tornega koeficienta med samimi vlakni.

10.7 Vpliv parametrov kakovosti preje na pojav svaljkov

Kot smo že posredno omenili pri vlaknih, sta za obnašanje preje pomembna dva osnovna parametra: velikost stične površine in velikost sile, ki stiska vlakna skupaj.

10.7.1 Vpliv velikosti stične površine

Velikost stične površine je odvisna predvsem od načina predenja. Če prejo predemo po mikanem postopku, ne dobimo dovolj velike orientiranosti vlakna, dobimo pa voluminozno prejo, v kateri imajo vlakna takšno medsebojno lego, da ne dovoljujejo doseganja visoke vrednosti stične površine med vlakni. V preji je preveč medsebojnih križanj vlaken, zato se vlakna med sabo dotikajo pogosteje v posameznih točkah kot po vsej dolžini.

Zaradi tega je velikost stične površine med vlakni manjša kot pri dobro paraleliziranih vlaknih v preji. Pri nespremenjenem medsebojnem pritisku vlaken pomeni majhna velikost stične površine manjšo vrednost torne sile, ki se javlja kot reakcijska sila v procesu vlečenja (puljenja) vlaken iz preje pri tvorbi svaljkov. Posledica tega je lažje puljenje vlaken iz strukture preje, lažja tvorba kosmate površine in svaljkov.

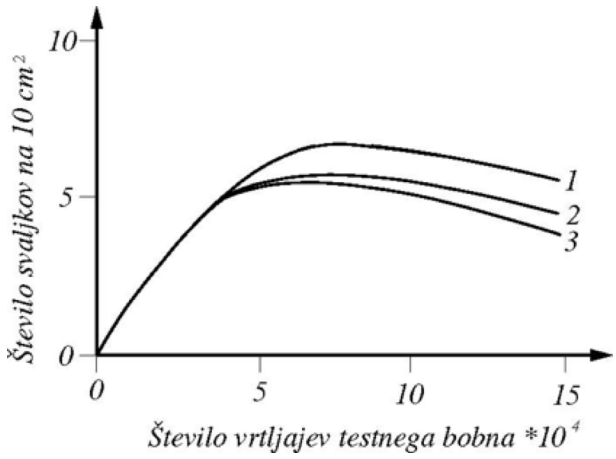
Če je preja česana, so vlakna bolj paralelizirana in se manj križajo med seboj. Stična površina je veliko večja kot pri mikani preji. Zaradi tega bo pri nespremenjeni vrednosti pritiska sosednjih vlaken na opazovano vlakno, ki ga vlečemo iz preje oziroma tkanine, vrednost reakcijske torne sile pri puljenju vlakna iz česane preje večja, kot bi bila pri podobnem vlaknu v mikani preji. Lahko torej sklepamo, da bo imela česana preja manjšo nagnjenost h kosmatenju in tvorbi svaljkov.

Pri sukani preji je pritisk sosednjih vlaken na opazovano vlakno večji, prav tako tudi stična površina zaradi česar se pojavi višja reakcijska sila pri puljenju opazovanega vlakna iz strukture preje oziroma tkanine. Poleg tega je abrazerju izpostavljen krajši del vlaken kot v enojni preji. Iz vsega tega lahko sklepamo, da bo tkanina, stkana iz sukane preje, manj nagnjena k tvorbi svaljkov kot tkanina, stkana iz enojne preje.

10.7.2 Vpliv števila zavojev

S povečanjem števila zavojev se povečuje tudi pritisk sosednjih vlaken na opazovano vlakno. Zaradi tega se pojavi večja reakcijska torna sila v procesu puljenja vlaken iz preje. Poleg tega se s povečanjem števila zavojev povečuje tudi gostota preje in se zmanjšuje medsebojna razdalja med vlakni, torej se poveča verjetnost zmanjšanja koncentracije svaljkov.

Na sliki 10.13 vidimo, da je število svaljkov na 10 cm^2 površine do 40.000 vrtljajev enako pri vseh opazovanih prejah, potem se krivulje tvorbe svaljkov ločijo. Vendar razlika ni bistvena. Enako obnašanje v začetni fazi je verjetno posledica približno enakega števila slabo vezanih vlaken pri vseh treh opazovanih prejah. Ko se ta vlakna "porabijo" za tvorbo svaljkov, začne abrazer vleči iz preje tudi tista vlakna, ki so bolj "vpeta". Ker pa se pojavlja manjša reakcijska torna sila pri sukani preji, v kateri ima enojna preja 300 zavojev na meter, kot pri preji, ki ima v enojni preji 600 zavojev na meter dolžine preje, zavzema tudi krivulja 1 višjo lego kot krivulja 3.



Slika 10.13: Odvisnost števila svaljkov na enoto površine (poliestrske tkanine) od števila vrtljajev testnega bobna in spremembe števila zavojev enojne preje. Legenda: 1 – 30 tex Z 300 * 2 S 550, 2 – 30 tex Z 550 * 2 S 550, 3 – 30 tex Z 600 *2 - S 550

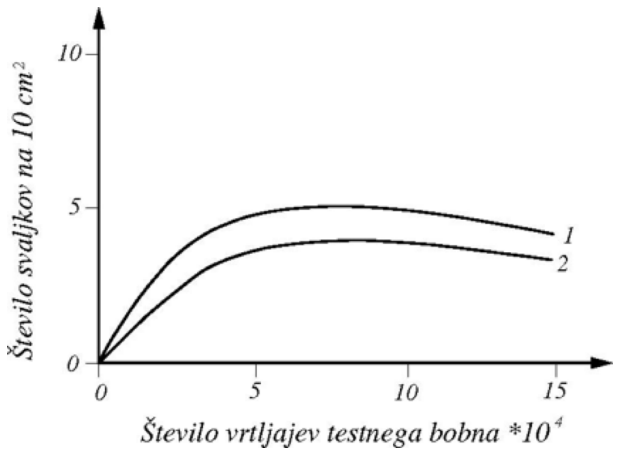
10.8 Vpliv vrednosti parametrov kakovosti tkanine na pojav svaljkov

Tkanina je kompleksen sistem in zaradi tega je težko predvideti vpliv spremembe vrednosti posameznih parametrov kakovosti na spremembo njene nagnjenosti k tvorbi svaljkov. Če pa upoštevamo prej analizirane vplive spremembe vrednosti parametrov kakovosti vlaken in preje na pojav svaljkov, se bo verjetno mogoče izogniti izdelavi tkanin, ki so nagnjene k tvorbi svaljkov. Pri tkanini bomo analizirali vpliv vezave in pol-stenja na pojav svaljkov.

10.8.1 Vpliv vezave

Medsebojno prepletanje niti osnove in votka v tkanini je dodatni stabilizacijski faktor, ki lahko v določeni meri zmanjša količino svaljkov na površini tkanine. Dolžina flotiranja niti na površini tkanine je odvisna od gostote – števila niti osnove in votka na enoto dolžine ter vrste vezave. Lahko pričakujemo, da povečanje gostote vpliva na zmanjšanje koncentracije svaljkov. Toda gostota je omejena in prilagojena vrsti in namenu tkanine. Zato ne more biti dejavnik, s katerim bi bistveno vplivali na zmanjšanje koncentracije svaljkov. Gostota naj bo konstantna in spreminjajmo le vezavo.

Na sliki 10.14 je vidimo, da vezava platno zmanjšuje količino svaljkov v primerjavi z vezavo keper (cirkas 2/2). Pri kepru je dolžina flotirajoče niti dvakrat večja kot pri platnu, kljub temu pa se razlika v številu svaljkov bistveno ne razlikuje. Iz tega lahko sklepamo, da vpliv vezave na koncentracijo svaljkov ni izrazit, oziroma bi morali precej povečati spremembo dolžine flotirajoče niti, da bi dobili bolj opazno razliko v količini svaljkov.



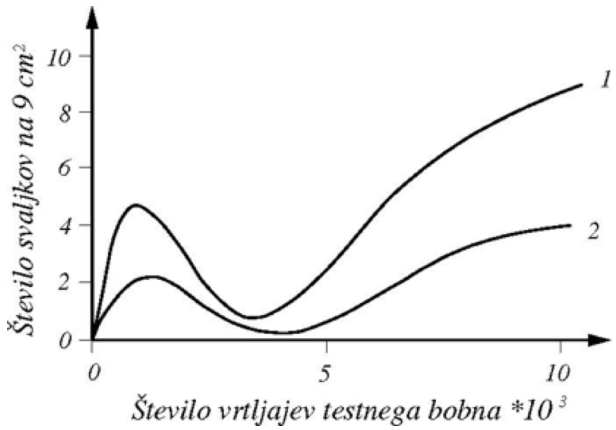
Slika 10.14: Odvisnost števila svaljkov (na površini poliestrske tkanine) od števila vrtljajev testnega bobna in vezave. [7]. Legenda: 1 – keper 2/2, 2 – platno

10.8.2 Vpliv polstenja tkanine

To se v glavnem nanaša na volnene in delno pol-volnene tkanine. Polstimo predvsem tkanine, izdelane iz mikane preje. Takšne tkanine imajo na površini določen odstotek vlaken, ki niso "vpeta" v prejo oziroma tkanino ali pa so le slabo vpeta. Poleg tega so vlakna med seboj delno zapletena tako, da se ne tvorijo svaljki. Ko površino takšne tkanine izpostavimo obrabi (drgnjenju), se združijo skupaj v svaljke prosta vlakna na tkanini in vlakna, ki so v tkanini slabo vgrajena – slabo vpeta.

Če bi nadaljevali s testiranjem tvorbe svaljkov, katerega krivulji sta prikazani na sliki 10.13, bi dobili še drugi maksimum. Vidimo, da malo polstena tkanina daje več svaljkov od normalno polstene tkanine. To lahko delno obrazložimo s prisotnostjo poliestrskih vlaken v tkanini, slika 10.15, ki jo predstavlja krivulja 1, in delno z načinom pol-stenja. Kot smo že prej omenili, so v normalno polsteni tkanini vlakna precej močno sprijeta med seboj. S tem se poveča velikost reakcijske torne sile in se iz tkanine težko izvlečejo nova vlakna, kar ni tako pri manj polsteni tkanini. Opazujmo drugi del krivulje – desno od minimalnega števila svaljkov. Krivulja 1 kaže več kot dvakratno število svaljkov v primerjavi s krivuljo 2. V tem področju je poleg učinka pol-stenja prisoten še učinek trgalne trdnosti poliestrskih vlaken, ki podaljšujejo "življenjsko dobo" svaljkov na tka-

nini. Zaradi tega število svaljkov narašča hitreje kot pri čisti volneni tkanini. Iz lege minimuma lahko sklepamo, da je hitrost tvorbe svaljkov na pol-volneni tkanini le nekoliko večja od hitrosti tvorbe svaljkov na volneni tkanini, toda hitrost odpadanja svaljkov na volneni tkanini je verjetno dosti večja kot na pol-volneni tkanini in to po dosegu minimalnega števila svaljkov potem, ko smo že dosegli 4.000 vrtljajev testnega bobna.



Slika 10.15: Odvisnost števila svaljkov od stopnje polstenja volnenih tkanin in števila vrtljajev testnega bobna. Legenda: 1 – krivulja tvorbe svaljkov na manj polsteni tkanini (85 % volne in 15 % PES), 2 – krivulja tvorbe svaljkov na normalno polsteni volneni tkanini.

10.8.3 Vpliv mešanice vlaken

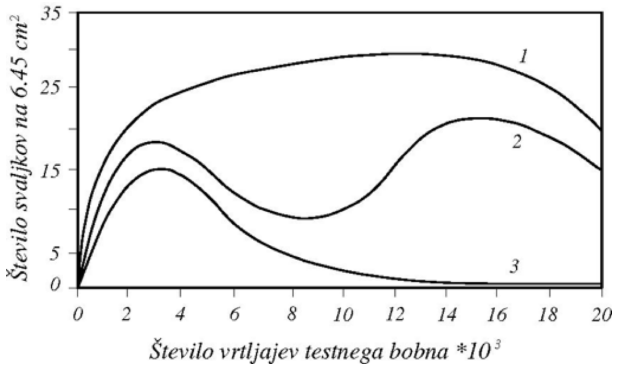
V prejšnjem poglavju smo že omenili, kako lahko na tvorbo svaljkov vpliva določeno vlakno, ne glede na to, da je njegov delež relativno majhen. Moderne tkanine, namenjene za izdelavo oblek, so pogosto izdelane iz mešanice različnih vlaken. V mešanici so ponavadi naravna vlakna mešana s kemičnimi (sintetičnimi) vlakni.

Oglejmo si rezultate preiskave tvorbe svaljkov pri različnih surovinskih sestavah. Na sliki 10.16. so prikazane tri krivulje tvorbe svaljkov. Krivulja 3 se nanaša na 100 % volneno tkanino, krivulja 2 na tkanino, ki ima 85 % volne in 15 % vlaken tipa dakron, krivulja 1 pa se nanaša na tkanino, ki ima 70 % volne in 30 % dakrona. Oblika krivulje 3 je tipična za volnene tkanine. Krivulja 2 že kaže močno spremenjen potek. Že v območju maksimuma krivulje 2 kaže krivulja 1 višje vrednosti tvorbe svaljkov, toda oblika je podobna obliki krivulje za volnene tkanine. Ta del krivulje si lahko razlagamo delno s povečano hitrostjo kosmatenja in večje hitrosti tvorbe svaljkov, delno pa z zmanjšano hitrostjo odpadanja svaljkov. Pri krivulji 2 je dosežen minimum pri približno 8.000 vrtljajih testnega bobna. Potem se začne število svaljkov zopet povečevati. Krivulja 1 doseže neizrazit maksimum pri približno 12.000 vrtljajih testnega bobna.

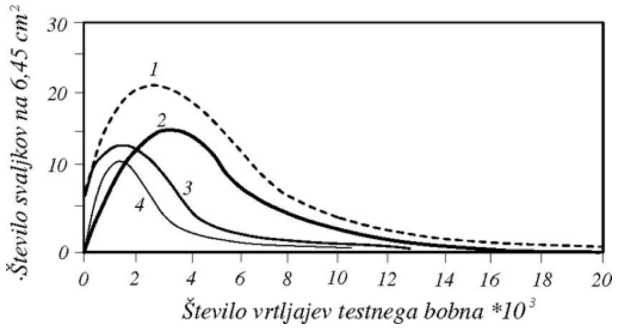
Iz teh krivulj vidimo, da v volnenih tkaninah tudi relativno majhen odstotek močnih sintetičnih vlaken v tkanini močno poslabša lastnosti tkanine glede tvorbe svaljkov.

Krivulja 4, slika 10.17, se nanaša na flanelasto tkanino, ki je manj kosmatena in polstena kot flanelasta tkanina, ki jo predstavlja krivulja 2. Iz poteka krivulj je razvidno, da imajo glede pojave svaljkov PAN vlakna podobne lastnosti kot volna.

Iz slike 10.18 tudi lahko vidimo, da imajo vse krivulje maksimum in da je hitrost odpadanja svaljkov po določenem številu vrtljajev testnega bobna večja od hitrosti tvorjenja novih svaljkov. Največji maksimum dosežemo pri tkaninah, v katerih so viskozna

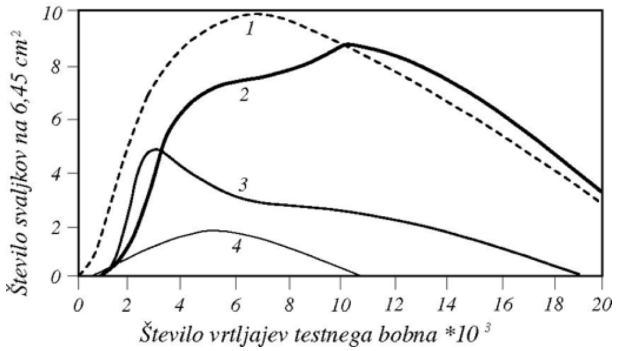


Slika 10.16: Odvisnost števila svaljkov od časa testiranja (števila vrtljajev testnega bobna) in surovinske sestave tkanine. [8] Legenda: 1 – tkanina iz 70 % volne in 30 % dakrona, 2 – tkanina iz 85 % volne in l5 % dakrona, 3 – tkanina iz 100 % volne.



Slika 10.17: Odvisnost števila svaljkov od časa testiranja (števila vrtljajev testnega bobna) in surovinske sestave tkanine. [8] Legenda: 1 – tkanina iz 70 % volne in 30 % orlona, 2 – 100 % volna, 3 – 70 % volne in 30 % dynela, 4 – tkanine iz 100 % volne.

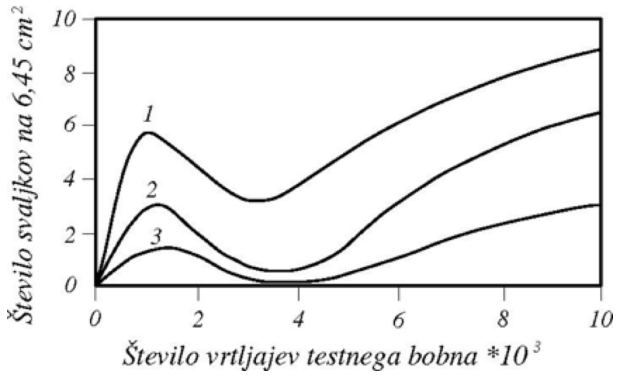
vlakna, zlasti če so obdelana poleg impregnacije proti mečkanju še z vodo odbojno impregnacijo.



Slika 10.18: Odvisnost števila svaljkov od časa testiranja (števila vrtljajev testnega bobna) isurovinske, sestave. [8] Legenda: 1 – tkanina iz 50 % viskoze in 50 % dakrona, obdelana proti mečkanju in močenju, 2 – 55 % dakrona in 45 % volne, 3 – 100 % dakron, 4 – tkanina iz 50 % dakrona in 50 % viskoznih vlaken – obdelana proti mečkanju.

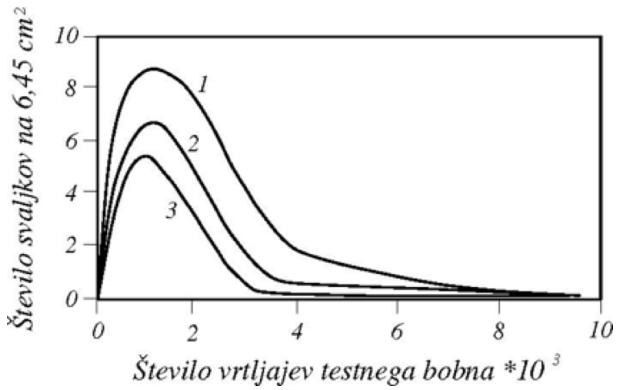
Iz slike 10.19 vidimo, da povečanje odstotka močnih sintetičnih vlaken v tkanini zelo povečuje koncentracijo svaljkov (krivulja 1). Poleg tega se po doseženem minimalnem številu svaljkov njihovo število začne povečevati, ker sintetična vlakna držijo svaljke na površini tkanine oziroma podaljšujejo življenjsko dobo svaljkov. Čim bolj je tkanina

polstena, tem manj je podvržena pojavu svaljkov.



Slika 10.19: Odvisnost števila svaljkov od časa testiranja (števila vrtljajev testnega bobna) in surovinske sestave tkanin. [8] Legenda: 1 – normalno polstena tkanina iz 30 % mešanice najlon/dakron in 70 % volne; 2 – malo polstena tkanina iz 15 % mešanice najlon/dakrona in 85 % volne in 3 – normalno polstena tkanina izdelana iz 15 % najlon/dakrona in 85 % volne.

Na sliki 10.20 vidimo, da je boljša situacija kot na sliki 10.19, saj ima orlon manjšo pregibno trdnost kot najlon. Res je, da je koncentracija svaljkov na maksimumu večja kot na sliki 10.19, vendar se potem hitro zmanjšuje. Tukaj obstaja še dodatni kriterij – oguljena površina tkanine. Če je površina tkanine preveč oguljena, dobi star videz in se lahko zgodi, da obleka, izdelana iz takšne tkanine, ni primerna za nadaljnjo uporabo. To seveda ne velja za kavbojke.



Slika 10.20: Odvisnost števila svaljkov od časa testiranja (števila vrtljajev testnega bobna) in surovinske sestave tkanin. [8] Legenda: 1 – normalno polstena tkanina izdelana iz 30 % orlon/dynela in 70 % volne, 2 – malo polstena tkanina izdelana iz 15 % orlon/dynela in 85 % volne in 3 – normalno polstena tkanina izdelana iz 15 % orlon/dynela in 85 % volne.

10.9 Seznam oznak poglavja

Oznaka	Enota	Opis
α		hitrost tvorjenja svaljkov
A		koeficient

Nadaljevanje na naslednji strani

Nadaljevanje s prejšnje strani

Oznaka	Enota	Opis
K_0		koeficient
K_1		koeficient
k_0		koeficient
k_1		koeficient
k_2		koeficient
k_3		koeficient
k_4		koeficient
k_5		koeficient
k_6		koeficient
N		število meritev
ω		hitrost odpadanja svaljkov
σ		raztros vrednosti rezultatov
t	h	čas
U		koncentracija (teža) tkanine
V		koncentracija (teža) kratkega lasu, ki ni zmožen takoj tvoriti svaljke
W		koncentracija (teža) dolgega lasu, iz katerega se tvorijo svaljki
Z		koncentracija (teža) vlaken, ki odpadejo s površine tkanine, preden se zavozlajo v svaljek
X		koncentracija (število ali teža) svaljkov, ki nastanejo na površini tkanine
X_i		eksperimentalno število svaljkov v danem času
$\bar{X}$		srednja vrednost eksperimentalno dobljenega število svaljkov v danem času
Y		število svaljkov, ki odpadejo s površine tkanine v časovnem intervalu

10.10 Literatura

[1] L. Hofman. . *Spinner Weber Textilveredlung*, 2:648–651, 1963.

[2] D. Jaksic and K. Dimitrovski. Študij pojava pillinga na tkaninah. In *XV. strokovni simpozij o novitetah v tekstilni industriji.*, pages 293–318, Ljubljana, 1980.

[3] W. Albrecht. Ein modell des pilling-mehanismus. *Chemiefasern.*, 20:387–396, 1970.

[4] R. H. Brand and M. B. Bohmfalkin. Ein modell des pilling-mehanismus. *Textile Research Journal*, 37(6):467–476, 1967.

[5] W. Conti and E. Tassinari. A simplified kinetic model for the mechanism of pilling. *Textile Research Journal*, 65(3):119–125, 1967.

[6] D. Gintis and J. E. Mead. The mechanism of pilling. *Textile Research Journal*, 29(7):578–585, 1959.

[7] K. M. Grunewald. . *Chemiefasern*, 18(10):862, 1968.

[8] W. Heydeck. The problem of pilling in uniform cloths. *Melliand Textilberichte International*, 36:1166, 1995.

POGLAVJE 11

Odpornost preje in tkanin proti deformacijam

Kazalo

11.1 Uvod **224**
11.2 Odpornost proti skrčenju **224**
11.2.1 Splošno o vzrokih deformacije (skrčenje ali razteg) 224
11.2.2 Krčenje volnenih tkanin in pojav napetih niti 224
11.2.2.1 Vpliv vlage 225
11.2.2.2 Vpliv spremembe napetosti 225
11.2.2.3 Vpliv temperature na mokro vlakno 225
11.2.2.4 Vpliv enakomernosti preje 226
11.3 Jakšićev model transformacije dolžine niti v volnenih tkaninah **226**
11.3.1 Izhodiščne predpostavke 226
11.3.2 Faze transformacije 229
11.3.2.1 Prva faza (slika 11.1a) 229
11.3.2.2 Druga faza (slika 11.1b) 229
11.3.2.3 Tretja faza (slika 11.1c) 231
11.3.2.4 Četrta faza (slika 11.1d) 232
11.3.2.5 Peta faza (slika 11.1e) 232
11.3.2.6 Šesta faza (slika 11.1f) 232
11.3.2.7 Sedma faza (slika 11.1g) 232
11.3.2.8 Osma faza (slika 11.1h) 233
11.4 Jakšićeva študija grbančenja pol volnenih tkanin **233**
11.4.1 Splošno 233
11.4.2 Teoretične osnove 234
11.5 Analiza eksperimentalnih rezultatov v nagrbančeni tkanini **239**
11.5.1 Splošno 239
11.5.2 Odpornost proti mečkanju 242
11.5.3 Trdnost posameznih delov oblačila 243

11.6 Vrste in obstojnost barv **244**
11.7 Seznam oznak poglavja **244**
11.8 Literatura **245**

11.1 Uvod

Stabilnost dimenzij, posebno pri gotovih tekstilnih izdelkih, kot so deli oblačil, je zelo pomembna. Poleg tega je pomembna tudi odpornost proti mečkanju, in to predvsem z estetskega stališča. Zaradi tega je nujno ob upoštevanju namembnosti tekstilnega proizvoda pri konstruiranju danega tekstilnega proizvoda predpisati vrsto vlaken in tehnološki postopek, ki nam bosta dala takšno kakovost tekstilnega izdelka, da deformacija – skrčenje in mečkanje, ne bosta večja od v naprej predpisanih vrednosti toleranc.

11.2 Odpornost proti skrčenju

Če se želimo izogniti skrčenju, je nujno vedeti vzroke za ta pojav. Kot smo že obravnavali. deformacije lahko razdelimo na elastične, visoko elastične in plastične [1]. Te definicije se pojavijo tedaj, ko na tekstilni proizvod deluje zunanja natezna sila. Na splošno imamo opravka z vlakni, prejo ali ploskim tekstilnim proizvodom (tkanina, pletenina, vlaknina), katerih zgodovine pogosto ne vemo. Deklarirana kakovost pogosto ne drži ali ni popolna. Včasih nimamo tehničnih možnosti ali časa za popolnejšo preiskavo kakovosti vlakna ali proizvodov; zaradi tega se lahko zgodi, da je kakovost izdelka slabša, kot smo pričakovali, oziroma, da izdelek ni uporaben za določeno namembnost zaradi prevelikega krčenja.

11.2.1 Splošno o vzrokih deformacije (skrčenje ali razteg)

Skrčenje je posebno pomembno pri tkaninah, ki se uporabljajo za posamezne dele oblačila, pa tudi za nekatere druge namene. Skrčenje tkanine je lahko posledica stanja vlakna, preje ali procesa tkanja [2]. Kemična vlakna so lahko nestabilna. Nestabilnost je posledica procesa predenja. Kaže se v plastični deformaciji – raztezanju zaradi premajhnega odstotka raztezanja pri predenju ali pa v krčenju, če je pri predenju vlakna nastala struktura, ki ima notranje napetosti. Te napetosti začnejo krčiti vlakno pod vplivom temperature ali pri nekaterih vlaknih pod vplivom vlage. Pri kemičnih (sintetičnih) tkaninah se takšnim nevšečnostim izognemo s fiksiranjem tkanin v določenem času pri določeni temperaturi.

11.2.2 Krčenje volnenih tkanin in pojav napetih niti

Napete niti v volnenih tkaninah se pojavljajo kot posebna vrsta napak v tkaninah. Glede na konstrukcijo tkanine, vezavo in barvne vzorce v tkanini, lahko izstopajo bolj ali manj vidno. Jasno vidna izboklina ali gube na tkanini, kjer se pojavljajo deformacije, je znak, da so na teh mestih prisotne napete niti. Napete niti predvsem v česanih volnenih tkaninah zmanjšujejo njihovo estetsko vrednost in s tem prodajno vrednost tkanine. Ta pojav ni nov. Z njim se srečujejo tekstilne tovarne, ki proizvajajo volnene tkanine.

Nekateri avtorji [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10] pojasnjujejo pojav napetih niti z vidika proizvodnih izkušenj. Pravijo, da napete niti nastanejo kot posledica neenakomernega raztezanja mokre volnene preje. Tako raztegnjena preja se med procesom tkanja fiksira v na

novo stkani surovi tkanini. V večini primerov ta pojav v surovi tkanini ni jasno viden. Šele po postopku pranja in sušenja surovih tkanin se ta deformacija pokaže v polni meri.

Skušali smo obdelati pojav napetih niti, za katerega sodimo, da je posledica strukturalnih sprememb v volnenem vlaknu. Če upoštevamo dosedanja dela o tej problematiki, lahko domnevamo, da te spremembe v glavnem nastajajo kot posledica istočasnega delovanja več različnih dejavnikov na volneno prejo v posameznih fazah izdelave tkanine. Ti dejavniki so v glavnem napetost, vlaga in temperatura; upoštevati pa je tudi treba čas delovanja teh dejavnikov.

11.2.2.1 Vpliv vlage

Na pojav napetih niti v volnenih tkaninah vpliva predvsem neenakomerno porazdeljena vlaga in neprimerna napetost preje [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. Trditev temelji na dejstvu, da se laže deformira mokra kot suha volnena preja med navijanjem, snovanjem in tkanjem. Znano je, da voda formira z alfa-keratinom kontinuirano molekulsko mrežo. Prisotnost vode v tej molekulski mreži zaradi asimetrične porazdelitve nabojev vodnih molekul znatno vpliva na zmanjšanje energije vezi v volnenem vlaknu. To posebej velja za prečne vezi, ker imajo na tem mestu molekule vode najlažji pristop. Zmanjšana energija vezi se zaradi prisotnosti vode kaže na obliki krivulje napetost – raztezek. Povečana relativna vlažnost zraka vpliva na povečanje količine vode v volneni preji, kar omogoča, da se vlažna preja precej bolj raztegne pri nespremenjeni napetosti v primerjavi s prejo z manj vlage. Ob analizi klasičnega diagrama napetost – raztezek volnenega vlakna, lahko postavimo nekaj značilnih ugotovitev.

Prehod iz Hookovega območja v območje velikih raztegov se zgodi pri isti absolutni dolžini suhega ali mokrega vlakna; to je v resnici začetek odvijanja alfa-vijačnice , ne glede na relativno vlago. Pri tej točki prehoda je napetost linearna funkcija relativne vlažnosti (napetost pada s povečanjem vlažnosti). Napetost v Hookovem območju nastane kot posledica povečane dolžine intravodikovih mostov v alfa vijačnici. Razteg vlakna v mokrem stanju do 30 % predstavlja reverzibilen proces. Razteg več kot 30 % povzroča trajne deformacije, ker pridemo iz območja velikih raztezkov v območje trajnih deformacij. Napetost oziroma silo v točki prehoda iz Hookovega območja v območje velikih raztezkov imenujemo kritično napetost oziroma silo.

11.2.2.2 Vpliv spremembe napetosti

Možen pojav izrazitih nihanj napetosti v fazah tehnološkega procesa (predenje, previjanje, sukanje, snovanje in tkanje) lahko precej vpliva na ustvarjanje začetnih pogojev za kasnejši pojav deformacij v volnenih tkaninah. Pojav nihanja napetosti lahko precej vpliva na povečanje števila pretrgov niti, hitrost previjanja pa tudi na kakovost snovanja in tkanja. Zaradi spremembe napetosti v preji so najslabša mesta (tanka in debela) potencialne lokacije, kjer lahko pride do pojava visoko elastičnih in trajnih (plastičnih) deformacij.

11.2.2.3 Vpliv temperature na mokro vlakno

Sprememba temperature lahko znatno vpliva na kakovostne spremembe v volnenem vlaknu [11]. Prekoračitev kritične napetosti povzroči začetek alfa-beta transformacije keratina in je tesno povezana s spremembo temperature. S povečanjem temperature se zmanjša vrednost napetosti, pri kateri se doseže točka prehoda v področje velikih raztezkov (kritična napetost). Spremembe v volnenem vlaknu so v tesni zvezi s tempe-

raturnim intervalom 50 °C – 60 °C [12, 13, 14]. V tem intervalu prehaja en del keratina v gostejšo obliko, ki ima manjšo zmožnost ekspanzije. Pri tej temperaturi je še viden prehod iz področja velikih raztezkov v področje trajnih (plastičnih) deformacij. Pri povečanju temperature s 60 °C na 80 °C pa meja prehoda med temi območji praktično ne obstaja. Ta pojav razlagamo kot izrazito zmanjševanje energije prečnih vezi (vključno s cistinskimi mostovi). Če je več kot 30 % raztezka, praktično ni več spremembe odpora proti deformaciji vlakna.

V fazi parjenja preje se doseže stanje strukture vlaken, ki pomeni najmanjšo notranjo napetost. Ta sprememba je možna zaradi zmanjšanja energije prečnih vezi v vlaknih. Možno je tudi, da pride do manjše spremembe medsebojne lege vlaken v preji. Ta sprememba daje tudi svoj delež v zmanjšanju notranjih napetosti v preji. Čas in pogoji relaksacije zelo pomembno vplivajo na odpravi visoko elastične deformacije in s tem tudi na odpravo notranjih napetosti v preji. Pogosto se takoj po končanem procesu parjenja začne previjanje te mokre preje, kar ima lahko, zaradi omenjenih vplivov, za posledico nastanek napetih niti v volnenih tkaninah.

11.2.2.4 Vpliv enakomernosti preje

V procesu predenja nastopijo določene spremembe pogojev, zaradi česar se na preji pojavi določeno število debelih in tankih mest v primerjavi s povprečno debelino preje. Večje število tankih mest v preji lahko neposredno vpliva na povečanje njene finosti, pa tudi na nihanje števila zavojev (zasukov) in na silo trenja med vlakni. Posledica tega je nihanje trgalne trdnosti vzdolž preje. Na tenkih mestih, kjer je število vlaken najmanjše, je trgalne trdnost praviloma manjša kot na preostalih delih preje. Na tem preseku se preja lažje deformira kot na preostalih delih. Pri povečani napetosti se zaradi tega ustvarjajo pogoji za pojav visoko elastičnih in trajnih deformacij prej, kot na drugih mestih vzdolž le-te. Pojav neenakomerne porazdelitve deformacij je predvsem posledica delovanja določene napetosti vzdolž osi neenakomerne preje. Na odpornost deformacij preje vpliva predvsem število vlaken v prečnem preseku preje, finost vlaken, število zavojev, orientiranost vlaken, sila trenja med vlakni ipd. Bolj orientirana vlakna omogočajo večjo stično površino, s tem pa se ustvarjajo pogoji za povečanje adhezijskih sil med vlakni pri povečanju števila zavojev.

V fazah izdelave volnenih tkanin se pojavijo deformacije preje, ki segajo v območje velikih raztezkov in v območje trajnih deformacij. Zaradi možnega pojava drsenja (migracije) vlaken v preji se lahko v procesu raztezanja preje pojavijo trajne deformacije tudi pri manj kot 30 % raztezka preje. V področju trajnih deformacij se kažejo izrazite spremembe v vlaknu oziroma preji. Tvorijo se nove prečne vezi, pa tudi nove disulfidne cistinske vezi in odpirajo se nove sekcije alfa vijačnic. Po drugi strani pa nastane ob primernih pogojih (vlaga, temperatura, napetost in čas) delno trajno fiksiranje sprememb v volnenem vlaknu. Trajne deformacije v preji so torej verjetno delno posledica medsebojnega drsenja vlaken v preji in predvsem trajnih deformacij v vlaknih.

11.3 Jakšićev model transformacije dolžine niti v volnenih tkaninah

11.3.1 Izhodiščne predpostavke

Napete niti v volnenih tkaninah imajo lahko različen izvor. Najpogosteje pa so visoko elastične deformacije vlaken v preji. Zaradi tega se bomo omejili na ta pojav. Napete

niti v volnenih tkaninah, ki jih je proizvajala tekstilna industrija v bivši SFR Jugoslaviji, niso bile redek pojav [15]. Še zmeraj imamo opraviti s tem problemom v primerih, ko realizacija posamezne faze izdelave volnenih tkanin ni optimalna. Na to so posebno občutljive česane volnene tkanine. Kljub popravljanju napak, takšne tkanine ne moremo uvrstiti v prvi kakovostni razred. Če so napete niti v tkanini posledica visoko elastičnih deformacij, potem je navadno teh napak toliko, da jih ni vredno popravljati. Zaradi tega lahko nastanejo precejšnje gospodarske izgube. Napete niti se lahko pojavijo v osnovi in v votku. Niti osnove so lahko napete zaradi nepravilne priprave osnove. Parjena volnene preje za osnovo in votek navadno nima notranjih napetosti, ki so posledica predenja in sukanja. Kljub temu pa lahko nastanejo visoko elastične deformacije v nadaljnjih fazah predelave preje v tkanino. Preden to analiziramo, bomo na kratko razložili vrste poškodb, ki jih navajamo. Če se preja raztegne pod vplivom zunanje sile za določen odstotek, v našem primeru manj kot za 2 % in se po prenehanju delovanja zunanje sile takoj vrne v prvotno dolžino, govorimo o elastični deformaciji. V tem primeru je zunanja sila manjša od kritične sile ali kritične napetosti. Če je začetna dolžina vzorca volnene preje L_0 in jo pod vplivom zunanje sile raztegnemo na dolžino L_1 ($L_1 > L_0$), potem nam kaže dolžina $L_1 - L_0$ velikost celotne deformacije. Ko zunanja sila preneha delovati, se preja takoj skrči na dolžino L_2 ($L_2 > L_0$). Pri volneni preji to velja, če smo jo raztegnili za več kot 2 %. Potem pustimo prejo v prostem stanju eno uro in pol. V tem času se dodatno skrči na dolžino L_3 ($L_2 > L_3 > L_0$) .

Dolžina $L_2 - L_3$ je delež visoko elastične deformacije. Torej je visoko elastična deformacija funkcija časa. Dolžina $L_3 - L_0$ pa predstavlja delež plastične ali trajne deformacije. Kot bomo pozneje videli, je možno visoko elastično komponento deformacije začasno zamrzniti s pomočjo fiksiranja novo formirane strukture v volnenih vlaknih, ki nastane v procesu deformacije preje. Če pozneje to fiksirano strukturo "odmrznemo" (mokra dodelava volnenih tkanin), se s tem sprostijo visoko elastične deformacije; vlakna in preja se v tkanini krčijo in tako nastanejo napete niti v volnenih tkaninah.

Če, na primer, opazujemo previjanje preje s križnih navitkov na votkove navitke (tkanje na konvencionalnih tkalskih statvah), se pojavijo poleg elastičnih še visoko elastične in plastične deformacije, čeprav za opazovano kakovost preje nismo spreminjali pogojev previjanja glede hitrosti in zaviranja niti. Iz izkušenj vemo, da pod temi pogoji, nismo prej imeli nobenih problemov, ki jih povzroča visoko elastična deformacija. Vzroke za to spremembo moramo poiskati v stanju preje, ki jo predelujemo v tkanino.

Preja je po fazi parjenja popolnoma mokra ali pa vsaj bolj vlažna kot pri 65 % relativni vlažnosti zraka ali kot pri vlažnosti zraka v tkalnici. To pomeni, da preja po fazi parjenja ni dobro posušena. Razlogi za to so lahko različni. Lahko je bil čas sušenja prekratek, temperatura sušilnega zraka prenizka ali pa je bila napaka v aparatu za parjenje preje in je nismo pravočasno odkrili.

Vlažnost (voda) v preji ni enakomerno porazdeljena. To se lahko zgodi zaradi nepopolnega sušenja po parjenju in prekratkega časa "aklimatizacije" preje, zaradi česar preostala voda nima dovolj časa za enakomerno porazdelitev po celotnem križnem navitku. Če preja ni dovolj posušena, so po navadi sloji, ki so najbližje cevki v navitku najbolj vlažni.

Lahko se zgodi, da se namoči del križnega navitka po parjenju in sušenju, lahko tudi na del površine križnega navitka pade ena ali več kapelj vode. Moker ali vlažen križni navitek ima lahko po parjenju na različnih mestih različno temperaturo. To se nanaša predvsem na notranje sloje križnega navitka. Kot smo že omenili, se s povečanjem temperature mokre volnene preje zmanjšuje njena trdnost, pa tudi nivo kritične napetosti. To pa pomeni lažjo deformacijo preje na takšnih lokacijah.

Pri odvijanju preje s križnega navitka, pri snovanju ali tkanju na bezčolničnih statvah, se spreminja napetost v niti. Pri konstantni hitrosti odvijanja preje s križnega navitka se povečava kotna hitrost pri zmanjševanju premera križnega navitka. Zaradi tega se bo spreminjala tudi kotna hitrost odvijanja preje s križnega navitka. Največja hitrost previjanja je takrat, kadar se preja navija na največji premer normalnega navitka; najmanjša pa takrat, ko se preja navija neposredno na cevko, torej na najmanjši premer križnega navitka. Hitrost previjanja niha približno v mejah od ± 40 % do ± 50 % [15]. Napetost v niti je sorazmerna s kvadratom kotne hitrosti, zaradi česar je nihanje napetosti še bolj izrazito kot nihanje previjalne kotne hitrosti. Ker je kotna hitrost sorazmerna s kvocientom hitrosti odvijanja in polmerom križnega navitka, bo rasla z zmanjšanjem polmera križnega navitka. Kotna hitrost je največja, tik preden se vsa preja odvije s križnega navitka.

Napetost niha tudi zaradi spremembe dolžine balona. Dolžina balona je najkrajša dolžina od najbližjega vodila h križnemu navitku do ploskve, ki si jo lahko zamislimo, da pravokotno seka križni navitek. Na obodu te okrogle ploskve je točka, v kateri preide preja iz mirovanja v gibanje. Ta točka potuje v obliki vijačnice od začetka do kraja križnega navitka in nazaj. Zaradi tega se spreminja tudi dolžina balona. Ker je dolžina križnega navitka največkrat v mejah od 10 cm do 20 cm, se za toliko spreminja tudi dolžina balona, ki ga tvori preja pri odvijanju s križnega navitka. Napetost v niti je sorazmerna s kvadratom dolžine balona, kar povzroča precejšnje nihanje njene vrednosti. Pri odvijanju določene plasti preje s križnega navitka nastane največja napetost v primeru, ko je dolžina balona največja, in se sočasno preja navija na največji premer votkovega navitka. Obstaja precejšnja nevarnost, da je ta maksimalna napetost višja od kritične napetosti (na primer, v vlažnem delu preje), ki je naključno v tem trenutku v polju gibanja preje. Rezultat te sočasnosti so visoko elastične in plastične deformacije in celo pretrg preje. Preja je trdo navita na križni navitek, razen v primeru ko prejo barvamo direktno na križnem navitku. Zaradi trdega navijanja ne obstaja možnost relaksacije visoko elastične napetosti. Če pride do te poškodbe na mokrem delu preje, se bo preja v večini primerov posušila, novo formirana struktura v vlaknih se bo na ta način utrdila. Do naknadne relaksacije visoko elastične deformacije ne bo prišlo toliko časa, dokler se ne bodo ustvarili določeni pogoji – ponovno močenje preje v tkanini.

Obratovalno napetost preje je, zaradi njene neenakomernosti, težko ugotoviti (napetost, ki se pojavi v preji pri odvijanju). V tem primeru se neenakomernost nanaša predvsem na trgalno trdnost oziroma vrednost kritične napetosti. Če je faza predenja pravilno izvedena, ne nastanejo periodično oslabljena mesta v preji. Povprečna napetost v preji v fazah tehnološkega procesa, ki sledijo parjenju preje, bi morala biti okrog 4 % trgalno trdnosti, ki jo ima suha preja. Če pa je preja zelo enakomerna, bi smela biti vrednost obratovalne napetosti do 10 % povprečne vrednosti trgalne trdnosti. Ker pa so po navadi precejšnja odstopanja od povprečne vrednosti tako trgalne trdnosti kakor tudi od povprečne vrednosti obratovalne napetosti, lahko pride do pojava visoko elastičnih deformacij kljub relativno nizki vrednosti povprečne obratovalne napetosti, posebno še, če je preja vlažna.

Vlažnost, temperatura, nihanje obratovalne napetosti in nihanje trgalne trdnosti so glede pojave med seboj neodvisni. Pojav enega od njih v previjalnem polju – na primer povečana vlažnost, maksimalna napetost ali minimalna trdnost preje, ki je v previjalnem polju, ni odvisen od sočasne pojave vpliva drugih parametrov, ki pogojujejo lažjo deformacijo preje. Sočasno nastopanje dveh ali več omenjenih parametrov v previjalnem polju lahko povzroči visoko elastične deformacije, zaradi katerih se lahko pozneje pojavijo napete niti v volnenih tkaninah. Vlažnost, temperatura in nihanje napetosti pri

preji določene kakovosti lahko povzročijo pogost pojav napetih niti. Opazovana preja ima lahko določeno število oslabljenih mest različnih stopenj. Na 1.000 m preje naj ima na primer 20 mest, na katerih je trgalne trdnost 10 % manjša od povprečne trdnosti, na 10 mestih je manjša za 20 %, na 5 mestih za 30 %, 2 mesti pa imata za 50 % manjšo trgalne trdnost od povprečne vrednosti trgalne trdnosti. Predpostavimo, da tudi kritična napetost niha tako kot trgalna trdnost. Če opazovano prejo omočimo ter povprečna napetost in temperatura ostaneta nespremenjeni, se bo zmanjšala kritična napetost, tako da bo maksimalna obratovalna napetost večja od kritične napetosti, ki jo ima opazovana preja pod temi pogoji na vseh oslabljenih mestih, ki so bila pri klimatizirani preji slabša od povprečne vrednosti za na primer 25 %. Torej je 7 kritičnih mest, na katerih se lahko pojavijo napete niti.

Nadalje lahko predpostavimo, da se bodo pojavile visoko elastične deformacije na oslabljenih mestih, na katerih je trgalne trdnost le 50 % povprečne trgalne trdnosti, toda pod pogojem, da je obratovalna napetost enaka ali večja od povprečne obratovalne napetosti. Na preostalih petih oslabljenih mestih lahko predpostavimo, da se bodo pojavile visoko elastične deformacije takrat, ko obratovalna napetost doseže maksimalno vrednost v niti, ki je trenutno v previjalnem ali odvijalnem polju.

Čeprav je nihanje napetosti funkcija časa, se lahko zgodi, da previjamo, na primer, eno uro s hitrostjo 500 m/min (previjemo 30.000 metrov preje) in da ne nastopita sočasno v previjalnem polju oslabljeno mesto in višina napetosti, ki je nujna, da pride do pojava visko-elastične deformacije na oslabljenem mestu. Vendarle pa obstaja določena verjetnost, da se bo to zgodilo. S povečanjem temperature se zmanjšuje vrednost kritične napetosti preje; s tem se povečuje verjetnost nastanka visoko elastične deformacije pri nespremenjeni povprečni vrednosti obratovalne napetosti.

11.3.2 Faze transformacije

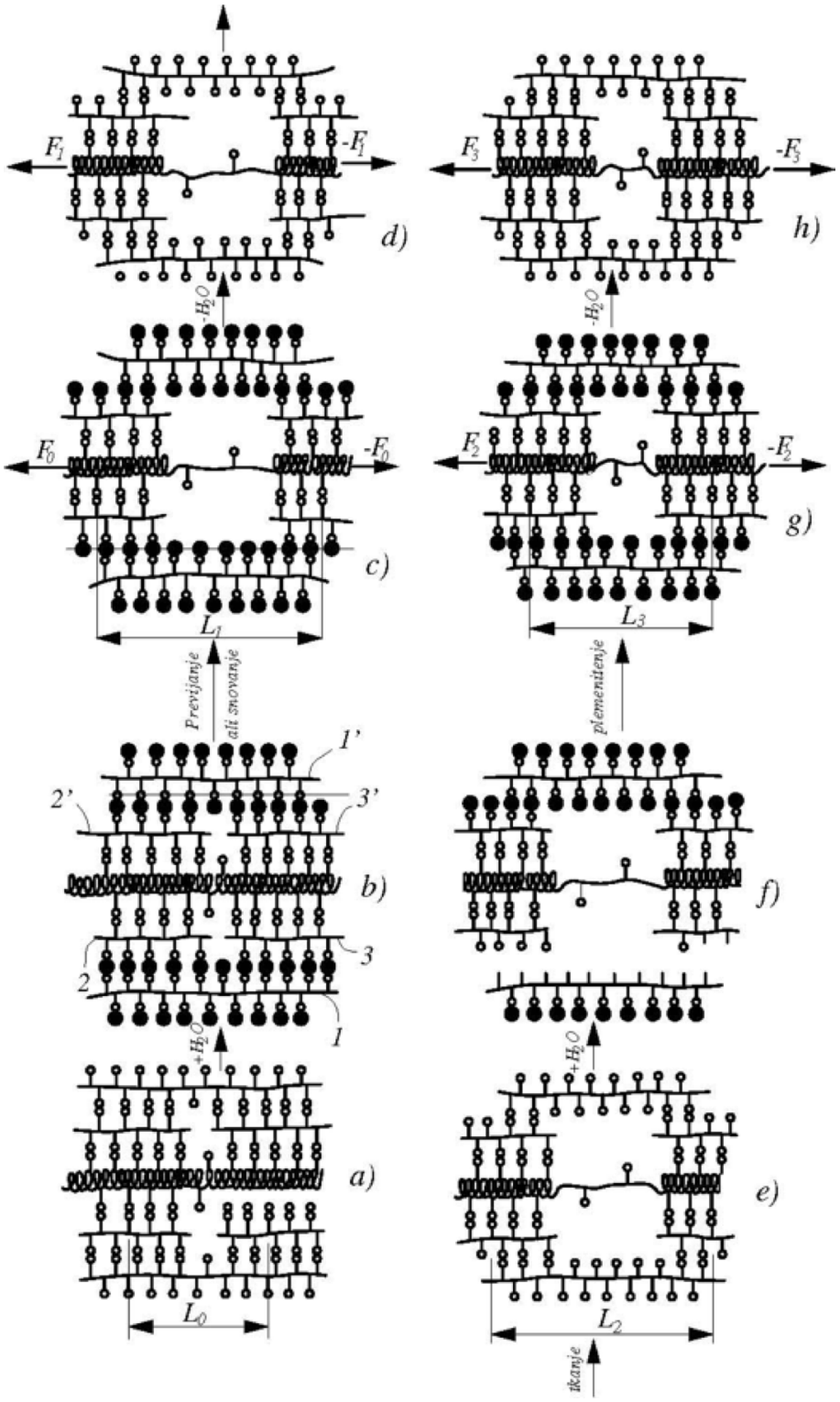
Če upoštevamo izhodiščne predpostavke in dejstvo, da v fazi parjenja volnene preje odstranimo notranje napetosti v preji, ki nastanejo v prejšnjih fazah izdelave preje, lahko vzamemo parjenje kot začetno fazo, ki lahko vpliva na pojav napetih niti v volnenih tkaninah kot posledico strukturnih sprememb v vlaknih, ki tvorijo prejo. Model se sestoji iz osmih faz ali stanj preje. Te faze ustrezajo določenim fazam v tehnološkem procesu predelave preje v tkanino. Model je prikazan na sliki 11.1. Opisali bomo posamezne faze.

11.3.2.1 Prva faza (slika 11.1a)

Prikazan je del strukture vlakna dolžine L_0. Molekule matriksa so prikazane v raztegnjenem stanju, kar se v dejanskem vlaknu redko dogaja. Zaradi lažjega dojemanja procesa transformacije dolžine vlakna, pa si lahko dovolimo takšno idealizacijo. V tej fazi preja oziroma vlakno nista izpostavljena napetosti. V takšnem stanju je preja po parjenju in sušenju. Možno pa je, da je preja v takšnem stanju na posebnih delih tudi pred parjenjem.

11.3.2.2 Druga faza (slika 11.1b)

Številke pomenijo: 1, 1′, 2, 2′, 3, 3′ – molekule matriksa (slabo orientirana faza v volnenem vlaknu, ki jo pogojno jemljemo kot amorfno fazo); 4 – mikrofibril, ki ga tvori več protofibrilov, ti pa so sestavljeni iz več alfa-vijačnic; 5 – stranske skupine (verige) in 6 – molekule vode.



Slika 11.1: Jakšićev model transformacije dolžine volnenih niti v tkanini.

Prejo izpostavimo parjenju, toda možno je, da se preja po parjenju in sušenju omoči pred fazo previjanja, ali pa ni bila, vsaj na nekaterih delih dolžine, dobro osušena. V obeh primerih je preja mokra. Močenje preje po parjenju in sušenju ni pogost pojav. Zaradi tega bomo predpostavili, da se druga faza nanaša na fazo parjenja preje. Na sliki 11.1b je prikazano, da sta se molekuli vode vrinili med stranske (bočne) polarne vezi, ter da povečujeta razdaljo med molekulami matriksa. To povzroči, da volneno vlakno v vodi nabrekne. Ta predpostavka pa ni nujna; dovolj je, da pridejo molekule vode v neposredno bližino prečnih polarnih vezi. Zaradi asimetrije nabojev molekule vode, ta navzven ni nevtralna, in se veže na prečno polarno vez v vlaknu, in to več molekul vode na obe krajni molekulski skupini bočnih verig, ki tvorita polarno vez. Del energije polarne vezi se porazdeli na asocirane molekule vode, zaradi česar se zmanjša energija opazovane prečne polarne vezi. Ta pojav omogoča sprostitev (zmanjšanje) notranje napetosti v preji v fazi parjenja. S tem je namreč omogočena lažja sprememba lege elementov strukture vlakna v stanje najmanjše energije, to je najmanjše napetosti v vlaknu.

11.3.2.3 Tretja faza (slika 11.1c)

Preja, ki jo parimo, je navadno navita na križne navitke. Parimo jo 15 do 20 minut pri temperaturi do 80 °C. Na zmanjšanje energije vezi vpliva poleg vodne pare tudi povišana temperatura (tudi prečnih vezi, ne glede na to, ali so te vodikove, polarne ali disulfidne).

V normalno vodenem procesu se preja po parjenju posuši in določen čas klimatizira, da se preostala vlaga enakomerno porazdeli in da se tudi temperatura izenači po celi prostornini križnega navitka. Včasih se zgodi, da se sušenje in aklimatiziranje preje ne izpeljeta pravilno – preja se ne posuši dobro ali gre celo mokra in ne ohlajena na previjanje. V takih okoliščinah je vrednost kritične napetosti preje zmanjšana in poveča se verjetnost, da se pojavi večja obratovalna napetost, kot je kritična napetost preje. V tem primeru se pojavi transformacija (povečanje) dolžine vlaken oziroma preje, kot je to prikazano na sliki 11.1c. Odpirajo se posamezne sekcije alfa vijačnic v mikrofibrili, molekule matriksa drsijo druga mimo druge, trgajo se prečne vezi in nastajajo nove. Dolžina L_0 se poveča na dolžino L_1. V modelu niso prikazane prečne disulfidne vezi in njihovo obnašanje pri tej transformaciji. Deformacije, ki so obdelane v modelu, se nanašajo na območje velikih raztezkov vlaken in v tem območju navadno ne pride do trganja disulfidnih vezi.

Ne glede na to je transformacija dolžine, prikazana na sliki 11-1c možna, ker so disulfidne vezi predvsem v matriksu, katerega molekule niso raztegnjene, vsaj ne pri normalno raztegnjenem vlaknu. Zaradi tega se dve sosednji molekuli matriksa lahko vzporedno raztezata, ne da bi se pretrgala disulfidna prečna vez, s katero sta povezani. To velja seveda samo do določenega odstotka raztezka. Pri vlaknu je to okrog 30 % (meja med območjem velikih raztezkov in območjem trajnih deformacij). Če je raztezek večji, se začnejo trgati tudi prečne disulfidne vezi.

Predpostavimo, da je preja izpostavljena takšnim napetostim v fazi previjanja na votkove navitke (za klasične statve). To se lahko nanaša tudi na fazo snovanja osnove in fazo tkanja – votkovi križni navitek in da nastanejo visoko elastične deformacije. Zaradi trdote navitja na votkovi ali križni navitek, je onemogočena relaksacija visoko elastičnih deformacij – preja se ne more skrčiti. Delno pa se kljub temu sprosti napetost v preji zaradi reorganizacije strukture v vlaknih in spremembe medsebojne lege vlaken v stanje najmanjše možne napetosti v danih pogojih. Na prejo deluje sila F_0 v previjalnem polju.

11.3.2.4 Četrta faza (slika 11.1d)

Preja, navita na votkove (križne) navitke, je pod določeno napetostjo, sliki 11.1c in 11.1d. Predpostavimo, da ostane preja toliko časa na votkovem navitku, da se posuši. Zaradi tega se poveča energija prečnih vezi – fiksira se novonastala struktura. Na prejo deluje sila F_1 ($F_1 < F_0$).

11.3.2.5 Peta faza (slika 11.1e)

V tkanine vtkemo suhi deformirani votek. Lahko zanemarimo napetost v votku pred pribijanjem tega k tkanini, toda v pribitem votku nastane določena napetost zaradi večkratnega prehoda votka z lica na hrbet tkanine in obratno, pa tudi zaradi tega, ker v tem območju delujejo raztezala v smeri votka. Sploh lahko ugotovimo, da so niti osnove in votka takoj po tvorbi tkanine izpostavljene določenim napetostim v tkanini. Te napetosti se postopoma sprostijo. Na sliki 11.1e smo popolnoma zanemarili morebitni ostanek napetosti v tkanini po relaksaciji. Toda te napetosti in povečana energija prečnih vezi, posebej še slednja, preprečujejo sprostitev visoko elastičnih napetosti oziroma zapiranje alfa vijačnic v deformirani (raztegnjeni) mikrofibrilu ter skrčenje preje na prvotno dolžino L_0. Zaradi tega navadno v surovi volneni tkanini ne opazimo napetih niti, ki bi bile posledica omenjenega strukturnega preoblikovanja. Izjema je lahko, če smo zatkali vlažen ali moker votek.

11.3.2.6 Šesta faza (slika 11.1f)

V mokri dodelavi omočimo tkanino, na primer, jo speremo. Zaradi tega se zmanjša energija prečnih vezi kot v drugi in tretji fazi. Novo energetsko stanje sistema je takšno, da so sile, ki delujejo v smeri zapiranja raztegnjenih sekcij alfa vijačnic, reverzibilen (povraten) proces, se pravi, večje od sil, ki jih ustvarjajo prečne vezi, in sil trenja med votki in nitmi osnove. Zaradi takšnega odnosa sil, se postopoma skrajšuje votek – se krči. Votek se skrči v višini vrednosti visoko elastične deformacije ali manj odvisno od energetskega stanja sistema tkanine – preja – vlakna – voda.

Na sliki 11.1f je prikazano le začetno stanje, tik preden se začne vlakno krčiti. Proces krčenja se odvija med šesto in sedmo fazo. V sedmi fazi, slika 11.1g, je ta proces končan. Vendar je doseženo ravnovesje sil (predpostavka), preden se popolnoma zaprejo alfa-vijačnice . Na votek deluje sila F_2.

11.3.2.7 Sedma faza (slika 11.1g)

V mokri dodelavi je dovolj časa za reverzibilni proces, to je krčenje vlaken oziroma odpravo visoko elastičnih deformacij. Če niso prisotne trajne deformacije v preji zaradi medsebojnega drsenja vlaken in če ta niso bila raztegnjena za več kot 30 %, se bo preja povrnila približno v stanje, kot ga je imela v drugi fazi modela. Če so prisotne tudi trajne (plastične) deformacije, druga in sedma faza glede strukture preje ne bosta identični. Opazovano volneno vlakno ima lahko enako stanje strukture v drugi in sedmi fazi kljub prisotnosti trajnih deformacij preje. To velja samo, če vlakno ni bilo v tretji fazi raztegnjeno za več kot 30 % in če so bile torne sile med nitmi osnove in votka manjše od sil, ki so delovale v smeri zapiranja odprtih alfa vijačnic in so se alfa vijačnice zaprle v trenutku, ko je bilo doseženo ravnotežje med temi silami. Če je ravnovesje sil doseženo prej, potem nastane stanje, kot je prikazano na sliki 11.1g. Votek je izpostavljen napetosti F_3. Obstaja kvalitetna razlika med drugo in sedmo fazo celo v primeru, ko se alfa vijačnice popolnoma zaprejo. Vlakno je v drugi fazi sestavni del preje, ki je navita

na križni navitek. Če je bila prej pravilno navita in je bila tudi faza parjenja pravilno izvedena (če izvzamemo sušenje), potem opazovano vlakno v preji ni izpostavljeno napetosti (kot smo jo tudi predpostavili v drugi fazi), ali pa je napetost v vlaknu relativno majhna. V sedmi fazi deluje na opazovano vlakno sila F_2, slika 11.1g, ki se pojavlja na deformiranem – raztegnjenem delu votka. Njena vrednost ustreza ravnotežnemu stanju med silami, ki delujejo v smeri zapiranja alfa vijačnic in tornimi silami, s katerimi se prečne vezi upirajo spremembi strukture vlaken ter tornimi silami med nitmi osnove in votka.

11.3.2.8 Osma faza (slika 11.1h)

Po mokri dodelavi tkanino posušimo. Ta faza se zdi istovetna prvi fazi v primeru zaprtih alfa-vijačnic, toda obstajata dve kvalitativni razliki. Preja je v osmi fazi izpostavljena sili F_3. Druga razlika se nanaša na dolžino L_0. V tkanino je bila zatkana dolžina L_2 v peti fazi, ki se ni spremenila do trenutka močenja v šesti fazi. Pri tem ni pomembno navidezno skrčenje votka glede na širino tkanine, ker je nespremenjena dejanska dolžina votka. V sedmi in osmi fazi se je skrčila dolžina L_2 iz pete in šeste faze na dolžino L_3. Zaradi tega krčenja je lahko votek na deformiranem mestu popolnoma napet. Če je deformacija nastala na večji dolžini in če je na primer, večja od 10 %, napeti votek lahko celo naguba tkanino, slika 11.2. Podobno se lahko deformirajo tudi niti osnove. Rezultati testiranja modela [16] kažejo, da model velja.

Slika 11.2: Videz površine volnene tkanine z napetimi niti, ki jih opisuje model na sliki 11.1.

11.4 Jakšićeva študija grbančenja pol volnenih tkanin

11.4.1 Splošno

Volna je dostopna le v omejenih količinah. Zaradi tega in zaradi njenih tekstilno tehnoloških ter uporabnih lastnosti jo mešamo z drugimi vlakni v določenih razmerjih. Če mešanje različnih komponent vlaken ni dobro izpeljano ali pa niso izbrana vlakna primernih parametrov (debelina, dolžina), lahko pride do nastanka dvokomponentnosti preje in v zvezi s tem do nastanka grbin (vzboklin) na tkanini, izdelani iz takšne preje.

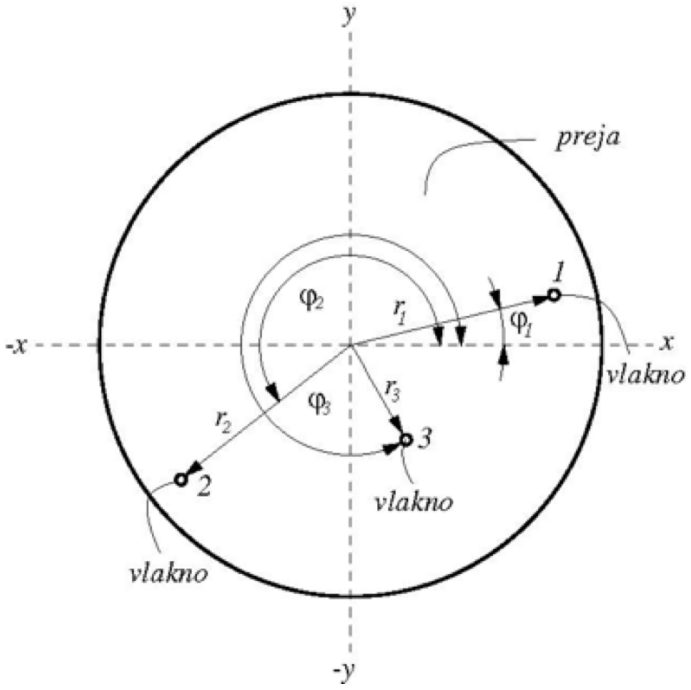
Pojav bomo ilustrirali na podlagi študije [17], ki se nanaša na ugotavljanje vzrokov grbančenja tkanine, izdelane iz preje, ki je deklarirana kot preja iz 30 % volnenih vlaken in 70 % PAN (poliakrilnitrilnih) vlaken. Dejansko je v testirani preji le okrog 23 % volnenih vlaken premera 38,6 mikrometrov. Premer PAN vlaken je le 19,4 mikrometrov. Poleg tega so volnena vlakna povprečno dolga l09 mm, PAN vlakna pa 118 mm.

11.4.2 Teoretične osnove

Grbančenje tkanine je zelo kompleksen pojav in ga je težko natančno analitično opredeliti. Na pojav vpliva precejšnje število parametrov, ki jim je težko slediti in jih izmeriti. Zaradi tega bomo pri analizi pojava uporabili določene idealizacije in aproksimacije. Sledili bomo fazam izdelave preje in tkanine in skušali ugotoviti, katera faza je odločilna pri tvorbi grbin (vzboklin) na površini tkanine [16, 18, 17].

Prva faza pri izdelavi omenjene preje je združevanje in raztezanje volnenih in poliakrilnitrilnih pramenov. Pri tej operaciji se vlakna mešajo med seboj. Predpostavljamo, da bi to fazo morali nekajkrat ponoviti, da se dejansko dobro in enakomerno porazdelijo volnena in poliakrilnitrilna vlakna po dolžini pramena in tudi po prečnem prerezu. Če je v tej fazi doseženo dobro medsebojno mešanje obeh komponent vlaken, potem ni pričakovati, da bi se bistveno spremenila medsebojna porazdelitev vlaken v predložku na predilnem stroju. V neposrednem procesu formiranja preje na prstančnem predilnem stroju se položaj naglo spreminja. Na relativno kratki poti se pojavljajo veliki raztezki. V polju tvorjenja preje so vlakna izpostavljena nateznim in centrifugalnim silam. Glede na dinamične pogoja, ki delujejo pri oblikovanju preje na vsako posamezno vlakno in celo na dele posameznih vlaken, bo prišlo do pojava migracije vlaken [19, 20] glede na njihovo lego v stanju predilniškega predložka. Če tvorimo prejo iz ene vrste vlaken, se bodo postavila daljša vlakna bliže osi preje [21, 22, 23, 24, 25] in bolj groba vlakna bliže periferiji preje [26]. Volnena vlakna so bolj groba in krajša kot poliakrilnitrilna. Zaradi tega lahko pričakujemo, da bodo volnena vlakna bliže površini preje. Če bi opazovali krajše dele posameznih vlaken, kar bi nam omogočilo slediti njihovi legi vzdolž preje, bi ugotovili, da so volnena vlakna razvrščena bolj proti površini preje. Takšna porazdelitev volnenih vlaken v preji lahko pripelje do grbin (vzboklin) na tkanini. Zakaj lahko pride do tega, je nazorno prikazano na sliki 11.3.

V fazi formiranja preje se vlakno lahko, glede na sosednja vlakna, v določeni meri deformira – raztegne, kar je odvisno od lokalnega delovanja sil na opazovano vlakno in od njegove lege v predilnem polju. Navadno ni celotna dolžina vlakna enako izpostavljena deformacijam. Vlakno zavzame v preji določeno vijačno lego. To seveda ni pravilna vijačnica, saj za kaj takega v predilnem polju ni pogojev. Preden se vlakna zapredejo v prejo, niso idealno paralelizirana. Poleg tega so tudi v določeni meri nakodrana pa tudi sosednja vlakna ovirajo tvorbo pravilne vijačnice. Pri formiranju preje deluje na vlakna natezna sila. Ta sila deluje na posamezne dele vlaken različno. Če je na primer en konec vlakna prost (štrli iz preje), sploh ni obremenjen. Del vlakna, ki tvori vijačnico, pa se dejansko ne deformira. V tem primeru se spremenijo parametri vijačnice in vlakno se postavi v bolj paralelno lego z osjo preje. Del vlakna, ki je vpet z drugimi vlakni, se manj deformira kot del vlakna, ki je med dvema vpetima točkama, zlasti še, če je takšen del vzporeden z osjo preje in natezna sila deluje paralelno z osjo preje. Zaradi delovanja natezne sile lahko drsijo vlakna drugo ob drugem, zlasti na tistih mestih preje, kjer je vrednost normalne sile najmanjša in je tudi stična površina med vlakni najmanjša. Drsenje je tudi odvisno od vrednosti tornega koeficienta površine vlaken. Ta je večji med volnenimi vlakni kot med volnenimi in poliakrilnitrilnimi vlakni. Pri volnenih vlaknih



Slika 11.3: Ugotavljanje lege posameznih volnenih vlaken na prečnem prerezu preje.

je večji v smeri, ki je nasprotna smeri luskin in manjša v smeri luskin.

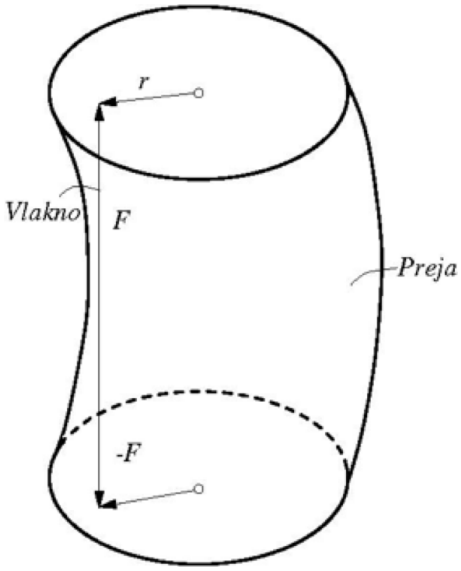
Obstaja le majhna verjetnost, da sta v opazovani preji dve volneni vlakni eno poleg drugega. Volnena vlakna so torej obdana s poliakrilnitrilnimi vlakni. Pri tem moramo upoštevati, da je malo verjetno, da bo določeno poliakrilnitrilno vlakno sledilo volnenemu vlaknu in bosta torej skupaj "vpeti" v dveh sosednjih točkah vpenjanja. Zaradi tega se povečuje verjetnost, da bo volneno vlakno izpostavljeno večji natezni sili kot poliakrilnitrilna vlakna.

Poleg tega je začetni modul ali smerni koeficient ($\tan\alpha$) v Hookovem področju pri volni od 2 N/tex do 3 N/tex [27]; pri poliakrilnitrilnem štapelnem vlaknu pa okrog 6 do 9 N/tex [28] pri standardnih pogojih (65 % relativne vlažnosti in 20 °C). V mokrem stanju se vrednost začetnega modula poliakrilnitrilnih vlaken ne spreminja,pri volnenih vlaknih pa se zmanjša za 60 % [29, 28].

V opazovani preji so volnena vlakna približno dvakrat bolj groba kot poliakrilnitrilna. Zaradi tega se absolutna vrednost zgornje meje začetnega modula izenači s spodnjo vrednostjo začetnega modula pri poliakrilnitrilnih vlaknih. To pa še vedno pomeni, da so volnena vlakna v opazovani preji manj odporna proti deformacijam kot poliakrilnitrilna vlakna.

Če pa upoštevamo še prej omenjeni mehanizem drsenja in porazdelitev natezne sile, potem je jasno, da se bodo med procesom formiranja preje volnena vlakna bolj deformirala kot poliakrilnitrilna vlakna. Nas predvsem zanima, kako vplivajo te deformacije na kakovost preje. Da bi to ugotovili, je nujno, da poznamo strukturo volne in poliakrilnitrilnih vlaken. Ne bomo se bolj podrobno spuščali v samo strukturno zgradbo poliakrilnitrilnih vlaken, ker grbančenje tkanine opravičeno pripisujemo komponenti volnenih vlaken v tkanini. Da bi proces popolnoma razumeli, bomo podali tudi Jakšićevo teorijo fazne strukture volne.

Če vlakno raztezamo, se v njem pojavijo določene napetosti. S povečanjem raztega se povečuje napetost v vlaknu, dokler se to ne pretrga. Če prenehamo raztezati pred



Slika 11.4: Ponazoritev uklona preje zaradi napetosti v volnenem vlaknu.

pretrgom in pustimo vlakno v napetem stanju, bo prišlo do sprostitve (relaksacije) napetosti. Relaksacija je funkcija časa. Napetost v vlaknu se zmanjšuje zaradi tega, ker se elementi strukture reorganizirajo v medsebojno lego, ki pomeni najmanjšo energijo pri danih pogojih deformacije in se povezujejo med seboj makro molekule oziroma nad molekulski elementi strukture vlakna. Čim bolj je novo nastala struktura fiksirana, tem večji je odstotek plastične deformacije. Navadno ostane še določen delež elastične in visoko elastične deformacije, ki sami po sebi ne bi mogli v večji meri vplivati na kakovost tkanine. To velja predvsem za poliakrilnitrilna vlakna. Pri volni je nekoliko drugače. V volnenem vlaknu je določen delež makro molekul v alfa obliki – makromolekule so v obliki vijačnic. Pri raztezanju volnenega vlakna v procesu formiranja preje se vijačnice odprejo in v poznejših fazah predelave preje v tkanino lahko negativno vplivajo na kakovost končnega izdelka [18, 17]. Pri prej omenjenem eksperimentu raztezanja se namreč novo nastala struktura fiksira tudi v volnenem vlaknu; toda za razliko od poliakrilnitrilnih vlaken so v volnenih vlaknih na posameznih delih makromolekul odprte vijačnice. Te pa težijo k temu, da se zopet zaprejo. To pomeni, da je novo formirana struktura v volnenem vlaknu precej labilna. V tem primeru so v ravnotežju sile, ki so proizvod prečnih vezi (te delujejo kot stabilizatorji novo formirane strukture) in sile, ki delujejo v smeri ponovnega zapiranja alfa vijačnice. Porazdelitev teh sil v vlaknu je lahko asimetrično glede na os vlakna. To lahko na splošno povzroči uklon vlakna. Ker je vlakno element strukture preje, lahko vpliva tudi na element preje, zlasti v primeru, ko je v preji relativno majhno število volnenih vlaken. Toda asimetrijo sil in momentov v samem vlaknu lahko zanemarimo zaradi tega, ker je premer vlakna precej manjši od premera preje. Zato bomo pripisali uklon preje, slika 11.3, in njegovo posledico, grbančenje tkanine, slika 11.4, večjemu številu vzrokov, kot sledi:

- na nobeno volneno vlakno ne deluje sila, ki bistveno presega povprečni nivo sil, ki delujejo na druga vlakna na opazovanem prečnem prerezu preje;
- volnena vlakna so na opazovanem prečnem prerezu preje izpostavljena delovanju različno velikih sil, ki presegajo povprečni nivo pri drugih vlaknih, toda njihovi momenti so simetrično porazdeljeni glede na os preje;

- volnena vlakna so na opazovanem prečnem prerezu preje izpostavljena delovanju različno velikih sil, ki presegajo povprečni nivo pri drugih vlaknih, toda njihovi momenti so asimetrično porazdeljeni glede na os preje;
- stanje se razlikuje od stanja v drugi alineji le po tem, da so momenti asimetrično porazdeljeni glede na os preje.

Kot smo že omenili pri analizi učinka sil pri formiranju preje, je večja verjetnost deformacije volnenih kot poliakrilnih vlaken. Zaradi prisotnosti alfa-keratina (makromolekule v obliki vijačnic), ima volneno vlakno večji delež visoko elastične deformacije kot poliakrilnitrilno vlakno.

Pod vplivom sil na vlakno nastanejo v fazi formiranja preje zaradi odpiranja (odvijanja) alfa vijačnic v volnenem vlaknu in manj stabilne eventualno novo formirane strukture v poliakrilnitrilnem vlaknu.

Ko se preja navije na predilniški navitek, se precej zmanjša napetost vzdolž osi preje. To omogoča delno krčenje preje zaradi krčenja vlaken. Ker je upravičena predpostavka, da so volnena vlakna bolj deformirana (raztegnjena) kot poliakrilnitrilna vlakna in ker so v volnenih vlaknih odprte alfa-vijačnice , se bodo volnena vlakna skrčila za večji odstotek (elastična in visoko elastična deformacija) kot poliakrilnitrilna vlakna.

Če se v nadaljnjih fazah predelave preje poveča relativna vlažnost ali se preja celo omoči, se zaradi tega zmanjša energija prečnih vezi v volnenih vlaknih [18, 17]. Zaradi zmanjšanja zaviralnega učinka prečnih vezi se nadaljuje proces zapiranja alfa-vijačnic in s tem krčenje volnenih vlaken.

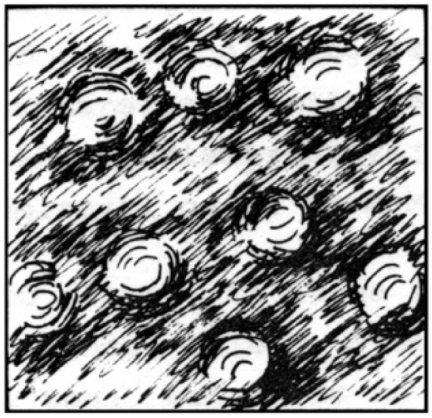
Če je delež volnenih vlaken v preji relativno majhen in če so ta locirana bolj proti periferiji preje, se lahko zgodi, da pride zaradi prej omenjenih vzrokov do uklona preje, kot je prikazano na slikoh 11.2 in 11.5. Kot vidimo iz slike 11.3, deluje sila F na ročici r glede na os preje. Ta sila in ročica tvorita moment, ki povzroči uklon preje. Položaj na sliki 11.3 se lahko nanaša na primer, ko je v preji le eno volneno vlakno ali pa predstavlja rezultanto delovanja vseh volnenih vlaken v preji. Upogibni moment lahko izrazimo z naslednjo enačbo:

$$M = \sum_{i=1}^{n} M_i = \sum_{i=1}^{n} F_i r_i \tag{11.1}$$

kjer je $i = 1, 2 \ldots n$ število volnenih vlaken v preji. Glede na sliko 11.3 lahko vzamemo, da vse sile delujejo v isti smeri in so paralelne. Realna je predpostavka, da deluje v vsakem vlaknu na opazovanem delu preje različna napetost oziroma sila. Žal nimamo metode, s katero bi izmerili velikost teh sil. Možno pa je ugotoviti lego vsakega volnenega vlakna na opazovanem prečnem prerezu preje, slika 11.5. Te lege smo dejansko tudi izmerili. Tkanino smo obarvali z rdečo barvo (Base acryl rot SB), ki ne obarva volnenih vlaken.

Volnena vlakna ostanejo ne obarvana – bela. Na podlagi višine in obsega grbine (vzbokline) na tkanini bi bilo mogoče ugotoviti rezultanto vseh sil, ki delujejo na vlakna. Toda to ni lahko, ker ne vemo, ali povzroča vzboklino ena ali več niti. Da bi bilo mogoče problem v naših trenutnih razmerah, glede na eksperimentalne možnosti meritev, matematično obdelati, je nujno upoštevati predpostavke naštete v besedilu, ki sledi.

Sile, ki delujejo v smeri osi volnenih vlaken, so paralelne z osjo preje (prva predpostavka) in delujejo v isti smeri (druga predpostavka). Iz teh predpostavk izhaja, da so volnena vlakna, ki jih vidimo na danem prečnem prerezu preje, paralelna z osjo preje. Iz druge predpostavke izhaja, da volnena vlakna ne spremenijo medsebojne lege



Slika 11.5: Videz površine analizirane tkanine.

oziroma lege so v nasednjem prečnem prerezu vzdolž preje, ki ni preveč oddaljen od opazovanega prereza (tretja predpostavka).

Predpostavljamo, da je deformaciji najbolj izpostavljen tisti del vlakna, ki je vzporeden z osjo preje (četrta predpostavka). Vlakno, ki ne izpolnjuje prvih štirih predpostavk, ki so naštete zgoraj, ni deformirano in napetost v njem je enaka povprečni napetosti vseh drugih vlaknih v preji z izjemo ekstremnih vrednosti (peta predpostavlka).

Vsakemu volnenemu vlaknu, ki je na prečnem prerezu, predpišemo povprečno vrednost sile F (šesta predpostavka). Šesto predpostavko lahko uporabimo zaradi tega, ker s tem ne spremenimo vrednosti skupnega momenta, ki povzroči določen uklon preje na opazovanem mestu.

Če je stanje na določenem delu preje takšno, da na nobeno volneno vlakno ne deluje sila, ki bistveno presega povprečni nivo sil, ki delujejo na druga vlakna na opazovanem prečnem prerezu preje, ne bo prišlo do grbančenja tkanine. Če so vlakna na opazovanem delu preje obremenjena s silami, ki presegajo povprečni nivo sil pri drugih vlaknih, bo prišlo do določenega grbančenja tkanine – odvisno od velikosti skupnega momenta.

Če je stanje na določenem delu preje takšno, da na nobeno volneno vlakno ne deluje sila, ki bistveno presega povprečni nivo sil, ki delujejo na druga vlakna na opazovanem prečnem prerezu preje, ne bo prišlo do grbančenja tkanine. Če so vlakna na opazovanem delu preje obremenjena s silami, ki presegajo povprečni nivo sil pri drugih vlaknih, bo prišlo do določenega grbančenja tkanine – odvisno od velikosti skupnega momenta. Če vsakemu volnenemu vlaknu, ki je na prečnem prerezu, pripišemo neko povprečno vrednost sile F, lahko enačbo (11.1) zapišemo v naslednji obliki:

$$M = \sum_{i=1}^{n} M_i = F \sum_{i=1}^{n} r_i = Fr \tag{11.2}$$

V enačbi (11.2 ni nakazana metoda izračuna ročice r. Ta dejansko predstavlja rezultanto vseh ročic in jo lahko izračunamo na podlagi slike 11.3. Ročica r je oddaljenost točke (volnenega vlakna) od izhodišča (osi preje) polarnega koordinatnega sistema v ravnini (prečni prerez preje). Ročico r lahko razstavimo na komponente v smeri osi pravokotnega koordinatnega sistema.

$$x_i = r_i \cos \varphi_i \quad ; \quad y_i = r_i \sin \varphi_i \tag{11.3}$$

$$r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \tag{11.4}$$

$$r = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} r_i = \sum_{i=1}^{n}\sqrt{x_i^2 + y_i^2} \tag{11.5}$$

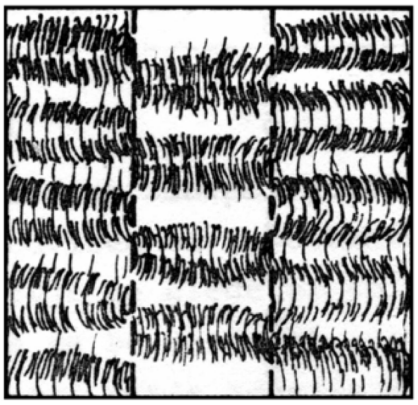
$$M = Fr = \frac{F}{n}\sum_{i=1}^{n} r_i = \sum_{i=1}^{n}\sqrt{x_i^2 + y_i^2} \tag{11.6}$$

Kot smo že omenili, lahko izračunamo r s pomočjo enačbe (11.5) na podlagi meritev r_i in φ_i. Če je $r = 0$, s tem še ni rečeno, da na tem mestu ne bo prišlo do grbančenja tkanine, toda verjetnost grbančenja je v tem primeru zelo majhna. S povečanjem vrednosti r se poveča verjetnost nastanka grbin na tkanini.

11.5 Analiza eksperimentalnih rezultatov v nagrbančeni tkanini

11.5.1 Splošno

Porazdelitev in število volnenih vlaken v prečnem prerezu preje je zelo pomemben dejavnik, ki ima verjetno dominanten vpliv. Naša temeljna predpostavka je, da je grbančenje posledica deformacije volnenih vlaken na posameznih lokacijah površine tkanine. To pomeni, da na ostalih delih preje ne pride do takšnih deformacij, da bi izzvale uklon preje; ali pa je kljub deformaciji porazdelitev momentov takšna, da rezultant-ni moment ni dovolj velik za uklon preje. Našo predpostavko potrjuje tudi videz grbin na preiskani tkanini, slika 11.2, ki se bistveno razlikujejo od grbin, ki se pojavijo na volneni tkanini kot posledica napetih niti, sliki 11.2 in 11.6 [18, 17].



Slika 11.6: Videz nagrbančene tkanine kot posledica napetih niti v tkanini.

Eksperimentalni rezultati so prikazani v preglednica 11.1.Pri izračunu ni upoštevan prečni prerez, v katerem ni volnenih vlaken. V teoretičnih osnovah smo predpostavili, da je uklon preje odvisen od povprečne oddaljenosti volnenih vlaken od osi preje ne glede na to, ali je enojna ali sukana in drugič, da se bo vrednost povprečne oddaljenosti volnenih vlaken od osi preje zmanjševala s povečanjem števila volnenih vlaken v preji. Kot vidimo v preglednici 11.2, je prva predpostavka eksperimentalno potrjena, druga pa ne.

V preglednicah 11.1 in 11.2 pomenijo številke v prvi koloni (mesto meritve): 1 – merjeno na ravni površini tkanine (enojna preja – osnova); 2 – merjeno na nagrbančeni

površini tkanine (enojna preja – osnova); 3 – merjeno na ravni površini tkanine (enojna preja – votek); 4 – merjeno na nagrbančeni površini tkanine (enojna preja – votek); 5 – merjeno na ravni površini tkanine (sukana preja – osnova); 6 – merjeno na nagrbančeni površini tkanine (sukana preja – osnova); 7 – merjeno na ravni površini tkanine (sukana preja – votek); 8 – merjeno na nagrbančeni površini tkanine – votek (sukana preja). Merjeno na ravni ali nagrbančeni površini tkanine pomeni, da je preja za preiskavo lege volnenih vlaken vzeta z ravne ali nagrbančene površine tkanine.

Preglednica 11.1: Povprečna oddaljenost volnenih vlaken od centralne osi preje.

Mesto meritve	Zaporedna številka prečnega prereza	Število volnenih vlaken v prerezu	Povprečna oddaljenost vlaken od osi preje [μm]
1	1	3	44
	2	0	0
	3	1	6
2	1	4	22
	2	4	60
	3	7	226
3	1	4	120
	2	1	46
	3	1	44
4	1	1	16
	2	2	93
	3	3	71
	4	4	175
	5	3	129
5	1	4	44
	2	5	127
	3	3	8
6	1	4	44
	2	5	175
	3	5	128
7	1	4	73
	2	3	77
	3	4	47
	4	5	21
	5	3	131
8	1	3	149
	2	6	115
	3	9	180

Stanje je celo obratno od tega, ki smo ga predpostavili. Iz preglednice 11.2 vidimo, da se veča povprečna vrednost povprečne oddaljenosti volnenih vlaken od osi preje s povečanjem števila volnenih vlaken v prerezu preje. To anomalijo lahko pojasnimo le kot posledico slabega mešanja vlaken. To predpostavko bomo ilustrirali na sliki 11.6. Najprej bomo predpostavili, da je v prečnem prerezu preje 55 poliakrilnitrilnih vlaken.Ta naj bo konstantna. To število poliakrilnitrilnih vlaken se nekoliko razlikuje Stanje je celo številka obratno od tega, ki smo ga predpostavili. Iz preglednice 11.2 vidimo tudi,

Preglednica 11.2: Povprečne vrednosti oddaljenosti volnenih vlaken od osi enojne ali sukane preje.

Mesto meritve	Število prečnih prerezov	Povprečno število volnenih vlaken v prerezu	Skupno število volnenih vlaken	Povprečna odaljenost volnenih vlaken od centralne enojne ali sukane preje [μm]
1	2	2,0	4	25
2	3	5,0	15	103
3	3	2,0	6	70
4	5	2,6	13	97
5	3	4,3	13	60
6	3	4,7	14	116
7	5	3,8	19	70
8	3	6,7	20	148

da se veča povprečna vrednost povprečne oddaljenosti volnenih vlaken od osi preje s povečanjem števila volnenih vlaken v prerezu preje. To anomalijo lahko pojasnimo le kot posledico slabega mešanja vlaken.

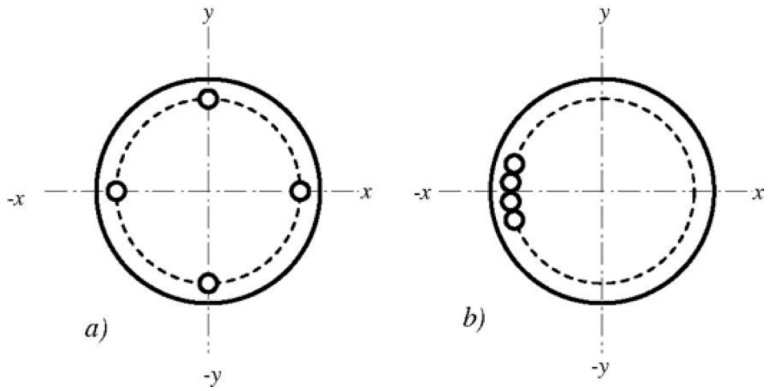
To predpostavko bomo ilustrirali na sliki 11-6. Najprej bomo predpostavili, da je v prečnem prerezu preje 55 poliakrilnitrilnih vlaken. Ta od eksperimentalno ugotovljenega povprečja 45,6. Omenjenih 55 vlaken v prečnem prerezu preje smo izračunali tako, da smo upoštevali naslednje vrednosti posameznih parametrov: finost preje 25 tex, finost (premer) poliakrilnitrilnih vlaken 19,4 mikrometra, dolžina vlaken 118 mm, specifična masa poliakrilnitrilnih vlaken 1,19 g/cm^3, masni delež poliakrilnitrilnih vlaken 77,3 %.

Razlika med izmerjenim in izračunanim povprečnim številom poliakrilnitrilnih vlaken je okrog 17 %. To lahko upoštevamo kot zadovoljivo natančnost, saj je bilo premalo meritev pri ugotavljanju pretrganih poliakrilnitrilnih vlaken, zaradi česar smo dobili manjšo povprečno dolžino, kot je bila v topsu (kopreni oziroma pramenu pred predenjem). Po enakem postopku smo izračunali tudi število volnenih vlaken (preja 25 tex, dolžina volnenih vlaken 98 mm, premer volnenih vlaken 38,6 mikrometrov, masni delež volnenih vlaken 22,7 % in specifična masa volne 1,32 g/cm^3) v prečnem prerezu preje.

Tako izračunano število volnenih vlaken je $4{,}4 \approx 4$. To se razlikuje od eksperimentalno ugotovljenega števila za 25 %. Ker dejansko število volnenih vlaken med prerezi zelo niha (od 0 do 9), je ta razlika nastala v glavnem zaradi premajhnega števila merjenih prečnih prerezov in delno zaradi spremembe dolžine vlaken (skrajšanje) v gotovi preji glede na tops (pramen).

Oglejmo si ekstremna primera porazdelitve volnenih vlaken na prečnem prerezu preje, slika 11.7. Na tej sliki so prikazane samo lege volnenih vlaken. Ostala prosta mesta v preji zasedajo poliakrilnitrilna vlakna. Volnena vlakna so debelejša in krajša. Zaradi tega v procesu predenja težijo k plašču preje. Na sliki 11.7 je najverjetnejša lega volnenih vlaken označena s črtkanim krogom in so vsa štiri vlakna narisana na tem krogu. Na sliki 11.7a je primer idealnega medsebojnega mešanja. V tem primeru je povprečna oddaljenosti volnenih vlaken od centralne osi preje, ki se ujema s koordinatnim izhodiščem, enaka nič.

Eksperimentalni rezultati se nanašajo na ugotavljanje lege volnenih vlaken, na preč-



Slika 11.7: Ekstremna primera lege volnenih vlaken v prečnem prerezu analizirane preje. Legenda: a – idealno pomešana volnena in poliakrilnitrilna vlakna; b – volnena in poliakrilnitrilna vlakna se ne pomešajo in tvorijo bikomponentno prejo.

nem prerezu preje, na katerega je postavljen polarni koordinatni sistem, slika 11.7. Na podlagi velikega števila prečnih presekov je bila ugotovljena lega volnenih vlaken kot povprečna oddaljenost od centralne osi preje.

Če pogledamo mesto meritve, preglednici 11.1 in 11.2, ki se nanašajo na enojno prejo, vidimo, da so volnena vlakna v povprečju res razvrščena bolj proti površini preje. Premer preje je manjši od 0,3 mm, medtem ko je dolžina volnenih vlaken okrog 100 mm. To pomeni, da je dolžina vlaken okrog 300-krat daljša kot premer preje. Zaradi tega je možno, da je del vlakna na površini preje in da je drugi del vlakna celo vzporeden z osjo preje.

Na sliki 11.7b je prikazan primer, ko se vlakna sploh ne pomešajo. Stenji (topsi) so bili postavljeni eden poleg drugega in so se tako združili, vlakna pa se praktično sploh niso pomešala. Iz slike 11.7b vidimo, da se y komponente med seboj izničijo, toda komponente x, pa se seštevajo. Čim več je vlaken, tem večja je vrednost povprečne oddaljenosti volnenih vlaken od osi preje, oziroma tem večja je verjetnost nastanka grbančenja tkanine. Največja vrednost povprečne oddaljenosti volnenih vlaken je 70 mikrometrov v preji, ki je bila vtkana na ravni površini tkanine. Najmanjša oddaljenost volnenih vlaken od osi preje, ki smo jo vzeli z nagrbančenih delov površine tkanine, pa je 97 mikrometrov. Glede na to in na posamične rezultate v preglednici 11.2 (tkanine, ki so uporabljene za testiranje metode), lahko postavimo orientacijski kriterij ocene kakovosti preje, izdelane iz 70 % poliakrilnitrilnih vlaken in 30 % volne. Orientacijski pravimo zaradi tega, ker bi za stalni kriterij morali posneti večje število povprečnih prerezov in tudi izboljšati našo tehniko priprave preparatov. Če je povprečna oddaljenost volnenih vlaken od osi preje 70 mikrometrov in če posamezna meritev ne presega 100 mikrometrov, obstaja zelo majhna verjetnost, da se bodo pojavile grbine na tkanini, izdelani iz takšne preje. Seveda bi bilo nujno kontrolirati kakovost mešanja vsaj toliko časa, dokler proizvajalec preje ne bi dosegel zadovoljive kakovosti mešanja.

11.5.2 Odpornost proti mečkanju

Ta lastnost je zelo zaželena pri tkaninah, iz katerih se izdelujejo predvsem zunanji deli oblačila. Odpornost proti mečkanju se meri s pomočjo izravnalnega kota in časa izravnave. Metoda je predpisana z ISO in drugimi standardi. Pri projektiranju moramo ugotoviti vrednost izravnalnega kota, če je to potrebno. Za vrednost izravnalnega kota moramo pri konstruiranju tkanine izbrati določeno vrsto vlaken, ker je izravnalni kot

odvisen od vrste vlaken. Pri kemičnih vlaknih pa je odvisen tudi od tipa vlaken oziroma nad-molekulske strukture, stopnje kristali-ničnosti in stopnje orientiranosti kristali-ta ali nad molekularnih elementov strukture vlaken. Bombaž in viskozna vlakna imajo relativno majhno odpornost proti mečkanju. To posebno velja za mokro stanje. Volna je v suhem stanju zelo odporna proti mečkanju, v mokrem stanju pa se odpornost zelo zmanjša.

Naravna vlakna in kemična vlakna iz regenerirane celuloze (viskozna vlakna) imajo lastnosti, ki pozitivno vplivajo na dobro fiziološko počutje – ne dražijo površine kože predvsem zaradi dobre absorpcije vode in s tem v zvezi manjšega kopičenja statične elektrike. Odpornost proti mečkanju lahko izboljšamo z mešanjem s kemičnimi (sintetičnimi) vlakni. Če volneni preji dodamo le 2 % elastana, se izredno poveča odpor proti mečkanju. Prej so bile problematične fiziološke lastnosti izdelka, ker so kemična (sintetična) vlakna dražile kožo. Pri modernih kemičnih vlaknih je ta pomanjkljivost odpravljena. Poleg mešanja s kemičnimi vlakni lahko odpornost proti mečkanju izboljšamo še s konstrukcijo preje in tkanine. Česane in sukane preje imajo boljše lastnosti glede mečkanja kot enojne in mikane preje le da so dražje. Podobno velja za goste in težke tkanine v primerjavi z lahkimi in redkimi tkaninami.

Tkanine iz naravnih vlaken lahko oplemenitimo in s tem povečamo odpornost proti mečkanju. Oplemenitenje je postopek, ki omogoča, da se s pomočjo različnih sintetičnih smol in podobnega formira elastična mreža v tkanini, ki bistveno ne spreminja lastnosti v mokrem stanju. Pri tem se na primer v bombažnem vlaknu blokirajo OH skupine in se zmanjša nabrekanje. Pri volnenem vlaknu se podobno kot pri bombažnem vlaknu onemogoči absorpcija vode na mestih, kjer so vodikovi mostovi in solne vezi, tako da se bistveno ne zmanjša odpornost proti mečkanju v mokrem stanju. Tudi pri takšnem oplemenitenju moramo upoštevati, da se lahko poslabšajo tako imenovane fiziološke lastnosti tkanine oziroma gotovega izdelka. To se pravi, da moramo tudi pri takšnem oplemenitenju težiti k optimalni rešitvi enako kot pri mešanicah.

11.5.3 Trdnost posameznih delov oblačila

Z izrazom trdnost bomo zajeli trgalno trdnost, razpočno trdnost in odpornost proti nadaljnjemu trganju. Pri projektiranju reprodukcijskih materialov (tkanine, pletenine, vlaknine, gumbi, zadrge ipd.) za izdelavo posameznih delov oblačila moramo poznati vlogo in lego posameznega reprodukcijskega materiala v gotovem predmetu in lego ter vlogo predmeta v oblačilu. Na podlagi tega je možno oceniti potrebno trdnost posameznega gotovega predmeta oziroma posameznih reprodukcijskih materialov, iz katerih je izdelan gotov predmet.

Potrebno trdnost ugotovimo na podlagi pogojev uporabe. S podrobno analizo je možno izračunati maksimalne sile, ki nastopijo med uporabo oblačila. Pri tem se včasih pokaže kombiniran učinek sil, ki delujejo podobno kot sila pri ugotavljanju trgalne ali razpočne trdnosti ali sile nadaljnjega trganja. Pri tem se oceni dominantnost delovanja določene sile, ki se upošteva kot osnova pri konstruiranju reprodukcijskega materiala. Vrednosti drugih dveh omenjenih parametrov trdnosti sta pač v določenem obsegu soodvisni od izbrane vrednosti dominantnega parametra.

Če ima predmet specifično namembnost, kot na primer tkanine za izdelavo zaščitne obleke za varnostne organe ali vojsko, ki ščitijo telo pred kroglami, izstreljenimi iz pištol ali pušk, potem vsekakor prevlada razpočna trdnost, ki je ne moremo preizkušati na navadnih aparatih, temveč s pomočjo krogel, ki imajo realno maso in hitrost. Pri tem mora biti kos oblačila, ki ga preizkušamo, pritrjen ali obešen na podlogo, ki se pri di-

namičnem udaru krogle obnaša podobno kot človeško telo. To je izjemen primer, kjer je odločilen le en parameter kakovosti in je temu podrejeno vse drugo. Za takšno obleko moramo uporabiti kemična vlakna, ki se težko deformirajo, za deformacijo pa porabijo veliko količino energije. Lahko pa uporabimo metodo merjenje prebojne trdnosti v laboratoriju, ki nam da vsaj orientacijske vrednosti.

11.6 Vrste in obstojnost barv

Barva je zelo pomemben element predvsem zunanjih delov oblačila. Že stari Feničani so precejšnji del svojega dohodka pridobili na podlagi monopola vijolično rdečega barvila, ki je bilo zelo moderno v starem veku. Vrsta barvila je prilagojena vrsti vlakna. Te problematike tukaj ne bomo podrobno obravnavali, saj sodi v tehnologijo barvanja. Pri projektiranju moramo upoštevati vrsto in parametre barve (rdeča, modra, zelena ipd; ton, čistost, jakost, harmonijo in dr.), odvisno pač od trenutnih modnih zahtevkov. Za posebne namene (maskirnost v vidnem in infrardečem spektru) je pomembna tudi refleksija barve ter delež posameznih barv na površini tkanine oziroma oblačila.

Poleg tega je zelo pomembna obstojnost barv. Katere obstojnosti (na svetlobi, pri pranju, znojenju, trenju ipd) in kakšne vrednosti obstojnosti bomo predpisali v projektnih zahtevkih, je pač odvisno od pogojev uporabe. Če se obleka ni izpostavljena pranju, potem bi bilo brez smisla zahtevati obstojnost pri pranju. Ali na primer, če del oblačila ni izpostavljen dnevni svetlobi (spodnje perilo), potem je obstojnost barve na svetlobi nepomembna. V tem primeru mora biti obstojnost pri pranju zelo visoka.

Kot pri drugih parametrih tudi pri barvi težimo k optimalni rešitvi. To pomeni, da upoštevamo modo oziroma trenutne zahteve tržišča, ceno barve in potrebne obstojnosti. Splošnega recepta ni. Priporočljivo je, da je kupcu všečna barva ali kombinacija barv in kakovost – visoke vrednosti obstojnosti barv in da dosežemo v daljšem časovnem obdobju najvišjo možno akumulacijo.

11.7 Seznam oznak poglavja

Oznaka	Enota	Opis
φ	rad	kot
φ_i	rad	kot i-tega vlakna
F_0	N	sila, ki deluje na prejo
F_1	N	sila, ki deluje na prejo
F_2	N	sila, ki deluje na prejo
L_0	μm	raztegnjena dolžina vlakna
L_1	μm	raztegnjena dolžina vlakna
L_2	μm	raztegnjena dolžina vlakna
M	Nm	upogibni moment
r	μm	radij
r_i	μm	radij i-tega vlakna
x_i	μm	abscisa i-tega vlakna
y_i	μm	ordinata i-tega vlakna

11.8 Literatura

[1] L. H. Newburgh. *Physiology of heat regulation and the science of clothing.* Hafner Publishing Co., New York, London, 1968.

[2] D. Jakšić. Tehnologija tkanja – ii. del. Technical report, VTOZD Tekstilna tehnologija, FNT, Univerza v Ljubljani, 1980.

[3] S. Kawabata, M. Niwa, and H. Kaeai. The finite-deformation theory of plain-weave fabrics part i: the biaxial-deformation theory. *The Journal of The Textile Institute*, 64(1):21–46, 1973.

[4] A. Seyam and A. El-Shiekh. Mechanics of woven fabrics: Part ii: Experimental study of weavability limit of yams with thickness variation. *Textile Research Journal*, 60(8):457–463, 1990.

[5] W. Herzog. Schußspanner in wollgeweben. *Melliand Textilberichte*, 40:1166–1170, 1959.

[6] L. Vangheluwe and P. Kiekens. Einfluß von faser und spinnparametem auf die relaxation von baumwollgamen. *Melliand Textilberichte*, 74(6):496–501, 1993.

[7] L. Vangheluwe and P. Kiekens. Test method for cloth fell displacement caused by relaxation. *Textile Research Journal*, 65(9):540–544, 1995.

[8] S. Kovačevič, K. Hajdarović, and A. M. Grancarić. Cause of deformation of textile products. *Textile Research Journal*, 70(7):603–610, 2000.

[9] W. Schindler and E. Finnimore. *Chemical testing of textiles.* Woodhead Publishing, 2005.

[10] L. Wang, editor. *Performance testing of textiles. Methods, technology and applications.* Woodhead Publishing, 2016.

[11] A. Cifferi. The α–β transformation in keratin transformation. *Textile Research Journal*, 59:562–569, 1963.

[12] J. H. Brandbury and D. J. Leeder. Keratin fibres iv. structure of cuticle. *Australian journal of biological sciences*, 23(4):843–854, 1970.

[13] P. Nordon and G. H. David. Coupled diffusion of moisture and heat in hygroscopic textile materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 10(7):853–866, 1967.

[14] J. H. Brandbury. The amino acid analysis of cuticle-rich material from wool. *Textile Research Journal*, 30(2):128–135, 1960.

[15] D. Jakšić. Mehanizam transformacije dužine žice u vunenim vlaknima. *Tekstil: časopis za tekstilnu tehnologiju i konfekciju*, 27(10):559–569, 1978.

[16] D. Jakšić and R. Jovanović. Mechanism of occurence of tense threads in voolen fabrics. In *Proceedings of the 7th International Woo1 Textile Research Conference.*, volume 3, pages 217–225, 1985.

[17] D. Jakšić. Študij pojava pillinga na površini tkanin. 1. in 2. faza. Technical report, RSS, Ljubljana, 1980.

[18] D. Jakšić. Transformacija dolžine niti v volnenih tkaninah. projekt: osvajanje novih tehnoloških postopkov proizvodnje tekstilnih in usnjarsko-čevljarskih materialov. Technical report, RSS, Ljubljana, 1979.

[19] F. T. Peirce. Geometrical principles applicable to the design of functional fabrics. *Textile Research Journal*, 17(3):123–147, 1947.

[20] W. E. Morton. The arrangement of fibres in single yarns. *Textile Research Journal*, 26(5):325–331, 1956.

[21] J. B. Hamilton. The radial distribution of fibres in blended yarns part ii-factor affecting the preferential migration of components in blends. *Journal of the Textile Institute Transactions*, 49(11):T687–T698, 1958.

[22] W. J. Onions, R. L. Toshniwal, P. P. Townend, and J. Onios. The mixing of fibres in worsted yarns: Part ii-fibre migration. *Journal of the Textile Institute Transactions*, 51(2):T73–T79, 1960.

[23] W. Žurek. *The structure of yarn.* Department of Commerce. Office of Technical Services, Washington, 1975.

[24] J. E. Ford. Segregation of component fibres in blended yarn. *Journal of the Textile Institute Transactions*, 49(11):T608–T620, 1958.

[25] M. Nikolić, F. Lesjak, and A. Štritof. Bodočnost prstnskega predenja. *Tekstilec*, 43(5–6):325–331, 2000.

[26] R. Hechti. Compact spinning systems – an opportunity for improving the ring spinning process. *Melliand International*, 2(1):12–13, 2000.

[27] R. Meredith. The tensile behaviour of raw cotton and other textile fibres. *Journal of the Textile Institute Transactions*, 36(5):T107–T130, 1945.

[28] J. E. Ford, editor. *Fibre data summaries: a handbook of data on 28 principal textile fibres.* Cotton, Silk and Man-Made Fibres Research Association, Manchester, 1968.

[29] B. Farrow. Extensometric and elastic properties of textile fibres. *Journal of the Textile Institute Transactions*, 47(2):T58–T101, 1956.

POGLAVJE 12

Teorija fazne strukture volne

Kazalo

12.1 Uvod **247**
12.2 Vpliv procesa rasti volnenega vlakna na njegovo fazno strukturo **248**
12.3 Eksperimentalna tehnika **252**
12.3.1 Rentgenografska metoda ugotavljanja stopnje kristaliničnosti v volnenem vlaknu 252
12.3.2 Eksperimentalna tehnika priprave vzorcev za snemanje difraktogramov 253
12.4 Eksperimentalni rezultati **254**
12.5 Analiza rezultatov **255**
12.5.1 Nepopolnost eksperimentalne tehnike 255
12.5.2 Fazna struktura volne 256
12.6 Namesto sklepov **257**
12.7 Seznam oznak poglavja **257**
12.8 Literatura **257**

12.1 Uvod

Obravnavali bom Jakšićevo teorijo fazne strukture volne [1, 2, 3].

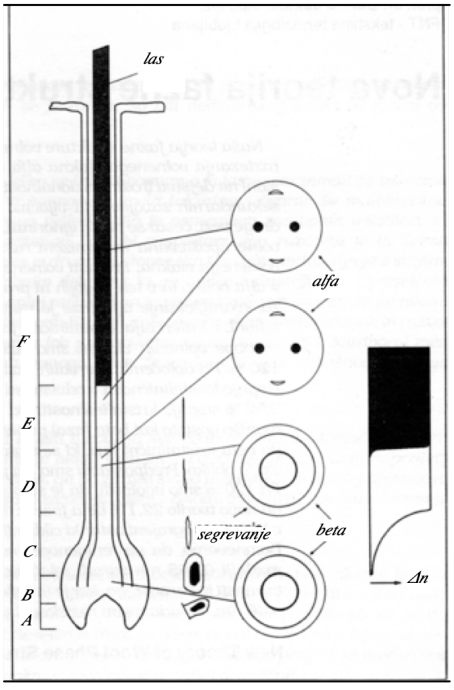
Največji problem je v tem, kako pravilno razumeti in s tem rešiti probleme, ki se občasno pojavljajo v procesu predelave volnenih vlaken v gotovi tekstilni izdelek, kot je preja, pletenina, vlaknina ali tkanina. Včasih je bil velik problem pojav napetih niti v volnenih tkaninah. Tovarne so imele šivalnice v katerih so delavke popravljale napake v dragih volnenih tkaninah, predvsem česankah, ki so namenjene za drage moške obleke. V šivalnici je bilo precej več delavk kot v tkalnici.

Če malo veste o strukturi volnenega vlakna, ne morete učinkovito ukrepati, da odpravite napake kot so napete niti v volnenih tkaninah. Astburyjeva teorija alfe – beta transformacije , ki jo je razvil 1931. leta, ki pojasnjuje obnašanje volnenega vlakna v procesu raztezanja ne drži in tudi ni uporabna. To se zgodilo dosti prej, preden sta Crick in Watson odkrila alfa vijačnico, oziroma DNK. Iz opisa razvoja teorije je razvidno, da je precejšnjo vlogo imela intuicija. Samo raziskovalno delo na strukturi volnenega vlakna,

ne pomeni tudi končni uspeh. Avstralski raziskovalec Bendit [4] je v svoji 460 objavi s področja raziskave strukture volnenega vlakna prišel zelo blizu do dejanske strukture volnenega vlakna. Omenil je celo verjetnost obstoja beta faze v volnenem vlaknu, kar je precejšen napredek. Sicer ideja teorije fazne strukture volne sloni na fazah rasti volnenega vlakna in na strukturi fibroina naravne svile ter metodi ugotavljanja stopnje kristaliničnosti in orijentisanosti makro molekul v volnenem vlaknu [5, 1].

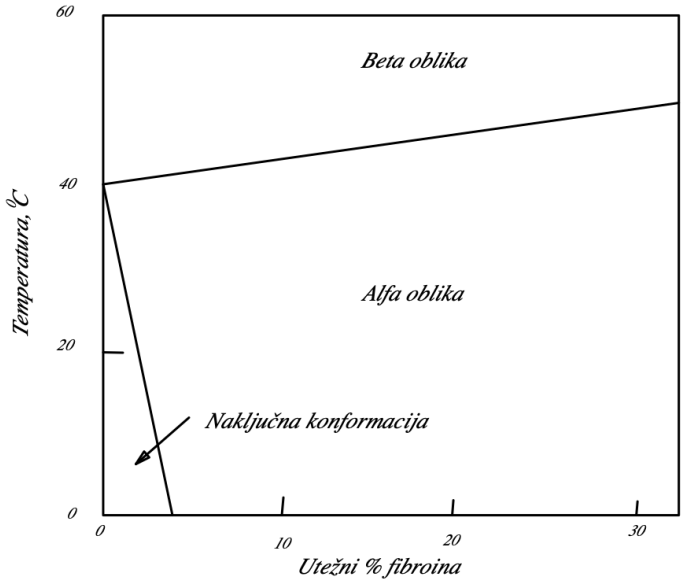
12.2 Vpliv procesa rasti volnenega vlakna na njegovo fazno strukturo

Kljub dejstvu, da je že dolgo tega, ko so bile ugotovljene zaporedne faze rasti keratinskega vlakna (volne, človeški lasje) [6], niso bila ta spoznanja dovolj prisotna pri raziskavi fazne strukture volne. Raziskovalci se niso preveč ozirali na termodinamična ravnotežja faz v procesu rasti volnenega vlakna. V zgornjem delu cone A, slika 12.1, se tvorijo dolge makro molekule iz ostankov aminokislin, ki nastanejo v folikuli (spodnji začetek zona A). V coni A je relativno visoka temperatura (okrog 36 °C). in vsekakor visok nadtlak (osmotski tlak). Takšni pogoji ne omogočajo naključne konformacije molekul, slika 12.2 [7]. To stanje pospešuje proces tvorbe daljših molekul in njihovo zlaganje v tvorbe, ki zavzamejo manjšo prostornino. Proces je dinamičen. Iz papile, ki je "vsajena" v folikulo kot stožčasti zatič, slika 12.1, se neprenehoma tvorijo nove kratka molekule, ki jih pogojno lahko imenujemo "ostanki aminokislin," saj so ti produkti ostanki razgradnje makromolekul keratina. Iz teh kratkih molekul se sintetizirajo makromolekule.



Slika 12.1: Spremembe konformacije makromolekul v času rasti človeškega lasu. [6]

Zaradi osmotskega tlaka se molekule pomikajo navzgor po kanalu, iz katerega raste volneno vlakno. Že v naslednji coni (cona B) se molekule združijo v nagubane beta plošče, te pa v beta kristalite. Del molekul pa verjetno tvori tako imenovane beta snope [6]. Pozneje bomo bolj podrobno analizirali verjetnost obstoja beta snopov. Kristaliti in snopi so verjetno orientirani vzdolž osi bodočega vlakna. Eksperimentalno ni mogoče



Slika 12.2: Vpliv temperature in koncentracije v fibroinskem filmu, na konformacijo fibroina naravne svile.

ugotoviti stopnje orientacije v tej coni rasti volnenega vlakna zaradi tega, ker ni mogoče pripraviti vzorca po principu snopa paraleliziranih volnenih vlaken, tem več po principu prašnega vzorca. Rentgenogram takšnega vzorca kaže tipično sliko neorientiranih beta kristalitov [6]. Kot smo že omenili je neorientiranost posledica metode snemanja rentgenograma (prašni vzorec). Na splošno se v coni B začenjajo tvoriti elementi nad molekulske strukture v volnenem vlaknu ali z drugimi besedami – začenja se proces diferenciacije makro molekul v volnenem vlaknu.

Beta kristaliti oziroma makro molekule, verjetno so orientirane vzdolž ose vlakna ne glede na stopnjo orientacije. Lahko se vprašamo, zakaj naj bi prišlo v coni B do določene stopnje orientacije makro-molekul, ki ne tvorijo beta fazo, nagubanih beta plošč, beta kristalov in molekul, ki naj bi tvorile beta snope. Res je, da je temperatura v conah A in B precej nižja kot je temperatura prehoda, na primer fibroina iz beta v alfa fazo. Toda v coni B še sploh ni pogojev za fazni prehod iz beta faze v alfa fazo. Saj so v tej coni komaj izpolnjeni termodinamični pogoji (skupen medsebojni vpliv temperature, tlaka in koncentracije makromolekul) za tvorbo beta faze. Vrnimo se na začetek prehojene poti – na začetek cona A. V – lahko bi rekli – "biološki juhi" plavajo nastajajoči deli bodočih makromolekul keratina.

Če koncentracija molekul ne presega kritične vrednosti prehoda v gradivne elemente beta keratina (molekuli v beta fazi), so te molekule na medsebojni razdalji, ki ne omogoča trenutno medsebojno združevanje molekul tako v makromolekule kot v nad-molekulske elemente (nagubane beta plošče, beta kristalite in eventualno geometrično nepravilne skupine molekul – beta snopi). Vendar neprenehoma nastajajo nove molekule in s tem raste koncentracija molekul v tem delu folikule. Razdalja med molekulami se zmanjšuje in povečuje se verjetnost medsebojne povezave molekul po dolžini (sinteza makromolekul) kot tudi medsebojne bočne povezave molekul – tvorba nad-molekulskih elementov strukture vlakna. Fazni prehodi se navadno zgodijo v ozkem temperaturnem intervalu pri določeni koncentraciji in določenem tlaku. V takšnem primeru je prehod diskontinuiteten in skokovit. Volneno vlakno raste počasi. Zaradi tega bomo, v prvi aproksimaciji, obravnavali fazne prehode kot kontinuiran proces v določenem časov-

nem obdobju na makro ravni. Ker je premer "reakcijske posode" – folikule – relativno velik, stene folikule nebi mogle bistveno vplivati na orientacijo molekul. Ta reakcijska posoda ima v sredini koničast vložek papilo, slika 12.1. Med zunanjo površino papile in notranjo površino folikule je približno le ena tretjina vrednosti premera folikule. V tem primeru pa stene folikule in papile usmerjajo molekule v smeri rasti vlakna. Molekule se orientirajo in se ustvarjajo pogoji za tvorbo nad-molekulskih elementov strukture vlakna. Pri človeku je temperaturni gradient približno 3 °C/cm [8]. Če velja približno enako pri ovci, ne bo bistvenega pada temperature v prvih dveh conah – A in B. Saj papila sega tudi v cono B. Verjetno se v teh conah bistveno ne spreminja tudi tlak. Lahko domnevamo, da se povečava koncentracija molekul. Namreč, nove molekule prihajajo v reakcijsko posodo – folikulo, med tem ko je v zgornjih conah, lahko bi rekli, zastoj prometa. Zaradi tega se povečuje koncentracija proti koncu cone B tako, da so izpolnjeni pogoji za diferenciacijo molekul, oziroma gostejše zlaganje molekul. Dejansko je to prvi fazni prehod v katerem se posamezne molekule združujejo v nad-molekulske elemente strukture volnenega vlakna. Novo stanje potrebuje manj prostora zaradi boljše urejenosti. Ko se določena molekula vgradi v, na primer, beta kristalite, hipoma pade tlak v tem območju in se prekine proces formiranja novih elementov nad-molekulske strukture volne za toliko časa, da se zopet vzpostavijo pogoji za ponovni proces združevanja molekul v nad-molekulske agregate. Vendar se moramo zavedati, da tudi ti pogoji ne omogočajo faznega prehoda v alfa fazo, da o naključni konformaciji molekul niti ne govorimo. Del vlakna v katerem so nastali beta kristaliti, se premika proti začetku cone C.

Pri tem procesu diferenciacije moramo upoštevati dejstvo, da okrog 20 % materiala, ki sodi cikličnim amino kislinam in cistinu [9] ne more sodelovati pri tvorbi pravilnih beta kristalitov, temveč bo tvoril defekte v fazni strukturi volne. V tem procesu se verjetno doseže eno ravnovesje za drugim, preden se vse molekule ne združijo v beta kristalite. Vendar ni nujo, da se vse molekule, ki so integrirane v beta kristalite, transformirajo v alfa obliko. Poleg tega lahko domnevamo, da določeni delež molekul tvorijo beta snope [4, 10] ali pa so se povezale z molekulami, ki imajo v svoji verigi vgrajene ostanke cikličnih amino kislin in cistina. Ta domneva je bolj realna kot domneva obstoja molekul, ki tvorijo beta snope. V coni C se zožuje kanal, v katerem raste volneno vlakno. Zaradi tega se zmanjšuje volumen, ki je na razpolago makromolekulam in nastalim kristalitom beta faze. Tudi temperatura in tlak se postopno zmanjšujeta. To tudi pomeni, da se zmanjšujejo amplitude nihanja molekul oziroma kristalitov okrog njihovih ravnotežnih leg. Zdi se, da je večji vpliv zmanjšanja temperature in tlaka kot zmanjšanje volumna. Pojavlja se proces fibrilizacije. Na posameznih lokacijah omogoča novo stanje okolja postopni fazni prehod iz beta v alfa obliko. Ta prehod se začenja nekje v sredini cone C. Tudi ta proces poteka od enega do drugega ravnotežnega stanja. Pri tem se povečuje orientacija v smeri osi vlakna. Molekule v alfa vijačni obliki so namreč toge in zavzamejo več prostornine kot molekule v raztegnjeni beta obliki. Ko se ustvarijo pogoji za fazni prehod iz beta v alfa fazo (znižanje temperature in tlaka), se to tudi zgodi, ker so makromolekule keratina nagnjene k tvorbi vijačne strukture [11]. Ni verjetno, da proces transformacije poteka na celotnem prečnem prerezu bodočega volnenega vlakna v določenem zgornjem delu cone B oziroma v kateremkoli prečnem prerezu vzdolž cone C. Posledica transformiranje določenega beta kristalita ali dela molekul, ki mu pripadajo, je povečanje prostornine, ki jo transformirani del molekul zaseda v primerjavi s prejšnjim stanjem. To pa povzroča povečanje pritiska na tej lokaciji, ki zavira nadaljnjo transformacijo.

Naj bo opazovan prečni prerez, zgornja ploskev zelo kratkega valja, ki naj simbolizira

le zelo kratko dolžino cevi, v kateri raste vlakno. Če bi potovali s tem valjem v procesu rasti proti površini kože ovce in bi to pot razdelili v nadstropja, bi lahko opazovali proces transformacije iz beta v alfa obliko v vsakem nadstropju. Na naslednjem nadstropju, ki je bližje površini kože, se zniža temperatura in s tem tudi tlak na vrednosti, ki omogočajo nadaljnjo transformacijo. V zgornji polovici cone C je dovolj materiala transformirano iz beta v alfa obliko in se začne bolj izrazit proces fibrilizacije. Transformirane molekule se združujejo v nad-molekulske elemente strukture (protofibrili, mikrofibrili). V coni D je temperatura nižja kot v coni C in se proces transformacije in fibrilizacije nadaljuje. Obenem se začenja proces keratinizacije – tvorjenje prečnih cistinskih mostov.

Proces keratinizacije gre počasi, približno tako kot sama rast volnenega vlakna. V coni D že dominira alfa faza. Saj difraktogram kaže reflekse, ki so karakteristični za alfa keratin. Če segrevamo material iz cone D se ta transformira v beta obliko. V tem procesu je možen razpad protofibrilov, ki jih tvorijo dve ali tri alfe vijačnice (v tem tekstu pod alfa vijačnico razumemo kompleksno vijačnico s primarnimi in sekundarnimi zavoji) zaradi tega, ker niso prečno povezane s cistinskimi mostovi, oziroma je teh prečnih vezi v tej fazi rasti volnenega vlakna premalo. Proces keratinizacije se nadaljuje kot funkcija časa in rasti volnenega vlakna. V naslednji coni (cona E) se konča proces keratinizacije.

Domnevati smemo, da se proces transformacije ni končal. Pri kemičnih reakcijah je to samoumevno. Iztržek ni nikoli 100 %. Faznih prehodov ne moremo primerjati s kemično reakcijo, saj so ti navadno trenutni in potekajo popolnoma iz ene v drugo fazo. To velja, če ni nobenih ovir transformaciji. V našem primeru se tvori tridimenzionalna struktura. Če se tvorba te strukture (keratinizacija) konča, preden popolnoma poteče transformacija, bo "zamrznjen" preostali del beta kristalitov in potemtakem bi jih morali identificirati v volnenem vlaknu. Identifikacija je zelo težavna.

Beta fazo lahko identificiramo le na rentgenogramu. Vendar je velik problem zaznati tipične reflekse za beta keratin, posebno, če je malo materiala v obliki beta kristalitov. Ekvatorialni refleks na približno 0,98 nm ima tudi alfa keratin in se oba zlijeta. Drugi karakterističen refleks za beta keratin v volnenem vlaknu je ekvatorialni refleks na 0,465 nm. Ta je sicer močan na rentgenogramu ali difraktogramu raztegnjenega snopa volnenih vlaken za 60 % [3, 5]. V tem primeru so nad-molekulski elementi strukture vlakna bolj orientirani kot pri neraztegnjenem volnenem vlaknu. To pomeni, da je ekvatorialni refleks na 0,98 nm neuporaben za identifikacijo prisotnosti beta faze v volnenem vlaknu. Ekvatorialni refleks na 0,465 nm, če je sploh prisoten, pa je na žalost zelo zamaskiran z difuznim prstanom na približno 0,46 nm. Mogoče bi se ga dalo izločiti z metodo razdvajanja refleksov.

Lahko uporabimo tudi drugačen pristop k identifikaciji in kvantifikaciji beta faze v volnenem vlaknu. Na podlagi analize rasti volnenega vlakna in identificiranih faz v posameznih stadijih (conah) rasti volnenega vlakna lahko postavimo naslednje hipoteze oziroma domneve:

- večji del molekul se je transformiral iz beta v alfa obliko;
- en del molekul se ni transformiral zaradi termodinamičnih pogojev in keratinizacije;
- molekule, v katere so vgrajene ciklične amino kisline, ne tvorijo ne alfa in ne beta faze;
- snopi beta molekul, ki so se združile z molekulami, ki vsebujejo ostanke cikličnih aminokislin, ne tvorijo beta kristalite niti nagubane beta plošče;

- domneva o beta snopih [2], ki ne tvorijo beta kristalov ali nagubanih beta plošč je nerealna;
- v procesu raztezanja snopa volnenih vlaken v vreli vodi ni pogojev za alfa – beta transformacijo zaradi prečne stabilizacije protofibrilov in mikrofibrilov s pomočjo cistinski mostov in zaradi nezmožnosti odvijanja sekundarnih zavojev molekul, ki tvorijo protofibrile;
- odvijajo (odpirajo) se le primarni zavoji alfa vijačnic.

Alfa vijačnica ima premer približno 0,51 nm, kar omogoča razteg alfa vijačnice za 120 %. Če bi volneno vlakno raztegnili za 120 %, bi odvili (odprli) vse primarne zavoje alfa vijačnic. V vlaknu ne bi bilo več alfa faze. Možno je ugotoviti stopnjo kristaliničnosti pri kateremkoli odstotku raztezka in na podlagi teh vrednosti sklepati o deležu alfa in beta faze v volnenem vlaknu. Če upoštevamo naštete domneve in če držijo, bi v volnenem vlaknu poleg normalne alfa faze morali identificirati še beta fazo, kateri bi se v procesu raztezanja pridružil delež molekul, ki so združene z molekulami, ki imajo v svoji verigi ciklične amino kisline in cistin. Kot posebna frakcija bi bile še molekule s cikličnimi amino kislinami. To domnevo bomo testirali na podlagi rezultatov spremembe stopnje kristaliničnosti, ki je bila izmerjena na ekvatorialnem refleksu na 0,98 nm.

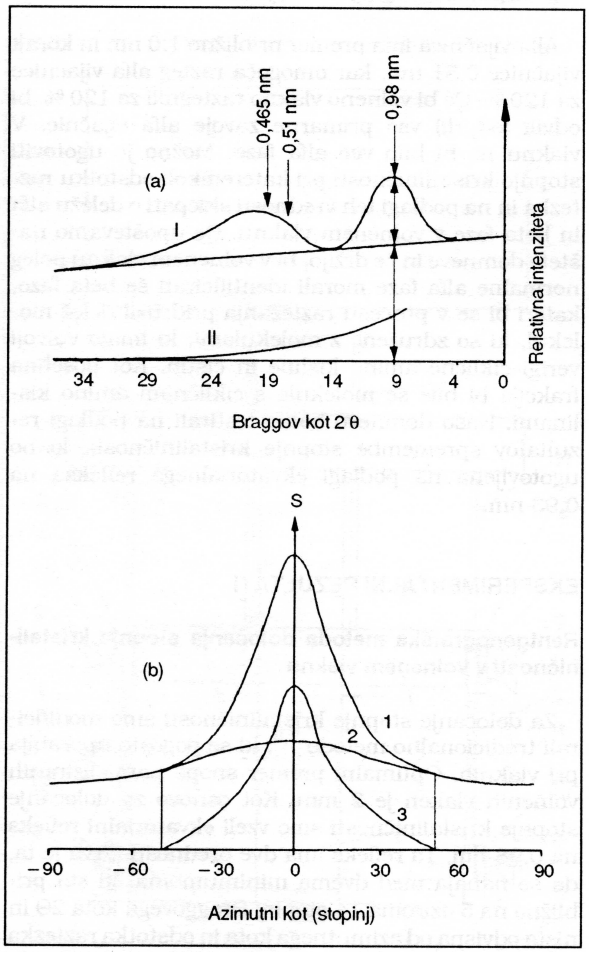
12.3 Eksperimentalna tehnika

12.3.1 Rentgenografska metoda ugotavljanja stopnje kristaliničnosti v volnenem vlaknu

Za ugotavljanje stopnje kristaliničnosti smo modificirali tradicionalno metodo [10], ki se pogosto uporablja pri vlaknih. Optimalni premer snopa paralelnih volnenih vlaken je 2 mm. Kot osnovo za ugotavljanje stopnje kristaliničnosti smo vzeli ekvatorialni refleks na 0,98 nm. Ta refleks ima dve prednosti. Prva je ta, da se nahaja med dvema minimumoma, ki sta približno na 5 oziroma 14 stopinj Braggovega kota 2θ in nista odvisna od azimutnega kota in odstotka raztezka volnenih vlaken razen le, da se nekoliko približata drug drugemu pri zelo velikih raztezkih zaradi zmanjšanja sipanja refleksa, ki je posledica večje stopnje orientacije strukture raztegnjenih volnenih vlaken. Druga prednost je v tem, da je ta refleks skupen za alfa in beta kristalinično fazo. Omenjena minimuma je možno povezati s tangento, ter z njo ločiti relativne intenzitete amorfne in kristalinične faze, slika 12.3a.

Snemali smo difraktograme Lincoln volne finosti približno 30 μm vzdolž Braggovega kota med 4 in 40 stopinjami in to: na ekvatorju, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 in 90 (meridian) stopinj po azimutu na rentgenu Rigoku. Pri obdelavi rezultatov smo upoštevali sipanje zaradi prisotnosti zraka.Vpliv vode na 9 stopinjah Braggovega kota 2θ je zanemarljiv [4, 10]. Izmerjene vrednosti relativnih intenzitet na 0,98 nm medravninske razdalje na difraktogramih v odvisnosti od azimutnega kota, smo povezali s krivuljo. Ker smo s tangento razdelili skupne integralne intenzitete, slika 12.3a, smo dobili dve krivulji, slika 12.3b. Površina pod krivuljo 1 je skupna intenziteta kristaliničnih faz in amorfne faze, medtem ko prestavlja površina pod krivuljo 2 delež amorfne faze. Površina pod krivuljo 3, slika 12.3, prestavlja razliko med tema dvema površinama in je delež kristaliničnih faz. Zaradi tega lahko napišemo naslednjo enačbo:

$$I = I_a + I_b = 1 \tag{12.1}$$



Slika 12.3: Ilustracija metode za ugotavljanje stopnje kristaliničnosti v volnenem vlaknu. Legenda: a – Ekvatorialni difraktogram; b – Porazdelitev relativnih intenzitet na medravninski razdalji 0,98 nm v odvisnosti od azimutnega kota.

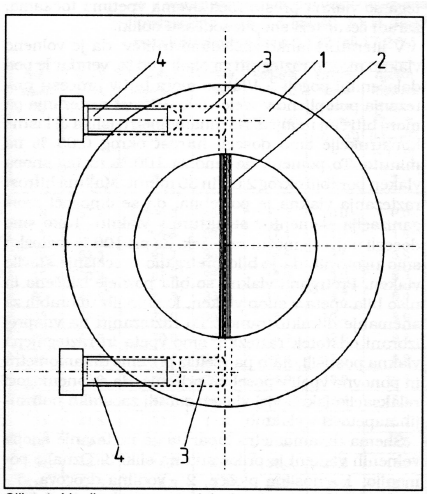
kjer so I skupna integralna intenziteta sipanja rentgenskih žarkov od kristaliničnih in amorfne faze v volni, I_a integralna intenziteta amorfne faze in I_c integralna intenziteta kristaliničnih faz.

Delež integralne intenzitete I_c se nanaša na alfa in beta kristalinično fazo. Ne vemo pa natančno koliko tej integralni intenziteti prinaša ena in druga kristalinična faza in če sploh v ne raztegnjenem volnenem vlaknu obstoji beta faza.

12.3.2 Eksperimentalna tehnika priprave vzorcev za snemanje difraktogramov

Osnova vsega eksperimentalnega dela je pravilna priprava snopa paraleliziranih volnenih vlaken. V snopu morajo biti vlakna popolnoma paralelizirana, kar pomeni izravnana. Paralelizam vlaken je težko doseči pri fini nakodrani volni. Zaradi tega so najbolj primerni grobi tipi volne brez kodrov ali z malo kodrov kot sta Lincoln in Costwold volni. Nosilo snopa vlaken, ki se vstavi v adapter ki je vstavljen v rentgen. Snop volnenih vlaken 2 je pritrjen v nosilo 1, slika 12.4, s pomočjo vijaka 4 oziroma valjčkov 3. Valjčka pritiskata snop vlaken v desno, zaradi česar se lahko spremeni paralelnost vlaken v levi polovici snopa. Poleg tega so vlakna prosta med dvema vpetima točkama, zaradi tega teži snop sodčasti obliki.

V literaturi lahko zasledimo trditev, da je volneno vlakno možno raztegniti za okoli 120 %, vendar le pod določenimi pogoji [12]. Vlakno mora biti v procesu raztezanja potopljeno v vrelo vodo. Hitrost raztezanja pa mora biti čim manjša. Na dinamometru lastne konstrukcije smo dosegli hitrost raztezanja okrog 0,63 % na minuto. Glede na dolžino snopa vlaken pomeni, da smo za 100 % razteg snopa vlaken porabili okrog 2 uri in 39 minut. Majhna hitrost raztezanja vlaken je potrebna, da se omogoči reorganizacija elementov strukture v vlaknih. Tako smo dosegle največji možni raztezek. Že pri 100 % raztezku (poskušali smo snop vlakna raztegniti do 120 %) smo ugotovili, da je bilo pretrgano precejšnje število vlaken. Pretrgana vlakna so pozneje bila izločena iz snopa vlaken in niso bila vpeta v snop vlaken, ki smo jih uporabili za snemanje difraktogramov. Po raztezanju na naprej izbrani odstotek raztezka, smo vpeta in raztegnjena vlakna posušili, nato pa vzeli iz prižem dinamometra in vpeli v nosilo snopa slika 12.4. S tem je tudi onemogočena eventualna relaksacija vlaken (krčenje) zaradi zaostalih notranjih napetosti v vlaknih.



Slika 12.4: Nosilo snopa paraleliziranih volnenih vlaken.

12.4 Eksperimentalni rezultati

Pripravili smo večje število vzorcev, ki smo jih raztezali na naprej izbrani odstotek raztezka. Poskušali smo raztezati volnena vlakna tudi do 120 %, vendar nam to ni popolnoma uspelo. Več kot 50 % vlaken je bilo pretrganih. Zaradi tega smo pripravili snop vlaken za snemanje na rentgenu združevanjem nepretrganih vlaken iz večjega števila raztegnjenih snopov vlaken. Kot je že omenjeno, so vsi pripravljeni vzorci snemani na strukturnem rentgenu in prikazani na rentgenogramu s tehniko širokega kota (WAXS).

Na podlagi obdelanih difraktogramov smo izračunali stopnjo kristaliničnosti volnenega vlakna [5]. Vendar to ne zadostuje. Problem je v interpretaciji izračunate vrednosti stopnje kristaliničnosti v odvisnosti od odstotka raztezka. Pri tem moramo upoštevati dosedanja dognanja na področju fazne strukture volne. Sprememba stopnje kristaliničnosti volne v odvisnosti od % raztezka pri domnevi, da je v neraztegnjeni Lincoln volni delež alfa kristalinične faze 0,4 (ali 40 %) in delež beta kristalinične faze 0,172 (ali 17,2 %), je prikazano v preglednici 12.1.

Najbolj je razširjena hipoteza (na osnovi fotografij prečnega prereza volne, ki so snemane na elektronskem mikroskopu), da ima mikrofibril "9+2" aranžma [13] in da je

Preglednica 12.1: Spremembe stopnje kristaliničnosti volne v odvisnosti od % raztezka pri domnevi, da je v neraztegnjeni Lincoln volni delež alfa kristalinične faze 0,4 (ali 40 %) in delež beta kristalinične faze 0,172 (ali 17,2 %) [2]

Raztezek [%]	$\alpha + \beta$ faza [%]	% neraztegnjene α vijačnice (osnova: 120 %)	α faza [%]	Količina β faze [%] (2)-(4)	Zmanjšanje α faze $\Delta\alpha$ [%] 40-(4)	Razlika med $\Delta\alpha$ in $\Delta\alpha$-17,2 % (6)-((5)-17,2)
(1)	(2)	(3)	(4)	(4)	(6)	(7)
0	57,2	100,0	40,0	17,2	0,0	0,0
5	55,4	95,8	38,3	17,1	1,7	1,8
10	53,3	91,7	36,7	16,6	3,3	3,9
15	50,9	87,5	35,0	15,9	5,0	6,3
20	48,8	83,3	33,3	15,5	6,7	8,4
30	48,6	75,0	30,0	18,6	10,0	8,6
36	47,9	70,0	28,0	19,9	12,0	9,3
46	47,3	61,7	24,7	22,6	15,3	9,9
54	46,9	55,0	22,0	24,9	18,0	10,3
70	41,1	41,7	16,7	24,4	23,7	16,1
80	41,5	33,3	13,3	28,2	26,7	15,7
95	43,5	20,8	8,3	35,2	31,7	13,5
100	43,0	16,7	6,7	36,3	33,3	14,2
110	38,5	8,3	3,3	35,2	36,7	18,7
120	39,3	0,0	0,0	39,3	40,0	17,9

v enoti tega (modela) aranžmaja le 40 % (volumskih) delež alfa faze. Ker ima alfa faza manjšo gostoto kot beta faza, je masni delež manjši kot 40 % Pri tem lahko še omenimo, da rentgenogram ozkega kota (SAXS) ne potrjuje ta model. V tej razpravi se ne bomo spuščali v poskus odgovora tudi na to vprašanje. To bi zahtevalo vsekakor, preveliko dela glede na naše eksperimentalne in materialne zmožnosti. Pa tudi sam problem je teoretično izredno zahteven. Zaradi tega bomo upoštevali "9+2" model, ne da bi se kritično vprašali o realnosti njegove eksistence. Izračunate stopnje kristaliničnosti, preglednica 12.1, se nanašajo na masni delež.V prvi aproksimaciji bomo predpostavili, da je gostota volnenega vlakna uniformna ne glede na kristalinično fazo. Vrednost stopnje kristaliničnosti, ki je večja kot 40 %, bomo pripisali beta kristalinični fazi.

12.5 Analiza rezultatov

12.5.1 Nepopolnost eksperimentalne tehnike

Eksperimentalni rezultati v preglednici 12.1 so prikazani v stolpcih (1) in (2). Stolpec (3) sloni na domnevi, da so v volni še ostanki beta kristalitov, ki se niso transformirali v alfa fazo v procesu rasti in keratinizacije volnenega vlakna. Kljub temu, da so vlakna dobro paralelizirana, preden so vstavljene v prižeme dinamometra za raztezanje volnenih vlaken in, da je za eksperiment uporabljena Lincoln volna, ki ima le malo kodrov, niso med prižemama pred začetkom raztezanja idealno izravnane. To odstopanje vpliva na rezultate in pomeni nekoliko nižje realne vrednosti. Poleg tega imajo vpliv tudi vi-

skoelastične deformacije. Iz raztegnjenih vlaken se tvori snop. ki se namesti v nosilo snopa,ki se pozneje vstavi v adapter za snemanje na rentgenu. Vlakna so bila v nosilu tudi do 30 dni. Kljub temu, da so bila dobro vpeta so se nekoliko skrčila, ker jih ni bilo možno popolnoma izravnati pri vpenjanju v nosilo. Pri prenosu iz prižem v nosilo so bila vlakna nekaj časa prosta (nevpeta) in bi lahko prišlo do delnega skrčenja zaradi delovanja notranjih napetosti v vlaknu, če so te še prisotne (viskoelastična deformacija). V izpopolnjeni eksperimentalni tehniki je mogoče te vplive znižati pod 2 %, tako da bi bil navidezni razteg 120 % realno med 117 % in 119 %.

Že v objavi [1] smo se sklicevali na 3 mogoče vzroke in smo omenili, da se napake lahko pojavijo pri snemanju difraktogramov in grafični obdelavi rezultatov. Dobili bi bolj natančne difraktograme, če bi jih snemali v vakuumu. Dobili pa bi tudi bolj natančne vrednosti stopnje kristaliničnosti, če bi avtomatizirali grafično obdelavo difraktogramov. Natančnost eksperimentalne tehnike je možno izboljšati tako, da minimiziramo odstopanje rezultatov od realnih vrednosti. Ker gre v našem primeru za globalno presojo sprejemljivosti domnev o fazni strukturi volne, eksperimentalni rezultati v preglednici 12.1, zadostujejo v prvi aproksimativnosti.

12.5.2 Fazna struktura volne

Izračunata stopnje kristaliničnosti je 57,2 %. Ker je v celici modela “9+2” le okrog 40 volumskih odstotkov materiala, ki je v alfa obliki je najmanj 17,2 % preostalega dela v beta obliki. Model “9+2” smo pač vzeli ker trenutno nimamo boljše rešitve. Če model “9+2” drži, potem je v coni B in v začetku cone C (rast volnenega vlakna) bilo v volni 57,2 utežnih odstotkov materiala v beta obliki. Od tega materiala se je večji del transformiral v alfa obliko, vendar je okrog 30 % (ali 17,2 % računano na celotno maso vlakna) ostalo netransformiranega. V volni je okrog 20 % cikličnih amino kislin in cistina [14]. Te amino kisline ne morejo tvoriti ne alfa in ne beta kristalinične oblike. Ostane še od 22 % do 23 % materiala, ki ni identificiran ne v alfa in ne v beta kristalinični obliki. V procesu rasti je moral biti ta material v takšni konfiguracijski povezavi z molekulami, ki imajo v svoji sestavi ciklične amino kisline, da ni bilo pogojev za konfiguriranje beta kristalitov.

Proces raztezanja deluje drugače kot kompresija v procesu rasti. Omogoča “razplet” konglomeratov, ki jih tvorijo “navadne” linearne makromolekule in makromolekule, ki imajo v svoji sestavi določen delež aminokislinskih ostankov v ciklični obliki. Verjetno tem konglomeratom lahko pripišemo delež materiala, ki ga v literaturi imenujemo beta snopi [13]. V procesu raztezanja se takšni konglomerati razbijejo in smemo domnevati, da se linearne molekule iz teh konglomeratov združujejo v beta kristalite. Če je ta domneva pravilna, bi pri 120 % raztezka morali pridobiti še okrog 22 % pa do 30 % beta kristalitov. V našem eksperimentu, preglednica 12.1, stolpec (5), se je na novo tvorilo 22,1 % beta faze.

Naša osnovna domneva je, da se beta faza v procesu raztezanja ne tvori iz alfa faze, temveč iz dela konglomeratov (beta snopi) v procesu prestrukturiranja in razgradnje le-teh. Res je, da je možna alfa – beta transformacija v coni D v primeru zagrevanje materiala. Toda v tem primeru še ni končana keratinizacija in protofibrili imajo prosto gibanje v prostoru, kar pomeni, da niso prečno vpete s cistinskimi mostovi in je favorizirana razgradnja protofibrilov v sestavne dele – makromolekule. V procesu razgradnje volnenega vlakna, pa so prevelike prostorske ovire in ni pogojev za odvijanje sekundarnih zavojev alfa vijačnic. Odvijajo se le primarni zavoji. Če upoštevamo to dejstvo, potem dodatni delež beta faze izvira iz prej omenjenih konglomeratov molekul.

Na osnovi mehanizma rasti človeškega lasu [6], fazne transformacije makromole-

kul v filmu fibroina naravne svile [7], aminokislinske sestave volnenega vlakna [11] in naših eksperimentalnih rezultatov, lahko ugotovimo naslednjo približno fazno sestavo volnenega vlakna izraženega v odstotkih:

- alfe faze v neraztegnjenem volnenem vlaknu: 40 % ali nekaj manj;
- beta faze v neraztegnjenem volnenem vlaknu: 17,2 % ali nekaj več
- potencialni dodatni delež beta faze, ki ga je možno identificirati v procesu raztezanja, 22,1 %;
- količina materiala, ki ne tvori ne alfa in ne beta kristalinične faze: 20,7 %.

12.6 Namesto sklepov

Opisana teorija fazne strukture volne [2] se zdi realna in logična, vendar ima dve slabi točki. Prva je "9+2" protofibrila v mikrofibrilu in domnevna fazna kompenzacija tega mikrofibrila; druga šibka točka se nanaša na rentgenogram neraztegnjenega volnenega vlakna, ki ne kaže prisotnosti beta kristalinične faze; oziroma ekvatorialni maksimum na medravninski razdalji 0,465 nm je zamaskiran z difuznim prstanom na ravninski razdalji približno 0,46 nm. Podrobna analiza naših difraktogramov kaže, da je verjetno prisoten ta ekvatorialni maksimum, ki je karakterističen za beta kristalinično fazo.

12.7 Seznam oznak poglavja

Oznaka	Enota	Opis
I		skupna integralna intenziteta sipanja rentgenskih žarkov od kristaliničnih in amorfne faze v volni
I_a		integralna intenziteta amorfne faze
I_c		integralna intenziteta kristaliničnih faz

12.8 Literatura

[1] D. Jakšić. Analiza strukturnih sprememb v volnenem vlaknu med procesom raztezanja. *Tekstilec*, 11:383—388, 1990.

[2] D. Jakšić. Nova teorija fazne strukture volne. *Tekstilec*, 4–5:135–142, 1993.

[3] D. Jakšić. New approach to wool phase structure. In *Proceedings of the 9th International Wool Textile Research Conference, Biela*, pages 12–18, 1995.

[4] E. G. Bendit. Diameter variations of irregular fibers under different tensions. *Tex. Res. J.*, page 547, 1960.

[5] D. Jakšić and R. Jovanović. Effect of pressure on morphology and molecular wool structure. In *Proceedings. 5. Internationale Wolltextilforschungskonferenz Aachen.*, volume 2, pages 54–68, 1976.

[6] E. H. Mercer. *Keratin and Keratinization: an essay in molecular biology.* Perganion Press, Oxford, London, 1961.

[7] W. G. Crewther, L. M. Dowling, A. S. Inglis, L. G. Sparrow, P. M. Strike, and E. F. Woods. Wool microfibrils and intermediate filaments have common structural features. In *Tokio, 7th International Wool Textile Research Conference Proceedings.*, volume 1, pages 329–353, 1985.

[8] A. C. Burton and O. G. Edholm. *Man in a cold environment. Physiological and pathological effects of exposure to low temperatures.* Edward Arnold (Publishers) Ltd, London, 1955.

[9] W. G. Crewther, R. D. B. Fraser, F. G. Lennox, and H. Lindley. *Advances in Protein Chemistry*. ., 1965.

[10] C. Deng, L. Wang, and X. Wang. Diameter variations of irregular fibers under different tensions. *Fibers and Polymers*, 8:642–648, 2007.

[11] J. Marmur and P. Doty. Thermal renaturation of deoxyribonucleic acids. *Journal of Molecular Biology*, 3:585–594, 1961.

[12] A. R. B. Skertchly. Structural rheological phases in wool keratin. *Journal of the Textile Institute Transactions*, 55:154–161, 1964.

[13] B. M. Chapman. A mechanical model for wool and other keratin fibers. *Textile Research Journal*, 39:1102–1109, 1969.

[14] W. G. Crewther, L. M. Dowling, A. S. Inglis, L. G. Sparrow, P. M. Strike, and E. F. Woods. Wool microfibrils and intermediate filaments have common structural features. In *Tokio, 7th International Wool Textile Research Conference Proceedings.*, volume 1, pages 85–94, 1985.

POGLAVJE 13

Projektiranje tekstilij za opremo stanovanj in bivalnih prostorov

Kazalo

13.1 Uvod **260**
13.2 Tekstilije za posteljnino in za blazinjenje pohištva **260**
13.2.1 Posteljnina 260
13.2.1.1 Fiziološka ustreznost 260
13.2.1.2 Pranje 260
13.2.1.3 Vnetljivost in gorenje 261
13.2.1.4 Toplotna izolacija 261
13.2.1.5 Trajnost 261
13.2.2 Tekstilije za blazinjenje pohištva 262
13.2.2.1 Polnila 262
13.2.2.2 Tekstilije za prevleke 262
13.3 Zavese, stenske in talne obloge **263**
13.3.1 Zavese in stenske obloge 263
13.3.1.1 Zavese 263
13.3.1.2 Stenske obloge 263
13.3.2 Talne obloge 264
13.3.2.1 Odpornost proti mehaničnim vplivom 264
13.3.2.2 Obstojnost barv 265
13.3.2.3 Udobnost pri hoji 265
13.3.2.4 Akustične lastnosti 265
13.3.2.5 Termične lastnosti 266
13.3.2.6 Umazanje in vzdrževanje preprog 266
13.3.2.7 Elektrostatične lastnosti 268
13.3.2.8 Dimenzijska stabilnost 269

13.3.2.9 Sprememba strukture in površinskega videza 270
13.4 Seznam oznak poglavja **270**
13.5 Literatura **270**

13.1 Uvod

Tekstilije za opremo stanovanj in bivalnih prostorov zajemajo zelo široko področje (spekter) tekstilij, predvsem tkanin in v nekoliko manjšem obsegu tudi področje vlaknin ter pletenin. Tu mislimo predvsem na tekstilije za blazinjenje pohištva, za blazinjenje avtobusov, vlakov, letal in drugih prevoznih sredstev, nadalje dekorativne tkanine za zavese, stenske in talne obloge, preproge itd.

13.2 Tekstilije za posteljnino in za blazinjenje pohištva

Ti dve skupini tekstilij imata različno namembnost. Iz tega sledi, da bosta imeli tudi različno rangiranje pomembnosti posameznih parametrov kakovosti. Najprej si bomo ogledali tekstilije za posteljnino in potem še tekstilije za blazinjenje pohištva. Pri tem ne mislimo samo na pohištvo v stanovanjih in javnih prostorih, temveč tudi na blazinjenje posameznih delov notranje opreme za prometna sredstva (avtomobili, avtobusi, vlaki, ladje, letala in dr.).

13.2.1 Posteljnina

Pri projektiranju posteljnine moramo predvsem upoštevati naslednje faktorje: fiziološko podobnost, lahko čiščenje, odpornost proti gorenju, termoizolacijsko vrednost, trajnost ipd.

13.2.1.1 Fiziološka ustreznost

Posteljnina v prvi vrsti ne sme dražiti kože. To velja predvsem za posteljnino; ki je v neposrednem stiku s subjektom (posteljno perilo). Morebitnemu draženju kože se v zadostni meri izognemo z uporabo primerne pižame. Toda ne glede na pižamo mora biti posteljno perilo dovolj prepustno za pline in vodno paro. V nasprotnem primeru bi se lahko del izhlapelega znoja začel kondenzirati, kar bi bilo vsekakor zelo neprimerno za dobro počutje oziroma spanje. Poleg tega bi se lahko na površini kože sčasoma nabrala prevelika količina ogljikovega dioksida, ki poveča potenje in tudi draži kožo.

Spodnji del – ležišče (posteljni vložek) in blazina morata omogočiti ugodno lego telesa in normalno kroženje krvi. Pri tem je marsikaj odvisno od lege telesa. Ker večina ljudi spi na boku, lahko to lego vzamemo kot osnovno in po njej določimo višino vložka in blazine. Konstrukcija vložka mora biti taka, da se ne deformira, tudi če teža subjekta presega 100 kg. Takšne lastnosti ima moderni vložek “jogi”.

13.2.1.2 Pranje

V principu posteljno perilo prejo. Pri tem je pomembno, da se ti deli posteljnine lahko operejo. Z energetskega stališča je ugodno, če zadostuje pranje pri relativno nizkih temperaturah (40 °C do 60 °C). V posameznih primerih to ni mogoče (bolnišnice) in je zaradi dezinfekcije, krvi in drugih snovi nujno prati pri 95 °C. V teh primerih je najbolj ugodno, če je posteljno perilo izdelano iz bombaža. V drugih primerih se lahko uporabi

mešanica bombaža in kemičnih vlaken (PES, PA ipd.), toda bombažnih vlaken bi moralo biti vsaj 30 %.

13.2.1.3 Vnetljivost in gorenje

Tekstilni izdelki dobro gorijo; izjema so izdelki iz volnenih vlaken. Torej lahko rečemo, da so tekstilije vnetljive. To velja tudi za posteljnino, posebno za posteljno perilo in blazine. Ker v primeru zažiga posteljnine niso v nevarnosti le materialne dobrine, ampak tudi človeška življenja; so nekatere države predpisale, da mora biti v javnih objektih (hoteli, bolnišnice ipd.) posteljnina nevnetljiva. Nevnetljivost se doseže z impregnacijo tkanin z različnimi sredstvi, ki zmanjšajo gorljivost. Pri tem se zmanjša fiziološka podobnost takšnega izdelka. Poleg tega je težko doseči permanentno negorljivost, posebno pri predmetih, ki se pogosto prejo, kot je posteljno perilo. Zaradi tega slonijo moderne tehnološke rešitve na vgraditvi komponent, ki zavirajo gorenje, v talino ali raztopino mase, iz katere se izdelujejo kemična vlakna. Pri naravnih vlaknih pa se aktivirajo posamezne skupine, na katere se s kovalentnimi ali solnimi vezmi vežejo molekule impregniranega sredstva, ki zavira gorenje.

Pri projektiranju je potrebno upoštevati dejstvo, da je negorljivost posteljnine zaželena ali pa celo predpisana. Ponavadi se jemlje 25 % indeks kisika kot najnižja vrednost, kar pomeni, da se izdelek ne vžge in ne gori, če v atmosferi ni vsaj 25 % kisika.

13.2.1.4 Toplotna izolacija

Kot osnova za izračun potrebne vrednosti toplotne izolacije posteljnine se vzame proizvedena toplota osebe med spanjem, oziroma 168 $kJ/m^2.h$. Drugi parameter je temperatura okolja. Ta je v večini primerov 15 °C do 25 °C. Če pa se spi na prostem ali v šotoru v spalni vreči, ki ima vlogo posteljnine, je temperatura lahko nižja kot 15 °C.

Vsekakor kaže, da je ugodno, če so prekrivala večplastna (na primer več tanjših odej). Pernice niso priporočljive, ker se jih ne da prilagoditi večjim nihanjem temperature okolja. Pri preračunu potrebne vrednosti toplotne izolacije kompleta in toplotne vrednosti toplotne izolacije posameznih plasti, je nujno upoštevati dejanske debeline posameznih delov posteljnine, ki se lahko spreminjajo zaradi pritiska, ki ga povzroča oseba. To velja posebej za spalno vrečo. Poleg tega morajo biti prekrivala voljna, tako da se prilagodijo legi telesa. Dimenzije prekrival pa morajo omogočiti dobro tesnjenje okoli telesa. V nasprotnem primeru se lahko izkaže ves termodinamični izračun kot nerealen zaradi prostega kroženja okoliškega zraka med subjektom in pokrivalom. Pri tem gre v okolje več toplote, kot kažejo izračuni.

13.2.1.5 Trajnost

Ta parameter ni dominanten v relativno bogati družbi. Pri nas pa ga še zmeraj ne moremo zanemariti. To nam kaže tudi reklama. Pri reklami za "jogi" vzmetnico se garantira celo 20-letna trajnost. Kvalitetne odeje trajajo precej manj, posteljno perilo pa najmanj, ker je izpostavljeno največjemu trenju in obrabi med spanjem. Poleg tega pa v procesu pranja nastanejo precejšnje poškodbe, ki se navadno pokažejo po večkratnem pranju.

Na splošno se pri projektiranju ne bomo preveč ozirali na trajnost, če se to eksplicitno ne zahteva. Ta zahteva je prisotna v vojski, kjer se mora predpisati trajnost zaradi količinskih norm in planiranja finančnih sredstev za obnavljanje posteljnine.

13.2.2 Tekstilije za blazinjenje pohištva

Tekstilije za blazinjenje pohištva in posameznih delov notranje opreme prometnih sredstev lahko delimo na dve osnovni skupini: vlaknine in razne vrste pen za polnjenje ter tkanine ali pletenine za prevleke.

13.2.2.1 Polnila

V novejšem času se za polnjenje uporabljajo predvsem sintetične pene, ki so precej elastične in kljub dolgotrajni obremenitvi ne izgubijo skoraj nič svoje elastičnosti. Sintetične pene je možno izdelovati v različnih debelinah in dimenzijah. Zaradi tega je zelo poenostavljeno oblikovanje posameznih delov pohištva, predvsem blazinjenih stolov, foteljev, kavčev ipd.

Sintetična pena ima precej praznih prostorov, izpolnjenih z zrakom, celo takrat, ko je stisnjena. Potemtakem ima pena relativno dobre termoizolacijske lastnosti. Pena se praktično ne obrabi, ker je "izolirana" s prekrivno tkanino. Trajnost pene je odvisna od hitrosti staranja. S staranjem je povezana tudi elastičnost, ki se s staranjem zmanjšuje. Problem nastopi, ko se pena zmoči. Sušenje je zelo počasno in pri tem lahko pride do poškodbe ogrodja oblazinjenega kosa pohištva ne glede na to, ali je iz lesa ali kovine.

13.2.2.2 Tekstilije za prevleke

Za prevleko uporabljamo predvsem tkanine, te pa morajo imeti določene lastnosti. Med te štejemo: stabilnost oblike, odpor proti deformaciji, odpor proti pilingu (svaljkanju), odpor proti drgnjenju, odpor proti umazaniji, estetski videz i dr. V novejšem času pa se uporabljajo tudi pletenine. Vendar te morajo biti elastične, oziroma zelo elastične deformacije, nikakor pa ne plastičnih. Stabilnost oblike in odpor proti deformaciji sta zelo podobni kategoriji. Ko govorimo o stalnosti oblike, mislimo pri tem, da se tkanina ne krči in ne razteza pod zunanjimi vplivi, oziroma da oblazinjeni predmet ne spremeni svojega videza zaradi spremembe dimenzij prekrivne tkanine (pletenine v ta namen bolj redko uporabljamo).

Dejansko spremembe dimenzij so posledica trajnih deformacij. To se pravi, da lahko dovolimo elastične in delno zelo elastične deformacije pod vplivom zunanjih sil, ne pa trajnih deformacij. Pri projektiranju upoštevamo le sile, ki se normalno pojavljajo v procesu uporabe pohištvenega predmeta, in to tako, kot se v resnici pojavljajo kot ciklične obremenitve.

Druga pomembna lastnost, ki jo moramo upoštevati pri projektiranju prekrivnih tkanin, je pojav pilinga (svaljkov). Če je tkanina nagnjena k tvorbi svaljkov, je praktično neuporabna za prekrivanje pohištva in drugih blazinjenih predmetov.

Tretja lastnost, ki jo moramo upoštevati pri tkaninah, namenjenih za prekrivanje pohištva, je odpornost proti drgnjenju. Za izdelavo teh tkanin moramo izbrati takšne surovine in konstrukcijo, da dosežemo čim večjo odpornost proti drgnjenju. To pa zaradi tega, ker so deli pohištva zelo dragi in tudi zamenjava tkanine ni poceni.

Četrta lastnost, ki jo moramo upoštevati pri projektiranju, je odpor proti umazaniji. Čiščenje prekrivne tkanine na blazinjenem pohištvu je zelo težavno. Zaradi tega je priporočljivo izbrati takšne surovine in konstrukcijo tkanine, ki kaže počasno umazanje. Vsekakor imajo prej naštete lastnosti prednost.

Še ena pomembna lastnost je estetski videz. Ta je odvisen od konstrukcije tkanine, ki se kaže v videzu njene površine in barvne harmonije tkanine. Pogosto se uporabljajo enobarvne tkanine. V tem primeru ni problem barvna harmonija, temveč učinek barve

na povprečnega kupca. Ta je na splošno odvisen od modnih tendenc ter od ujemanja barve s celotnim okoljem, v katerem je nameščen predmet pohištva ipd. Problem komponiranja barv pa je vsekakor treba posvetiti veliko pozornosti.

13.3 Zavese, stenske in talne obloge

Zavese in stenske obloge bi lahko dali v eno skupino tekstilij, talne obloge pa v drugo skupino. To pa predvsem zaradi načina uporabe, funkcije in delovanja okolja nanje v času uporabe.

13.3.1 Zavese in stenske obloge

13.3.1.1 Zavese

Zavese imajo estetsko in dekorativno namembnost. Poleg tega pa pogosto rabijo za zatemnitev in včasih za zmanjšanje hrupa. Takšnega širokega področja uporabnosti ne more pokriti en sam tip proizvoda. Zaradi tega se pogosto uporabljajo dvojne zavese. Ene lahke in porozne, ki so ponavadi prosojne, največkrat izdelane v sukljanji z različnimi ornamentnimi vzorci. Ta vrsta zaves mora zadovoljiti estetsko plat, se pravi, da mora vzorec oziroma videz zavese ugajati očesu povprečnega opazovalca. Zavesa mora biti dovolj težka, da lepo pada, mora biti odporna proti mečkanju in sončni svetlobi, mora se lahko prati in barve, če je obarvana, morajo biti obstojne proti sončni svetlobi. Glede stopnje prosojnosti pa so zahteve lahko zelo različne. Ponavadi se zahteva, da ta vrsta zaves prepusti v prostor dovolj sončne svetlobe. Temu primerno mora biti prilagojena konstrukcija pletenine, tkanine ali sukljanje, namenjene za zaveso.

Druga vrsta zaves (goste in težke zavese) je namenjena preprečevanju dostopa zunanje svetlobe v prostor, ali pa služi kot pregradna stena v določenem prostoru; na primer zavesa med odrom in prostorom za gledalce v gledališču ipd. Takšna zavesa mora imeti vse lastnosti prej omenjene zavese, če je obešena na oknih, razen prosojnosti. Glede prosojnosti morajo biti čim bolj neprosojne. Če takšna zavesa ni izpostavljena direktni sončni svetlobi, ni nujno, da so barve obstojne na svetlobo. Takšne zavese so pogostokrat enobarvne in le redko bele.

13.3.1.2 Stenske obloge

Stenske obloge ali stenske tapete so najpogosteje papirne ali plastične. Izjemoma se uporabljajo tudi stenske obloge iz tekstilnih vlaken. Takšne obloge so lahko tkane, pletene, taftane ali pa iz iglanih vlaknin. Najpogosteje se uporabljajo za zvočno izolacijo. Uporabljajo se tudi za dekoracijo panojev v galerijah ipd. Če se uporabljajo za dekorativne namene, so zahtevane lastnosti lahko zelo različne in so odvisne od presoje naročnika. Stenske obloge, ki so namenjene zmanjševanju hrupa in odmevov, morajo biti precej debele, goste in imeti morajo po možnosti hrapavo površino. Skratka, naj bodo čim bolj učinkovite pri dušenju hrupa in odmevov. Pri tem stenske obloge učinkujejo tudi kot termoizolacijska plast in kot estetski element. Z estetskega stališča je važna barva, vzorec in videz površine, kar je priporočljivo upoštevati pri konstrukciji stenske obloge. Da ne bi prišlo do vžiga stenskih oblog, ki prekrivajo vse stene je nujno stenske obloge izdelati iz slabo vnetljivih ali nevnetljivih vlaken, ali pa jih impregnirati proti gorljivosti. Posebno je nevarno, če so v oblogi prisotna vlakna poliakrilnitrilnega izvora, ki pri gorenju razvijajo strupene pline.

13.3.2 Talne obloge

Največji delež talnih oblog odpade na obloge iz tekstilnih vlaken, kot so preproge, iglane vlaknine, tafting obloge ali tekstilni ploski izdelek, prevlečeni s plastično maso. Ker se uporaba tekstilnih talnih oblog po obsegu precej hitro povečuje, bomo nekoliko natančneje obdelali lastnosti, ki jih moramo upoštevati pri konstrukciji talnih oblog, da bi le-te dosegle optimalno kvaliteto glede na pogoje uporabe.

13.3.2.1 Odpornost proti mehaničnim vplivom

Mehanični vplivi pridejo posebno do izraza pri talnih oblogah, ker se po njih stalno hodi. Vsa površina talne obloge navadno ni enakomerno izpostavljena mehaničnim vplivom. Če dobo trajanja, oziroma količino obrabljenosti, merimo po debelini preproge ali talne obloge, potem je mogoče povleči celo serijo izohips tako, da ostaja višina talne obloge na vsaki teh izohips enaka. Na površinah, po katerih se največ hodi, bo praviloma talna obloga najtanjša. Doba trajanja preproge ali talne obloge se torej ugotavlja glede na tisti del površine, ki je najbolj izpostavljen mehaničnim vplivom. Če pa se površina in debelina znatno spremeni samo na določenem odstotku skupne površine, je del izrabljene površine mogoče zamenjati; s tem se doba trajanja skupne površine tal oziroma talne obloge v povprečju zelo podaljša. Debelina preproge in talnih oblog se zmanjša zaradi plastične deformacije, ki nastane, ker na opazovano površino deluje pritisk, poleg tega pa se debelina zmanjša tudi zaradi drgnjenja. Med debelino preproge (talne obloge) in številom prehodov (hoje) obstaja naslednje relacija [1]:

$$d = k - m \log N \tag{13.1}$$

kjer so d debelina preproge, N število prehodov (hoje), čigar logaritem je potreben pri izračunu obrabe lasu preproge (zmanjšanje) debeline d, m smerni koeficient ragresijske krivulje, k debelina preproge pred uporabo.

Enačba velja za interval približno 10^3 do 10^5 prehodov v primeru omejitve ali kriterija, da je preproga (talna obloga) uporabna, dokler se njena debelina ne zmanjša do prvotne debeline spodnjega dela obloge, kateremu dodamo 0,4 mm [2]. Upoštevaje ta kriterij je mogoče na temelju praktičnega preučevanja ali preučevanja na ustreznem aparatu ugotoviti število prehodov med eksploatacijo. Da bo število prehodov čim realnejše, morajo biti pogoji preučevanja čim bližji dejanskim. Ko dobimo realno število prehodov, ni težko izračunati realnega časa trajanja preproge, s tem, da se oceni povprečno število prehodov v enem dnevu. Število prehodov med uporabo bo torej:

$$\log N_f = \frac{k - d + 0,04}{m} \tag{13.2}$$

kjer so k debelina preproge pred uporabo (ali pred preučevanjem), m smerni koeficient regresijske krivulje, d začetna debelina spodnje plasti talne obloge ali preproge, N_f število možnih prehodov preko opazovane površine preproge (talne obloge) med uporabo.

Če upoštevamo, da je bila med uporabo nosilna plast preproge (spodnja plast) plastično deformirana (kar velja tudi za zgornjo plast, ki se drgne), lahko ugotovimo, da je zgornji kriterij zelo strog.

Koeficient korelacije regresijske krivulje enačbe v zgoraj omenjenem intervalu je večji od -0,98 tako, da je standardna napaka izračunanega časa uporabe manjša od 0,1 logaritemskih enot. To velja za volnene preproge in za preproge iz mešanic sintetičnih vlaken z volno [2] izdelanih iz 1/3 volne in 2/3 PAC vlaken, glede na preprogo iz čiste volne z enakimi konstrukcijskimi značilnostmi manjši samo za okrog 8 %, pri drugih sintetičnih vlaknih pa je razlika še manjša.

13.3.2.2 Obstojnost barv

Obstojnost barv pri preprogah in talnih oblogah na določen način vpliva na kvaliteto. Ko izbiramo teste za obstojnost barv, je treba upoštevati vse dejavnike, ki med uporabo vplivajo na spremembo barv. Raziskovanja [3] so pokazala, da ni potrebno testirati obstojnosti barv glede na kisline, ostanke alkalij, toploto, redukcijske agense in urin; treba pa je testirati obstojnost barv glede na kuhinjsko sol, na čiščenje in vodo. Priporoča se testiranje obstojnosti barv proti soli, ker so nekatera barvila občutljiva za kuhinjsko sol, ta pa se v zimskem času lahko na talno oblogo prenese s podplati.

Metode za ugotavljanje obstojnosti barv na tekstilu so predpisane v standardih. Slovenskega standarda za ugotavljanje obstojnosti barv trenutno še nimamo. Priporoča se obstojnost barv proti svetlobi 6, sprejemljiva pa je tudi obstojnost 5, posebno v primerih, če talna obloga ni preveč izpostavljena sončni svetlobi. Druge obstojnosti se morajo gibati na ravni najmanj 3–4.

13.3.2.3 Udobnost pri hoji

Za preproge in talne obloge je uveden tako imenovani koncept "indeksa uporabnosti"[4], ki zajema udobnost pri hoji, akustično in termično udobnost ter zavarovanost za primere hoje. Te lastnosti so pri sedanji uporabi preprog in talnih oblog najvažnejše, a se pri preučevanju njihovih kvalitet le redko misli nanje. Plast, ki je izpostavljena drgnjenju, mora biti mehka, da lahko uduši delovanje udarcev, ki nastajajo pri hoji, pri obtežitvi pa mora imeti zelo visok modul na pritisk, da se preprečijo večje plastične deformacije. Pazljivo je bil analiziran vpliv hoje in je dognano, da se pri hitri hoji večji del telesne teže prenaša na peto v trenutku, ko noga udari ob tla; s tem se povečuje dinamična obtežitev na talno oblogo. Hitro hojo je mogoče primerjati s tovorom, težkim 80 kg, ki pade na talno oblogo s hitrostjo 0,5 m/s, počasno sprehajanje pa z 10 kg tovorom, ki se dotakne tal z enako hitrostjo. Preučevanje je pokazalo, da so igelne talne obloge primernejše za prostore, kjer prihaja do večjih obtežitev, medtem ko so tafting talne obloge z lasasto (rezano) plastjo, ki je izpostavljena drgnjenju, primerne za manjše obtežitve, kakršne so ponavadi v stanovanjskih prostorih.

Namesto da merimo udarec sile, je mnogo prikladneje meriti “efektivno delo pri drgnjenji plasti,” ki je rezultat pritiska, ki ga izzove obremenjenost na površini drgnjenje plasti. Efektivno delo je količnik dela pri kompresiji (produkt obremenitve in spremembe debeline talne obloge) ter povprečnega pritiska. Preučevanje efektivnega dela pri različnih pritiskih dokazuje, da imajo talne obloge z visokim lasnim delom drgnjenje plasti visok indeks udobnosti v lokacijah, kjer je obremenitev majhna, kot so na primer spalnice; v lokacijah z veliko obremenitvijo, kot so vhodne veže in dnevne sobe, pa imajo najvišji indeks udobnosti talne obloge z nizkim, gostim lasnim delom drgnjenje plasti. V teh primerih so zelo dobre tudi igelne talne obloge, pri katerih z večanjem obremenitve raste tudi udobnost hoje.

Raziskano je tudi, kako na indeks udobnosti vpliva nosilna plast talne obloge. V najenostavnejših meritvah je ugotovljeno, da potrebujemo za enako deformacijo pene in ekstrudirane koprene na spodnji strani nosilne plasti večje efektivno delo, kot za podlogo iz jute, in to pri vseh pritiskih.

13.3.2.4 Akustične lastnosti

Že dolgo je znano, da so preproge (ki istočasno nudijo še druge ugodnosti) za ta namen zelo primerne. Preproge in talne obloge zmanjšujejo jakost zvoka na tri različne načine.

Preproge in talne obloge izolirajo zvočne valove, ki nastanejo pri udarcu. Hoja, na primer, v veliki meri proizvaja zvok visoke frekvence. Preproga učinkuje tako, da isto količino energije transformira v mnogo sprejemljivejše nižje frekvence. Čim debelejša je preproga, tem boljše rezultate daje. Zmanjšujejo jakost zvoka, ki se prenaša skozi zrak. Zvok kateregakoli izvora dolgo traja v prostorih, ki imajo trde površine (plavalni bazeni, cerkve ipd.). Tudi sicer je za vse prostore značilno, da se zvok večkrat odbija, kar ima v manjših prostorih za posledico, da zvok traja dalj časa. Preproge in drugi materiali lahko skrajšajo trajanje zvoka v takih prostorih, na primer od dveh na pol sekunde.

Kontroliranje hrupa na površini se razlikuje od izolacije zvoka, ki nastane kot posledica udarca, in to po tem, da na primer vinilna površina, ki je s spodnje strani prevlečena s peno, lahko prav tako kot preproga zmanjša zvočnost, ki nastane ob udarcu, poleg tega pa še dopušča, da se koraki slišijo kot serija ločenih udarcev slabe jakosti [5].

Načelo za proučevanje zvočne prepustnosti pri določenem materialu je v tem, da se najprej meri prepustnost golih tal (če se meri zvočna prepustnost med nadstropji), nato prepustnost golih tal skupaj z materialom, ki ga preučujemo (preproga ali pod). Zvočna prepustnost se meri v odvisnosti od frekvence v razponu od 100 Hz do preko 3000 Hz, kar je odvisno od tega, kateri indeks uporabljamo. S standardi je navadno predpisana krivulja zvočne prepustnosti, glede na frekvenco in namen materiala, ki ga preučujemo. Zadovoljuje material, ki ima v predpisanih pogojih eksperimenta pri določeni frekvenci (je zaželeno, da pri vseh frekvencah) nižjo prepustnost zvoka, izraženo v decibelih, kot je s standardom predpisana vrednost. Preučevanja zvočne prepustnosti pri talni oblogi, debeli okrog 2 cm, ki je v celoti izdelana iz polipropilena [6] in izmerjena po DIN 52210, dokazujejo, da je njena zvočna prepustnost za 6 decibelov manjša, kot je zgornja dovoljena meja zvočne prepustnosti pri 500 Hz po DIN 4109.

13.3.2.5 Termične lastnosti

Ena najvažnejših termičnih lastnosti je vnetljivost. Preproge in talne obloge morajo biti težko vnetljive. Za težko vnetljiv velja tisti material, ki se ob predpisanem alkoholnem plamenu (DIN 51960) ne vname, in potem, ko plamen ugasne, tudi več ne gori in ne tli; medtem ko je vnetljiv tisti material, ki v enakih pogojih gori s plamenom ali še nadalje tli, potem ko je alkohol že povsem izgorel.

Požar v stanovanjskih in javnih zgradbah nastane najpogosteje zaradi ne ugasnjenih cigaretnih ogorkov. Zaradi tega so za preučevanje odpornosti proti cigaretnemu ognju predpisani posebni standardi (na primer DIN 51961). V zadnjem času se problem vnetljivosti raziskuje na zelo širokem področju, kot rezultat teh raziskav pa je patentirana vrsta postopkov za obdelavo tekstila proti vnetljivosti.

Druga važna termična lastnost preprog in talnih oblog je toplotna izolacija. Zajeta je že v indeksu udobnosti kot toplotna udobnost. Stopnja toplotne izolacije, ki jo daje talna obloga, pride predvsem do izraza v tistih prostorih, kjer se tla ne ogrevajo niti posredno niti neposredno. Koeficient toplotne prevodnosti se pri talnih oblogah giblje med 0,13 kJ/m.h.°C in 0,21 kJ/m.h.°C, najpogosteje je okoli 0,17 kJ/m.h.°C. Za ilustracijo naj navedemo, da se pri razliki med notranjo in zunanjo temperaturo, ki znaša 30 °C, skozi 10 cm debela hrastova tla izgubi vsako uro 252 kJ/m^2.h, če pa se tla prekrijejo z 2 cm debelo PP oblogo, znaša izguba samo 126 kJ/m^2.h.

13.3.2.6 Umazanje in vzdrževanje preprog

Hitrost umazanja in vzdrževanje preprog in talnih oblog je največjega pomena. Preproge in talne obloge, ki so izdelane iz volne, imajo z vidika vizualnega dojemanja sprememb

najmanjšo hitrost umazanja. Nato hitrost umazanja raste od PA preko PES, največja pa je med sintetičnimi vlakni pri PAN. Umazanost, oziroma stopnja umazanosti, se meri po spremembi videza površine talne obloge, oziroma njene barve s kolormetrijskimi metodami in to v intervalih od $2{\cdot}10^4$ do 10^5 prehodov. Pri volnenih preprogah je v enakih pogojih izmerjena približno petkrat manjša sprememba kot pri PAN [7], pri tafting preprogah z zankami pa je umazanost za 10 % do 20 % večji kot pri preprogah z lasasto površino.

Z volnene preproge je mogoče s pranjem odstraniti celo do 70 % umazanije, pri PA in njegovih mešanicah pa le 40 %, pri PES okrog 30 %, pri PAN pa celo pod 20 % [7]. Za merjenje dejanskih količin umazanije v tekstilnih proizvodih obstaja več metod; dobljene vrednosti niso v skladu z vizualno oceno [8]. To neskladje je posledica odvisnosti stopnje umazanosti od optičnih lastnosti vlaken [9, 10, 11], od konstrukcije preje [9, 11, 12] ter od barve opazovanega tekstilnega proizvoda [13]. Mnogo boljšo skladnost z vizualnim opažanjem, koeficient korelacije je celo nad 0,86 [7], dobimo z merjenjem refleksije na aparatu Elruepho, na katerem se koeficienti refleksije X, Y, Z ugotovijo z ustreznimi filtri. Na osnovi spremembe teh koeficientov se sprememba barve izračuna po enačbi:

$$\Delta C = \sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2 + (\Delta Z)^2} \tag{13.3}$$

kjer so: ΔX, ΔY in ΔZ refleksije (barve), to je razlike vrednosti pred umazanjem in po njem.

Stopnja umazanosti se izračuna tako, da se sprememba obarvanja (barve) deli s spremembo barve vzorca iz serije raziskanih vzorcev, katerih barva se je najmanj spremenila, nato pa se dobljeni rezultat pomnoži s 100, da dobimo spremembo v odstotkih. Ta postopek uporabljamo v primerih, kadar primerjamo talne obloge in preproge, ki se med seboj razlikujejo po surovinski sestavi in (ali) po konstrukcijskih karakteristikah. Torej bo imel vzorec, pri katerem se je barva najmanj spremenila, po dogovoru 100 % umazanost, pri drugih pa bo stopnja umazanosti nad 100 %, enačba (13.4). Stopnja umazanosti v %:

$$C(\%) = 100\frac{\mathrm{d}C_x}{\mathrm{d}C} \tag{13.4}$$

kjer sta $\mathrm{d}C$ najmanjša sprememba barve pri enem od opazovanih vzorcev (služi kot etalon za oceno relativne spremembe barve), $\mathrm{d}C_x$ sprememba barve pri enem od opazovanih vzorcev (z izjemo vzorca, ki služi kot etalon); $x = 1, 2, 3 \ldots n-1$ (v primeru, da preizkušamo skupno n vzorcev).

Analogno z enačbo (13.4) se lahko meri tudi odstotek s pranjem odstranjene umazanije, in tega izračunamo po enačbi (13.5). Količina pri pranju odstranjene umazanije K v %:

$$K(\%) = \frac{\mathrm{d}C_x}{\mathrm{d}C_p} \tag{13.5}$$

kjer so $K(\%)$ % med pranjem odstranjene umazanije, $\mathrm{d}C_r$ sprememba barve po pranju, $\mathrm{d}C_p$ sprememba barve pred pranjem.

Spremembe se nanašajo na neki določen etalon (predloga), ki je lahko tudi nov vzorec, če opazujemo spremembo barve enega samega artikla v odvisnosti od časa in pogojev uporabe. Kako se bodo umazale mešanice, je mogoče dobro predvideti glede na to, kako se umažejo njihove komponente. Različno umazanje raznih vrst vlaken je odvisno verjetno od fizikalnih in morfoloških lastnosti ter od kemične strukture. Stopnjo umazanosti večajo: hidrofobnost vlaken, elektrostatični naboj, vdolbine, brazde, razpoke,

luknje (praznine) in svaljki (piling) na površini vlaken ter hrapavost površine vlaken nasploh.

Po drugi strani pa težnjo po umazanju zmanjšujejo: hidrofilna narava vlaken in povečanje vsebine vlage, gladka površina vlaken ter okrogla oblika prečnega preseka vlaken. Stopnja umazanosti je očitno manjša, če imajo vlakna visok koeficient svetlobne refleksije. Torej bo stopnja umazanosti vlaken odvisna od prevladujočega vpliva posameznih dejavnikov, ki vplivajo na večanje ali zmanjšanje umazanosti. Relativno majhno umazanje volnenih vlaken glede na sintetična vlakna je mogoče pojasnjevati s hidrofilnim značajem – večjo količino vlage glede na druga vlakna in luskinami, ki lahko prekrijejo umazanijo. Barva preproge lahko prikrije umazanijo ali pa jo poudari. Bele in svetlo obarvane preproge se hitro umažejo. Tudi atmosferski pogoji lahko vplivajo na hitrost umazanja, oziroma na stopnjo umazanosti. Če je temperatura tal (preproge) nižja od temperature zraka, kar se dogaja v neposredni bližini radiatorjev in pod njimi, bo umazanija padala na preprogo zaradi večje energije molekul v zraku [13].

Če je na vlaknih večja količina olja, se bo umazanija "lepila" na vlakna. Če se preproge ali talne obloge obdelajo s katerimkoli sredstvom, ki odbija vodo, (silikoni, parafin, vosek idr.), se bo nagnjenost stopnje umazanosti povečala [13, 14]. Po drugi strani pa lahko s prekrivanjem neenakomernih – hrapavih mest na površini vlaken s pomočjo gladkega trdnega filma preprečimo, da bi se umazanija nabirala na hrapavih mestih, poveča pa se tudi koeficient refleksije vlaken [13]. Sredstva za pranje morajo imeti take sestavine (oziroma hidrofobne in hidrofilne dele), ki po pranju ne bodo povečevale nagnjenost k umazanosti preprog ali talnih oblog glede na nagnjenost k umazanosti pred pranjem.

13.3.2.7 Elektrostatične lastnosti

Pogosto se zdi, zlasti pri obleki, da sta umazanje in statična elektrika tesno povezani, ker obstaja mnenje, da se del umazanije na obleki veže preko statične elektrike. Vendar ni jasnega dokaza, da bi statična elektrika imela velik pomen pri umazanju preproge. Problem neustreznih elektrostatičnih lastnosti je verjetno v tem, da se oseba, ki gre preko preproge, naelektri in pri praznjenju skozi prevodnik občuti neprijeten udarec.

Naboj nastane, kadar se pri hoji podplat loči od preproge – talne obloge. Ta naboj se z indukcijo prenaša na telo osebe, ki hodi po preprogi. Količina naboja je odvisna od relativnega položaja podplata glede na material, s katerim so prekrita tla, od električnih lastnosti osebe, ki hodi, od hitrosti hoje, od razmaka med osebo in zidom ter od hitrosti, s katero se naboj odvaja. Ljudje so različno občutljivi za električne udarce; najmanjša napetost, pri kateri se občuti udarec, se giblje med 2 kV do 3 kV.

Kaže, da se pri vseh vlaknih z izjemo viskoze pojavlja problem statične elektrike, če je relativna vlaga manjša od 40 %. Čeprav povečanje relativne vlage veča osebno ugodje, je glede pojava statične elektrike ceneje uporabiti antistatično sredstvo kot instalirati drage klimatske naprave.

Pri merjenju elektrostatičnih lastnosti preproge (talne obloge) obstajajo določeni problemi. Izmerjeno napetost na telesu preučevane osebe je treba skrbno interpretirati, ker različni materiali za podplate dajejo različne rezultate. Po drugi strani vrednosti upora na površini preproge in normalno na površino preproge, ki jih lahko merimo, niso v korelaciji z napetostjo na telesu osebe, ki hodi po preprogi – talni oblogi. Rezultati, ki jih dobimo s frikcijskimi aparati [15], ki posnemajo trenje materiala podplatov ob preprogo dokazujejo, da surovinski sestav preproge in material, iz katerih so narejeni podplati, vplivata na količino nastale statične elektrike. Konstrukcija preproge je pri

tem manjšega pomena. Elektrostatične lastnosti preproge lahko popravimo s tem, da v plast, ki je izpostavljena drgnjenju, vgradimo metalna ali metalizirana vlakna, tako da se na spodnjo stran nosilne plasti nanese prevodni lateks.

Očitno je, da ni dovolj, če naboj odvedemo s površine drgnjenje plasti, temveč se mora le-ta zgubiti v horizontalni ravnini (v tleh). Za izboljšanje elektrostatičnih lastnosti preprog – talnih oblog se lahko uporabi mešanica, pri kateri ima ena komponenta pozitiven, druga pa negativen naboj in tako dobimo preprogo brez elektrostatičnega naboja.

V novejšem času se je razvila vrsta postopkov [16] za zmanjšanje elektrostatičnega naboja. Mnoga antistatična sredstva in postopki so opisani v reklamnih publikacijah proizvajalcev [17].

Preglednica 13.1 prikazuje rezultate raziskovanja elektrostatičnega naboja pri osebi, ki nosi različne podplate in hodi po različnih preprogah – talnih oblogah [18]. Osebo najprej razelektrijo, potem ta napravi po preprogi 16 korakov in se nato dotakne mesta na elektrometru, ki meri naboj. To se ponovi trikrat, glej preglednico 13.1, pri 35 % relativne vlage in 27 °C.

Preglednica 13.1: Naboj, ki nastane pri osebi pri njeni hoji po preprogi. [18]

	Naboj, ki je nastal na osebi, 10^{-7} kulonov					
Vrsta obutve	Volna	PP	Najlon	Najlon z anti-statikom	Najlon z antistatikom in gumijasto podlago	PAN
Usnjen podplat in	-4,0 SS	+1,0	-1,6	-0,1	-1,7	+0,1
pete, šivane in	-3,3 S	+1,0	-1,3	-0,1	-1,2	+0,2
podkovanje	-3,2 S	+0,8	-1,0	-0,1	-1,1	+0,3
Podplat in poete iz	-3,0 S	+0,8	-2,6 S	+0,2	-2,1	-2,0
rebraste gume, gumijasti	-3,8 S	+0,8	-1,7	+0,1	-1,6	-1,2
škornji za puščavo	-3,0 S	+0,8	-2,0	0,0	-2,0	-1,8
Podplat in pete	-4,2 S	+1,5	-5,0 SS	-0,2	-3,0	+1,0
iz rebraste gume	-3,8 S	+0,9	-3,5	0,0	-1,8	+0,5
Usnjen plašč in	-4,0 SS	+1,0	-2,5 S	-0,1	-1,4	0,0
pete, lepljene	-4,5 SS	+1,0	-2,1	-0,1	-1,1	0,0
in šivane	-4,8 SS	+1,2	-1,8	0,0	-0,8	+0,1
Podplat in pete	-3,7	+1,9	-1,6	-0,1	-1,2	+0,3
iz rebraste gume	-3,6 S	+1,8	-2,1	+0,1	-1,4	+0,4

13.3.2.8 Dimenzijska stabilnost

Preproge – talne obloge se lahko deformirajo zaradi sil, ki delujejo med hojo. Te deformacije so navadno v veliki meri reverzibilne. Dimenzije se spreminjajo tudi zaradi porasta relativne vlage, vendar so te spremembe skoraj v celoti reverzibilne. Pri nekaterih vrstah preprog – talnih oblog se lahko pojavi reverzibilno skrčenje, in to v primeru, če se ovlažijo z vodo; to je posebno izrazito pri preprogah – talnih oblogah, ki vsebujejo volno.

Tkane preproge – talne obloge imajo navadno zadovoljivo dimenzijsko stabilnost. Tafting in igelne preproge – talne obloge imajo nekoliko slabšo dimenzijsko stabilnost; vendar tehnologija pri izdelovanju preprog – talnih oblog omogoča, da se doseže dimenzijska stabilnost, ki v največ primerih ustreza praktičnim potrebam in predpisanim standardom.

13.3.2.9 Sprememba strukture in površinskega videza

Sprememba strukture in površinskega videza lahko zelo negativno vpliva na estetski videz preproge – talne obloge. To pride predvsem do izraza pri preprogah – talnih oblogah z lasasto plastjo, ki je izpostavljena drgnjenju, še posebno, če je lasasti del visok. Trajne deformacije na tej plasti nastanejo zaradi prevelike obremenitve in drugih fizičnih ter kemičnih vplivov (visoka temperatura, mehanske poškodbe, zmanjšanje višine lasastega dela na posameznih mestih, posipanje raznih substanc, ki lahko vplivajo na degradacijo vlakna, spremembo nianse ali tona barve ipd.). Tudi svaljki lahko negativno vplivajo na videz in tudi na estetski vtis površine preproge – talne obloge. Zaradi vsega tega mora proizvajalec pri izdelavi preprog – talnih oblog računati s pogoji uporabe in temu ustrezno najti najboljšo rešitev glede izbora ustrezne surovine in konstrukcijo preprog – talnih oblog.

13.4 Seznam oznak poglavja

Oznaka	Enota	Opis
C	%	stopnja umazanosti
ΔC	%	sprememba barve zaradi umazanosti
$\mathrm{d}C$		najmanjša sprememba barve vzorca
$\mathrm{d}C_p$		sprememba barve pred pranjem
$\mathrm{d}C_r$		sprememba barve po pranju
$\mathrm{d}C_x$		najmanjša sprememba barve vzorca, ki ne služi kot etalon
K	%	delež med pranjem odstarnjene umazanije
ΔX	%	refleksija (barva), razlike vrednosti pred umazanjem in po njem
ΔY	%	refleksija (barva), razlike vrednosti pred umazanjem in po njem
ΔZ	%	refleksija (barva), razlike vrednosti pred umazanjem in po njem

13.5 Literatura

[1] G.E. Cusick and S. R. K. Dawber. Loss of thickness of carpets in floor trials. *Journal of the Textile Institute Transactions*, 55(10):T531–T536, 1964.

[2] W. S. Simpson, R. L. Bratt, and K. K. Noonan. The wear performance of carpets made from wool containing polymers. *The Journal of The Textile Institute*, 64(8):449–453, 1973.

[3] R. S. Asquith and R. S. Brooke. Yellowing of wool keratin on exposure to ultraviolet radiation. *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, 84(3):159–165, 1968.

[4] W. Herzog. The role of wool carpets in controlling indoor air. *The Textile Institute and Industry*, 9:153–157, 1971.

[5] F. Holy, Z. Kavček, and V. Teodoris. Review of the early miocene mastixioid flora of the kristina mine at hrádek nad nisou in north bohemia (the czech republic). *Acta Musei Nationalis Pragae. Series B – Historia Naturalis*, 68(3–4):53–118, 2012.

[6] N. Nicolai and V. Schulze. Floor covering having a strong noise-reducing properties. *USPatent No.: US 7,279,214 B2*, 2007.

[7] L. Benisek. Service soiling of wool, man-made fibers, and blendet carpets. *Textile Research Journal*, 42(8):490–496, 1972.

[8] H. Hemmendinger and J. M. Lambert. The importance of chromaticity in the evaluation of whiteness. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 30(4):163–168, 1953.

[9] G. C. East and J. P. Ferguson. The optical properties of fabrics and their relation to soiling. *The Journal of The Textile Institute*, 60(10):441–442, 1969.

[10] D. B. Judd. *Color in business, science and industry.* Wiley, New York, 1967.

[11] A. S. Weatherburn and C. H. Bayley. The soilimg characteristics of textile fibers. *Textile Research Journal*, 25(6):579–558, 1955.

[12] M. B. Mann and T. H. Morton. Optical studies: I–relation of colour to the apparent soilability of textile materials. *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, 75(11):522–533, 1959.

[13] R. Hochreiter. Schmutzabweisende ausrüstung von textilien i. *Fette-Seifen-Anstrichmittel*, 68(1):31–41, 1966.

[14] P. A. Florio and E. P. Mersereau. Control of appearance changes due to soiling: the mechanism, measurement, and reduction of soiling changes in carpet during use. *Textile Research Journal*, 25(7):641–649, 1955.

[15] M. C. Geoghegan, E. Rivet, and C. P. Malone. Static control needs for carpets. *Textile Research Journal*, 46(5):367–371, 1976.

[16] L. From, W. G. Klein, and S. L. Fowler. Procedures for the design, analysis and auditing of static control flooring/footwear systems. In *Proceedings Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium*, pages 33–48, 1997.

[17] K. Lindner. Die ursachen und die verhütung des anschmutzens von textilien. *Fette, Seifen, Anstrichmittel*, 65(2):96–103, 1963.

[18] N. Wilson. Static behavior of carpets. *The Textile Institute and Industry*, August:32–33, 1972.

POGLAVJE 14

Projektiranje tekstilij za tehnične namene

Kazalo

14.1 Uvod **274**
14.2 Tekstilije za filtracijo **274**
14.3 Suha filtracija **274**
14.3.1 Teorija suhe filtracije 274
14.3.2 Teorija filtracije na enem vlaknu 274
14.3.3 Pomanjkljivosti teorije filtracije na enem vlaknu 276
14.3.4 Gravitacijski učinek 279
14.3.5 Vztrajnostni učinek 279
14.3.6 Filtracija v tokovnici 281
14.3.7 Učinkovitost difuzije 281
14.3.8 Projektiranje tekstilije za suho filtracijo 281
14.3.9 Poroznost 282
14.3.10 Prostornina 282
14.3.11 Odpor proti deformacijam 283
14.3.12 Cena filtra 283
14.3.13 Posebne lastnosti 284
14.4 Mokra filtracija **284**
14.4.1 Področja mokre filtracije 284
14.4.2 Teorija mokre filtracije 285
14.4.2.1 Filtracija v tokovnici 286
14.4.2.2 Filtracija zaradi vztrajnosti delcev 286
14.4.2.3 Filtracija delcev zaradi difuzije 287
14.4.2.4 Filtracija delcev, ki jo povzroča sedimentacija (gravitacija) 288
14.4.2.5 Hidrodinamični vpliv na hitrost filtracije 288
14.4.3 Kakovost filtrskega medija 289
14.5 Seznam oznak poglavja **290**
14.6 Literatura **291**

14.1 Uvod

Zaradi boljše preglednosti bomo posebej obravnavali različna tehnična področja uporabe, kot so: suha in mokra filtracija [1], razni objekti (šotori, skladišča s platneno streho, cerade (ponjave) za kamione ali zaščito ipd., transportni trakovi, tekstilije za zaščito proti balističnimi izstrelki, padala ipd. Naštetih pet področij tehnične uporabe tekstilij zajema največji del tekstilij, ki jih uporabljamo za tehnične namene. V to področje bi lahko uvrstili še gasilska oblačila, oblačila za zašito proti strupenimi plini, gasilske cevi, geotekstilije ipd. Ker pa je ta snov zelo obširna, bomo nekatera področja uporabe omenili le informativno. Nov pristop teoriji filtracije mikrobov in virusov v medicinski maski pa bolj natančno.

14.2 Tekstilije za filtracijo

Področje filtracije je zelo raznovrstno. Lahko ga delimo na dve osnovni vrsti: suho in mokro filtracijo. Obe sta zelo pomembni, in to iz dveh razlogov: ekološke zaščite okolja in uporabe v posameznih fazah različnih tehnoloških postopkov. Omejili se bomo le na filtracije, pri katerih je ploski tekstilni izdelek filtrski medij oziroma prepustni sloj, ki ima to lastnost, da loči posamezne delce določene velikosti od drugih delcev v opazovani zmesi ali pa loči trdo fazo od tekoče oziroma plinske faze. Če želimo projektirati, konstruirati in izdelati ploski tekstilni izdelek, namenjen za filtracijo v določenih okoliščinah, je nujno poznati vsaj osnove teorije filtracije kot tudi pogoje, katerim je izpostavljen tekstilni filter medij v uporabi. Najprej se bomo podrobneje seznanili s suho filtracijo, nato pa še z mokro filtracijo. Filtracijo mikrobov in virusov, kot tudi trdih delcev, ki se nahajajo v smogu, pa na koncu poglavja.

14.3 Suha filtracija

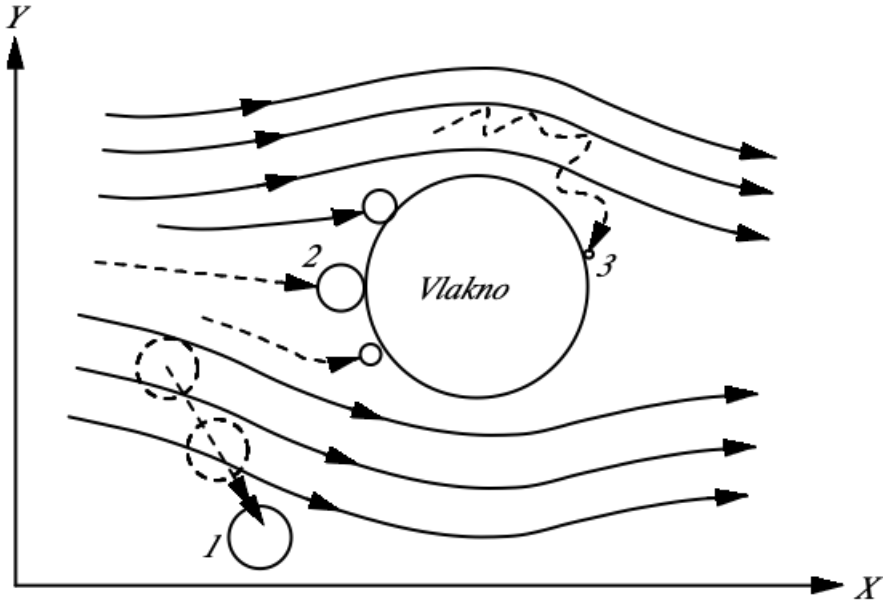
14.3.1 Teorija suhe filtracije

Teorija filtracije sloni na dognanjih o obnašanju zračnega toka, ki nosi trdne delce pri prehodu skozi tekstilni filter medij. Proces je praktično zelo težko matematično obdelati, če ne predpostavimo določene idealizacije glede lege vlaken v filtru.

Ena od teorija filtracije sloni na učinku filtracije, ki ga da izolirano vlakno, kot je to prikazano na sliki 14.1 in 14.2. Pri tem predpostavimo, da so druga vlakna dovolj oddaljena od opazovanega vlakna, oziroma da je razdalja med vlakni precej večja, kot je premer trdnih delcev, ki jih želimo filtrirati. Zaradi tega se ne upošteva vpliv sosednjih vlaken na obliko tokovnice zraka in izločanje delcev.

14.3.2 Teorija filtracije na enem vlaknu

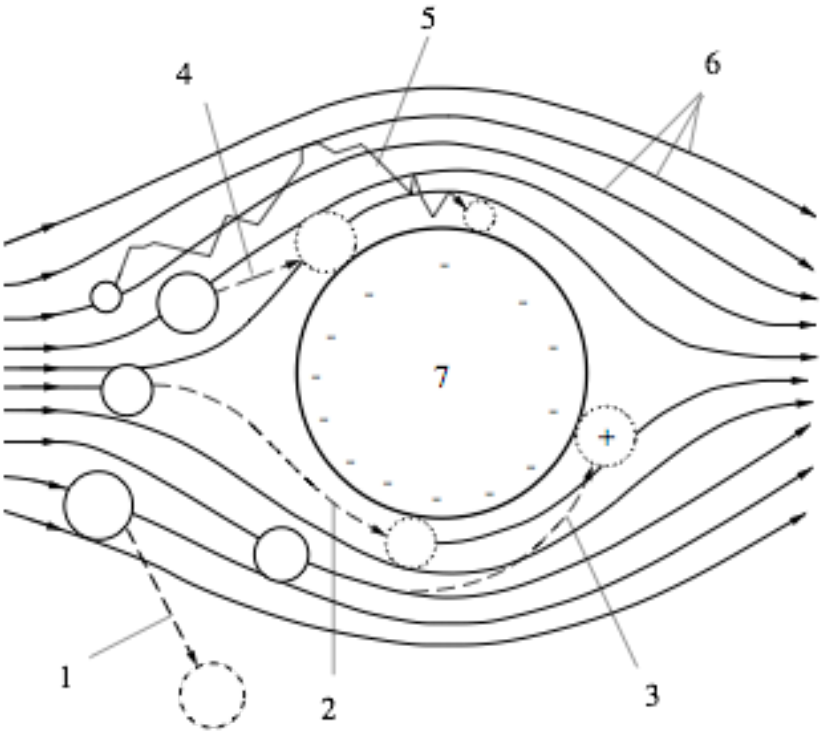
Bolj natančno si bomo ogledali le dve teoriji. Ena je Kuwabarajeve teorije pretočnega polja, slika 14.3. Ne glede na precej natančno razviti in prikazani matematični model, ne daje ta teorija dovolj racionalno razumno dogajanje pri filtraciji delcev. Saj je vse skupaj preveč idealizirano in ne sledi dejanskem dogajanju v procesu filtracije. Druga pa je teorija filtracije na enem vlaknu, ki je prikazana na sliki 14.1 in dopolnjena teorija slika 14.2 [1, 2, 3], pri kateri je negativno nabito vlakno vstavljeno v laminarno tokovnico. Na sliki 14.2 je prikazana tudi filtracija električno pozitivno nabitih delcev. Opisani so naslednji mehanizmi filtracije in trajektorije gibanja delcev:



Slika 14.1: Mehanizem filtracije na izoliranem vlaknu v filtrskem mediju. [2] Legenda: 1 – izločanje zaradi vztrajnosti delcev, 2 – izločanje v tokovnici zaradi adhezije med delci in površino vlakna, 3 – izločanje zaradi difuzije delcev v tokovnici.

- Filtracija zaradi gravitacije je uporabljena za največje in najtežje delce. Ta mehanizem filtracije je mogoče opazovati v zunanji plasti maske in je neuporabna za filtracijo mikrobov in virusov.
- Sesedanje delcev na površino vlakna, ki je posledica udara delca ob površino vlakna, ki ima vlogo dela stene kanala je splošno uporabno za več ali manj vse velikosti delcev. Na žalost, čim manjša je velikost delca, tem je večja verjetnost, da zračna tokovnica nese delec mimo površine kanala, ki je posledica laminarnega pretoka zračne tokovnice skozi kanal. V tem primeru je zanemarljiva vztrajnost v primerjavi z vplivom sil tokovnice na delec.
- Elektro filtracija je veljaven koncept. Toda ni uporaben v medicinski maski v tej varianti, ki jo tukaj obravnavamo.
- Vztrajnost delca lahko ima za posledico, da delec zapusti tokovnico, ko se ta giblje v bližini površine vlakna in se tako filtrira iz tokovnice. Predpostavljeno je, da se majhni delci (manjše kot 1,6 μm) gibljejo po zakonitosti difuzije tako, kot se gibljejo v mirujočem zraku (Brownovo gibanje) v dominantni smeri, ki jo ima smer zračne tokovnice.

Slika 14.2 na kateri je predstavljena dopolnjena teorija filtracije na enem vlaknu ima niz pomanjkljivosti, če jo primerjamo z vrednostmi parametrov poroznosti, ki smo jih dobili z Jakšićevo metodo ugotavljanja števila, velikosti in porazdelitve por v ploskih tekstilijah. Če opazujemo tokovnico pred razcepitvijo in po združitvijo, glede na lego puščic, bi sklepali, da je hitrost gibanja silnic v tokovnici izenačena. Zaradi cepitve, je največja dolžina silnic, ki so največ oddaljene od centra vlakna 7. Te so silnice obenem najbližje steni kanala, ki tukaj ni prikazana. Če upoštevamo dolžine silnic, so najdaljše tiste, ki so najbližje strani kanala. To pa je nesprejemljivo. Silnice so najhitrejše na centralni osi kanala in se hitrost silnic zmanjšuje proti stenam kanala. Gibanje zraka



Slika 14.2: Dopolnjena verzija klasična teorija filtracije delcev na enem vlaknu v primeru laminarnega pretoka zraka. [1, 2, 3] Legenda: 1 – filtracija delcev zaradi vpliva gravitacije (velja za težke delce); 2 – filtracija manjših delcev na površino vlakna, ko spremenijo svojo lokacijo s centralne ose tokovnice proti virtualni površini tokovnice, ki se ustvarja neposredno ob površini vlakna; 3 – elektro filtracija delcev, ki so pozitivno nabiti; 4 – filtracija delcev zaradi njihove vztrajnosti, ki ne omogoča spremembo smeri; 5 – filtracija zelo majhnih delcev zaradi difuzije; 6 – silnice zračne tokovnice; 7 – vlakno.

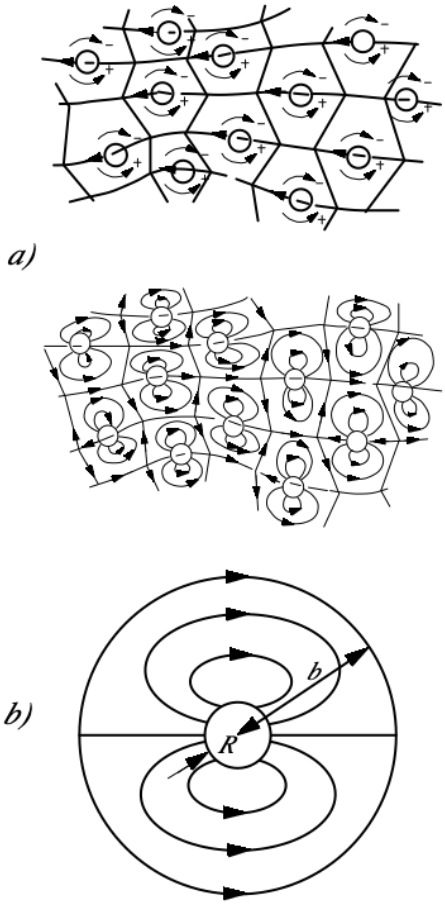
se zmanjša na nič v neposredni bližini stene kanala. To verjetno velja tudi za površino vlakna 7 na sliki 14.2.

Prikaz gibanja majhnega delca po trajektoriji 5 je nerealen. Takšna trajektorija bi bila sprejemljiva v mirnem zraku (difuzijsko gibanje po Brownovi zakonitosti). Vendar tukaj nastopi nedoločljivost hitrosti gibanja tokovnice. Preden se tokovnica cepi, zaradi prisotnosti vlakna 7 v kanalu, ima tokovnica največjo hitrost na osi kanala. Silnice, ki so prej bile na centralni osi tokovnice zgubljajo hitrost, ko se približujejo površini vlakna 7. Vsi delci rotirajo. Tukaj to ni prikazano. Ta rotacija, ko bomo pozneje videli, povzroča poseben efekt. Rotacijo pa povzroča sprememba hitrosti tokovnice v radialni smeri. Ne glede na število citatov, ta teorija ne vzdrži resnejšo znanstveno analizo.

14.3.3 Pomanjkljivosti teorije filtracije na enem vlaknu

Fluid teče skozi kanal, pa tudi okrog vlakna, ki je položeno pravokotno na smer kanala in ga seka na dva dela. Na sliki stene kanala niso prikazane, ker pač cela teorija bazira na enem samem vlaknu. Teorija je ilustrirana na sliki 14.1. Tokovnico deli vlakno in silnice, ki se gibljejo direktno okrog površine vlakna. Po prehodu področja v katerem se nahaja vlakno, se zopet združijo, ko so vlakno pustile za sabo.

Opisana situacija, ki se nanaša na filtracijo na enem vlaknu, je dejansko prisotna tudi



Slika 14.3: Osnova Kuwabarajeve teorije pretočnega polja. Legenda: a – cepitev tokovnic in ustvarjanje vrtinčnega polja, b – vrtinčno polje okrog posameznega vlakna.

pri filtraciji mikrobov in virusov v medicinski maski. Toda, v vlaknini so pore zelo slabo definirane. V vlaknini ni možno direktno slediti poteku kanala skozi katerega teče zrak. Vprašljiva je tudi uporaba diferencialnih enačb, ki se nanašajo na pretok zraka skozi dobro definirane pore.

Kratek vpogled v teorije filtracije, lahko podamo v naslednjih alinejah.

- Vlakna imajo vlogo mej pore pri vlakninah. Obstojajo votline med vlakni kjer se zrak ne giblje. Virtualna površina se formira med praznim prostorom in tokovnico ko se tokovnica giblje. Votline v kanalu (pori) v katerih nikoli ni znatnega pretoka, niso prikazane v teoriji filtracije na enem vlaknu.

- Teorija filtracije prikazuje Brownovo gibanje majhnih delcev z eno dominantno smerjo. za delce, ki so manjši kot 0,15 μm. Predpostavlja se,da se izloča na vlakno zaradi tega, ker jih iz tokovnice požene mehanizem difuzije. Lahko se pospeši gibanje in spremeni smer gibanja zaradi trka z večjim delcem v tokovnici ali zaradi vpliva silnic tokovnice. Trk z večjim delcem je viden. Nasprotno, model mehanike kontinuuma, ne podpira mehanizem filtracije, ki je baziran na Brownovem gibanju majhnih delcev v tokovnici. Brownovo gibanje majhnih delcev igra važno vlogo v votlinah, kjer je dominanten miren zrak.

- Teorija filtracije na enem vlaknu jemlje premer vlakna kot edino karakteristiko linearne meritve pri računanju Reynoldsovega števila. Prikazano je, da, kadar se

vzame v obzir maksimalni hidravlični premer pore, Reynoldsovo število je za eno velikostno število večje. Reynoldsovo število za tok tokovnice okrog objekta, je precej manjše, toda limit kjer začenja turbulentno gibanje zraka v tokovnici, je tudi precej manjše, kot pri pretoku tokovnice skozi cev oziroma kanal.

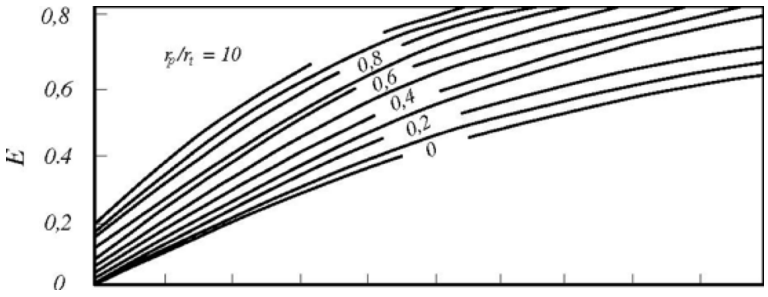
Na sliki 14.1 je ilustrirana teorija filtracije na enem vlaknu. Na sliki 14.2a pa dopolnjena filtracija pri čem je upoštevana filtracija delcev, ki so pozitivno nabiti. Vlakno pa ima negativen električni naboj. Teorija filtracije na enem vlaknu ima precej pomanjkljivosti. O teh bomo pozneje nekaj več povedali, ko bomo obdelali Jakšićevo teorijo filtracije virusov in mikrobov v medicinski maski. Pri filtraciji delcev iz odpadnih plinov, lahko ugotovimo nekaj dejstev kot sledi:

- Teorija filtracije na enem vlaknu je osnovana na predpostavki, da so vlakna vsa enaka in se na vseh dogajajo enake pojave.
- Delci prahu se obnašajo enako, obnašanje se razlikujejo le glede velikosti in s tem mase delca, ki ga želimo filtrirati.
- Dejansko se opisani primer pojavi, ko je vlakno v pravokotni legi glede na smer tokovnice in poro ter tudi tokovnico razdeli na dva dela.
- Kaj se dogaja na drugih lokacijah v pori, teorija ne pove ničesar.
- Delci, ki so manjši kot 0,5 μm so izpostavljeni Brownovem difuzijskem gibanju.
- Teorija ne upošteva dejstvo, da se tokovnica laminarno giblje v eni smeri.
- Glede na gibanje tokovnice, narisano gibanje majhnega delca 3 ni.realno.
- Delec se ne more gibati pravokotno na smer gibanja tokovnice, ali celo nekoliko nazaj.
- Tokovnica nima enakomerne hitrosti po celotni dolžini pore. To velja tudi za premer tokovnice.

Moderni koncept teorije filtracije sloni na Kuwabarajevem (tokovnem) polju [2]. Pred podstavlja se, da so vlakna v koaksialnem cilindru, kot je prikazano na sliki 14.3. Če je presek zunanjega cilindra pravilni enakostranični šesterokotnik, potem ti cilindri tvorijo mrežo, podobno satovju. Prostor med notranjim cilindrom (vlaknom) in zunanjim cilindrom (zamišljena meja med conami vpliva sosednjih vlaken na tokovnici) je polje, v katerem vlakno vpliva na spremembo smeri tokovnic v neposredni bližini. S tem tudi vpliva na poti trdnih delcev v tokovnici.

Na podlagi predpostavljene porazdelitve vlaken in stalnega polja tokovnic zraka okoli vlaken, slika 14.4, so izpeljane enačbe funkcije polja tokovnic in enačbi za radialno ter tangencialno hitrost tokovnic glede na vlakno. V teh enačbah je upoštevana hitrost tokovnic zraka, polmer prereza vlaken in polmer trdnih delcev prahu ter delež filter medija, ki je zaseden z vlakni.

Na podlagi enačbe funkcije polja tokovnic je možno izpeljati pod določenimi predpostavkami enačbe za izločanje delcev zaradi vpliva gravitacije (večji delci), za izločanje delcev v tokovnici (vztrajnostni učinek) na površino vlakna zaradi adhezijskih sil (delec v tokovnici gre relativno blizu površine vlakna – manjši delci) in enačbe za izločanje zelo majhnih delcev s pomočjo mehanizma difuzije. Pri tem se operira s parcialnimi diferencialnimi enačbami prve in druge stopnje, ki so zelo kompleksne in niso primerne za nivo, na katerem tukaj obravnavamo filtracijo. Zaradi tega se bomo omejili le na teorijo mehanizma filtracije, opazovanega na enem vlaknu, sliki 14.1 in 14.2.



Slika 14.4: Učinkovitost filtracije v odvisnosti od K in r_p/r_f pri Re = 0,2.

14.3.4 Gravitacijski učinek

Če je delec, ki ga želimo izločiti, relativno velik, na primer je polmer večji od 3 μm, bo imel večjo maso, kot jo je zmožna nositi zračna tokovnica, posebno če je hitrost tokovnice majhna. Takšen delec se bo izločil iz tokovnice, še preden doseže filtrski medij. Kako veliki delci se bodo izločali zaradi gravitacijskega učinka, je odvisno predvsem od hitrosti tokovnic zraka, od oblike polja tokovnic in od prevladujoče smeri tokovnic (vodoravno, navpično navzdol ali navzgor). Na splošno je hitrost tokovnic majhna, posebno če se želi doseči visoka učinkovitost filtracije. V tem primeru je lahko gravitacijski učinek izločanja delcev zelo izrazit.

14.3.5 Vztrajnostni učinek

Kot vidimo s slike 14.1, se cepi zračna tokovnica pred vlaknom. Pri tem spreminja smer gibanja. Del tokovnice gre ob spodnji in del ob zgornji površini vlakna. Tokovnica nosi s seboj številne trdne delce. Čim večja je masa delcev, tem težje, zaradi vztrajnosti, sledijo spremembi smeri tokovnice.

Pri opazovanih pogojih filtracije so v tokovnicah vsi delci trdne snovi, ki se niso izločili iz tokovnic zaradi gravitacijskega učinka. Če je relativna hitrost med zračno tokovnico in delcem majhna, potem lahko opišemo gibanje delca v točki (x, y) s pomočjo Stokesovega zakona.

$$m\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2} = 6\pi\eta r_p\left(\mu - \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\right) \tag{14.1}$$

$$m\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2} = 6\pi\eta r_p\left(\nu - \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\right) \tag{14.2}$$

kjer so m masa delca, t čas opazovanja, η koeficient viskoznosti zraka, μ in ν komponente relativnih hitrosti med delcem in tokovnico, r_p polmer delca.

Enačbi (14.1) in (14.2) kažeta, kako se spreminjajo komponente sil vztrajnosti delca (leva stran enačb) v odvisnosti od spremembe relativnih hitrosti v točki (x, y), ki leži na ravnini (X, Y). Ker je bolj ugodno operirati z brezdimenzijskimi parametri, lahko enačbi (14.1) in (14.2) transformiramo v brezdimenzijsko obliko s tem, da upoštevamo naslednje transformacije: $u_1 = u/U$, $v_1 = v/U$, $x_1 = x/r_f$, $Y_1 = y/r_f$ ter $t_1 = tU/r_f$. Pri tem je U hitrost zračne tokovnice daleč proč od opazovanega valja oziroma vlakna, ki je sestavni del tekstilnega filtra medija in r_f polmer opazovanega vlakna. Če upoštevamo te transformacije, dobimo:

$$K\frac{\mathrm{d}^2x_1}{\mathrm{d}t_1^2} + \frac{\mathrm{d}x_1}{\mathrm{d}t_1} = u_1 \tag{14.3}$$

$$K\frac{\mathrm{d}^2 y_1}{\mathrm{d}t_1^2} + \frac{\mathrm{d}y_1}{\mathrm{d}t_1} = v_1 \tag{14.4}$$

$$K = \frac{2\rho r_p^2 U}{9\eta r_f} \tag{14.5}$$

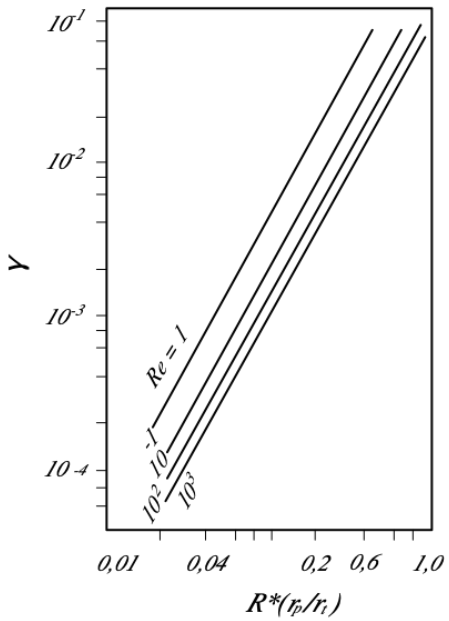
Rešitev enačb (14.3) in (14.4) lahko izrazimo v naslednji obliki (upoštevano je precejšnje število poenostavitev):

$$(x_1, y_1) = f\left(x_0, y_0, t_1 \frac{mU}{6\pi\eta r_p r_f}\right) \tag{14.6}$$

(x_l, y_l) nam pove lego delca v času t_1; x_0, y_0 pa v začetku opazovanja $t = 0$. Parameter vztrajnosti K je razmerje med oddaljenostjo delca in začetno hitrostjo U. Delec se bo gibal, dokler se ne bo sesedel na površino vlakna. Ta oddaljenost x = 1,230r2prU, pri temperaturi zraka 20 °C. Predvsem je zanimivo ugotoviti vpliv posameznih parametrov na učinkovitost filtracije E. Splošno enačbo učinkovitosti filtracije lahko napišemo v naslednji obliki:

$$E = f\left(K, Re, \frac{r_p}{r_f}\right) \tag{14.7}$$

Iz enačbe (14.7) je razvidno, da učinkovitost filtracije raste s povečanjem velikosti delcev in s povečanjem vrednosti parametra K, ki je sorazmeren hitrosti U in obratno sorazmeren premeru vlakna. Potemtakem se s povečanjem premera vlaken zmanjšuje vrednost parametra K in učinkovitost filtracije E. Na sliki 14.5 je prikazana učinkovitost filtracije v odvisnosti od K in r_p/r_f pri $Re = 0,2$.



Slika 14.5: Učinkovitost filtracije delcev iz tokovnic na površini izoliranega vlakna. [4]

14.3.6 Filtracija v tokovnici

Manjši delci, ki sledijo tokovnici, se lahko izločijo na površini vlakna le, če so v tistem delu tokovnice, ki gre neposredno ob površini vlakna. V tem primeru se delec izloči na površino zaradi delovanja adhezijskih sil. Poleg tega se hitrost tokovnice zmanjšuje, ko gremo od glavne osi tokovnice proti površini vlakna in je neposredno na površini vlakna hitrost tokovnice enaka nič. Površina naravnih vlaken je navadno precej hrapava. Zaradi tega se lahko pojavijo vrtinčni tokovi v bližini površine vlakna. Hitrost tokovnice je majhna, in bi na podlagi Reynoldsovega števila lahko sklepali, da je pretok zraka okoli opazovanega vlakna laminaren. Skratka, če površina vlaken, iz katerih je izdelan tekstilni filter, ni idealno gladka, temveč hrapava, se bo zaradi tega povečala učinkovitost filtracije iz tokovnice v primerjavi s teoretičnimi izračuni. Pri katerih je predpostavljeno, da je površina vlakna gladka. Če je $R = r_p/r_f$, lahko učinkovitost filtracije delcev iz tokovnice približno opišemo z naslednjo enačbo [3]:

$$E = \frac{2(1+R)}{2(2-\ln Re)} \ln(1+R) + \frac{1}{1+R} - (1+R) \tag{14.8}$$

Iz enačbe (14.8) vidimo, da učinkovitost filtracije delcev iz tokovnic raste s povečanjem R in Re. Ta odvisnost je ilustrirana na sliki 14.5.

14.3.7 Učinkovitost difuzije

Zelo majhni delci, manjši od 0,15 mikrometrov, se gibajo po Brownovem zakonu. Difuzijo delcev v zračni tokovnici cilindrične oblike s spremenljivo lokalno koncentracijo enako velikih delcev lahko opišemo z diferencialno parcialno enačbo drugega reda v cilindričnih koordinatah. V realnem sistemu delci niso uniformni in tokovnice niso cilindrične, ker imajo odprtine v tekstilnem filter mediju različno obliko in velikost prečnih prerezov, zaradi česar tudi hitrost tokovnic na vsej opazovani poti ni stalna. Zaradi tega bomo uporabili enačbo (14.9), ki kaže približno učinkovitost filtracije najmanjših delcev s pomočjo učinka difuzije [5]:

$$E = \frac{1,36}{\sqrt[3]{2(2-\ln Re)}} \sqrt[3]{\left(\frac{D}{v_0 r_f}\right)^2} \tag{14.9}$$

kjer so Re Reynoldsovo število, D koeficient difuzije in v_0 hitrost zraka v tokovnici, ki gre mimo opazovanega vlakna.

Iz enačbe (14.9) vidimo, da je učinkovitost izločanja delcev s pomočjo učinka difuzije sorazmerna z $v_o^{-2/3}$. To se pravi, čim večja je hitrost tokovnice, tem manj delcev se bo izločilo iz tokovnice na površini opazovanega vlakna. V realnem sistemu je zelo težko med seboj ločiti posamezne mehanizme filtracije. S praktičnega stališča je važna skupna učinkovitost filtracije vseh omenjenih mehanizmov. Ta pa se da meriti. Iz enačb od (14.1) do (14.9) vidimo, da je učinkovitost filtracije predvsem odvisna od Re, hitrosti tokovnic ter razmerja¬ med polmerom delca in polmerom vlakna, na katerega se izločajo delci iz tokovnice.

14.3.8 Projektiranje tekstilije za suho filtracijo

Eden bistvenih parametrov, ki ga moramo upoštevati pri projektiranju tekstilnih filter medijev, je poroznost filter medija. Ta pa je odvisna od konstrukcije in vrste ploskega tekstilnega izdelka. Na splošno povzročajo vlaknine manjši upor pretoku zraka kot

tkanine z enako gostoto oziroma maso na enoto površine. Upor pretoku zraka lahko izrazimo z osnovno Darcyjevo enačbo:

$$p = \frac{k\eta bQ}{A} \tag{14.10}$$

kjer so p razlika tlakov, ki je potrebna, da skozi površino A filtra preteče v enoti časa prostorninska količina zraka Q, k konstanta, η koeficient viskoznosti zraka, b debelina filtra. Pri merjenju poroznosti pogosto uporabljamo naslednjo enačbo:

$$V = Ap^b \tag{14.11}$$

kjer so V prostorninska hitrost pretoka zraka pri razliki tlakov p, A in b konstanti za opazovani filter $(0,5 < b < 1)$, p razlika tlakov.

Preden začnemo projektirati in konstruirati filter medij, moramo poznati vse pogoje za uporabo filter medija, kot so: količina plinov, ki mora preteči skozi filter v enoti časa; temperatura plinov, agresivnost plinov do tekstilnega filtra, koncentracijo delcev v plinu; porazdelitev velikosti delcev, velikost prostora, ki je namenjen za tekstilni filter, tlak plinov, zahtevana učinkovitost filtracije, količina vodne pare v plinih, možen pojav koagulacije delcev zaradi kohezijskih sil in vlage; adhezija delcev na površino filtra in notranjosti por filtra, življenjska doba filtra ipd. Ne glede na vrednost parametrov filtracije, ki smo jih našteli, na splošno velja pri projektiranju filtrov upoštevati naslednje parametre: poroznost, prostornina, upor proti deformacijam, cena filtra in njegove specifične lastnosti.

14.3.9 Poroznost

Filter naj ima čim večjo poroznost. Tako bo možno uporabiti manjšo površino filtra pri enakem pretoku plina kot v primeru, če ima filter manjšo poroznost. Pri tem moramo upoštevati predpisano učinkovitost filtracije. To pomeni, da količina delcev, ki gre skozi filter, ne sme biti večja, kot je predpisano. Iz tega sledi, da poroznosti ne smemo dosegati na podlagi por velikega premera, ampak s pomočjo večjega števila por majhnega premera, saj se učinkovitost filtracije povečuje s povečanjem vrednosti razmerja med polmerom delca in polmerom vlakna, iz katerih je izdelan filter.

Tudi če je omenjeno razmerje ugodno, to še ni zagotovilo, da bomo dosegli predpisano učinkovitost filtracije, ker je lahko premer por med vlakni zelo velik glede na premer delcev, ki jih želimo filtrirati. Prej omenjeni mehanizmi opisujejo dogajanja v neposredni bližini površine enega samega vlakna. Ta predpostavka implicitno upošteva dejstvo, da je premer opazovane tokovnice omejen, oziroma da so v neposredni bližini opazovanega vlakna tudi druga, ki omejujejo premer tokovnice. Glede na prej omenjene mehanizme filtracije, se bo učinkovitost filtracije povečala, če se tokovnica večkrat razdeli in s tem večkrat spremeni smer, preden pride na nasprotno površino filtra. Takšno obliko por imajo vlaknine in tkanine (iz štapelne preje), ki so kosmatene in imajo pore zamrežene s pomočjo vlaken, ki štrlijo iz sten pore oziroma preje. Vendar imajo tkanine manjšo poroznost kot vlaknine enake gostote. Potemtakem so vlaknine bolj primerne za suho filtracijo kot tkanine razen v primeru, ko je filter izpostavljen večjim tlakom, kar pa ni tako pogosto.

14.3.10 Prostornina

Tekstilni del filtra naj zavzame čim manjšo prostornino. To je potrebno predvsem zaradi izmer filtrske naprave, ki mora zavzeti čim manjši prostor in mora biti čim bolj poceni.

Tekstilni filter bo zavzel najmanjšo možno prostornino takrat, ko bo imel optimalne vrednosti parametrov kakovosti, med katere sodita tudi gostota in poroznost.

14.3.11 Odpor proti deformacijam

Filter mora biti odporen proti deformacijam. Če se filter zaradi delovanja tlaka deformira – raztegne, potem se mu spremeni struktura. Poveča se povprečni premer por in s tem tudi poroznost. To pa ima lahko za posledico zmanjšanje učinkovitosti filtracije. Tkanine se manj deformirajo kot vlaknine in so glede deformacije bolj primerne. Toda vlaknine imajo ugodnejše druge lastnosti, kot so na primer poroznost in učinkovitost filtracije. Možno se je izogniti relativno slabi odpornosti vlaknin proti deformacijam tako, da se določena količina vlaken nalaga na redko tkanino z ene ali z obeh strani. Na ta način se izdelku lahko ohrani visoka poroznost in učinkovitost filtracije, obenem pa se mu poveča odpornost proti deformacijam. Tkanina ima kljub temu, da je precej redka, vlogo armature oziroma stabilizatorja posebej še, če je tetra aksialna ali pet aksialna.

14.3.12 Cena filtra

Filtracija ni poceni. Investicije v filtrsko napravo kot celoto so relativno velike, pa tudi tekstilni del filtra ni poceni. Poleg tega je potrebna za proces filtracije tudi določena količina energije za pogon ventilatorjev, ki ustvarjajo potrebno razliko tlakov. Pri vsem tem pa je le tekstilni del filtra potrošni material. Zaradi tega ima cena tekstilnega filtra velik vpliv na ceno filtracije. Zaradi onesnaževanja okolja se ne moremo izogniti uporabi filtracije. Da bi pocenili filtracijo, izberemo primeren tip filtrske naprave, ki naj bo čim cenejša. Osnovne investicije v filtrsko napravo (ali postajo) in prostor, navadno ne moremo bistveno zmanjšati. To nam bremeni amortizacijo. Lahko pa se izognemo prevelikim stroškom obratovanja filtrske naprave in to predvsem z optimalnim projektiranjem tekstilnega filtra. To pa pomeni, da mora imeti tekstilni filter takšne obratovalne karakteristike, da so obratovalni stroški v daljšem časovnem obdobju minimalni. To dejansko ne pomeni le najnižje cene m^2 filtra, temveč predvsem kvaliteto, to je le počasno spreminjanje začetnih vrednosti važnejših parametrov kakovosti filtra. Torej, obratovalni stroški se najlaže znižajo s podaljšanjem življenjske dobe filtra.

Podaljšanje življenjske dobe filtra lahko dosežemo na več načinov. Filtrirna naprava mora omogočiti čiščenje filtra, to je odstranitev prahu, ki je naložen na površini filtra in po možnosti vsaj del prahu, ki se je sesedel na površino vlaken v porah ali pa je celo zamašil določeno število por. To lahko dosežemo s tresenjem dela filtrske naprave, na katero je montiran tekstilni filter, ki je največkrat v obliki vreč ali satovja.

S tresenjem se odstrani predvsem plast prahu, ki se je sesedla na površino filtra. Tresenje le malo vpliva na prah, ki je deponiran v notranjosti filtra. Bolj učinkovit je protitlačni postopek. V določenih časovnih presledkih se vpihava zrak z nasprotne strani filtra. Ta tlak je večji od normalno delujočega tlaka in deluje le kratek čas. Pri tem izpiha prah iz por filtra in obenem odstrani plast prahu, ki se je nakopičila na nasprotni površini filtra. To je možno le tedaj, če adhezijske sile niso prevelike, oziroma če se delci prahu niso močneje oprijeli površine vlaken filtra. Prah se močneje prime na površino vlaken filtra, če je vlažen ali če imajo delci prahu električni naboj z nasprotnim predznakom, kot ga ima filter. Adhezijske sile med delci prahu in površino vlaken filtra lahko zmanjšamo z vgraditvijo kovinskih vlaken, ki odvajajo statično elektriko ali pa površino filtra impregniramo s sintetično smolo. Ta pa se navadno nanaša s pomočjo vakuumske tehnike, tako da je možno regulirati globino, do katere se povleče sintetična smola v notranjost filtra. Nanos smole je najbolj pogosto v obliki pene. Smola je porozna

in se poroznost filtra zaradi impregnacije s smolo bistveno ne spremeni. Če je vlakno prevlečeno s filmom smole, se zmanjšajo adhezijske sile med vlaknom in prašnimi delci, oziroma je adhezijska sila med delci in površino filma precej manjša kot med površino vlaken in delci prahu. Zaradi tega je v tem primeru čiščenje filtrov s proti-tlakom in celo s tresenjem bolj učinkovito. Posledica tega je podaljšana življenjska doba filtra oziroma pocenitev obratovanja filtrirne naprave.

Študij vplivov konstrukcije filtrov, pogojev filtracije in porazdelitve velikosti delcev prahu lahko pripelje do precejšnjega podaljšanja življenjske dobe filtrov. Življenjsko dobo navadno določimo s pomočjo v naprej izbrane vrednosti razlike tlakov, ki je ne smemo prekoračiti s tem, da je volumenska hitrost pretoka stalna. To pa iz dveh osnovnih vzrokov. Moč motorja, ki poganja ventilator, je omejena in zato motor ni zmožen nadaljnjega povečanja razlike tlakov. Pri nadaljnji povečavi zamašitve filtra se zmanjšuje pretok. To lahko pomeni zmanjšanje učinkovitosti proizvodnje v fazah, kjer nastanejo odpadni plini oziroma prašni delci. Po drugi strani pa bi lahko poškodovalo filter čezmerno povečanje razlike tlakov.

Življenjsko dobo filtrov lahko izračunamo z naslednjo enačbo:

$$t = \frac{1}{KM}\sqrt{\frac{A}{Q}}\ln\frac{P}{P_0} \tag{14.12}$$

kjer so t čas, v katerem se poveča razlika tlakov s P_0 na P, A površina filtra, M koncentracija prahu, Q volumenska hitrost pretoka plinov, K koeficient, ki odraža konstrukcijo filtra ter velikost in porazdelitev delcev. Vrednost koeficienta K moramo ugotoviti eksperimentalno.

14.3.13 Posebne lastnosti

Glede na pogoje uporabe je včasih nujno, da ima filter posebne lastnosti, kot so: negorljivost, odpornost proti kemikalijam, določeno trdnost v mokrem stanju ipd. Včasih je temperatura izpušnih plinov 300 °C in več. V takšnih primerih moramo uporabiti za izdelavo filtrov steklena in azbestna vlakna (ta so prepovedana) ali pa vlakna na osnovi aromatskih poliamidov, ki prenesejo temperature do 400 °C.

Če so plini agresivni – kisli ali bazični , moramo za izdelavo filtrov uporabiti tekstilna vlakna, ki so odporna proti kislinam ali bazam. Če so plini vlažni, ni priporočljiva uporaba vlaken, ki spremenijo posamezne lastnosti v mokrem stanju. To so predvsem viskozna in volnena vlakna ter delno bombažna vlakna.

14.4 Mokra filtracija

14.4.1 Področja mokre filtracije

Mokra filtracija je zelo razširjena. Filtrski medij je lahko plast delcev različne velikosti, kot je na primer plast peska, ki je sestavljena iz več plasti delcev različnih velikosti in jo uporabljamo za filtracijo vode. Ta filtrski medij ima nalogo izločiti iz vode vse trdne delce, ki kalijo vodo. Ker pa mokra filtracija zajema zelo široko področje, v katerega je vključeno tudi ločevanje dveh tekočih faz, bi za nekoliko natančnejši opis potrebovali prostor, ki bi zajel več knjig. Zato se bomo omejili le na izločanje trdnih delcev iz tekoče faze in to samo na tiste primere, kjer se kot filtrski medij uporablja tekstilni ploski izdelek. Takšne primere imamo v oljarnah, tovarnah sladkorja, keramični industriji, industriji papirja ipd. K tej skupini bi lahko prišteli tudi geotekstilije, ker imajo tudi te

vlogo filtrskega medija. V primerih, ko želimo izločiti iz tekočine zelo majhne delce, za katere je tekstilni medij neprimeren (ima prevelike pore glede na velikost delcev), je tekstilija lahko armatura , na katero se usede plast posebne snovi, ki služi kot zelo fin filtrski medij.

14.4.2 Teorija mokre filtracije

Za razliko od suhe filtracije, s katero želimo izločiti trdne delce iz plinske faze, izločimo pri mokri filtraciji trdne delce iz tekoče faze. Pogoji filtracije so lahko zelo različni. Filtracija lahko poteka zelo počasi ali pa relativno hitro. Lahko se tudi s časom spreminja hitrost. V začetku lahko filtracija poteka hitro, proti koncu pa zelo počasi. Takšen primer je lahko utrditev barjanskih tal za cestišče. Postopek utrditve barjanskih tal je zanimiv s stališča uporabe igla-ne vlaknine kot filtrskega medija.

Odsek avtoceste A1 Dolgi most – Vrhnika poteka po Ljubljanskem barju [6]. Pri njegovi gradnji (https://www.dars.si) so odkrili plast tako imenovane polžovke, ki ima okrog 400 % vode. Ta plast je debela tudi do 20 m. Takšna plast se obnaša pri obremenitvi kot živo blato. Cesta, položena na to plast, bi se preprosto vdrla, ker bi obremenilna plast izpodrinila položovko. Da se to ne bi zgodilo, so uporabili tehniko gradnje, pri kateri je odigrala odločilno vlogo vlaknina kot filtrski medij. Bodoče cestišče so prekrili z vlaknino, konce so sešili ali zvarili skupaj. To pa zaradi tega, da bi dobili plast vlaknine kot celoto. S tem je bilo onemogočeno ločevanje posameznih trakov vlaknine. Če bi se to zgodilo, bi se skozi takšne razpoke zlilo blato iz spodnjih slojev. Če pride blato v podloga cestišča (glina, deli hišic polžev in sloji peska različne velikosti), se namreč zmanjša koeficient trenja med delci peska, ki tvorijo podlago cestišča. Zaradi tega se zelo zmanjša nosilnost podlage cestišča, ker delci pri obremenitvi lažje drsijo drug mimo drugega, kot če vmes ni blata, ki se obnaša kot mazivo. V tem primeru služi plast vlaknine kot filtrski medij, ki prepušča vodo iz spodnjih plasti, ne prepušča pa blata.

Da bi povečali nosilnost polžovke, so uporabili navpične filtre. Ti filtri so dejansko dolge perforirane cevi, ki so znotraj obložene z vlaknino, ki je pritisnjena ob stene cevi. Cevi so zabili v polžovko do določene globine po vsem cestišču. Razdalje med cevmi je je bila 1 m do 2 m, odvisno od karakteristik polžovke na določeni lokaciji. Potem so cestišče obremenili z 1,5 m do 2 m visoko plastjo gramoza. Ta plast je pritiskala na polžovko. Vmesna plast vlaknine je preprečila pogrezanje obremenilne plasti v polžovko. Obenem je zaradi pritiska začela voda iz polžovke odtekati skozi navpične filtre na površino. Pri tem se je zmanjševala količina vode v polžovki. Zaradi pritiska je novi vodi iz sosedstva onemogočeno, da bi prišla v polžovko. S tem se je povečevala njena nosilnost. Ta proces filtracije je trajal 2 do 3 leta. Cestišče se seseda nekaj let, toda sesedanje je enakomerno in dosedanji rezultati (vožnja po cesti tudi zelo težkih kamionov) kažejo, da je omenjeni postopek uspešen. Seveda moramo za to izdelati vlaknino iz tekstilnih vlaken, ki so odporna proti degradaciji v omenjenih pogojih. Polipropilenska vlakna izpolnjujejo ta pogoj.

Geotekstilije se uporabljajo tudi za oblaganje nasipov, jezov, obal ipd. Izkušnje so pokazale, da je vlaknina nenadomestljiva. Če se med obalo in deročo vodo postavi plast vlaknine in se obremeni s ploščama, da jih tekoča voda ne odnese z obale tako, da ta onemogoča odnašanje zemlje ali peska z obale, ker deluje kot filter. Na splošno lahko hitrost filtracije izračunamo z znano Darcyjevo enačbo:

$$\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t} = \frac{KA\Delta P}{\mu L} \tag{14.13}$$

kjer so V prostornina tekočine, ki gre v enoti časa t skozi filtrski medij, ΔP razlika tlakov med nasprotnima površinama filtrskega medija, A površina filtrskega medija, skozi katero filtriramo zmes trdne in tekoče faze (suspenzijo), L debelina filtrskega medija, μ viskoznost tekoče faze, K izravnalna konstanta za dani filtrski medij.

V enačbi (14.13) lahko izmerimo vse parametre in izračunamo vrednost izravnalne konstante K. Dejansko pa bi moralo biti možno na podlagi vrednosti parametrov na desni strani enačbe (14.13) vnaprej konstruirati filtrski medij – v našem primeru tekstilni ploski izdelek, ki bi omogočil zaželeno hitrost in učinkovitost filtracije. To pa ni mogoče, ker vrednosti izravnalne konstante K ne poznamo. Izravnalna konstanta zajema poroznost filtrskega medija, vpliv velikosti in porazdelitve hidravličnih premerov por, geometrije por, velikosti delcev in sten por, kvalitete površine vlaken, gostote filtrskega medija in porazdelitve ter vpliv gostote na hitrost filtracije, ki jo ponazarja leva stran enačbe (14.13). Enačba (14.13) nam torej ponazarja zelo poenostavljen opis hitrosti filtracije. Za bolj podroben opis procesa filtracije potrebujemo bolj kompleksno enačbo, kot je enačba (14.13). To pomeni, da nam ni znan vpliv posameznega parametra in lahko ocenimo le skupni vpliv. Enačba (14.13) nam nič ne pove o mehanizmu filtracije, to je o spremembi poroznosti filtrskega medija zaradi sesedanja trdnih delcev na njegovo površino in površino sten por v notranjosti filtrskega medija.

Na splošno je mehanizem filtracije odvisen od pogojev filtracije; se pravi hitrosti tokovnic skozi filtrski medij, spremembe smeri tokovnic, velikosti trdnih delcev v zmesi, ki jo filtriramo ipd. Trdne delce lahko od filtriramo iz tekočine s pomočjo filtrskega medija v tokovnici, zaradi vztrajnosti delca, zaradi difuzije, gravitacije ali hidrodinamičnih vplivov. Na sliki 14.6 so ilustrirani našteti mehanizmi filtracije trdnih delcev iz tekoče faze.

14.4.2.1 Filtracija v tokovnici

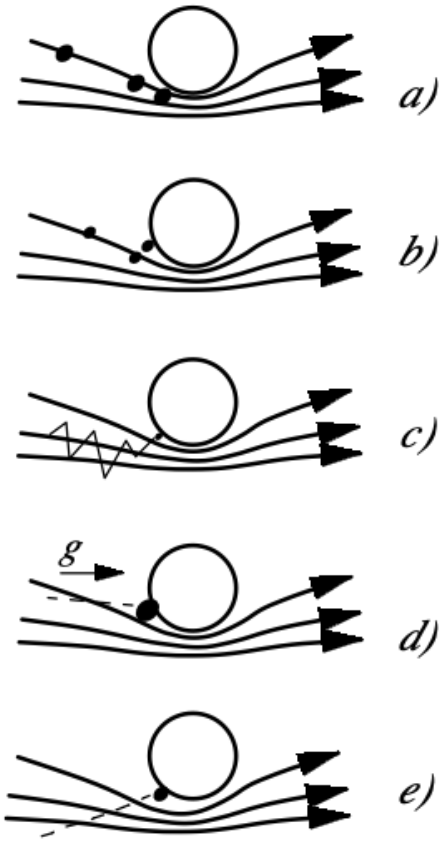
Če so odsotne druge sile, na primer vpliv sosednjega trdnega delca v tokovnici ipd., bo nesla tokovnica delec skozi filtrski medij. V tem primeru predpostavljamo, da je delec precej manjši od premera pore, skozi katero teče tokovnica, in da je tokovnica laminarna. Če je na primer v pori filtrskega medija vlakno, okrog katerega se cepi tokovnica, ali pa vlakno samo toliko štrli iz stene pore, da jo zožuje in s tem ovira tokovnico, tako da ta nekoliko spremeni smer ko teče mimo, bo delec tudi sledil spremenjeni smeri tokovnice.

Če je lega delca v tokovnici takšna, da je razdalja od njegovega središča do središča (ali osi) vlakna v katerikoli točki poti prehoda mimo vlakna manjša od premera trka, na primer $(d_p + d_m)/2$, kjer je d_p Stocksov premer delca in d_m premer opazovanega vlakna, bo delec zadel na površino opazovanega vlakna in se bo izločil iz tokovnice – se pravi, da bo ostal na površini vlakna. Pri tem predpostavljamo, da je adhezijska sila, ki drži delec na površini opazovanega vlakna, večja od sile, ki jo povzroča tokovnica, ko teče mimo površine opazovanega vlakna, na kateri se je iz tokovnice izločil opazovani delec.

14.4.2.2 Filtracija zaradi vztrajnosti delcev

Če je delec sorazmerno velik in ima večjo gostoto kot tekočina, v kateri je suspendiran, ne bo delec sledil tokovnici pri spremembi njene smeri v bližini omenjenega vlakna, glej sliko 14.6, ampak bo zaradi sil vztrajnosti nadaljeval gibanje v prejšnji smeri tokovnice. Dokazano je [5], da obstoji soodvisnost med brez dimenzijskim Stocksovim številom St in učinkom vztrajnosti.

$$St = \frac{(\rho_s - \rho_f) d_p^2 \bar{\mu}}{18 \mu d_m} \tag{14.14}$$



Slika 14.6: Modeli mehanizmov filtracije trdih delcev iz tekoče faze v notranjosti medija. Legenda: a – prestrezanje, b – vztrajnost, c – difuzija, d – gravitacija, e – hidrodinamični vplivi.

kjer so St Stocksovo število, ρ_s gostota trdnih delcev, ρ_f gostota tekočine, d_p premer trdnih delcev, μ viskoznost tekočine, d_m premer delca filtrskega medija (v našem primeru premer vlakna) in $\bar{\mu}$ povprečna hitrost suspenzije skozi pore filtrskega medija.

Čim večje je Stocksovo število, tem večji je vpliv vztrajnosti na trdni delec. Na podlagi teoretičnih in eksperimentalnih del v zvezi s filtriranjem delcev in plinov s pomočjo tekstilnih filtrov so prišli do spoznanja, da je učinkovitost filtracije odvisna predvsem od St in razmerja d_p/d_m [7].

14.4.2.3 Filtracija delcev zaradi difuzije

Zelo majhni delci se, zaradi trkov z drugimi delci, gibljejo naključno po principu Brownovega difuzijskega gibanja. Difuzijski koeficient D lahko definiramo z naslednjo enačbo:

$$D = \frac{kT}{3\pi\mu d_p} \tag{14.15}$$

kjer so k Boltzmannova konstanta, T absolutna temperatura, μ viskoznost tekoče faze, d_p premer trdnega delca.

Pri sobni temperaturi se po Brownovem zakonu gibljejo delci, ki imajo manjši premer od 1 mikrometra. Rezultanta gibanja teh delcev je vsekakor v smeri tokovnice. Ko pa se delci gibljejo v delu tokovnice, ki gre mimo vlakna filtrskega medija, lahko pri tem

pridejo v del tokovnice, ki je v neposrednem stiku s površino vlakna. Hitrost te plasti tokovnice je manjša od povprečne hitrosti tokovnice. (Na sami površini ni tokovnice, ker je tukaj njena hitrost enaka nič.) Zaradi tega nese tokovnica delce bolj počasi mimo vlakna naprej. S tem pa se poveča verjetnost, da difuzijski majhni delci udarijo ob površino vlakna in zaradi adhezijskih sil ostanejo na površini vlakna, oziroma se izločijo iz tokovnice.

14.4.2.4 Filtracija delcev, ki jo povzroča sedimentacija (gravitacija)

Ugotovljeno je [8], da na hitrost filtracije vpliva gravitacijska sedimentacija delcev, ki imajo premer 2 μm do 10 μm. Ta vpliv lahko izrazimo s pomočjo brez dimenzijskega parametra, ki je v zvezi s Stocksovo hitrostjo sedimentacije in se približuje hitrosti delcev.

$$S = \frac{(\rho_s - \rho_p) d_p^2 g}{18 \mu \bar{\mu}} \tag{14.16}$$

kjer sta S koeficient sedimentacije, g gravitacijski pospešek.

Drugi parametri imajo prej omenjeni pomen. Čim večjo vrednost ima koeficient sedimentacije, tem večja je hitrost izločanja delcev zaradi sedimentacijskega učinka. Kot vidimo iz enačbe (14.16), je vrednost koeficienta sedimentacije sorazmerna s kvadratom premera delcev, kar pomeni, da je hitrost izločanja tudi sorazmerna s kvadratom premera delcev.

14.4.2.5 Hidrodinamični vpliv na hitrost filtracije

Gibanje delcev v tekočini, ki teče skozi cilindrične pore, ni popolnoma pojasnjeno, predvsem zaradi interakcij različnih vplivov. Če pa so delci suspendirani v tekočini, v kateri obstoji strižni gradient, lahko nastanejo sile, ki ženejo delce zunaj smeri tokovnice ali celo približno pravokotno na smer tokovnice. Pri tem gibanju lahko zadenejo ob steno pore in se tako izločijo iz tokovnice oziroma suspenzije.

S povečanjem velikosti delcev se poveča učinek filtracije zaradi vztrajnosti, sedimentacije in hidrodinamičnega vpliva. Če pa se zmanjšuje velikost delcev, se poveča učinek filtracije zaradi difuzije. Lahko pričakujemo, da bo učinek filtracije minimalen, če je velikost delcev takšna, da se doseže minimalni učinek vseh že omenjenih mehanizmov filtracije. Pri filtraciji delcev plastike iz plinske faze (suha filtracija), dosežemo manjši učinek filtracije takrat, kadar je premer delcev 1 μm [8].

S povečanjem hitrosti filtracije (hitrosti pretoka) se na splošno zmanjša učinek filtracije. Lahko sklepamo, da je difuzija prevladujoči mehanizem pri učinkovitosti filtracije, saj je hitrost izločanja delcev s pomočjo mehanizma difuzije sorazmerna s časom pretoka skozi filtrski medij. Potemtakem so drugi mehanizmi relativno nepomembni. Če bi bolj vplivali na učinek filtracije, se učinek s povečanjem hitrosti pretoka suspenzije skozi filtrski medij ne bi bistveno zmanjšal. S povečanjem hitrosti pretoka se namreč poveča učinkovitost izločanja iz tokovnice, ker se poveča vpliv vztrajnosti in s tem verjetnost, da se bodo delci koncentrirali v tistem delu tokovnice, ki gre neposredno mimo površine vlakna. V teh razmerah bolj učinkujejo vztrajnost delcev, sedimentacija in hidrodinamični vpliv. Obenem pa se zmanjša izločanje s pomočjo difuzije, saj gredo delci hitreje mimo vlaken oziroma skozi pore in se zaradi tega zmanjša verjetnost trka delca, ki gre skozi tokovnico ob površino stene pore. Razmerje med hitrostjo izločanja delcev s pomočjo mehanizma difuzije in časom pretoka suspenzije skozi filtrski medij lahko

izrazimo s pomočjo Pecietovega števila P.

$$P = \frac{d_p \bar{\mu}}{D} \tag{14.17}$$

Če se delec prime na površino filtrskega medija oziroma na površino vlaken, iz katerih je filtrski medij, obstajajo navadno dovolj močne adhezijske sile , da ostane delec na površini vlakna tudi tedaj, kadar je pretok suspenzije skozi filtrski medij relativno hiter.

Filtrski medij ima določeno kapaciteto izločanja delcev iz suspenzije. Pri določenem povečanju mase filtrskega medija se hitrost filtracije zmanjša. Zaradi tega postane hitrost filtracije premajhna za dane kapacitete ter ovira proizvodnjo ali pa postane neekonomična. Filtrski medij v takšnem stanju ni več uporaben. Kriterije za zamenjavo filtra (hitrost filtracije, tlak, učinek filtracije ipd.) ugotovimo na podlagi izkušenj. Navadno je kljub zamašitvi filtrski medij še zmeraj uporaben, če ga "regeneriramo". Regeneracija pomeni izpiranje vseh delcev iz filtrskega medija, ki so bili izločeni iz suspenzije med filtracijo. Pri izpiranju pa moramo uporabiti takšno tekočino, ki bo zmanjšala sile, ki vežejo delce na površino vlaken. Le tako je mogoče popolnoma očistiti filter in ga ponovno uporabiti. Filtrski medij je mogoče po vsakem čiščenju večkrat uspešno uporabiti. Pri mokri filtraciji trajajo filtrski mediji – navadno vlaknine, tudi do enega leta (v industriji papirja).

14.4.3 Kakovost filtrskega medija

Filtrski medij mora biti zelo kakovostno izdelan. Vlaknina mora biti zelo enakomerna glede gostote, poroznosti in debeline. Takšno enakomernost je zelo težko doseči. Pri najnovejši tehniki izdelave vlaknin, ki so namenjene za filtrski medij (za izdelavo papirja ipd.), so pred nekaj desetletji uporabljali radioaktivni stroncij 90 za merjenje debeline in gostote vlaknine v teku njene proizvodnje. V modernih rešitvah, ki jih omogoča mikroelektronika, radioaktivnih elementov ne uporabljajo več.

Pri filtraciji gline, ki jo uporabljajo v keramični industriji, se ponekod še uporablja filtracija skozi zelo močne in goste sintetične filamentne tkanine. Pri takšnih tkaninah, ki služijo za filtrski medij, je povprečni srednji hidravlični premer por manjši od 20 μm [9]. Filtracija poteka pod tlakom okrog 1,2 MPa. Če bi bile pore večje, bi bila tudi izguba surovine večja, oziroma bi se zmanjšala učinkovitost filtracije. Če pa so v tkanini napake, ki povzročijo prevelik hidravlični premer por v tkanini (luknje, pretrgane niti ipd.), je kos filtrskega medija, na katerem je takšna napaka, neuporaben za izdelavo filtra.

Za projektiranje filtrov za mokro filtracijo ne moremo v naprej podati končne rešitve. Mehanizem filtracije je zelo kompleksen [9]. Lastnosti suspenzij so lahko zelo različne tako, da je nujno upoštevati vrsto suspenzije oziroma področje uporabe danega filtrskega medija. Kot smo videli, učinkovitost filtracije ni odvisna samo od konstrukcijskih lastnosti filtrskega medija, temveč tudi od hitrosti filtracije, velikosti delcev, koeficienta viskoznosti tekočine ipd.

Izmed parametrov kakovosti filter medija je vsekakor pomembna njegova poroznost oziroma število, velikost in porazdelitev por ter dolžina por, oblika povprečnega preseka por vzdolž pore in lastnosti sten por. V enačbi (14.13) je upoštevana debelina filtrskega medija. Ta velikost bi tudi ustrezala dolžini vsake pore, če bi te bile na najkrajši poti od ene do druge površine filtrskega medija. Tak primer so predvsem tkani filtrski mediji. Pri vlakninah pa je večina por daljša od debeline vlaknine.

Ta razlika bi se v enačbi (14.13) pokazala v zmanjšanju vrednosti izravnalne konstante K in s tem hitrosti filtracije pod pogojem, da so drugi parametri na desni strani

enačbe (14.13) enaki. Iz tega primera vidimo, da je zelo težko konstruirati filtrski medij, za katerega bi vedeli, kako se bo obnašal med filtracijo. Zaradi tega igra izkušnja pri projektiranju in konstruiranju filtrov zelo pomembno vlogo. Pri tem mislimo na izkušnje, ki jih dobimo s pomočjo povratnih informacij iz neposredne uporabe filtrov. Te informacije uporabimo za izboljšanje kvalitete filtrskega medija. Po tem sistemu izboljševanja kvalitete se življenjska doba nekaterih vrst filtrskih medijev podaljša tudi za več kot desetkrat.

14.5 Seznam oznak poglavja

Oznaka	Enota	Opis
A	m^2	površina filtra
A		konstanta
b	μm	debelina filtra
b		konstanta
D		koeficient difuzije
d_m	μm	premer delca filtrskega medija (vlakna)
d_s	μm	premer trdnih delcev
E		učinkovitost filtracije
η	kg/m.s	koeficient viskoznosti zraka
g	m/s^2	gravitacijski pospešek
K		konstanta
k		konstanta
k		Boltzmannova konstanta
L	μm	debelina filtrskega medija
M		koncentracija prahu
m	kg	masa delca
$\bar{\mu}$	m/s	povprečna hitrost suspenzije skozi pore filtrskega medija
μ	kg/m.s	koeficient viskoznosti tekoče faze
μ	m/s	x komponenta relativne hitrosti med delcem in tokovnico
v	m/s	y komponenta relativne hitrosti med delcem in tokovnico
ΔP	Pa	razlika tlakov
P	Pa	tlak
P		Pecietovo število
P_0	Pa	tlak
p	Pa	razlika tlakov
Q	m^3/s	prostorninski pretok zraka
ρ_f	kg/m^3	gostota tekočine
ρ_s	kg/m^3	gostota trdnih delcev
Re		Reynoldsovo število
r_p	μm	polmer delca
r_f	μm	polmer vlakna
S		koeficient sedimentacije
St		Stocksovo število
T	K	absolutna temperatura
t	s	čas
U	m/s	hitrost

Nadaljevanje na naslednji strani

Nadaljevanje s prejšnje strani

Oznaka	Enota	Opis
u_1		brezdimenzijska hitrost
V	m^3	prostornina
V	m^3/t	prostornina tekočine, ki gre v enoti časa skozi filtrski medij
v_1		brezdimenzijska hitrost
v_0	m/s	hitrost zraka v tokovnici, ki gre mimo opazovanega vlakna
x	m	koordinata točke
x_1		brezdimenzijska koordinata točke
y	m	koordinata točke
y_1		brezdimenzijska koordinata točke

14.6 Literatura

[1] A. Sharma. *Penetration, pressure drop, and wicking characteristics of NIOSH Certified P-100 and P-95 Filters under heavy DOP holding. Master´s thesis.* College of Engineering and Mineral Resources at West Virginia University, 2000.

[2] R. C. Brown. *Air filtration: an integrated approach to the theory and applications of fibrous filters.* Pergamon Press, Oxford, New York, 1993.

[3] I. M. Hutten. *Handbook of non-woven filter media.* Elsevier Ltd., Oxford, 2007.

[4] D. Jakšić and N. Jakšić. Assessment of porosity of flat textile fabrics. *Textile Research Journal*, 77(2):105–110, 2007.

[5] D. Jakšić and N. Jakšić. *Porosity of the flat textiles (255—272). Woven fabric engineering*. InTech, Rijeka, 2010.

[6] S. Isakovič. Kako gradimo avtocesto dolgi most–vrhnika čez barje. *Gradbeni vestnik*, 26(4–5):72–75, 1977.

[7] M. Zuurbier, G. Hoek, P. van den Hazel, and B. Brunekreef. Minute ventilation of cyclists, car and bus passengers: an experimental study. *Environmental Health*, 48:1–10, 2009.

[8] U. D. Parashar, J. S. Bresee, J. R. Gentsch, and R. I. Glass. Rotavirus. *Emerging Infectious Diseases*, 4(4):561–570, 1998.

[9] M. Widden. *Fluid Mechanics.* Macmillan Press, New York, 1966.

POGLAVJE 15

Teorija filtracije nano delcev

Kazalo

15.1 Uvod **293**
15.2 Medicinska maska **294**
15.2.1 Začetno stanje medicinske maske pred uporabo 294
15.2.2 Virus 295
15.2.3 Poroznost medicinskih mask 295
15.2.4 Vpliv večplastne strukture maske na filtracijo 299
15.3 Nov pristop teoriji filtracije **300**
15.3.1 Narava pretoka zraka skozi medicinsko masko 300
15.3.2 Ugotavljanje fizikalnega stanja vplivnih parametrov na filtracijo 301
15.4 Numerično modeliranje obnašanja virusa v ravni cevi (pori) **301**
15.4.1 Vpliv gibanja fluida na gibanje delca v aksialni smeri 304
15.4.2 Vpliv gibanja fluida na gibanje delca v radialni smeri 306
15.5 Razparava o mehanizmu filtracije v medicinskih maskah **310**
15.5.1 Povzetek filtracije v medicinskih maskah 310
15.5.2 Povzetek o mehanizmu filtracije v medicinskih maskah 314
15.5.3 Primer filtriranja prahu v cementarni 316
15.6 Seznam oznak poglavja **318**
15.7 Literatura **319**

15.1 Uvod

Teorija filtracije opisana v tem poglavju je originalna in plod lastnega raziskovalnega dela, zato se tudi imenuje Jakšićeva teorija filtracije nano delcev.

Teorijo filtracije nano delcev smo razvili na podlagi študija filtracije mikrobov in virusov v obstoječi medicinski maski, ki je izdelana iz več plasti vlaknin in mora omogočiti 100 % učinkovitost filtracije.

Mehanizem filtracije v vlaknini je zelo kompleksen proces [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Da bi ga lahko razumeli, je nujno definirati parametre poroznosti, naravo pretoka zraka skozi

odprtine (pore) v vlaknini, geometrijo por in obnašanje nano delcev, ki se v tokovnicah zraka gibljejo skozi masko iz okolja proti ustom (v primeru medicinske maske) in obratno.

Medicinska obrazna maska, ki je izdelana iz tekstilnih vlaken, je lahka, enostavna za uporabo, relativno poceni in zelo učinkovita pri zaščiti pred infekcijo med vdihavanjem zraka. Maska mora biti formirana tako, da se dobro prilega obrazu uporabnika, oziroma, da gre vdihani zrak skozi telo maske in ne skozi eventualne odprtine na robovih maske. To pomeni, da gredo prašni delci, kot tudi mikrobi in virusi le skozi masko in ne med robom maske in površino obraza uporabnika. Maska je le za enkratno uporabo, da se izognemo eventualno izločenim delcem, ki so filtrirani v maski. Lahko jo uporabimo tudi v prašnem okolju dokler ne pride do nasičenja maske s prašnimi delci.

Kompozicija maske mora popolnoma ustrezati razmeram uporabe. Filtrirna plast mora biti zaščitena z zunanje strani in tudi s strani obraza uporabnika. Pretočni kanal (pora) skozi zunanjo plast ne sme potekati skozi notranjo filtrirno plast in naprej skozi notranjo zaščitno plast brez spremembe smeri. Filtrirna plast mora imeti zelo majhne premere kanalov zaradi izločanja tudi najmanjših virusov. Odprta površina za pretok zraka skozi masko (vsota števila površin teh kanalov) mora biti zadostna, da je omogočeno normalno dihanje [4, 5].

15.2 Medicinska maska

15.2.1 Začetno stanje medicinske maske pred uporabo

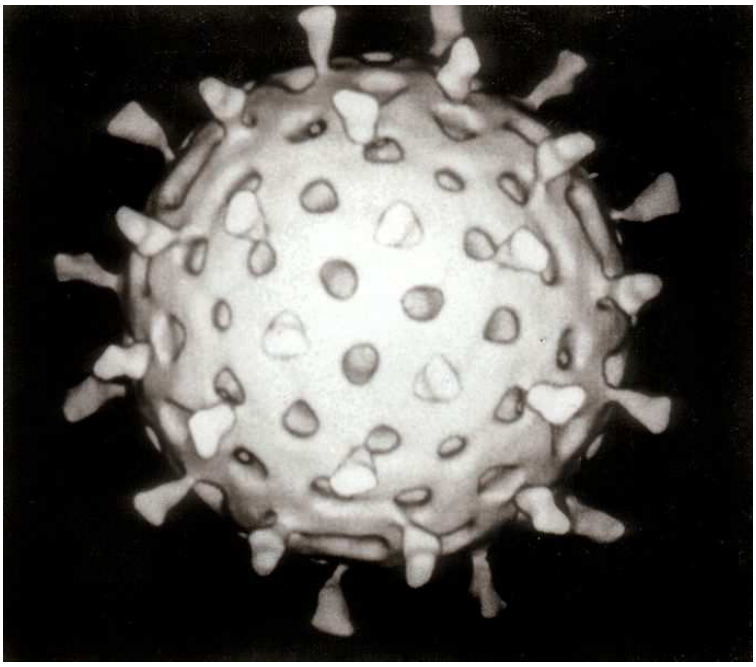
Za ilustracijo možnosti uporabe Jakšićeve metode za ugotavljanja števila, velikosti in porazdelitve por v vlakninah [3, 4], smo izbrali medicinsko masko, ki je izdelana iz treh plasti vlaknine. Srednja plast je izdelana iz mikrovlaken, ki imajo premer le 2 μm, in 100 % zadrži vse mikrobe in viruse. Omogoča normalno dihanje uporabnika, brez nevarnosti, da mikrobi in virusi prodrejo skozi masko v pljuča uporabnika, kljub temu, da so premeri por precej večji od premera virusa.

Preden začnemo analizirati poroznost maske, moramo imeti nekatere informacijo, o stanju maske. Predpostavljamo, da maska še ni bila v uporabi. Spodaj smo navedli sedem nujnih informacij kot sledi:

- maska je nova v originalni embalaži,
- maska je nameščena na obraz uporabnika tako, da gre zrak pri dihanju le skozi masko,
- maska zadrži 100 % mikrobov in virusov v času uporabe, ki je seveda omejen,
- pretok zraka skozi masko je laminaren,
- uporabnik maske z dihanjem povzroča srednji pretok zraka 40–60 l/min,
- hitrost dihanja je 12–20 vdihov na minuto,
- debelina maske je 285 μm in specifična masa 57,5 g/m^2;
- v maski ni vlaken, ki bi bila postavljena pravokotno ali približno pravokotno med zunanjo in notranjo površino maske.

15.2.2 Virus

Virusi so manjši kot zelo majhni prašni delce in jih je težko filtrirati. Pojavljajo se v različnih oblikah, kot so sferična, v obliki heliksa, izohedra in podobno v velikosti, ki se nahaja v mejah med 10 nm in 300 nm. Povprečna gostota virusa ρ_x = 1200 kg/m^3. Mi se bomo za enkrat zadržali le na sferičnem ali približno sferičnem virusu, slika 15.1.



Slika 15.1: Računalniška rekonstrukcija roto-virusa, ki je bazirana na večjem številu elektronskih mikrografov. [8]

15.2.3 Poroznost medicinskih mask

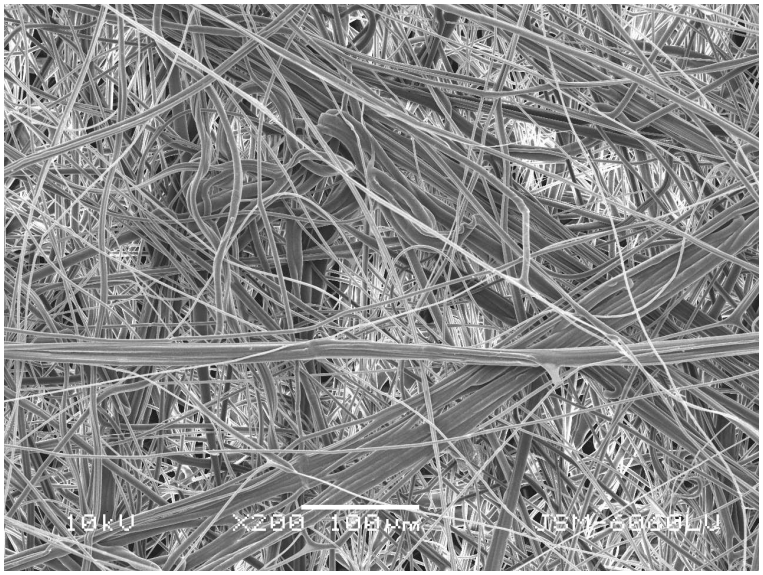
Za ugotavljanje parametrov poroznosti je uporabljena Jakšićeva metoda za ugotavljanje števila, velikosti in porazdelitve por v ploskih tekstilijah [3, 4]. Stene por (kanalov) tvorijo vlakna. Za razliko od tkanin, pri katerih stene por formirajo vlakna, ki so spredena v prejo; so pri vlaknini vlakna prosto postavljena v xyz prostoru, razen pri iglani vlaknini. V tkanini so pore (kanali) naravnani približno pravokotno na xy ravnino, kar velja tudi za pore v iglani vlaknini, ki so posledica gibanja igel v vlaknini.

Vse tri plasti vlaknin so izdelane iz polipropilenskih vlaken. Površina maske skozi katero je možen pretok zraka je velika okrog 160 cm^2, preglednica 15.1. Aktivna površina zunanje plasti je manjša kot je aktivna površina vmesne plasti. Obe zunanje plasti sta stabilizirani s točkastimi površinami, na katerih so staljena vlakna in te površine so nepropustne za zrak. Na teh delih je vlaknina transformirana v folijo. Večina površine dveh zunanjih plasti je prepustna za zrak, preglednica 15.1. Vmesna plast ni stisnjena in nima staljene površine. Zaradi tega je mogoč pretok zraka tudi skozi del površine, ki se nahaja pod staljenim delom zgornje (zunanje) plasti ali nad spodnjo zunanjo plastjo, ki se tesno ne opira na površino obraza uporabnika. Glede na to je 100 % aktivne površine vmesne plasti dejansko aktivna za pretok zraka, preglednica 15.1. Izjema je delež površine, ki je točkasto pritrjen za obe zunanji plasti s taljenjem mikrovlaken, ki ga nismo ugotovili.

Preglednica 15.1: Primerjava izbranih fizičnih parametrov vlaken, ki so uporabljeni za plasti vlaknin iz katerih je izdelana medicinska maska. (*) – na obrazu uporabnika.

Plasti vlaken	Masa [g/m^2]	Debelina [μm]	Število plasti vlaken v plasti vlaknine	Premer vlaken [μm]	Aktivna površina, ki ni blokirana s smolo [%]	Celotna površina vlaknine [cm^2]
Zunanja plast	17,6	92	5	18	87	160
Vmesna plast	20,4	74	37	2	100	160
Zunanja plast$^{(*)}$	19,1	120	7	18	75	160

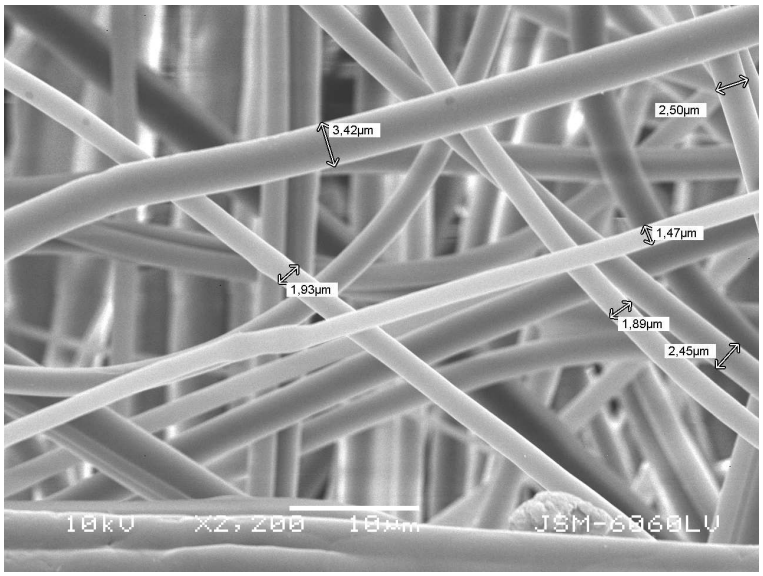
Slika 15.2 je povečana 200 krat. Razvidna je zelo slaba orientacija in porazdelitev tudi v globini plasti vlaken v vmesni vlaknini. Ni razvidno, da bi kakšno vlakno ležalo pravokotno na xy ravnino, oziroma na površino vmesne plasti.



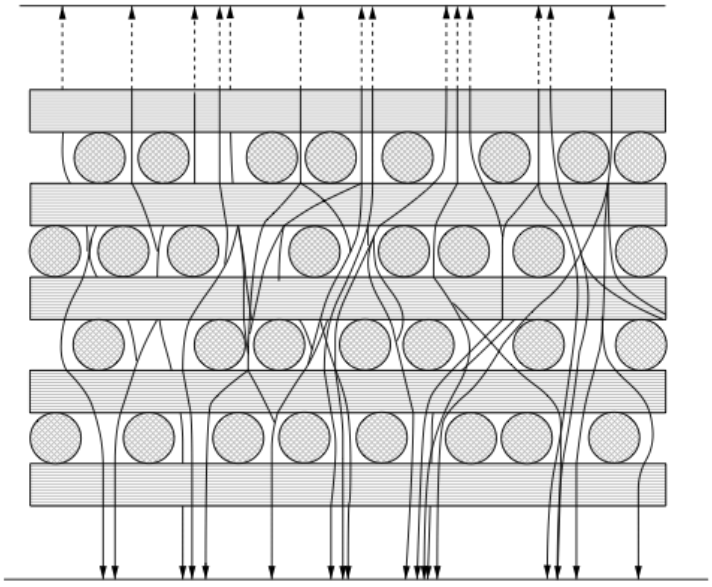
Slika 15.2: Vmesna plast vlaknine v maski povečana za 200 krat.

Na sliki 15.3 je povečava za več kot 10 krat večja od povečave na sliki 15.2 in znaša 2.200 krat. Tukaj je bolj razvidna medsebojna lega vlaken. Če upoštevamo dejstvo, da je vmesna plast debela le 74 μm, kar je zelo malo, in v idealni porazdelitvi vlaken pomeni debelino le 37 vlaken. Glede na vse to, je razumljivo, da na sliki 15.3 vidimo po globini eventualno 5 do 7 vlaken. Kanalu se sproti spreminja premer in smer. Z Jakšićevo metodo ugotavljanja parametrov poroznosti, lahko izmerimo le najmanjši premer v kanalu, glej tudi sliko 15.4. To smo imenovali hidravlični premer pore. Ta ima dominantno vlogo pri pretoku zraka.

V preglednici 15.2 so prikazani parametri filtracije. Število por na 1 cm^2 je 45.294. Maksimalni hidravlični premer por je 30 μm. Odprta površina (prosta za pretok zraka) je 7,26 %. Koeficient *a*, regresijska enačba (8.4) na strani 156 – pretok zraka skozi suh vzorec, je 0,0921. Eksponent b, regresijska enačba (8.4), na strani 156 – pretok zraka skozi suh vzorec, je 0,7521. Povprečni hidravlični premer por je 13,91 μm. V preglednici 15.3 pa so prikazani parametri poroznosti za vse tri plasti vlaknin maske skupaj.



Slika 15.3: Vmesna plast vlaknine v maski povečana za 2200 krat.



Slika 15.4: Model pretoka tokovnic zraka skozi vlaknino v procesu vdiha in izdiha.

Preglednica 15.2: Parametri poroznosti za vse tri posamezne plasti in maske kot celote (merjeni z Jakšićevo metodo ugotavljanja poroznosti tekstilij); tekočina v porah je n-butanol; (*) – na obrazu uporabnika. Legenda: D_{max} – hidravlični premer največje pore, d_{max} – povprečni hidravlični premer por v prvem velikostnem intervalu (največje pore), d_{min} – povprečni hidravlični premer por v zadnjem velikostnem intervalu (najmanjše pore), d_p – povprečni hidravlični premer por vzorca, a, b – regresijski koeficienti enačbe (8.4) na strani 156, P – povprečna hidravlična odprta površina za pretok zraka, L – širina velikostnih razredov por, N – število velikostnih razredov por, NP – število por.

Parametri poroznosti	Zunanja plast	Vmesna plast	Zunanja plast$^{(*)}$	Maska v celoti
D_{max} [μm]	305	38	211	30
d_{max} [μm]	275	28	195	26
d_{min} [μm]	15	8	15	9
d_p [μm]	83,2	12,46	76,3	13,91
b	0,6183	0,7313	0,6143	0,7521
a	0,249	0,0889	0,2925	0,0921
P [%]	27,71	8,43	25,32	8,42
L [μm]	13	2	18	2
N	13	10	10	10
NP/cm^2	3.745	68.414	4.506	45.294

Preglednica 15.3: Parametri poroznosti maske, za vse tri vlaknine skupaj, (merjene z Jakšićevo metodo ugotavljanja števila por v velikostnih intervalih).

Meje velikostnih razredov [μm]	Hidravlični premer por [μm]	Tlak [Pa]	Volumenski pretok zraka $[\mathrm{m}^3/\mathrm{s}]\cdot 10^{-6}$	Število por	Delež por [%]
25–27	26	3.815	5,556	230	0,51
23–25	24	4.133	13,100	329	0,73
21–23	22	4.509	16,704	139	0,31
19–21	20	4.959	66,931	2.814	6,21
17–19	18	5.510	12,306	3.135	6,92
15–17	16	6.199	233,431	6.979	15,41
13–15	14	7.089	323,569	6.880	15,15
11–13	12	8.266	516,463	16.637	36,73
9–11	10	9.919	652,269	8.171	18,04

15.2.4 Vpliv večplastne strukture maske na filtracijo

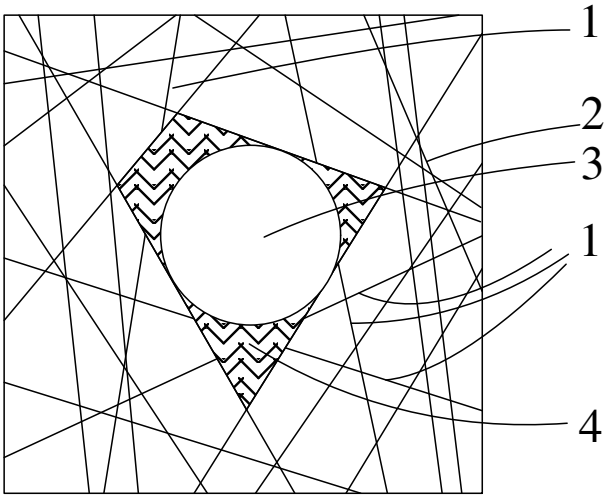
Opisali bomo nekaj razlik v delovanju plasti v maski v procesu uporabe in v procesu merjenja parametrov poroznosti. Kot je že povedano, imata obe zunanje plasti manjšo aktivno površino zaradi svojih dodatnih funkcij, da omogočita mehansko podporo notranji (vmesni) plasti.

Vzorec, ki je uporabljen za testiranje poroznosti maske je izrezan iz maske in vstavljen v glavo aparature za merjenje parametrov poroznosti v enakih legah kot so jih imeli v maski. Površina odprtega dela glave aparature v katero vstavimo vzorec je 1 cm^2. Plasti vzorca so bili na robovih skupaj pritisnjeni v času merjenja pretoka zraka skozi vzorec pod določenimi tlaki. Pri teh meritvah gre zrak skozi kanale (pore) v vzorcu in ne mimo teh kanalov. Tlak pri meritvi poroznosti pritiska vse tri plasti skupaj. V tem se razlikuje testiranje maske od njene uporabi na obrazu. Pri uporabi maske vse tri plasti so rahlo med sabo povezane razen na robovih maske, kje so trdo med sabo povezane. Pri uporabi maske, tlak na masko povzroča tok zraka, ki se formira pri vdihu in izdihu zraka. Ta zrak lahko prehaja skozi spodnjo plast le skozi pore na aktivnih delih plasti. Ker je hitrost zraka pri dihanju le okrog 1 m/s, je tlak, ki ga proizvaja zračni tok relativno nizek (20 Pa), in ne vpliva na medsebojno stiskanje plasti.

Volumen zraka – produkt odprte površine za pretok zraka in hitrosti toka, so prikazani v enačbi (8.4) na strani 156 in tlak (razlika tlaka na obe strani maske) ter hitrost pretoka zraka sta prikazana v enačbi (8.5) na strani 157. Iz teh enačb je razvidno, da je možno doseči enako hitrost pretoka zraka v realnosti in v eksperimentu. Večji tlak povzroči večjo hitrost, kar omogoča, da lahko dobimo realne rezultate pod katerim koli tlakom, ki ga omogoča laboratorijska aparatura, za meritev hitrosti pretoka zraka skozi suh in moker vzorec v odvisnosti od tlaka. V laboratorijskih poskusih dobimo manjšo vrednost odprte površine za pretok zraka, kot je dejanska odprta površina pri uporabi maske. To pa zaradi tega, ker so plasti pri laboratorijskih meritvah pritisnjene druga ob drugo. Pri vdihu in izdihu je tlak precej manjši in ne stiska plasti drugo ob drugi. Poleg tega je tudi prisotna spodnja meja hidravličnih premerov, ki so še odprti glede na zgornjo mejo uporabljenega tlaka.

Izmerili smo, da je odprta površina 7,26 % od celotne aktivne površine na kateri se nahajajo pore. Potrebno je tudi poudariti, da se odprta površina za pretok zraka nanaša na vsoto vseh hidravličnih por, oziroma na najožje dele por ali kanalov, ki smo jih definirali kot hidravlične premere por, slika 15.5. Pri tem je na aparaturi možno izmeriti hidravlične premere por do 8 μm. To omogočata maksimalni tlak, ki ga je možno doseči na aparaturi, in kapaciteta pretoka zraka. Iz porazdelitve velikosti por, ki je prikazan v preglednici 15.3 je razvidno, da so v vzorcu verjetno prisotne tudi pore, ki imajo manjše velikosti hidravličnih premerov por kot 8 μm, kar je spodnja meja možnosti aparature. Tudi te manjše pore imajo pomembno vlogo pri filtraciji mikrobov in virusov. Ti so precej manjši kot so hidravlični premeri teh por.

Seveda je možno izdelati aparaturo, ki omogoča uporabo višjega tlaka in večji pretok zraka skozi vzorec, kot ga omogoča obstoječa aparatura, na kateri smo izmerili rezultate v preglednici 15.2. Zrak normalno teče skozi te zelo majhne pore. Če upoštevamo vse to lahko ugotovimo, da je odprte površine precej več kot smo jo izmerili med eksperimentom. Lahko predpostavimo, da je premer kroga, ki je prikazan na sliki 15.5 minimalni izmerjeni hidravlični premer 8 μm. Druge pore imajo manjše hidravlične premere kot 8 μm. Prikazana vlakna niso v merilu. Bila bi že v nano območju. Ne glede na to, da so vse pore med vlakni manjše od pore, ki jo omejuje krog, je zaradi boljše preglednosti prikazan ostanek tekočine samo v najbližjih porah, ki so okrog pore 3 na sliki 15.5.



Slika 15.5: Pore (brez tekočine) in hidravlična pora iz katere je iztisnita tekočina razen v vogalih. Legenda: 1 – vlakno, ki je na enem spodnjih nivojih dela pore iz katere je iztisnjena tekočina, 2 – mikro vlakno, 3 – hidravlična pora, 4 – del pore iz katerega ni iztisnjena tekočina v eksperimentu ugotavljanja števila, velikosti in porazdelitvi por po J-metodi.

15.3 Nov pristop teoriji filtracije

Predpostavljamo, da je tok fluida usmerjen skozi kanale (pore) med vlakni. Oblika teh kanalov v vlaknini je naključna. Ni nobene pravilne geometrične oblike. Pogosto se jim spreminja velikost (premer) in smer. Bistvena za filtracijo je srednja plast v maski, ki je izdelana iz mikrovlaken. Obliko teh kanalov je nemogoče ugotoviti, saj je premer mikrovlaken le 2 μm. Vendar je bistvenega pomena le najmanjši premer kanala, ki ga lahko ugotovimo z uporabo Jakšićeve metode, ki omogoča ugotavljanje števila, velikosti in porazdelitve por v ploskih tekstilijah [3, 4].

15.3.1 Narava pretoka zraka skozi medicinsko masko

Naravo pretoka zraka (laminarno ali turbulentno) ugotovimo z izračunom vrednosti Reynoldsovega števila, enačba (15.1)

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \tag{15.1}$$

kjer parametri pomenijo: ρ gostota zraka, v povprečna hitrost objekta (delca) v primerjavi s tokovnico ali obratno, d karakteristična-linearna dimenzija (hidravlični premer pore ali premer delca ali premer vlakna), μ dinamična viskoznost zraka ali splošno fluida.

Gostota zraka ρ = 1,2 kg/m^3 in dinamična viskoznost μ = 18 Pa.s. Značilne linearne dimenzije so uporabljene glede vrednosti parametrov na katere se nanašajo. Če raziskujemo pretok skozi pore, jemljemo najmanjši hidravlični premer kanala oziroma pore. Po drugi strani, če je v vprašanju pretok okrog stacionarnega delca, je dimenzija njegov premer.

Hitrost zraka skozi medicinsko masko, je možno ugotoviti s pomočjo parametrov poroznosti maske in fiziologije človeka. Hitrost zraka pri vdihanju in izdihanju je odvisna od intenzivnosti dihanja. Ta je odvisna od vrste in intenzitete aktivnosti uporabnika medicinske maske. Vdihani zrak ima normalno gostoto. Izdihani zrak pa ima povečano vlažnost in s tem gostoto. Predpostavimo, da uporabnik vdihava 12 litrov zraka na minuto pri normalnem tlaku in lahki aktivnosti, in 60 litrov na minuto za časa aktivnost srednjega intenziteta. Predpostavimo še, da subjekt vdihne 12 krat v eni minuti. Velikost aktivne površine vmesne plasti maske pa naj bo 160 cm^2 in odprta površina za pretok zraka 8,42 %, preglednica 15.2. Potemtakem je odprta površina za pretok 11,6 cm^2. Hitrost pretoka zraka skozi vmesno plast je približno 0,17 m/s za časa lahke aktivnosti in 0,86 m/s za časa aktivnosti srednje intenzitete [5]. Za računanje Reynoldsovega števila Re je vzeta hitrost 1 m/s.

Največji hidravlični premer por je 30 μm, preglednica 15.2. Reynoldsovo število za pretok zraka skozi največjo poro Re = 2 kar je precej manjše od 2.300, kar je zgornja meja za laminarni pretok zraka skozi vmesno plast maske.

Maska je oblikovana tako, da filtrira vse velikosti virusov premera od 10 nm do 300 nm. Ko začnemo zrak vdihavati ali izdihavati, virusi ne slede popolnoma toku fluida. Reynoldsovo število v momentu, ko je virus stacionaren (izven zunanje površine maske blizu vhoda v poro) in se začne gibati fluid, izračunano pri maksimalni hitrosti toka fluida. Celo takrat, ko je virus zajet v toku fluida se način njegovega gibanja na kratki razdalji bistveno ne spreminja. V tem primeru je Re = 0,02 « 0,1, limit za laminarni pretok zraka okrog objekta in je precej večji kot pri pretoku skozi kanal med vlakni v vmesni plasti vlaknine v medicinski maski. Lahko sklepamo, da filtracija v vmesni plasti maske poteka pri laminarnem gibanju zračne mase.

15.3.2 Ugotavljanje fizikalnega stanja vplivnih parametrov na filtracijo

Proces filtracije, ki poteka v medicinski maski, je v mikro in nano območju velikosti. Velikost por v vmesni plasti v maski je v mikro metrskem območju. Velikost virusov je v nano metrskem območju. Kundsenovo število (Kn) je uporabljeno za ugotavljanje, ali enačbe klasične mehanike kontinuuma veljajo ali ne. Kundsenovo število je definirano z naslednjo enačbo:

$$Kn = \frac{k_B T}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 pL} \tag{15.2}$$

kjer so k_B Boltzmannova konstanta, T termodinamična temperatura, σ premer delca, p totalni tlak, L reprezentativna fizična dolžina v določenem območju.

Vrednost Kn za maksimalni premer pore in velikost virusa je $Kn \approx 10^{-9}$, kar je precej manjša vrednost kot 1. Kar pomeni, da lahko uporabimo teorijo klasične mehanike kontinuuma.

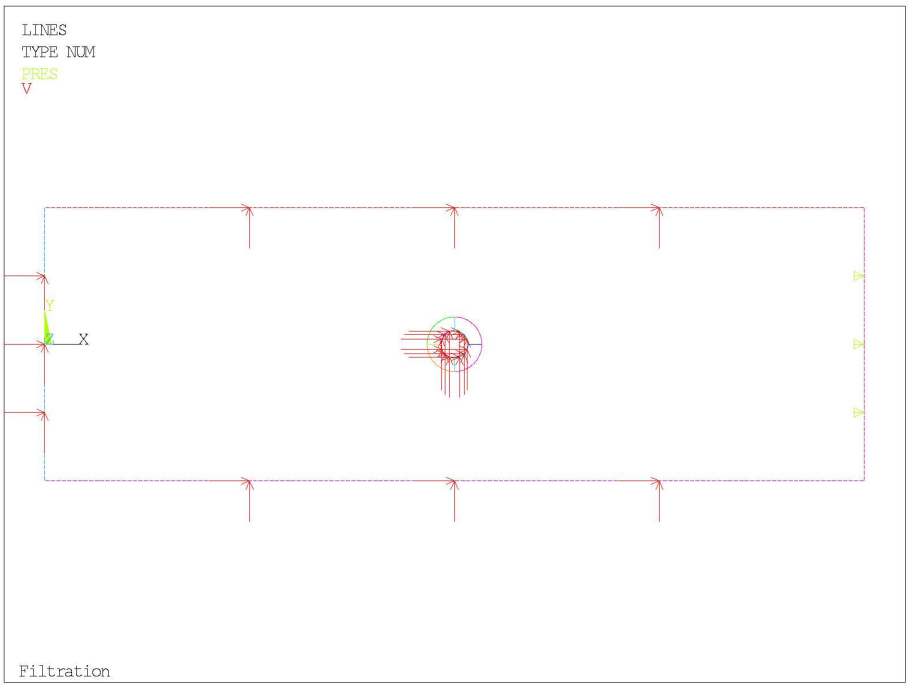
15.4 Numerično modeliranje obnašanja virusa v ravni cevi (pori)

Pora v vmesni plasti maske je oblikovana v kanal ali cev. Vmesna vlaknina je formirana na zelo kompliciran način – formirana je iz kompozita, ki ima 37 notranjih pod plasti. Vsaka od teh notranjih pod plasti je sestavljena iz vlaken, ki so med sabo naključno razporejena, zaradi česar pore (kanali) imajo nepravilne geometrične oblike. Zaradi

tega je tudi oblika kanalov geometrijsko nedoločena, kar velja tudi za obliko toka fluida, slika 15.4. Lahko predpostavimo da:

- Pora lahko spremeni svojo smer 35 krat, ko zapusti vmesno plast in pride v plast, ki tvori površino maske, ki pritiska na obraz uporabnika.
- Sprememba smeri je naključna.
- Pri spremembi smeri pora se lahko razcepi. Ne glede na to, v teku eksperimenta ugotavljanja parametrov poroznosti, dejansko upoštevamo na novo formirane pore. Jašićeva metoda upošteva le hidravlični premer pore, to je tisti del kanala, ki ima najmanjši premer. Ta del je bolj pomemben, kot dolžina pore oziroma kanala.
- Dolžina pore je najmanj dva krat daljša kot je debelina vmesne plasti kar pomeni, da je dolžina pore vsaj 570 μm, upoštevajoč debelino tudi obeh zunanjih plasti, je skupna dolžina pore še precej večja. Debelina maske je vsota debelin vseh treh plasti.
- Eksperimentalno ugotovljen premer pore, se nanaša na najmanjši premer pore vzdolž celotne njene dolžine, oziroma debeline maske. Celotna pora je oblikovana kot cev nepravilne oblike.
- Delec je lahko filtriran zaradi ovir, ali v praznih prostori med vlakni, ko se ne izloči iz toka fluida na površino ovire ali se izloči na površino vlakna, ki ima vlogo stene cevi.

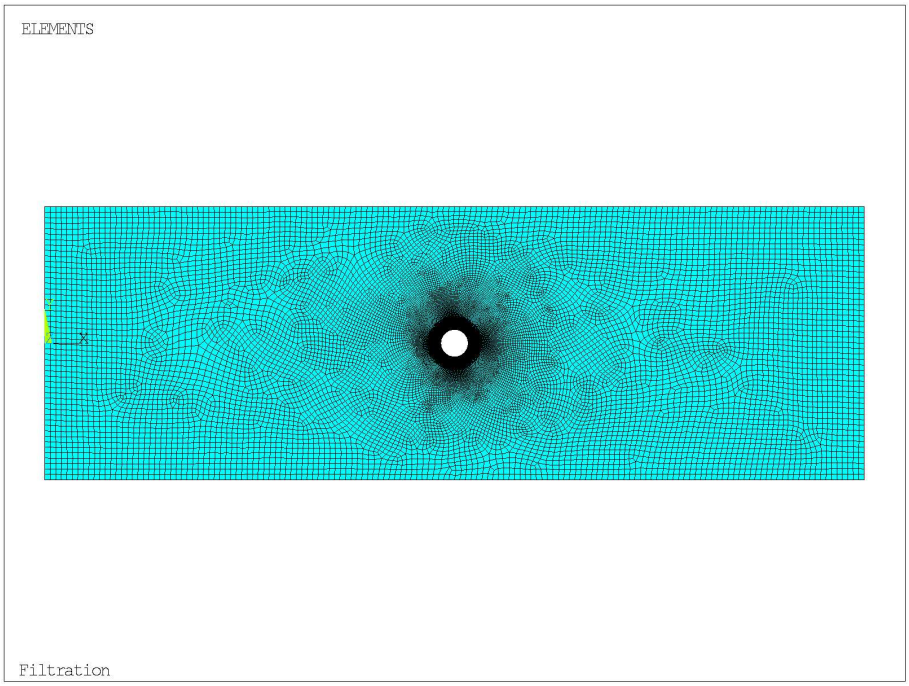
Upoštevajoč predpostavke o obliki pore, izdelan je enostaven numerični model, da bi se prikazale različne možnosti filtracije. Oblika virusa je idealizirana. Uporabljena je sferna oziroma krožna oblika, slike od 15.6 do 15.8.



Slika 15.6: 2D model virusa v pori.

Uporabili smo računalniški program za izračun dinamike fluida (CFD), oziroma 2D simulacije s ciljem ugotavljanja obnašanja virusa v ravni cevi skozi katero teče fluid -– v našem primeru zrak. To je seveda približek realnega stanja. Virus, ki je predstavljen kot krog, je postavljen v pravokotnik, ki predstavlja 2D model cevi, slike od 15.6 do 15.8. Zgornje in spodnje stene so definirane kot stene po čigavi površini ne morejo drseti molekule zraka. Kar pomeni, da je hitrost zračnega toka na površini vlaken, ki tvorijo steno cevi enaka nič. To tudi pomeni, da je hrapavost površine vlakna zadosti velika, da ovira gibanje zračnih molekul. Površina virusa je definirana, grobo vzeto, na enak način. Radialna hitrost fluida na površini virusa je tudi nič (predpostavljeno je, da fluid ne penetrira (prehaja) v virus skozi njegovo površino in hitrost fluida na mejah virusa je arbitrarna (dogovorjena) tako, da omogoča simulacijo rotacije virusa). Začetna (vhodna) hitrost z uniformnim profilom je določena na vhodu v cev (leva meja cevi) in tlak v okolju je upoštevan pri izhodu – desna meja cevi, slika 15.8. Termin cev uporabljamo za idealizirano obliko pore. Rezultati laminarnega modela so dobljeni z našo ciljno rešitvijo (ANSYS-FLUENT) kjer smo primerjali tudi rezultate turbulentnega modela z rezultati laminarnega modela, ki so dobljeni z 3D v ANSYS-CFX. Rezultati rešitev v različnih modelih, se zelo dobro ujemajo in tako smo nadaljevali z 2D laminarnim modeliranjem v ANSYS-FLUENT.

Namen numeričnega modeliranja je dobiti kvalitativno sliko mehanskega sistema gibanje delca skozi medicinsko masko. Na tej osnovi je mreža modela relativno enostavna, slika 15.7. Mejna plast pri mejah cevi ni v fokusi te analize in je tako prosta mreža uporabljena za celotno področje. Okolica virusa je v mrežna s strukturirano mrežo z najmanjšimi elementi na površini virusa.



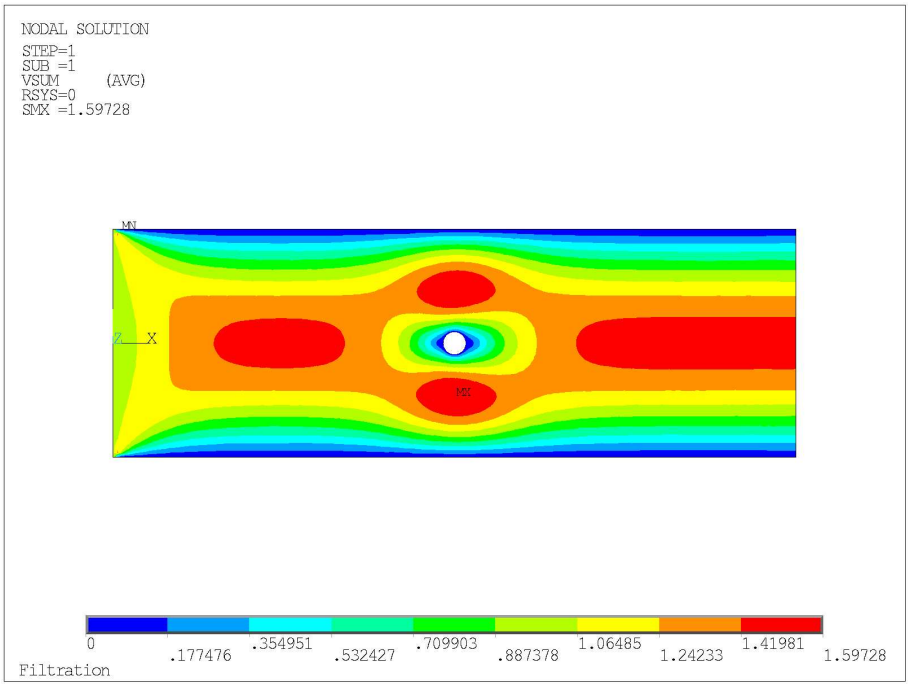
Slika 15.7: CFD mreža. Velikost največjega virusa je na tej sliki povečana 10 krat za potrebo prikaza.

Premer cevi je 30 μm, ki se obenem nanaša na maksimalni hidravlični premer pore. Dolžina cevi je 120 μm, ki je dovolj za formiranje profila laminarne hitrosti preden virus zapusti polovico dolžine cevi, slika 15.8. Profil laminarne hitrosti, enačba (15.3) [7], je

ugotovljen približno na razdalji enega premera od vhoda v cev.

$$v(r) = \frac{3}{2} v_0 \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \tag{15.3}$$

kjer pomenijo v_0 začetna hitrost pred vhodom delca v kanal, r radij, ki definira položaj tokovnice v cevi in R radij cevi. Maksimalna hitrost je $v_m = 1,5 v_0$.



Slika 15.8: Konture hitrosti. Velikost največjega virusa je na tej sliki povečana 10 krat za potrebo prikaza.

15.4.1 Vpliv gibanja fluida na gibanje delca v aksialni smeri

Velikost sile, ki jo generira tok fluida na stacionarni virus pozicioniran v centru cevi, oziroma v centru prečnega preseka cevi ($r = 0$ μm) za različne začetne hitrosti, kot funkcija maksimalne hitrosti fluida. Robni pogoj na površini virusa predstavlja ničelna hitrost. Tudi rotacije virusa ni. Ugotovljeno je, da je sila F_a, ki jo povzroča tok fluida, v linearnem odnosu z največjo hitrostjo fluida v_m.

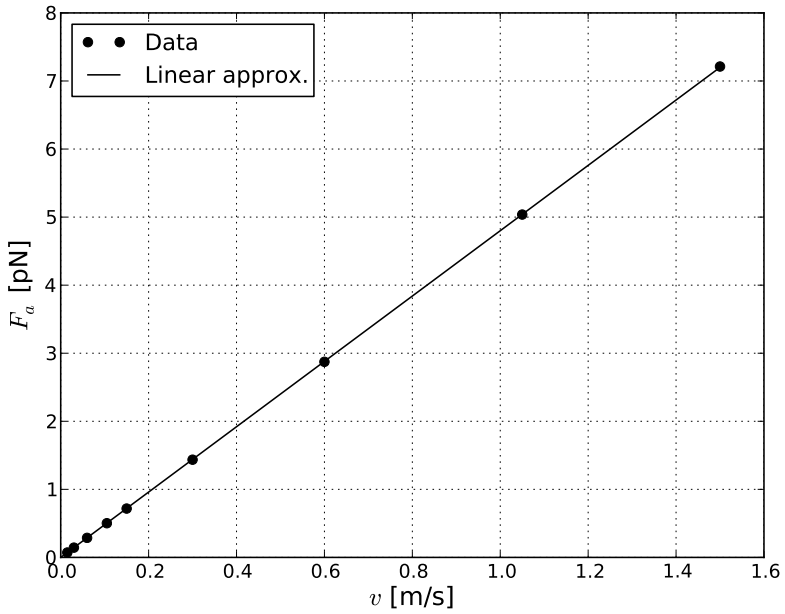
$$F_a = C v_m \tag{15.4}$$

kjer so F_a sila, ki jo povzroča tok fluida, C konstanta, ki je odvisna od velikosti virusa, v_m maksimalna hitrost fluida.

Iz grafa na sliki 15.9 lahko izračunamo vrednost koeficienta C. $C_{300} = 4,8 \cdot 10^{-12}$ Ns/m za maksimalno velikost virusa 300 nm, slika 15.9 in $C_{10} = 32,5 \cdot 10^{-15}$ Ns/m za minimalno velikost virusa 10 nm. Očitno je, da je sila, ki deluje na virus, ekstremno majhna, tudi v primeru, ko virus miruje in ga tok ne nosi s seboj.

Če virus ne miruje, hitrost v_m v enačbi (15.4) predstavlja začetno razliko hitrosti med fluidom in virusom. Uporabljen je drugi Newtonov zakon za izračun hitrosti virusa v aksialni smeri.

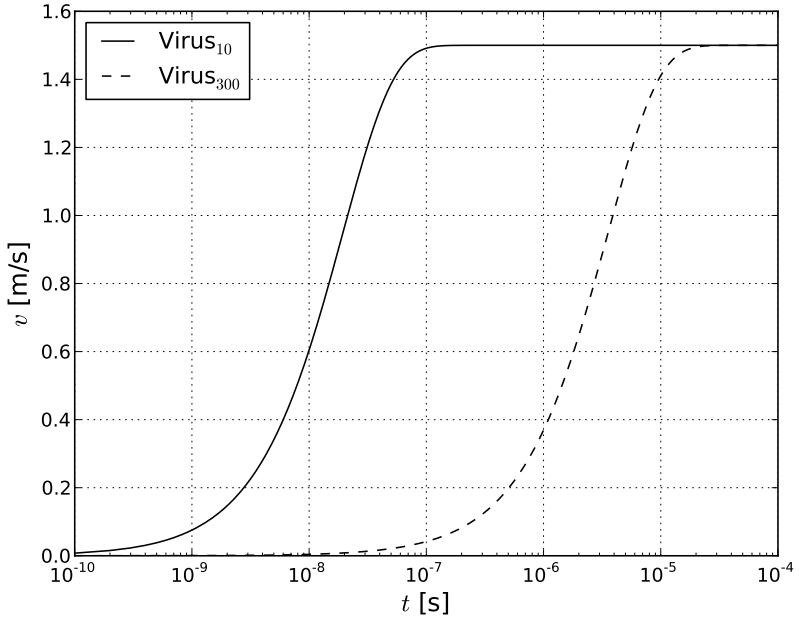
$$C(v_m - v) = m \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} \tag{15.5}$$



Slika 15.9: Vpliv sil toka fluida na največji virus.

kjer se v nanaša na hitrost virusa, ki ima maso m. Masa virusa, ki ima maksimalno velikost, $m_{300} = 17,0 \cdot 10^{-18}$ kg in dobljena masa najmanjšega virusa je $m_{10} = 0,63 \cdot 10^{-21}$ kg. Enačbo (15.5) je možno rešiti analitično, enačba (15.6). Rezultat je prikazan na sliki 15.10.

$$v(t) = v_m \left(1 - \mathrm{e}^{-\frac{C}{m}t}\right) \tag{15.6}$$



Slika 15.10: Hitrost virusa v odvisnosti od časa.

Nadalje, aksialno gibanje virusa, enačba (15.7), je možno izračunati s še enkratno integracijo enačbe (15.6).

$$x(t) = v_m \left[t + \frac{m}{C} \left(\mathrm{e}^{-\frac{C}{m}t} - 1 \right) \right] \tag{15.7}$$

Manjši, oziroma najmanjši virus doseže okrog 99 % hitrosti toka fluida v času $8,9 \cdot 10^{-8}$ s in 99,9 % v času $1,3 \cdot 10^{-7}$ s. Pri velikem, oziroma največjem virusu je vztrajnost večja in posledično tudi čas. 99 % hitrosti tokovnice doseže v času $1,6 \cdot 10^{-7}$ s in 99,9 % v $2,4 \cdot 10^{-5}$ s.

15.4.2 Vpliv gibanja fluida na gibanje delca v radialni smeri

Lahko se zgodi, da je aksialna smer gibanja prevladujoča, ko sila fluida deluje na absolutno mirujoči virus, vendar se praktično takoj pojavijo tudi sile v radialni smeri – smeri pravokotno na tok fluida. Analize, ki smo jih izpeljali z aksialno silo na stacionarni virus, kažejo na to, da sila deluje tudi v radialni smeri. Slednja se ne pojavi, če je virus lociran v centru cevi, ker je delovanje toka simetrično. Če je stacionarni virus postavljen izven centra cevi, se pojavi, zaradi porazdelitve tlakov, ki ga diktira profil hitrosti fluida v cevi, enačba (15.3), radialna sila, ki deluje proti središču cevi.

Ta hip se zdi, kot da filtracija v ravnem kanalu ni mogoča, ker na stacionarni virus delujejo sile v smeri centralne osi kanala. Za trenutek poglejmo vpliv toka na virus v smislu tangencialno usmerjenih tlakov na površini virusa, ki so posledica tako profila hitrosti v cevi kot tudi viskoznosti fluida, ki omogoča sicer omejene tangencialne napetosti v fluidu. Ugotovimo lahko, da je porazdelitev tangencialnih tlakov taka, da začne virus rotirati. Če se virus nahaja med centralno osjo cevi in zgornjo steno cevi, virus rotira v nasprotni smeri urinega kazalca (negativna smer). Če se pa nahaja na drugi strani, pa začne rotirati v smeri urinega kazalca (pozitivna smer), slika 15.16. Rotacija virusa generira drugačno porazdelitev tlakov v normali smeri na steno virusa, ki je v svoji rezultanti usmerjena stran od centralne osi cevi.

Imamo torej dva mehanizma, ki generirata sile v radialni smeri:

- Obtok fluida okoli virusa generira radialno silo, ki je usmerjena v sredino cevi.
- Isti mehanizem generira tudi tangencialne sile na obodu virusa, ki ga začnejo rotirati.
- Rotacija pa ustvarja porazdelitev tlakov v normalni smeri na obod virusa, ki virus potiskajo stran od srednjice cevi – Magnusov efekt.

Na začetku gibanja virusa, ko rotacije še ni ali pa je zelo počasna, prevladuje 1. mehanizem. Rotacijska vztrajnost virusa (masni vztrajnostni moment) je relativno majhna in hitrost rotacije se hitro povečuje. Takrat pa prevladuje 2. mehanizem, ki pošlje virus do stene cevi. Mehanizem je grafično prikazan na sliki 15.16.

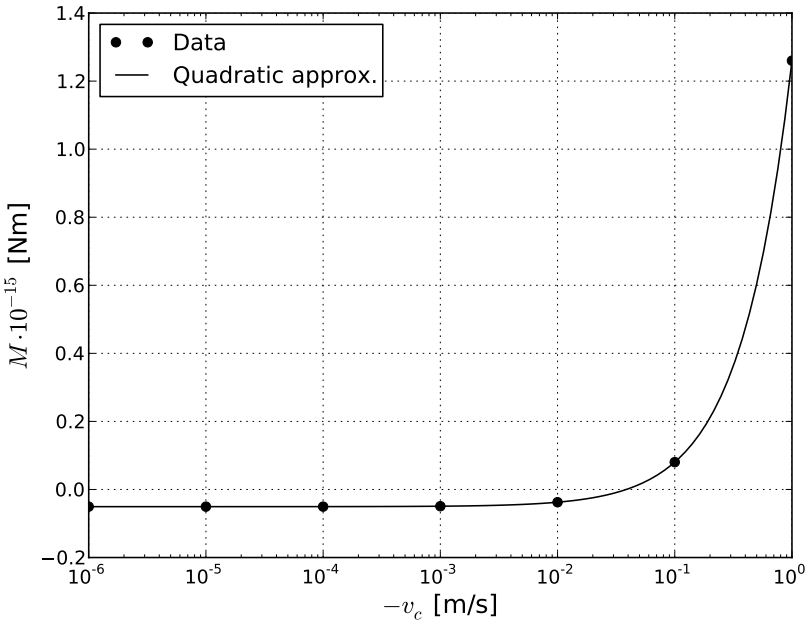
Ker se ta pojav v maski precej razlikuje od pojave Mangusovega efekta, na primer, pri igri z žogo, kjer je rotacija žoge eksogen pojav, smo ta efekt imenovali Jakšićev efekt, saj je rotacija endogen pojav. Model kaže ta učinek tako, da je filtracija možna celo v primeru, ko je kanal popolnoma raven. Izjeme so delci, ki se gibljejo natančno po centralni osi kanala, kot je že zgoraj omenjeno.

Poglejmo si princip filtriranja z Jakšićevim efektom bolj podrobno. Upoštevamo, da je virus nad srednjico cevi. V začetku je moment negativen in popolnoma konstanten. Moment se povečuje s povečevanjem kotne (obodne) hitrosti virusa. Očitno je, da ni

mogoče doseči pozitivno vrednost momenta pri visoki vrednosti kotne hitrosti. To je posledica enostavnega dejstva, da moment, ki povzroči rotacijo virusa in spremembo predznaka momenta v primeru, ko se zmanjšuje hitrost rotacije virusa. Točka ničelnega momenta je točka dinamičnega ravnotežja. Predpostavka torej je, da bo virus rotiral s konstantno kotno hitrostjo, čigar hitrost je definirana z ničelnim momentom. Moment je aproksimiran z enačbo polinoma drugega reda, enačba (15.8), kot je prikazano na sliki 15.11.

$$M(\omega) = a\omega^2 + b\omega + c \tag{15.8}$$

kjer parametri pomenijo: M moment, ki ga ustvarja tok fluida, ki deluje na virus, ω kotna hitrost virusa, a, b, c parametri aproksimacije, slika 15.11.



Slika 15.11: Opis vpliva toka fluida na moment velikega virusa, kot funkcija rotacije slednjega.

Uporabljen je drugi Newtonov zakon za rotacijo trdnega telesa, za generiranje enačbe gibanja za rotacijo virusa.

$$\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = \frac{M(\omega)}{J} = A\omega^2 + B\omega + C \tag{15.9}$$

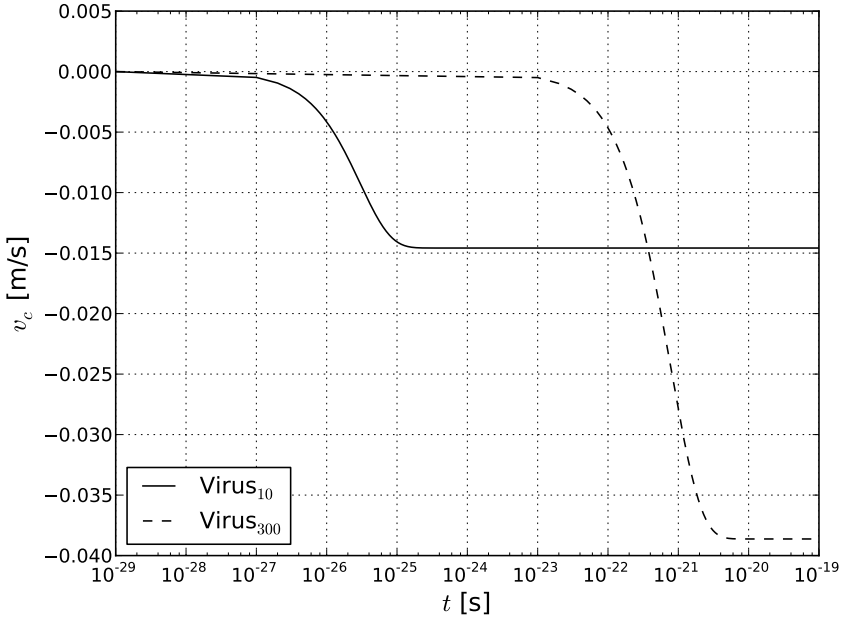
kjer so J moment vztrajnosti virusa in A, B, C parametri aproksimacije podeljeni z J. Moment vztrajnosti J največjega virusa je $1,53 \cdot 10^{-31}$ kg.m^2 in najmanjšega virusa $6,9 \cdot 10^{-39}$ kg.m^2. Enačbo (15.9) je možno rešiti analitično.

$$\omega(t) = \frac{D}{2A} \tanh\left[\operatorname{arctanh}\left(\frac{B}{D}\right) - t\frac{D}{2}\right] - \frac{B}{2A} \tag{15.10}$$

kjer sta t čas in D konstanta, definirana z enačbo $D = \sqrt{B^2 - 4AC}$. Virusna doseže končno kotno hitrost v mejnem primeru, ko gre $t \to \infty$.

$$\omega_{max} = \frac{-D - B}{2A} \tag{15.11}$$

Končno obodno hitrost izračunamo kot $v_{c_{max}} = \omega_{max} R$, kje je R radij virusa. Vrednost končne (maksimalne) obodna hitrost za večji virus je $v_{c_{max}}$ = 0,0386 m/s in za manjši virus je 0,0146 m/s kar je okrog 4 % za večji in 1,5 % za manjši virus hitrosti zraka pri vhodu v kanal. Kar je zalo pomembno je to, da se virus doseže končno kotno hitrostjo in s tem obodno hitrost rotacije $v_{c_{max}}$ v zelo kratkem času, skoraj hipno, glej sliko 15.12.



Slika 15.12: Obodna hitrost virusa kot funkcija časa.

Radialna sila je izračunana in aproksimirana na podoben način kot moment, slika 15.13. Ob kombinaci s kotno hitrostjo, lahko radialno silo prikažemo kot funkcijo časa, slika 15.14. Sila postane konstantna, ko virus doseže končno kotno hitrost.

Analize smo ponavljali za različne začetne lege virusov, slika 15.13, kjer so prikazane točke rezultatov analiz in njihova kvadratna aproksimacija, enačba (15.12).

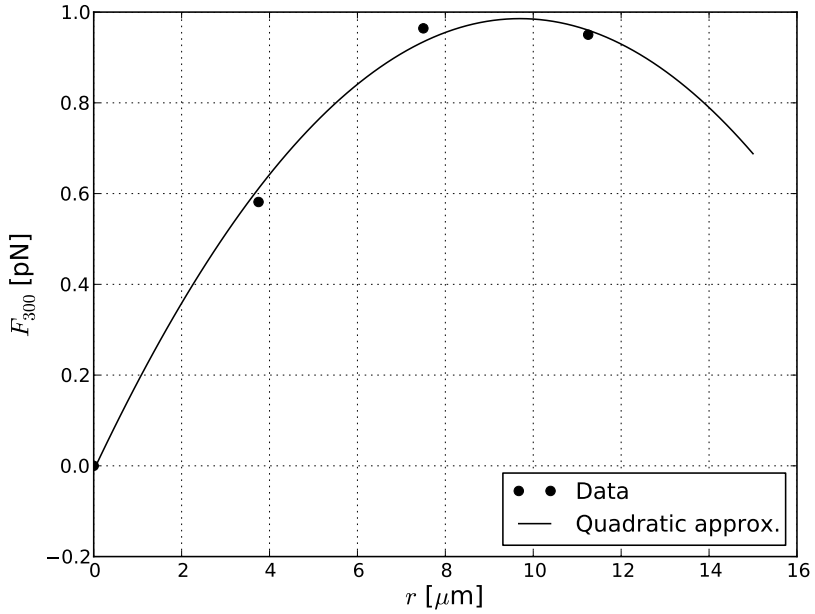
$$F(y) = ay^2 + by + c \tag{15.12}$$

kjer so F radialna sila na virusu, y premik virusa v radialni smeri in a, b, c parametri aproksimacije. Ti podatki so vzeti za izračun kinematike virusa v radialni smeri. Ponovno smo uporabili drugi Newtonov zakon.

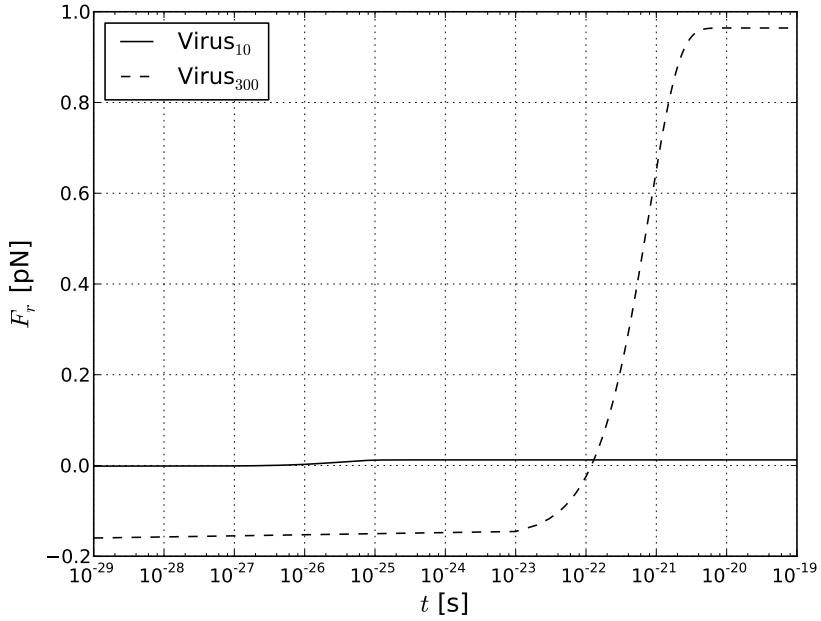
$$\frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}t^2} = \frac{F(y)}{m} = Ay^2 + By + C \tag{15.13}$$

kjer so m masa virusa, A, B, C parametri aproksimacije deljeni z maso m. Enačbo je sicer možno rešiti analitično, vendar tu predstavljamo numerično integracijo diferencialne enačbe (15.13), ki je prikazana na sliki 15.15.

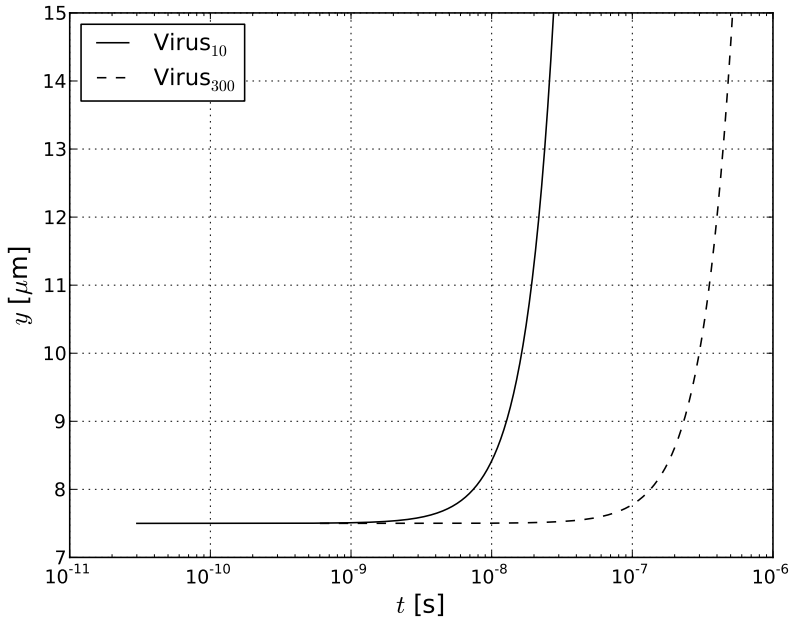
Zelo zanimiva je primerjava slike 15.10 s sliko 15.15. Lahko zaključimo za večji virus, da je ujet (filtriran) v steno kanala v času $5,1 \cdot 10^{-7}$ s in, da je za manjši virus čas filtracije približno $2,7 \cdot 10^{-8}$ s. Aksialna hitrost večjega virusa v času zajetja na steno kanala je le 0,15 m/s, kar je le 10 % njegove maksimalne aksialne hitrosti in njegova pot v aksialni smeri je približno $4,0 \cdot 10^{-8}$ m, kar je tri velikostne razrede manj kot je dolžina njegove poti v radialni smeri. Diagram se nekoliko razlikuje za manjši virus. On doseže



Slika 15.13: Radialna sila pri pozicijah virusa od centralne linije kanala navzgor za veliki virus.



Slika 15.14: Radialna sila kot funkcija časa.



Slika 15.15: Radialna pot virusa.

0,85 m/s, kar je okrog 57 % aksialne hitrosti in se premakne približno $1,4 \cdot 10^{-8}$ m v aksialni smeri, kar je ponovno tri velikostne razrede manj kot v radialni smeri. Iz povedanega sledi, da se virus filtrira na steno cevi izredno hitro.

Mehanizem filtracije, ki je predstavljen tukaj, je baziran na pretoku fluida, ki povzroči rotacijo okroglega objekta. Ta mehanizem je povezan z Magnusovim efektom. Velja tudi v primeru ukrivljenega kanala oziroma cevi, vendar za laminarni pretok fluida. To stanje, (oziroma mehanizem), omogoča učinkovit način filtracije virusov in mikrobov.

15.5 Razparava o mehanizmu filtracije v medicinskih maskah

15.5.1 Povzetek filtracije v medicinskih maskah

Teorija filtracije, ki je tukaj prikazana, predpostavlja, da zrak, ki teče skozi medicinsko masko, dejansko teče skozi cevi. To predpostavko potrjujeta teoretična in eksperimentalna dognanja z uporabo *Jakšićeve metode za ugotavljanje števila, velikosti in porazdelitvi por v ploskih tekstilij*, poglavje 8. Laminarni tok fluida skozi cev ima parabolično obliko porazdelitve hitrosti. Profil hitrosti omogoča samodejno ustvarjanje rotacije okroglih ali približno okroglih delcev. Vrtenje delca se začne takoj, ko delec pride v cev in se vzpostavi parabolični profil hitrosti fluida. Samo-inducirano vrtenje delca, ta fenomen smo imenovali *Jakšićev efekt*, pa omogoča filtracijo slednjega.

Teorijo filtracije smo preverili z numeričnim eksperimentom in z opazovanjem filtracije delcev iz odpadnih plinov v industriji. V slednjem primeru se za filter medij poleg elektrofiltrov uporablja tudi iglane vlaknine, pred vsem v obliki vreč. Iglanje je uporabljeno zaradi medsebojne povezave vlaken v vlaknini. Na mestu, kjer je igla prebila vlaknino in je potem bila izvlečena, se ustvari luknja, oziroma ravna cev, ki ima premer do 2 mm. Mehanizem filtracije v tem primeru, lahko prikažemo v naslednjih odstavkih.

- Delec, ki se nahaja na centralni liniji cevi ostane na njej dokler ne trči z drugim delcem, kar je malo verjetno, ali dokler cev ne spremeni smeri.

- Ko delec pride na površino vlakna, ki tvori steno kanala, ali če zapusti tok fliuda in pride v prazni prostor med vlakni, je njegova kinetična energija premajhna, da bi se delec ponovno vrnil v tok fluida.
- Delec, čigar hitrost zaostaja za hitrostjo toka fluida, ne podleže Brownovem gibanju.
- Majhni delec, ki se nahaja v praznem prostoru med vlakni, podleže Brownovem gibanju in se filtrira v procesu difuzije, na površino vlakna, ki je mejna stena praznega prostora
- Okrogli ali približno okrogli delci se začenjajo rotirati, če se ne nahajajo na centralni osi cevi.
- Rotacija delca je povzročena zaradi distribucije hitrosti fluida in posledično tlaka na površino delca; obenem je vse posledica parabolične hitrosti toka fluida v kanalu. Delec dejansko v zelo kratkem času doseže konstantno vrednost kotne hitrosti in ta povzroči radialno silo, ki vleče delec proti steni kanala (Mangusov efekt). Glavna razlika z normalnim vplivom Magnusovega efekta in tega, ki ga povzroča rotacija virusa je v endogenem viru (samo-povzročitvi – *Jakšićev efekt*) in ne eksogenom vzroku.

Pri filtraciji v medicinski maski lahko dodamo:

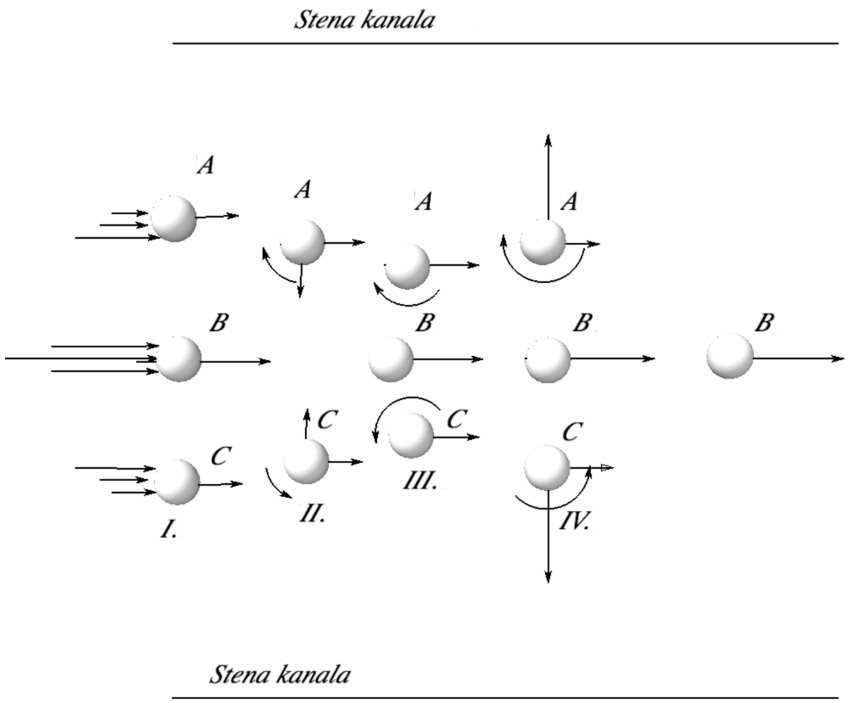
- Volumen praznih prostorov in kanalov je enoten prostor med vdihom in izdihom, zaradi tega lahko virusi neovirano prehajajo iz praznega prostora v cev in obratno.
- Virusi, ki se ne filtrirajo v času vdihavanja zraka ali pa so migrirali iz praznih prostorov v cevi za časa zatišja, ki traja med vdihom in izdihom, bo v času izdiha sledil isti poti kot pri vdihu, le v nasprotni smeri.
- Pretok zraka skozi cev je vsaj delno pospešen in upočasnjen zaradi dihanja subjekta oziroma uporabnika maske. To pa povzroča pojav sil, ki vplivajo na virus.
- Konfiguracija cevi v vlaknini je zelo kompleksna. Mnogokrat se spreminjata smer in premer slednje. Natančne geometrije cevi ne poznamo, razen najmanjšega hidravličnega premera, ki ga ugotovimo s pomočjo *Jakšićeve metode za ugotavljanje števila, velikosti in porazdelitve por v ploskih tekstilijah*.
- Če ima virus cilindrično obliko, splošno ne rotira, oziroma rotira le okoli svoje osi, kar je dovolj za filtracijo. Če je pa virus nepravilne oblike, pa je verjetnost, da bi prišel do stene cevi le s pomočjo Jakšićevega efekta, majhna. Zaradi tega je ta virus težko filtrirati v cevi. Premer kanala je precej večji kot premer virusa. Vztrajnost virusa tudi igra vlogo pri njegovi filtraciji v filter mediju (maski).

Prikazana analiza je omejena na izravnano cev in na idealno sferični virus. Ugotovili smo, da je dolžina kanala dovolj dolga, da podpira stacionarni laminarni tok. Obstaja precej parametrov, ki vplivajo na kompleksni proces filtracije. Nekatere med njimi je težko oceniti, nekateri niso upoštevani, da se lahko prikaže osnovni mehanizem filtracije sferičnih in približno sferičnih delcev v medicinski maski. Zanimivi parametri, ki dodatno vplivajo na proces filtracije so:

- koncentracija delcev;

- medsebojna interakcija delcev;
- porazdelitev velikosti delcev;
- različne geometrične oblike delcev;
- različne debeline in kakovost vlaken zgornje in spodnje plasti maske glede na vmesno filtracijsko plast;
- debelina vlaken;
- prečni prerez vlaken;
- maksimalni hidravlični premer por in porazdelitev por, dimenzije votlin in
- vzorec dihanja kot funkcija stanja subjekta.

Slika 15.16 prikazuje dogajanje na začetku cevi in v sami cevi. Fluid ima smer gibanja od leve proti desni. Na začetku cevi je le simbolično prikazana hitrost fluida z dolžino puščic na vsakem virusu.



Slika 15.16: Ilustracija virusa v tokovnici zraka, ki se giblje skozi kanal.

I. Trije okrogli delci se nahajajo pri vhodu v cev (poro). Tukaj se vidi smer in hitrost oziroma profil toka fluida. Največja hitrost se nahaja na ekvatorju delca B (os cevi). Porazdelitev hitrosti v kanalu je parabolična. Ko se pomikamo radialno od centra cevi proti stenam cevi se hitrost fluida zmanjšuje. Ta hitrost je enaka nič na površini stene cevi.

II. Parabolični profil porazdelitve hitrosti fluida po prerezu cevi ima trojni vpliv na delec, ki je postavljen izven srednjice cevi.

1. Fluid generira preko normalnih tlakov na obodu delca aksialno silo, ki potiska delec v smeri toka fluida. Tu sama oblika profila hitrosti ne vpliva na usmerjenost aksialne sile, le na njeno velikost. Bližje roba cevi je delec, manjša je slednja.
2. Zaradi paraboličnega gibanja fluida, se tangencialni tlaki na površini delca porazdelijo tako, da poženejo rotacijo delca. Le-ta pa preuredi porazdelitev normalnih tlakov tako, da radialna sila kaže proti steni cevi. S povečevanjem rotacijske hitrosti delca se povečuje tudi radialna sila v smeri stene cevi.
3. Parabolični profil hitrosti fluida povzroči tudi porazdelitev normalnih tlakov na obodu okroglega delca, ki rezultirajo v aksialni sili, ki sili delec proti srednjici cevi

Vpliva 2 in 3 tekmujeta za prevlado. Ker je profil hitrosti konstanten, mehanizem 3 generira vedno približno enako silo. Medtem pa je mehanizem 2 spremenljiv, kotna hitrost delca se povečuje in s tem se povečuje tudi radialno sila, ki hitro po velikosti preseže aksialno silo mehanizma 3 in usmeri delec proti steni cevi. Torej, s povečevanjem hitrosti rotacije se velikost radialne sile, ki je usmerjena v os cevi, zmanjšuje, do trenutka, ko doseže nično vrednost (lega III). Vse to se dogaja v zelo kratkem času.

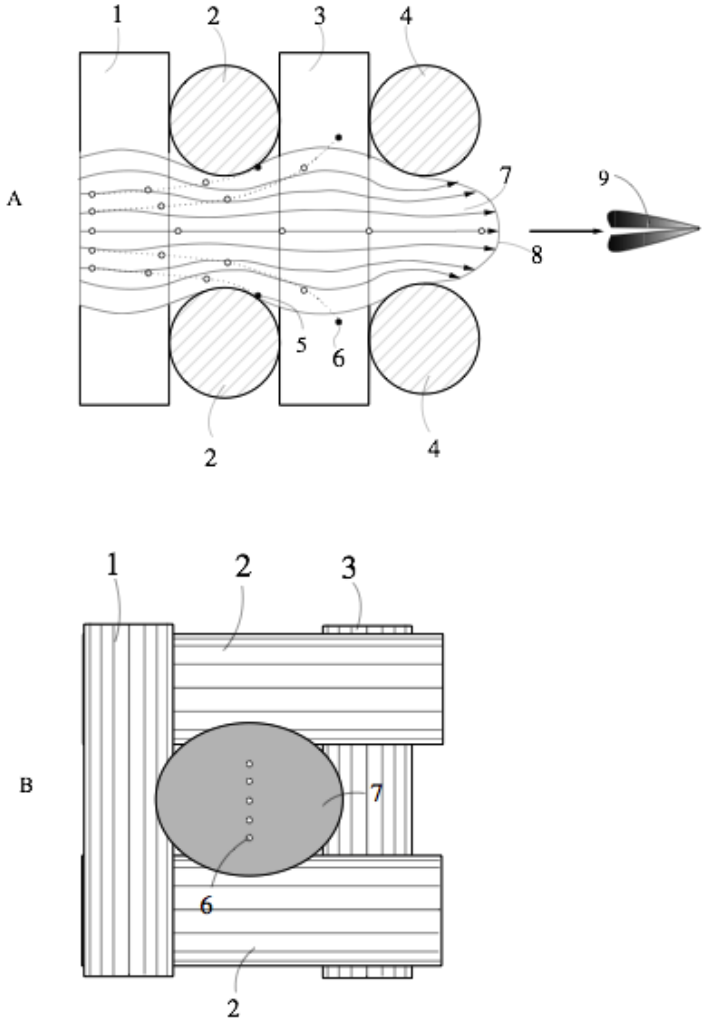
III. Do tu deluje radialna sila v smeri osi cevi. To je razvidno iz lege delca A v legi III v primerjavi z legama delca A I in II. V legi III je delec bližje osi kanala kot v legi I in II. Delec še vedno rotira vse hitreje in smer radialne sile se obrne k steni cevi. V legi III imamo rotacijo delca in nično radialno silo.

IV. Zaradi vse večje rotacije delca, potiska sedaj radialna sila, ki je posledica porazdelitve tlakov na obodu delca, slednjega proti steni cevi. Kotna hitrost delca se povečuje do končne vrednosti. Isto velja za radialno silo, ki sedaj kaže v smeri stene cevi.

Proces filtracije v času vdihavanja in izdihavanja je prikazan na slikah 15.17 in 15.19, kjer oznake pomenijo: A – prečni prerez, B – pogled vzdolž kanala, 1,2,3,4 – vlakna, 5 – delec, ki je bil ujet na površini vlakna, 6 – delec, ki je bil potisnjen v votlino, 7 – tokovnice fluida, 8 – profil hitrosti toka fluida, 9 – usta uporabnika maske.

Filtracija v procesu vdihavanja je prikazana na sliki 15.17. Tukaj je pet delcev, ki so prikazani na vhodu v kanal. Eden od njih se nahaja na srednjici cevi (začetna lega). Ta virus se giblje najhitreje v aksialni smeri, zaradi oblike profila hitrosti toka fluida. Drugi virusi se gibljejo tudi v aksialni smeri predvsem pa v radialni smeri zaradi Jakšićevega efekta. To je razvidno na drugi poziciji, ki predstavlja drugi vpogled. V tretji poziciji so virusi precej oddaljeni od srednjice cevi. Virus, ki je v začetni fazi bil na srednjici cevi, še zmeraj vztraja na njej toda precej spredaj. Drugi virusi se gibljejo aksialno in tudi radialno proti steni kanala. Virusa, ki sta bila v začetni fazi najbolj oddaljena od srednjice cevi, sta filtrirana na steni kanala. V peti poziciji sta filtrirana še preostala dva virusa. Virus, ki je lociran na srednjici cevi, se nahaja še zmeraj na njej in ga bo uporabnik maske vsak čas vdihnil v pljuča. To pomeni, da tukaj ni delcev večjih kot 10 μm, ki so zapustili tok fluida in bi se lahko filtrirali v procesu difuzije. Očitno je, da proces difuzije tukaj ni uporabljen.

Mirovanje zraka v času med vdihom in izdihom (ni toka fluida v cevi) je prikazano na sliki 15.18. Ker ni toka fluida v kanalu, je stanje v kanalu in votlinah enako. Ker vmes



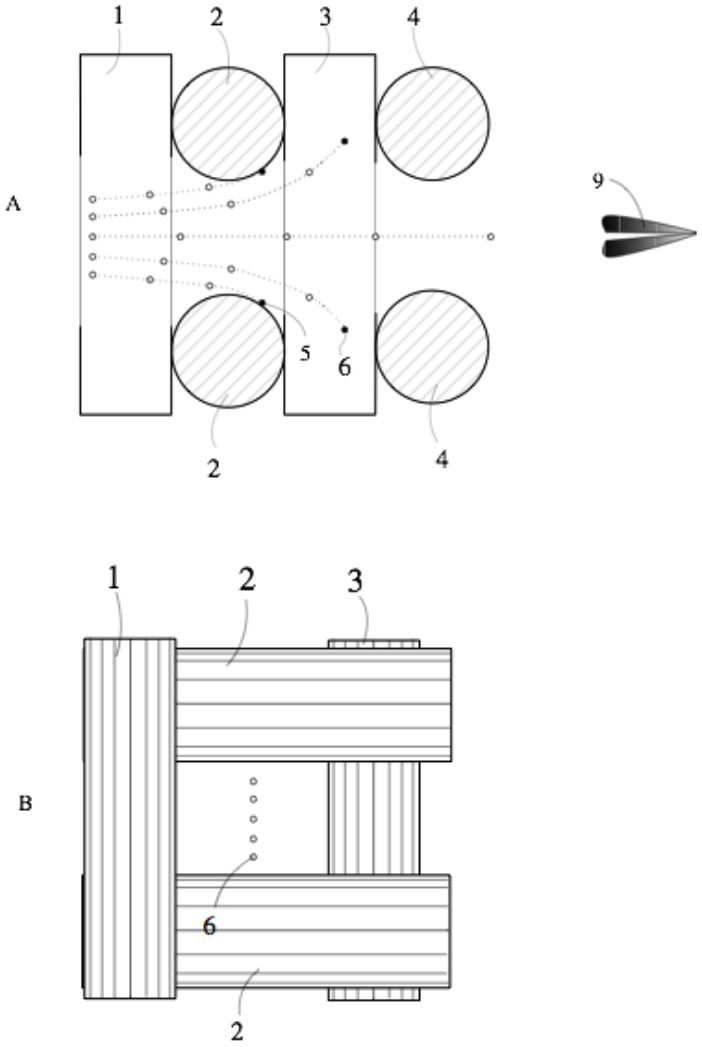
Slika 15.17: Vdihavanje – ilustracija gibanja majhnih delcev, ki podležu Brownovem gibanju v mirnem zraku.

ni preveč pregrad, je možno, da majhni delce pridejo iz kanala v votline in obratno v procesu difuzije. Filtracija je možna s pomočjo Brownovega gibanja.

V sliki 15.19 je gibanje delcev podobno kod na sliki 15.17. Razlika je v tem, da se tok fluida z delci giblje v nasprotni strani.

15.5.2 Povzetek o mehanizmu filtracije v medicinskih maskah

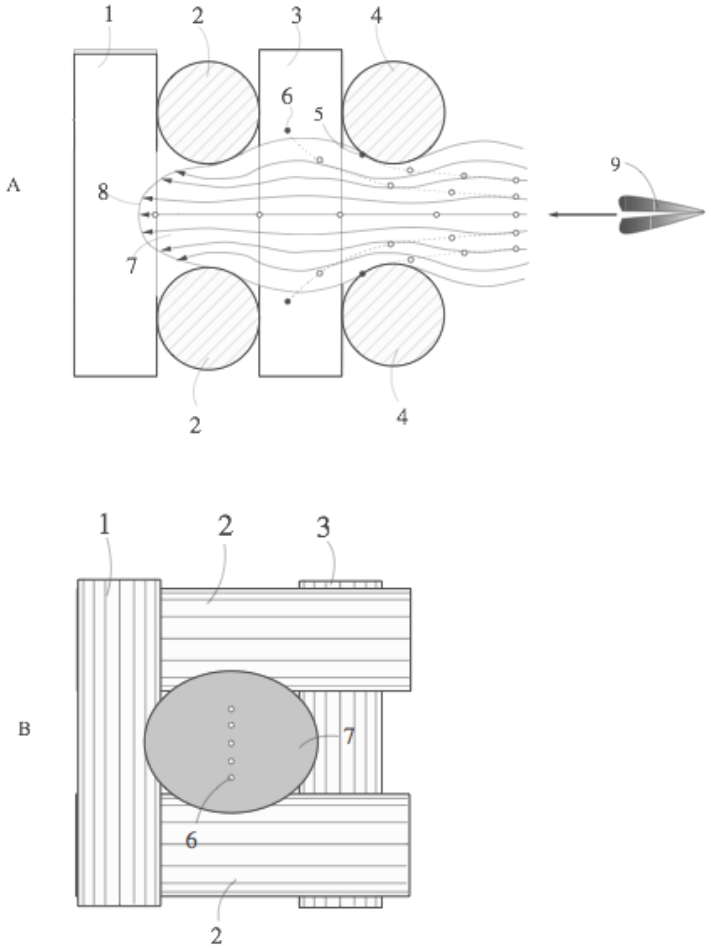
Nov pogled na problem filtracije je omogočen z razvojem in uporabo Jakšićeve metode za ugotavljanje števila, velikosti in porazdelitve por v ploskih tekstilijah. Cevi gredo z ene površine ploske tekstilije na drugo. Vrednosti prečnih presekov cevi so definirane s porazdelitvijo hidravličnih premerov por. Dokazali smo, da je pretok zraka skozi pore laminaren in, da je problem velikosti v domeni mehanike kontinuiteta. Laminarni pretok zraka skozi cev formira poseben profil hitrosti toka fluida, ki povzroča pojav rotacije sferičnega virusa. Za razliko od Magnusovega efekta, ki se pojavi zaradi zunanjega vpliva in, ki povzroči rotacijo, na primer, igra z žogo. Pri medicinski maski to vlogo prevzame oblika profila toka fluida, kot notranji dejavnik procesa. Virus ima pasivno vlogo. Aktivno vlogo ima tok fluida. Ta povzroča rotacijo virusa. Profil toka fluida



Slika 15.18: Stanje med vdihom in izdihom, ko v kanalih zrak miruje.

ima maksimalno hitrost na osi kanala in nično hitrost na steni kanala. Zaradi rotacije virusa v smeri urnega kazalca, odnaša virus zrak na zgornji polobli in obenem zavira gibanje zraka na spodnji polobli zgornjega virusa. Zaradi tega se zmanjšuje aksialna sila, ki deluje v smeri osi cevi. Ta proces traja celoten čas toka fluida. Slej ko prej mehanizem regeneriranja radialne sile zaradi rotacije virusa, ki kaže proti steni cevi, preglasi mehanizem regeneracije aksialne sile, zaradi oblike profila toka fluida, ki kaže proti srednjici cevi. Tako se pojavi rezultanta radialne sile, ki deluje v smeri stene kanala. Ta sprememba se zgodi v zelo kratkem času. Virus se filtrira na površino enega vlakna, ki je del površine cevi ali pa vpadne v prazen prostor (votlino) med vlakni, ki se nahaja izven cevi. Na poziciji III, slika 15.16, je prikazana sprememba smeri gibanja virusa, ki se od tu naprej giblje proti steni kanala. Ta specifičen pojav gibanja delca smo imenovali Jakšićev efekt.

Numerične raziskave z uporabo izračuna približkov dinamike toka fluida in klasične Newtonove mehanike, kažejo, da je Jakšićev efekt fenomen, ki se hitro pojavi in je potem takem učinkovit mehanizem za filtracijo sferičnih ali približno sferičnih virusov celo v ravnih kanalih, razen virusov, ki so na srednjici cevi.



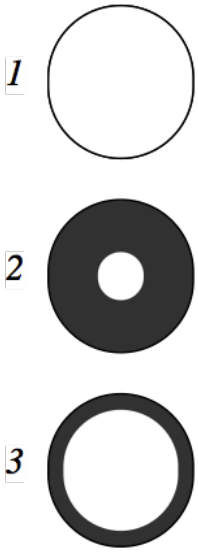
Slika 15.19: Izdihavanje – ilustrirano je gibanje majhnih delcev.

Tukaj je tudi nekaj vprašanj, ki so v tej teoriji namenoma zanemarjena, z razlogom, da smo lahko pokazali osnovni mehanizem filtracije, ki se pomembno razlikuje od klasične teorije filtracije na enem vlaknu. Vprašanja so seveda pomembna za razumevanje celotnega fenomena filtracije. Ne podajamo odgovorov na spodnja vprašanja, želimo le vzpodbuditi zavedanje o kompleksnosti področja.

- Kaj se dogaja v slabo oblikovanimi stenami kanala, ki jih tvorijo deli dolžine vlaken?
- Kaj se dogaja v votlinah med vlakni zunaj kanala?
- Kako se delci izločijo iz toka fluida v votline?
- Kolikšen delež delcev se izloči v votlinah?
- Kako medsebojni vpliv delcev vpliva na proces filtracije?

15.5.3 Primer filtriranja prahu v cementarni

Slika 15.20 se nanaša na filtriranje prahu v Cementarni Trbovlje okoli leta 1980 in predstavlja posredni dokaz veljavnosti tukaj opisane teorije filtracije virusov v medicinski maski.



Slika 15.20: Filtracija v Cementarni Trbovlje skozi vreče, ki so izdelane iz iglane vlaknine. Legenda: 1 – luknja v vlaknini, ki je posledica iglanja, pred uporabo, 2 – stanje pred izpihovanjem filtriranega prahu, 3 – videz luknje po izpihovanju.

Pozicija 1 predstavlja kanal na novi filtracijski vreči. V kanalu ni niti enega delca prahu. V filter komori je vreča nasajena na posebno ogrodje. V ogrodju je montirana izpihovalna šoba. V filter komori je veliko število vreč. Vreča je izdelana iz vlaknine, ki je stabilizirana z vlakni, ki so jih postavile igle pravokotno proti notranji in druge proti zunanji površini vlaknine. Luknje v vlaknini so posledica delovanja igel. Igla je široka okrog 2 mm, debela okrog 0,5 mm in je nekaj centimetrov dolga. Luknja je idealizirana (pozicija 1). Dejansko ni idealno okrogla. Daleč od tega. Vendar je največja širina luknje okrog 2 mm, če ni celo nekoliko večja. Ko gre igla skozi vlaknino, pusti za sabo raven kanal.

Koncentracija prašnih delcev v zraku je relativno visoka. Zaradi tega lahko pride do medsebojnega trka delcev v kanalu. Delec, ki se giblje po centralni osi kanala se giblje hitreje kot delci, ki so izpostavljeni Jakšićevem efektu. Zaradi trka z drugim delcem, lahko je delec vržen proč od centralne linije kanala. Ne glede na to, je situacija prikazana na poziciji 2 realna. Prah se izloča sproti na stenah kanala in pozneje na stenah ki jih tvorijo filtrirani delci. Še zmeraj je odprta centralna os kanala in nekaj prostora okoli te osi. Pozicija 2 kaže precej zamašeno luknjo. Toda še zmeraj je v srednjem delu luknje nekaj prostora, ki ni zamašen z prašnimi delci. Ta pozicija je dokaz, da je delce, ki so bili na centralni osi luknje, ali zelo blizu le te, zračni curek odnesel s sabo v okolje. Zaradi tega je učinek filtracije le okrog 90 %.

Zaradi nalaganja prahu na stene kanala se zmanjšuje zračna propustnost vreč. Na sliki 15.20 je predpostavljeno, da je vlaknina dovolj zamašena in da je potrebno uporabiti proti tlak, ki izpiha prah iz vreč. Tretja pozicija kaže situacijo po izpihovanju prahu iz vlaknine. Na tej poziciji je prikazano, da je nekaj prahu, ki se je izločil iz zračnega curka neposredno na površino kanala (luknje) še zmeraj ostal v kanalu po izpihovanju. Ves prah ni mogoče izpihati, ker ga je nekaj v votlinah nekaj na površinah vlaken, ki tvorijo steno kanala. Tukaj moramo upoštevati dejstvo, da je hitrost zračnega toka na centralni osi kanala res velika. Toda ta hitrost se počasi zmanjšuje in doseže hitrost, ki ni zadostna za nadaljnjo učinkovito filtracijo. Zaradi tega se uporablja zračni tlak, ki uspešno izpiha prah s površin vreč. Ta tlak je okrog 4 bare.

Pri opazovanju slike 15.20 lahko ugotovimo, da se delci, ki niso na osi kanala, pretežno gibljejo proti steni kanala, kar pomeni tudi, da ti delci rotirajo. Delci prahu se precej večji kot virusi. Poleg tega je njihova geometrična oblika precej naključna. Ni nobenega vzroka, da bi delci imeli pravilno sferično obliko. Iz tega se da sklepati, da je večina delcev, ki so odmaknjeni od centralne linije kanala izpostavljeni rotaciji ne glede na njihovo geometrično obliko. To pomeni, da so tudi v tem primeru izpolnjeni pogoji za aktiviranje Jakšićevega efekta ki povzroča rotacijo delcev ne glede na njihovo geometrično obliko. Ta ugotovitev je s praktičnega vidika zelo pomembna.

15.6 Seznam oznak poglavja

Oznaka	Enota	Opis
A		regresijski koeficient
a		regresijski koeficient
B		regresijski koeficient
b		regresijski koeficient ali eksponent
C		konstanta
C		regresijski koeficient
c		regresijski koeficient
D		konstanta
D_{max}	μm	hidravlični premer največje pore
d_{max}	μm	povprečni hidravlični premer por v prvem velikostnem intervalu (največje pore)
d_{min}	μm	povprečni hidravlični premer por v zadnjem velikostnem intervalu (najmanjše pore)
d_p	μm	povprečni hidravlični premer por vzorca
d	μm	karakteristična-linearna dimenzija (hidravlični premer pore ali premer delca ali premer vlakna)
η	Pa.s	dinamična viskoznost zraka ali splošno fluida
F_a	N	aksialna sila
Kn		Kundsenovo število
k_B	kg.m^2/s^2.K	Boltzmannova konstanta
L	μm	širina velikostnih razredov por
L	μm	reprezentativna fizična dolžina v določenem območju
M	Nm	moment, ki ga ustvarja tok fluida, ki deluje na delec ali virus
m	kg	masa delca ali virusa
N		število velikostnih razredov por
NP		število por
P	%	povprečna hidravlična odprta površina za pretok zraka
p	Pa	tlak
ρ	kg/m^3	gostota zraka
Re		Reynoldsovo število
R	μm	radij cevi/kanala
r	μm	radij tokovnice v cevi/kanalu
σ	μm	premer delca
T	K	termodinamična temperatura
t	s	čas

Nadaljevanje na naslednji strani

Nadaljevanje s prejšnje strani

Oznaka	Enota	Opis
v	m/s	hitrost
v_0	m/s	začetna hitrost
v_m	m/s	največja hitrost
ω	rad/s	kotna hitrost delca ali virusa
ω_{max}	rad/s	maksimalna kotna hitrost delca ali virusa
x	m	pot delca ali virusa v aksialni smeri
y	m	pot delca ali virusa v radialni smeri

15.7 Literatura

[1] R. C. Brown. *Air filtration: an integrated approach to the theory and applications of fibrous filters.* Pergamon Press, Oxford, New York, 1993.

[2] I. M. Hutten. *Handbook of non-woven filter media.* Elsevier Ltd., Oxford, 2007.

[3] D. Jakšić and N. Jakšić. Assessment of porosity of flat textile fabrics. *Textile Research Journal*, 77(2):105–110, 2007.

[4] N. Jakšić and D. Jakšić. *Novel theoretical approach to the filtration of nano particles through non-woven fabrics. Woven fabric engineering.* InTech, Rijeka, 2012.

[5] A. Sharma. *Penetration, pressure drop, and wicking characteristics of NIOSH Certified P-100 and P-95 Filters under heavy DOP holding. Master´s thesis.* College of Engineering and Mineral Resources at West Virginia University, 2000.

[6] M. Zuurbier, G. Hoek, P. van den Hazel, and B. Brunekreef. Minute ventilation of cyclists, car and bus passengers: an experimental study. *Environmental Health*, 48:1–10, 2009.

[7] M. Widden. *Fluid Mechanics.* Macmillan Press, New York, 1966.

[8] U. D. Parashar, J. S. Bresee, J. R. Gentsch, and R. I. Glass. Rotavirus. *Emerging Infectious Diseases*, 4(4):561–570, 1998.

POGLAVJE 16

Tekstilije namenjene za zaščito pred balističnimi izstrelki in več–aksialne tkanine

Kazalo

16.1 Področja uporabe **322**
16.2 Karakteristike materialov za izdelavo zaščitnih oblačil **322**
16.3 Matematična analiza penetracije izstrelka **324**
16.4 Vpliv lastnosti tekstilij na upor penetraciji izstrelka **326**
16.5 Nekatere moderne rešitve na področju neprebojnih tkanin **328**
16.5.1 Nadaljnji razvoj tkanin za zaščito pred projektili 328
16.5.2 Material za izdelavo tetra aksialnih tkanin 332
16.5.3 Karakteristike tkanine, ki se sedaj uporablja za neprebojne jopiče 333
16.5.4 Prilagoditev konstrukcije tkanine optimalnim vrednostmi parametrov, ki se zahtevajo za neprebojne jopiče 335
16.6 Jakšićeva pet, šest in sedem aksialna tkanina, ki bi se lahko uporabile za izdelavo neprobojnih jopičev **335**
16.6.1 Uvod 335
16.6.2 Prednosti sedem aksialne tkanine v primerjavi s tetra aksialno tkanino 335
16.6.3 Osnovni načini penetracije pri zlomu, z vlakni ojačenih kompozitov 343
16.6.3.1 Uvod 343
16.6.3.2 Mehanizem prodiranja in zaviranja projektila v neprebojnem jopiču 344
16.6.3.3 Jakšićev aproksimativni postopek ugotavljanja potrebnega števila plasti tkanine za 100 % zaščito uporabnika neprebojnega jopiča 347

16.7 Medsebojna primerjalna analiza uporabnosti 2, 3, 4, 5, 6 in 7 aksialnih tkanin za izdelavo neprebojnih jopičev **350**
16.7.1 Bi-aksialna tkanina 350
16.7.2 Tri aksialna tkanina 351
16.7.3 Tetra aksialna tkanina 351
16.7.4 Pet aksialna tkanina 351
16.7.5 Šest aksialna tkanina 351
16.7.6 Sedem aksialna tkanina 351
16.7.7 Druga področja uporabe pet in sedem aksialnih tkanin 352
16.7.7.1 Primeri uporabe tetra-aksialnih tkanin v gradbeništvu 354
16.8 Seznam oznak poglavja **357**
16.9 Literatura **358**

16.1 Področja uporabe

V poglavju 6 smo razpravljali o projektiranju tekstilij, ki so namenjene za razne vrste oblačil. Pri tem smo zelo izčrpno obravnavali vlogo tekstilij kot toplotnega izolatorja. Toda oblačilo ima lahko tudi drugačno vlogo. Ta vloga je lahko zelo specifična – zaščita posameznih delov telesa pred manjšimi balističnimi izstrelki, ki so izstreljeni iz pištole, puške ali iz brzostrelke. Takšna vloga tekstilij je novejšega datuma. Zaščitne obleke so začeli izdelovati med drugo svetovno vojno. Te obleke so bile namenjene predvsem letalskemu osebju. Njihova osnovna vloga je bila, zaščita človeka pred letečimi izstrelki, pa naj so bili to balistični izstrelki, ki so prodrli v letalo ali pa drobci, ki nastanejo pri eksploziji protiletalskih granat. Izkušnje so pokazale, da je takšna zaščita precej učinkovita. Zaradi tega se je razvoj delov zaščitnih oblačil nadaljeval.

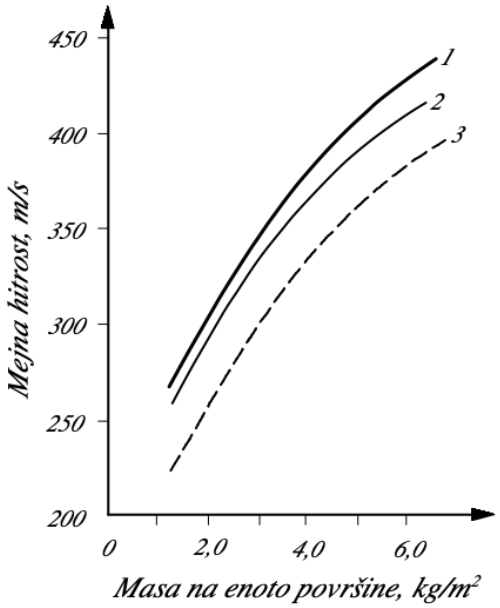
Če je na primer izstrelek izstreljen iz pištole in, če ima maso približno 8 g ter začetno hitrost čez 200 m/s, bo imel precejšnjo kinetično energijo. Takšen projektil prebije navadno obleko, prodre skozi telo in skozi nasprotno plast oblačila pride na drugo stran. Če zadene v močno kost, lahko tudi ostane v telesu. Iz izkušenj, žal vemo, da nekaj plasti oblačila ne pomeni resnejše ovire prodiranju balističnih izstrelkov. Delno pa obleka ščiti telo pred drobci, ki nastanejo pri eksploziji mine ali bombe, če kinetična energija takšnega delca ni velika. Očitno je, da bi izstrelke, ki imajo veliko gibalno količino oziroma kinetično energijo, lahko ustavila le veliko število plasti tkanine ali izravnanih niti nalepljenih na folijo in podobno. Če gre na primer za zaščitni jopič, bi moral biti debel nekaj centimetrov, kar ponavadi pomeni, več kot 20 plasti tkanine ipd. Takšen jopič – brezrokavnik iz najlonske tkanine, tehta več kot 6 kg in je zaradi velike mase težko uporaben v pehotnih enotah. Toda, ko gre za življenje nič ni pretežko. Pri motoriziranih in specialnih enotah ter letalstvu pa masa ne predstavlja velik problem. Tak brezrokavnik uporabljajo tudi varnostne sile (policija ipd.) v posameznih akcijah.

Na splošno je zelo težko uporabljati zaščitno oblačilo, če uporabnik proizvaja preveč toplote (marš, tek, počasna hoja na hrib ipd.), ker se organizem pregreva. Vendar velja, da je bolje biti pregret kot mrtev. Zato se negativni fiziološki učinki ignorirajo vsaj toliko časa, dokler se borbena sposobnost uporabnikov preveč ne zmanjša.

16.2 Karakteristike materialov za izdelavo zaščitnih oblačil

V začetni fazi razvoja se je uporabljal predvsem najlon, ki je pokazal boljše lastnosti kot naravna, ali kemična vlakna, razen naravne svile. Na sliki 16.1 so prikazane mejne

hitrosti izstrelka, ki je imel maso 17 gramov. Krivulja 1 se nanaša na svileno tkanino, ki ima maso 152 g/m^2, krivulja 2 na svileno tkanino, ki ima maso 339 g/m^2, in krivulja 3 na najlonsko tkanino, ki ima maso 441 g/m^2 [1, 2]. Preskušani so jopiči, ki imajo maso 1,2 do 6 kg/m^2. Pri masi jopiča 6,08 kg/m^2 je 40 plasti lažje svilene tkanine, pri masi jopiča 6,102 kg/m^2, izdelanega iz težje svilene tkanine, je le 18 plasti tkanine in pri masi najlonskega jopiča 6,174 kg/m^2 pa samo 14 plasti tkanine.



Slika 16.1: Mejne hitrosti izstrelka, pri kateri izstrelek ne prebije jopiča v odvisnosti od mase jopiča in uporabljene vrste vlaken.

V novejšem času so bila izdelana visoko modularna vlakna [3, 2], na osnovi aromatskih poliamidov, kot so Kevlar, Nomex, Twaron, Technora in vlakno X, ali na bazi polietilena – Spectra ipd. Ta vlakna so bolj odporna proti deformacijam, kot naravna vlakna. To je prikazano v preglednici 16.1.

Preglednica 16.1: Vrednosti nekaterih parametrov kakovosti različnih vrst vlaken, ki se uporabljajo za zaščito proti izstrelkom.

Vrste vlaken	Trgalna trdnost [mN/tex]	Raztezek pri pretrgu [%]	Modul] elastičnosti [mN/tex]	Hitrost širjenja zvoka [m/s]	Mejna hitrost izstrelka [m/s]
Najlon	795	18	3.540	3.000	380
Kevlar	29 2.031	4	35.400	9.400	500
Naravna svila	440	18	4.154	3.000	426
Vlakno X	2.650	6	35.400	9.400	500
Spectra	2.700	4	32.000	9.400	500

Mejna hitrost izstrelka se nanaša na tisto hitrost, pri kateri izstrelek še ne gre skozi plast tkanine, izdelane iz danega vlakna. Masa teh plasti je okrog 6 kg/m^2. Na splošno lahko rečemo, da sta Kevlar 39 in vlakno X zelo primerna za izdelavo delov oblačil, ki jih uporabljamo kot zaščito proti letečim izstrelkom. Toda, še boljše lastnosti ima Spectra.

Poleg tkanin se za zaščito pred izstrelki za posamezne dele zaščitnega jopiča uporabljajo tudi vložki iz plastike na katere so nalepljene izravnane niti v več plasti in smeri tako, da se vsaka plast v ravnini zasuče za določen kot.

Za enkrat ni popolnoma pojasnjen mehanizem deformacije preje pri udarcu izstrela. Zanimiva je medsebojna primerjava različnih materialov. Multi filamentno prejo lahko primerjamo celo z jeklom in kaže sorazmerno boljšo odpornost proti prehodu izstrelkov z ene na drugo stran zaščitne plasti. Primerjalni rezultati so prikazani v preglednici 16.2. Sicer, vlaknine niso primerne kot material za uporabo v zaščitnih delov oblačila.

Preglednica 16.2: Primerjava prebojnosti izstrelka skozi ščite iz različnih materialov. * v primerjavi z aluminijem.

Material	Gostota na enoto površine [kg/m^2]	Prebojnost* na razdalji 0,5 m [%]	Prebojnost* elastičnosti] [%]
Stekleno vlakno Doron	7,8	80	80
Najlon	8,0	82	93
Aluminijska zlitina	9,8	100	100
Jeklo za čelade	13,7	140	117

16.3 Matematična analiza penetracije izstrelka

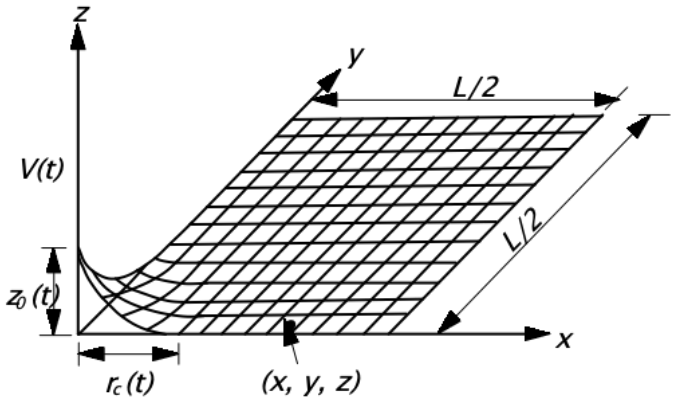
Vse kaže, da je odpornost tekstilnih izdelkov proti penetraciji izstrelkov v neposredni zvezi z ravnovesjem med visokim modulom vlaken, ki zmanjšuje deformacije (razteg), ki nastanejo zaradi dinamičnega udara izstrelka, in povečanje hitrosti absorpcije energije ter lomljivosti vlaken, ki se na splošno povečuje, ko raste vrednost modula.

Mehanizem penetracije izstrelka lahko posplošimo. Podobno se dogaja tudi pri drugih zunanjih vplivih, ki povzročajo deformacijo ploskih tekstilij, toda pri manjših hitrostih, kot je hitrost izstrelka, ko zadene površino ploskega tekstilnega izdelka. Zaradi tega bomo nekoliko podrobneje obravnavali mehanizem deformacije, ki jo povzroči izstrelek na ploskem tekstilnem izdelku.

Če plasti tkanine ležijo v ravnini xy in koordinatno izhodišče postavimo v točko, v kateri izstrelek prodira skozi plasti tkanine, tako, da se giblje po z–osi v njeni pozitivni smeri, bomo imeli po določenem času položaj, ki je prikazan na sliki 16.2. Na sliki je prikazan le tisti del tkanine, ki leži v prvem kvadrantu. Ta je razdeljen na veliko število majhnih ploskev. Lahko predpostavimo, da so delilne linije niti osnove in votka. Točke, v katerih se ta dva sistema niti križata (predpostavimo, da je tkanina v vezavi platno), so vezne točke v katerih se ta dva sistema niti združujeta. Prek teh veznih točk se ploskovno prenašajo napetosti in deformacije. To je najbolj izrazito pri tri aksialni in posebno pri tetra aksialni tkanini. Mreža točk nam omogoča, da diferencialno enačbo (16.1) rešimo s pomočjo serije diferencialnih enačb tako da, za vsako točko mreže postavimo diferencialno enačbo [4].

$$m\mathrm{d}v = T\mathrm{d}t \tag{16.1}$$

kjer so m masa elementa tkanine, ki je pod vplivom udarca izstrelka, dv diferencial hitrosti deformacije dela tkanine, ki je pod vplivom udarca izstrelka, T raztezna sila, ki se pojavi na opazovanem delu tkanine, dt diferencial časa opazovanja dogodka.



Slika 16.2: Idealizirani model deformacije bi-aksialne tkanine zaradi udarca izstrelka. Legenda: $z_0(t)$ hitrost dela tkanine v točki udarca izstrelka, $r_c(t)$ radij vektor, ki nam kaže razprostrtost deformacije na površini tkanine v času t, ko je dosežena hitrost z_0, točka (x, y, z, t) v bližini osi je zunaj območja delovanja deformacije tkanine, ki se pojavi zaradi udarca izstrelka.

Izstrelek udari v določeno točko površine tkanine z določeno hitrostjo. Ta hitrost se s časom zmanjšuje in izstrelek se ustavi pri določeni višini izbokline na tkanini, če ne prodre tkanino oziroma vse plasti tkanine, ki tvorijo zaščitni del oblačila. Pri tem nastanejo deformacije, ki se razprostirajo v koncentričnih krogih okrog točke udarca izstrelka. Čim bolj je opazovani krog oddaljen od točke udarca izstrelka, tem manjša je deformacija dela tkanine, ki leži na tem krogu. Deformacije se tako širijo samo v izotropnem ploskem tekstilnem izdelku, kot je na primer tri aksialna, tetra aksialna ali pet aksialna tkanina v smeri osnovnih niti. Votek je vezna komponenta. V bi-aksialni tkanini, ki je anizotropna, pa je konfiguracija deformacij precej izmaličena.

Izstrelek določene mase ima v trenutku dotika s površino tkanine določeno hitrost in zato določeno količino kinetične energije. Ko prodira izstrelek skozi tkanino, izgubi del ali vso kinetično energijo, kar je odvisno od tega, ali je prodrl skozi tkanino ali se v njej zaustavi. Izgubo kinetične energije lahko ponazorimo z enačbo (16.2).

$$\Delta E_p = \frac{1}{2} m_p \left(v_p^2 - v_r^2 \right) \tag{16.2}$$

kjer so ΔE_p izguba kinetične energije izstrelka, m_p masa izstrelka, v_p hitrost izstrelka pri trku s površino tkanine, v_r preostala hitrost izstrelka, ko ta zapusti plasti tkanine, če ne prebije vse plasti tkanine, potem je $v_r = 0$.

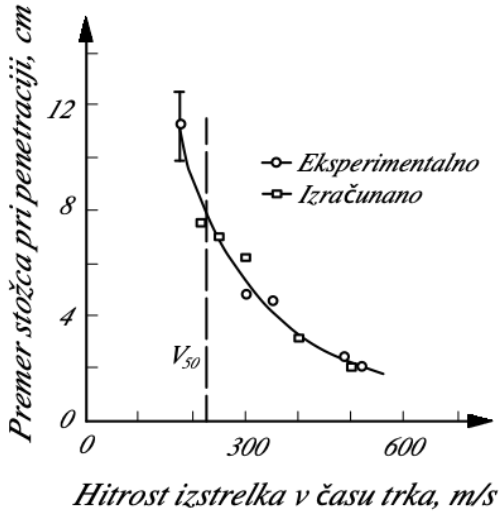
Ko izstrelek prodira skozi plasti tkanine, izgublja kinetično energijo, oziroma jo predaja plastem tkanine, skozi katere prodira. Kinetično energijo, ki jo sprejmejo plasti tkanine, lahko opišemo z naslednjo enačbo

$$E_f^k = \int_A \frac{m}{2} \left[v(x, y, z, t) \right]^2 \tag{16.3}$$

kjer so $E_f^k(t)$ kinetična energija, ki jo sprejmejo plasti tkanine, m del mase plasti tkanine, ki je izpostavljen vplivu izstrelka, v hitrost deformacije, A površina, na kateri se razprostira deformacija.

16.4 Vpliv lastnosti tekstilij na upor penetraciji izstrelka

Preglednice 16.1 kaže, da je modul elastičnosti najpomembnejši parameter kakovosti, glede penetracije izstrelka. Čim večja je vrednost modula elastičnosti vlaken, tem večji upor penetraciji izstrelka bo imelo zaščitno oblačilo, izdelano iz takšnega vlakna, oziroma mono filamentov, ki so združeni v multifilament, oziroma prejo. Če poznamo vse vrednosti parametrov kakovosti tkanine, lahko precej natančno predvidimo potek penetracije izstrelka skozi plasti dane tkanine. Izračuni so zelo zahtevni in jih je možno izpeljati s pomočjo velikega računalnika. Zelo zahtevna je tudi merilna eksperimentalna tehnika. Slika 16.3, pa kaže da se izračuni, ki temeljijo na precej poenostavljenem modelu penetracije izstrelka, zelo dobro ujemajo z eksperimentalnimi rezultati.



Slika 16.3: Primerjava izračunanih in eksperimentalnih rezultatov deformacije enoplastne tkanine, ki je izdelane iz Kevlarja 29 v času, ko je projektil prebil tkanino.

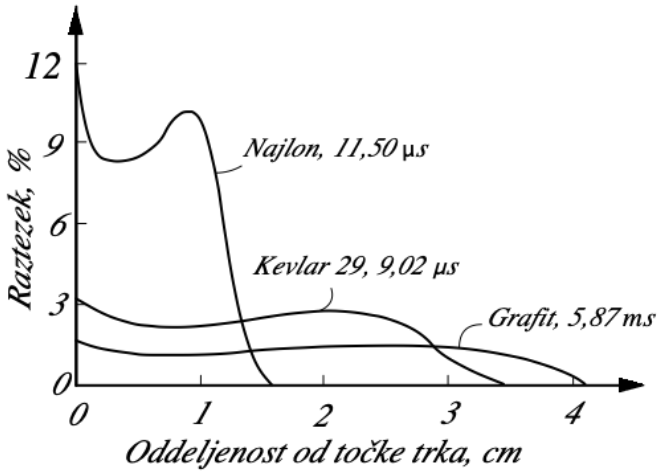
Višina stožca (deformacije) v trenutku preboja je odvisna od hitrosti trka izstrelka na površino tkanine. Čim manjša je ta hitrost, tem večja je deformacija. To pa zaradi tega, ker ima pri manjši hitrosti izstrelka tkanina več časa za prilagoditev (deformacijo). Zaradi vztrajnosti, proces raztezanja ima določene omejitve hitrosti in zato pri povečanju hitrosti trka zaostaja. Medsebojna primerjava štirih različnih vrst vlaken nam pove, kako posamezne lastnosti vlaken vplivajo na obnašanje pri trku z izstrelkom [5], preglednica 16.3.

Preglednica 16.3: Primerjava nekaterih parametrov kakovosti preiskanih tkanin.

	Vrsta tkanine			
Parametri kakovosti	Najlon	Kevlar 29	Kevlar 49	Grafitna
Modul elastičnosti [μN/tex]	5.150	35.400	63.720	170.560
Razteznost pri pretrgu [%]	14,0	4,0	2,2	1,1
Masa na enoto površin tkanine [], g/m^2	488	436	644	677
Številka preje [tex]	1.167	1.297	1.650	1.677
Gostota po osnovi	17	16	16	16
Gostota po votku	17	16	16	16

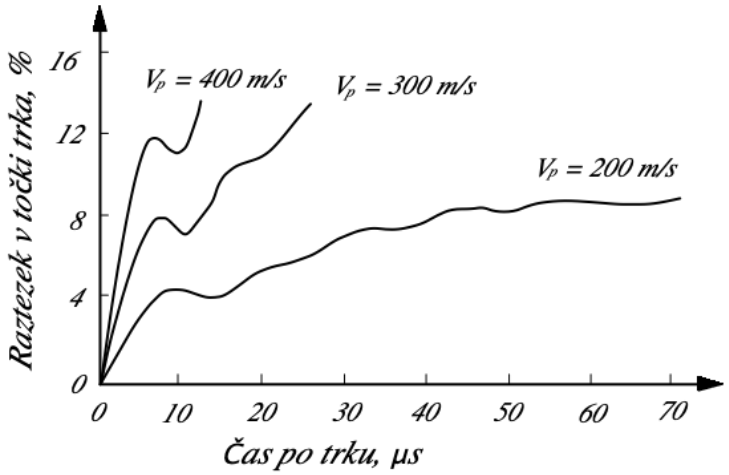
Na sliki 16.4 je prikazana porazdelitev deformacije (raztezka) v odvisnosti od vrste

vlakna in od oddaljenosti od točke trka izstrelka. Največjo vrednost modula elastičnosti ima grafit. Najlon ima najmanjšo vrednost modula elastičnosti in zaradi tega se tudi najbolj deformira. Vendar se ta deformacija porazdeli po manjši površini, kot pri grafitni tkanini.



Slika 16.4: Porazdelitev deformacije v odvisnosti od vrste vlakna in oddaljenosti od točke trka izstrelka ob površino tkanine s hitrostjo 400 m/s pri različnih časih meritev.

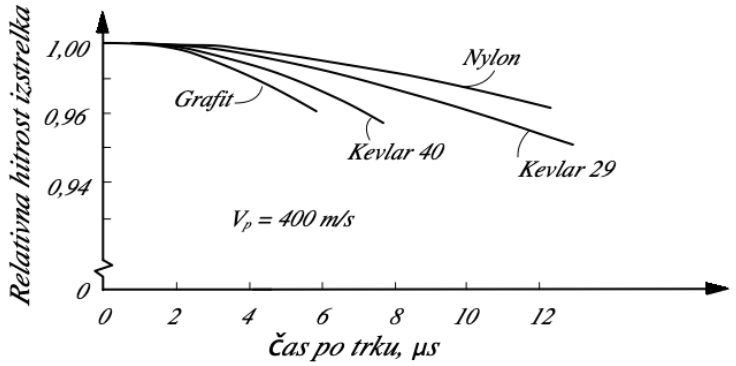
Na sliki 16.5 so prikazane deformacije ene plasti najlonske tkanine zaradi trka izstrelka na njeno površino pri različnih hitrostih trka, v odvisnosti od časa po trku. Krivulje so valovite. Valovitost je posledica vpliva povratnih valov, ki se po trku širijo po površini tkanine.



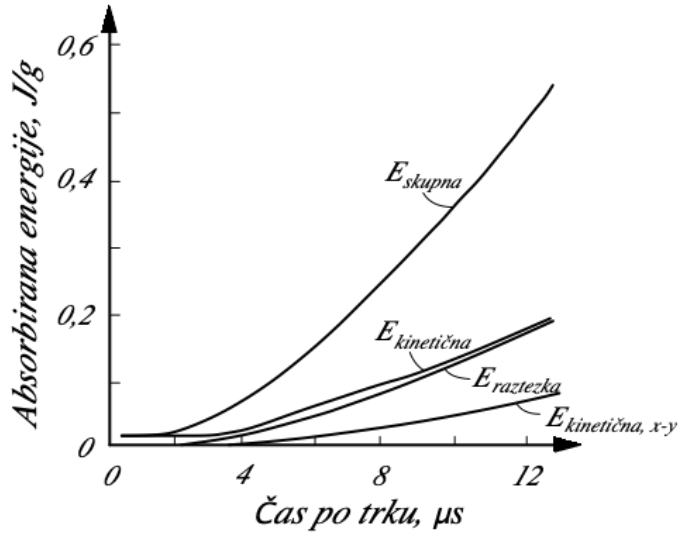
Slika 16.5: Vpliv začetne hitrosti izstrelka (hitrost v trenutku trka ob površino tkanine) na spremembo deformacije na enoplastni najlonski tkanini v točki trka.

Na sliki 16.6 je prikazano relativno zmanjšanje hitrosti izstrelka v odvisnosti od časa penetracije. Očitno je, da dosežemo največji pojemek z grafitno tkanino; s Kevlarjem 29 pa dosežemo največje zmanjšanje hitrosti.

Izstrelek izgubi največ svoje kinetične energije v smeri preboja (na sliki 16.7, smer osi z). Precejšen del energije se porabi za deformacije, manjši del se porazgubi po ravni površini tkanine.



Slika 16.6: Relativno zmanjšanje začetne hitrosti projektila (400 m/s) v odvisnosti od vrste tkanine in časa penetracije v μs.



Slika 16.7: Energija, ki jo absorbira Kevlar 29 po trku z izstrelkom (masa 1,10 g), ki ima hitrost 400 m/s. Na abscisi (x os) je čas v μs.

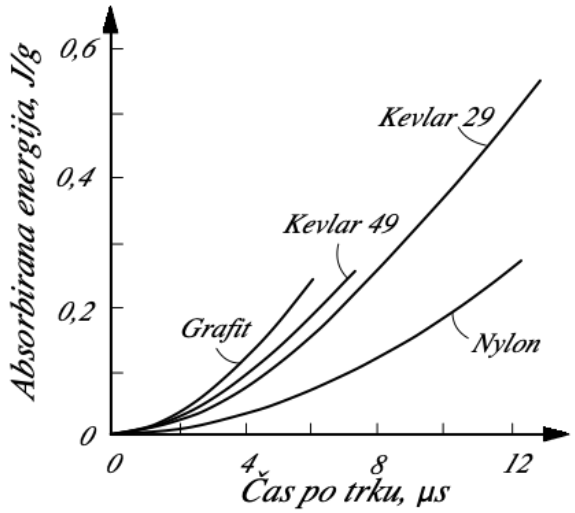
Na sliki 16.8 je prikazana primerjava absorpcije kinetične energije izstrelka različnih vrst tkanin. Grafitna tkanina absorbira energijo najhitreje, Kevlar 29 pa absorbira največ energije. Primerjava razteznosti (deformacija) v točki trka v odvisnosti od časa je podana na sliki 16.9. Najlon se najbolj deformira, grafit najmanj; vendar grafitna tkanina poči (projektil prodre skozi njo) v najkrajšem času po trku.

16.5 Nekatere moderne rešitve na področju neprebojnih tkanin

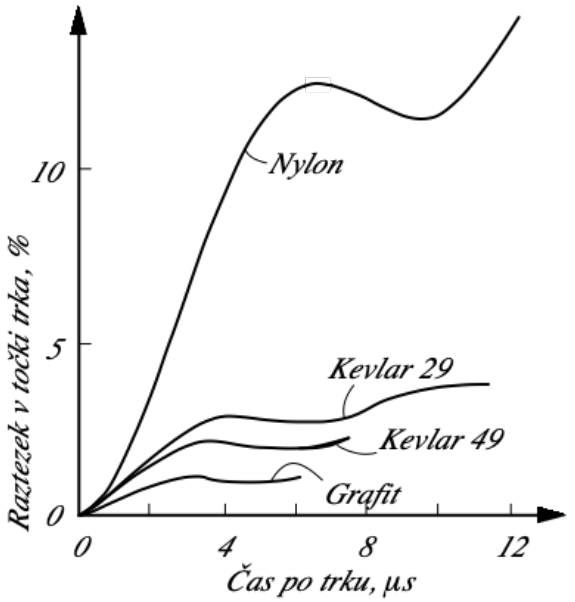
16.5.1 Nadaljnji razvoj tkanin za zaščito pred projektili

Za izdelavo neprebojnih jopičev za individualno zaščito in tudi za izdelavo neprebojnih plošč, so v rabi predvsem tkanine izdelane iz visoko zmogljivih vlaken. Primer tega je Spectra, ki je polietilensko vlakno in je enakovredno aramidnim vlaknom le, da ima nekatere karakteristike celo boljše.

Problem se pojavlja pri izdelavi tkanin iz visoko modulnih (zmogljivih) vlaken. Normalna bi-aksialna tkanina ima določen odstotek stkanja osnove in votka. Temu se ne



Slika 16.8: Primerjava absorbirane energije izstrelka opazovanih vrst tkanin v odvisnosti od časa, ki preteče po trku (masa izstrelka 1,10 g, trk pri hitrosti izstrelka 400 m/s).



Slika 16.9: Odvisnost velikosti deformacije (raztezka) v točki trka od vrste vlaken in od časa po trku (masa izstrelka 1,10 g, hitrost pri trku 400 m/s).

moremo izogniti zaradi prepletanja osnove in votka. Pri udaru koničastega projektila manjšega premera se bodo niti v tkanina razmaknile v smeri votka, če je osnova izravnana. V tej smeri tkanina ne daje nobenega odpora dokler se votek ne izravna.

Precej so si obetali od tri aksialne tkanine. Če tri aksialno tkanino deformiramo v poljubni smeri (slika 16-10), lahko izpeljemo dokaz o izotropnosti tri aksialne tkanine v smeri vsake osnove, kar kaže enačba (16.4). Enačba (16.3) je izpeljana pod predpostavko, da so vsi trije sistemi niti izravnani. Za izotropnost tri aksialne tkanine v smeri niti osnov, bi morali biti izpolnjeni naslednji pogoji:

- preja v vseh treh sistemih mora biti popolnoma enaka,
- mora biti gostota niti v vsakem sistemu tudi enaka,
- tkanje v vseh treh sistemih mora biti identično.

V realni tkanini stkanje sistemov niti ni enako, oziroma je to zelo težko doseči. To pa je zadosten razlog za anizotropijo tri aksialne tkanine. Poleg tega se ni možno izogniti stkanju niti. Pokazalo pa se je, da tri aksialna tkanina daje manjši upor preboju projektila kot primerjalna biaksialna tkanina. Pri izdelavi tri aksialne tkanine ni možno obdržati nobenega sistema niti v izravnani legi. To je zelo velika pomanjkljivost tri aksialnih tkanin, če jih uporabljamo za zaščito pred projektili. Niti se morajo najprej izravnati, šele potem pride do veljave modul elastičnosti preje.

Pri več aksialnih tkaninah, pod izotropnostjo se pod-razumeva, enaka obremenitev in raztezek, če enaka sila deluje v smeri katerega koli sistema niti osnove. To ne velja v primeru, če je smer delovanja sile med sistemi niti.

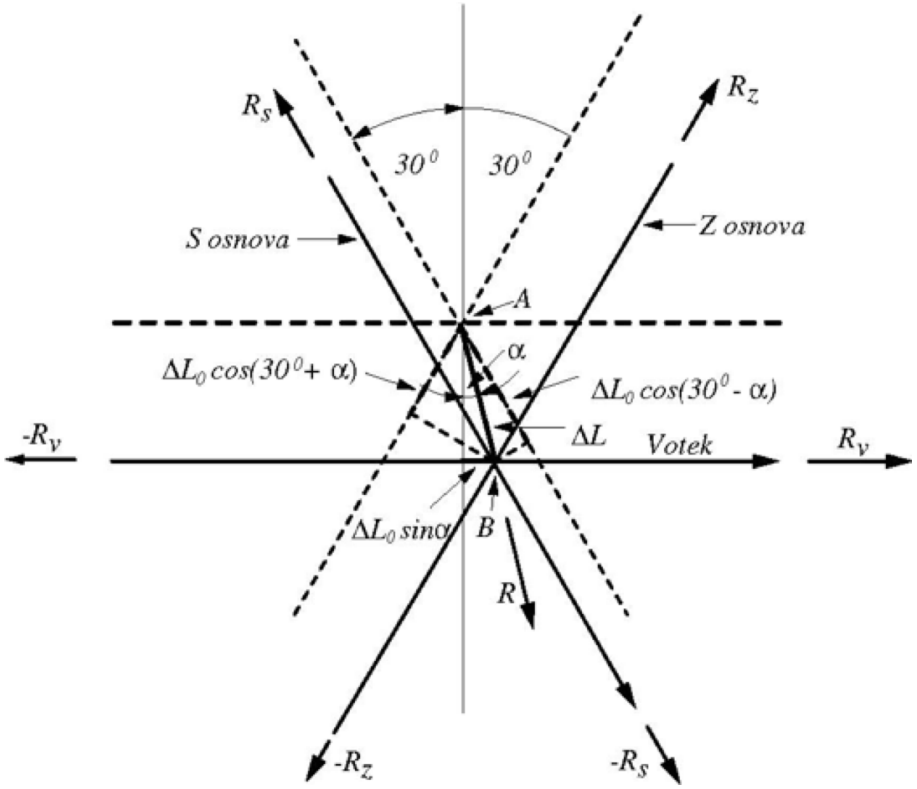
Tetra aksialna tkanina ima boljše lastnosti kot tri aksialna tkanina. Namesto dveh oziroma treh sistemov niti, ima štiri sisteme. Dejansko gre za normalno bi-aksialno tkanino, ki je ojačena z dvema dodatnima sistemoma niti osnove. Sistemi niti med seboj zaklepajo kot 45 stopinj. Pri tri aksialni je ta kot 60 in pri bi-aksialni 90 stopinj.

Na svetovnem trgu proizvajajo tetra aksialne tkanine le Japonci. Japonci imajo delujoče statve za proizvodnjo tetra aksialnih tkanin. Da so razvili mehanske statve na osnovi ročnih statev za tkanje tetra aksialnih tkanin, so potrebovali 20 let. Statve, ki se lahko vidijo na internetu se zdijo precej kompleksne. Njihova tetra aksialna tkanina naj bi imela naslednje lastnosti [6]:

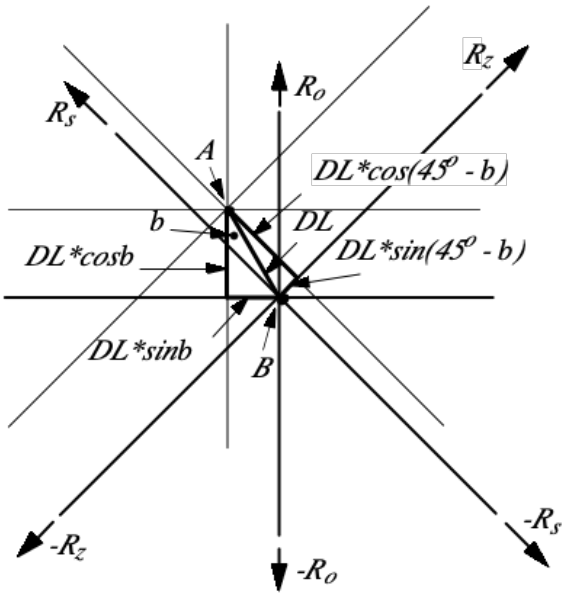
- multifazni pretrg,
- veliko odpornost na trenje,
- stabilnost dimenzij,
- veliko absorpcijo in disperzijo sile,
- možnosti različnih aplikacij z uporabo različnih vlaken.

Zgoraj naštete lastnosti kažejo, da je tetra aksialna tkanina neprimerno boljša za izdelavo proti prebojnih jopičev kot tri aksialna tkanina. Deformacija tri aksialne tkanine je prikazana na sliki 16.10. Diagram deformacije tetra aksialne tkanine pa je prikazan na sliki 16.11. Ne samo, da ni možno izdelati bi-aksialno in tri aksialno tkanino z izravnanimi nitmi v vseh sistemih, tudi ni možno izdelati izotropno tetra aksialno tkanino. Možno je tkati izravnane tri sisteme osnove. Votek se stke, kar pomeni, da takšna tkanina ni stabilna v smeri votka. Pri izdelavi neprebojnih jopičev in neprebojnih plošč,

je možno zarotirati plasti glede na začetno lego tako, da v naslednji plasti tkanino zarotiramo za 45 stopinj, potem za 90 stopinj in tako naprej. Ker se, na primer, neprebojna plošča sestoji iz velikega števila plasti, ki so med seboj povezane s prepregom (smolo), je komponirana plošča dejansko izotropna. Zelo težko pa je doseči izravnanost niti vseh treh sistemov osnove, če opazujemo samo eno plast tkanine.



Slika 16.10: Diagram deformacije tri-aksialne tkanine.



Slika 16.11: Diagram deformacije tetra-aksialne tkanine.

16.5.2 Material za izdelavo tetra aksialnih tkanin

Glede na dejstvo, da je naša tetra aksialna tkanina namenjena predvsem, kot osnovni material za izdelavo neprebojnih jopičev za policijo in vojsko, je bilo nujno izbrati visoko zmogljiva vlakna kot so: Nomex, Kevlar, Spectra, vlakno X ipd. Nomex in Kevlar sta aramidna vlakna. Spectra pa polipropilensko. Spectra je najugodnejša, ker ima specifično maso manj kot 1 g/cm^3. Japonci v svojem prospektu ne navajajo v področjih uporabe, področje neprebojnih jopičev.

Izdelali smo ročne statve za tkanje tetra aksialnih tkanin. Za tkanje tetra aksialnih tkanin, izbrali smo prejo firme Teijin, ki se ujema z našimi zahtevami (150 navitkov po 0,5 kg in 90 zavojev/m, kar je optimalno število zavojev multifilamentne aramidne preje – Twaron). Finost preje smo vzeli iz njihovega proizvodnega programa, ki je najbolj primerna za naše potrebe in smo jo uporabili na naših pilotskih statvah. Enačba (16.4)opisuje delo pri deformaciji tri aksialne tkanine.

$$W = \frac{3K\Delta L_0^2}{4}\left(\sin^2\alpha + \cos^2\alpha\right) = K'\Delta L_0^2 \tag{16.4}$$

kjer so K koeficient odpornosti niti, K' normirani koeficient odpornosti niti, ΔL deformacija niti, W opravljeno delo.

Enačba (16.5) opisuje deformacijo tetra aksialne tkanine

$$W = \frac{K\Delta L_0^2}{2}\left(2 + \sin^2\alpha + \cos^2\alpha\right) = \frac{3}{2}K\Delta L_0^2 \tag{16.5}$$

kjer so $\alpha = 45^\circ$, K koeficient odpornosti niti, ΔL deformacija niti, W opravljeno delo.

Kakovost preje za izdelavo tetra-axialne tkanine je naslednja:

- Tip: Twaron 1.000.
- Finost preje: 1.680 dtex.
- Število filamentov v preji: 1.000.
- Linearna gostota (dtex): 1.720 (standardna deviacija: 12,0).
- Trgalna sila (N): 335 (standardna deviacija: 7,0).
- Specifična napetost (MPa): 2.808 (standardna deviacija: 73.0).
- Raztezek pri pretrgu (%): 3-4 (standardna deviacija: 0,06).
- Modul elastičnosti (GPa): 72 (standardna deviacija: 1,6).
- Število Zavojev preje (Z/m): 90 (optimum za to prejo).
- Avivaža – apretura (%): 0,75 (standardna deviacija: 0,09).

Pri konstruiranju in izdelavi statev smo računali na prejo 1.000 dtex in finejšo. Tkanino smo izdelali v 8-veznem osnovnem atlasu. Ta je primerna za armaturo v kompozitih kot so neprebojne plošče, ker je dejansko možno doseči izravnanost treh sistemov osnove. Ta vezava se nanaša na prevezovanje med normalnim votkov in normalno osnovo. Vendar je lahko vprašljiva uporaba tkanine v tej vezavi za izdelavo neprebojnih jopičev zaradi možnosti odriva niti proč od smeri gibanja projektila. Vsekakor je primerna v primeru vreza ali udara projektila, ki nima oster vrh. Če pa opazujemo udar majhnega projektila z ostro konico (praktično je vsa sila koncentrirana v točki udara),

lahko pride do prečnega razmika niti. To je tudi osnovni razlog, da se sedanje neprebojni jopiči izdelujejo iz tkanin, ki so tkane v vezavi platno. V takšni tkanini imajo niti precejšnje stkanje, kar je negativno, ker niti ne prevzamejo takoj silo udara projektila, ampak se to zgodi, ko je nit popolnoma izravnana. Laboratorijske preiskave, posebno pa praktični preizkusi na strelišču bodo pokazali ali so predpostavke uporabe 8-veznega atlasa za izdelavo neprebojnih jopičev realne. Vsekakor 8-vezni osnovni atlas ni primeren za izdelavo neprebojnih jopičev, ker bi že pri udaru projektila iz lahkega orožja, prišlo do razmika niti

V vezavi 8-vezni osnovni atlas so niti med sabo zelo ohlapno, povezane. Vsaka druga *Z* nit osnove ne prevezuje z votkom, ampak prosto leži med votkom, ki je spodaj in normalno osnovo, ki je zgoraj. V našem primeru je *Z* osnova pod *S* osnovo. Z votkom veže vsaka četrta nit tega sistema osnove. Če se tkanina v tej vezavi uporabi za neprebojne plošče, pri katerih so niti izpostavljene natezni obremenitvi, ne bo prišlo do razmika niti zaradi velikosti projektila in povezavo v plasti in zaradi povezave med nitmi s smolo.

16.5.3 Karakteristike tkanine, ki se sedaj uporablja za neprebojne jopiče

Zaradi primerjave smo preizkusili tkanino, ki jo uporabljajo za izdelavo proti prebojnih jopičev in je tkana v vezavi platno. Ta tkanina ima naslednje vrednosti mehanskih parametrov:

- Surovina: Kevlar.
- Vrsta preje: multi-filament.
- Število zavojev na meter dolžine preje: 0.
- Finost preje osnove in votka: 3.400 dtex.
- Trgalna sila niti osnove: 451 N; razteg pri pretrgu: 3,19 %.
- Trgalna sila niti votka: 395 N; razteg pri pretrgu: 3.66 %.
- Gostota osnove: 6,7 niti/cm.
- Gostota votka: 6,7 votkov/cm.
- Teža enega m^2: 500 g/m^2.
- Trgalna sila (preizkušanec: širina 25 mm, vpeta dolžina:100 mm):
- v smeri osnove: 6.983 N; trgalni raztezek: 18,5 %.
- v smeri votka: 6.046 N; trgalni raztezek: 18,2 %.
- Poroznost:
  - Odprta površina za pretok plinov in tekočin: 1,20 %.
  - Število por/cm^2: 82.

Gostota niti po osnovi in votku je 6,7 niti/cm, ali skupaj 13,4 niti osnove in votka/cm. V osnovni izvedbi v naši tetra aksialni tkanini bo 20 niti. To pomeni, da bi bila naša tkanina za 15 % težja. Toda moramo upoštevati dejstvo, da ležijo niti *S* in *Z* sistema pod kotom 45 stopinj in so daljše za faktor 1,42. Če to upoštevamo, potem nimamo 10 niti

S in *Z* sistema ampak 14,2. Masa bi bila večja za 3 % od bi-aksialne tkanine v vezavi platno V primeri dvakratnega povečanja gostote normalne osnove, bi imeli skupaj 24,2 niti, bi bila naša tkanina za 23 % težja. Vendar to ni prava primerjava. Sistemi niti v tetra aksialni tkanini so postavljeni drug pod drugim, razen na mestih prepletanja votka z nitmi osnove. Pa tudi vezava v 8-veznem atlasu ni primerljiva s platneno vezavo. Zaradi tega je bolj primerno primerjati tetra aksialno tkanino, ki jo pozneje bomo tkali v 4-veznem lomljenem kepru v sosledju ojačenem za eno vezno točko. V tem primeru bo votek položen enkrat čez dve niti normalne osnove in nato pod naslednje dve. Niti *S* in *Z* sistema vežejo nekoliko drugače (3:1, oziroma 1:3). Ta tkanina bo primerljiva s tkanino v platneni vezavi. Vendar je bistvena razlika. Pri natezni sili imamo pri tkanini, ki je tkana v vezavi platno, nekaj čez 18 % raztezka pri pretrgu. Ker preja izdelana iz Kevlarja ima okrog 4 % raztezka pri pretrgu pomeni, da je stkanje preje okrog 14 %. To je očitno preveliko stkanje in negativno vpliva pri prevzemu zunanje obremenitve. Tudi v tetra aksialni tkanini, ki je tkana v 4-veznem lomljenem ojačenem keperu v sosledju bo stkanje, posebno votka. Vendar sistemi osnove bodo imeli stkanje le nekaj odstotkov, kar bo ugodno vplivalo za trenutni odziv na zunanje obremenitve (udar projektila ipd.)

V preglednici 16.4 so prikazani rezultati merjenja prebojne trdnosti tkanine v laboratoriju po standardni metodi, toda pri različnih premerih kroglice. Glede velikosti premera se s projektilom najbolj ujema premer 10 mm. Pri preboju kroglice je bila višina pri preboju le 7,14 mm. To bi bilo sprejemljivo, če se pri tem nebi precej razlikovala velikost vpete površine za preboj. Pri tej metodi in realni površini proti prebojnega jopiča pri udaru projektila. Ta je precej večja tudi v primeru, če je spodaj neprebojna plošča. Drugi problem je hitrost projektila. Hitrost projektila je največ krat med 400 m/s in 500 m/s. Pri merjenju prebojne trdnosti pa je hitrost neprimerljivo manjša. Zaradi tega lahko rezultati v preglednici 16.4 služijo le kot orientacija.

Preglednica 16.4: Prebojna trdnost goste tkanine, tkane v vezavi platno.

Premer kroglice [mm]	Premer vzorca [mm]	Prebojna trdnost [N]	Višina pri preboju [mm]
5	10	845	4,52
10	15	1.956	7,14
15	20	3.263	9,91
20	25	4.317	9,57
25	30	6.500	11,0

Tkanina tkana v vezavi platno, ima izredno zaprto površino. Le okrog 1,20 % površine, ki je odprto za pretok plinov in tekočin. V normalnih pogojih ni ta tkanina prepustna za tekočine. Hidravlični premeri por so izredno majhni. Dejansko bi rabili tlak, ki ga povzroči okrog 300 cm vodnega stolpca, da potisnemo vodo skozi poro, ki ima hidravlični premer le 35 mikrometrov. Pretok plinov in s tem tudi vodne pare pa je mogoč. Upor pretoku vodne pare pa mora biti pri tej tkanini izredno velik (nismo ga merili). V primerjalni tetra-aksialni tkanini pa bo ta upor, zaradi rahlejše strukture, precej manjši. To je tudi prednost naše tetra aksialne tkanine v primerjavi z bi-aksialnimi v vezavi platno, ki se sedaj uporabljajo.

V Iraku, pa tudi v Afganistanu zna biti peklensko vroče. Vojak se v takšnem podnebju lahko hladi predvsem s pomočjo izločanja in izhlapevanja znoja. Zanimivi so rezultati meritev prebojne trdnost, preglednica 16.4. Ta je merjena v intervalu premera

kroglic 5 mm do 25 mm. Zanimivo je razmerje med silo preboja in premerom kroglice. To ima vrednost 169 N/mm pri premeru kroglice 5 mm. Pri večjih premerih pa okrog 200 N/mm. Pri premeru kroglice 2,5 mm (zašiljen konec projektila) je ta vrednost 260 N/mm.

Lahko analiziramo tudi silo na površino neposrednega udara projektila (kroglice). Tukaj so razlike precej večje. Pri premeru kroglice 5 mm je razmerje med prebojno silo in površino projekcije kroglice 43 MPa, pri 10 mm je ta vrednost 24 MPa, pri 15 mm 18 MPa, pri 20 mm 14 MPa in pri 25 mm pa le 5 MPa.

Če pa upoštevamo površino tkanine, ki je izpostavljena deformaciji, rezultati se pomaknejo za eno mesto navzdol s tem, da je zadnji rezultat 9 MPa. Problem je v pravilni interpretaciji rezultatov. Zelo je važno najti korelacijo med laboratorijskimi rezultati in realnimi rezultati na terenu. Ta bi omogočila optimalno konstruiranje tkanine.

16.5.4 Prilagoditev konstrukcije tkanine optimalnim vrednostmi parametrov, ki se zahtevajo za neprebojne jopiče

Prva varianta vezave je prikazana na sliki 16.17. To je modifikacija 8-veznega osnovnega atlasa, ki je ojačen za tri votkove točke navzgor tako, da normalna osnova leži nad štirimi votki in nato pod naslednjimi štirimi votki. Prevezovanje ni preveč gosto in je zaradi tega možna izravnava niti vseh sistemov osnove. Pri tej varianti ni realne možnosti, da greben povleče votek s sabo. Tkanina izdelana v tej vezavi bo primerna kot armatura v neprebojnih ploščah. Problem je ali bi bila primerna za izdelavo neprebojnih jopičev zaradi nevarnosti razmikanja niti. Verjetno bi bilo možno zmanjšati ali celo odpraviti razmikanje niti s podvojitvijo gostote normalne osnove in z istočasnim povečanjem gostote po votku. Ta modifikacija bi pomenila povečanje teže tkanine na enoto površine. Ni nujno, da pomeni zmanjšanje števila potrebnih plasti v jopiču.

16.6 Jakšićeva pet, šest in sedem aksialna tkanina, ki bi se lahko uporabile za izdelavo neprobojnih jopičev

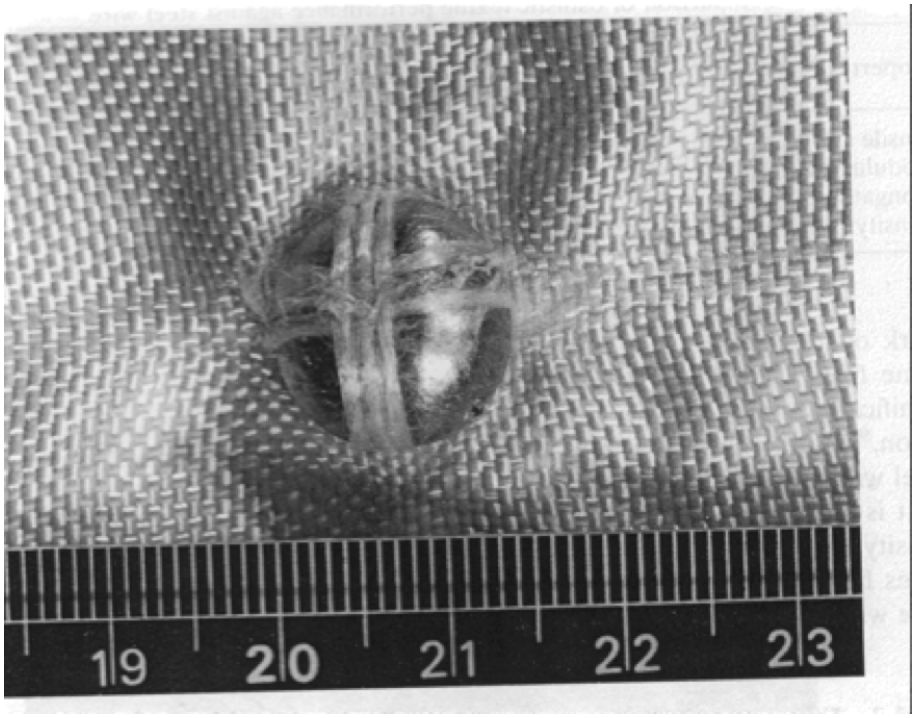
16.6.1 Uvod

Obravnavali smo bi-aksialno tkanino, slika 16.12, japonsko tetra aksialno tkanino, ki je bila izdelana na ročnih statvah slika 16.13 in japonsko tetra aksialno tkanino slika 16.14 , ki je bila izdelana na mehanskih statvah za tkanje tetra aksialnih tkanin. Poleg tega smo obravnavali tudi tetra aksialno tkanino, ki je bila izdelana na Jakšićevem ročnem stroju za izdelavo tetra aksialnih tkanin, ki so prikazane na slikah 16.15, 16.16 in 16.17.

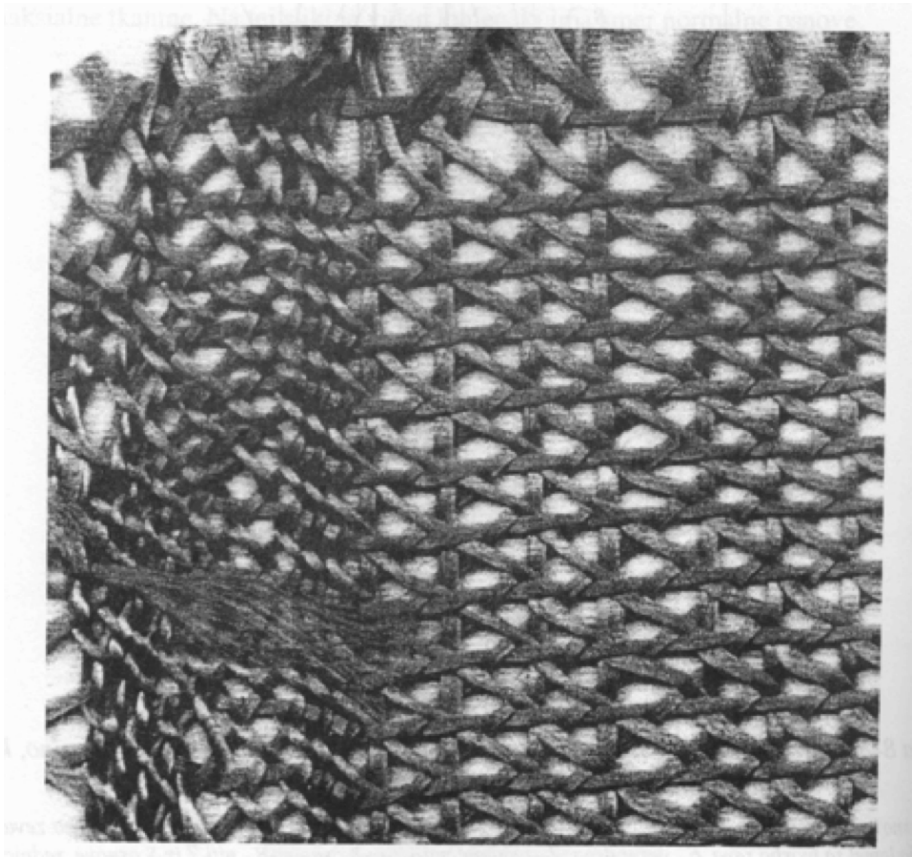
Tkanine, ki so bile izdelane na Jakšićevih ročnih statvah, so videti kvalitetnejše od primerjalne japonske tkanine. Vendar japonska tetra aksialna tkanina, ki je bila izdelana na mehanskih statvah, ima bolj enakomerno površino. Za prehod od ročnega tkanja na strojno so Japonci rabili celih 20 let. Ta tkanina se lahko uporablja, po trditvah proizvajalca, na osem različnih področjih. Toda, ni navedeno področje zaščite proti projektilom. Verjetno zaredi tega, ker vse niti osnove niso izravnane.

16.6.2 Prednosti sedem aksialne tkanine v primerjavi s tetra aksialno tkanino

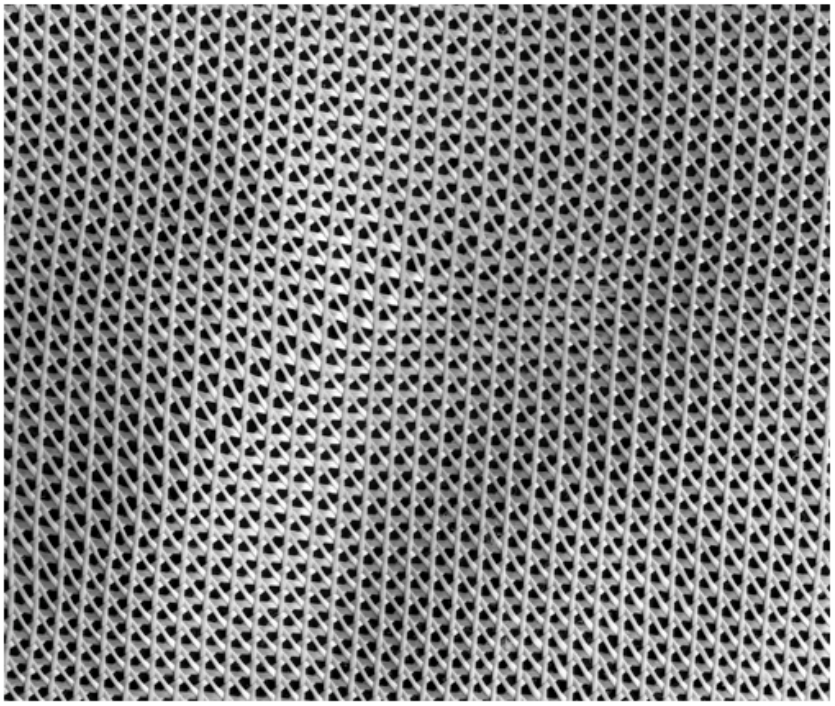
Trenutno na svetu ne obstoji stroj za izdelavo sedem aksialnih tkanin. Tudi se ne omenja v svetovni literaturi, ki se nanaša na tekstilno tehnologijo. Toda, tehnologija izdelave tetra aksialnih tkanin omogoča hitrejši razvoj tehnologije izdelave pet aksialnih tkanin,



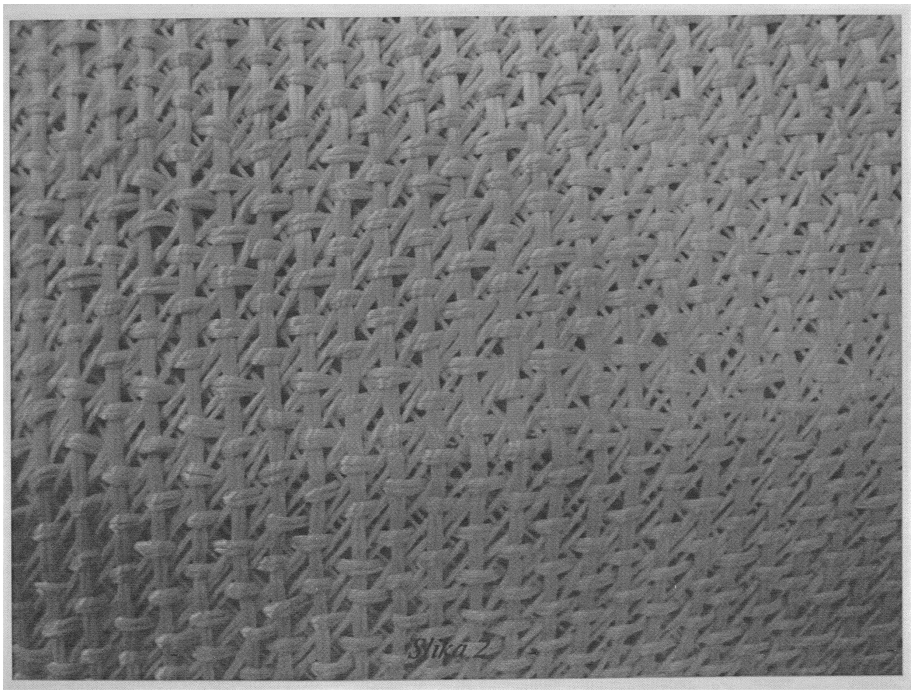
Slika 16.12: Penetracija projektila skozi gosto bi-aksialno tkanino v vezavi platno. [5]



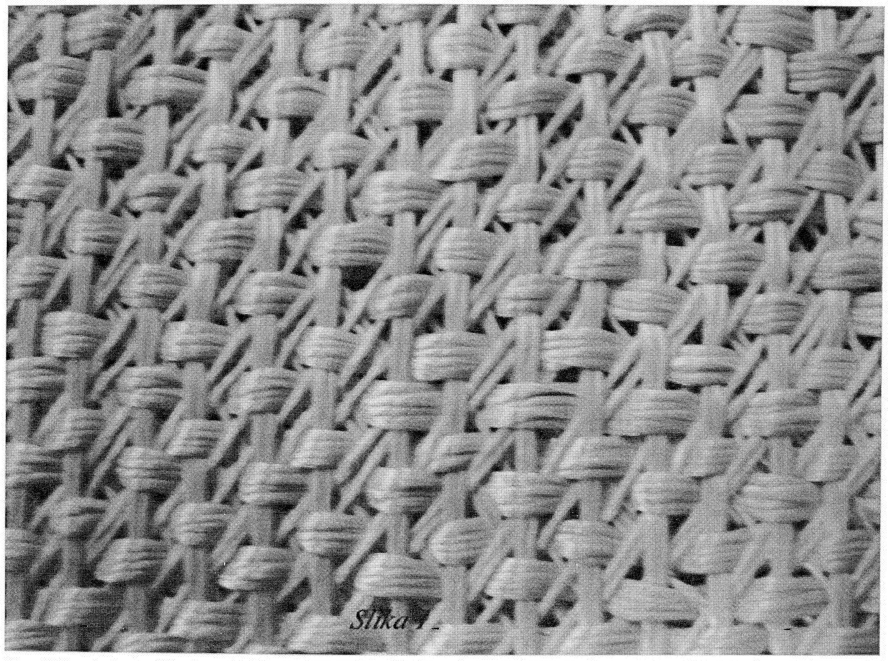
Slika 16.13: Japonska tetra aksialna tkanina, ki je bila izdelana na ročnih statvah. [6]



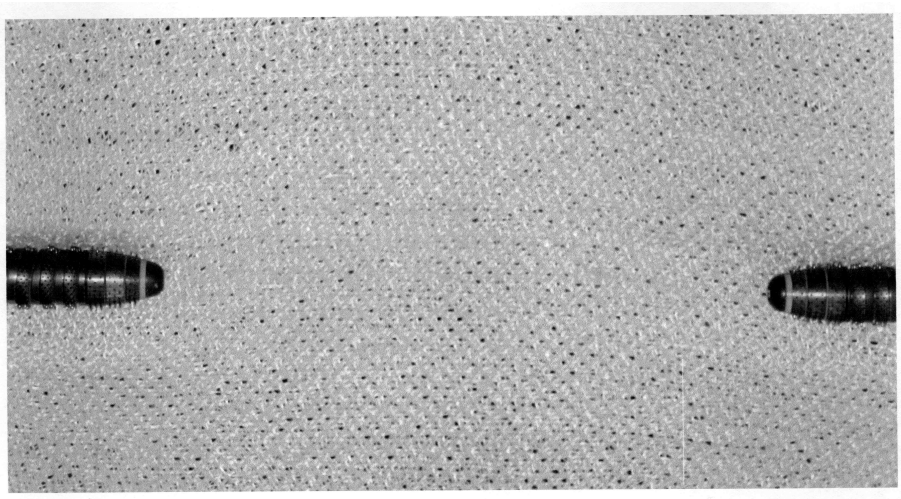
Slika 16.14: Japonska tetra aksialna tkanina, ki je tkana na mehaničnih statvah za izdelavo tetra aksialnih tkanin. [6]



Slika 16.15: Tetra aksialna tkanina, ki je bila izdelana na vzorčnih statvah za tkanje tetra-aksialnih tkanin, ki so bile konstruirane na Oddelku za tekstilstvo NTF Univerze v Ljubljani.



Slika 16.16: Tetra aksialna tkanina, ki je bila izdelana na vzorčnih statvah za tkanje tetra-aksialnih tkanin, ki so bile konstruirane na Oddelku za tekstilstvo NTF Univerze v Ljubljani.



Slika 16.17: Tetra aksialna tkanina, ki je bila izdelana na vzorčnih vzorčnih statvah za tkanje tetra aksialnih tkanin, ki so bile konstruirane na Oddelku za tekstilstvo NTF Univerze v Ljubljani.

kot tudi sedem aksialnih tkanin. Možno je nekatere rešitve na ročnem stroju za tkanje tetra aksialnih tkanin vsaj delno, uporabiti pri konstrukciji stroja za tkanje sedem aksialnih tkanin. Nanaša se na naš ročni stroj za izdelavo tetra aksialnih tkanin. Z relativno majhno dograditvijo, bi na tem stroju lahko izdelali tudi pet aksialno tkanino, ki se razlikuje od štiri aksialne tkanine le v tem, da ima še eno normalno osnovo na hrbtni strani tkanine.

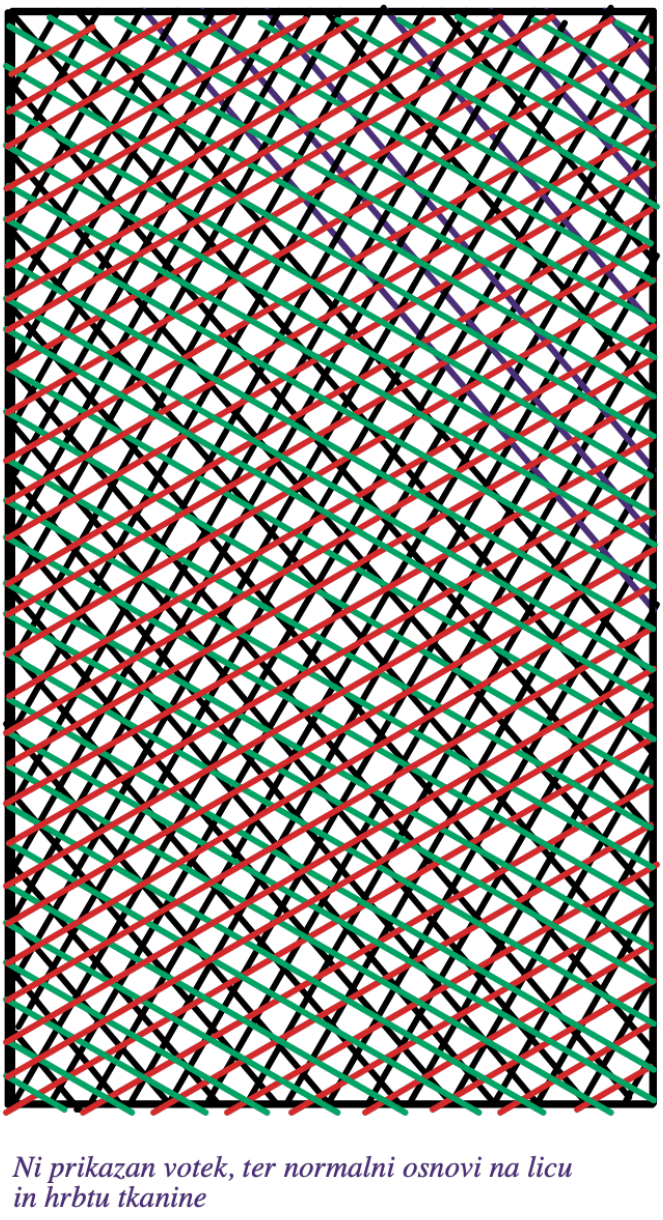
Strukturo sedem aksialne tkanine tvori šest osnov in en votek. Votek ima le povezovalno vlogo. Osnove naj bi bile izravnane. Dve osnovi sta normalni, kot pri bi-aksialni tkanini, oziroma pet aksialni tkanini. Druge dve osnovi pa so v tkanini postavljene poševno pod določenim kotom glede na lego votka. Ena osnova se vtke v tkanino od levega krajca proti desnemu pod kotom 30 stopinj in tudi od desnega proti levemu krajcu pod enakim kotom. Z normalno osnovo, ki z votkom tvori kot 90 stopinj, pa tvori kot 60 stopinj. V tkanini se dobi vtis, da sta to dve osnovi. Druga osnova, ki se vtke v tkanino od levega proti desnem krajcu, tvori z votkom kot 60 stopinj in z normalno osnovo tvori kot 30 stopinj. Ko se ta osnova polaga v tkanino od desnega proti levem krajcu, zaklepa z votkom kot 60 stopinj. Te dve osnovi se v tkanini pojavijo kot štiri osnove.

Ena normalna osnova je na licu tkanine, druga pa na hrbtni strani tkanine. Notranje "štiri" osnove pa se skoraj ne vidijo ne z lične in ne z hrbtne strani tkanine. Votek povezuje vse osnove skupaj. Tkanina dejansko ima šest plasti, slika 16.20, in votkov rez, slika 16.21. Votek ne štejemo zraven. Ker ima votek preveliko stkanje, je samo povezovalni sistem in ga ne upoštevamo kot sistem, ki zavira gibanje projektila skozi plasti osnov. Pri tkanju se lahko pojavijo določene napake, kot je to vidno na slikah 16.18, 16.19 in 16.20 vendar, to ne bo bistveno zmanjšalo uporabno vrednost tkanine, posebno za izdelavo neprebojnih jopičev. Saj podobnih napak v končni verziji stroja bo precej manj, ali jih sploh ne bo. Tkanina bo tudi primerna kot armatura pri gradnji manjših mostov in kot geotekstilija za zavarovanje obrežij potokov in rek. Pri tem moramo uporabiti vlakna, ki so odporna proti vlagi in bakterijam. To lastnost imajo polipropilenska vlakna. Če se uporablja kot armatura v gradbeništvu, mora biti dovolj redka, da cementna (betonska) zmes gre skozi vse plasti tkanine. To velja tudi, če uporabimo več plasti večplastnih tkanin. To pa zaradi tega, da ne pride do ločitve med plastmi med tkaninama in plasti med plasti cementa (betona). Beton mora biti kompakten.

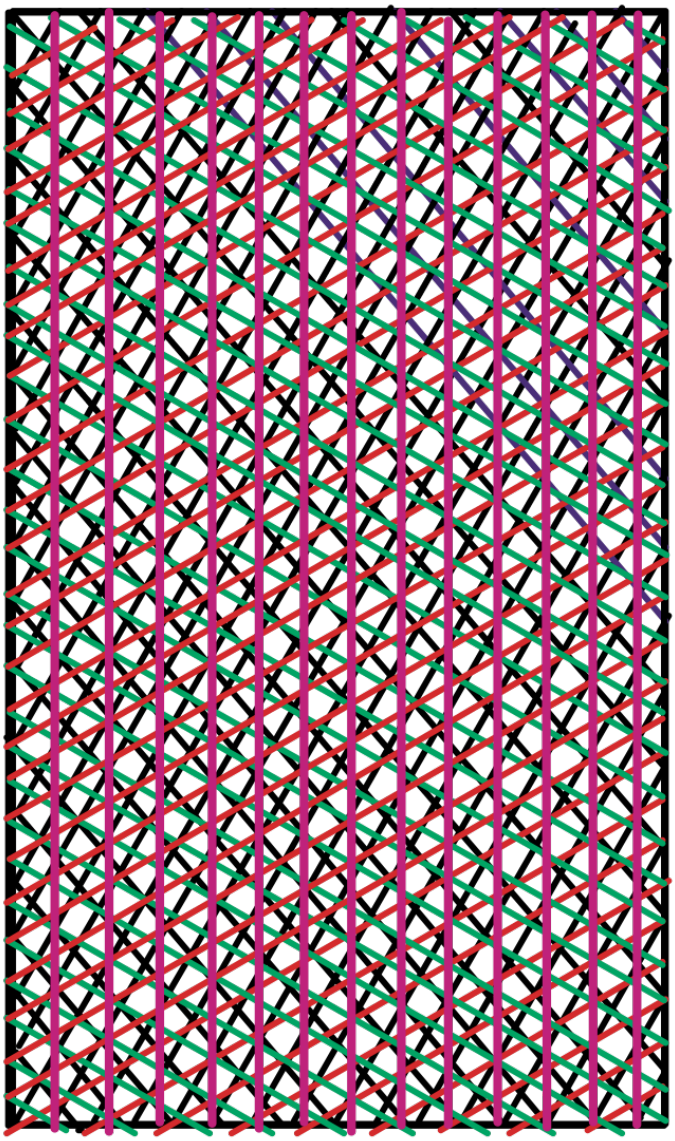
Lahko primerjamo sedem aksialno tkanino z gosto bi-aksialno tkanino, ki je prikazana na sliki 16.12 in je tkana v vezavi platno Ta tkanina ima težo 500 g/m^2 in stkanje 14 %. Dejansko je ta tkanina neuporabna za proti prebojne jopiče. Zaščito dosežemo z dva ali več žepov spredaj, in zadaj na hrbtni strani telesa, v katerih so vložki v katerih so izravnane folije na katere so nalepljena niti preje, ki je izdelana iz visoko modularnih vlaken. Te folije so postavljene druga poleg druge, oziroma ena na drugo, odvisno od načina opazovanja, in so popolnoma izravnane. Na hrbtni strani jopiča je lahko tudi nahrbtnik namesto žepov v katerem so vstavljene folije s prejo, kot v žepe spredaj. Teh je ponavadi več kot 20, ki so postavljene druga nad drugo in tudi v vsakem žepu spredaj in zadaj na hrbtni strani. Površina telesa, ki nima dodatne zaščite, praktično ni zaščitena. To je vzrok prevelikega stkanja in tkanina ne zavira projektil dokler se niti ne zravnajo. Tudi med žepi telo ni zaščiteno.

Na sliki 16.18 so prikazane poševno postavljene niti osnove v desno in levo smer pod kotom 30 in 60 stopinj glede na vodoravno postavljen votek, ki na tej sliki ni prikazan. Osnova, ki tvori z votkom kot 30 stopinj, se približno dva krat hitreje giblje v desno in levo smer, kot osnova, ki tvori z votkom kot 60 stopinj. Te dve osnovi v tkanini kažeta, kot da bi bile štiri osnove. Tako jih bomo tudi obravnavali.

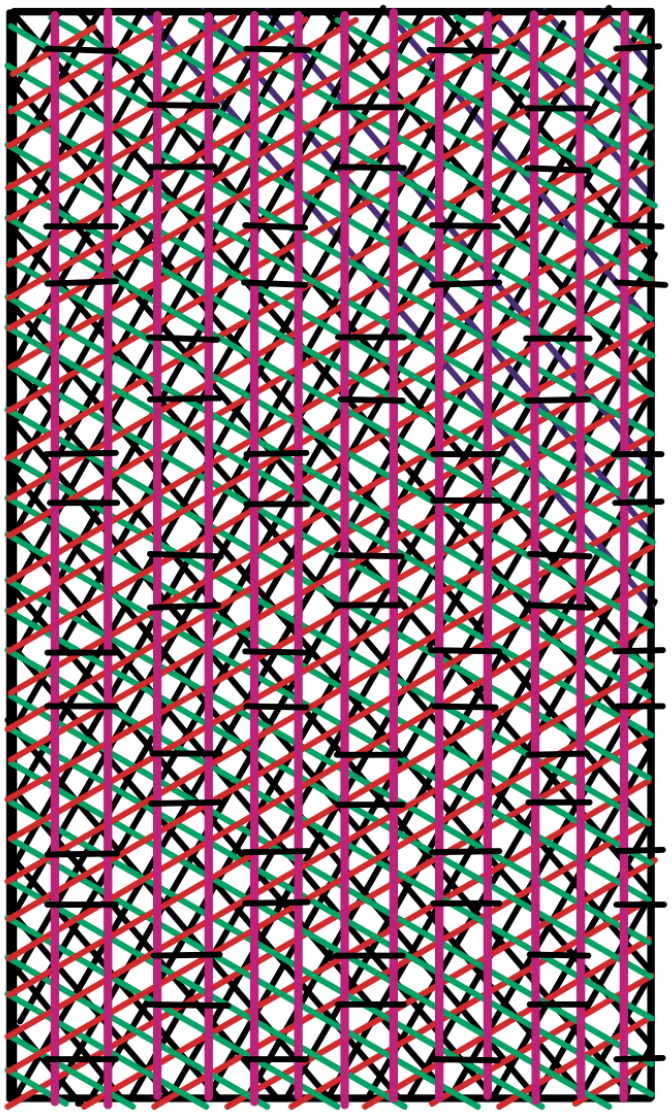
Če predpostavimo, da je širina tkanine 100 cm, potem je dolžina osnove, ki zaklepa



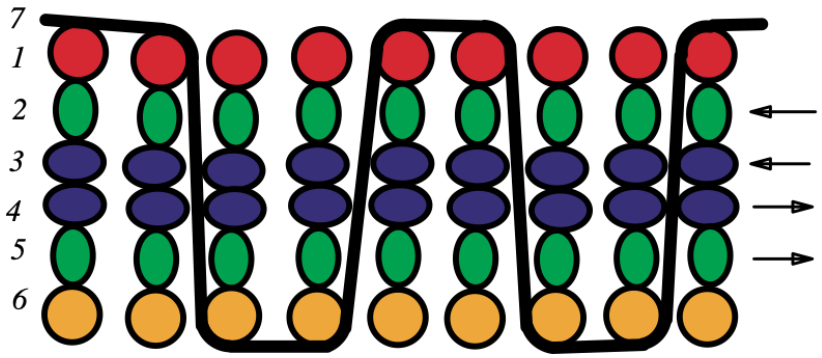
Slika 16.18: Notranji del seta sedem aksialne tkanine. Legenda: S_{30} (zelena barva) in Z_{30} (rdeča barva) ter S_{60} (temno vijolična barva) in Z_{60} (črna barva) 4 osnove, ki zaklepata z votkom kota 30 oziroma 60 stopinj. Votek in normalni osnovi nista prikazani.



Slika 16.19: Notranji del seta sedem aksialne tkanine plus zgornja normalna osnova na licu tkanine (spodnja normalna osnova na hrbtni strani in votek nista prikazani). Legenda: S_{30} (zelena barva) in Z_{30} (rdeča barva) ter S_{60} (temno vijolična barva) in Z_{60} (črna barva) 4 osnove, ki zaklepata z votkom kota 30 oziroma 60 stopinj; normalna osnova (navpična temno rdeča barva).



Slika 16.20: Popolna sestava sedem aksialne tkanine; ni vidna normalne osnove na hrbtni strani tkanine. Legenda: S_{30} (zelena barva) in Z_{30} (rdeča barva) ter S_{60} (vijolična barva) in Z_{60} (črna barva) 4 osnove, ki zaklepata z votkom kota 30 oziroma 60 stopinj, normalna osnova (navpična temno rdeča barva), votek (črna barva vodoravno).



Slika 16.21: Votkovni rez 7 aksialne tkanine. Legenda: 1 – normalna osnova na licu tkanine, 2 – S_{30} osnova, 3 – S_{60} osnova, 4 – Z_{60} osnova, 5 – Z_{30} osnova, 6 – normalna osnova na hrbtni strani tkanine, 7 – votek.

z votkom kot 30 stopinj 115,5 cm med dvema krajcema tkanine. Za osnovo, ki z votkom zaklepa kot 60 stopinj pa je dolžina 200 cm, kar je dva krat večja kot je širina tkanine. To pomeni, da za te osnove moramo imeti posebne osnovne valje ali navitke, ki so na cevčnici. Z vsakega navitka se odvija po ena nit osnove, kot pri snovanju. Na licu ali hrbtu tkanine, te štiri osnove praktični niso vidne. Skrivata jih normalni osnovi, ki sta položeni na lice oziroma hrbet tkanine. Delno jih skriva tudi votek.

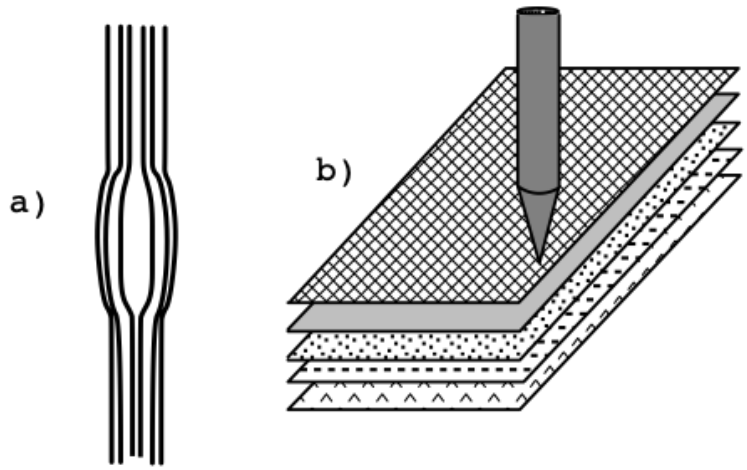
Osnovi S_{30} in Z_{30} se nahajata v sredini seta šest slojev osnove. Osnovi S_{60} in Z_{60} se nahajata na eni in drugi strani osnov, ki z votkom zaklepata kot 30 stopinj. Gostoto normalnih osnov lahko povečamo tako, do so niti osnove praktično druga poleg druge, približno kot niti, ki so nalepljene na folije in ojačajo neprebojni jopič ki se sedaj uporablja. To je razvidno na slikah 16.18, 16.19 in 16.20. Sicer je možno tkati tudi pet aksialne tkanine (dva normalna sistema in druga dva v diagonalni smeri in en normalni sistem votka), ter šest aksialne tkanine (en normalni sistem osnove in štiri diagonalna sistema osnove kot pri sedam aksialni tkanini, ter en normalni sistem votka). Vendar je šest aksialna tkanina po uporabni vrednosti verjetno slabša kot pet aksialna tkanine, ker šest aksialna tkanina ima samo eno normalno osnovo, ki je pravokotno postavljena glede na smer votka. Normalno osnovo je možno tkati z večjo gostoto, kot osnove, ki z votkom tvorijo manjši kot od devetdeset stopinj.

16.6.3 Osnovni načini penetracije pri zlomu, z vlakni ojačenih kompozitov

16.6.3.1 Uvod

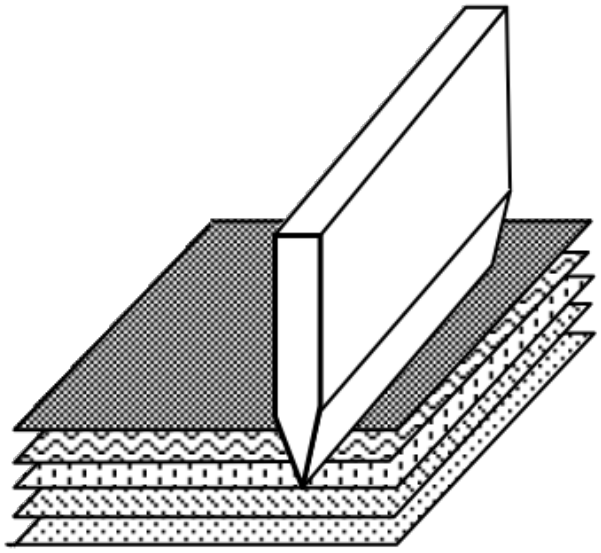
Zaradi boljšega razumevanja, bomo prikazali tri možne načine penetracije pri zlomu kompozitov, v katerih je armatura vlakno. Na sliki 16.22 je prikazan vpliv točkastega projektila najmanjšega premera. Kot je razvidno s slike 16.22a obstoji nevarnost razmikanja, na primer, niti v tkanini, ki je izpostavljena vplivu projektila, ki deluje v točki. Zaradi tega so tkanine, ki jih uporabljajo za izdelavo neprebojnih jopičev tkane v vezavi platno. Ta vezava pri enaki gostoti niti po osnovi in votku, enaki finosti preje in enaki surovimi najbolj preprečuje pomik niti pri točkastem vplivu projektila. Če bi, na primer, imeli še dovolj veliko gostoto niti in bi te bile precej izravnane vsaj v nekaterih sistemih, bi dosegli optimalne rezultate. Kot je razvidno s slike 16.12 gostota nič ne pomaga, ker

je skrčenje (vtanje) osnove in votka preveliko. Celo 14 %.



Slika 16.22: Prodiranje točkastega projektila majhnega premera. Legenda: a) razmik niti, b) videz delovanja projektila na kompozitu.

Na sliki 16.23 je prikazan vpliv rezilnega predmeta (noža, sablje ali sekire). Pri vrezu so vlakna obremenjena na nateg in rezanje. Ta način nima nič skupnega s projektili. Lahko bi ga uporabili v primeru posredovanja, na primer, policije v uličnih demonstracijah, ko so policisti v neposrednem fizičnem stiku z demonstranti.

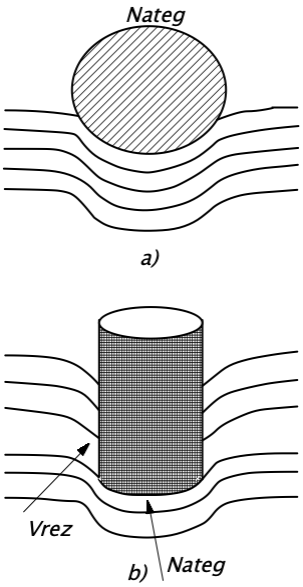


Slika 16.23: Vrez – prodiranje rezilnih predmetov.

16.6.3.2 Mehanizem prodiranja in zaviranja projektila v neprebojnem jopiču

Če je projektil večjega premera, se način penetracije nekoliko spremeni. Na sliki 16.24 je prikazan projektil, ki ima sferično konico. Ta povzroča nateg niti v tkanini, če je tkanina armatura kompozita. V tem primeru se ne pojavi razmak niti, ampak se pojavi nateg. Zaradi tega je pomembno, da so niti, ki prenašajo nateg, izravnane. Seveda, morajo niti biti "vpete". Niti so bolj vpete v tkanino, če je tkana v vezavi prikazani na sliki 16.25 oziroma na sliki 16.26, kot v vezavi prikazani na sliki 16.27. Drugo je vprašanje koliko

vpetost niti poveča lepljenje (smola) s katero so zalepljene plasti tkanin v kompozitu oziroma neprebojni plošči.

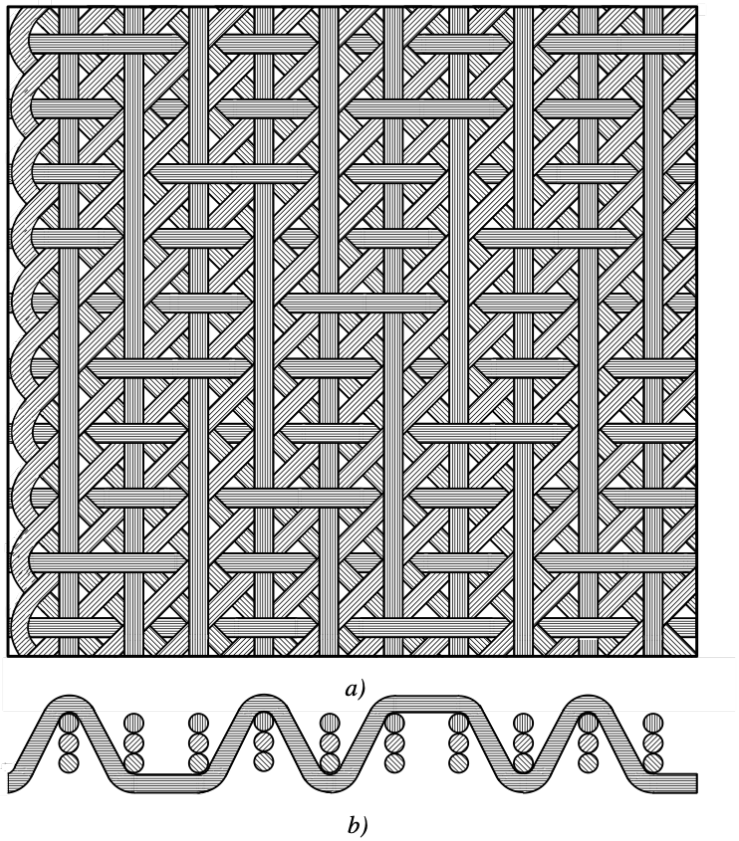


Slika 16.24: Vpliv projektila večjega premera. Legenda: a) projektil s sferično konico, b) projektil z ravno konico (nateg in vrez).

Ker sta naši štiri in sedem aksialni tkanini namenjeni predvsem za izdelavo neprebojnih jopičev, namenjenih zaščiti telesa uporabnika pred poškodbami, ki jih povzročajo projektili izstreljeni iz pištol, pušk in podobno, se bomo predvsem ukvarjali s to problematiko.

Mehanizem penetracije projektila skozi neprebojni jopič, je zelo kompleksen in je težko obvladljiv. Saj je več parametrov, ki zavirajo prodor projektila skozi neprebojni jopič. Nič ne pomaga zelo velika gostota tkanine, ki je prikazana na sliki 16.12. Z gostoto so pričakovali, da bo možno rešiti problem odrivanja niti proč od smeri gibanja projektila. Če se nit odrine proč od smeri gibanja projektila, se precej zmanjša njen delež pri zmanjševanju hitrosti gibanja projektila. Na sliki 16.12 je vrh projektila sferičen in je celo deformiran. Niso se pretrgale samo tri niti osnove in dve niti votka. Večina niti je odrinjena proč od poti projektila. Jakšičeva tetra aksialna tkanina, slika 16.16 ni dovolj gosta, da bi preprečila na celotni površini negativne posledice udara projektila, na primer, z ostro konico, da ne udari v relativno prazen prostor med nitmi osnove in votka. To pomeni, da bi projektil zavirale le niti osnove, ki so neposredno v stiku s površino konice projektila. Toda v tem primeru je večina niti izpostavljene odrivu in bi se zaradi tega zmanjšala njihova učinkovitost zaviranja hitrosti projektila. To pomeni, da v neprebojnem jopiču ne sme biti praznih prostorov. Zaradi tega moramo uporabiti več plasti tkanine za izdelavo neprebojnega jopiča. Pri tem je zelo velika verjetnost, da projektil ne bo direktno prišel v stik s praznim prostorom v tkanini. Tudi, če se to zgodi na prvi plasti jopiča, je majhna verjetnost, da se bo zgodilo na naslednji plasti in s tem na vseh naslednjih plasteh, dokler se projektil ne zaustavi.

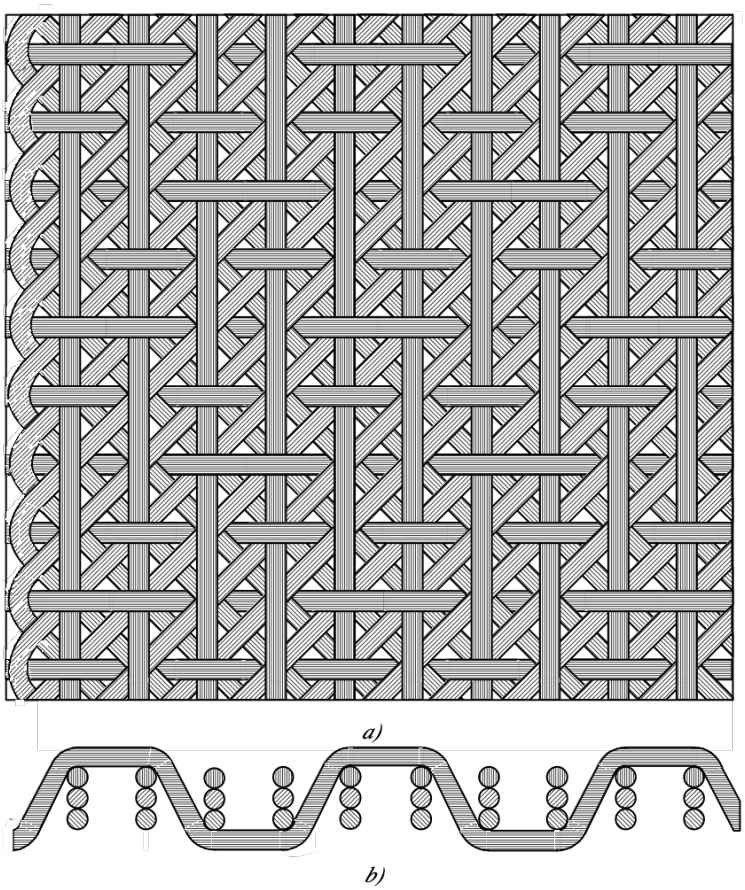
Niti, ki so na centralni osi projektila, jih ta pritiska v svoji smeri gibanja in jih obremenjuje na nateg. Vse niti, ki so v stiku s površino projektila, jih ta odriva vstran od smeri gibanja projektila. Te niti potiska proč od smeri svojega gibanj in tudi navzdol paralelno s osjo gibanja projektila. Tukaj so dogajanja precej kompleksna in se pojavlja trenje. Med površino projektila in nitmi, ki so neposredno v stiku s to površino se poja-



Slika 16.25: Vezava tetra aksialne tkanine, ki bi bila primerna za tkanino namenjeno za izdelavo proti prebojnih jopičev. Problem bo eventualni odriv niti.

vlja določen torni koeficient in s tem torna sila. Torni koeficient ne spreminja vrednost. Glede na začetno vrednost torne sile v hipu stika s površino stožca projektila se ta začne zmanjševati, ker se v stiku s površino stožca projektila povečava dolžina niti Torna sila se zmanjšuje toliko časa dokler stožec projektila ne gre mimo teh niti. Potem se pojavi valjasti del projektila in se vrednost torne sile stabilizira. Ker je torni koeficient sorazmeren kvocientu med torno silo in normalno silo projektila, se mora zmanjševati tudi hitrost projektila. Odrivane niti drsijo čez sosednje niti, ki so bolj oddaljene od projektila. Saj je razvidno s slike 16.12, da niti na katere posredno ali neposredno deluje projektil mu sledijo in tvorijo odprti stožec okrog projektila. Tukaj se tudi pojavi torna sila, ki jo vsaj teoretično moramo upoštevati. Tukaj ima torni koeficient praviloma drugačno vrednost, kot ga ima torni koeficient med površino niti in površino konice projektila. Ko projektil udari na površino neprebojnega jopiča ima kinetično energijo E_0 in hitrost v_0. Zaradi upiranja strukture vlakna deformaciji le tega, porabi projektil nekaj energije, da pretrga prejo.

Predpostavimo, da je vrh projektila udaril na mesto križanja vseh šest niti osnove v sedem aksialni tkanini in da vse te niti pretrga in pride do naslednje plasti tkanine, ki tvori proti prebojni jopič. Hitrost projektila je zmanjšana in se zmanjšuje ko prebije vsako naslednjo plast. Po določenem število plasti se projektil zaustavi. Lahko se vprašamo, koliko je potrebno plasti, da se projektil, ki ima težo 11 gramov in začetno hitrost 400 m/s, zaustavi.



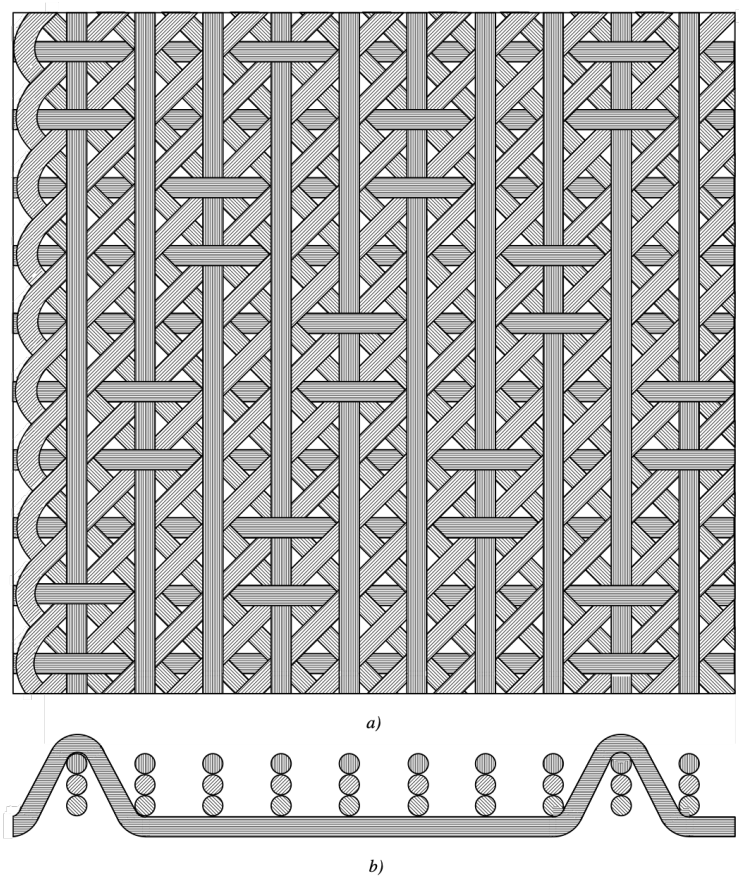
Slika 16.26: Vezava tetra aksialne tkanine, ki bo primerna za tkanino namenjeno za izdelavoneprebojnih jopičev in tudi neprebojnih plošč. Razmik niti bo manjši kot pri prejšnjem primeru, slika 16.25.

16.6.3.3 Jakšićev aproksimativni postopek ugotavljanja potrebnega števila plasti tkanine za 100 % zaščito uporabnika neprebojnega jopiča

Glede na stanje v svetu, so še zmeraj potrebni neprebojni jopiči. Ni zadosti uporabiti tkanine in eventualno večplastne vložke, ki so izdelani iz visoko modularnih vlaken za izdelavo proti prebojnega jopiča. Potrebno je poznavanje dinamike gibanja projektila skozi plasti neprebojnega jopiča. Naš namen je prilagoditi strukturo neprebojnega jopiča tako, da se čim bolj izkoristi trdnost visoko modularnih vlaken iz katerih je izdelan jopič.

Ko udari projektil na površino zunanje plasti jopiča, ima začetno kinetično energijo. Da prodre skozi prvo plast, mora projektil opraviti določeno količino dela. Zaradi tega se mu zmanjša določena količina kinetične energije in s tem tudi hitrost. Hitrost mu se zmanjšuje, dokler se pri n_i plasti popolnoma ne zaustavi. Pri tem se ne spreminja masa projektila. Ker so vse plasti enake se porabi za preboj vsake plasti enaka količina kinetične energije, oziroma se zmeraj opravi enaka količina dela.

Opravljeno delo je konstantna. To velja tudi za zmanjšanje količine kinetične energije projektila. V enačbi (16.4) je W delo, ki je potrebna, da se pretrgajo vse niti, ki so v neposrednem stiku s konico projektila in jih projektil ne odriva s svoje poti. Opazovali bomo projektil z ostro konico. Ta pri tetra aksialni tkanini lahko s svojo konico zajame maksimalno 3 niti osnove. Druge niti so izpostavljene odrivu. Za to se tudi porabi določena količina kinetične energije. Tu je tudi votek. Ker ima votek precejšnjo stkanje, bomo predpostavili, da je za njegovo izravnavo potrebno zelo malo energije. Izravna



Slika 16.27: Vezava tetra aksialne tkanine, ki je, brez *S* in *Z* osnove analogen 8-veznem atlasu pri bi-aksialni tkanini; bi bila primeren za izdelavo proti prebojnih plošč.

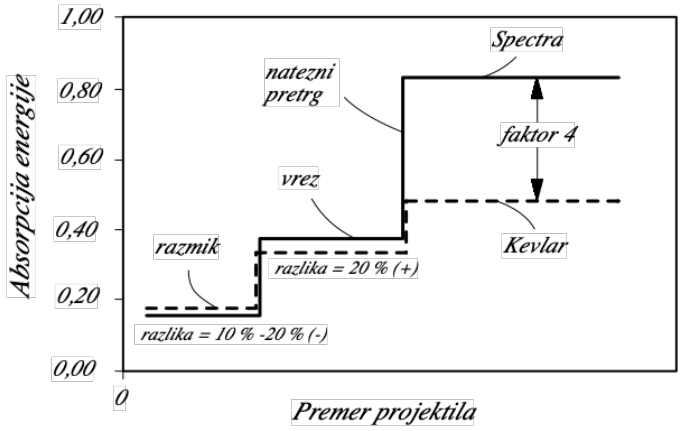
se na poti daljši od 4 %, ko so zajete niti osnove verjetno že pretrgane. Zaenkrat votek ne bomo upoštevali. Niti so različno oddaljene od ose gibanja projektila. Nekatere so zelo malo oddaljene od točke udara projektila. Druga so oddaljene za polmer projektile. Nekatere niti se nahajajo vmes ali so oddaljene še več kot je polmer projektila. Predpostavili smo, da te zadnje niti ne sodelujejo v procesu zaviranja gibanja projektila. Za odrivanje niti je tudi potrebna določena količina kinetične energije, oziroma potrebno je opraviti določeno količino dela. Koliko je to, je težko ugotoviti brez potrebnih meritev. Lahko se tudi zgodi, da projektil zadene v prazno mesto brez niti. V tem primeru bi bile praktično vse niti odrinjene. Za to bi morali uporabiti manj dela in bi bilo zmanjšanje hitrosti projektila manjša. Malo je verjetno, da se kaj takega zgodi tudi v naslednjih plasteh tkanine.

$$E = \frac{m}{2}\left[v_0^2 - v_1^2 - v_2^2 - v_3^2 - \cdots - v_n^2\right] \tag{16.6}$$

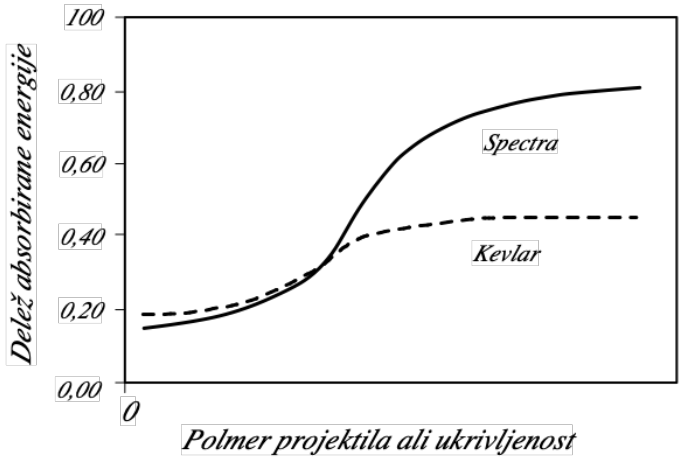
kjer so E kinetična energija projektila, m masa projektila, v_0 hitrost projektila v momentu stika z zunanjo površino neprebojnega jopiča, v_n hitrost projektila v stiku z zadnjo plastjo proti prebojnega jopiča v kateri se projektil zaustavi.

Sliki 16.28 in16.29 podajata prikaz primerjave absorpcije energije med Kevlarjem in Spectro.

Glede enačbe (16.6) bi neprebojni jopič moral imeti n plasti, da zašiti del telesa, ki ga prekriva. Da bi projektil prebil plast tkanine, mora projektil opraviti določeno količino dela. Pri tem izgubi določeno količino kinetične energije, ki jo zaznamo kod zmanjšanje



Slika 16.28: Primerjava deleža absorbirana energije med Kevlarjem in Spectro.



Slika 16.29: Zvezni prikaz absorpcije energije v primeru sferične konice projektil.

hitrosti projektila. Ta dogodek lahko opišemo z naslednjo enačbo:

$$v_1^2 = \left(\frac{m}{2}v_0^2 - n_1 F_1 s_1\right) \tag{16.7}$$

V enačbi (16.7) je n_1 prva plast jopiča, ki ima določeno število niti, kar je odvisno od gostote niti in vrste tkanine (4, 5, 6 ali 7 aksialne) V tem primeru se projektilu upira le ena plast niti osnove s silo F_1. Projektil pretrga niti v tej plasti in pri tem naredi pot s_1, ki je obenem debelina plasti, ki jo je projektil pretrgal. Količina opravljenega dela pri vseh plasteh je enaka. Saj se plasti med sabo ne razlikujejo. Drugo je vprašanje mesto udara projektila. V enačbah (16.6), (16.7) in (16.8) je tudi masa projektila m konstantna. Spreminja se samo hitrost projektila in razteg niti, ki se pretrgajo, ali so odrinjene s poti projektila, dokler projektil ne pride do plasti v kateri se zaustavi. Ena plast tkanine ima lahko 3, 4, 5 ali 6 niti, ki zavirajo hitrost projektila. To so lahko 4, 5, 6 ali 7 aksialna tkanina. Votek je vezni sistem in ne sodeluje v zaviranju hitrosti projektila, ker ima preveliko stkanje (glej sliko 16.21 – votkovi rez sedem aksialne tkanine).

$$\frac{mv_0^2}{2} - \left(\sum_{i=1}^{n} F_i s_i + \sum_{j=1}^{n} F_j s_j\right) = 0 \tag{16.8}$$

kjer so n_1 prva plast jopiča skozi katero se je gibal projektil, F_1 trgalna trdnost (sila upora) prve plasti jopiča s katero se upira gibanju projektila, F_i sila upora i-te plasti jopiča proti

gibanju projektila, v_0 hitrost projektila, ko pride v stik s površino zunanje plasti jopiča, s_i dolžina poti, ki jo preide projektil skozi i-te plasti jopiča, n_1 prva plast jopiča, skozi katero se je gibal projektil, n zadnja plast tkanine v kateri se projektil zaustavi, s_j j-ta pot niti, ki so na smeri gibanja konice projektila, F_j j-ta sila, ki jo dajejo niti, ki niso na smeri gibanja konice projektila, vendar so v coni na katero deluje projektil, s_j j-ta pot niti, ki niso na smeri gibanja konice projektila, vendar so v coni na katero deluje projektil.

Ko projektil prebije zadnjo plast jopiča ali se v njej zaustavi, dobimo, $v_i = v_n = 0$. Tukaj se pojavi tudi problem ocene dolžine poti projektila, ki jo ima pri prehodu skozi določeno plast. Kljub temu, da je debeline tkanine konstanta, kar velja tudi za plasti jopiča, se lahko ustvari določena razlika. Toda enačba (16.8) se nanaša na idealizirani primer, ko se lega plasti ne spreminja pri prehodu projektila skozi jopič.

Tetra aksialno tkanino je možno izdelati tako, da so vsa tri sistema osnove izravnana, sliki 16.15 in 16.16, kar pomeni, da takoj prevzamejo silo, ki jo povzroča projektil ob udaru na površino plasti. To ne velja za votek, ki ima povezovalno vlogo s sistemi osnov. Sedaj se za izdelavo neprebojnih jopičev uporablja gosta bi-aksialna tkanina v vezavi platno, ki ima 14 % stkanja, slika 16.12. Zaradi tega ni primerna za izdelavo neprebojnih jopičev. Ta je zelo gosta, in težka. Saj ima le 1,2 % odprte površine in je težka 0,5 kg/m^2. Preden niti prevzamejo obremenitev projektila, se ta že nahaja v telesu uporabnika v globini okrog 2 cm, skupaj s plastjo, ki jo ni prebil.

Če nam je znana energija, ki jo absorbira ena plast zaščitnega jopiča in kinetična energija projektila, ki jo ima projektil pri stiku s zunanjo površino zaščitnega jopiča, je možno izračunati najmanjše število plasti, ki so potrebne, da se zaustavi gibanje projektila. To je odvisno predvsem tudi od tega katero več aksialno tkanino uporabimo in kakšno prejo uporabimo za tkanje več aksialne tkanine. Najbolj primerna bi bila sedem aksialna tkanina. Toda bo lažje izdelati pet aksialno tkanino in bi izdelava bila precej cenejša.

16.7 Medsebojna primerjalna analiza uporabnosti 2, 3, 4, 5, 6 in 7 aksialnih tkanin za izdelavo neprebojnih jopičev

16.7.1 Bi-aksialna tkanina

Na sliki 16.12 je konkretno prikazana tkanina in projektil, ki ni popolnoma prebil tkanino. Kot smo že omenili, to zelo gosto bi-aksialno tkanino so vzeli za izdelavo neprebojnih jopičev, ker so pričakovali, da se lahko tako izognemo odrivu niti proč od smeri gibanja projektila. Kot je razvidno s slike 16.12, odriv niti še obstoji. Tako gosto tkanino v vezavi platno je možno dobiti pri velikem stkanju osnove in votka. Na tkanini, ki smo jo preskušali je stkanje 14 %. Za izravnavo teh niti je potrebna majhna vrednost sile. Ko se niti izravnajo in na njih še naprej deluje zunanja sila, se začnejo raztezati makro molekule, ki tvorijo mikro fibrile. Za to je potrebna precejšnja sila. Preden se to zgodi, je projektil že več kot 1 cm v telesu uporabnika. To pomeni, da ta tkanina ni primerna za izdelavo neprebojnega jopiča. Zaradi tega so jopiču dodate ojačitve. Spredaj v obliki žepov in zadaj na hrbtni strani pa v obliki nahrbtnika. V notranjosti so folije na katere so nalepljene niti, ki so popolnoma izravnane in so postavljene druga poleg druge. Takšnih plasti je v žepih in nahrbtniku ponavadi več kot 20. Med sabo so za-rotirane tako, da niti ležijo v različnih smereh.

16.7.2 Tri aksialna tkanina

Tri aksialna tkanina ni uporabna za izdelavo neprebojnih jopičev zaradi odrivanja niti proč od smeri poti projektila. To tkanino tvorijo dve osnovi in votek. Niti med sabo zaklepajo kote 60 stopinj in osnove ni možno popolnoma izravnati pri tkanju.

16.7.3 Tetra aksialna tkanina

Japonska tetra aksialna tkanina ni namenjena za izdelavo neprebojnih jopičev. Saj to ni navedeno v njihovem prospektu, kot eno od področij uporabe. Pa tudi, če pogledamo sliki 16.13 (ročna izdelava) in sliki 16.14 (strojna izdelava) vidimo, da noben drugi sistem niti ni izravnan, razen normalne osnove.

Pri naših tetra aksialnih tkaninah se struktura precej razlikuje, posebej, če jih primerjamo z japonsko tkanino, ki je izdelana na ročnih statvah. Na sliki 16.15 imamo 4 niti v enem votku. Vsako osnovno nit tvorijo po dve niti preje. S in Z osnovo pa tvori po ena nit preje, ki je postavljena enkrat od desnega proti levem krajcu tkanine – S osnova in potem v obratni smeri Z osnova. Vsak votek tvorijo po 4 niti. Vidimo, da je normalna osnova praktično izravnana. S in Z osnova pa sta popolnoma izravnani. Votek je precej valovit, kar pomeni da je precej stkan in dejansko ne sodeluje aktivno v procesu zaviranja projektila. Vidne so tudi napake (prazna mesta). Če projektil udari na to prazno mesto, bo razrinil niti in bo zaviranje onemogočeno. Na tkanini, ki bo izdelana na mehanskih statvah, takšnih napak ne sme biti.

16.7.4 Pet aksialna tkanina

Pet aksialna tkanina še neobstoja. Možno bi je bilo izdelati na naših ročnih statvah, ki bi jim dodali še eden osnovni valj za normalno osnovo. Če je sedanja normalna osnova na licu tkanine, bi bila dodatna osnova na hrbtni strani tkanine. Vmes bi bile S in Z osnova. Pri dovolj gostih normalnih osnovah, S in Z osnova se nebi videle niti na lični, niti na hrbtni strani tkanine. Ker bi bila izravnana tudi ta dodatna osnova, bi 4 osnove zavirale projektil. To je povečanje 25 % sile, ki zavira hitrost projektila. Pri tem nismo upoštevali dejstva, da so v smeri gibanja projektila, še tri plasti, ki zavirajo projektil. Preden projektil predre do površine dodatne normalne osnove, mora prebiti tri plasti niti osnove, pri čemer izgubi precej hitrosti. Ko predre, če predre, do površine dodatne osnove, je hitrost precej manjša kot je začetna hitrost, ki jo ima projektil pri stiku s površino zunanje normalne osnove te plasti tkanine.

16.7.5 Šest aksialna tkanina

Ta bi imela eno normalno osnovo, kot tetra aksialna tkanina in štiri S in Z osnove ter šesti sistem, oziroma votek. S in Z osnova tvorita z votkom kot 30 in 60 stopinj. Te osnove lahko označimo s S_{30}, S_{60}, Z_{30} in Z_{60}. Lege teh niti so prikazane na sliki 16.21.

Ta tkanina je vsekakor boljša kod pet aksialna tkanina. Ne samo ker ima eden sistem osnove več, ampak tudi zaradi tega, ker je kot med sistemi le 30 stopinj. Ko smo že prišli do šest aksialne tkanine, lahko gremo tudi na sedem aksialno tkanino, ki ima še eno normalno osnovo na hrbtni strani tkanine.

16.7.6 Sedem aksialna tkanina

Stroju za tkanje šest aksialnih tkanin, dodamo še del, ki uravnava tkanje dodatne normalne osnove, ki je bil omenjen pri tkanju pet aksialnih tkanin. Sedem aksialna tkanina

se razlikuje od pet aksialne tkanine še z dve S_{30}, S_{60}, Z_{30} in Z_{60} osnovi, tako kot v šest aksialna tkanina. Pri sedem aksialni tkanini, niso vidne S in Z osnovi, enako, kot pri pet aksialni tkanini, če so niti normalne osnove na licu in na hrbtni površini tkanine dovolj goste.

Bistvena razlika med sedanjo bi-aksialno tkanino v vezavi platno in sedem aksialno tkanino je v tem, da so plasti osnov ena nad drugo, kar omogoča izravnanost niti, ki takoj prevzamejo silo udara projektila. Projektil stiska plasti druga nad drugo, oziroma drugo ob drugi, kar zmanjšuje verjetnost odriva niti. Votek tudi drži niti osnov skupaj. Sam praktično ne sodeluje v zaviranju hitrosti projektila. Razlika se lahko pokaže, če za neprebojno platformo uporabimo več tkanin ena nad drugo. To se ne bo zgodilo pri neprebojnem jopiču ker bi bil pretežek. Kompletna sedem aksialna tkanina je prikazana na sliki 16.20. Ni vidna normalna osnova na hrbtni strani tkanine. Sicer je normalno osnovo na hrbtni strani tkanine možno stkati tako, da je premaknjena za polovica razdalje med nitmi normalne osnove na licu tkanine. Votkov rez je prikazan na sliki 16.21. Ta je precej idealiziran.

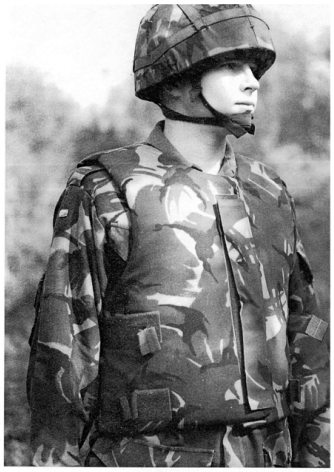
16.7.7 Druga področja uporabe pet in sedem aksialnih tkanin

Smiselna je proizvodnja le pet in sedem aksialnih tkanin. To pa zaradi tega, ker proizvodnja bo precej dražja kot proizvodnja bi-aksialnih tkanin. Potem takem se bodo uporabljale za področja, ker uporaba bi-aksialne tkanine ni primerna, oziroma nima kakovost, ki je nujna za določeno področje uporabe. To je na primer uporaba v delih gradbeništva kot armatura . Saj je lažja kot železo, ki ni odporno na rjavenje in se, na primer mora cesta ali mostovi in viadukti obnoviti po določenem času uporabe, ker je železna armatura zarjavela in s tem izgubila svojo odpornost na obremenitve.

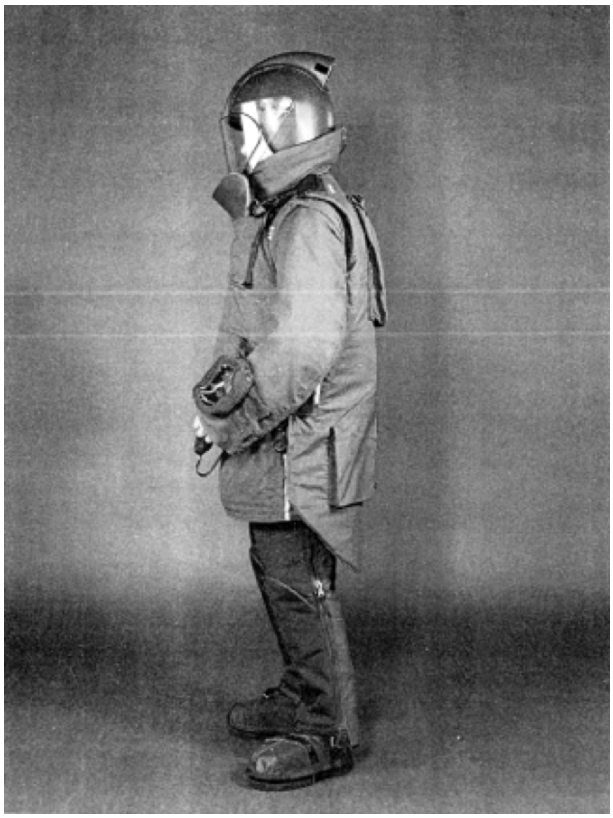
Lahko se uporabi tudi za izdelavo helikopterjev in letal kot armatura ali kompozit. Možna je tudi uporabe za obloge u prtljažnih kontejnerjev za prtljago na potniških letalih. S tem bi preprečili negativne posledice eksplozij v prtljažnikih letal. Nebi prišlo do zrušitve letala in s tem do smrti vseh potnikov in članov posadke. Kompozite že uporabljajo pri posameznih delih konstrukcije tankov, letal in raket. Ruska raketa "Avangard" leti s hitrostjo do 27 Macha ali več kot 33.075 km/h. Pri takšni hitrost zelo zažari. Ne zgori za to, ker je zunanja lupina verjetno izdelana iz ogljikovih vlaken, ki prenesejo zelo visoke temperature in tlake in so precej lažje od aluminija. Kompozit bi lahko uporabili tudi pri izdelavi avtomobilov, avtobusov in podobno. Moramo upoštevati dejstvo, da so visoko modularna vlakna odpornejša na deformacije kot jeklo, so precej lažja (Spectra okrog 10 krat), jih spremenimo v grafitirana vlakna, ki ne gorijo in prenesejo visoke temperature, kar je pomembno pri konstrukciji super soničnih letal in super soničnih raket.

Če primerjamo sliki 16.30 in 16.31, vidimo kvalitetni skok v razvoju kompleta za zaščito vojaka na bojišču. Zaščitni komplet na sliki 16.31, ki ga uporablja NATO, precej zavira gibanje vojaka, kar je velika pomanjkljivost. Ruski komplet pa je res kompleten slika 16.32. Zaščiteni so vsi deli telesa. Izdelan je iz ogljikovih vlaken, kar pomeni, da je zelo lahek in ima zelo veliko dinamično odpornost. Planira se v nadaljnjem razvoju dodati še elektroniko. Komplet je bil testiran na robotu v realnih vojnih pogojih v Siriji. Pokazal je odlične rezultate. Sicer, je potrebno okrog ene minute, da vojak obleče komplet in le 20 sekund, da ga sleče, oziroma sname s telesa. Prednost je tudi v tem, da ogljik (karbon) ne gori. V tem kompletu vojak lahko celo teče in nosi obremenitev do 50 kg.

Na sliki 16.33 je v obliki diagrama prikazano kako uporaba zaščite opreme (čelada



Slika 16.30: Vojak v neprebojnem jopiču in z zaščitno čelado. [5]



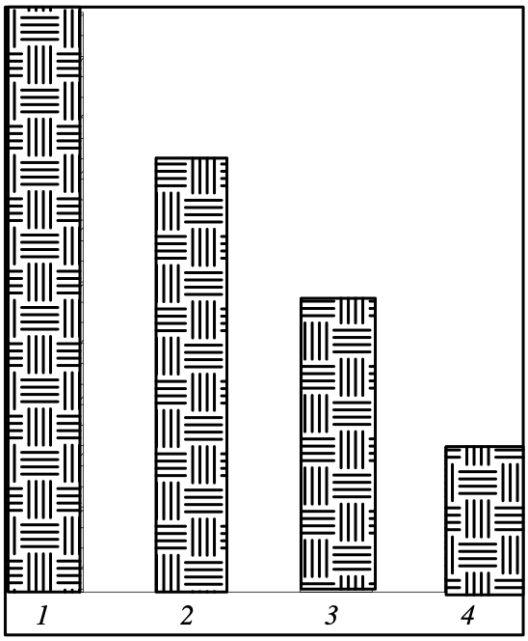
Slika 16.31: Vojak v popolni zaščitni opremi. [5]

Slika 16.32: "Ratnik" – ruski komplet zaščitnega oblačila. [7]

in zaščiti jopič) vpliva na zmanjšeanje izgub na bojišču. Kombinirana uporaba čelade in zaščitnega jopiča statistično zmanjša izgube na bojišču kar za 65 %.

16.7.7.1 Primeri uporabe tetra-aksialnih tkanin v gradbeništvu

Vzemimo primer, prikazan na sliki 16.34. Deset plasti tetra-aksialne tkanine 5 je speljano čez palice 2, ki jih napenjala 3, 4 vlečeta narazen. Tkanina je vstavljena v okvir 1, v katerega vlivamo betonski nosilec. Na sliki 16.34 je prikazan naris nosilca. Ko bo nosilec montiran kot del nosilne konstrukcije, bo sila obremenitve delovala z leve ali desne strani na nosilec, prikazan na sliki 16.34. Nosilec bo izpostavljen upogibu. Predpostavimo, da je višina nosilca 50 cm, širina 50 cm in dolžina 1.000 cm. Nadalje lahko predpostavimo, da je gostota S in Z osnove ter votka po 5 niti/cm. Gostota ortogonalne osnove naj bo 10 niti/cm. Finost multifilamentne preje 100 tex, vrsta vlaken – kevlar, koeficient odpornosti (potrebna sila za 1 % raztezka preje) – 50 N/nit, razteg nosilca in niti v nosilcu – 1 %. 50 N/nit je 0,25 vrednosti trdnosti pri 4 % raztezka (2 N/tex). Modul elastinosti pa je 35 N/tex. Vendar smo vzeli manjšo vrednost, ker je zelo težko doseči popolnoma izravnano lego niti ortogonalne ojačene osnove. Votek se pod temi pogoji sploh ne razteza, medtem ko lahko pričakujemo, da bosta S in Z osnova sodelo-

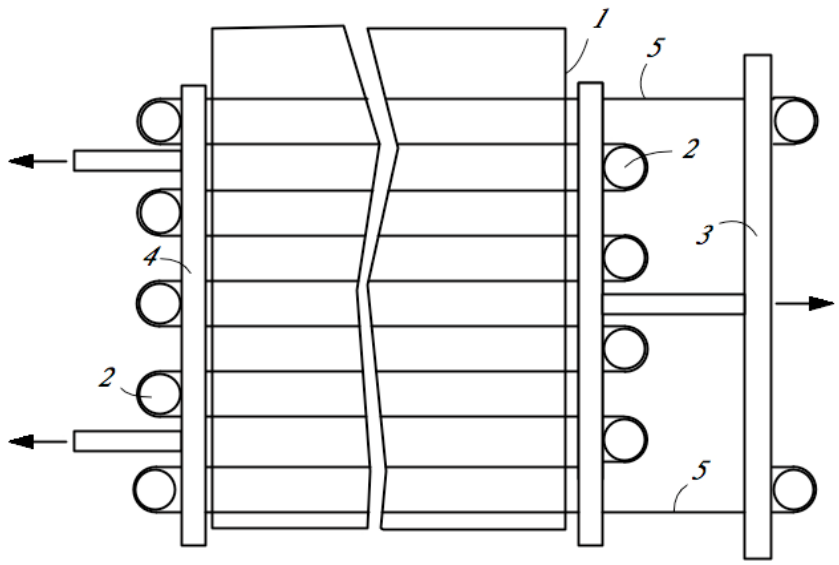


Slika 16.33: Odvisnost števila žrtev od stopnje zaščite. [5] Legenda: 1 – skupaj žrtve (ni proti prebojne zaščite), 2 – če je uporabljena čelada (19 % zmanjšanje izgub), 3 – uporaba neprebojnega jopiča (40 % zmanjšanje izgub), 4 – če je uporabljena čelada in proti prebojni jopič (65 % zmanjšanje izgub).

vali, zaradi valovite lege, verjetno z manj kot 20 % izkoristka odpornosti v izravnanem stanju. To pomeni le 5 N/nit ali manj. V sistemu deformacije imamo 5.000 niti ortogonalne (normalne) osnove, ki prenaša silo 250 kN. *S* in *Z* sistem osnove imata skupaj enako število niti kot ojačena ortogonalna osnova, vendar dajeta vsaj petkrat manjši odpor deformaciji tkanine, kar pomeni le 50 kN. Skupaj torej 300 kN ali 30 ton. Problem je velika gostota, premajhen hidravlični premer por in razslojevanje betona. Za odpravo teh problemov, se lahko uporabi bolj groba preja in manjša gostota niti v tkanini.

Če je tetra-aksialna tkanina izdelana iz omenjenih visokomodulnih vlaken in je vgrajena v betonski nosilec, ki je obremenjen na upogib, lahko analiziramo vrednost te armature. V mehaniki se obravnava deformacija nosilca na upogib tako, da obstoji nevtralna zakrivljena ravnina v sredini višine nosilca, ki se pri upogibu ne deformira. Nad to ravnino se v nosilcu pojavijo tlačne sile, pod njo pa natezne sile. V tako kratkem prikazu, pa še brez eksperimentov, ne moremo obravnavati zgornje polovice nosilca. Vsekakor lahko predpostavimo, da tkanina, vgrajena v zgornjo polovico višine nosilca, ne bo prenašala nobenih obremenitev. Če ne bi uporabili plasti tkanine v zgornji polovici nosilca, bi se lahko tu pojavile natezne napetosti kot posledica napetosti v plasteh tkanine v spodnji polovici nosilca. Vse natezne obremenitve prenašajo plasti tkanine. Samoumevno je, da obremenitev prenaša tudi beton, vendar tukaj obravnavamo samo tkanino. Najbolj bo deformirana plast na spodnjem koncu nosilca, najmanj pa plast, ki se nahaja najbližje nevtralni ravnini. Predpostavljamo, da je povprečna deformacija vseh plasti tkanine, ki so v natezni polovici višine nosilca, 1 %. To pomeni, da je precej realno pričakovati, da bo armaturna tkanina prenašala obremenitev 15 ton. Iz tega ilustrativnega primera je razvidno, da je možno tetra aksialno tkanino uspešno uporabiti kot armaturo celo v takšnih elementih, kot je beton. Uporabnost v kompozitih, pri katerih je druga komponenta sintetična smola ipd., ki je bolj elastična kot beton, pa je še bolj ugodna.

Uporaba Allied Spectra 1000 je še bolj ugodna kot uporaba Kevlarja. Specifina masa



Slika 16.34: Primer uporabe anizotropne ojačene tetra-aksialne tkanine kot armature pri vlivanju betonskega nosilca.

Spectre je le 0,97 g/cm^3, trdnost 3 N/tex in modul elastičnosti 172 N/tex. V nosilec bi vgradili 50 m^2 tkanine. Vsi sistemi imajo 20 niti/cm, kar pomeni težo tkanine 200 g/m^2. Skupna teža tkanine, vgrajene v nosilec bi bila 10 kg, kar je zanemarljiva teža glede na težo celotnega nosilca. Uporabljena tetra-aksialna tkanina v tej analizi je dejansko pregosta. Plasti betona se težko povežejo med sabo skozi pore tkanine. Zaradi tega bi morali zmanjšati gostoto tkanine na po 2,5 niti/cm po sistemu. V tem primeru bi bila teža uporabljene tkanine le 5 kg. Kljub temu bi bila nosilnost nosilca oziroma tkanine vgrajene v nosilec vsaj 7 ton.

Tetra-aksialno tkanino bi bilo možno uporabiti v večplastnem kompozitu za oblogo zabojnikov v letalih, kot varovalno plast proti bombnimi eksplozijami, ki jih lahko postavijo teroristi v zabojnike za prtljago in drug tovor. Pri eksploziji bi se kontejner sicer deformiral, vendar bi ga bilo možno konstruirati in dimenzionirati tako, da bi zdržal precej močno eksplozijo. V tem primeru letalo s potniki ne bi bilo poškodovano in bi lahko nadaljevalo polet do prvega letališča.

Zgornja primerjava delno velja na primer za Japonsko tetra-aksialno tkanino, ki je neuporabna za armaturo v betonskih izdelkih, ker pač nima izravnanih niti v nobenem sistemu. Jakšićeva tetra-aksialna tkanina bo imela izravnane niti v vsa tri sistema osnove. Zaradi tega je potrebno korigirati zgornji pristop izračunu vrednosti armature. Kot kaže slika 16.34 je tkanina lahko prednapeta tako da lahko vzamemo zgoraj prikazana vrednosti specifične sile (N/tex), ki jo prenese nit tkanine. Vlakno naj bo Spectra. Tkanino, za to namembnost lahko tkemo tako, da *S* in *Z* osnova zaklepata z normalno osnovo kot 30 stopinj in z votkom 60 stopinj. Gostoto votka lahko zmanjšamo na polovično vrednost *S* in *Z* osnove in gostoto normalne osnove podvojimo. Takšna medsebojna lega sistemov niti je ugodna, ker ojačamo smer v kateri deluje obremenitev. Ugodna je tudi manjša gostota votka, ker se pri upogibu ne deformira in obenem se poveča premer por med nitmi, kar je ugodno za medsebojno povezovanje plasti betona skozi pore. Velikost por mora biti večja, kot so največji delci primesi cementu. To pa je pesek.

Ker ortogonalna oziroma normalna osnova na votek ima 5.000 niti v nosilcu, ki

so izpostavljene obremenitvi, rabimo silo 1.500 kN, da pretrgamo to osnovo. Imamo še toliko niti skupaj S in Z sistema. Toda ta dva sistema sodelujeta le z ortogonalno komponento na votek. Vrednost te komponente bo manjša za faktor 0,866 v primerjavi z ortogonalno osnovo. Skupna vrednost je 1.500 + 1.500·0,866 = 2.800 kN ali 280 ton. To pomeni, da lahko zmanjšamo gostoto za polovico in s tem povečamo velikost por med nitmi osnove in s tem bolj učinkovito medsebojno povezovanje plasti betona med plastmi tkanine. Prišli bi na 140 ton, kar je več kot dovolj. Tudi če vzamemo polovično vrednost trgalne trdnosti, še zmeraj bi dobili 70 ton nosilnosti tkanine. Pri tem beton jemljemo kot prenosnik obremenitve z zgornje prve obremenjene plasti pod nevtralno linijo do zadnje plasti spodaj.

Brez eksperimenta z kompozitom beton – tkanina, mi možno vnaprej z določeno verjetnostjo predvideti obnašanje tega kompozita. So izkušnje z manjšimi betonskimi elementi, ki kažejo, da se beton dobro oprime tekstilne komponente. Vsekakor struktura betona i pore v tetra-aksialni tkanini morata biti takšna, da se plasti betona vežejo med sabo skozi pore tkanine. Kot se da sklepati na podlagi zgoraj prikazanih izračunov, bi verjetno bila primerna tkanina, v kateri bi imela normalna osnova gostoto 2 niti/cm, S in Z osnova in tudi votek po 1 nit/cm. Finost preje pa bi bila od 500 tex do 1.000 tex.

Primerjalna analiza tri aksialnih in tetra-aksialnih tkanin kaže, da so tri aksialne tkanine preteklost. Sicer so tudi do sedaj imele zanemarljiv delež v tehničnih tekstilijah, predvsem zaradi previsoke cene, ki sicer nima popolnega opravičila v previsokih proizvodnih strokih.

Obstoječa japonski sistem izdelave tetra-aksialnih tkanin bistveno prekašata tehnologijo izdelave tri aksialnih tkanin na Barber Colmanovem stroju. Zaradi tega bodo tudi cene teh tkanin, če bodo na tržišču, precej višje kot je cena primerjalnih bi-aksialnih tkanin. Kljub temu bodo vsekakor precej nižje kot so trenutne cene tri aksialnih tkanin, saj bi podrle obstoječi monopol. Poleg tega, tetraaksialne tkanine imajo boljše lastnosti kot tri aksialne tkanine.

Če upoštevamo do sedaj znani trend razvoja tehnike izdelave tetra-aksialnih tkanin, lahko v bližnji prihodnosti pričakujemo izredno povečanje hitrosti proizvodnje tetra-aksialnih tkanin. Hitrost bo narasla na 300 vnesenih votkov v eni minuti in več. Pri gostoti 5 votkov/cm pomeni, da bo hitrost izdelave tetra-aksialne tkanine 1 m/min in več. Proizvodni stroki verjetno ne bodo presegali strokov izdelave bi-aksialnih tkanin na modernih brez čolničnih statvah.

Na večini področij uporabe tetra-aksialnih tkanin se bodo zahtevala visokozmogljiva vlakna (Nomex, Kevlar, Spectra ipd.), kar pomeni velik finančni vložek v vhodno surovino. Ta bo vplivala na višjo vrednost tetra-aksialnih tkanin, ne pa sama tehnologija izdelave le-teh.

Zaradi relativno nizkih strokov izdelave tetra-aksialnih tkanin in odpornosti visokomodulnih (visokozmogljivih) vlaken proti deformacijam, ki presega jeklo, bodo tkanine uporabili na številnih področjih visokih tehnologij. S tem se bo na trgu hitro povečeval delež teh tkanin. Posledica tega trenda bo padec njihovih cen in s tem možnost uporabe na manj atraktivnih področij.

16.8 Seznam oznak poglavja

Oznaka	Enota	Opis
α	°	kot med osnovami tkanine

Nadaljevanje na naslednji strani

Nadaljevanje s prejšnje strani

Oznaka	Enota	Opis
A	m^2	površina plasti tkanine, ki je deformirana zaradi izstrelka
ΔE_p	J	izguba kinetične energije izstrelka
E_f^k	J	kinetične energija, ki jo sprejemajo plasti tkanine
E	J	kinetične energija projektila
F_i	N	sila upora i-te plasti
F_j	N	sila j-ta plasti, ki jo dajejo niti, ki niso na smeri gibanja konice projektila, vendar so v coni na katero deluje projektil
K		koeficient odpornosti niti
K'		normirani koeficient odpornosti niti
ΔL	m	deformacija niti
m	kg	masa plasti tkanine, ki je izpostavljena delovanju izstrelka
m	kg	masa projektila
m_p	kg	masa izstrelka
s_i	m	dolžina poti, ki jo preide projektil skozi i-te plasti
s_j	m	dolžina poti j-tih plasti niti, ki niso na smeri gibanja konice projektila, vendar so v coni na katero deluje projektil
v	m/s	hitrost deformacije plasti tkanine
v_0	m/s	začetna hitrost projektila
v_i	m/s	hitrost projektila pred i-to plastjo tkanine
v_p	m/s	hitrost izstrelka pri trku s površino tkanine
v_r	m/s	preostala hitrost izstrelka, ko ta zapusti plasti tkanine, če ne prebije vse plasti tkanine, potem je $v_r = 0$
W	J	opravljeno delo

16.9 Literatura

[1] Lyons W. J. Neodquerters quartermaster res. and denvelopment comand. *Text. Eng. Lab. Rep.*, 1995.

[2] R. Shishoo. Recent developments in materials for use in protective clothing. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 14(3/4):201–215, 2002.

[3] D. Roylance, A. Wilde, and G. Tocci. Assessment of porosity of flat textile fabrics. *Textile Research Journal*, 77(2):105–110, 2007.

[4] R. Laible, editor. *Ballistic Materials and Penetration Mechanics.* Elsevier, Amsterdam, 1980.

[5] A. R. Horrock and S. C. Anand, editors. *Ballistic Materials and Penetration Mechanics.* Elsevier, Amsterdam, 2000.

[6] Tetras Meidai. Tetra-axial fabrics. Technical report, HTetras Meidai. http://www.meidai.co.jp/tetras (13. 4. 2005).

[7] B. Knific. Ruska oprema »ratnik-2« do konca leta, »ratnik-3« v letu 2025. *Obramba*, 2015.

POGLAVJE 17

Tekstilije za posebne tehnične namene

Kazalo

17.1 Ribiške in druge mreže [1] . . . **360**
17.2 Tkanine za šotore [2] . . . **360**
17.2.1 Splošno . . . 360
17.2.2 Trdnost in modul elastičnosti . . . 360
17.2.3 Poroznost . . . 361
17.2.4 Hidrofobnost . . . 362
17.2.5 Barva tkanine . . . 362
17.2.6 Tkanine za ponjave . . . 362
17.3 Tkanina za jadra - jadrovina . . . **362**
17.4 Transportni trakovi in pogonski jermeni . . . **363**
17.5 Padala . . . **363**
17.5.1 Splošno . . . 363
17.5.2 Moderna padala [3] . . . 364
17.5.3 Teorija letenja [4] . . . 366
17.5.4 Teorija odpiranja padala [5] . . . 368
17.5.4.1 Splošno . . . 368
17.5.4.2 Sila upora . . . 372
17.5.4.3 Pretok zraka skozi kupolo in tlak Δp_B v kupoli . . . 373
17.5.4.4 Končna hitrost padala . . . 375
17.5.4.5 Tkanine za padala . . . 377
17.6 Seznam oznak poglavja . . . **377**
17.7 Literatura . . . **378**

17.1 Ribiške in druge mreže [1]

V ribištvu imajo ribiške mreže pomembno vlogo, saj so poleg ladij in čolnov osnovno sredstvo za lovljenje rib. Pri projektiranju mrež moramo poznati velikost rib, ki jih želimo loviti, opremo za vlečenje mrež (ribiška ladja ali ribiški čoln), napetosti, ki nastajajo pri vlečenju mrež, vpliv morske ali sladke vode in vpliv sončnih žarkov. To pomeni, da je treba najprej izbrati primerno vrsto surovine (vlaken) za izdelavo sukanca. Pri konstrukciji sukanca je treba upoštevati maksimalne obremenitve mreže v katerikoli fazi lovljenja rib. Pri tem ne moremo upoštevati izjemnih dogodkov, kot je napad delfinov na polno mrežo ali ulov kake velike ribe, ki raztrga mrežo. Velikost odprtin v mreži mora biti manjša od najmanjših rib, ki jih želimo obdržati v mreži.

Mreža je precej draga in je gospodarno, če je njena življenjska doba čim daljša. Za izdelavo takšnih mrež so primerna PA vlakna, ki so stabilizirana proti degradacijskimučinkom ultravijoličnih žarkov. Poleg tega je pozitivno, da se PA mreže hitro sušijo. Mreže se uporabljajo tudi za kamuflažo orožja in vojne opreme (topovi, tanki, kamioni ipd.). Mreže, ki so namenjene za kamuflažo, sovražniku onemogočijo snemanje in odkrivanje razmestitve enot in tehnike. Mreže se uporabljajo tudi za obrambo proti komarjem, posebno v vlažnih in močvirnih predelih. To so zelo fine mreže z odprtinami, skozi katere komarji ne morejo prodreti. Izolirajo pred komarji, predvsem prostor za spanje in istočasno vanj prepuščajo dovolj svežega zraka. Poleg tega se mreža lahko uporablja kot filter v puščavskih predelih, posebno med peščenimi viharji. Uporabne so tudi kot geotekstilije za zaščito obal rek in potokov. Omenili smo že, da se mreže uporabljajo tudi kot zavese na oknih ipd.

17.2 Tkanine za šotore [2]

17.2.1 Splošno

Tkanina za šotore je specifičen izdelek, ki mora imeti nekaj posebnih lastnosti. Te so predvsem v funkciji namembnosti tkanine. Pogoji uporabe šotorov so lahko zelo različni. Šotori so lahko turistični, vojaški ali pa so namenjeni za bivanje alpinistov v zelo ostrih klimatskih razmerah. Lahko služijo tudi kod prostori za skladiščenje, prostor za občasne prireditve ipd. Glede namembnosti lahko tkanina za šotore ima različne strukture in kakovosti. Najvažnejši parametri kakovosti tkanine za šotore so: trdnost, modul elastičnosti, poroznost, hidrofobnost, barva in stabilnost dimenzij.

17.2.2 Trdnost in modul elastičnosti

Tkanina mora imeti relativno veliko trdnost, ne glede na to, za kakšno vrsto šotora je namenjena. To je zaradi dveh dejstev. Najprej mora biti tkanina na šotoru dobro in enakomerno napeta. Ta napetost ni enakomerno porazdeljena po vsej tkanini, ampak je največja v območju delovanja vrvice, s katero napenjamo tkanino. Pri približno izotropni tkanini, vzdolž posameznega sistema niti, kot so tri-aksialne, tetra-aksialne ali sedemaksialne tkanine, bi se ta lokalna napetost bolj porazdelila po površini tkanine, s čimer bi lahko prenesla večje napetosti. Poleg relativno velike vrednosti natezne trdnosti, mora tkanina imeti veliko razpočno trdnost in silo nadaljnjega trganja. To je zaradi sunkov vetra in velike hitrosti, ki povzroča določen tlak. Šotor je sestavljen iz tkanine in ogrodja, ter pomožnih delov.

Če želimo, da tkanina ostane ves čas napeta, mora imeti visoko vrednost modula elastičnosti, oziroma napetosti (natezne sile) v tkanini ne smejo priti izven območja

elastičnih deformacij. V nasprotnem primeru bi tkanina po določenem času postala ohlapna in bi se gubala, zaradi česar bise zmanjšala odpornost proti pretoku deževnice skozi tkanino, pa tudi veter bijo lažje poškodoval.

Tkanina za šotore ne sme v mokrem stanju bistveno spreminjati lastnosti, ker bi to lahko zmanjšalo njeno uporabno vrednost. Pri volnenem vlaknu se v mokrem stanju zelo zmanjša modul elastičnosti. Že samo zaradi tega bi bila uporaba volnenih tkanin za šotore vprašljiva. Poleg tega je trdnost volnenih tkanin prenizka in cena previsoka. Vse to nam pove, da so volnene tkanine neprimerne za šotore.

Prej so se za šotore največ uporabljale bombažne tkanine. Sedaj pa tkanine iz mešanice bombaža in kemičnih (sintetičnih) vlaken ali samo iz kemičnih (sintetičnih) vlaken. Bombažna tkanina ima dve osnovni pomanjkljivosti: v mokrem stanju se krči, zaradi česar se lahko celo deformira šotor, in hitro preperi - ni odporna proti degradacijskim vplivom ultravijoličnih žarkov - nastane oksiceluloza, ki ima majhno trdnost. Tkanine iz kemičnih (sintetičnih) vlaken so stabilne, imajo visoko trdnost (trgalno, razpočno in trdnost nadaljnjega trganja) in visoko vrednost modula elastičnosti. Vse to velja predvsem za aramidne tkanine - tkanine iz vlaken na osnovi aromatskih poliamidov (Kevlar, Nomex, ali polietilena – Spectra ipd.). Poleg tega so kemična vlakna stabilizirana in se zaradi vpliva ultravijoličnih žarkov le počasi spreminjajo njihove fizikalno-mehanske lastnosti. Poliamidno vlakno je najbolj občutljivo na vpliv sončne svetlobe. V zadnjem času je večina tipov tega vlakna stabilizirana in se lahko uspešno uporablja za izdelavo tkanin za šotore. Tkanine, ki so izdelane iz kemičnih vlaken niso občutljive na mikroorganizme, tako kot bombažne tkanine, kar je tudi pomembno, saj pride tkanina za šotore v stik z biološko aktivno zemljo.

17.2.3 Poroznost

Poroznost je zelo pomembna uporabna lastnost tkanine za šotore ne glede na to, ali se uporablja za bivanje ali za skladiščni prostor. V posameznih primerih, odvisno od vrste blaga, je tkanina, namenjena za šotore – skladišča, lahko tudi neprepustna za zrak (plastificirana). V tem primeru je nujen poseben prezračevalni sistem. Tkanina za šotore mora biti nepredušna v primeru, ko oblike šotora ne drži ogrodja, temveč nadtlak, ki ga ustvarja kompresor. Zaradi drage energije je takšen sistem neekonomičen in vse manj privlačen. Izjeme so različne napihnjene konstrukcije za zabavo.

Tkanina je po svoji strukturi porozen sistem. Poroznost je odvisna od več faktorjev, kot so gostota po osnovi in votku, finost preje, gostota preje, število zavojev, usmerjenost in kodravost vlaken, finost vlaken, vezava ipd. Temperatura v bivalnem šotoru je praviloma višja od temperature okolja. Poleti zato, ker deluje šotor kot toplotna kletka, v hladnejših obdobjih pa zato, ker ljudje, ki bivajo v šotoru, izžarevajo določeno količino toplote. Poleg tega je v takšnih primerih v šotoru nameščeno še ogrevalno telo (peč, sveča ipd.). Pod temi pogoji se v šotoru ustvarja majhen nadtlak. S površine kože oseb, ki bivajo v šotoru, izhlapeva znoj. Ta vodna para se s toplejšim zrakom dviga k strehi šotora in gre naprej v okolje. Čim večja je poroznost tkanine, tem večji je pretok zraka in vodne pare skozi tkanino šotora pri določeni razliki tlakov. To je zelo ugodno s stališča ventilacije, oziroma zamenjave zraka v šotoru. Če pa želimo zmanjšati izgubo toplote, potem je nujno zmanjšati poroznost tkanine za šotore. To pomeni, da moramo pri konstruiranju tkanine za šotore poiskati optimalno poroznost ob upoštevanju pogojev uporabe. Pore v tkanini ne smejo biti prevelike, sicer bi zaradi dinamičnega udarca del deževnih kapelj šel skozi pore v notranjost šotora.

17.2.4 Hidrofobnost

Če je dno v konstrukciji šotora predvideno, je zanj smiselno uporabiti plastificirano (za vodo nepropustno) tkanino. Dno je ponavadi vgrajeno v turistične šotore; medtem ko pri vojaških šotorih ponavadi dna ni. Izjema so le specialni sanitetni šotori. Pogosto se tudi prakticira uporaba plastificirane (za vodo neprepustne) tkanine za izdelavo spodnjega dela šotora približno do 20 cm višine. Okrog šotora je priporočljivo urediti zemljišče tako, da voda odteka (nasipi, jarki ipd.).

Streha šotora je oblikovana tako, da deževne kaplje padajo na površino strehe šotora pod določenim kotom, ki je manjši kot 90 stopinj. S tem se zmanjša učinek hidrodinamičnega udarca deževnih kapelj ob površino strehe šotora. Tkanina, ki ni plastificirana, mora biti obdelana s hidrofobnimi apreturami, ki preprečujejo hitro močenje tkanine in eventualno curljanje vode skozi streho v notranjost šotora. Hidrofobnost tkanine in nagnjenost strehe omogočata, da tkanina (streha šotora) ne prepušča vode tudi v zelo hudih nalivih. Edino v primeru kapelj, ki imajo zelo veliko energijo, glej preglednico 2.3 na strani 18, je možno, da drobne kaplje prodrejo skozi pore, kar samo poveča vlago v šotoru.Do močenja notranje površine tkanine pa ne pride.

17.2.5 Barva tkanine

Barva tkanine za šotore je zelo pomembna tako pri šotorih za vojaške namene kot pri šotorih, ki so namenjeni turizmu. Pri vojaških šotorih je barva pomembna predvsem zaradi maskiranja in delno tudi pripadnosti. Pri turističnih šotorih igra barva zelo pomembno estetsko vlogo. Posamezni kosi tkanine so obarvani v različnih barvah, pogosto so to zelo žive barve, ki včasih delujejo celo disharmonično.

17.2.6 Tkanine za ponjave

Tkanina za ponjave (cerade) je težja in močnejša od tkanine za šotore in je praviloma plastificirana. Ponjave se uporabljajo za zavarovanje tovora pred padavinami, predvsem v odprtih skladiščih (skladišča na prostem) in na transportnih sredstvih. Najpogosteje so s ponjavami prekriti kamioni s prikolicami. Za¬radi plastifikacije je tkanina zaponjave nepremočljiva. Izdeluje se predvsem iz kemičnih (sintetičnih) vlaken. Ponjave na kamionih so izpostavljene velikim tlakom, ki nastajajo zaradi hitrosti vožnje kamiona. Izpostavljene pa so tudi bočnim sunkom vetra. Poleg tega so močno napete na ogrodju. Vse to zahteva tkanino, ki ima veliko trdnost. Pri tem se pojavlja še en pomemben faktor, vpliv plastifikacije na trdnost tkanine. Proti pričakovanju plastificiranje zmanjšuje trdnost tkanine. Posebno izrazito je to pri sili nadaljnjega trganja. Plastična plast, ki je nanesena na tkanino, zmanjšuje elastičnost tkanine oziroma učinkuje tako, da prepreči porazdelitev obremenitve po globini in površini. Zaradi tega sodeluje v procesu deformacije manjše število osnovnih in votkovih niti, to je, obremenitev se porazdeli na manjše število niti ali manjšo površino, s čemer se poveča obremenitev posamezne niti. Na zunaj se to kaže kot zmanjšanje trdnosti. To dejstvo moramo upoštevati pri konstrukciji tkanine za ponjave.

17.3 Tkanina za jadra - jadrovina

Tako kot tkanina za ponjave, mora biti tudi jadrovina zelo odporna proti velikim sunkom vetra. Že iz davnih časov je jadrovina znana kot zelo močna tkanina. Temu primerno je

bila težka in gosta. Moderna jadrovina je ponavadi izdelana iz kemičnih vlaken (multifilament). Takšna tkanina ima veliko trdnost, zaradi česar lahko zdrži zelo močne sunke vetra. Jadrovina je ponavadi rahlo obojestransko plastificirana in neprepustna za zrak. Odporna mora biti proti morski vodi in ultravijoličnim žarkom. Nekatera od teh plovil so na odprtem morju tudi takrat, ko je hitrost posameznih sunkov vetra večja kot 60 km/h. Že pri 60 km/h povzroči na površini jadra veter tlak okrog 170 Pa. To pa pomeni približno 17 kg/m^2. Velika trdnost kemičnih vlaken omogoča izdelavo relativno lahke jadrovine, kar je zelo pomembno zaradi lažje manipulacije z jadrom.

17.4 Transportni trakovi in pogonski jermeni

Uporaba transportnih trakov in pogonskih jermenov je zelo razširjena v industriji in rudarstvu. Tukaj mislimo predvsem na transportne trakove in pogonske jermene, katerih nosilna plast je tkanina, ki je izdelana iz tekstilnih vlaken. Izdelani so kot večdelne tkanine, ki so med seboj zelo močno povezane, tako da tvorijo trdno celoto. Takšne tkanine prenesejo zelo velike obremenitve, saj so lahko debelejše od 1 cm. Transportni trakovi in pogonski jermeni so gumirani. Pri transportnih trakovih služi guma kot abraziv-na plast, tkanina pa kot nosilna plast. Pri jermenih je guma tudi abraziv-na plast in torna ploskev. Površina gume ima visoko vrednost tornega koeficienta. To preprečuje drsenje jermena na jermenici. Pri klinastih jermenih pa je bistvenega pomena oblika jermena in v zvezi s tem velikost tornih sil.

17.5 Padala

17.5.1 Splošno

Letenje je bilo davni človekov sen. V antiki je poznan Ikar ali Ikarus, ki je s pomočjo kril poletel zelo visoko; tako blizu sonca, da se je raztopil vosek, s katerim so bila zlepljena krila. Zaradi tega je padel in se ubil. Tako pravi mitologija.

Eden prvih teoretikov padalstva je bil Leonardo da Vinci. S problemom letenja se je ukvarjal okrog 30 let. Proučeval je možnost spuščanja s padalom. Izdelal je idejno skico štiri kotnega šotora v obliki piramide, ki od daleč precej spominja na današnje padalo. Pod skico je zapisal, da se je mogoče spustiti s pomočjo takšnega šotora iz poškrobljenega platna, ki meri 12×12 laktov, iz katerekoli višine, ne da bi se poškodovali.

Prvi človek, za katerega se točno ve, da je skočil s padalom, je bil Francoz Laven iz Savoje leta 1620. Bil je zaprt v trdnjavi Moljans v Franciji. V zaporu je na skrivaj izdelal padalo, sešito iz odej in rjuh. Ponoči je skočil s padalom z obzidja trdnjave. Padel je v vodo. Skok je popolnoma uspel ne glede na to, da samemu ni uspelo zbežati.

Do začetka 20. stoletja je bilo padalstvo povezano z letenjem s pomočjo balonov. V začetku našega stoletja pa se začenja razvijati letalstvo in z njim padalstvo. Prva sta z letalom poletela 1903. leta brata Wright. Prvo pilotsko padalo pa je konstruiral Francoz Voser 1909. leta. Padalo je bilo v obliki velikega dežnika. Ni bilo uporabljeno, ker sistem odpiranja padala ni bil dobro rešen.

Nadaljnji razvoj letalstva in padalstva je vezan na prvo svetovno vojno. Pilot je imel padalo, zloženo v poseben nahrbtnik, ki se je pri skoku avtomatično odprlo. Tkanina je bila izdelana iz prave svile. Površina padala je bila od 41 m^2 do 85 m^2 in masa do 12 kg. Po prvi svetovni vojni se je razvil padalski šport, kar je vplivalo na nadaljnjo izpopolnitev padal.

17.5.2 Moderna padala [3]

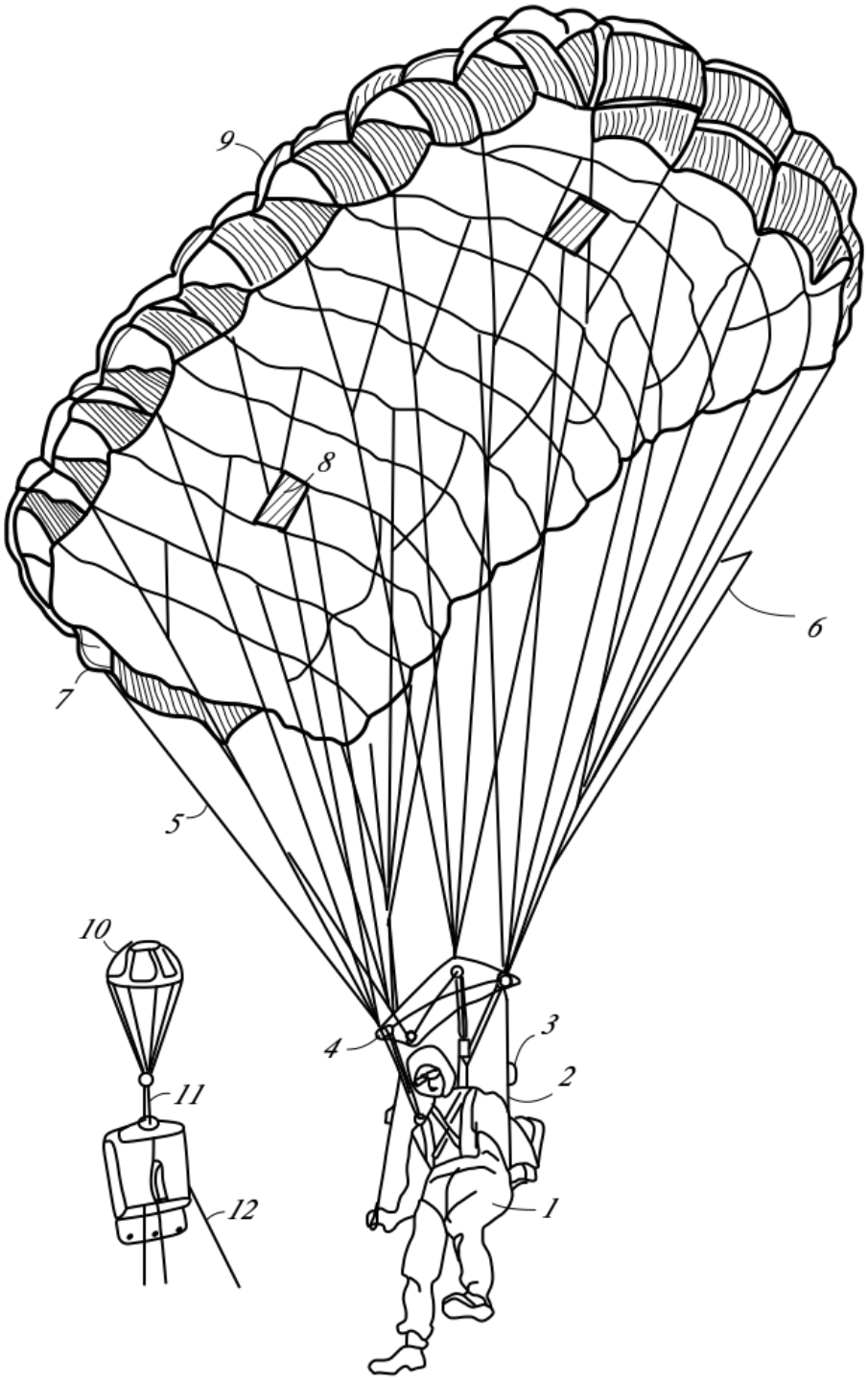
Moderna padala lahko razdelimo v dve skupini: avtomatična padala in športna padala. Prva so enostavna in se avtomatično odpirajo. Ponavadi so kupolaste oblike. Na vrhu kupole je pogosto odprtina, nad katero je montirano majhno padalo, ki ima iniciativno vlogo odpiranja glavnega padala. Včasih je na prsih padalca še pomožno padalo, s pomočjo katerega se upočasni padanje ali pa sploh nadomesti glavno padalo, če se to ne odpre. Ta padala so služila predvsem v vojaške namene pri množičnih padalskih desantih, v katerih uporabljajo tudi malo trenirane padalce. Manevrske lastnosti te vrste padal so relativno majhne, kar jih je potisnilo iz nadaljnje uporabe.

Na športnih padalskih tekmah se uporabljajo specialna športna padala velikih manevrskih zmožnosti. Takšna padala omogočajo padalcu, da zelo natančno zadene cilj. Ta padala nimajo oblike okrogle kupole, temveč so v obliki pravokotnika s kupolo ali brez nje. To obliko padala pogosto imenujejo krilo, ker se pri gibanju skozi zrak obnaša podobno kot letalsko krilo, saj lahko doseže horizontalno hitrost tudi 13 m/s in več v vremenu brez vetra.

Na sliki 17.1 je prikazano nekoliko starejše padalo v obliki krila. Ta padala lahko uporabljajo le izkušeni padalci. "Drsni pravokotnik" omogoča počasno odpiranje padala, zaradi česar se zmanjša dinamični udarec pri odpiranju. Poleg tega omogoča padalcu proste gibe s telesom med padanjem. Dimenzije padala so $4\times3\times2$ m. Celotna masa padala z nahrbtnikom je težka okrog 10 kg. Padalo prenese padalca, čigar masa je v mejah od 60 kg do 120 kg. Padalec mora odpreti padalo, preden prekorači hitrost 70 m/s (okrog 250 km/h). Če ne bi bilo drsnega pravokotnika, bi padalec doživel hud dinamični udarec pri hitrosti padanja 250 km/h. Poleg tega se postavlja vprašanje, ali bi tkanina vzdržala takšen tlak. V začetni fazi odpiranja je drsni pravokotnik v bližini kupole. To pomeni, da so vse štiri skupine vrvic ena poleg druge. Takšna lega vrvic preprečuje hitro odpiranje kupole oziroma padala. Ko pilot "izvleče" padalo iz nahrbtnika, se kupola le delno odpre zaradi omenjene lege drsnega pravokotnika. Zaradi majhne površine kupole je tudi zaviranje - zmanjšanje hitrosti relativno majhno. Zrak, ki povzroča tlak na površino kupole, nadalje odpira kupolo. To je mogoče le, če drsni pravokotnik drsi navzdol. Dejansko se ustvarja takšno razmerje sil, da mora pravokotnik drseti navzdol. To drsenje je postopno in se torej tudi kupola postopno odpira. Takšen sistem odpiranja pa pomeni zmanjšanje vrednosti pospeška oziroma dinamičnega udara. Po drugi strani takšen sistem odpiranja pomeni, da je nujno odpreti padalo najkasneje 400 m nad tlemi. Sicer bi zaradi počasnega odpiranja padala prišel padalec do tal, preden bi se padalo popolnoma odprlo. To bi pa pomenilo preveliko hitrost pri doskoku, ki je lahko zelo nevarna za padalca.

Padalo doseže vodoravno hitrost od 0 m/s do 13 m/s (od 0 km/h do 47 km/h) in vertikalno hitrost od 3 m/s do 8 m/s (od 11 km/h do 29 km/h). Te vrednosti se nanašajo na vreme brez vetra. Ker padalec lahko v omenjenih mejah regulira vertikalno in vodoravno komponento hitrosti s pomočjo krmilnih vrvic, lahko doskoči v naprej določen krogna tleh. Možnost preciznega krmiljenja padala omogoča zelo dobre rezultate v padalskem športu. Na padalskih tekmovanjih, če ni vetra, večina padalcev skoči v tekmovalni krog ali zelo blizu njega. Pri tem, poleg sposobnosti padalca, ima odločilno vlogo kakovost padala (večja ali manjša možnost krmiljenja).

Manevrske zmožnosti padala so odvisne tudi od časa spremembe smeri za popoln krog. Pri padalu PS-11 se lahko izpelje sprememba smeri za popoln krog v času 4 do 6 sekund, če ima padalo maksimalno vodoravno hitrost. Razmerje med vzgonom in uporom pri polni (popolnoma odprti) kupoli je približno 3:1. Čas, v katerem se kupola



Slika 17.1: Padalo PS-11tovarne “Kluz"(Beograd). Legenda: 1 – padalec, 2 – komandna vrvica za krmiljenje, 3 – zanka za blokado komand, 4 – drsni pravokotnik, 5 – nosilne vrvice, 6 – vrvica za upravljanje, 7 – stabilizator, 8 – ena od dveh pravokotnih odprtin na kupoli, 9 – kupola, 10 – pomožno padalo namenjeno odpiranju glavnega padala, 11 – povezava pomožnega padala z notranjim etuijem, 12 – povezovalne vrvi z glavnim padalom.

napolni (od potega ročice do popolnega odpiranja), znaša 2,5 sekund. Pri tem se ustvarja dinamična obremenitev 5g (petkratno vrednost Zemljinega pospeška).

Na sliki 17.1 sta v kupoli dve odprtini 35×20 cm (šrafirana pravokotnika), ki zmanjšujeta dinamični udarec pri odpiranju padala in omogočata lažjo deformacijo kupole pri krmiljenju. V pilotskem padalu (majhno padalo s premerom kupole 76 cm) je vgrajena vzmet, ki se sproži, ko padalec povleče ročico, in to padalo potem izvleče glavno kupolo padala iz nahrbtnika. Pri supersoničnih letalih, ki letijo 2.500 km/h ali celo hitreje, pilot se katapultira s sedeža in se padalo samodejno odpre. Pri tako velikih hitrostih, padalec nima časa za klasični izstop iz pilotske kabine in dejansko nebi obvladal ročnega postopka odpiranja padalo.

17.5.3 Teorija letenja [4]

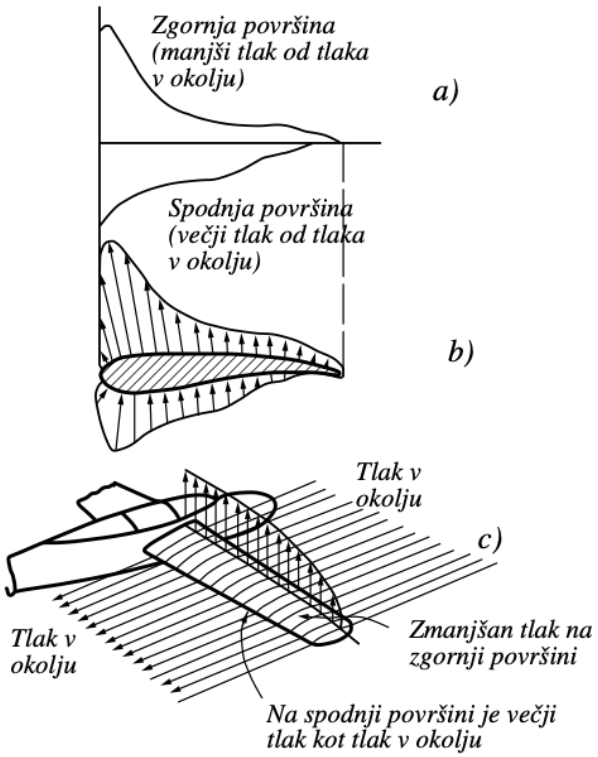
Gibanje padala-krila skozi zrak lahko obravnavamo kot gibanje krila jadralnega letala.Pri tem moramo upoštevati dejstvo, da se za razliko od krila jadralnega letala padalo-krilo lahko deformira. Poleg tega ima padalo dve odprtini, ki zmanjšujeta moč aerodinamičnega udarca pri odpiranju padala. Potemtakem je aerodinamična obravnava padala-krila precej bolj zapletena kot obravnava krila nespremenljivih dimenzij in oblike.

Za lažje razumevanje delovanja padala se je treba seznaniti s teorijo letenja. Na sliki 17.2 so prikazani letalsko krilo 17.2c, profil krila in smer vzgona 17.2b ter diagram tlakov 17.2a. Poglejmo letalsko krilo na sliki 17.2c. Pred krilom in za njim je atmosferski tlak. Pod krilom je tlak večji od atmosferskega tlaka. Nad krilom je manjši tlak od obdajajočega zraka. Takšna situacija povzroča vzgon. Profil krila in smer vzgona sta prikazana na sliki 17.2b. Na sliki 17.2a pa je prikazan diagram tlaka na zgornji in spodnji površini krila. Takšno porazdelitev tlakov povzroča oblika profila krila.

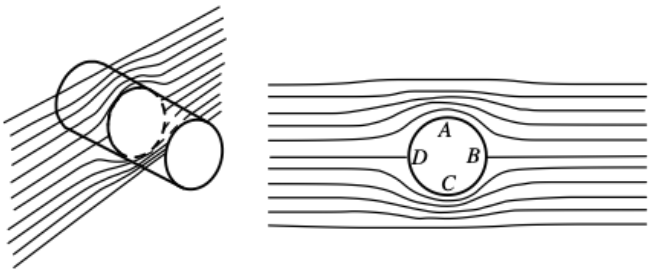
Moderni profil letalskega krila je osnovan na teoriji Nikolaja Jegoroviča Žukovskega, ki jo je razvil med letoma 1902 in 1906. Preden podrobneje razložimo to teorijo, bomo poskušali pojasniti, zakaj prihaja do vzgona. Oglejmo si dolg valj, slika 17.3, ki se vodoravno giblje skozi zrak in ne rotira; ali pa je pri miru in zračne tokovnice tečejo okoli njega. Sprememba smeri tokovnic je simetrična glede na zamišljeno simetralo na liniji C-D-B. predpostavljamo, da je tok zraka laminaren. Ker se tokovnice na zgornjem in spodnjem delu valja zgostijo (zmanjša se površina pretoka), se mora povečati hitrost tokovnic, ker je pretok mase konstanten. To ilustrirata pravokotnik in kvadrat na sliki 17.4 (pravokotnik ilustrira večjo hitrost tokovnice). To stanje se ujema z Bernoullijevo enačbo, po kateri je (pri fluidu, ki se giblje laminarno) vsota tlaka in kinetične energije na enoto mase fluida konstantna v vseh točkah polja, kar pomeni, da se bo zmanjšal tlak v tistem delu polja, v katerem se poveča hitrost tokovnic in obratno.

Če bi ustvarili takšne pogoje, da bi se povečala hitrost tokovnic na zgornji plošči valja, hitrost tokovnic na spodnjem delu valja pa bi ostala nespremenjena, bi dobili vzgon in bi se valj začel dvigati. Takšno stanje je možno ustvariti z vrtenjem valja v gibajočem se fluidu, kot je prikazano na sliki 17.5.

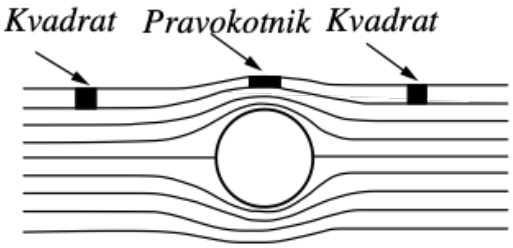
Fluid se giblje od desne proti levi okrog dolgega valja, slika 17.5b, ki se vrti v nasprotni smeri urinega kazalca, slika 17.5a. Mejna plast fluida na površini valja se vrti v isti smeri kot valj. Na zgornjem delu valja se smer gibanja fluida. ki je v neposredni bližini površine valja, ujema s smerjo gibanja fluida v polju, v katerem je valj. V tem primeru se hitrosti seštevajo in rezultat tega je povečana hitrost tokovnic nad zgornjo površino valja. Ker pa je pretok mase konstanten, se bo tlak fluida zmanjšal v sorazmerju s povečano hitrostjo.



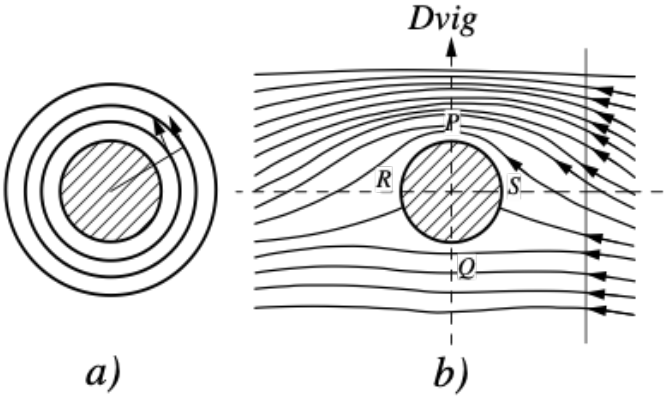
Slika 17.2: Vzgon, ki nastane zaradi oblike profila (preseka) letalskega krila. [2] Legenda: a – diagram tlakov, b – profil krila in smer vzgona, c – letalsko krilo.



Slika 17.3: Lega zračnih tokovnic v neposredni bližini plašča dolgega valja.



Slika 17.4: Spremembe hitrosti tokovnic v neposredni bližini mirujočega dolgega valja.



Slika 17.5: Magnusov učinek.

Na spodnji strani valja je stanje precej drugačno. Plasti zraka, ki jih valj "vleče" s seboj, se na spodnji strani valja gibljejo v nasprotni smeri gibanja fluida. Zaradi tega se zmanjšuje hitrost gibanja fluida v tem delu polja. Ker pa je hitrost pretoka skozi enoto površine polja konstantna, se poveča gostota fluida na spodnjem delu valja. To se izraža kot povečanje tlaka. Zaradi takšnega stanja se pojavlja vzgon – valj se začne dvigati. To je Magnusov učinek.

Stanje, prikazano na sliki 17.5, je poseben primer ene od znanih teorij aerodinamike Kutta-Žukovskega, ki je temeljni teorem aerodinamike. Teorem pravi, da valj kateregakoli prečnega prereza, ki miruje v dvodimenzionalnem toku fluida, ki ima hitrost v in ki se vrti okrog valja z intenziteto K, povzroči silo vzgona F na enoto prečnega preseka toka in deluje pravokotno na smer toka oziroma hitrosti v. Podoben učinek (vzgon) povzroči tudi oblika letalskega krila, ki je prikazana na sliki 17.2.

17.5.4 Teorija odpiranja padala [5]

17.5.4.1 Splošno

Odpiranje padala je zelo kompleksen proces, saj na odpiranje padala deluje več faktorjev, ki imajo v različnih pogojih različne vrednosti. Mi bomo predpostavili, da se padalo odpira oziroma polni tako, kot je prikazano na sliki 17.6.

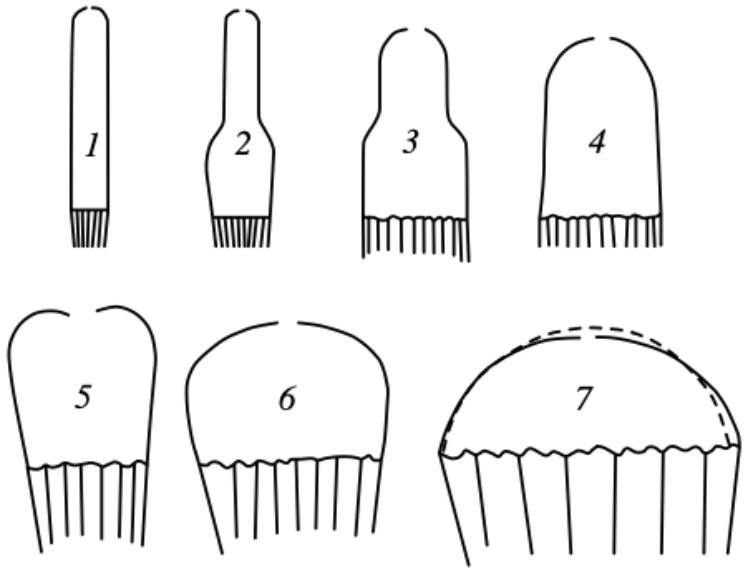
Prikaz faz odpiranja padala velja za kupolasto padalo z okroglo projekcijo brez drsnega pravokotnika. Podobno velja tudi za pravokotna kupolasto padalo z drsnim pravokotnikom, le da je pri enaki hitrosti padanja čas odpiranja precej daljši.

Poleg konstrukcije padala, nas zanima predvsem, kako se obnašajo tkanina, trakovi in vrvi v trenutku delovanja največjega tlaka na površino padala. Zanima nas tudi kako na zmanjšanje vpliva poroznosti tkanine in odprtina (ali odprtine) na padalu na zmanjšanje dinamičnega sunka pri odpiranju padala in kakšen je njihov vpliv na hitrost padanja padalca.

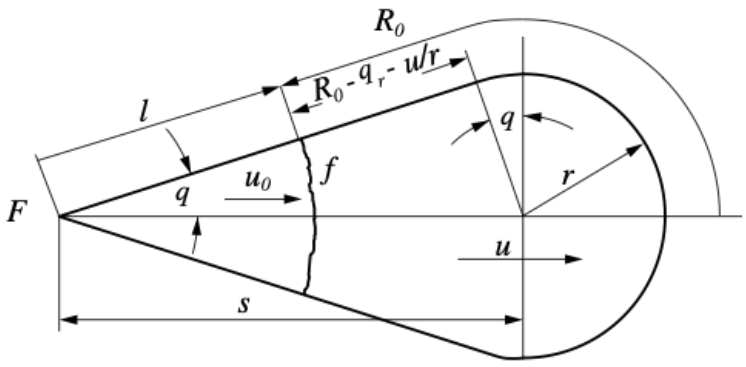
Predpostavljamo, da ima padalo v času odpiranja obliko prisekanega stožca, katerega osnovo tvori polkrogla,kot je prikazano na sliki 17.7. Volumenska hitrost pretoka zraka v stacionarnem področju mehurja (padala) lahko opišemo z naslednjo enačbo

$$V = u\pi r^2, \tag{17.1}$$

kjer so V [m^3/s] volumenska hitrost pretoka, u [m/s] linearna hitrost pretoka, r [m] polmer kupole padala.



Slika 17.6: Faze odpiranja padala. Legenda: 1 – stanje, ko pomožno majhno padalo izvleče padalo pri določeni hitrosti padanja, 2 in 3 – padalo se polni – odpira; 4, 5 in 6 – odpiranje se nadaljuje, 7 – prikazano je popolnoma odprto padalo.



Slika 17.7: Nekaj važnejših parametrov idealizirane oblike padala v času odpiranja. Legenda: s – oddaljenost med bremenom (padalcem) in centrom sfere padala, l – dolžina neobremenjena vrvi, R_0 – dolžina tkanine, iz katere je narejeno padalo, od vrvice do najvišjega dela padala, r – polmer kupole padala, F – sila vzgona (pri odpiranju padala se spreminja volumen kupole), v odvisnosti od povečanja njenega polmera (odpiranje obravnavamo pod predpostavko, da ima kupola v opazovanem času odpiranja obliko poloble, torej zavzema polovični volumen krogle enakega polmera), u_0 - začetna hitrost padala.

Pri odpiranju padala se polmer kupole padala povečuje. Zaradi tega se spreminja linearna in volumenska hitrost pretoka. Za linearno hitrost pretoka velja naslednje diferencialna enačba

$$u = 2\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}. \tag{17.2}$$

Spremembo volumna v odvisnosti od spremembe polmera kupole padala v določenem času lahko izrazimo z naslednjo diferencialno enačbo

$$\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{2}{3}\pi r^3\right) = 2\pi r^2\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}. \tag{17.3}$$

Po drugi strani je, po Bernoullijevi teoriji, statični tlak tega mehurja enak

$$p = p_\infty + \frac{1}{2}\rho\left(u_0^2 - u^2\right), \tag{17.4}$$

kjer so p [Pa] statični tlak, p_∞ [Pa] statični tlak okoliškega zraka, ρ [kg/m^3] gostota zraka, u_0 [m/s] hitrost prostih tokovnic zraka. Če upoštevamo enačbo (17.2), lahko napišemo diferenco Δp statičnih tlakov z naslednjo enačbo

$$\Delta p = p - p_\infty = \frac{1}{2}\rho\left(u_0^2 - \left(\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}\right)^2\right), \tag{17.5}$$

Iz enačbe (17.5) lahko izrazimo hitrost spremembe premera kupole po času v odvisnosti od hitrosti prostih tokovnic zraka, preden pridejo v kupolo.

$$\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t} = \frac{u_0}{2} \tag{17.6}$$

Z integriranjem enačbe (17.6) lahko izračunamo velikost končnega polmera projekcije kupole r_E ki ga doseže v času polnitve t_f.

$$\int_0^{r_E}\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t} = \frac{u_0}{2}\int_0^{t_f}\mathrm{d}t \quad ; \quad r_E = \frac{1}{2}u_0 t_f \tag{17.7}$$

Po drugi strani pa velja naslednje razmerje med r_E in polmerom R ravne površine kupole, slika 17.7).

$$r_E = \frac{2R_0}{\pi} \tag{17.8}$$

Če upoštevamo enačbi (17.7) in (17.8), lahko izrazimo čas odpiranja z naslednjo enačbo

$$t_f = 1,273\frac{R_0}{u_0}. \tag{17.9}$$

Enačbi (17.2) in (17.9) se ne ujemata z eksperimentalnimi rezultati zaradi neupoštevanja nekaj pomembnih dejavnikov. Pri širjenju (polnjenju) kupole, pritiska površina kupole na plasti zraka, ki so neposredno na njeni zunanji površini. Potemtakem tlak na zunanji površini kupole ni p_∞ (tlak zraka na dovolj veliki oddaljenosti od kupole), temveč ima vrednost, ki je različna od p_∞. To pomeni, da diferenca tlakov, enačba (17.5), ni enaka nič. Poleg tega čas odpiranja t_f ni takšen, kot bi ga pričakovali iz enačbe (17.9), saj ni upoštevana poroznost tkanine in vpliv odprtine na kupoli. Če bi se ta enačba nanašala na padalo, ki ima drsni pravokotnik, bi bil čas odpiranja precej daljši.

Diferenco med notranjim (v kupoli) in zunanjim tlakom (na zunanji površini kupole) Δp_B bolj natančno ponazarja enačba (17.10), v kateri je zajeta tudi sila vzgona F.

$$\Delta p_B = \rho r \frac{\mathrm{d}^2 r}{\mathrm{d}t^2} + \frac{3\rho}{2}\left(\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}\right)^2 + \frac{F}{2\pi r^2} \tag{17.10}$$

Drugi odvod polmera po času predstavlja v fizikalnem smislu pospešek širjenja (odpiranja) padala. Ta ima v začetni fazi odpiranja zelo majhno vrednost in zato lahko zanemarimo prvi člen na desni strani enačbe (17.10) in dobimo

$$\Delta p_B = \frac{3\rho}{2}\left(\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}\right)^2 + \frac{F}{2\pi r^2} \tag{17.11}$$

Če to enačbo izenačimo z enačbo (17.5), ki se tudi nanaša na razliko tlakov na notranji in zunanji površini kupole in uredimo, dobimo

$$7\left(\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}\right)^2 = u_0^2 - \frac{F}{\rho\pi r^2}, \tag{17.12}$$

ker je $r = f(F)$. Enačbe (17.11) ni mogoče rešiti, če te odvisnosti ne poznamo. Na to vplivajo številni faktorji, kot so: masa bremena (padalca), elastičnost vrvi, trakov in tkanine, poroznost tkanine, velikost odprtine na kupoli ipd. Toda če silo F reduciramo na breme (težo padalca) in opazujemo stanje tik preden se začne padalo odpirati ($\mathrm{d}r/\mathrm{d}t = 0$), lahko ugotovimo minimalno začetno hitrost bremena u_{t_0}, pri kateri se padalo odpre. To lahko izrazimo z naslednjo enačbo

$$u_{t_0} \geq \sqrt{\frac{F}{\rho\pi r^2}}. \tag{17.13}$$

Za odpiranje padala je torej potreben dinamični tlak, ki je posledica padanja (gibanja) kupole skozi zrak in je večji od pritiska, ki ga povzroča napetost vrvi (reduciran na sferni del kupole padala). Hitrost odpiranja padala, ki je podana z enačbo (17.12), je manjša od hitrosti, ki je dana z enačbo (17.6). Zaradi tega bo tudi čas odpiranja padala daljši kot v enačbi (17.7).

Povečanju (odpiranju) kupole se upira zunanji tlak. Lahko dokažemo, da je tlak na površini sfere, ki se širi, možno opisati z naslednjo enačbo

$$\Delta p = \frac{3\rho}{2}\left(\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}\right)^2. \tag{17.14}$$

Polmer kupole se povečuje, dokler se ne doseže polmer izenačenja. Ta nastopi takrat, ko se platno kupole lahko zoperstavi tlaku na obsegu kupole. Kupola se še naprej širi, toda proti notranjem tlaku deluje tlak na obsegu kupole in ne zunanji tlak. V primeru, ko je prisoten drsni pravokotnik, se tlak na obsegu kupole precej poveča (črta, na kateri je kupola zvezana z vrvmi) in se zaradi tega upočasni odpiranje padala.

Tlak na zunanji površini kupole zavira odpiranje padala. Ko se padalo širi, potiska zunanji tlak v radialni smeri kupole do trenutka, ko se doseže ravnotežni polmer r_E. Zaradi elastičnosti tkanine, trakov in vrvi se kupola širi tudi nad to vrednost polmera. Pri določeni vrednosti $r > r_E$, se širjenje kupole zaustavi. Takrat začnejo delovati napetosti v tkanini v nasprotni smeri. To je mogoče zaradi tega, ker se hitrost padanja zmanjša, zaradi česar se zmanjša tudi sila vzgona, ki odpira padalo. Lahko predpostavimo, da se hitrost širjenja kupole čez končni polmer r_E zmanjšuje, dokler ni dosežen r_{max}. V tem

trenutku se začne kupola zaradi delovanja notranjih napetosti v tkanini zmanjševati. Zaradi tega pojava se poveča hitrost padanja. Ta proces niha (z vse manjšimi amplitudami) okrog vrednosti r_E, dokler se ne doseže vrednost $r = r_E$. V trenutku, ko napetosti na robu (obsegu) kupole precej zmanjša hitrost širjenja kupole, zunanji tlak spremeni smer, kar povzroča sunek pri odpiranju padala. Sprememba smeri delovanja zunanjega tlaka se pojavi zaradi vztrajnosti. Ko se kupola širi, odriva plasti zraka s površine kupole v radialni smeri. Zaradi vztrajnosti zračne mase se ustvarja na kupoli zunanji tlak. Ko se hitrost širjenja kupole precej zmanjša zaradi delovanja napetosti na njenem robu, zrak na zunanji površini kupole še zmeraj obdrži prejšnjo hitrost radialnega gibanja glede na površino kupole. Posledica tega je, da je na površini kupole stanje nekoliko podobno slabemu vakuumu, ki omogoča, da se kupola širi prek končne vrednosti polmera r_E. Ta mehanizem je predvsem zanimiv zaradi trdnosti tkanine. Tkanina je najbolj obremenjena v trenutku udara, ko zunanji tlak spremeni smer delovanja. Drsni pravokotnik zmanjšuje velikost sile sunka in velikost elastične in eventualno viskoelastične deformacije tkanine. Ker se trdnost tkanine pri vsakem odpiranju zmanjšuje zaradi deformacij, ki so posledice sunka, je število skokov z določenim padalom omejeno. Če je v konstrukciji padala prisoten drsni pravokotnik, se število skokov (čas uporabnosti) z določenim padalom precej poveča.

17.5.4.2 Sila upora

Silo upora, ki se pojavlja zaradi hitrosti kupole padala, lahko definiramo z naslednjo enačbo

$$F_m = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} m' v = m' \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} + v \frac{\mathrm{d}m'}{\mathrm{d}t}, \tag{17.15}$$

kjer so F_m sila, ki nastane zaradi spremembe gibalne količine zraka v kupoli, v hitrost kupole, $m' = (2/3)\rho\pi r^3$ masa zraka v kupoli.

Padalo in padalec tvorita eno telo in enačba (17.15) velja, če se padalo in padalec gibljeta z enako hitrostjo v. Toda to med odpiranjem padala ne drži. Hitrost v je sestavljena iz hitrosti padalca (ali bremena) u_t in hitrosti kupole v_k. Relativna hitrost kupole v_k (z oziroma na hitrost padanja) je pozitivna, če se kupola giblje v smeri gibanja bremena in negativna, če zaostaja.

Med težiščem bremena in središčem kupole je razdalja s, slika 17.7. Pri odpiranju padala se razdalja s spreminja zaradi elastične deformacije vrvi, s katerimi je padalec povezan s kupolo in tudi zaradi deformacije (podaljšanja – raztega) padalca. Zato je tudi skupna hitrost manjša. Zaradi vpliva deformacije vrvi se enačba (17.15) razširi za štiri člene na njeni desni strani. Ker so deformacije dejansko majhne in ker se pojavijo drugi odvodi, ne bomo naredili prevelike napake, če ostanemo pri enačbi (17.15).Če pa želimo izraziti velikost bremena, ki ga lahko prenese padalo, oziroma celotno silo upora F reducirano na breme, bomo enačbi (17.15) dodali še člen $\Delta p_B \pi r^2$. Če upoštevamo vrednost za m', lahko napišemo

$$F = \Delta p_B \pi r^2 + \frac{2}{3}\rho\pi r^3 \frac{\mathrm{d}u_t}{\mathrm{d}t} + 2u_t \rho\pi r^2 \frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}. \tag{17.16}$$

Kot smo že omenili, smo v enačbi (17.16) zanemarili deformacije vrvi in bremena. Celotna sila upora F zreducirana na breme, bo rasla s povečanjem hitrosti bremena u_t in s širjenjem (odpiranjem) padala – sprememba polmera kupole po času. Ko se padalo dokončno odpre, ima kupola končni polmer r_E in se ta več ne spreminja. To pomeni, da zadnji člen na desni strani enačbe(17.15) odpade, ker je $\mathrm{d}r/\mathrm{d}t = 0$. Ko padalo doseže

konstantno hitrost $\mathrm{d}u_t/\mathrm{d}t$, odpade tudi drugi člen na desni strani enačbe (17.16) in ostane le prvi člen na desni strani enačbe (17.16), primerjajte z enačbo (17.11).

Velikost padala je zaradi praktičnih vzrokov omejena. Zaradi konstrukcijskih značilnosti tkanine pa je omejen tudi tlak Δp_B. Če upoštevamo trgalno trdnost, silo nadaljnjega trganja in razpočno trdnost tkanine, iz katere je izdelana kupola padala, lahko izračunamo velikost bremena, ki ga padalo določene velikosti lahko prenese. Toda sprememba hitrosti bremena in sprememba hitrosti odpiranja padala morata biti v določenih mejah. Iz enačbe (17.6) vidimo, da je hitrost odpiranja padala sorazmerna začetni hitrosti u_0. To pa je hitrost padala in padalca (bremena) v trenutku, ko se padalo začne odpirati. To je odvisno od tega, ali padalec takoj odpre padalo, ko skoči, ali pa ga odpre pozneje, ko hitrost zelo naraste. Pri veliki hitrosti padanja padala bo tudi hitrost odpiranja padala velika. Pri tem pride do velike spremembe hitrosti padanja oziroma do močnega sunka, kar pomeni veliko vrednost sile upora. Ta sunek preprečuje drsni pravokotnik. Če bi torej hoteli upoštevati vpliv drsnega pravokotnika, bi morali v enačbo (17.6) vpeljati izraz, s katerim bi izrazili zmanjšanje hitrosti odpiranja padala.

V enačbah (17.10) in (17.11) smo zanemarili elastične deformacije padala – predvsem vrvi in elastično deformacijo padalca. Kako elastična deformacija vrvi vpliva na hitrost bremena u_t, se vidi iz enačbe (17.17).

$$u_t = u_0 \left(1 - \frac{K}{m_t u_{t_0}} \int_0^t e\mathrm{d}t + \frac{gt}{u_{t_0}}\right), \tag{17.17}$$

kjer so K [N/m] odpor vseh vrvi proti deformaciji, e [m] elastična deformacija vrvi, g [m/s^2] gravitacijski pospešek, u_{t_0} [m/s] začetna hitrost bremena, m_t [kg] masa bremena.

Če v enačbi (17.17) ne bi bilo drugega člena na desni strani, bi hitrost bremena naraščala po zakonitosti prostega pada. Parameter K mora imeti precej večjo vrednost, kot je masa bremena m_t. Vrednost parametra e pa ne bi smela presegati 2 % ali nekaj centimetrov ($e = F/K$). Čim večja je celotna sila upora F, tem večja je vrednost elastične deformacije e (K = konstanta za dano vrsto vrvic) in tem večja je vrednost drugega člena na desni strani enačbe (17.17). Ta vrednost raste s časom t. Toda s prirastkom časa raste tudi vrednost zadnjega člena. Iz tega lahko sklepamo, da povečanje mase bremena zmanjšuje vrednost drugega člena, toda povečanje deformacije (povečanje sile upora) povečuje vrednost tega člena, oziroma zmanjšuje hitrost bremena.

17.5.4.3 Pretok zraka skozi kupolo in tlak Δp_B v kupoli

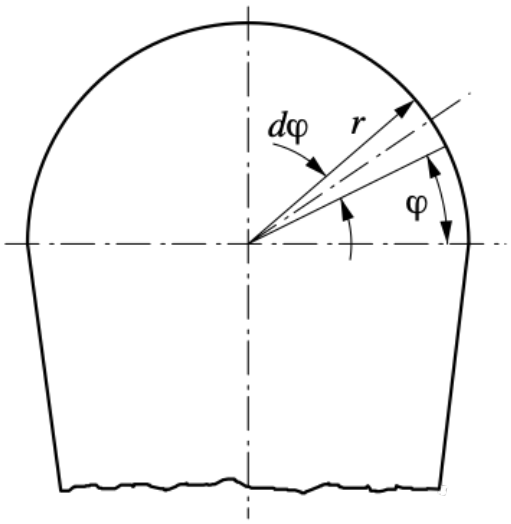
Če kupolo vzamemo kot sfero, gre zrak skozi osnovno ploskev v kupoli zaradi njenega širjenja. Tudi v tej fazi gre del zraka dejansko skozi tkanino in odprtino na kupoli. Ko se padalo popolnoma odpre, teče zrak le skozi tkanino in odprtino kupole. Pretok mase skozi tkanino kupole se ponavadi definira z naslednjo enačbo

$$\frac{\mathrm{d}m_A}{\mathrm{d}A} = C\sqrt{2\rho\Delta p}, \tag{17.18}$$

kjer so m_A [kg/s] pretok mase zraka skozi tkanino kupole v enoti časa, A [m^2] površina kupole (tkanine), C koefieient poroznosti tkanine, Δp [Pa] razlika tlakov na notranji in zunanji površini tkanine sfernega dela kupole.

V literaturi se pogosto navaja, da je C = 0,05. To vrednost dobimo, če v enačbi (17.18) uporabljamo zgoraj omenjene enote. Če je kupola pravilna sfera, slika 17.8, potem lahko izrazimo difereneial površine kupole $\mathrm{d}A$ z naslednjo enačbo

$$\mathrm{d}A = 2\pi(r\sin\varphi)r\mathrm{d}\varphi. \tag{17.19}$$



Slika 17.8: Geometrija kupole pri odpiranju padala.

Če upoštevamo enačbo (17.19), lahko transformiramo enačbo (17.18) v naslednjo obliko

$$\frac{\mathrm{d}m_k}{\mathrm{d}\varphi} = 2\pi r^2 C \sin\varphi \sqrt{2\rho\Delta p}. \tag{17.20}$$

Na podlagi rezultatov raziskav podvodnih eksplozij lahko napišemo

$$\Delta p = \Delta P \sin\varphi, \tag{17.21}$$

kjer je ΔP amplituda tlaka glede na ekvatorialno ravnino kupole. V bližini ekvatorja je tlak ΔP_B v ravnotežju z zunanjim tlakom, ki se upira širjenju kupole padala. Če upoštevamo enačbo (17.21), lahko enačbo (17.20) napišemo v naslednji obliki

$$\mathrm{d}m_k = 2\pi r^2 C \sqrt{2\rho\Delta P \sin^3\varphi}\mathrm{d}\varphi. \tag{17.22}$$

Z delnim integriranjem te enačbe dobimo

$$m_k = 2\pi r^2 C \sqrt{2\rho\Delta P} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^{\frac{3}{2}}\varphi \mathrm{d}\varphi. \tag{17.23}$$

Ker se integral v enačbi (17.23) lahko reši z numeričnim integriranjem in ima vrednost 0,882, dobimo

$$m_k = 1{,}764\pi r^2 C \sqrt{2\rho\Delta P}. \tag{17.24}$$

Poleg pretoka skozi tkanino, teče zrak tudi skozi odprtino ali dve odprtini, slika 17.1. Če je A_v površina odprtine ob upoštevanju Bernulijevega učinka (padec tlaka – povečanje hitrosti), dobimo

$$\frac{1}{2}\rho u_v^2 = \Delta P + \Delta P_B + \frac{1}{2}\rho u^2 = \Delta P + \frac{1}{2}\rho u^2. \tag{17.25}$$

Iz enačbe (17.25) lahko izrazimo u_v (linearna hitrost pretoka zraka skozi odprtino)

$$u_v = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho} + u_0^2}. \tag{17.26}$$

Pretok mase zraka m_v skozi odprtino površine A_v je

$$m_v = \rho A_v u_v \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho} + u_0^2}. \tag{17.27}$$

Bolj primerno je, če amplitudo tlaka ΔP izrazimo s silo F_m

$$\mathrm{d}F_m = 2\pi r^2 \Delta P \sin\varphi \mathrm{d}\varphi. \tag{17.28}$$

Če to enačbo integriramo, dobimo

$$F_m = \frac{1}{2}\pi^2 r^2 \Delta P \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^2\varphi \mathrm{d}\varphi = \frac{\Delta P}{2} \quad ; \quad \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^2\varphi \mathrm{d}\varphi = \frac{\pi}{4}, \tag{17.29}$$

oziroma

$$\Delta P = \frac{2F_m}{\pi^2 r^2}. \tag{17.30}$$

Če upoštevamo enačbo (17.26), lahko enačbo (17.24) napišemo v naslednji obliki

$$m_k = 3,528 C r \sqrt{\rho F_m} \tag{17.31}$$

in enačbo (17.27) v obliki

$$m_v = \rho A_v \sqrt{\frac{2F_m}{\pi^2 r^2 \rho} + u_0^2}. \tag{17.32}$$

Za konstanten hemisferni (polkrožen) mehur (padalo) velja naslednja enačba

$$\rho \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r}\left(\frac{2}{3}\pi r^3\right) + m_k + m_v = \rho \pi r^2 u. \tag{17.33}$$

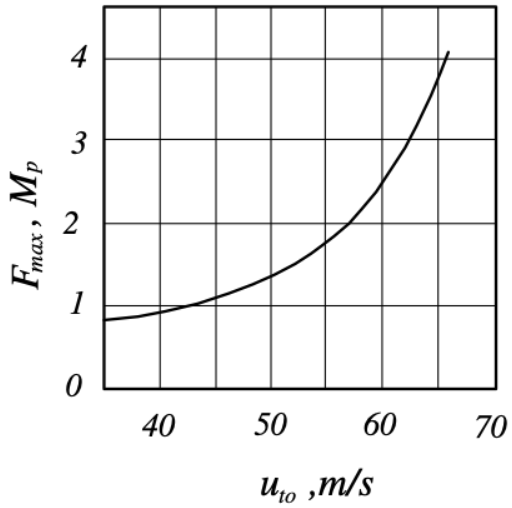
Če upoštevamo enačbi (17.31) in (17.32), nadalje dobimo

$$2\rho\pi r^2 \frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t} + 3,528 C r \sqrt{\rho F_m} + \rho \sqrt{\frac{2F_m}{\pi^2 r^2 \rho} + u_0^2} = \rho \pi r^2 u. \tag{17.34}$$

Enačba (17.34) je pomembna pri ugotavljanju končne hitrosti padala. Vsebuje vse parametre, ki vplivajo na končno hitrost padala. Pri tem nas predvsem zanima, kako na hitrost padala vplivata konstrukcija tkanine (poroznost) in konstrukcija padala (velikost padala, polmer, velikost odprtine) skupaj z drugimi parametri.

17.5.4.4 Končna hitrost padala

Hitrost padalca pri odpiranju padala se spreminja po enačbi (17.17). Sprememba hitrosti je prikazana na sliki 17.9. V začetni fazi ($t = 0$), je sila upora relativno majhna, majhna pa je tudi sprememba hitrosti. Ko se sila F povečuje, se hitrost padalca naglo zmanjšuje. Zaradi prej omenjenih učinkov, se sila F lahko zelo hitro zmanjšuje, kar velja predvsem za sferno padalo brez drsnega pravokotnika. Lahko pride do takšnega stanja, da je $F < G_t$ (G_t je teža padalca), ali celo $F = 0$. V tem primeru imamo prosto padanje: hitrost padanja se povečuje. Toda zopet se, v zelo kratkem času, vzpostavi stanje sil, ki zavira padanje in ko je padalo popolnoma odprto, pada padalec z določeno hitrostjo.



Slika 17.9: Hitrost padalca v fazi odpiranja padala.

Ko se padalo popolnoma odpre, je v enačbi (17.10) $\mathrm{d}r/\mathrm{d}t = 0$; $\mathrm{d}^2r/\mathrm{d}t^2 = 0$, $r = r_E$; $F = G_t$ in ostane le zadnji člen na desni strani enačbe

$$\Delta p_B = \frac{G_t}{2\pi r_E^2}. \tag{17.35}$$

Po drugi strani lahko enačbo (17.2) upoštevamo pri transformaciji enačbe (17.5), v kateri zamenjamo u_0 z u_k (ker predpostavljamo, da se je padalo popolnoma odprlo in padalec pada s konstantno hitrostjo u_k) ter dobimo

$$\Delta p_B = \frac{1}{2}\rho u_k^2 - \frac{1}{2}\rho u^2 = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{K}{u_{t_0} m_t}\int_0^t e\mathrm{d}t - \frac{gt}{u_{t_0}}\right)^2 - \frac{1}{2}\rho u^2. \tag{17.36}$$

Hitrost u lahko dobimo iz enačbe (17.32), če upoštevamo, da je $\mathrm{d}r/\mathrm{d}t = 0$; $u_0 = u_k$; $r = r_E$ in $F_m = G_t$.

$$u = \frac{3,528C}{\rho\pi r_E}\sqrt{\rho G_t} + \rho A_v\sqrt{u_k^2 + \frac{4G_t}{\rho\pi^2 r_E^2}}. \tag{17.37}$$

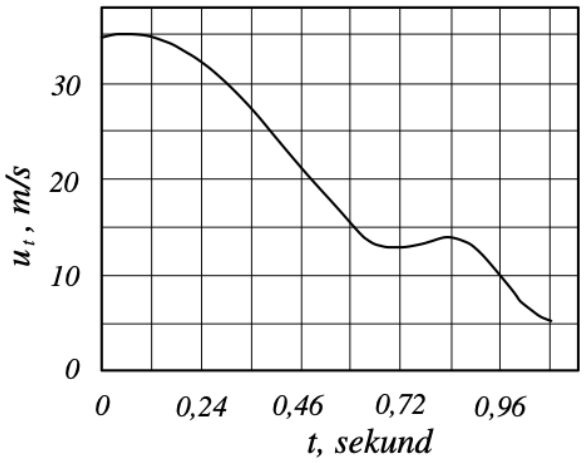
Če upoštevamo enačbi (17.35) in (17.37), lahko enačbo (17.36) napišemo v naslednji obliki

$$\frac{G_t}{2\pi r^2} = \frac{1}{2}\rho u_k^2 - \frac{1}{2}\rho\left(3,528Cr_E\sqrt{\rho G_t} + \rho A_v\sqrt{u_k^2 + \frac{4G_t}{\rho\pi^2 r_E^2}}\right)^2 \tag{17.38}$$

Iz enačbe (17.38) lahko ugotovimo, da jo je precej težko rešiti po u_k. Toda če je C reda velikosti 0,05 in manj, in $A_v \ll 1$, kar je približno dejansko stanje pri padalu, potem lahko zanemarimo drugi člen na desni strani enačbe in vzamemo, da je ρ = 1,226 kg/m^3, dobimo

$$u_k = 1,597\frac{\sqrt{G_t}}{r_E} \tag{17.39}$$

Sliki 17.9 in 17.10 sta le ilustraciji, simulirani na majhnem padalu premera 2 m [1]. Drugi podatki so A_v = 0,00785 m^2, K = 7440 N/m, C = 0,15, G_t = 3 kg, začetno relativno raztezanje vrvi E_0 = 0,004, ρ = 1,226 kg/m^3, u_{t_0} = 50 m/s. Če je G_t v N, potem je C = 0,05.



Slika 17.10: Sprememba maksimalne sile, ki deluje na padalca, v odvisnosti od začetne hitrosti padanja.

17.5.4.5 Tkanine za padala

Tkanina, namenjena za izdelavo padal, je zelo zahteven proizvod. Kakovost tkanine mora biti standardizirana oziroma predpisana. Vrednosti parametrov kakovosti lahko odstopajo od predpisanih le v ozkih mejah. Slaba kakovost lahko namreč povzroči nesrečo pri doskoku padalca (prevelika poroznost, premajhna trdnost ipd.) [6]. Zaradi tega bomo prikazali kakovost štirih vzorcev tkanin za padala, ki so bili vzeti iz dveh starih padal (po dva vzorca iz vsakega padala). Rezultati preskušanja kakovosti so prikazani v preglednici 17.1. Upoštevati moramo dejstvo, da so bila padala že odpisana, kar pomeni, da so vrednosti parametrov kakovosti nove tkanine, ki opisujejo trdnost, višji in tisti, ki opisujejo poroznost nižji, kot so vrednosti v preglednici 17.1. Vse tkanine so izdelane iz PA multifilamentne preje.

Vzorca 1 in 3 sta vzeta iz ene in vzorca 2 in 4 iz druge tkanine. Med vzorcema iste tkanine je razlika samo v barvi. Kot vidimo iz preglednice 17.1 je srednji hidravlični premer por manjši od 20 mikrometrov, kar pomeni, da sta tkanini zelo gosti. Vrednosti koeficienta poroznosti C so manjše od 0,015. Pri vzorcu 3 je izračunana nekoliko prenizka vrednost glede na vrednost vzorca 1. Kvadrate v vezavi platno (14×14 niti) obdaja "bordura" v ripsu (4 niti osnove in 4 niti votka). V platnu je približno 60 % površine tkanine.

17.6 Seznam oznak poglavja

Oznaka	Enota	Opis
A	m^2	površina kupole
A_v	m^2	odprta površina kupole
C		koeficient poroznosti tkanine
e	m	elastična deformacija vrvi
F	N	sila vzgona

Nadaljevanje na naslednji strani

Nadaljevanje s prejšnje strani

Oznaka	Enota	Opis
F_m	N	sila upora
G_t	N	teža padalca
g	m/s^2	gravitacijski pospešek
K	N/m	odpor vseh vrvi proti deformaciji
l	m	dolžina neobremenjena vrvi
m'	kg	masa zraka v kupoli
m_A	kg/s	masni pretoka zraka skozi tkanino
m_k	kg/s	masni pretoka zraka skozi tkanino
m_t	kg	masa bremena
m_v	kg/s	masni pretoka zraka skozi odprto površino kupole padala
φ	rad	kot kupole padala
ΔP	Pa	amplitudna razlika tlakov v notranjosti in zunanjosti kupole
Δp	Pa	razlika tlakov v notranjosti in zunanjosti kupole
p	Pa	statični tlak v padalu
p_∞	Pa	statični tlak okoliškega zraka
Δp_B	Pa	razlika tlakov v notranjosti in zunanjosti kupole na njenem ekvatorju
R_0	m	dolžina tkanine, iz katere je narejeno padalo, od vrvice do najvišjega dela padala
ρ	kg/m^3	gostota zraka
r	m	polmer kupole padala
r_E	m	polmer kupole padala med odpiranjem
s	m	oddaljenost med bremenom (padalcem) in centrom sfere padala
t	s	čas
u	m/s	linearna hitrost pretoka
u_0	m/s	začetna hitrost padala
u_0	m/s	hitrost prostih tokovnic zraka
u_k	m/s	končna hitrost pagalca
u_t	m/s	hitrost padalca oziroma bremena
u_{t_0}	m/s	začetna hitrost padalca oziroma bremena
u_v	m/s	linearna hitrost pretoka zraka skozi odprto površino kupole padala
V	m^3/s	volumenska hitrost pretoka
v	m/s	hitrost kupole padala
v_k	m/s	relativna hitrost kupole padala

17.7 Literatura

[1] Y. El Mogahzy. *Engineering Textiles. Integrating the Design and Manufacture of Textile Products.* The Textile Institute, Woodhead Publishing, 2009.

[2] R. A. Scott. *Tekstiles in defence. Handbook of Technical Textiles.* The Textile Institute, Woodhead Publishing, 2000.

[3] V. Flis. *Padalstvo za začetnike.* Obzorja, Maribor, 2004.

[4] O. G. Sutton. *Mathematics in action: applications in aerodynamics, statistics, weather prediction, and other sciences.* Dover Publications, New York, 1984.

Preglednica 17.1: Vrednosti parametrov kakovosti tkanin, namenjenih za izdelavo padal (vezava tkanin je kombinacija platna in ripsa). [7]

		Vzorec			
Parametri kakovosti	Enota	1	2	3	4
Finost osnove	tex	4,0	8,5	5,0	9
Finost votka	tex	4,6	9,0	5,0	9
Zavoji	Z/m	308	192	300	185
Masa tkanine	g/m^2	47	74	49	71
Debelina tkanine	mm	0,081	0,131	0,078	0,134
Trgalna trdnost osnove	daN	36	83	40	70
Trgalna trdnost votka	daN	39	70	40	57
Raztezek osnove	%	36	27	32	25
Raztezek votka	%	29	33	32	29
Razpočna trdnost	daN	35	69	37	66
Raztezek pri razpočenju tkanine	%	13	13	13	13
Sila nadaljnjega trganja osnove	daN	4	5	5	5
Sila nadaljnjega trganja votka	daN	4	5	5	6
Gostota po osnovi	niti/cm	48	44	50	45
Gostota po votku	niti/cm	45	44	50	45
Parametri poroznosti	Enota	1	2	3	4
A		13,50	9,63	10,77	8,87
b		0,691	0,671	0,738	0,704
d	μm	17	14	13	12
P	%	0,49	0,25	0,31	0,21
C		0,0133	0,0095	0,0095	0,0085

[5] Z. Dovedan. Prilog teoriji otvaranja padobrana. Technical report, Tehnički školski centar kopnene vojske JNA – Tehnička vojna akademija KoV, Zagreb, 1979.

[6] F. Citoğlu and B. Esi. Parachute fabric and its manufacturing process. *International Journal of Science, Environment and Technology*, 6(5):3214–3224, 2017.

[7] D. Jakšić. Analiza kakovosti tkanin, namenjenih za izdelavo padal. Technical report, Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo, Oddelek za tekstilno tehnologijo, Ljubljana, 1994.

POGLAVJE 18

Konstrukcija tekstilij

Kazalo

18.1 Splošno **382**
18.2 Izbor vlaken **383**
18.2.1 Izbor vlaken za izdelavo oblačil 383
18.2.2 Izbor vlaken za opremo bivalnih prostorov 385
18.2.3 Izbor vlaken za tehnične tekstilije 387
18.2.3.1 Delovna oblačila 387
18.2.3.2 Ribiške mreže 388
18.2.3.3 Tkanine za šotore, jadra in ponjave 388
18.2.3.4 Tkanine za padala 388
18.2.3.5 Tkanine za filtracijo plinov in tekočin 389
18.2.3.6 Tkanine za pogonske jermene, transportne trakove ipd. 389
18.3 Konstrukcija preje **390**
18.3.1 Splošno 390
18.3.2 Konstrukcijske značilnosti prej, namenjenih za izdelavo oblačil 391
18.3.3 Konstrukcijske značilnosti prej, namenjenih za izdelavo blaga za opremo bivalnih prostorov 393
18.3.4 Konstrukcijske značilnosti prej, namenjenih za tehnične tekstilije 393
18.4 Konstrukcija tkanin **395**
18.4.1 Geometrijska struktura tkanin 395
18.4.1.1 Premer preje 395
18.4.1.2 Faktor kritja 396
18.4.1.3 Debelina tkanine in vtkanja osnove in votka 398
18.4.1.4 Masa tkanine 402
18.4.2 Fizikalno-mehanske lastnosti tkanin 402
18.4.2.1 Trgalna trdnost 403
18.4.2.2 Raztezek pri pretrgu 404
18.4.2.3 Nadaljnje trganje 405
18.5 Konstrukcija pletenin **408**

18.5.1 Geometrija pletenin 409
18.5.2 Fizikalno-mehanske lastnosti pletenin 413
18.5.2.1 Masa pletenine 413
18.5.2.2 Trgalna trdnost in raztezek 414
18.6 Vlaknovine **418**
18.6.1 Konstrukcija vlaknovin 418
18.6.1.1 Polsti 418
18.6.1.2 Iglane vlaknovine 418
18.6.1.3 Lepljene vlaknovine 419
18.6.2 Preizkušanje fizikalno-mehanskih lastnosti 419
18.6.2.1 Trgalna trdnost in razteznost 419
18.6.2.2 Razpočna trdnost (ISO 13938-2) 419
18.6.2.3 Iztrganje (ASTM D 1682; EN 29073-3) 420
18.6.2.4 Nadaljnje trganje (ISO 13937-1; ISO 13937-2) 420
18.6.2.5 Preizkušanje filtracijskih lastnosti 420
18.6.2.5.1 Hitrost pretoka v pravokotni smeri na površino vlaknovine. 422
18.6.2.5.2 Hitrost pretoka vzdolž površine vlaknovine. 424
18.6.2.6 Prebijanje 425
18.7 Seznam oznak poglavja **427**
18.8 Literatura **429**

18.1 Splošno

Tekstilije so vsi izdelki, proizvedeni iz tekstilnih vlaken. Vlakna so izhodna surovina, ki ni proizvod tekstilne industrije v klasičnem smislu. Proizvodnjo kemičnih vlaken prištevamo h kemični industriji. Proizvodnja naravnih vlaken pa je pogosto v domeni kmetijstva.

Tekstilna industrija ne zajema proizvodnje vlaken, vendar je glavni porabnik le-teh, zato vpliva na njihovo količino, kakovost in splošni asortiment. Kakšna naj bo vrsta in kakovost vlaken, določimo z induktivnim postopkom. Najprej izhajamo iz projektnih zahtevkov, ki nas omejujejo pri kakovosti končnega izdelka oziroma kompleta, če gre za oblačilo. Konstrukcija končnega izdelka ali kompleta naj bo optimalna glede na projektne zahtevke. Končne izdelke ali komplete izdelamo iz reprodukcijskih materialov (polizdelkov). Te izberemo tako, da končni izdelek ali komplet dobi lastnosti, ki pomenijo optimum glede na projektne zahtevke. Kaj je reprodukcijski material, je odvisno predvsem od tega, kaj je v proizvodnem procesu končni proizvod. Kar je za enega proizvajalca končni proizvod, je za drugega reprodukcijski material. Če je oblačilo končni izdelek, so to tudi vsi njegovi sestavni deli. Tkanine, pletenine, sukanec, trakovi, zadrge, gumbi ipd. so s stališča konfekcije reprodukcijski materiali. Za njihovo izdelavo potrebujemo določene surovine. Po tej logiki bi bila preja surovina za izdelavo sukanca, tkanin in pletenin. Toda preja šteje kot polizdelek in ne kot surovina. V tekstilni industriji se za surovino štejejo le vlakna. Barvila, apreturna sredstva, pralna sredstva ipd. pa so pomožna sredstva. Tako razlikujemo surovine in pomožna sredstva, polizdelke in izdelke različne stopnje dodelave ter končne izdelke. Pri konstruiranju končnega izdelka uporabljamo deduktivno metodo. To pomeni, da gremo od potrebnih kakovostnih parametrov končnega izdelka proti surovinam in pomožnim materialom. Včasih pa je

priporočljivo obravnavati več faz hkrati in to predvsem takrat, ko obstaja večje število možnih rešitev. Poleg tega so pogoste različne omejitve, kot so nepopolnost strojnega parka, pomanjkanje ustreznih surovin, pomožnega materiala ipd. V takšnih primerih se skušamo čim bolj približati optimalni konstrukciji s pomočjo zamenjav, parcialnih sprememb posameznih elementov konstrukcije ipd.

V nadaljevanju smo opisali izdelavo polizdelkov in končnih izdelkov, ki imajo vnaprej določene konstrukcijske karakteristike. Pri tem obravnavamo celotno problematiko posplošeno, vendar dovolj namensko, da bo mogoč dober vpogled v sistem konstruiranja in izbire načina izdelave tekstilnih izdelkov.

18.2 Izbor vlaken

Pred drugo svetovno vojno je bil izbor zelo enostaven. Na voljo so bile le štiri vrste vlaken: bombaž, volna, naravna svila in kemična vlakna iz regenerirane celuloze, predvsem viskoznega tipa. Danes je precej drugače. Delež naravnih vlaken pada zaradi hitrega povečanja proizvodnje kemičnih vlaken. Nista se povečala le delež in absolutna količina kemičnih vlaken, povečalo se je tudi število vrst kemičnih vlaken in tipov v posameznih vrstah. Uporaba velikega števila vrst in tipov vlaken pa otežuje njihovo pravilno izbiro za ciljni proizvod.

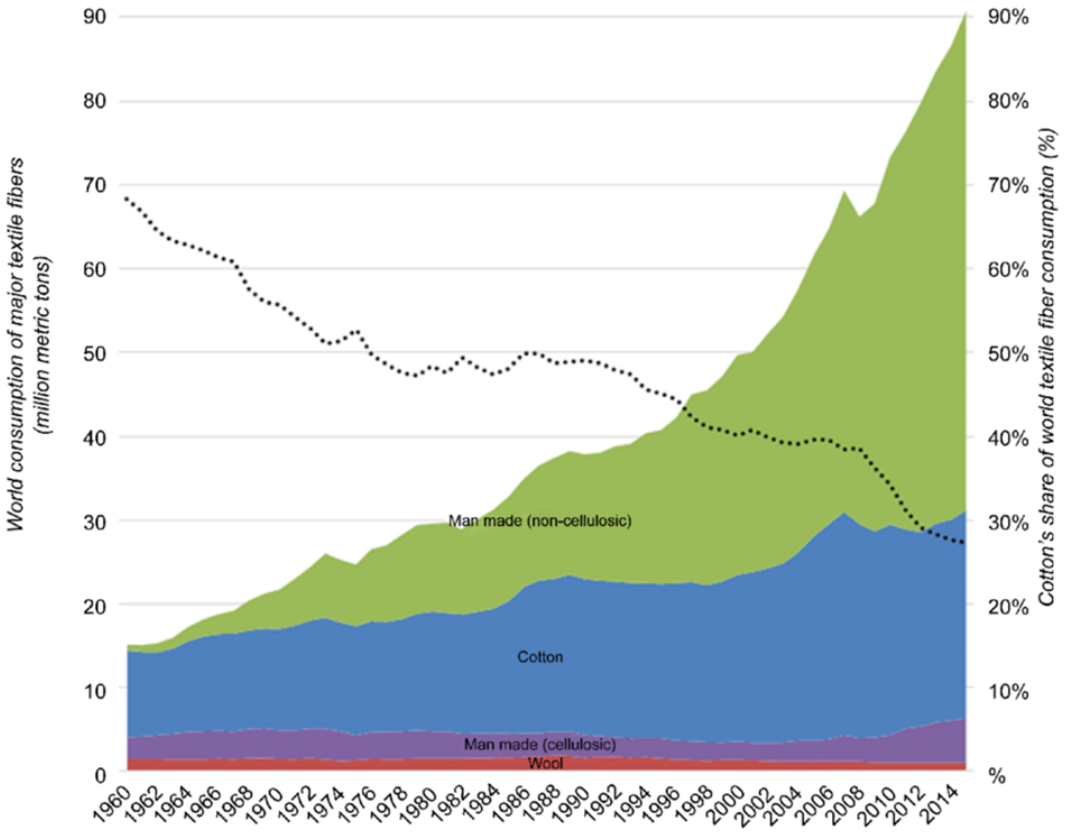
Porabo tekstilnih vlaken lahko delimo na tri osnovna področja: oblačila, opreme bivalnih prostorov (dekorativno blago, posteljnina, talne in stenske obloge) in tehnične tekstilije. Za oblačila se uporabi približno 65 % vseh tekstilnih vlaken, za opremo bivalnih prostorov 20 % in za tehnične tekstilije 15 %. Nekatere razvite države imajo drugačno strukturo porabe tekstilnih vlaken. Japonska porabi za tehnične tekstilije že več kot 50 % vlaken. Iz tega in splošnega trenda v razvitih državah lahko sklepamo, da se struktura potrebe tekstilnih vlaken spreminja. Pri tem narašča delež vlaken, ki so porabljena za izdelavo tehničnih tekstilij.

Poraba tekstilnih vlaken na svetu, slika 18.1, se izrazito povečuje in to predvsem zaradi vse večje porabe sintetičnih vlaken. Okrog 70 % vseh vlaken se predela v tkanine, ostalo pa v pletenine, vlaknovine ipd. V proizvodnji tekstilnih izdelkov še vedno prevladujejo tkanine. Zato v nadaljevanju natančneje obdelamo konstrukcijo tkanin.

18.2.1 Izbor vlaken za izdelavo oblačil

Pri izboru vlaken za izdelavo oblačil lahko upoštevamo več vidikov: psihološki, termoizolacijski, estetski, ekonomski, funkcionalni idr. Kateri vidik bo prevladal, je odvisno tudi od namena oblačila (otroško, vsakdanje, športno, delovno, terensko, posebno oblačilo, vojaška uniforma ipd.). Izbor vrste vlaken je odvisen tudi od lege plasti oblačila (plast na površini kože, termoizolacijske plasti, vrhnja plast).

Najbolj splošen pristop k izboru vrste vlaken je vidik lege plasti ali dela plasti v oblačilu. Zato izbor vrste in tipa vlaken analiziramo glede na določeno plast oblačila. Pri plasti, ki je v neposrednem stiku s kožo, razlikujemo tri različne dele oblačila: spodnje perilo in srajca, nogavice ter eventualno hlače ali krilo. Izkušnje kažejo, da noge niso zelo občutljive glede na vrsto vlaken, ki pa ne smejo biti preveč groba oziroma slabo upogljiva. Približno enako velja tudi za roke. Druge površine telesa pa so bolj občutljive. Nekateri ljudje so občutljivi predvsem na posamezne vrste kemičnih vlaken. Pojavna oblika te občutljivosti je alergija (rahlo vnetje površine kože, občutek nervoze in splošno slabo počutje). Takšno reakcijo povzročajo vlakna, ki absorbirajo majhen odstotek vlage ter kopičijo precejšnjo količino statične elektrike, ki nastaja kot posledica trenja. Takšne



Slika 18.1: Svetovna poraba tekstilnih vlaken in gibanje tržnega deleža bombaža v obdobju 1960–2014. Vir: (https://www.researchgate.net/figure/World-consumption-of-major-textile-fibers-and-variation-of-cottons-market-share-6_fig1_309520719).

lastnosti imajo PA, PES in podobna vlakna. Odlične absorpcijske lastnosti imajo bombaž, viskozna kemična vlakna, volna in naravna svila. Zaradi izhlapevanja znoja je plast, ki je v neposrednem stiku s kožo, najpogosteje v nasičeni atmosferi. Ker v takšnih razmerah naravna vlakna absorbirajo od 8 % do približno 30 % vlage, računano na suho maso, se statična elektrika ne pojavlja in tudi koža se ne draži.

Pri izbiri vlaken za plast oblačila, ki je v neposrednem stiku s površino kože, moramo upoštevati tudi načine vzdrževanja (pranje ali kemično čiščenje). Ker je kemično čiščenje drago, je najbolj pogost postopek vzdrževanja spodnjega perila pranje pri temperaturi 40 °C do 95 °C. Ker je naravne svile zelo malo, pa tudi volna je postala izredno dragocena, se ti dve vrsti naravnih vlaken ne uporabljata za spodnje perilo in srajce. Tako preostanejo le bombaž in viskozna kemična vlakna. Količina proizvedenega bombaža stagnira, njegov delež v porabi tekstilnih vlaknih se zmanjšuje. Po drugi strani pa prebivalstvo narašča. Zaradi tega se bo čisti bombaž redkeje uporabljal za spodnje perilo in srajce. Edina realna perspektiva je njegovo mešanje z drugimi kemičnimi vlakni in pa izdelava kemičnih vlaken, ki bodo imela fiziološke lastnosti bombaža ter boljše fizikalno-mehanske lastnosti kot viskozna kemična vlakna. Takšna kemična vlakna proizvajajo že precej časa.

Mešanice kemičnih vlaken z bombažem so bolj ali manj standardizirane. Deleži posameznih vlaken so izbrani tako, da dajo izdelku s stališča uporabe optimalne lastnosti in ceno. Mešanico včasih pogojuje tudi tehnološki proces, npr. ko se različne vrste vlaken mešajo v obliki pramenov na raztezalu. Poleg fiziološke ustreznosti mešanice morajo biti kemična vlakna v njej stabilizirana, da v procesu nege (pranja) ne

spreminjajo dimenzije (dolžine). Druge lastnosti niso bistvenega pomena. Le pri srajci je pomemben estetski videz. Zaradi tega ne sme priti do pilinga, kar pomeni, da mora biti kakovost kemičnih vlaken ustrezna.

Druga plast je praviloma termoizolacijska. Vlakna, ki naj bi jih izbrali za izdelavo te plasti, morajo imeti čim manjšo vrednost koeficienta toplotne prevodnosti in čim večjo voluminoznost. To pomeni, da je manjša specifična gostota vlaken in da so vlakna kodrasta, kar omogoča izdelavo voluminozne preje. Zato za to plast niso primerna bombažna vlakna in viskozna kemična vlakna, temveč volna in nakodrana sintetična kemična vlakna, predvsem pa manj kakovostna volna v mešanici s kemičnimi vlakni.

Vrhnja plast je najbolj zahtevna in tudi najbolj mnogotera. Za izdelavo vrhnje plasti pridejo v poštev vse vrste in tipi vlaken, ki so ekonomsko upravičena. Glede na namembnost oblačila so različni tudi zahtevki za kakovost vlaken, iz katerih naj bi izdelali vrhnjo plast in dele vrhnje plasti oblačil. Vsakdanja oblačila, tako moška kot ženska ali otroška, morajo imeti močno poudarjeno estetsko komponento. To pa lahko dosežemo s poljubno vrsto vlaken, ki jih v fazi izdelave tekstilij (preje, tkanin ali pletenin) izpostavimo določenim tehnološkim postopkom. Vlakna morajo tudi dobro prenašati fazo šivanja oblačila, da ne pride do poškodb vlaken v preji oziroma tkanini ali pletenini. Kemična vlakna, namenjena za izdelavo vrhnje plasti oblačila, med katere prištevamo tudi plašče, vetrovke ipd., so pretežno kodrana (plašč) vlakna ali pa pretežno gladki multifilament (vetrovka). Konstrukcija tekstilij za izdelavo zgornje plasti oblačil se prilagaja atmosferskim razmeram, ki so jim ta oblačila namenjena (poletje, jesen, zima, veter, dež ipd.).

18.2.2 Izbor vlaken za opremo bivalnih prostorov

Najprej moramo opredeliti termin "oprema bivalnih prostorov", pri čemer se bomo osredotočili na blazinjenje pohištva in prometnih sredstev (avtomobili, avtobusi, potniški vagoni, ladje, potniška letala ipd), talne in stenske obloge, posteljnino ipd.

Tekstilije, ki jih uporabljamo za opremljanje stanovanjskih, predvsem javnih prostorov (bolnišnice, hoteli, domovi, blazinjenje prometnih sredstev ipd.), morajo biti negorljive. To pomeni, da se ne vžgejo, dokler koncentracija kisika ne doseže 25 %, oziroma ugasnejo, ko odstranimo plamen ali telo, zagreto na zelo visoko temperaturo. V Evropski uniji področje ureja Direktiva 2001/95/ES Evropskega parlamenta in Sveta z dne 3. decembra 2001 o splošni varnosti proizvodov [1].

Negorljivost lahko dosežemo pri sintetičnih kemičnih vlaknih, ne da bi jim zmanjšali vrednosti tekstilno tehnoloških parametrov in uporabne lastnosti. V posteljnino sodijo rjuhe, blazine, prevleke za blazine in odeje ter prekrivala (včasih so bile to v večini primerov odeje). V prejšnjih časih so bile blazine polnjenje s perjem, danes imajo vlogo polnila različna vlakna ali poliuretanska pena. Če uporabljamo vlakna, morajo le-ta imeti dovolj velik upor proti pritisku, veliko voluminoznost in kodravost ter nizko ceno. Za ta namen so najbolj primerna sintetična kemična vlakna, ki imajo primerno elastičnost in kodravost. Kodravost dosežemo z ustrezno termično obdelavo oziroma s teksturiranjem (kodranjem). Včasih uporabljajo za polnjenje blazin sekundarne surovine (odpadki pri predenju in celo pri konfekcioniranju). Temu primerna je tudi kakovost takšnih blazin: neprimerna elastičnost polnjenja in nagnjenost k deformacijam.

Posebej je potrebno obravnavati prevleke za blazine in rjuhe. Te naj bi se lahko prale in ne bi smele dražiti golih delov kože, s katero pridejo v neposreden stik. Poseben zahtevek je tudi njihova negorljivost. Poleg tega morajo imeti določeno trdnost, čim manjše krčenje pri pranju, odpornost proti drgnjenju ipd. Z izjemo negorljivosti imata

vse te lastnosti bombaž in fini lan. Ker je bombaža malo, lanu pa še manj, se za izdelavo rjuh uporabljajo predvsem mešanice bombaža in kemičnih vlaken. V nekaterih primerih se uporabljajo celo čista sintetična kemična vlakna. V tem primeru je priporočljivo, da sta spalna srajca in pižama bombažni ali izdelani iz mešanice bombaža in kemičnih vlaken.

K posteljnini prištevamo tudi termoizolacijske plasti. Običajno so to odeje. V prejšnjih časih so uporabljali pernice (polnjene s perjem). V novejšem času perje ni dosegljivo v zadostnih količinah in se takšne pernice ne izdelujejo več. Uporabljajo se prešite odeje, ki so debele nekaj centimetrov in so največkrat napolnjene s sekundarnimi tekstilnimi surovinami. Kot termoizolacijska plast je najbolj primerna odeja (deka). Odeja je dovolj tanka, da lahko uporabimo večplastno termoizolacijo (večje število odej). Odeje so v primerjavi s prešitimi odejami in pernicami lahke, zaradi svoje konstrukcije upogljive ter se dobro prilegajo telesu in preprečujejo nastajanje "ventilacijskih" odprtin.

Pri odejah ima praviloma termoizolacijsko vlogo votek. To vlogo ima lahko tudi zančna osnova. V prvem primeru je osnova lahko bombažna, iz mešanice bombaža in kemičnih vlaken ali iz čistih kemičnih vlaken (tudi iz čistih viskoznih). Pri izdelavi kakovostnih odej uporabljamo za izdelavo votka volno, mešanico volne in sintetičnih kemičnih vlaken ali čista sintetična kemična vlakna. Vlakna morajo biti voluminozna kot volna, kar dosežemo z uporabo nakodranih vlaken. Za izdelavo lahkih poletnih odej lahko uporabljamo enaka vlakna kot za izdelavo debelih kakovostnih odej, za manj kakovostne odeje pa sekundarne surovine. Odeje z zančno osnovo so frotirne odeje, ki se lahko uporabijo tudi kot rjuhe, če je zančna osnova bombažna. Votek in temeljna osnova sta lahko izdelana iz manj kakovostnih surovin, ki lahko vsebujejo določen odstotek sekundarnih surovin. Ker se frotirne odeje perejo, ni priporočljiva uporaba volnenih vlaken (niti v deležu sekundarnih surovin).

Uporaba tekstilij za blazinjenje je zelo vsestranska. Blazinimo stanovanjsko pohištvo, pisarniško pohištvo, sedeže v prometnih sredstvih ipd. Tekstilije za blazinjenje morajo biti odporne proti mečkanju, drgnjenju, umazaniji, spremembi videza zaradi spremembe barve in odrgnjenosti. Poleg tega morajo omogočati nego (odstranitev madežev in druge umazanije) in imeti morajo stabilno obliko. Idealnega vlakna, ki bi izpolnjevalo vse omenjene zahtevke, ni. Najprimernejša je volna, mešanica volne in sintetičnih kemičnih vlaken ter kemična vlakna. Pri tem je potrebno upoštevati, da se to nanaša na vlakna, ki so neposredno na površini tkanin ali pletenin, ki se uporabljajo za blazinjenje. Od vezave je odvisno, kateri sistem bo prevladoval na površini (osnovni ali votkovi efekt). Če je osnova precej finejša od votka in je votek dekorativni element (votkovi efekt), lahko za osnovo uporabimo katerokoli vlakno – tudi viskozno, ker ima vlogo armature in ne pride do izraza na površini tkanine. Iz tega je razvidno, da je različnih primerov zelo veliko. Zato moramo analizirati vsakega posebej, upoštevajoč najpomembnejše aspekte uporabe, in na podlagi takšne analize izbrati najbolj primerne vrste vlaken.

V naslednjo skupino sodijo zavese. Te so večinoma izpostavljene direktni sončni svetlobi. Zaradi velike površine so neprimerne za likanje in morajo lepo "padati". Ne glede na konstrukcijo (tkanine, pletenine ali sukljanke, ki so namenjene za zavese) morajo biti vlakna, iz katerih izdelujemo zaveso, odporna na vpliv direktne sončne svetlobe in, po možnosti, proti mečkanju. Tem zahtevam ustreza predvsem vlakno PES, delno PAN, kot tudi tipi PA in PP, ki so stabilizirani proti degradacijskim učinkom sončne svetlobe. V današnjem času bi bilo nesmotrno uporabljati za zavese bombaž, še manj volno. Kemična viskozna vlakna niso primerna zaradi relativno slabe dimenzijske stabilnosti, prevelikega mečkanja in slabe obstojnosti na sončni svetlobi.

Zelo pomembna skupina so tekstilije za talne in stenske obloge. Stenske obloge imajo lahko estetsko, zvočnoizolacijsko in termoizolacijsko funkcijo ali pa vse tri omenjene funkcije hkrati. Glede na to so najprimernejša sintetična voluminozna kemična vlakna. Steske obloge morajo biti tudi negorljive, zato za izdelavo stenskih oblog uporabimo negorljiva sintetična kemična vlakna.

Talne obloge v ožjem pomenu so tekstilije, s katerimi smo nadomestili parket, ladijski pod ipd. Preproga je po svoji funkciji prej estetski dodatek kot talna obloga, čeprav ima tudi to funkcijo (vsaj na površini tal, na katero je položena). Talne obloge imajo enake funkcije kot stenske obloge. Morajo biti tudi negorljive. Za razliko od stenskih oblog so talne obloge izpostavljene obrabi, pritiskom, umazaniji, pogostemu čiščenju ipd. To pomeni, da morajo biti vlakna, namenjena za izdelavo talnih oblog, elastična (odporna proti tlačnim deformacijam), odporna proti obrabi in pilingu ter hitrem zamazanju. Ker pa je poraba talnih oblog velika in se zelo naglo povečuje, morajo biti vlakna relativno poceni in dostopna. Če upoštevamo omenjene zahtevke, bombaž in viskozna kemična vlakna ne pridejo v poštev. Volna je bila včasih ekskluzivna tekstilna surovina za izdelavo preprog, ki so se uporabljale kot talna obloga. Danes volne ni v zadostnih količinah in v poštev pridejo le sintetična kemična vlakna. To velja predvsem za kakovostne talne obloge, izdelane s tafting tehniko. Za manj kakovostne talne obloge, izdelane s tehniko iglanja, pa je mogoče uporabiti tudi sekundarne tekstilne surovine oziroma mešanice različnih tekstilnih vlaken.

18.2.3 Izbor vlaken za tehnične tekstilije

Tehnične tekstilije je zelo težko opredeliti. Nekatere lahko razvrstimo v skupino oblačil in v tehnične tekstilije obenem. To so predvsem posebna zaščitna oblačila: oblačila ali deli oblačil za zaščito proti projektili, zaščitna oblačila pred ognjem, termičnim udarom, pred strupenimi kemikalijami ali bojnimi strupi, oblačila vesoljcev ipd. Posebna oblačila niso razširjena in uporabo pogojuje delo. V posebnih okoliščinah jih lahko prištevamo k tehničnim tekstilijam.

18.2.3.1 Delovna oblačila

Med posebna oblačila lahko razvrstimo delovna oblačila za delo v agresivni atmosferi , ki je kisla ali bazična, ali oblačila za delo s kislinami ali bazami. V tem primeru moramo izbrati vlakna, ki so odporna proti dani agresivni atmosferi. Za ta namen uporabljamo nekatere vrste sintetičnih kemičnih vlaken. Včasih mora biti oblačilo negorljivo (gasilske in pilotske obleke, uniforme tankistov ipd.). V tem primeru morajo biti obleke ali uniforme izdelane iz negorljivih vlaken. Obdelava tkanin z apreturnimi sredstvi proti gorenju se je pokazala kot slabo učinkovita. Takšne apreture negativno vplivajo na druge parametre kakovosti in ponavadi niso dovolj permanentne. Zaradi tega se v novejšem času uporabljajo različni aditivi, ki se dodajo talini ali raztopini, iz katerih se izdelujejo sintetična kemična vlakna. Takšni aditivi zavirajo gorenje . Tako dobimo permanentno negorljiva vlakna, pri katerih drugi parametri kakovosti niso bistveno poslabšani. Poleg tega so aromatski poliamidi že sami po sebi negorljivi, vendar je cena teh vlaken visoka in se uporabljajo tam, kjer druga vlakna niso primerna (temperatura 250 °C do 400 °C ipd.).

Med posebna oblačila prištevamo tudi oblačila, ki ščitijo pred projektili, ki imajo nizko kinetično energijo (hitrost do 400 m/s). Takšna zaščitna oblačila (ali samo zaščitni brezrokavnik) uporabljajo posamezne armade in posebne varnostne enote policije. Najpomembnejša značilnost vlaken, ki jih uporabljamo za takšna oblačila, je visoka

vrednost začetnega modula. Za deformacijo potrebujejo precejšnjo količino kinetične energije, kar pomeni, da se lahko uspešno upirajo projektilom, ki imajo hitrost do 400 m/s. Visok začetni modul imajo dobro orientirani aromatični poliamidi (Kevlar, Nomex, Twaron, Technora ipd.) in polietilensko vlakno – Spectra. Ta vlakna tvorijo različne vrste mrež. Mreže se lahko uporabljajo kot zavese, za obrambo pred insekti ali kot okras (različne vrste čipk). Mreže, ki jih uporabljamo za tehnične namene, so ribiške mreže in tudi maskirne mreže. Z maskirnimi mrežami se prekrijejo različna orožja, transportna sredstva in manjši vojaški objekti, ki jih tako zamaskiramo pred sovražnikom. Ker maskirne mreže niso izpostavljene obremenitvam, jih lahko izdelamo iz vlaken, ki imajo manjšo pretržno trdnost (PAN vlakna ipd.). Ta vlakna so tudi odporna atmosferilijam, sončni svetlobi in mikroorganizmom. Po drugi strani pa se lahko barvajo, kar je zelo pomembno zaradi barvanja v maskirne barve.

18.2.3.2 Ribiške mreže

Ribiške mreže so izpostavljene velikim obremenitvam na nateg, agresivnemu delovanju morske vode in sončnih žarkov (v času sušenja ali skladiščenja na palubi ribiške ladje). Tem zahtevkom najbolj ustrezajo stabilizirana PA vlakna, PES vlakna in tudi stabilizirana PP vlakna. Prej se je za ribiške mreže uporabljal predvsem bombaž, toda sintetična kemična vlakna so ga pri izdelavi ribiških mrež v celoti nadomestila, saj imajo take mreže nekajkrat daljšo življenjsko dobo.

18.2.3.3 Tkanine za šotore, jadra in ponjave

Tkanine za šotore, jadra in ponjave (cerade) lahko uvrstimo v eno skupino. Te tkanine so izdelane iz grobe, zelo močne preje, saj so izpostavljene zelo velikim nateznim in razpočnim obremenitvam ter silam, ki povzročajo nadaljnje trganje tkanine. Poleg tega so pogosto plastificirane in izpostavljene atmosferilijam ter sončnim žarkom. Ker sta tkanini za cerade in šotore napeti na ogrodju, morata med uporabo obdržati praktično absolutno stabilnost dimenzij. Za te namene so primerna sintetična kemična vlakna, in sicer tipi, ki imajo zelo visoko vrednost začetnega modula elastičnosti in so stabilizirani proti negativnemu vplivu ultravijoličnih žarkov. Ta vlakna so tudi odporna proti vplivu mikroorganizmov, s katerimi pride šotorska tkanina v stik preko biološko aktivne zemlje, na kateri je šotor postavljen. V prejšnjih časih so za izdelavo tkanin za šotore in ponjave uporabljali izključno bombaž in za izdelavo jadrovine delno bombaž in delno lan. Danes te vrste vlaken ne pridejo v poštev, saj so njihove lastnosti neprimerljive z lastnostmi sintetičnih kemičnih vlaken.

Jadrovina za tekmovalne jadrnice je zelo specifični izdelek. Mora biti lahka, kar dosežemo s posebno tehnologijo izdelave. Ker se ta vrsta tkanine izdeluje v majhnih količinah, je ne bomo podrobno obravnavali.

18.2.3.4 Tkanine za padala

Do konca druge svetovne vojne in nekaj časa po njej so za izdelavo tkanine za padala uporabljali pravo svilo, predvsem zaradi izredne elastičnosti in trdnosti. Poleg tega pred drugo svetovno vojno ni bilo primernejšega materiala, kot je prava svila. Najlon in perlon se še nista izdelovala v zadostnih količinah.

Danes tkanine za padala izdelujejo predvsem iz PA multifilamentne preje. PA je primeren tudi zaradi relativno majhne specifične mase. Če želimo, da imajo padala iz PA daljšo življenjsko dobo, jih moramo izdelovati iz PA, ki je stabiliziran proti delovanju

ultravijoličnih sončnih žarkov. Lahko uporabimo tudi druga sintetična kemična vlakna, ki imajo visoko vrednost začetnega modula elastičnosti. Padala morajo biti čim lažja ob upoštevanju optimalne vrednosti trgalne trdnosti, razpočne trdnosti in odpornosti proti nadaljnjemu trganju. Poleg tega moramo upoštevati tudi poroznost. Za omenjene parametre dobimo najboljše rezultate pri tkaninah, ki so izdelane iz multifilamentne preje. Zaradi tega se ne uporabljajo štapelna vlakna.

18.2.3.5 Tkanine za filtracijo plinov in tekočin

V naslednjo skupino tehničnih tekstilij bi lahko razvrstili tekstilne filtre (tkanine in vlaknovine), ki se uporabljajo pri suhi in mokri filtraciji. Za pravilen izbor vrste vlaken je odločilnega pomena temperatura filtracije in agresivnost plinov, tekočin ali trdne snovi , ki jo filtriramo. Pogoji filtriranja so tako različni, da lahko za izdelavo tekstilnih filtrov uporabimo praktično vse vrste vlaken. Prvi omejitveni faktor je temperatura. Ta se pojavlja predvsem pri filtriranju vročih plinov. Naravna vlakna lahko uporabljamo le pri nižjih temperaturah, volno približno do 60 °C in bombaž do 100 °C.

Za temperature od 100 °C do 150 °C so primerna PES vlakna, nad 150 °C do 250 °C aromatična poliamidna vlakna (Nomex, Kevlar ipd.), nad 250 °C pa uporabljamo predvsem steklena vlakna. Azbestna vlakna se ne uporabljajo več, saj se njihova proizvodnja opušča zaradi škodljivosti za vse ljudi, ki pridejo z njimi v stik.

Volnena vlakna se delno še uporabljajo za izdelavo tekstilnih filtrov, ki jih uporabljamo v industriji papirja. Volno nadomeščamo s sintetičnimi kemičnimi vlakni.

Bombaž se uporablja predvsem za izdelavo tkanin, iz katerih se izdelujejo vreče za filtriranje prahu in vlaken iz atmosfere v industrijskih obratih, pa tudi v živilsko predelovalni industriji (tovarne sladkorja, rafinerije jedilnega olja ipd.). Včasih se tkanina uporabi kot armatura , na katero se sesedajo fina vlakna, ki tvorijo filtrirno plast, ker bi bila sicer sama tkanina pregroba in bi zato bila učinkovitost filtracije prenizka (rafiniranje jedilnega olja). V novejšem času se za tekstilne filtre vse pogosteje uporabljajo vlaknovine. Toda pri visokih tlakih, tudi do 1 MPa (tako visok tlak se uporablja pri filtraciji mase v keramični industriji), uporabljamo tkanino, ker takšen tlak lahko prenese le močna tkanina, ki mora biti zelo gosta. Izdelamo jo iz multifilamentne PES preje. Ta vlakna morajo imeti zelo visoko vrednost začetnega modula elastičnosti. Vrsto vlaken izbiramo tudi po kriteriju agresivnosti snovi, ki jo filtriramo (kisla ali bazična). Tako so primerni za filtracijo vročih in agresivnih plinov aromatični poliamidi . Če pa temperatura plinov ne presega 150 °C, bomo raje uporabili PES vlakna, ker so cenejša. Pri tem moramo upoštevati tudi življenjsko dobo in stroške zamenjave filtrnih vreč, ker se lahko izkaže, da so sicer dražja vlakna cenejša zaradi manjših obratovalnih stroškov.

18.2.3.6 Tkanine za pogonske jermene, transportne trakove ipd.

K tehničnim tekstilijam prištevamo tudi razne trakove in vrvi, transportne trakove, pogonske jermene, kord za gume ipd. Ti izdelki morajo prenašati velike natezne sile in morajo biti v nekaterih primerih odporni proti drgnjenju. Takšne lastnosti nudijo nekatera sintetična kemična vlakna v obliki multifilamenta, toda le tisti tipi, ki imajo visoko stopnjo orientacije in zato visoko začetno vrednost modula elastičnosti.

18.3 Konstrukcija preje

18.3.1 Splošno

Zelo pomembno je, da določimo kriterije za izbiro optimalne kakovosti preje za določeno namembnost, tako monofilamentne kot tudi multifilamentne. Monofilamentno in multifilamentno prejo dobimo z izpredanjem kemičnih vlaken iz raztopine ali taline. Obe uporabljamo za izdelavo ploskih tekstilnih izdelkov neposredno ali pa predhodno obdelani. Multifilamentno prejo zelo pogosto kodramo (teksturiramo), da se ji poveča voluminoznost in izboljša otip. Monofilamentno prejo pogosto tudi termično obdelujemo, da dobi želeno konfiguracijo in lastnosti.

Monofilamentne niti lahko oblikujemo v vijačnice, iz katerih izdelujemo posebno vrsto filtra. Lahko se uporabljajo tudi kot protivlečne vzmeti galirnih vrvic na žakarskih strojih. Za takšne namene se uporablja predvsem groba monofilamentna preja. Iz finejše monofilamentne preje se izdelujejo tkanine za različne filtre, med katere štejemo različne vrste sit. Takšne tkanine so zelo enakomerne in imajo visoko trdnost. Iz monofilamentne preje je zelo težko tkati goste tkanine, ker ima preja nizko vrednost tornega koeficienta na relativno gladki površini. Kadar potrebujemo zelo gost filter, ki ima majhen hidravlični srednji premer por, npr. pod 10 mikrometrov, termično obdelamo tkanine, ki so izdelane iz finejše monofilamentne preje. Tkanino spustimo skozi kalander, katerega valji so segreti na temperaturo, ki je višja od temperature mehčanja monofilamentne preje. Preja se omehča in se pod pritiskom deformira oziroma razširi v ravnini tkanine. Tako se zmanjšajo pore v tkanini in se niti med seboj delno zlepijo. Zaradi tega se poveča stabilnost konfiguracije tkanine.

Preja v ožjem pomenu besede je preja, spredena iz štapelnih vlaken v predilnicah ne glede na tehnologijo predenja (prstančni predilnik, predenje z odprtim krajem, frikcijski, aerodinamični postopek ipd.). Glede izbire tehnologije smo pogosto omejeni. Običajno razpolagamo s predilnico, ki ima instalirano določeno tehnologijo, ki je ne moremo veliko spreminjati. Obstajajo tudi predilnice v velikih tekstilnih kombinatih, ki razpolagajo s kapacitetami v več tehnologijah ali lahko v eni tehnologiji izvajajo več postopkov (česani, polčesani, mikani ali vigonjski način predenja).

Konvencionalna tehnologija s prstanskim predilnikom na koncu tehnološkega procesa predenja ima določene prednosti pred drugimi tehnologijami glede na nekatere lastnosti preje. Proizvodnja enega predilnega mesta pa je precej manjša kot pri novejših tehnologijah. Na splošno omogoča česani postopek predenja dobro orientacijo vlaken vzdolž osi preje, visoko trdnost in enakomernost preje ter majhno voluminoznost preje. Z mikanim postopkom predenja dobimo prejo, v kateri je orientacija vlaken vzdolž osi preje manjša kot pri česanki, manjša je enakomernost in trdnost, večja pa voluminoznost preje. Toda mikani postopek ne onemogoča izdelave zelo finih prej. Podobno velja tudi za vigonj prejo, ki je običajno izdelana iz sekundarnih tekstilnih surovin.

Tehnologija predenja preje z odprtim koncem (open end) ne omogoča predenje preje, finejše od 17 tex (približno enako kot pri mikanem postopku). Preja je enakomerna in voluminozna, vendar ima manjšo trdnost kot podobna preja, spredena na prstanskem predilniku, ima pa hkrati mehkejši otip.

Ena novejših tehnologij predenja je tudi frikcijsko predenje. Preja, izdelana po tej tehnologiji, je precej toga (plašč je bolj opreden kot jedro preje). Zaradi prevelike togosti ta preja ni primerna za izdelavo ploskih tekstilij, pri katerih je zaželena voljnost. Poleg tega je trdnost te preje manjša kot pri podobni preji, izdelani na prstanskem predilniku.

Aerodinamično predenje omogoča veliko proizvodnost predilnega mesta in odsotnost delovanja mehanizma (v strojnem smislu) v predilnem polju. Preja se tvori s

pomočjo urejenega gibanja zraka v predilni cevki. Negativna stran te tehnologije je precejšnja poraba energije. Preja je dokaj enakomerna in vlakna v njej so dokaj dobro paralelizirana. Zaradi tega je trdnost preje na nivoju trdnosti podobne konvencionalne preje, spredene na prstanskem predilniku. Mogoče je presti srednje fine in fine preje.

Najnovejša tehnologija predenja je "kompaktno predenje". V predilnem polju so vlakna vodena čez površino valja, ki ima zelo gosto mrežo. Na enem delu se ustvarja podtlak, ki vlakna lepi na površino valja. Zaradi tega se vlakna paralizirajo. So pač z vakuumom "vpeta" na površino valja. To stanje onemogoča sipanje smeri vlaken. Vsa so usmerjena v smeri toka vlaken v predilnem polju. Obenem se vlakna izravnajo. Ko preneha delovati podtlak zaradi ovire v valju, ki preprečuje vpliv vakuuma v nadaljnjem toku vlaken čez valj, se vlakna "odlepijo" od površine valja in se obenem opredejo v prejo. Ker so z enim koncem še zmeraj vakuumsko vpeta na valj, se ne morejo deparalizirati in krčiti – kodrati. Vlakna v preji so dobro paralizirana in izravnana. Zaradi tega ima večjo gostoto kot klasična prstanska preja. Večji je tudi izkoristek substančne trdnosti vlaken.

18.3.2 Konstrukcijske značilnosti prej, namenjenih za izdelavo oblačil

Zelo težko je opredeliti kakovost preje, namenjene za izdelavo tkanin in pletenin, ki jih uporabljamo za izdelavo delov oblačil. Za osnovo bi lahko vzeli tri kriterije: vrsto oblačila (otroško, moško, žensko, delovno, uniformo, posebno oblačilo ipd.), lego opazovanega dela oblačila v kompletu (prva plast – neposredno na koži, termoizolacijska plast, vrhnja plast, posebni deli oblačila ipd.) in vrsto ploskega izdelka, iz katerega je izdelan določen del oblačila (tkanina, pletenina ipd.).

Če upoštevamo vrsto oblačila, lahko ugotovimo, da ta kriterij ni najbolj primeren za izbiro vrste in kakovosti preje. To pa zaradi tega, ker je vloga posameznih delov oblačila različna glede na zelo različne pogoje uporabe, zaradi česar pridejo v poštev praktično vse vrste in kakovosti, razen zelo grobih. Boljša kriterija sta lega v oblačilu in vrsta ploskega izdelka. Za spodnje perilo uporabljamo predvsem pletenine. Žensko spodnje perilo je izdelano predvsem iz fine multifilamentne preje. Če pa je spodnje perilo izdelano iz predene preje (bombaž in njegove mešanice s kemičnimi vlakni), je to lahko fina in srednje groba preja. Vitje je običajno manjše od standardnega za določeno finost preje. S tem dosežemo boljšo voluminoznost preje ter ugodnejši, mehkejši otip pletenine. V večini primerov je moško in otroško spodnje perilo izdelano iz pletenin, ki so spletene iz mehko vite predene preje.

Srajce so mejni predmet oblačila med spodnjo in termoizolacijsko plastjo in so pretežno tkanine. Delež srajc, ki so izdelane iz pletenin, narašča, vendar je še vedno relativno majhen. Pletene srajce so večino izdelane iz multifilamentne preje, redkeje iz predene preje. Tkane srajce so pretežno izdelane iz predene preje. Finost preje je najpogosteje v mejah od 10 tex do 50 tex. Preja, ki jo uporabljamo za izdelavo tkanin, je podvržena precejšnjim obremenitvam v procesu tkanja in ji zaradi tega damo večje vitje kot preji, ki je namenjena za izdelavo pletenin. Za spodnje perilo in srajce so tako primerne zelo različne kakovosti preje. Za katero kakovost se bomo odločili, je odvisno od želene kakovosti končnega izdelka. Za izdelavo debelih flanelastih srajc bomo uporabili grobo mikano prejo z manjšim vitjem, da bomo lažje kosmatili. Surovina je lahko celo volna ali mešanica volne, kemičnih in bombažnih vlaken. Za vrhunsko kakovost preje pa bomo uporabili kakovosten dolgovlaknat bombaž in zelo fino česano ali sukano prejo. Pogosta je tudi uporaba multifilamentne teksturirane preje, ki je izdelana iz posebnih kemičnih vlaken, ki ne povzročajo slabega fiziološkega počutja.

Termoizolacijsko plast lahko delimo na več delov. Za vsak del bo tudi kakovost preje različna. Tako lahko ločeno opazujemo: pokrivalo (zaščita glave), termoizolacijsko plast oblačila v ožjem pomenu besede (zaščito trupa in okončin) ter rokavice in nogavice (zaščita dlani in prstov ter stopal). Prejo lahko uporabljamo za izdelavo termoizolacijske plasti, kot so rokavice, nogavice, puloverji ipd. ali pa za armaturo (vezna osnova in votek) in termoizolacijsko plast (lasna osnova ali votek). Preja, ki jo uporabljamo za izdelavo termoizolacijske plasti, mora biti mehka in voluminozna. Voluminozno prejo lahko izdelamo le iz volne ali teksturiranih kemičnih vlaken. Razen nogavic in eventualno rokavic (če ni tankih zaščitnih rokavic iz tkanine) termoizolacijska plast večinoma ni izpostavljena obrabi. Poleg tega je preja lahko mehko vita in ni nujno, da je odporna proti obrabi, razen v primeru, ko dele, izdelane iz take preje, uporabljamo kot zgornje oblačilo. Preja je v večini primerov groba ali srednje groba in je ponavadi izdelana iz štapelnih vlaken. Trdnost preje nima večjega pomena.

Zgornja plast oblačila pa je lahko zelo različna glede na namen uporabe in glede na konstrukcijo materiala, iz katerega je izdelana. To plast najpogosteje tvori obleka v ožjem pomenu besede. V večini primerov so konvencionalne moške in ženske obleke izdelane iz česane sukane preje, ki je bila včasih pretežno izdelana iz volne. Danes je to predvsem preja, izdelana iz mešanice volne in kemičnih vlaken, za pletene obleke pa iz bombaža ali mešanice.

Tudi dodatnih zgornjih delov oblačila – moških in ženskih plaščev ne izdelujemo več iz težkih volnenih tkanin. Ti so bili izdelani iz grobe ali srednje grobe volnene preje in so tehtali tudi štiri kilograme in več. Sedaj jih izdelujemo iz lažjih tkanin, izdelanih iz mikane, polčesane ali česane volnene preje, polvolnene preje ali kemičnih vlaken volnenega tipa. Takšni plašči so lahki in primerni za prehodna obdobja (pozna jesen in zgodnja pomlad), nosijo se tudi pozimi, ko ni preveč mraz. Če je zima mrzla, je primeren plašč, izdelan iz tkanine bombažnega tipa, ki ima termoizolacijski vložek. Za izdelavo takšnega plašča največkrat uporabljamo fino česano in sukano štapelno prejo iz mešanice bombaža in kemičnih vlaken ali iz čistih kemičnih vlaken. Za izdelavo različnih tipov vetrovk in puhovk največkrat uporabljamo kodrano ali nekodrano multifilamentno prejo iz kemičnih vlaken.

Nogavice so specifični del oblačila. Imajo predvsem termoizolacijsko funkcijo, pri ženskah tudi estetsko. Ženske nosijo dokolenke, nadkolenke ali hlačne nogavice. Te so najpogosteje izdelane iz kodrane fine PA multifilamentne preje. Tudi običajne moške nogavice so lahko izdelane iz kodrane PA multifilamentne preje, ki pa je bolj groba kot preja, ki jo uporabljamo za izdelavo ženskih in hlačnih nogavic. Za navedene nogavice uporabljamo tudi srednje fino predeno prejo bombažnega tipa, izdelano iz bombaža in mešanice bombaža ter kemičnih vlaken, za zimske nogavice pa prejo volnenega tipa, izdelano iz volne ter mešanice volnenih in kemičnih vlaken. Nogavice so pletene, kar omogoča dobro prileganje obliki stopala.

Zaščita dlani je zelo velik problem, predvsem v ekstremno mrzlem okolju in pri slabi intenziteti človekove aktivnosti. V našem podnebju termoizolacija dlani in prstov ne predstavlja posebnega problema. Rokavice nimajo samo termoizolacijske funkcije, temveč tudi estetsko in higiensko (pletene tanke ženske rokavice, ki se lahko nosijo ob vsaki priložnosti, lahke moške pletene rokavice za posebne svečane priložnosti) ter zaščitno (zaščita rok pri posameznih vrstah dela – gradbeništvo, plavžarstvo, kirurgija idr.). Tekstilne rokavice so pletene, izdelane iz grobe, srednje fine ali zelo fine preje, ki je običajno sukana. Katero prejo bomo uporabili, je odvisno od namembnosti rokavic. Če imajo estetsko in delno higiensko funkcijo, jih izdelujemo iz zelo fine sukane preje. Če pa so namenjene termoizolaciji, jih izdelujemo iz grobe ali srednje fine mehko vite preje.

Tudi tekstilni vložek v usnjenih rokavicah je izdelan iz slabo vite kosmatene srednje fine preje. Včasih uporabljamo dvoplastne rokavice, pri čemer je zgornja plast izdelana iz goste tkanine, odporne proti obrabi. Za izdelavo te tkanine uporabljamo normalno vito in sukano, fino ali srednje fino prejo.

Pokrivala so zelo različna, od klobuka do smučarske čepice. Čepice so običajno spletene iz grobe ali srednje fine mehko vite sukane preje. Ta preja je voluminozna, kot preja za izdelavo rokavic, in ima dobre termoizolacijske lastnosti.

18.3.3 Konstrukcijske značilnosti prej, namenjenih za izdelavo blaga za opremo bivalnih prostorov

Tekstilije, ki so namenjene za opremo bivalnih prostorov, so tekstilije za blazinjenje, posteljnina, talne in podne obloge, zavese ipd.. Tekstilije za blazinjenje pogosto imenujemo dekorativno blago, ki mora biti odporno predvsem proti obrabi in pilingu. Zaradi tega uporabljamo grobo ali srednje fino mikano, polčesano ali česano sukano prejo, ki je v večini primerov normalno vita. Pogosto uporabljamo tudi močno nakodrano prejo ali efektni sukanec, ki dajejo tkanini posebni videz. To velja za sistem niti, ki tvori površinski učinek. Sistem niti, ki ga na površini ni videti, ima vlogo armature. Zanj je bistvena primerna trdnost in stabilnost, manj pa estetski učinek. Takšen temeljni ali vezni sistem niti tvori v večini primerov srednje fina mikana in sukana preja. Za blazinjenje se uporablja tudi multifilamentna preja, vendar v manjšem obsegu.

Zavese so posebna skupina tekstilij. Izdelane so ali iz zelo lahke tkanine, pletenine ali sukljanke, ali pa iz zelo težke tkanine, odvisno od njihove funkcije. Temu je primerna tudi kakovost preje. Ta je lahko multifilamentna, predena ali efektna. Edina obremenitev, ki jo prenaša zavesa, je lastna teža. Zato trdnost preje ni bistvena pri uporabi zaves. Pomembna je le odpornost proti deformacijam pri visenju in pri pranju. Temu primerno bomo izbrali ustrezno prejo, njeno vitje, karakteristike vlaken ipd. Običajno se uporablja enojna ali sukana preja z normalnim vitjem. Pri efektnih sukancih vitje narekuje želeni videz preje, to pomeni, da je preja lahko tudi mehko ali zelo trdo vita.

V tretji skupini bomo obravnavali posteljnino. To lahko grobo delimo v dve skupini: rjuhe in prevleke ter odeje in prekrivala na splošno. Za rjuhe in prevleke uporabljamo lahke tkanine, ki so izdelane iz srednje fine ali fine enojne ali sukane štapelne preje. Preja je večinoma normalno vita, izdelana po mikanem, polčesanem ali česanem postopku. V novejšem času se uporablja tudi multifilamentna preja. Odeje so ponavadi izdelane iz dveh različnih kvalitet preje. V osnovi je večinoma groba ali srednje fina sukana preja, izdelana po mikanem postopku. Preja je ponavadi normalno vita. Za votek pa se uporablja groba mehko vita preja, izdelana po vigonjskem ali mikanem postopku. Votek praviloma kosmatimo in je zelo voluminozen, zaradi česar ima odeja visoko vrednost termoizolacije, še zlasti, če imajo vlakna sama po sebi visoke termoizolacijske vrednosti.

18.3.4 Konstrukcijske značilnosti prej, namenjenih za tehnične tekstilije

Med tehnične tekstilije lahko pogojno uvrstimo tudi posebna oblačila ali pa dele oblačil. Konstrukcija preje za izdelavo teh oblačil se bistveno ne razlikuje od konstrukcije preje, ki jo uporabljamo za druge vrste oblačil. Biti mora le bolj enakomerna. Razlika je predvsem v kakovosti uporabljenih vlaken. Zaradi tega preje, namenjene za izdelavo posebnih oblačil ali delov oblačil, ne bomo podrobneje obravnavali.

Naslednja skupina so mreže (ribiške, maskirne ipd.). Ker so ribiške mreže izpostavljene velikim obremenitvam, mora imeti preja visoko trdnost. Zaradi tega ribiške

mreže izdelujejo predvsem iz monofilamentne ali multifilamentne sukane preje. Število monofilamentov v sukani preji je odvisno od namembnosti mreže.

Če je mreža zelo velika, namenjena za ribarjenje na odprtem morju, je posukano skupaj večje število monofilamentov kot pri manjših mrežah, ki jih uporabljamo v priobalnih vodah. Glede na način uporabe mreže je primerneje uporabiti monofilament, ki ga uporabljajo tudi pri ribiških palicah, ker je manj občutljiv kot multifilamentna preja, ki ji ne moremo dati večjega števila zavojev. Preji, ki ima 1.000 monofilamentov, lahko damo okrog 90 zavojev. To je optimum. Pri tem se preja ne sme krotovičiti.

Tudi maskirne mreže izdelujejo iz sukane preje. V tem primeru trdnost preje ni toliko pomembna, ker mreža ni obremenjena na nateg. Zato lahko uporabimo mikano ali monofilamentno oziroma multifilamentno prejo, odvisno od tega, kako čas uporabe mreže vpliva na ceno, pri čemer skušamo najti optimalno ekonomsko rešitev.

Posebno skupino predstavljajo tkanine za šotore, cerade (ponjave) in jadra. Če upoštevamo dejstvo, da so tkanine, ki jih uporabljamo za šotore, cerade (ponjave) in jadra, izpostavljene velikim nateznim in razpočnim obremenitvam ter obremenitvam nadaljnjega trganja, kar posebno velja za ponjave (cerade) in jadra, bi morali za izdelavo teh tkanin uporabiti zelo močno prejo. Najbolj primerna je multifilamentna sukana in kablana preja, izdelana iz sintetičnih kemičnih vlaken, ki so odporna proti atmosferilijam in vplivom sončne svetlobe. V zgodovini se je za jadra uporabljala pretežno lanena sukana in kablana preja, za cerade bombažna sukana in kablana preja in za šotore pretežno bombažna sukana preja. Bombažne preje so bile grobe ali srednje fine, predene po mikanem postopku. Bombažna preja je neprimerna za izdelavo teh tkanin, ker bombaž ni odporen proti vplivom atmosferilij, sončne svetlobe ter bakterij v biološko aktivni zemlji (šotori) in ker je trdnost bombažnih tkanin precej manjša od trdnosti tkanin iz kemičnih vlaken enake mase.

Zaradi posebnih pogojev uporabe moramo tkanine za padala vsekakor posebej obravnavati. Za izdelavo tkanin za padala uporabljajo zelo fino multifilamentno prejo (4 tex do 9 tex). To pa zato, da dobimo lahko in gosto tkanino. V primerjavi z maso je trdnost tkanine zelo velika. Vendar absolutna trdnost tkanine ni prevelika. To pomanjkljivost odpravimo z vgraditvijo močnih trakov v padalo. Ti trakovi prevzamejo večji delež nateznih obremenitev in omogočajo bolj enakomerno porazdelitev sile po površini padala. Ker mora biti padalo lahko, tkanina ne sme biti preveč porozna in mora prenašati precejšnje obremenitve zlasti v fazi odpiranja padala. Zato je primerna le multifilamentna PA ali podobna zelo fina preja. Ta naj bi imela čim večjo trdnost in čim večji začetni modul elastičnosti, s čimer onemogočimo plastično deformacijo padala in omejimo viskoelastično deformacijo.

Tekstilni filtri so zelo pomembna skupina tehničnih tekstilij. Prejo uporabljamo za izdelavo tkanin, za tekstilne filtre ali pa za izdelavo tkanin za armature vlaknovin. Kakovost preje za izdelavo armaturnih tkanin je odvisna predvsem od razmer uporabe vlaknovine. Pomembna je trdnost preje in ne njen videz. Uporabljamo predvsem grobo in srednje fino predeno prejo, ki je največkrat sukana. Redkeje uporabljamo multifilamentno prejo, ker poškodbe preje pri iglanju bolj izrazito vplivajo na zmanjšanje trdnosti tkanine kot pri predeni preji.

Kakovost tkanih tekstilnih filtrov oziroma filter medijev v filtrirni napravi je resnično zelo pestra. Temu ustrezna je tudi kakovost preje, iz katere izdelujemo tkane tekstilne filtre. Za izdelavo lahkih, enakomernih in zelo trdnih tkanin uporabljamo fin in srednje fin monofilament. Z uporabo finih monofilamentov lahko dobimo tkanine, ki imajo hidravlični premer por manjši od 20 mikrometrov. Še manjše pore lahko dobimo, če površino tkanine termično obdelamo in jo hkrati izpostavimo pritisku na kalandru. Mo-

nofilament se splošči in pri tem se velikost por zmanjša. Zelo pogosto uporabljamo multifilamentno prejo, in sicer zelo fino, fino, srednje grobo in grobo, enojno in sukano. Predene preje različnih kakovosti uporabljamo za izdelavo tkanin za manj zahtevno suho filtracijo, pretežno pri sobni temperaturi ter za makro filtracijo. Pri prejah različnih kakovosti gre za mikano, polčesano in česano prejo, ki je predvsem srednje fina, fina in normalno vita.

Kot zadnjo skupino tehničnih tekstilij lahko omenimo trakove, vrvi, transportne trakove, poganske jermene, kord za gume ipd. Ker morajo imeti ti proizvodi veliko pretržno trdnost, je najbolj primerna multifilamentna preja visokega začetnega modula elastičnosti in primerne finosti. V večini primerov je to sukana, včasih celo kablirana preja. Tudi z najbolj kakovostno prejo praviloma ne dosežemo potrebne trdnosti z enoplastno tkanino. Zato pogosto uporabljamo konstrukcije večplastnih tkanin.

18.4 Konstrukcija tkanin

Tkanino imenujemo ploski tekstilni izdelek zato, ker je njena debelina majhna v primerjavi s širino in še posebej z dolžino. Vendar je kljub temu tkanina tridimenzionalen tekstilni izdelek in jo bomo tako, vsaj v nekaterih primerih, tudi obravnavali. V drugih primerih zadostuje dvodimenzionalna obravnava. Konstrukcija tkanine mora ustrezati projektnim zahtevkom, kar pomeni, da moramo parametre konstrukcije izbrati tako, da bodo lastnosti tkanine čim bolj ustrezale projektnim zahtevkom. Lastnosti tkanine so funkcije lastnosti vlaken in preje ter vrednosti parametrov konstrukcije same tkanine. Osnovni parametri konstrukcije se nanašajo na geometrijo tkanin. Od teh parametrov so odvisne fizikalno-mehanske lastnosti tkanine oziroma tiste lastnosti, ki so določene v projektnih zahtevkih. Najprej si bomo ogledali geometrijsko strukturo tkanin in nato odvisnost fizikalno-mehanskih lastnosti tkanin od te geometrijske strukture.

18.4.1 Geometrijska struktura tkanin

18.4.1.1 Premer preje

Osnovni parameter, ki ga moramo upoštevati pri analizi geometrije tkanin, je premer nitiosnove in votka. Realni premer niti je zelo težko ugotoviti. Odvisen je od vrste vlaken oziroma od oblike prečnega preseka vlaken, specifične mase, kodravosti, togosti ipd. Poleg tega je odvisen tudi od vrste predilnega postopka oziroma stopnje paralelizacije vlaken v preji, števila zavojev, finosti preje in tudi od sil, ki delujejo na niti osnove in votka v procesu oblikovanja tkanine. Pri analizi geometrije tkanine pogosto predpostavljamo okrogel presek niti, kljub temu da je realni presek niti v tkanini bolj podoben elipsi.

Če predpostavimo, da je prečni presek preje idealen krog, lahko izrazimo premer preje z naslednjo enačbo [2]

$$d = 2,57 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{T}{P\gamma}}, \tag{18.1}$$

kjer so d [cm] premer preje, T [tex] finost preje, P poroznost preje, γ [g/cm^3] gostota vlaken.

Poroznost preje je največkrat v mejah od 0,55 do 0,75. Za izračun premera preje zadostuje, če privzamemo srednjo vrednost poroznosti 0,65. S tem ne bomo naredili

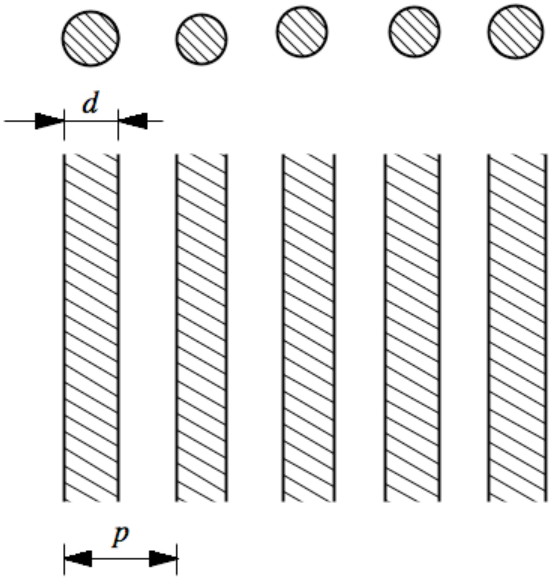
prevelike napake. Če to vrednost vstavimo v enačbo (18.1), dobimo

$$d = 4,44 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{T}{\gamma}}. \tag{18.2}$$

18.4.1.2 Faktor kritja

Faktor kritja je osnovni parameter geometrije tkanin, ki nam pove, na kakšni medsebojni razdalji so niti osnove in votka. Če so niti ena poleg druge brez razmaka, gre za popolno kritje brez deformacij niti. Pri tem predpostavimo, da je osnova v eni ravnini in votek v drugi. V realni tkanini to ni tako. Zaradi tega je v enoplastni tkanini izredno težko doseči tolikšno število niti osnove in votka, ki bi pomenilo popolno kritje ali maksimalno vrednost faktorja kritja. Pri maksimalni vrednosti faktorja kritja v realni tkanini bi morale biti niti tako deformirane, da bi imel prečni prerez niti obliko elipse.

Izračun faktorja kritja K temelji na paralelni legi niti s premerom d in medsebojno oddaljenostjo p, slika 18.2.



Slika 18.2: Premer niti in razdalja med nitmi osnove ali votka.

Če upoštevamo enačbo (18.2), lahko napišemo razmerje med premerom niti in medsebojno oddaljenostjo v naslednji obliki

$$\frac{d}{p} = 4,44 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{T}{\gamma p^2}}. \tag{18.3}$$

Če upoštevamo, da je $1/p = n$, pri čemer je n število niti na cm, lahko enačbo (18.3) transformiramo v naslednjo obliko

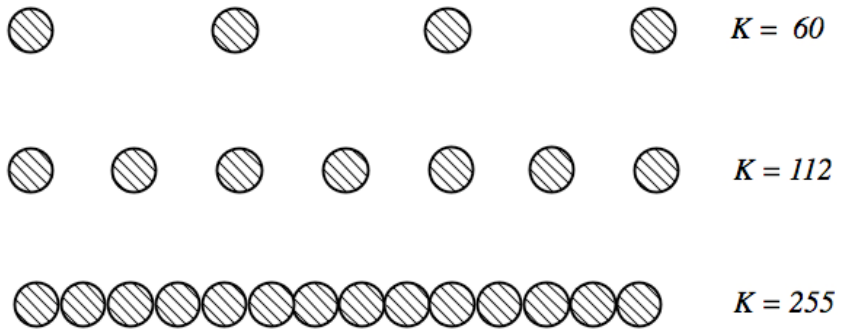
$$\frac{d}{p} = 4,44 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{Tn^2}{\gamma}}. \tag{18.4}$$

V primeru, da je $d/p = 1$, se niti med seboj dotikajo in dobimo maksimalno vrednost faktorja kritja. V enačbi (18.4) je $4{,}44 \cdot 10^{-3}$ konstanta in jo lahko označimo z a. Faktor

kritja definiramo z naslednjo enačbo

$$K = \frac{d}{ap} = n\sqrt{\frac{T}{\gamma}}. \tag{18.5}$$

Maksimalna vrednost faktorja kritja $1/a = 225$. Faktor kritja računamo posebej za osnovo in posebej za votek. Na sliki 18.3 je prikazan faktor kritja.



Slika 18.3: Ilustracija vrednosti faktorja kritja.

Enačba (18.5) kaže, da lahko pri konstrukciji tkanine spreminjamo finost preje, gostoto niti in surovino, iz katere je izdelana preja. To velja tako za osnovo kot za votek. Poleg tega je mogoče spreminjati tudi vezavo.

S pomočjo faktorjev kritja osnove in votka je mogoče izračunati poroznost oziroma polnost tkanine. Pri računanju polnosti tkanine moramo upoštevati tudi površino, na kateri se križajo niti osnove in votka. To površino si lahko predstavljamo kot pravokotnik. Ena stranica tega pravokotnika je premer niti osnove in druga premer niti votka. Ker je na tej površini kritje dvakratno, moramo odšteti en pravokotnik, da dobimo realno kritje oziroma polnost tkanine.

Polnost tkanine P lahko izračunamo s pomočjo faktorjev kritja osnove in votka, ki ju izrazimo z naslednjima enačbama

$$K_1 = \frac{K_0}{K_{max}} \quad ; \quad K_2 = \frac{K_v}{K_{max}}, \tag{18.6}$$

$$P = K_1 + K_2 - K1 \cdot K_2, \tag{18.7}$$

kjer so K_0 faktor kritja osnove, K_v faktor kritja votka, K_{max} maksimalni faktor kritja je 225, P polnost tkanine.

Enačbi (18.6) in (18.7) kažeta, da je polnost tkanine $P = 1$. Faktor kritja oziroma polnost tkanine omogoča primerjavo geometrije dveh ali več različnih tkanin. Pri tem moramo upoštevati, da so enačbe od (18.1) do (18.7) izpeljane pod predpostavko okroglega preseka preje in da je že pri enačbah od (18.4) do (18.7) predpostavljena uniformna poroznost preje. V realnih tkaninah ti dve idealizirani predpostavki ne držita.

Pri tkaninah je praviloma povprečni presek preje v obliki elipse. Če je teoretična polnost tkanine $P < 1$ in so bile v procesu formiranja tkanine niti osnove in votka dovolj napete, je velika verjetnost, da je manjša os elipse prečnega preseka preje pravokotna na površino tkanine. Pri zelo gostih tkaninah, pri katerih je teoretična vrednost polnosti

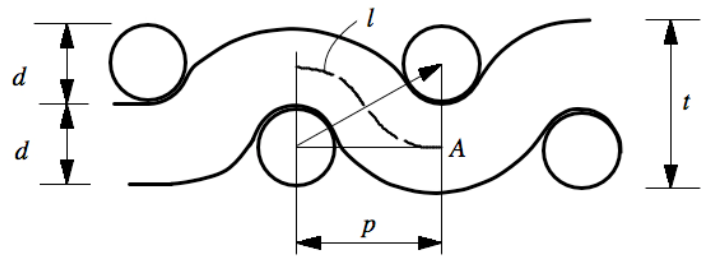
tkanine $P = 1$, je velika verjetnost, da je daljša os elipse prečnega preseka osnove in votka pravokotna na površino tkanine. Ne glede na določena razhajanja od dejanskega stanja je enačba (18.7) primeren kriterij za izbiro realnih gostot osnove in votka v tkanini določene finosti preje in vrste vlaken.

18.4.1.3 Debelina tkanine in vtkanja osnove in votka

Z izrazom geometrija tkanine označujemo medsebojno lego osnove in votka v tkanini. Geometrija tkanine vpliva na njene fizikalno-mehanske lastnosti, ki so bistvenega pomena za kakovost tkanine s stališča uporabe. Za matematično obdelavo je najprimernejša tkanina, ki ima enako prejo in enako gostoto v osnovi in votku in je izdelana v vezavi platno ("kvadratasta"). Poleg tega ima preja idealiziran okrogel prečni presek. Različica tega primera je elipsast prečni presek preje, ali pa okrogel ali elipsast presek preje v kaki drugi vezavi. Dodatne težave pri matematični obdelavi povzroča razlika finosti in gostote niti osnove in votka v tkanini. Še težja je obdelava geometrije večplastnih tkanin.

Pri konstrukciji tkanin moramo vsekakor upoštevati vtkanje osnove in votka. Prvič zaradi izračuna potrebnih količin preje in drugič zaradi vpliva vtkanja na nekatere lastnosti tkanin. Pri nespremenjeni napetosti osnove in votka bo vtkanje največje v tkaninah, ki so tkane v vezavi platno. Predpostavimo najbolj enostaven primer: tkanina je izdelana v vezavi platno iz iste kakovosti preje in ima enako gostoto niti v osnovi in votku (oziroma enake faktorje kritja). Če sta votek in osnova v procesu tkanja izpostavljena enaki napetosti, bo tudi vtkanje osnove in votka enako.

Na sliki 18.4 je prikazan rez "kvadrataste" tkanine, tkane v vezavi platno. Očitno je, da je dolžina $l > p$ za odstotek vtkanja. Parametra l in p lahko izrazimo s pomočjo premera preje d, kateta $AC = d$, hipotenuza $BC = 2d$. Iz Pitagorovega izreka izhaja, da je $p = 30,5d = 1,732d$. Dolžino l lahko razdelimo na dva loka, ki pripadata kotu 60 stopinj na krogu, ki ima polmer d. Torej je $l = 4d/6 = 2d/3$, $c = 100 = 17,3$ %. Na sliki 18.4 je dosežena maksimalna možna gostota tkanine v vezavi platno, kar pomeni, da je maksimalno možno vtkanje v tkanini okrog 17 %, pri čemer je $t = 2d$.

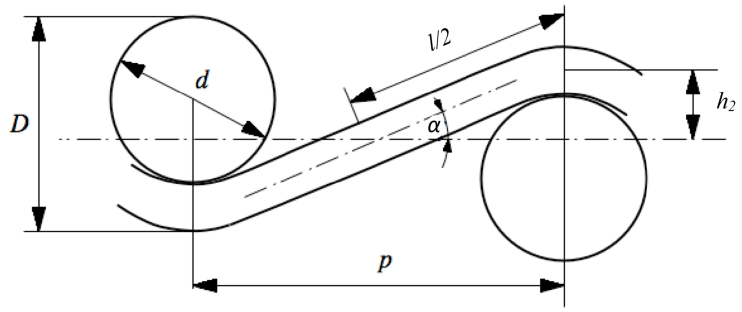


Slika 18.4: Rez kvadrataste tkanine, ki ima teoretično maksimalno gostoto pri okroglem prečnem preseku niti.

Za parametre na sliki 18.5 lahko postavimo naslednje enačbe

$$p = (l - D\alpha)\cos\alpha + D\sin\alpha, \tag{18.8}$$

$$h = (l - D\alpha)\sin\alpha + D(1 - \cos\alpha), \tag{18.9}$$



Slika 18.5: Peircov geometrični model tkanine v vezavi platno. [3]

$$D = h_1 + h_2, \tag{18.10}$$

pri čemer so l dolžina niti na razdalji p, D debelina tkanine, h_1 višina loka osnovne niti, h_2 višina loka votkove niti.

Višina loka in dolžina niti v loku sta bistvenega pomena za količino vtkanja. Dolžino niti v loku je izredno težko ugotoviti oziroma teoretično izračunati. Odvisna je od finosti niti deformabilnosti niti, napetosti niti v procesu tkanja ipd. Na splošno je višina loka odvisna od napetosti. Če je, na primer, osnovna nit zelo napeta in votek zelo ohlapen, se lahko zgodi, da bo ležala osnovna nit v eni ravnini brez lokov, votek pa bo imel maksimalno višino lokov. Zaradi tega je primerno računati z brezdimenzijskim parametrom H,

$$H = \frac{h_1}{h_2}. \tag{18.11}$$

Parameter H ima lahko katerokoli vrednost med 0 in ∞. Za ilustracijo je v preglednici 18.1 prikazanih 9 različnih vrednosti H [4, 5]. Osnova ima dvakrat večji premer kot votek. Pod zaporedno številko 1 leži osnova, izravnana v tkanini. Pod zaporedno številko 9 leži votek, izravnan v tkanini.

Preglednica 18.1: Mejne in nekaj vmesnih vrednosti H (r = polmer niti).

Zap. št.	h_1	h_2	H	Debelina tkanine
1	0,00	6,0r	0,000	8,00r
2	0,75r	5,25r	0,143	7,25r
3	1,50r	4,5r	0,333	6,50r
4	2,25r	3,75r	0,600	6,25r
5	3,00r	3,00r	1.000	7,00r
6	3,75r	2,25r	1,667	7,75r
7	4,50r	1,50r	3,000	8,50r
8	5,25r	0,75r	7,000	9,25r
9	6,00r	0,00	∞	10,00r

Preglednica 18.1 kaže, da se vrednost H povečuje s povečanjem vrednosti h_1 in z zmanjšanjem vrednosti h_2. Iz vrednosti H ne moremo direktno sklepati o vrednostih drugih parametrov konstrukcije tkanin, vendar nam lahko koristi v nekaterih izrazih ovrednotenja določenih parametrov.

Iz višine lokov h_1 in h_2 lahko izračunamo tudi debelino tkanine D. Če debelino tkanine izražamo s premerom osnove in votka, moramo upoštevati koeficient deformacije prečnega preseka osnove η_1 in votka η_2,

$$D = h_1 + h_2 = d_1\eta_1 + d_2\eta_2. \tag{18.12}$$

Z upoštevanjem enačb (18.11) in (18.12), lahko izrazimo h_1 in h_2,

$$h_1 = \frac{H(d_1\eta_1 + d_2\eta_2)}{l + H} \quad ; \quad h_2 = \frac{d_1\eta_1 + d_2\eta_2}{l + H}. \tag{18.13}$$

Vrednost koeficienta deformacije η je največkrat med 0,8 in 0,9. To pomeni, da se s produktom $d\eta$ izraža vrednost krajše osi elipse prečnega preseka.

Vtkanja ali skrčenja ni enostavno izračunati. V končni tkanini vtkanja ni težko ugotoviti, zelo težko pa je izračunati vtkanje v fazi konstruiranja tkanine. Če predpostavimo, da je p dolžina kosa tkanine in l dolžina niti v tem kosu, je $l > p$, slika 18.3. Dolžina $l > BC$ je hipotenuza trikotnika ABC. V večini enoplastnih tkanin je ta razlika manjša kot pri mejnem primeru na sliki 18.3. Če vzamemo, da je $AC = h$ in $l \approx BC$, velja približno naslednja enačba

$$l_1 = \sqrt{p_2^2 + h_1^2} \quad ; \quad l_2 = \sqrt{p_1^2 + h_2^2}. \tag{18.14}$$

Vtkanje osnove c_1 in votka c_2 pa lahko definiramo z naslednjima enačbama

$$c_1 = 100\frac{l_1 - p_1}{l_1} = 100\left(1 - \frac{p_1}{\sqrt{p_2^2 + h_1^2}}\right), \tag{18.15}$$

$$c_2 = 100\frac{l_2 - p_2}{l_2} = 100\left(1 - \frac{p_2}{\sqrt{p_1^2 + h_2^2}}\right). \tag{18.16}$$

Če upoštevamo enačbe od (18.11) do (18.13) ter geometrijsko gostoto p, zanemarimo pa tehnološko gostoto n niti na enoto dolžine, lahko enačbi (18.15) in (18.16) transformiramo v enačbi (18.17) in (18.18).

$$c_1 = 100\sqrt{1 - \frac{100}{\left(10^4 + n_2^2H^2\eta^2\frac{d_1+d_2}{l+H}\right)^2}} \tag{18.17}$$

$$c_2 = 100\sqrt{1 + \frac{100}{\left(10^4 + n_1^2\eta^2\frac{d_1+d_2}{l+H}\right)^2}} \tag{18.18}$$

V enačbah (18.17) in (18.18) predpostavimo, da je $n_1 = n_2 = n$. Ti dve enačbi veljata le, če je tkanina izdelana v vezavi platno. Če pa je tkanina izdelana v drugačni vezavi (npr. keper, atlas ipd.), se situacija nekoliko spremeni. Zmanjša se število lokov v raportu, zaradi česar se zmanjša tudi vtkanje.

Splošno enačbo za vtkanje osnove in votka v enoplastni tkanini lahko izpeljemo s predpostavko, da imamo pri prehodu niti z lica na hrbtno stran in obratno eno hipotenuzo, ki jo moramo upoštevati. To nam pove, da se moramo omejiti na raport vezave,

da dobimo realno število prehodov. Pri tem moramo upoštevati dejstvo, da pri nekaterih vezavah število prehodov posameznih niti ni enako. V takšnih primerih vtkanje računamo na podlagi največjega števila prehodov posamezne niti v raportu.

Če je širina ali dolžina raporta L_0 ali L_v, dolžina niti osnove v raportu L_1 in dolžina votka L_2, potem lahko enačbi (18.15) in (18.16) napišemo v naslednji obliki

$$c_1 = 100\frac{L_1 - L_0}{L_1}, \tag{18.19}$$

$$c_2 = 100\frac{L_2 - L_v}{L_2}. \tag{18.20}$$

Pri dolžinah L_1 in L_2 moramo upoštevati število hipotenuz oziroma prehodov u ($u = 2$) z geometrijsko gostoto p [mm/nit] in števila niti v raportu m. Geometrijsko gostoto izračunamo z naslednjo enačbo

$$p_1 = \frac{100}{n_1} \quad ; \quad p_2 = \frac{100}{n_2}. \tag{18.21}$$

Tehnološka gostota osnove n_1 in votka n_2 je izračunana kot število niti na 10 cm. Sedaj lahko zapišemo

$$L_1 = u_1 l_1 + p_2(m_2 - u_1) = u_1\sqrt{p_2^2 + h_1^2} + p_2(m_2 - u_1), \tag{18.22}$$

$$L_2 = u_2 l_2 + p_1(m_1 - u_2) = u_2\sqrt{p_1^2 + h_2^2} + p_1(m_1 - u_2), \tag{18.23}$$

$$L_0 = p_2 m_2 \quad ; \quad L_v = p_1 m_1. \tag{18.24}$$

Enačbe od (18.22) do (18.24) poenostavimo z vpeljavo naslednjih transformacij, pri tem moramo upoštevati dejstvo, da sta h_1 in h_2 definirana z enačbo (18.13)

$$a_1 = p_2(m_2 - u_1) \quad ; \quad b_1 = \sqrt{p_2^2 + h_1^2} \quad ; \quad e_1 = p_2 m_2, \tag{18.25}$$

$$a_2 = p_1(m_1 - u_2) \quad ; \quad b_2 = \sqrt{p_1^2 + h_2^2} \quad ; \quad e_2 = p_1 m_1. \tag{18.26}$$

Če upoštevamo enačbi (18.25) in (18.26), lahko enačbi (18.15) in (18.16) napišemo v naslednji obliki

$$c_1 = 100\frac{u_1 b_1 + a_1 - e_1}{u_1 b_1 + a_1}, \tag{18.27}$$

$$c_2 = 100\frac{u_2 b_2 + a_2 - e_2}{u_2 b_2 + a_2}. \tag{18.28}$$

18.4.1.4 Masa tkanine

Maso tkanine izražamo v g/m^2. Maso je zelo težko natančno izračunati, ker moramo upoštevati neenakomernost preje, neenakomernost gostote niti in velikost skrčenja niti osnove in votka. Poleg tega se pojavijo izgube mase ali njeno povečanje v posameznih fazah tehnološkega procesa izdelave tkanin. Zaradi tega lahko računamo le maso surove ali gotove tkanine. Masa surove tkanine nam služi le kot orientacija, medtem ko je masa gotove tkanine pomemben parameter, saj so od nje odvisne nekatere lastnosti gotove tkanine. Maso surove tkanine lahko izračunamo s pomočjo enačbe (18.29), maso gotove tkanine pa z enačbo (18.30).

$$G_s = \frac{p_1 T_1}{100 - c_1} + \frac{p_2 T_2}{100 - c_2} \tag{18.29}$$

$$G_g = \frac{G_s \left(1 - \frac{c_3}{100}\right)}{\left(1 - \frac{u_1}{100}\right)\left(1 - \frac{u_2}{100}\right)} \tag{18.30}$$

kjer so G_s [g/m^2] masa surove tkanine, p_1 [niti/10 cm] gostota osnove, p_2 [niti/10 cm] gostota votka, c_1 [%] vtkanje osnove, c_2 [%] vtkanje votka, T_1 [tex] finost preje v osnovi, T_2 [tex] finost preje v votku, G_g [g/m^2] masa gotove tkanine, c_3 [%] spremembe mase surove tkanine v procesu oplemenitenja, u_1 [%] skrčenje tkanine v smeri osnove v procesu oplemenitenja, u_2 [%] skrčenje tkanine v smeri votka v procesu oplemenitenja.

Vrednosti c_1, c_2, u_1 in u_2 so pozitivne, če se preja oziroma tkanina krči. Te vrednosti so negativne, če se prvotne dimenzije preje (preden jo zatkemo v tkanino) in tkanine (surova tkanina) spremenijo zaradi raztezanja. V enačbah (18.29) in (18.30) se spremeni predznak pred temi količinami. Glede vrednosti c_3 pa je stanje nekoliko drugačno. Ta veličina se nanaša na spremembo mase zaradi izgube mase vlaken in eventualno števila, če je bila osnova škrobljena. Takšne izgube privzamemo kot normalne in c_3 ima pozitivno vrednost. Če upoštevamo le-to spremembo, je masa gotove tkanine manjša od mase surove tkanine. Pogosto pa tkanine apretiramo, zaradi česar se jim poveča masa. V takšnih primerih bo c_3 predstavljal vse spremembe mase. Če je količina nanosa apreture večja, kot so izgube mase zaradi apretiranja, ima c_3 negativno vrednost.

Vrednosti c_1 in c_2 izračunamo z enačbama (18.27) in (18.28). Upoštevati moramo dejstvo, da je zelo težko dovolj natančno izračunati teoretične vrednosti posameznih parametrov, ki jih vsebujejo omenjene enačbe. Zaradi tega uporabimo eksperimentalne meritve in kriterije, ki jih dobimo na podlagi eksperimentalnih ugotovitev pod določenimi pogoji. Količini u_1 in u_2 pa sta precej odvisni od pogojev oplemenitenja, zaradi česar ju je teoretično težko ugotoviti. To pomeni, da njihove vrednosti ugotovimo predvsem na podlagi eksperimentalnih meritev, ki veljajo za več različnih artiklov enake surovinske sestave, če je potek oplemenitenja podoben.

18.4.2 Fizikalno-mehanske lastnosti tkanin

Fizikalno-mehanske lastnosti tkanin so predvsem trdnost, razteznost, togost, odpornost proti mečkanju, krčenje tkanine zaradi določenega tretmana med uporabo, odpornost proti drgnjenju, odpornost proti nastanku svaljkov (pilinga) ipd. Na večino omenjenih lastnosti lahko vplivamo z izbiro vrednosti določenih parametrov konstrukcije, kot so: vrsta in kakovosti vlaken, kakovost preje, finost preje, gostota niti po osnovi in votku, vezava ipd. Ker nas zanima kakovost gotove tkanine, lahko na nekatere fizikalno-mehanske lastnosti tkanin vplivamo tudi z oplemenitenjem.

Podrobneje so raziskane samo nekatere fizikalno-mehanske lastnosti tkanin. To velja, na primer, za trgalno trdnost in odpornost proti nadaljnjemu trganju pri tkaninah, izdelanih v vezavi platno. Na področju vpliva konstrukcije tkanin na njihove fizikalno-mehanske lastnosti pa je še veliko neraziskanega.

18.4.2.1 Trgalna trdnost

Trgalna trdnost tkanine je odvisna od trgalne trdnosti niti osnove in votka, smeri delovanja obremenitve glede na os niti in števila niti na enoto dolžine ali širine tkanine. Ti parametri ne zadostujejo, saj niti osnove in votka ne ležijo prosto v tkanini, temveč so med seboj prepletene. Ko obremenjujemo enega od sistemov niti (osnovo ali votek), se te deformirajo oziroma raztegujejo toliko časa, dokler obremenitev ne doseže trgalne vrednosti. Če so, na primer, obremenjene niti osnove, niti votka zavirajo deformiranje niti osnove zaradi koeficienta trenja med nitmi obeh sistemov in normalne sile, ki niti votka tiščijo ob niti osnove. In obratno, kot je prikazano na sliki 18.6. Zaradi tega se pojavi torna sila, ki se upira deformaciji niti. Če to upoštevamo, lahko zapišemo [6]

$$P_1 = (P_o + f_1)\eta \cos \beta_1, \tag{18.31}$$

$$P_2 = (P_v + f_2)\eta \cos \beta_2, \tag{18.32}$$

pri čemer so P_o trgalna trdnost ene osnovne niti, P_v trgalna trdnost ene votkove niti, f_1 torna sila, ki deluje na nit osnove, zmanjšana za vrednost medsebojnega drsenja vlaken v osnovni niti, η koeficient, ki upošteva neenakomerno obremenitev niti ($\eta = 0,85$), β_1 kot med osjo osnovne niti in smeri delovanja sile na osnovno nit, P_1 trgalna trdnost ene osnovne niti v tkanini, P_2 trgalna trdnost ene votkove niti v tkanini, f_2 torna sila, ki deluje na nit votka, zmanjšana za vrednost medsebojnega drsenja vlaken v votkovi niti in β_2 kot med osjo votkove niti in smeri delovanja sile na votkovo nit.

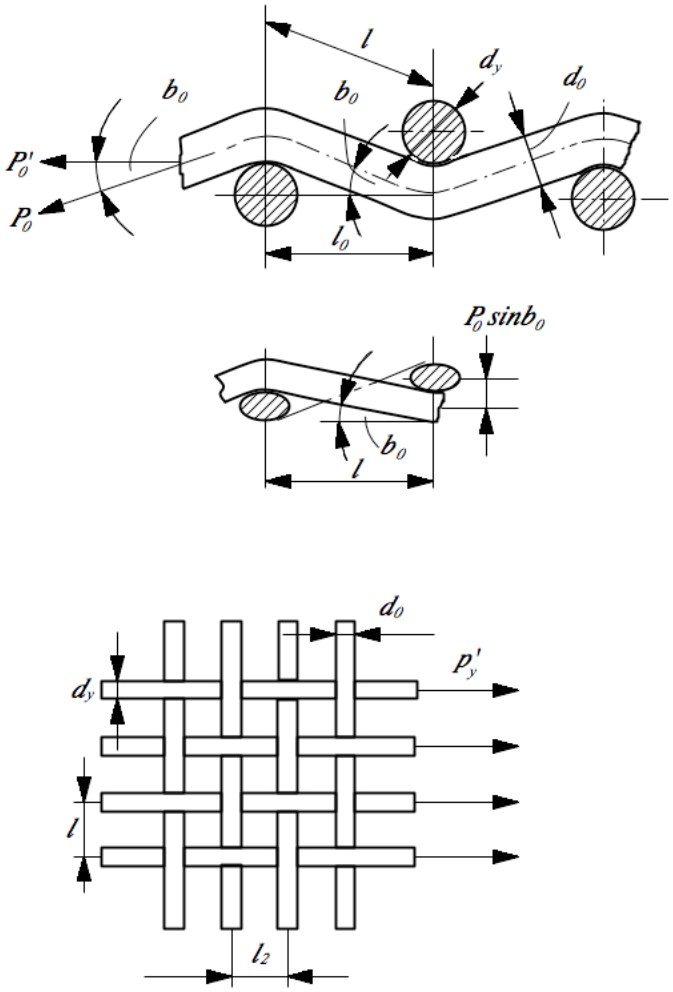
Torna sila f ni enaka produktu normalne sile, katere maksimalna vrednost je enaka trgalni trdnosti, in tornega koeficienta. Upoštevati moramo še gostoto niti, kot objema med nitmi, torno površino, ki je odvisna od finosti preje, deformacijo niti obeh sistemov ipd. Torna sila bo torej največja pri vezavi platno. Ker je zelo težko upoštevati vpliv vseh naštetih parametrov na vrednost torne sile, lahko izrazimo vse vplive na spremembo trgalne trdnosti niti v tkanini s koeficientom k_1 (oziroma k_2).

$$Q_1 = k_1 S_1 P_1, \tag{18.33}$$

$$Q_2 = k_2 S_2 P_2, \tag{18.34}$$

pri čemer so: Q_1 trgalna trdnost tkanine v smeri osnove, S_1 gostota niti osnove na širini preizkušenega vzorca, P_1 trgalna trdnost proste niti osnove, ki ni zatkana v tkanino, Q_2 trgalna trdnost tkanine v smeri votka, S_2 gostota niti votka na širini preizkušenega vzorca, P_2 trgalna trdnost proste niti votka, ki ni zatkana v tkanino.

Za uporabnost tkanine pa ni pomembna samo trgalna trdnost, temveč tudi potek spremembe trdnosti v odvisnosti od raztezka. Niti v tkanini niso izravnane. Dokler se ne izravnajo v smeri delovanja sile, kaže tkanina precej manjšo vrednost sile pri določenem raztezku, kot bi to pričakovali glede na trdnost niti, ki so v tkanini pod vplivom sile. Torne sile med nitmi osnove in votka nimajo bistvenega vpliva na odpor tkanine proti deformaciji, vse dokler se ne izravna sistem niti, ki prenašajo obremenitev. Torne sile ni, dokler se ne pojavi drsenje med nitmi osnove in votka. Kadar imamo opravka s predeno prejo, je drsenje lahko zanemarljivo.



Slika 18.6: Shema delovanja sil na niti osnove in votka pri obremenitvi in raztegu tkanine.

18.4.2.2 Raztezek pri pretrgu

Raztezek je predvsem funkcija vrste in strukture vlaken. Tako imajo, na primer, zelo orientirana in kristalizirana aramidna vlakna (aromatski poliamidi) zelo majhno vrednost raztezka pri pretrgu, in sicer komaj nekaj odstotkov. Pri kemičnih vlaknih pa je ta vrednost lahko tudi več kot 30 %. Raztezek, ki ga izmerimo pri pretrgu tkanine, je večji kot raztezek proste niti. Razlika nastane zaradi vtkanja niti. To lahko izrazimo z naslednjo enačbo

$$e = e'' + c, \tag{18.35}$$

pri kateri so e raztezek pri pretrgu tkanine, e'' raztezek pri pretrgu proste (izolirane) niti, c vtkanje.

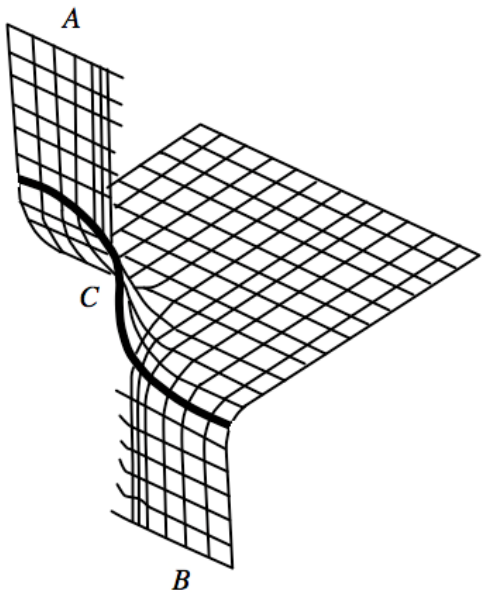
Enačba (18.35) ni uporabna, saj pri merjenju trgalne trdnosti in raztezka pri pretrgu niti ne moremo popolnoma raztegniti. To pa zaradi neenakomerne porazdelitve raztezka po vsej dolžini preizkušenega vzorca. Vzorec se najbolj raztegne na polovici dolžine (na enaki oddaljenosti od obeh prižem). Proti prižemam se raztezek zmanjšuje in je praviloma v neposredni bližini prižem komaj opazen. Ta neenakomernost raztezka

se povečuje s povečanjem gostote osnove in votka ter s povečanjem števila prehodov niti z ene na drugo stran tkanine. Zato je raztezek najbolj neenakomeren pri vezavi platno.

18.4.2.3 Nadaljnje trganje

Trgalne trdnosti v laboratoriju ne moremo ugotavljati pod enakimi pogoji, kot so le-ti v procesu uporabe, in sicer predvsem zaradi premajhne širine preizkušenega vzorca (maksimalno do 10 cm). Laboratorijska simulacija nadaljnjega trganja pa popolnoma ustreza pogojem uporabe. Poleg tega je nadaljnje trganje bolj pogost pojav kot pretrg in je zaradi tega pomembno, da se z njim podrobno seznanimo.

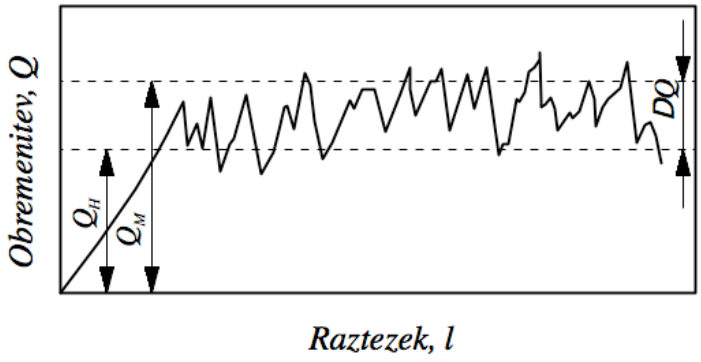
Proces nadaljnjega trganja je prikazan na sliki 18.7. Če so v prižeme v točkah A in B vpeti konci osnovnih niti, odpornost proti nadaljnjemu trganju zagotavljajo votkove niti. Delno sodelujejo v tem procesu tudi niti osnove, vendar predvsem v ozki coni trganja tkanine. Če v procesu nadaljnjega trganja prenaša obremenitev n votkovih niti v smeri nadaljnjega trganja, $n + 1$ votkova nit še ne sodeluje pri prenašanju obremenitve. Ko se pretrga prva votkova nit, obremenitev v tkanini nekoliko popusti, nato spet naraste na maksimalno vrednost. V tem trenutku se del obremenitve prenese tudi na $n + 1$ votek. Nihanje obremenitve v procesu nadaljnjega trganja je prikazano na sliki 18.8 [7].



Slika 18.7: Shema lege preizkušenega vzorca v procesu nadaljnjega trganja.

Odpor proti nadaljnjemu trganju je odvisen od trgalne trdnosti posamezne niti v opazovanem sistemu (osnova ali votek), gostote niti na enoto dolžine, "vpetosti" niti v drugi sistem niti ipd. Očitno je, da bo odpor niti tem večji, čim večji je odpor vsake posamezne niti, ki v procesu nadaljnjega trganja sodeluje v prenašanju obremenitve. Ker se obremenitev razprostira do določene globine preizkušenega vzorca, bo na opazovani globini več niti pri večji gostoti niti na enoto dolžine, kar ima za posledico večji odpor proti nadaljnjemu trganju.

Vpetost niti merimo s silo, s katero se nit pri izvlečenju iz tkanine upira. Ta sila je odvisna predvsem od vezave. Čim več je veznih točk, tem bolj je nit vpeta v tkanino. Tako so niti v tkanini, ki je stkana v vezavi platno, bolj vpete, kot v tkanini, ki je stkana v osemveznem atlasu. Poleg tega je pomembna tudi kakovost površine niti oziroma



Slika 18.8: Potek diagrama obremenitev – raztezek v procesu nadaljnjega trganja.

vrednost tornega koeficienta. Čim večja je vrednost tornega koeficienta, tem bolj vpeta bo nit. Pri tej analizi ne smemo prezreti raztezka niti pri pretrgu.

Večji raztezek omogoča porazdelitev obremenitve na večjo globino in tudi na večjo površino, kar pomeni, da obremenitev prenaša večje število niti enega ali drugega sistema. Takšna porazdelitev daje večji odpor tkanine proti nadaljnjemu trganju.

Zaradi omenjenih vplivov moramo biti zelo previdni pri kaširanju tkanin. Plast, ki jo nanesemo na tkanino, največkrat poveča upor proti upogibu in poveča medsebojno vpetost niti obeh sistemov. Sama nanesena plast je pogosto premalo elastična. Vse to ima za posledico zmanjšanje odpora tkanine proti nadaljnjemu trganju, ki je pogosto zelo intenzivno.

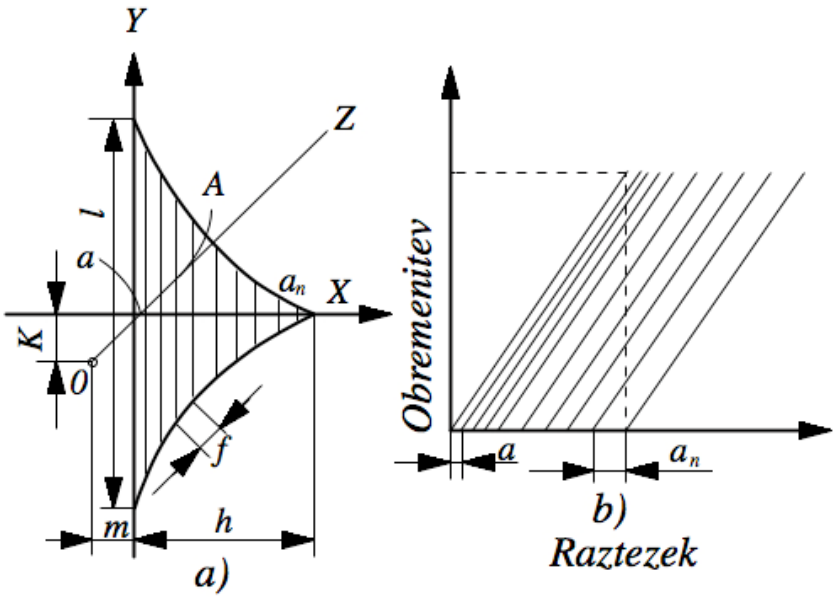
Analiza odpora tkanin proti nadaljnjemu trganju sloni na trikotniku deformacije, slika 18.9, ki se oblikuje v procesu nadaljnjega trganja [7]. Zgornji del trikotnika deformacije, slika 18.9a, je omejen z enakostranično hiperbolo z osjo simetrije in asimptotama, ki sta paralelni koordinatnima osema na razdalji k od x-osi in na razdalji m od y-osi. Če je A razdalja od točke Q do krivulje vzdolž osi simetrije, lahko izrazimo hiperbolo z naslednjo enačbo

$$y = \frac{A^2}{2(x+m)} - k. \tag{18.36}$$

Na sliki 18.9a pomenijo navpične paralelne črte lego niti osnove ali votka v trikotniku deformacije. Razdalja med nitmi je označena z a do a_n. Očitno je, da se razdalje od a proti a_n povečujejo. Razdalja a je približno enaka dejanski razdalji niti v nedeformirani tkanini. Na sliki 18.9b pa je prikazana obremenitev niti. Na prvo nit deluje obremenitev, ki to nit pretrga (vodoravno pretrgana črta). Nit $n+1$, ki je na razdalji a_n od niti n, je v legi, ko bo sprejela obremenitev (navpična pretrgana črta). Niti 1 do n sodelujejo pri prenašanju obremenitve v procesu nadaljnjega trganja, slika 18.9b. Kot kaže slika 18.9b, je prva nit raztegnjena na dolžino, ki je enaka vsoti razdalj a do a_n. Ta raztezek je obenem enak raztezku pri trganju niti. Dejansko velja ta zakonitost le v Hookovem področju deformacij, v katerem je raztezek sorazmeren obremenitvi. Faktor sorazmernosti pa je modul elastičnosti. Pri nadaljnji deformaciji pridemo iz Hookovega področja in omenjena sorazmernost ne velja več. Če predpostavimo, da je raztezek sorazmeren z obremenitvijo, velja

$$P = Ee \quad ; \quad Q = P + \frac{1}{2}(n-1)P, \tag{18.37}$$

kjer so P obremenitev, E modul elastičnosti, e raztezek n število niti, ki so izpostavljene obremenitvi, Q odpor tkanine proti nadaljnjemu trganju.



Slika 18.9: Proces nadaljnjega trganja tkanine. Legenda: a – oblika trikotnika deformacije, b – obremenitev niti proti nadaljnjem trganju.

Očitno je, da obremenitev P pomeni trgalno trdnost na eno nit, faktor 1/2 v enačbi (18.37) pa pomeni dejstvo, da je vseh n niti, razen prve, v povprečju obremenjenih s polovico vrednosti trgalne trdnosti.

Deformacijo tkanine v procesu nadaljnjega trganja lahko obravnavamo tudi nekoliko drugače. Osnovni parametri so prikazani na sliki 18.9 [8]. Predpostavimo, da deluje sila P v smeri osnove. Zaradi delovanja te sile se tvori trikotnik deformacije s stranico l.

Obremenitev zunanje A niti trikotnika deformacije bo sorazmerna velikosti sile trenja F_2.

$$F_2 = \mu P_1 S_1 d_2 \cos\beta_1, \tag{18.38}$$

pri čemer so μ koeficient trenja med nitmi, S_1 gostota niti osnove na 1 cm, d_2 pogojni premer niti votka, β_1 kot med osjo niti osnove in smeri delovanja sile P_1.

Premer votka se spreminja z raztezkom po naslednji enačbi

$$d_2 = \frac{KT^{\frac{2}{3}}}{\sqrt{l+e_2}}, \tag{18.39}$$

pri čemer sta T_2 [tex] finost votka, e_2 raztezek votka pri pretrgu. Hkrati se poveča dolžina te niti za $l + e_2$. Če je P_1 sorazmerna sili P_2, bo sila trenja na enoto dolžine votkove niti enaka

$$F_2 = \frac{\mu k P_2 S_1 T^{\frac{2}{3}} \cos\beta_1}{(l+e_2)^{\frac{2}{3}}}. \tag{18.40}$$

Sedaj lahko odpornost votka proti nadaljnjemu trganju izrazimo z vsoto obremenitev prečnih (votkovih) niti, podobno kot v enačbi (18.37)

$$Q_2 = \left(l + \frac{1}{2}n\right) P_2 \cos\beta_2. \tag{18.41}$$

Število niti votka n, ki se nahajajo v trikotniku deformacije, lahko izračunamo iz razmerja med obremenitvijo, ki povzroči nadaljnje trganje votkove niti v tkanini, in silo trenja, ki se nanaša na enoto dolžine votka

$$n = \frac{P\cos\beta_2}{F_2} = \frac{kP_2\cos\beta_2(l+e_2)^{\frac{3}{2}}}{P_2T_2^{\frac{2}{3}}S_1\cos\beta_1}. \tag{18.42}$$

Če upoštevamo enačbi (18.40) in (18.41), lahko izrazimo koeficient odpora proti nadaljnjemu trganju tkanine po votku K_2 z naslednjo enačbo

$$K_2 = l + \frac{k_1(l+e_2)^{\frac{3}{2}}\cos^2\beta_1}{T_2^{\frac{2}{3}}S_2\cos\beta_2}. \tag{18.43}$$

Analogna enačba za koeficient upora tkanine po osnovi je sledeča

$$K_1 = l + \frac{k_1(l+e_1)^{\frac{3}{2}}\cos^2\beta_1}{T_1^{\frac{2}{3}}S_1\cos\beta_1}. \tag{18.44}$$

Torni koeficient μ za bombažno prejo je 0,24. Volnena preja ima večjo vrednost, multifilamentna preja pa manjšo vrednost tornega koeficienta kot bombažna preja. Za bombažno prejo je izračunana vrednost koeficienta proporcionalnosti $k_1 = 1,7 \times 103$ in $k_2 = 1,5 \times 103$. Izračunane vrednosti na podlagi enačb (18.43) in (18.44) odstopajo od eksperimentalnih za od 10 % do 20 % [8]. To pomeni še sprejemljivo natančnost.

Koeficienta odpora K_1 in K_2 sta brezdimenzionalni količini in sta definirana kot razmerje med odporom tkanine proti nadaljnjemu trganju in trgalno trdnostjo niti v tkanini (pri čemer je $l/\cos\beta = l$). Razlika vrednosti l je upoštevana v vrednosti koeficientov k_1 in k_2.

$$K_1 = \frac{Q_1}{P_1} \quad ; \quad K_2 = \frac{Q_2}{P_2} \tag{18.45}$$

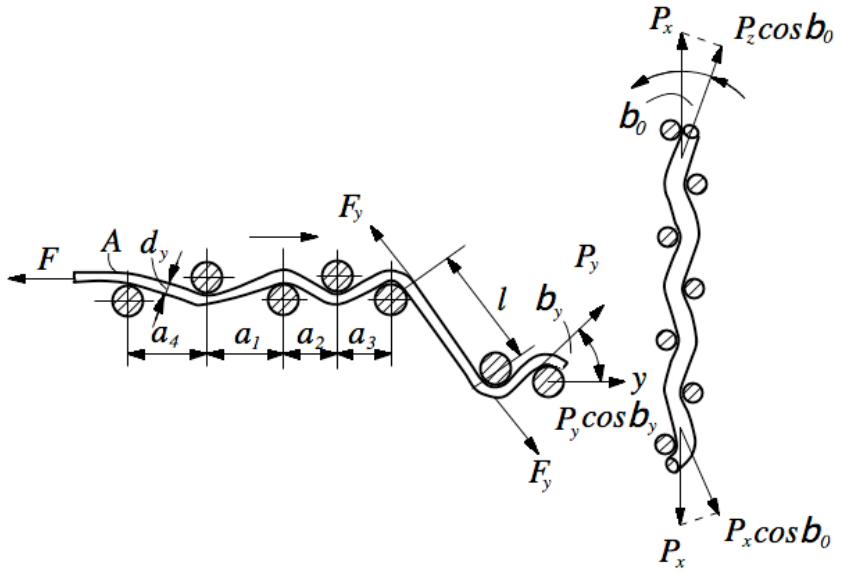
Shemo delovanja sil na niti osnove in votka pri metodi preizkušanja odpora tkanine proti nadaljnjemu trganju prikazuje slika 18.10.

18.5 Konstrukcija pletenin

Pletenina je ploski tekstilni izdelek, tako kot tkanina, le da ima drugačne lastnosti. Predvsem ima bolj rahlo strukturo in manjšo dimenzijsko dimenzijo. Proizvajajo se tudi pletenine z dokaj stabilnimi dimenzijami. V tem primeru je v pletenine vgrajen dodatni sistem niti, ki povečuje stabilnost pletenine. Ta sistem je podložena ali pa votkova nit. S tem povečamo stabilnost pletenine po širini. Pletenino lahko precej stabiliziramo tudi s pomočjo kombiniranih pletilskih vezav. Skratka, pletenine lahko razdelimo na enostavne votkove in snutkovine ter kombinirane pletenine, ki so lahko zelo kompleksno izdelane tako glede vezave kot sistemov niti in oblike zank.

Pri pleteninah nas zanimajo predvsem geometrija pletenine in fizikalno-mehanske lastnosti. Fizikalno-mehanske lastnosti pletenine so posledica tako fizikalno-mehanskih lastnosti preje kot tudi geometrije pletenine. Zaradi tega bomo geometrijo pletenin obravnavali posebej.

Pletenine precej izpodrivajo tkanine. To velja predvsem za nekatere dele oblačil. Spodnje perilo je praktično v celoti izdelano iz pletenin. Tudi srajce in ženske obleke



Slika 18.10: Shema delovanja sil na niti osnove in votka pri metodi preizkušanja odpora tkanine proti nadaljnjemu trganju.

so vse pogosteje izdelane iz pletenin. Puloverji in nogavice so že od nekdaj domena pletenin. Videti je, da pletenine pridobivajo na veljavi. To pa predvsem zaradi cenejše izdelave v primerjavi s tkaninami, večje prilagodljivosti, večje voluminoznosti in zaradi tega boljše toplotne izolacije. Področje uporabe pletenin se širi predvsem zaradi možnosti izdelave pletenin, katerih stabilnost oblike se bistveno ne razlikuje od stabilnosti tkanin, oziroma stabilnost zadovoljuje večino pogojev pri uporabi predmeta, izdelanega iz pletenine.

18.5.1 Geometrija pletenin

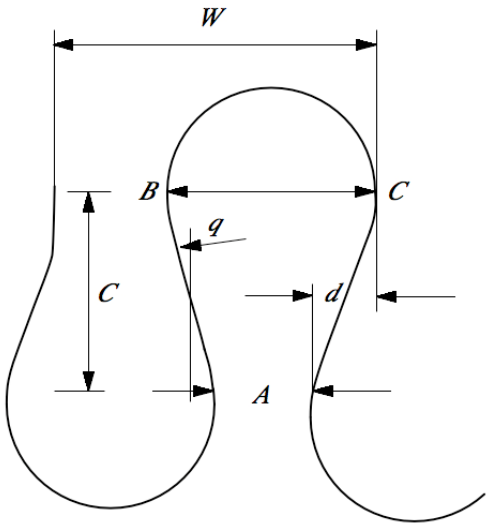
Pod geometrijo pletenin razumemo obliko in lego ter dolžino zank v pletenini, od katerih so v veliki meri odvisne fizikalno-mehanske lastnosti in tudi uporabnost pletenin. Dolžino zanke izračunamo na podlagi njene oblike, in sicer pod predpostavko, da leži v ravnini. Zanka dejansko leži v prostoru, kar zelo otežuje izračun njene dolžine kot osnovnega parametra za oceno porabe preje na enoto površine pletenine.

Pri oblikovanju zanke moramo upogniti prejo. Pri tem se pojavijo določene napetosti, ki spreminjajo obliko zanke. Zaradi tega se surova pletenina viha. Temu se izognemo z dodelavo pletenine tako, da izničimo ali zelo zmanjšamo notranje napetosti v zanki. Za izračun parametrov zanke lahko uporabimo model, prikazan na sliki 18.11. S črto je prikazana le srednica preje, iz katere je izoblikovana zanka. V točkah A, B in C delujejo rezultante sil, ki omogočajo prikazano obliko zanke. S c je označena navpična razdalja med točkama A in B; w je širina zanke in d premer preje.

Na širini w ima celotna zanka dva enaka kraka l_1 (med A in B) in tudi dva enaka loka l_2 (med B in C). Celotno dolžino zanke l lahko izrazimo z naslednjo enačbo

$$l = 2l_1 + 2l_2 \quad ; \quad l_1 = c(l + o) \quad ; \quad l_2 = \pi r \tag{18.46}$$

kje je o povečan delež dolžine c zaradi lege dela niti v zanki na dolžini c, r polmer loka BC. Oblika dela zanke med A in B je identična obliki lege niti na sliki 18.5. Zaradi tega

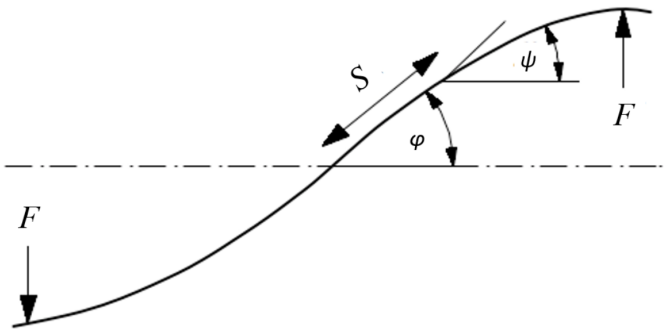


Slika 18.11: Mundenov model zanke. [9]

lahko postavimo naslednje relacije

$$\frac{d}{c} = \frac{h}{p} = \frac{4}{3}\sqrt{o} \quad ; \quad l_1 = c\left[l + \frac{9}{16}\left(\frac{d}{c}\right)^2\right]. \tag{18.47}$$

Pri določanju polmera r loka BC, moramo upoštevati upogibni moment preje. Na sliki 18.12 so prikazani parametri, ki se pojavijo pri upogibanju elastične niti.



Slika 18.12: Delovanje reakcijskih sil F na upognjeno nit.

Upogibni moment v poljubni točki niti je Fx. Zveza med polmerom r, upogibnim modulom E in upogibnim momentom je podana z naslednjo enačbo

$$Fx = \frac{E}{r}. \tag{18.48}$$

Če upoštevamo sliko 18.12 in enačbo (18.48), lahko napišemo

$$r\mathrm{d}\psi = \mathrm{d}s \quad ; \quad \mathrm{d}x = \cos\psi \mathrm{d}s, \tag{18.49}$$

$$E\cos\psi\mathrm{d}\psi = -Fx\mathrm{d}x. \tag{18.50}$$

Ker je $x = 0$, če je $r = 0$ z integracijo enačbe (18.50) dobimo

$$\frac{1}{2}Fx^2 = E(\sin\varphi - \cos\psi). \tag{18.51}$$

Z enačbo (18.51) je podana velikost potrebne sile za tvorjenje loka. Ko je $x = 0,5c$, $\psi = 0$, dobi enačba (18.51) naslednjo obliko:

$$F = \frac{8E\sin\varphi}{c^2} \quad ; \quad \sin\varphi = \frac{3}{4}\frac{106\pi d}{180c}. \tag{18.52}$$

Ukrivljenost $1/r$ je podana z naslednjo enačbo

$$\frac{1}{r} = \frac{fc}{2E}. \tag{18.53}$$

Če upoštevamo enačbi (18.52) in (18.53), je $l_2 = 0,544c_2/d$ in lahko celotno dolžino zanke l izrazimo z naslednjo enačbo

$$\frac{l}{c} = 1,088\frac{c}{d} + 1 + \frac{9}{16}\left(\frac{d}{c}\right)^2. \tag{18.54}$$

Očitno je, glej sliko 18.11, da lahko razdaljo w med zankama definiramo z naslednjo enačbo

$$w = 2r + (2r - d). \tag{18.55}$$

Za razmerje w/c pa velja naslednja enačba:

$$\frac{w}{c} = 0,72\frac{c}{d} - 2\frac{d}{c}. \tag{18.56}$$

Kot pri tkaninah poznamo tudi pri pleteninah faktor kritja. Premer niti je sorazmeren $\sqrt{\text{tex}}$ in razmerje d/l lahko nadomestimo s $\sqrt{\text{tex}}/l$, ki nam pri pleteninah daje faktor kritja. To je le nominalni faktor kritja, ker je premer niti tudi funkcija gostote pletenine.

Brezdimenzijska parametra c/l in w/l nista odvisna od nominalnega faktorja kritja, medtem ko so razmerja l^2/cw, l/c in l/w odvisna od tipa relaksacije pletenine, kar pomeni stabilizacijo pletenine v suhem ali mokrem stanju. To je pomembno predvsem za volnene pletenine, pri katerih se v mokrem stanju izrazito spremenijo fizikalno-mehanske lastnosti.

Enačbe (18.46) do (18.56) kažejo, da so geometrijski parametri zanke definirani precej zapleteno. Zato je težko slediti medsebojni odvisnosti omenjenih parametrov zanke. Zaradi tega smo v preglednici 18.2 prikazali nekaj vrednosti omenjenih brezdimenzijskih parametrov pri različnih vrednostih kota.

Kot vidimo iz enačbe (18.53), je $\sin\varphi$ sorazmeren s premerom niti d in obratno sorazmeren s parametrom c. V primeru, da je npr. dolžina zanke 99-krat večja od premera niti, je absolutna vrednost upogibnega modula relativno majhna. Zaradi tega je kot φ majhen, v našem primeru le 10 stopinj, parameter c pa je 5,8-krat manjši od širine zanke. Ko pa se razmerje dolžine zanke in premera niti l/d zmanjša na 9,4, se poveča vrednost kota na 40°, vrednost odnosa w/c pa se zmanjša, glej enačbo (18.56). Zmanjša se tudi vrednost l/c in to predvsem zaradi povečanja vrednosti parametra d. Zaradi relativnega zmanjšanja vrednosti w se poveča tudi vrednost razmerja l/w, glej enačbo (18.55). Zanimivo je razmerje l^2/cw, ki se s spreminjanjem vrednosti kota bistveno ne spreminja in je funkcija oblike zanke ter razmerja l/d.

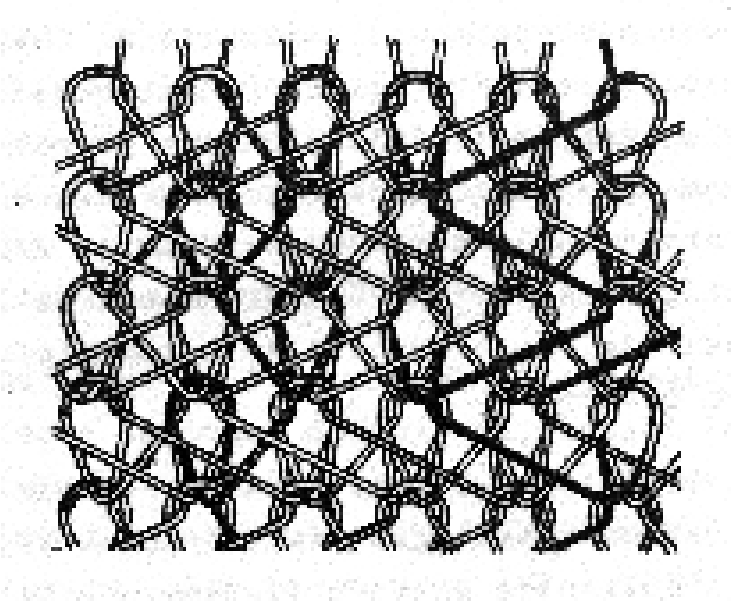
Preglednica 18.2: Medsebojna odvisnost vrednosti brezdimenzijskih parametrov zanke pri različnih kotih.

	Kot φ [°]			
Parameter	10	20	30	40
l/d	88,0	28,0	14,4	9,4
l^2/cw	22,2	16,6	17,1	21,7
l/c	11,30	6,74	5,31	4,80
l/w	1,94	2,40	3,18	4,42
w/c	5,80	2,73	1,64	1,07

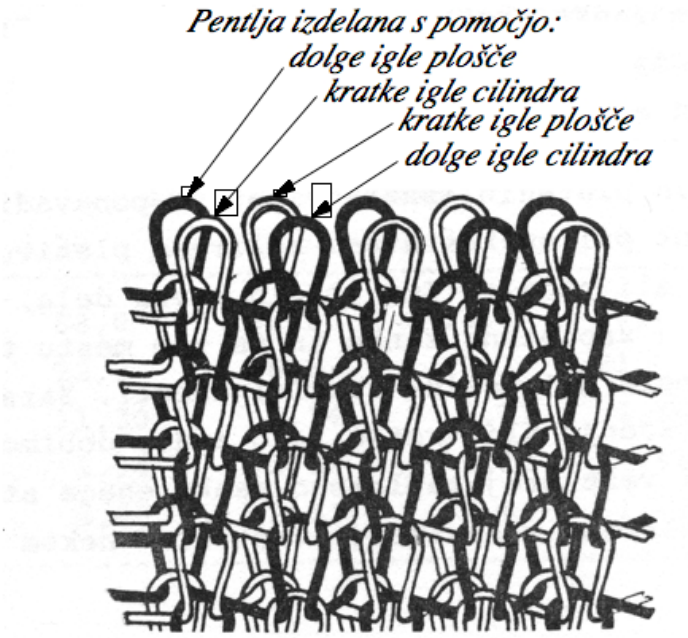
Rezultati v preglednici 18.2 in enačbe od (18.46) do (18.56) dovolj jasno ilustrirajo velike težave pri analizi geometrije zanke najbolj enostavnega kulirnega pletiva (votkovine) in to v primeru, ko jo analiziramo le v ravnini. Zanka dejansko ne leži v ravnini, temveč v prostoru. Zato je analiza geometrije zanke veliko bolj zapletena, kot smo jo prikazali. Prostorska lega zank je še bolj izrazita pri robkovnem kulirnem blagu, ki ima eno levo in eno desno zanko.

Geometrija osnovnih pletenin (snutkovine) je ponavadi še bolj kompleksna kot pri enostavnem kulirnem pletivu. Zanka ima obliko balona ali padala; ima lok in ravna dela, ki se križata v loku prej zapletene zanke in na tem mestu tvorita loke majhnega polmera ali velike zakrivljenosti. Zaradi polaganja niti na sosednjo ali tretjo iglo ipd., dobimo premočrtni del niti, ki veže prej zapleteno zanko enega stolpca z zanko, ki bo zapletena v naslednji vrstici v nekem drugem stolpcu.

V primeru interlock pletenine pa se pojavi izrazita tridimenzionalna struktura, katere geometrijo je zelo težko interpretirati. Primer strukture osnovne pletenine (triko) je prikazan na sliki 18.13, primer strukture interlock pletenine je prikazana na sliki 18.14.



Slika 18.13: Shematski prikaz strukture osnovne triko pletenine.



Slika 18.14: Shematski prikaz strukture interlock pletenine.

18.5.2 Fizikalno-mehanske lastnosti pletenin

Fizikalno-mehanske lastnosti pletenin obravnavamo podobno fizikalno-mehanskim lastnostim tkanin; vendar je tudi precej razlik. Namesto gostote po votku in osnovi upoštevamo vertikalno in horizontalno gostoto zank ali število vrstic in število stolpcev. Pri bolj zapletenih strukturah upoštevamo število zank na enoto površine. Ker je dolžina zank pa tudi finost preje v posameznem sistemu lahko različna; lahko uporabimo ponderirane dolžine zanke in finosti preje.

Včasih je v pletenini podložena nit kot sistem votka, ki tvori v veznih točkah le pentlje. Takšen sistem moramo posebej upoštevati pri računanju porabe materiala oziroma maso m^2 pletenine.

18.5.2.1 Masa pletenine

Maso pletenine, podobno kot pri tkanini, definiramo kot maso na enoto površine, g/m^2. Če je D_h število stolpcev na enoto širine, D_v število zank v stolpcu na enoto dolžine pletiva, l dolžina zanke in T_t finost preje v tex-ih ter C konverzijska konstanta mer, lahko maso m [g/m^2] izračunamo z naslednjo enačbo

$$m = CD_vD_hlT_t. \tag{18.57}$$

Enačbo (18.57) lahko uporabimo za izračun mase poljubne vrste pletiva pod pogojem, da D_v, D_h, l in T_t predstavljajo povprečne vrednosti. Sliki 18.13 in 18.14, kažeta, da je izračun mase pletenine pri takšnih vezavah precej zapleten in to predvsem zaradi težav pri ugotavljanju dolžine zanke. Že v triko pletenini, prikazani na sliki 18.13, so različni tipi zank glede na njihove sestavne dele. Zaradi tega je tudi dolžina različnih tipov zank različna. Poseben problem je izračun dolžine zanke, če ta leži v prostoru, kot je prikazano na sliki 18.14. Poleg tega ima lahko pletenina podloženo nit, ki je običajno bolj groba kot niti, ki tvorijo zanke na površini pletenine. Med dvema pentljama je

podložena nit bolj ali manj povešena. V takšnem primeru bomo pač posebej izračunali maso podložene niti na enoto površine in to maso prišteli k masi osnovne pletenine.

Pri pleteninah, ki imajo več sistemov niti, zank in pentelj, se v praksi pogosto poslužimo z empirijo. To pa predvsem v primerih, ko konstruiramo novo strukturo pletenine in moramo čim bolj natančno predvideti porabo materiala in hitrost izdelave, da bi lahko določili proizvodno ceno. Poleg tega moramo realno predpostaviti vrednosti najpomembnejših fizikalno-mehanskih lastnosti, da bi ugotovili, ali je bodoči izdelek primeren za predvideno uporabo in ali tudi cena izdelave ustreza.

18.5.2.2 Trgalna trdnost in raztezek

Pletenine so lahko izdelane v enostavnih enofonturnih kulirnih (votkovina) ali osnovnih (snutkovina) vezavah. Celo pri teh glede strukture najbolj enostavnih pletivih je težko vnaprej teoretično predvideti trdnost in raztezek pletenine.

Pri strukturno bolj zapletenih pleteninah je problem še večji. Pri biaksialnih tkaninah, v katerih imamo le dva med seboj pravokotno ležeča sistema niti, je teoretično obravnavanje trgalne trdnosti in raztezka precej zahtevno, enačbe od (18.33) do (18.44). Struktura pletenin za razliko od strukture tkanin ne omogoča preizkušanja trdnosti in raztezka, ker bi se pojavile anomalije ob obeh robovih preizkušanca, tako da bi bile izmerjene vrednosti trgalne trdnosti manjše in raztezek večji, kot bi bile te vrednosti pri preizkušancu, ki bi imel robova podobna robovom tkanine, izdelane na konvencionalnih statvah.

Z metodama preizkušanja fizikalno-mehanskih lastnosti naj bi simulirali pogoje, ki se pojavijo pri uporabi določenega tekstilnega izdelka. Pogosto je to zelo težko ali pa z metodo ni mogoče zajeti vseh možnih primerov. Zaradi tega so metode preizkušanja dogovorjene na državnih (na primer DIN standardi), evropskih (CE standardi) ali svetovnih (ISO standardi) ravneh. Za razliko od tkanin preizkušamo pri pleteninah trdnost hkrati v dveh smereh, in sicer vzdolž vrst (prečno na pletenino) in vzdolž stolpcev (vzdolž pletenine), kar pomeni tudi dve vrednosti trgalnega raztezka.

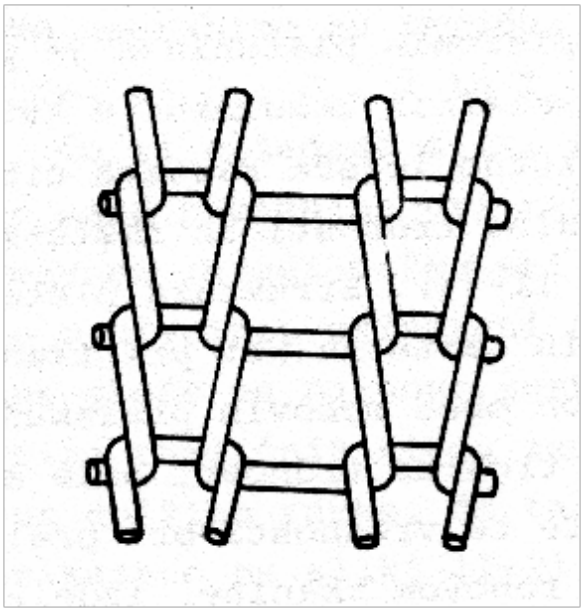
Na sliki 18.15 je prikazana enostavna kulirna pletenina. Detajl je prikazan na sliki 20-16 pod biaksialno obremenitvijo. Na njem so prikazane sile, s katerimi so obremenjeni konci niti. Poleg sil so prikazani tudi koti, pod katerimi sile delujejo, kot tudi oddaljenost prijemališča sil od centra križanja niti v pentlje.

V biaksialnem modelu, sliki 18.15 in 18.16, predpostavimo, da lahko pri velikih biaksialnih obremenitvah zanemarimo notranjo energijo, ki se pojavi zaradi zavijanja niti v pentlji. Zaradi tega lahko predpostavimo, da niti sledijo premici, razen v pentlji, slika 18.16, pri kateri niti tvorijo lok s centrom v točki 9, slika 18.16.

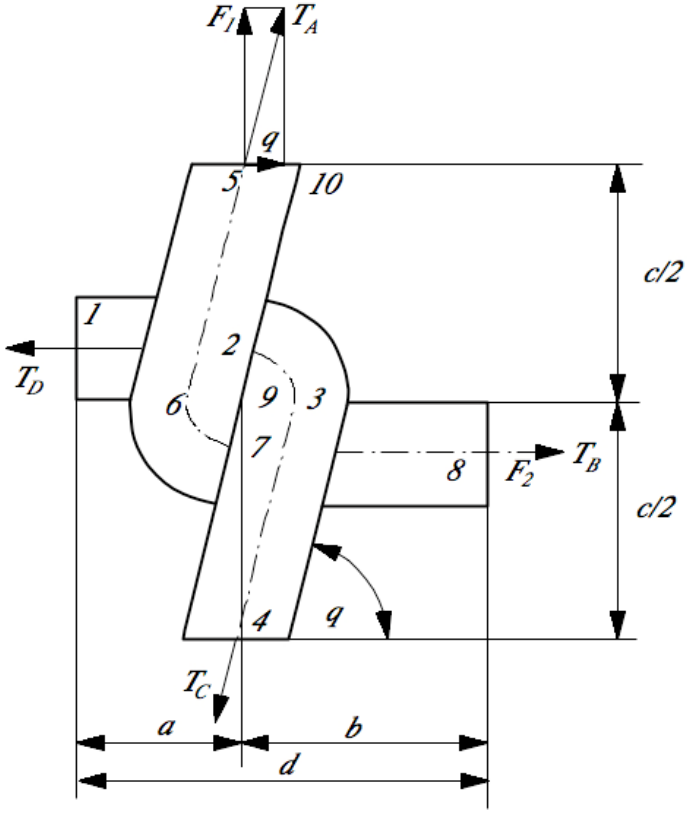
Sile, ki delujejo na niti, slika 18.16, lahko prikažemo v vektorski obliki. Tudi ni težko najti razmerja med obremenitvijo in geometrijo pentlje. Vrednosti nekaterih geometrijskih parametrov se ne spreminjajo celo takrat, ko se oblika pentelj spremeni zaradi spremembe razmerja biaksialnih obremenitev. Smotrno je uporabiti brezdimenzijske parametre, ki jih bomo vpeljali v naslednjih enačbah. Če je l dolžina niti v zanki, c razdalja med sosednjima vrsticama (višina zanke), w razdalja med sosednjima stolpcema (širina zanke) in d premer niti, potem lahko zapišemo

$$c' = \frac{c}{l - \frac{d}{2}}, \tag{18.58}$$

$$w' = \frac{w}{l - \frac{d}{2}}, \tag{18.59}$$



Slika 18.15: Model gladkega kulirnega pletiva pri delovanju biaksialne obremenitve. [2]



Slika 18.16: Pentlje pod biaksialno obremenitvijo.

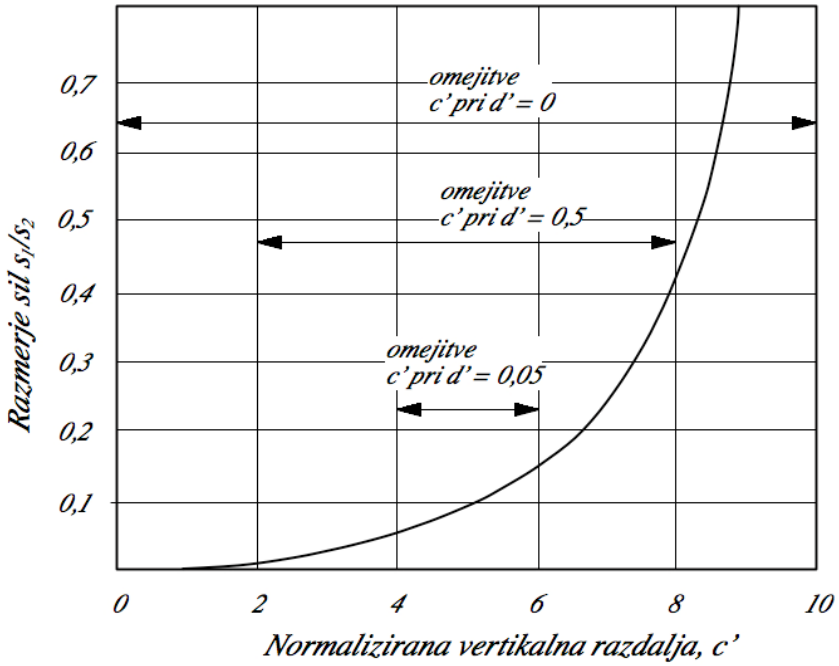
$$d' = \frac{d}{l - \frac{d}{2}}. \tag{18.60}$$

Da se dokazati [10], da je odnos obremenitev približno podan z naslednjo enačbo

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{c'}{l - c'}. \tag{18.61}$$

Krivulja, ki izhaja iz enačbe (18.61), je podana na sliki 18.17. Prikazane so tudi omejitve parametra c' pri d' = 0; 0,05 in 0,5. Sprememba brezdimenzijskega parametra w' v odvisnosti od c' in d' je podana z enačbo (18.62) in je prikazana na sliki 18.18 za primer, ko je d' = 0; 0,025 in 0,05.

$$w' = 1 - \frac{c}{\sqrt{l - \left(\frac{d'}{c'}\right)^2}} \tag{18.62}$$



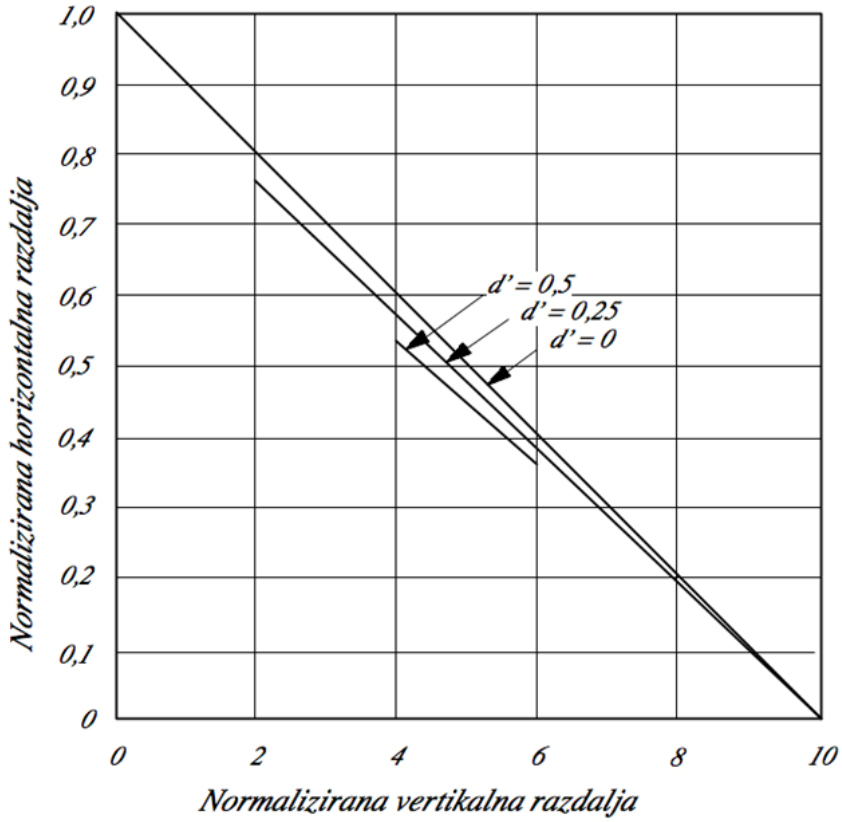
Slika 18.17: Sprememba parametra c' v odvisnosti od spremembe vrednosti razmerja s_1/s_2, enačba (18.61).

V pentlji – križišču niti se pojavi upor medsebojnemu drsenju niti. Razmerje sil v točki križanja lahko izrazimo z enačbo (20.63):

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{c'}{l - c'} e^{\pm \mu \alpha}, \tag{18.63}$$

pri kateri sta μ torni koeficient med površinama niti in α kot medsebojnega objema niti v pentlji (križišču).

Enačbe od (18.58) do (18.63) veljajo za enostavno kulirno pletivo. Sili s_1 in s_2 lahko merimo, parameter c' lahko izračunamo z enačbo (18.61 in w' z enačbo (18.62). Premer



Slika 18.18: Sprememba parametra w' v odvisnosti od spremembe parametra c' in vrednosti parametra d', enačba (18.62).

preje d izračunamo s pomočjo enačbe (18.2). Zelo težko pa je izračunati dolžino zanke l, ker velja enačba (18.46) le za Mundenov model [9], ki sicer precej realno ponazarja lego niti v zanki, slika 18.11). Na sliki 18.16 smo zanemarili notranjo energijo pri biaksialni obremenitvi in je oblika zanke bolj enostavna kot na sliki 18.11. Za izračun te zanke ne moremo uporabiti enačbe (18.46). Enačbe od (18.58) do (18.63) uporabimo kot orodje za študij deformacij kulirnih pletenin v primeru biaksialne obremenitve. Pri robkovni kulirni pletenini se, na primer, zakonitosti kažejo drugače [10] in so dosti bolj zapletene kot pri gladkem kulirnem pletivu.

Biaksialni obremenitvi je podobna obremenitev pri merjenju razpočne trdnosti. Pri tem delno simuliramo deformacije pletenine, ki se pojavijo na kolenih, komolcih in v primeru, ko se pletenina oziroma del pletenega oblačila zatakne za kakšen predmet. Pletenino kot tudi tkanino prebijamo z jekleno kroglico premera 2 cm. Ker je pletenina krožno vpeta v prstan, skozi katerega porinemo kroglico, bo pletenina na površini kroglice izoblikovana v sferično obliko. Pri tem je pletenina obremenjena v vseh smereh in se obremenitev povečuje od obroča proti vrhu sfere do trenutka preboja. Deformacije zank in niti so v tem procesu zelo kompleksne. Teoretično jih je težko opredeliti, ker v procesu sodeluje hkrati veliko število zank, ki se različno deformirajo, odvisno od njihove oddaljenosti od vrha sfere. Eksperimentalno lahko izmerimo krivuljo obremenitev – raztezek, teoretična obdelava krivulje pa je izredno težka celo pri najenostavnejšem gladkem kulirnem pletivu. Ne glede na to dobimo s pomočjo merjenja razpočne trdnosti dragoceno informacijo o fizikalno-mehanskih lastnostih pletenine.

18.6 Vlaknovine

18.6.1 Konstrukcija vlaknovin

V zadnjem času postajajo vlaknovine zelo pomemben tekstilni izdelek, katerih delež se v celotni proizvodnji tekstilij postopoma veča. To povečanje je rezultat cenejše tehnologije izdelave in obsežnih področij uporabe. To se predvsem nanaša na iglane vlaknovine, katerih uporaba se za tehnične namene širi tako glede števila različnih izdelkov in področij uporabe, kot tudi samih količin. Izredno naglo se povečuje tudi uporaba v bivalnih prostorih, predvsem za talne obloge. Uporaba vlaknovin narašča tudi za obloge sten bivalnih in drugih prostorov, ker imajo vlaknovine zelo dobre termoizolacijske lastnosti in izvrstno dušijo zvok. Vlaknovine tako nadomeščajo les.

Vlaknovine izdelujejo predvsem iz kemičnih vlaken. Osnovna surovina za izdelavo kemičnih vlaken je nafta. Zato je njihova prihodnost zelo odvisna od gibanja cen nafte.

18.6.1.1 Polsti

Polsti imajo dolgo zgodovino in to predvsem kot klobučevina. Volnena vlakna imajo to lastnost, da se pod določenimi pogoji (mehanična obdelava v mokrem stanju) polstijo in je mogoče izdelati precej stabilen ploski izdelek – klobučevino ipd. Proces, v katerem nastane vlaknovina iz volnenih vlaken, imenujemo polstenje. Polstenje razlagamo z medsebojnim zagozdenjem luskin sosednjih vlaken. Zaradi načina polstenja je lega vlaken v polsti zelo neurejena – neorientirana. Zaradi tega je mogoče s polstenjem doseči v precejšnji meri izotropno stanje glede fizikalno-mehanskih lastnosti polsti.

Področje uporabe polsti je omejeno predvsem zaradi lastnosti in cene volnenih vlaken. Uporablja se predvsem za izdelavo klobukov, pa tudi za filtre v mokri filtraciji, in sicer najpogosteje v tovarnah papirja. S pojavom relativno cenenih kemičnih vlaken z drugačnimi mehansko-kemičnimi lastnostmi, kot jih ima volna, in z razvojem novih tehnik, predvsem tehnike iglanja za izdelavo vlaknovin, so volnene polsti postale nepomembne.

18.6.1.2 Iglane vlaknovine

Iglane vlaknovine se glede konstrukcije razlikujejo od polstenih vlaknovin. Iglane vlaknovine so izdelane pretežno iz kemičnih vlaken. Tehnologija iglanja je zelo preprosta in učinkovita. Kopreno, ki jo dobimo iz mikalnika, polaga polagalnik po širini bodoče iglane vlaknovine v plasti določene mase na m^2. Igle, ki so pritrjene na iglenico, prebodejo plasti koprene. Pri tem igle povlečejo posamična vlakna oziroma del dolžine vlaken skozi plasti koprene na spodnjo stran, in pri gibanju v nasprotno smer povlečejo del vlaken skozi kopreno od spodaj navzgor. Čim več je takšnih vlaken, tem bolj je vlaknovina povezana. To pomeni, da sta trdnost in gostota koprene odvisni od števila vbodov igel na enoto površine vlaknovine. Pri tem moramo upoštevati tudi dejstvo, da se s povečanjem števila vbodov povečuje tudi število poškodovanih vlaken, ki jih igle prerežejo oziroma pretrgajo. Zaradi tega trdnost vlaknovine narašča s povečanjem števila vbodov, dokler se povečuje število vlaken, ki prečno povezujejo vlakna v vlaknovini. Ko pa število poškodovanih vlaken, ki imajo vezalno vlogo, preseže na novo tvorjene prečne vezi, se začne zmanjševati trdnost vlaknovine. Zaradi tega dejstva ne smemo prekoračiti kritičnega števila vbodov na enoto površine pri dani vlaknovini. Iglamo lahko tudi z dvema iglenicama, kar je bolj učinkovito, kot če iglamo samo z eno.

Za posamezne namene potrebujemo večplastne vlaknovine oziroma različno finost vlaken v posameznih plasteh. To se predvsem nanaša na vlaknovine, namenjene za fil-

tre. Površinska plast sestoji iz finejših vlaken kot nadaljnje plasti. S finejšimi vlakni je mogoče doseči manjši srednji hidravlični premer por in večjo učinkovitost filtracije. Ker so finejša vlakna dražja od bolj grobih, se poceni filtrski medij poceni z vgrajevanjem finejših vlaken samo v zgornjo površinsko plast vlaknovine. Poleg tega se podaljša življenjska doba filtra, ker je lažje čiščenje "usedlin" iz plasti vlaknovine, ki so izdelane iz bolj grobih vlaken in imajo večji srednji premer por. V vlaknovino včasih vgradimo metalna vlakna, da preprečimo kopičenje statične elektrike. Včasih pa površino kaširamo z impregnantom (s smolo), ki ima dovolj veliko poroznost, zmanjša pa silo "lepljenja" prahu na površino filtra.

Vlakna pogosto naiglamo na eni ali obeh straneh tkanine, ki ima relativno majhno gostoto niti po osnovi in votku. Tkanina ima vlogo armature. Izboljšuje fizikalno-mehanske lastnosti vlaknovine, predvsem trgalno in razpočno trdnost, ter zmanjšuje raztezek.

Iglane vlaknovine uporabljamo za zidne in talne obloge, za filtre pri suhi in mokri filtraciji ter v gradbeništvu predvsem kot geotekstilije (za avtoceste, železnice, predore, za utrditev obal rek in potokov, drenaže ipd.). Kot vidimo, je področje uporabe iglanih vlaknovin zelo široko in se še zmeraj širi. Zaradi tega se povečuje delež vlaknin v celotni proizvodnji ploskih tekstilnih izdelkov.

18.6.1.3 Lepljene vlaknovine

Poleg iglanih proizvajajo tudi lepljene vlaknovine. Te se uporabljajo predvsem v oblačilni industriji v obliki flizelinov ali podlog, ki služijo kot termoizolacijska plast. Tanke flizeline dobimo s točkastim termičnim taljenjem vlaken, ki se zato zlepijo med seboj. Vlaknovine lahko lepimo s pomočjo smol in naknadno termično obdelavo. Lepljene plasti vlaknovin v oblačilu previloma niso izpostavljene obrabi in obremenitvam. To velja tudi za polnilno (termoizolacijsko) plast v spalni vreči, pernici pa tudi žimnici, če je kot polnilo uporabljena vlaknovina. Lepljene vlaknovine se uporabljajo tudi kot filter medij predvsem v suhi filtraciji. Pri tem filter medij ni izpostavljen velikim mehanskim obremenitvam, tako da fizikalno-mehanske lastnosti nimajo bistvene vloge. Uporabljajo se celo v obraznih filtrih v medicini. Te lahko uporabljamo tudi v peščenih viharjih, v zadimljenem okolju ipd.

18.6.2 Preizkušanje fizikalno-mehanskih lastnosti

Področja uporabe vlaknovin so zelo pestra. Razmere, v katerih se uporabljajo, pa so pogosto zelo specifične. Temu so prilagojene tudi metode preizkušanja, s katerimi razmere uporabe simuliramo.

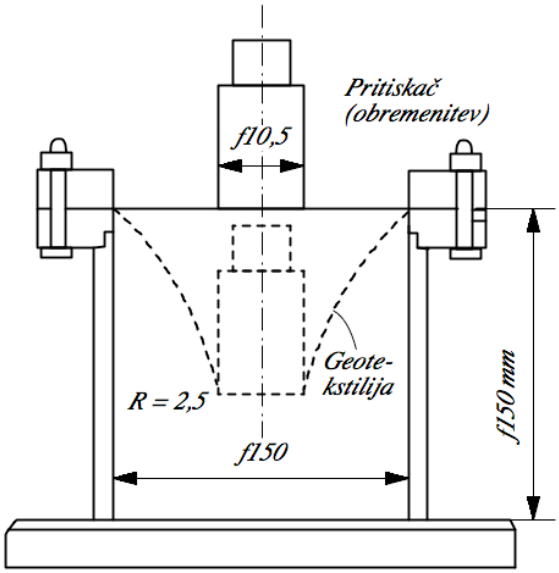
18.6.2.1 Trgalna trdnost in razteznost

Metoda preizkušanja trgalne trdnosti in razteznosti se ne razlikuje od metode, ki jo uporabljamo pri tkaninah. Preizkušanec ima dimenzije 20×5 ali 20×10 cm. S tem, da se pri drugem oblikuje cev, se dobi tudi širina 5 cm, s katero delno simuliramo nekatere pogoje uporabe vlaknovine v obliki cevi, namenjenih filtraciji.

18.6.2.2 Razpočna trdnost (ISO 13938-2)

Preizkus razpočne trdnosti se razlikuje od konvencionalne metode, ki jo uporabljamo pri tkaninah v dimenzijah preizkušanca, slika 18.19. S to metodo simuliramo stanje, v

katerem se nahaja vlaknovina, ki se uporablja kot geotekstilija, ko je vpeta nad odprtino in od zgoraj pritiska nanjo trd predmet – kamen ali podobno.



Slika 18.19: Način merjenja razpočne trdnosti pri vlakninah.

18.6.2.3 Iztrganje (ASTM D 1682; EN 29073-3)

Če je vlaknovina vpeta samo na delu širine na nasprotnih koncih, slika 18.19, se vlaknovina raztrga tako, da nastane odprtina med vpetima deloma. S to metodo simuliramo neenakomerno obremenitev vlaknovine (geotekstilije). V tem primeru obremenitev ne prenaša samo ozki vpeti del vlaknovine, temveč se napetost prenaša na sosednjo površino. To je zelo dobra simulacija realnih razmer deformacije vlaknovine v primeru neenakomerne obremenitve vzdolž njene širine ali dolžine, slika 18.20.

18.6.2.4 Nadaljnje trganje (ISO 13937-1; ISO 13937-2)

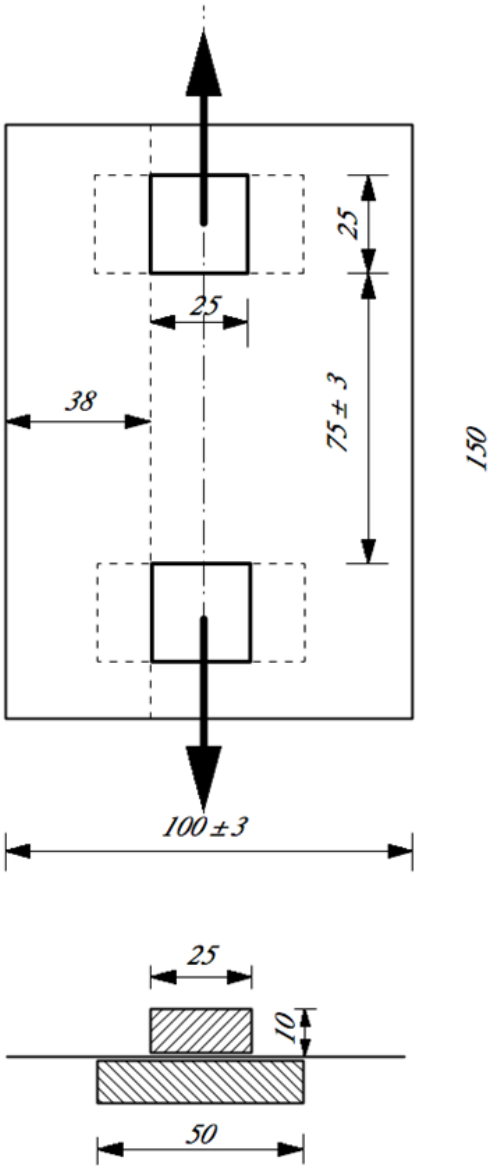
Način preizkušanja je identičen kot pri tkaninah, le da ima preizkušanec nekoliko spremenjene izmere, slika 18.21.

18.6.2.5 Preizkušanje filtracijskih lastnosti

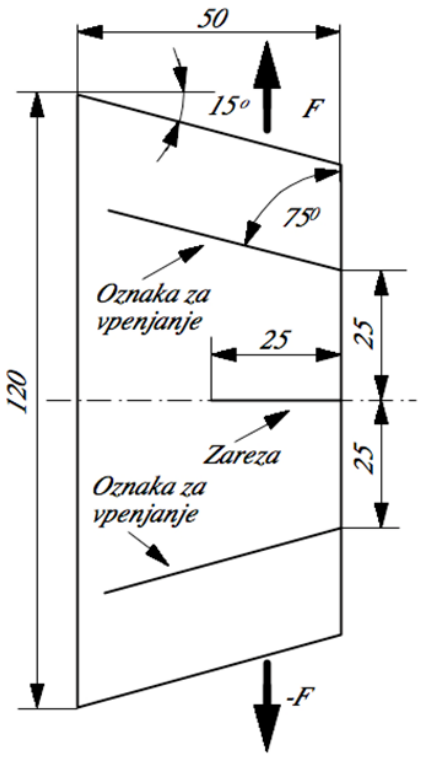
Osnovne parametre poroznosti lahko ugotovimo s pomočjo metode za ugotavljanje števila, velikosti in porazdelitve por. Delež praznega prostora V_p v vlaknovini, ki ni zaseden z vlakni, izračunamo z naslednjo enačbo

$$V_p = \frac{V_c - V_v}{V_c}, \tag{18.64}$$

pri kateri so V_p delež praznega prostora v vlaknovini, V_c celotni volumen praznega prostora, V_v volumen vode, ki jo iztisne vlaknovina. Delež V_p se zmanjšuje s povečanjem tlaka, ki mu je izpostavljena vlaknovina, slika 18.22. Pri oceni filtracijskih lastnosti vlaknovine (geotekstilije) moramo upoštevati navpično in vodoravno hitrost pretoka skozi vlaknovino pri določenih tlakih.



Slika 18.20: Način vpenjanja preizkušanca in njegove dimenzije (izmere) pri preizkušanju odpora proti iztrganju.

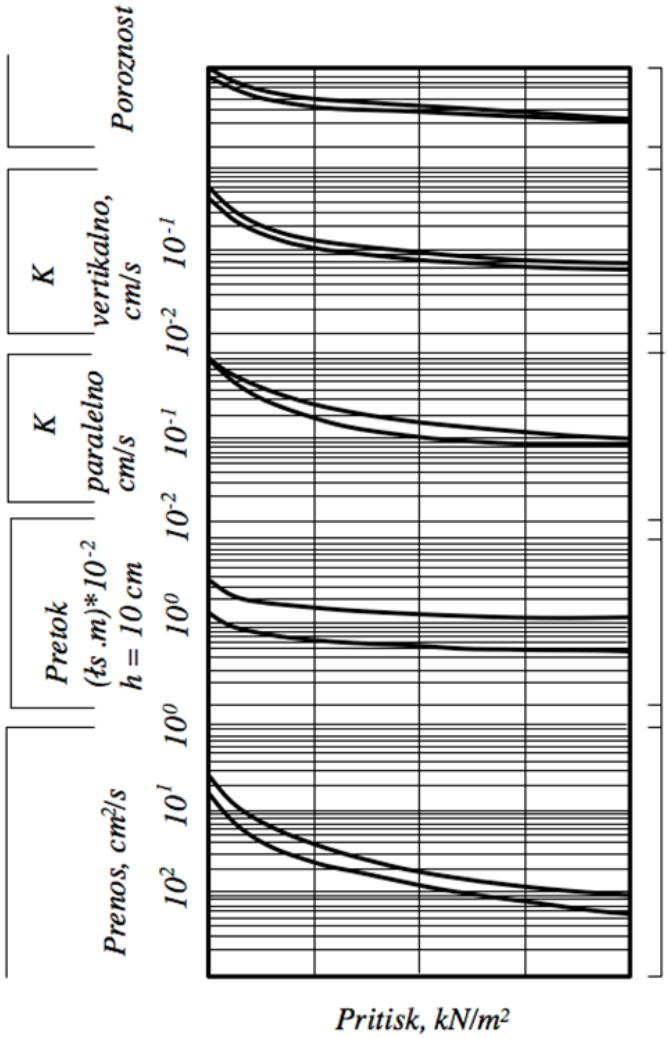


Slika 18.21: Način preizkusa nadaljnjega trganja pri vlaknovinah in izmere preizkušanca.

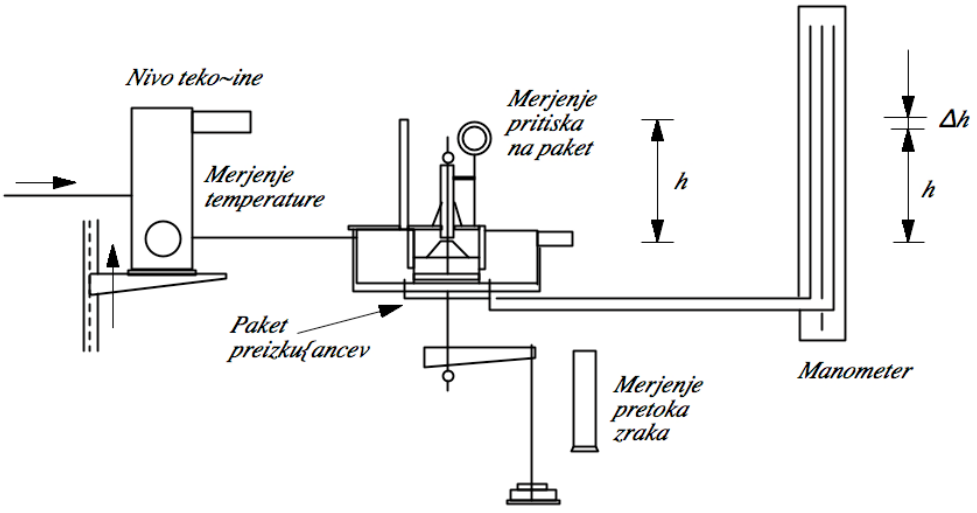
18.6.2.5.1 Hitrost pretoka v pravokotni smeri na površino vlaknovine. Metoda simulira pretok vode pravokotno na površino vlaknovine v primeru, ko je le-ta obremenjena, kot je obremenjena na primer plast vlaknovine v podlagi avtoceste na Ljubljanskem barju ipd. Obenem pa obstaja določena razlika tlakov tekočine (vode) na nasprotnih površinah vlaknovine. To je lahko reden pojav po nalivih. Shema aparature je prikazana na sliki 18.23. Preizkušance izrežemo v obliki krogov s premerom 14,5 cm. Več preizkušancev naložimo enega nad drugim v glavo za preizkušanje hitrosti pretoka. Skupna debelina preizkušancev mora biti večja od 2 cm. Preizkušance namakamo v vodi 24 ur pred začetkom preizkušanja. Preizkušamo pod tlaki v mejah od 0,02 kN/m^2 do 2 kN/m^2. Preizkušanje izpeljemo tako, da se debelina plasti preizkušancev zmanjšuje s hitrostjo, ki je manjša od 0,01 mm/5 min. Hitrost pretoka in debelino plasti preizkušancev merimo pri vnaprej izbranih tlakih tako, da dobimo krivulje tlak – hitrost pretoka, kot je prikazano na sliki 18.22. Koeficient permeabilnosti ali specifično hitrost pretoka kv izračunamo z naslednjo enačbo

$$k_V = \frac{qd\frac{\eta_T}{\eta_{20}}}{\Delta hA}, \tag{18.65}$$

pri kateri so k_V [cm/s] koeficient permeabilnosti vlaknovine (geotekstilije) pri 20 °C, q [cm^3/s] volumenska hitrost pretoka vode skozi plasti preizkušancev, A [cm^2] površina geotekstilije, skozi katero teče voda, d [cm] debelina plasti preizkušancev v odvisnosti od tlaka, Δh [Pa, cm VS] razlika tlakov vode na nasprotnih površinah plasti preizkušancev – višina vodnega stolpca, cm, ki je praviloma 157 Pa (1,6 cm VS), η_T/η_{20} razmerje med dinamično viskoznostjo vode, ki jo ima v času preizkušanja pri temperaturi T in dinamične viskoznosti vode pri 20 °C.



Slika 18.22: Sprememba nekaterih parametrov filtracije v odvisnosti od tlaka pri vlaknini Polyfert TS, ki jo izdeluje fima Chemie Linz AG.

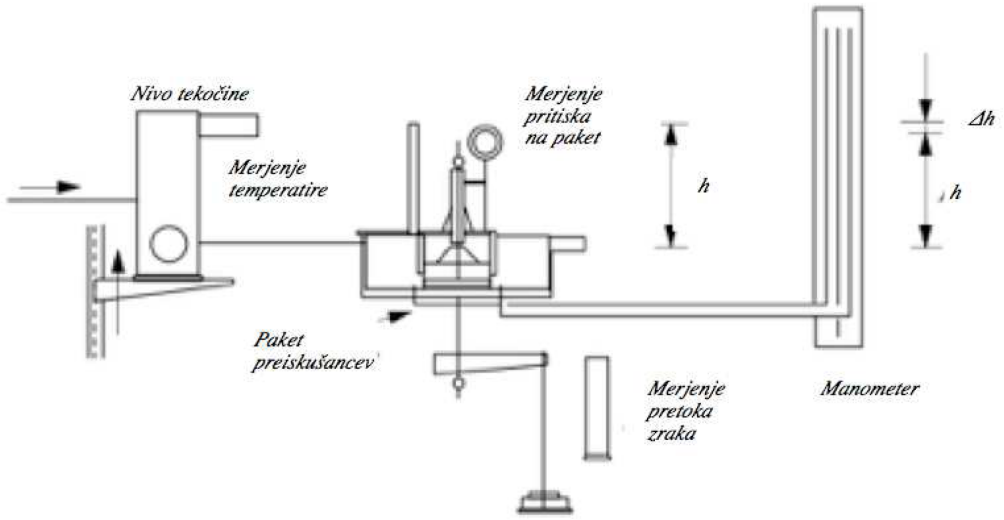


Slika 18.23: Aparatura za ugotavljanje vrednosti koeficienta permeabilnosti k_V.

18.6.2.5.2 Hitrost pretoka vzdolž površine vlaknovine. Aparatura je prikazana na sliki 18.24. Tudi pri tej metodi naložimo več preizkušancev enega na drugega, dokler ne dosežejo debeline, večje od 2 cm. Preizkušance izrežemo v obliki pravokotnikov, katerih dimenzije so 10×16,5 cm, tako da je njihova površina 165 cm^2. Voda teče v smeri daljše stranice preizkušanca. Površina, skozi katero voda teče, je enaka produktu širine preizkušanca (10 cm) in debeline plasti preizkušancev. Koeficient permeabilnosti ali specifično hitrost pretoka k_H izračunamo z naslednjo enačbo

$$k_H = \frac{ql\frac{\eta_T}{\eta_{20}}}{\Delta h d b}, \tag{18.66}$$

pri kateri so k_H [cm/s] koeficient permeabilnosti vlaknovine (geotekstilije) pri 20 °C vzdolž površine, l [cm] dolžina plasti preizkušancev, po kateri teče voda, b [cm] širina plasti preizkušancev. Drugi parametri imajo enak pomen kot v enačbi (18.65). Pri tej metodi uporabljamo vrednost Δh = 3,2 kPa (33 cm VS).



Slika 18.24: Aparatura za ugotavljanje vrednosti koeficienta permeabilnosti k_H (specifične hitrosti pretoka vzdolž vlaknovine).

Delež volumna V_p lahko izračunamo tudi z naslednjo enačbo

$$V_p = \frac{dlb\gamma}{G} - 1, \tag{18.67}$$

pri kateri so d [cm] debelina preizkušanca, l [cm] dolžina preizkušanca, b [cm] širina preizkušanca, γ [g/cm^3] gostota vlaknovine, G [g] masa suhega preizkušanca.

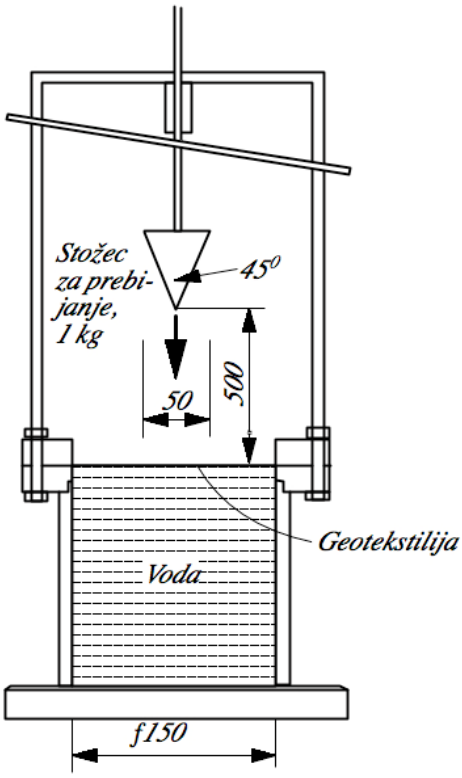
Lahko tudi izračunamo transmisivnost (prenos) T v cm^2/s, če upoštevamo samo eno plast vlaknovine debeline d_1

$$T = k_H d_1. \tag{18.68}$$

Na sliki 18.22 so prikazane sprembe vrednosti V_p, k_V, k_H, Q [1/s.m^2] pri h = 980 Pa = 10 cm VS) in T v odvisnosti od tlaka na vlaknovini podanog v kPa.

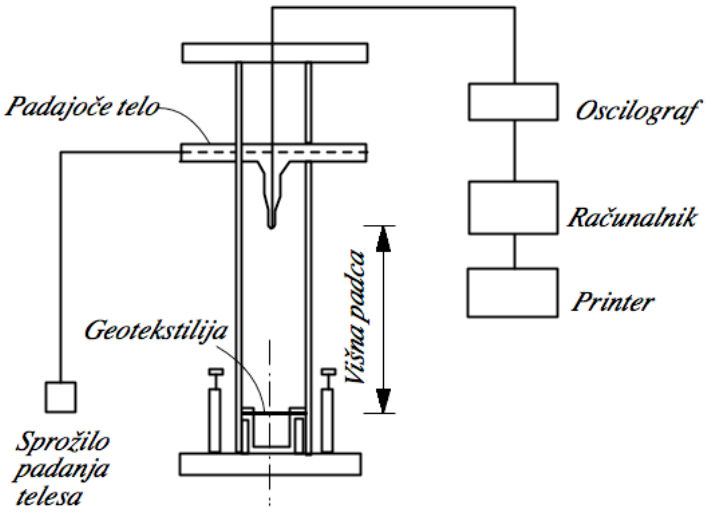
18.6.2.6 Prebijanje

Princip metode je prikazan na sliki 18.25. Odpor proti prebijanju ugotovimo s pomočjo premera odprtine, ki jo naredi padajoče telo mase 1 kg s konico stožca. Pomanjkljivost te metode je v tem, da je težko natančno ugotoviti premer odprtine zaradi elastičnosti vlaknovine.

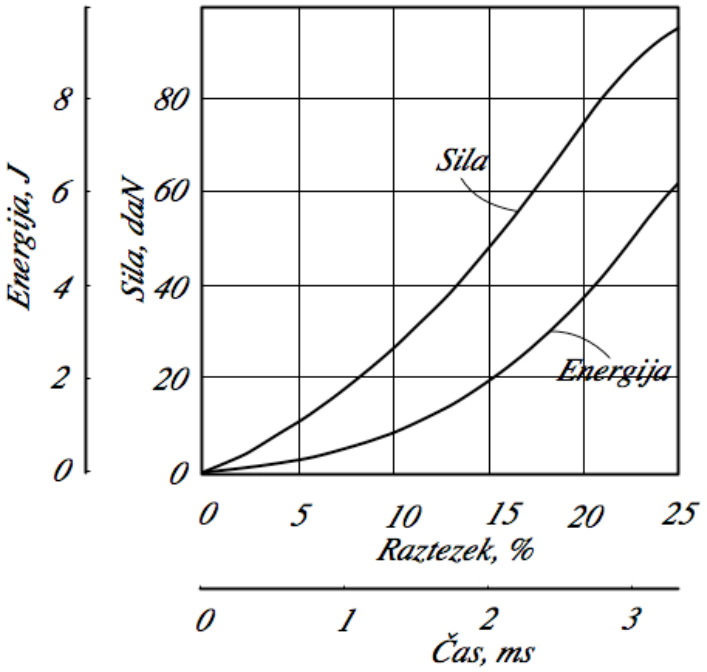


Slika 18.25: Način delovanja aparature za ugotavljanje upora vlaknovine proti prebijanju.

Boljša je metoda, ki ima elektronsko sondo za merjenje sile in energije in je povezana z računalnikom. Princip metode je prikazan na sliki 18.26. Na sliki 18.27 sta prikazani krivulji sila – raztezek in energija – čas delovanja sile.



Slika 18.26: Shema elektronske aparature za ugotavljanje odpora vlaknovine proti prebijanju.



Slika 18.27: Primer poteka spremembe rezultatov (sila, energija in raztezek) v času preizkušanja odpora vlaknovine proti prebijanju. ki ga ugotovimo z elektronsko aparaturo.

18.7 Seznam oznak poglavja

Oznaka	Enota	Opis
A		razdalja od točke Q do krivulje vzdolž osi simetrije
A	cm^2	površina geotekstilije skozi katero teče voda
a		konstanta
a_1		parameter
a_2		parameter
β_1	rad	kot med osjo osnovne niti in smerjo delovanja sile na osnovno nit
β_2	rad	kot med osjo votkovne niti in smerjo delovanja sile na votkovno nit
b_1		parameter
b_2		parameter
C		konverzijska konstanta mer
c		vtkanje
c'		parameter
c_1		vtkanje osnove
c_1	%	vtkanje osnove
c_2		vtkanje votka
c_2	%	vtkanje votka
c_3	%	spremembe mase surove tkanine v procesu oplemenitenja
D	cm	debelina tkanine
D_h		število stolpcev na enoto širine
D_v		število zank v stolpcu na enoto dolžine
d	cm	premer preje, premer niti
d	cm	debelina preizkušanca
d'		parameter
d_1	cm	debelina ene vlaknovine
d_1	cm	premer osnove
d_2	cm	premer votka
E	N	modul elastičnosti
e		raztezek, raztezek pri pretrgu tkanine
e''		raztezek pri pretrgu proste (izolirane) niti
e_1		parameter
e_2		parameter
f_1	N	torna sila, ki deluje na nit osnove, zmanjšana za vrednost medsebojnega drsenja vlaken v osnovni niti
f_2	N	torna sila, ki deluje na nit votka, zmanjšana za vrednost medsebojnega drsenja vlaken v votkovni niti
γ	g/cm^3	gostota preje, vlaknovine
G_s	g/cm^2	masa surove tkanine
G_g	g/cm^2	masa gotove tkanine
G	g	masa suhega preizkušanca
Δh	Pa	razlika tlakov
H		parameter višin lokov
η		koeficient, ki upošteva neenakomerno obremenitev niti
η_1		koeficient deformacije prečnega preseka osnove

Nadaljevanje na naslednji strani

Nadaljevanje s prejšnje strani

Oznaka	Enota	Opis
η_2		koeficient deformacije prečnega preseka votka
η_T/η_{20}		razmerje med dinamično viskoznostjo vode, ki jo ima v času preizkušanja pri temperaturi T in dinamičnoe viskoznosti vode pri 20 °C
Fx	Nm	upogibni moment
h_1	cm	višina loka osnovne niti
h_2	cm	višina loka votkovne niti
K		faktor kritja
K_1		normirani faktor kritja osnove
K_1		koeficient proti nadaljnjem trganju po osnovi
K_2		koeficient proti nadaljnjem trganju po votku
K_2		normirani faktor kritja votka
K_{max}		maksimalni faktor kritja (=225)
K_o		faktor kritja osnove
K_v		faktor kritja votka
k		koeficient
k_1		koeficient ekvivalentnega učinka vseh vplivov na spremembo trgalne trdnosti niti osnove v tkanini
k_2		koeficient ekvivalentnega učinka vseh vplivov na spremembo trgalne trdnosti niti votka v tkanini
k_V	cm/s	koeficient permeabilnosti vlaknovine pri 20 °C
k_H	cm/s	koeficient permeabilnosti vlaknovine pri 20 °C
L_1	cm	dolžina niti osnove v raportu
L_2	cm	dolžina niti votka v raportu
L_0	cm	širina raporta
L_v	cm	dolžina raporta
l	cm	dolžina niti na razdalji p
l	cm	celotna dolžina zanke
l	cm	dolžina preizkušanca
l_1	cm	dolžina niti osnove na razdalji p
l_1	cm	dolžina loka zanke med A in B
l_2	cm	dolžina niti votke na razdalji p
l_2	cm	dolžina loka zanke med B in C
μ		koeficient trenja
m		razdalja med krivuljo in osjo y
m	g/m^2	masa pletenine
n		število niti
n	1/cm	število niti na cm
n_1	1/cm	število niti osnove na cm
n_2	1/cm	število niti votka na cm
o		povečan delež dolžine c zaradi lege dela niti v zanki
φ	rad	kot
ψ	rad	kot
P		poroznost preje, polnost tkanine
P	N	obremenitev
P_1	N	trgalna trdnost ene osnovne niti v tkanini

Nadaljevanje na naslednji strani

Nadaljevanje s prejšnje strani

Oznaka	Enota	Opis
P_2	N	trgalna trdnost ene votkovne niti v tkanini
P_o	N	trgalna trdnost ene osnovne niti
P_v	N	trgalna trdnost ene votkovne niti
p	cm	razdalja med nitmi
p	mm/nit	geometrijska gostota
p_1	mm/nit	geometrijska gostota osnove
p_1	niti/10 cm	gostota osnove
p_2	mm/nit	geometrijska gostota votka
p_2	niti/10 cm	gostota votka
Q	N	odpornost tkanine proti nadalnjem trganju
Q_1	N	trgalna trdnost tkanine v smeri osnove
Q_2	N	trgalna trdnost tkanine v smeri votka
q	cm^3/s	volumski pretok vode
S_1		gostota niti osnove na širini preizkušenega vzorca
S_2		gostota niti votka na širini preizkušenega vzorca
s_1	N	sila niti osnove v točki križanja
s_2	N	sila niti votka v točki križanja
r	cm	polmer loka BC na zanki
T	tex	finost preje
T	cm^2/s	transmisivnost
T_t	tex	finost preje
u_1		število prehodov osnove
u_1	%	skrčenje tkanine v smeri osnove v procesu oplemenitenja
u_2		število prehodov votka
u_2	%	skrčenje tkanine v smeri votka v procesu oplemenitenja
V_c	mm^3	celotni volumen praznega prostora
V_p		delež praznega prostora v vlaknovini
V_v	mm^3	volumen vode, ki jo izstisne vlaknovina
x		vrednost krivulje na osi x
y		vrednost krivulje na osi y
w	cm	širina zanke
w'		parameter

18.8 Literatura

[1] Evropski parlamenta in Evropski svet. Direktiva 2001/95/es evropskega parlamenta in sveta z dne 3. decembra 2001 o splošni varnosti proizvodov. *Uradni list L 011*, 15/01/2002:4–17, 2002.

[2] J. W. S. Hearle, P. Grosberg, and S. Backer. *Structural mechanics of fibers, yarns, and fabrics.* Wiley-Interscience, New York, 1969.

[3] F. T. Peirce. The "handle" of cloth as a measurable quantity. *Journal of the Textile Institute Transactions*, 21(9):T377–T416, 1930.

[4] N. G. Novikov. O stroenii i proektirovanii tkani s pomoschu geometricheskogo metoda. *Tekstil'naja promyshlennost*, 2:9–17, 1946.

[5] H. Lin, X. Zeng, M. Sherburn, A. C. Long, and M. J. Clifford. Automated geometric modelling of textile structures. *Textile Research Journal*, 82(16):1689–1702, 2012.

[6] V. P. Shherbakov, A. P. Bolotnyj, I. B. Cyganov, T. I. Poljakova, and Š. E. Tulanov. Eksperimentanije zakonomernosti deformirovanija holopkovih prjaži pri rasteženii. *Tehnologija tekstilnoj promyšlenosti*, 4(364):63–67, 2016.

[7] N. A. Teixeira, M. M. Platt, and W. J. Hamburger. Mechanics of elastic performance of textile materials: Part xii: Relation of certain geometric factors to the tear strength of woven fabrics. *Textile Research Journal*, 25(10):838–861, 1955.

[8] E. Triki, T. Vu-Khanh, P. Nguyen-Tri, and H. Boukehili. Mechanics and mechanisms of tear resistance of woven fabrics. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 61:33–39, 2012.

[9] D. L. Munden. The geometry of a knitted fabric in its relaxed condition. *Hosiery Times*, April:43, 1959.

[10] J. A. Smirfitt. Worsted 1×1 rib fabrics. part i. dimensional properties. *Journal of the Tekstile Institut*, 56(5):T248–T259, 1965.

POGLAVJE 19

Osnove barvnega sistema

Kazalo

19.1 Splošno **432**
19.2 Teorije mešanja barvne svetlobe in barv **433**
19.2.1 Teorija mešanja barvne svetlobe 433
19.2.2 Pigmentna teorija mešanja barv 439
19.3 Modeli barvnih sistemov **440**
19.3.1 Nu-Hue Color Custon System 441
19.3.2 Munsellov barvni sistem 441
19.3.3 Nemški barvni sistem 446
19.3.4 Švedski naravni barvni sistem 446
19.3.5 Prikaz barvnega prostora objekta v regularni romboederski rešetki 453
19.4 Barvni standardi in merilna tehnika **456**
19.4.1 Barvni standardi 456
19.4.2 Merilna tehnika 457
19.5 Praktična uporaba barvnih teorij in barvnih sistemov [16] **458**
19.5.1 Lesk 458
19.5.2 Uporaba teorije mešanja barvne svetlobe in pigmentne teorije mešanja barv 459
19.5.3 Učinek barvne kompozicije 463
19.5.3.1 Barvni kontrast 463
19.5.3.1.1 Splošno. 463
19.5.3.1.2 Kontrast nianse. 463
19.5.3.1.3 Kontrast tona. 464
19.5.3.2 Barvna harmonija. 464
19.5.3.2.1 Harmonija podobnosti. 465
19.5.3.2.2 Harmonija kontrasta. 465
19.5.3.2.3 Harmonija stopnjevanja nianse. 465
19.5.3.3 Osnova barvne harmonije 465
19.5.3.4 Kompozicija vzorca na površini tkanine 466

19.5.3.5 Ločevanje barv 467
19.5.4 Barvanje tekstilij 467
19.5.4.1 Mešani barvni učinki 467
19.5.4.2 Preja iz mešanice različno obarvanih vlaken 467
19.5.4.3 Sukanci iz raznobarvnih niti 468
19.5.4.4 Kombinacije različno obarvanih niti 468
19.5.4.5 Barvne proge in križanje barvnih prog 468
19.5.4.6 Enostavni – regularni barvni vzorci 469
19.5.4.7 Neregularni barvni vzorci 469
19.5.4.8 Sestavljeno barvno zaporedje 470
19.5.4.8.1 Barvni vzorci, v katerih barve spreminjajo lego (zaporedje). 470
19.5.4.9 Stopnjevani barvni vzorci 470
19.5.4.10 Modifikacije črtastih (progastih) in karirastih barvnih vzorcev 471
19.5.4.11 Uravnava kontrastov v barvnem vzorcu. 471
19.5.4.12 Barvne kombinacije glede na vezavo 472
19.6 Seznam oznak poglavja **473**
19.7 Literatura **473**

19.1 Splošno

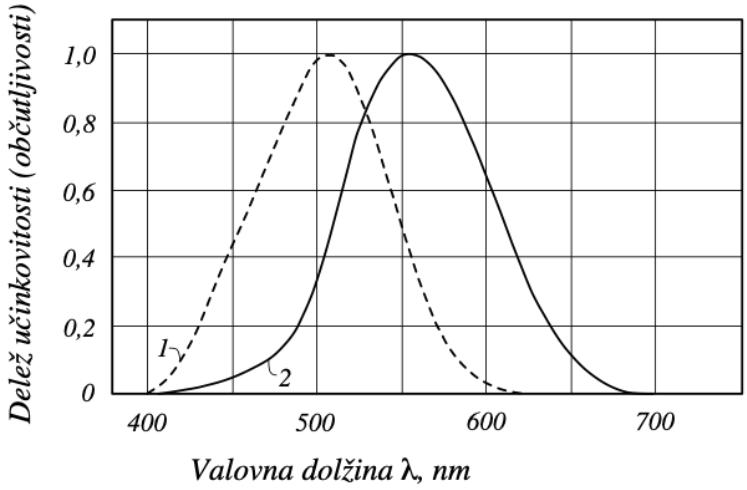
Newton je prvi dokazal, da je vidna bela svetloba sestavljena iz barvnega spektra. Na levi strani spektra (krajša valovna dolžina) je ultravijolična. Proti desni sledijo: vijolično modra, zelena, rumena, rdeča in infrardeča. Vidna svetloba, le majhen del elektromagnetnega valovanja, je med približno 380 nm in 780 nm. Levo od vidnega dela spektra je ultravijolično območje, območje X in Y žarkov ter na koncu območja so kozmični žarki, ki imajo valovno dolžino 10^{-4} nm nm in manj. Na desni strani vidnega dela spektra je že prej omenjeno infrardeče območje valovnih dolžin do približno 10^5 nm. Naprej pa je območje ultra visokih frekvenc in radio valov.

Ko pravimo vidni del spektra, mislimo vedno na območje, ki ga zaznamuje človeško oko. Nekateri insekti sicer vidijo le v ultravijolični svetlobi, nekatere živali pa zaznavajo infrardečo svetlobo. To se nanaša predvsem na nočne živali.

Ne bomo se spuščali v podrobnosti zgradbe človekovega očesa. Lahko rečemo le, da loči veliko število barvnih nians in barvnih tonov, omogoča stereo percepcijo, je delno prilagodljivo tudi na nočno svetlobo, ima moč fokusiranja in da je občutljivo le v ozkem intervalu valovnih dolžin elektromagnetnega valovanja. To se pravi, da smo kljub velikim možnostim, ki jih nudi zgradba očesa, za marsikaj prikrajšani. Vendar je s posebnimi napravami možno videti tudi v infrardeči svetlobi, se pravi ponoči. Živi organizmi izžarevajo infrardeče valove, kar velja tudi za dele strojev, ki jih segrevajo motorji. To dejstvo se izkorišča tudi v vojaške namene. V temni noči je možno opazovati premike sovražnika, toda le v infrardečem področju spektra. Da bi se temu izognili, uporabljajo maskirne uniforme, ki so potiskane v različnih barvah (zelena, olivno zelena, temno rjava, svetlo rjava ipd.). Te barve pa morajo imeti različne odboje (refleksije) v infrardečem območju. Na ta način da opazovanje v infrardeči svetlobi razbito konturo nosilca maskirne uniforme in zaradi tega opazovalec ne dojema nosilca maskirne uniforme kot kompaktno figuro, ampak kot manjše kose površine, ki oddajajo različno

intenziteto svetlobe v infrardečem delu spektra. Poleg maskiranja v infrardečem delu spektra mora maskirna uniforma maskirati tudi v vidni svetlobi. To je možno, če posamezni deli površine maskirne uniforme odbijajo svetlobo enake valovne dolžine kot okolje. V tem primeru se vsaj del silhuete subjekta "zlije" z okoljem in oko ne zazna silhuete kot celote.

V očesu so poleg senzorjev za barve še dve vrsti senzorjev: čepki in paličice. Prvi so občutljivi na dnevno svetlobo, drugi se aktivirajo v temi, ko je svetloba zelo slaba. Na sliki 19.1 je prikazana občutljivost enih in drugih v odvisnosti od valovne dolžine. Čepki, ki so občutljivi na dnevno svetlobo, reagirajo na žarke valovne dolžine od 400 nm do 700 nm, najbolj občutljivi pa so za svetlobo valovne dolžine od 550 nm do 560 nm, kjer imajo 100 % učinkovitost. Paličice pa zaznavajo svetlobo valovne dolžine od 400 nm do 620 nm in imajo največjo občutljivost za svetlobo valovne dolžine med 500 nm in 520 nm.



Slika 19.1: Relativna spektralna občutljivost čepkov 1 in paličic 2 v odvisnosti od valovne dolžine svetlobe.

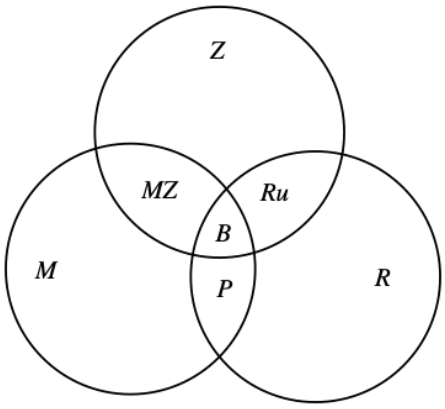
19.2 Teorije mešanja barvne svetlobe in barv

19.2.1 Teorija mešanja barvne svetlobe

Kot smo že omenili, je bela dnevna svetloba mešanica barvnih svetlob, ki jih lahko ločimo v barvnem spektru. Dejansko dobimo belo svetlobo, če pomešamo med seboj tri osnovne barvne svetlobe (rdečo, modro in zeleno) v enakih deležih. Teorija mešanja barvne svetlobe je prikazana na sliki 19.2.

Če pomešamo v enakih deležih zeleno in modro svetlobo, dobimo modro zeleno svetlobo; modra in rdeča dajeta vijolično svetlobo. Rdeča in zelena pa rumeno. Kot smo že omenili, zmes vseh treh osnovnih barvnih svetlob daje belo svetlobo, če so deleži enaki. Postavlja se praktično vprašanje, kako kvantificirati (opisati) barvo? Najbolj ugodno je, če vse vrednosti parametrov, ki karakterizirajo določeno barvo, izrazimo v številčni obliki.

Številke same po sebi niso dovolj, da dobimo subjektivno predstavo o barvi; ampak so potrebni še določeni etaloni za primerjavo. Parametre, s katerimi lahko opišemo določeno barvo, mora zaznavati naše oko. Že leta 1853 je Grassmann (in Judd et. al.:



Slika 19.2: Teorija mešanja barvne svetlobe.

"Color in Business, Science and Industry") [1] postavil principe, ki dajo kvalitativne informacije glede mešanja treh osnovnih barv.

Prvi princip pravi, da loči človeško oko tri spremenljivke, ki opisujejo barvo: spremembo nianse (odtenka) barve, spremembo svetilnosti barve in spremembo nasičenosti barve.

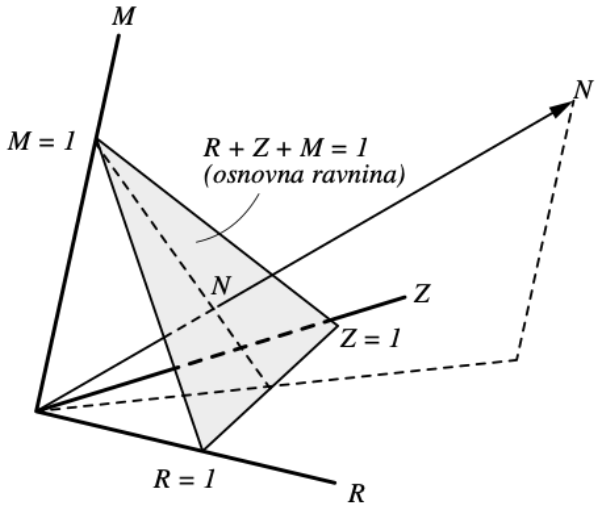
Drugi princip pa pravi, če v mešanici treh barv ne menjamo količine pri dveh, zvezno pa spreminjamo količino ali delež tretje barve, se bo zvezno spreminjala tudi mešanica.

Tretji princip pravi, da mešanica treh barv, ki imajo enake nianse, svetilnost in zasičenost, dajo identične efekte v mešanicah ne glede na njihovo spektralno sestavo. Na tem principu je zasnovana moderna kolorimetrija. To pomeni, da barvno mešanico določimo na podlagi barv, ki jo sestavljajo, ne glede na njihovo spektralno sestavo. Iz tega sledijo naslednji važni zaključki:

1. Če dodamo dvema sredstvoma, ki dajeta enako barvo, drugi dve sredstvi enake barve, dobimo mešanico, ki ima nespremenjeno barvo. To pomeni, če stimulatorju (snovi, ki proizvaja določeno barvo) a dodamo stimulator b in stimulatorju c dodamo stimulator d, dobimo mešanico, ki ima enak učinek, kot mešanica b in d. Enako velja za mešanico a in c. To je ekvivalentno aritmetičnemu aksiomu, ki pravi, če se enakemu doda enako, je rezultat enak (nespremenjen).
2. Če imamo stimulatorja enake barve (nianse) in enega ali drugega vzamemo iz mešanice enake barve, še vedno ostane ta mešanica barv. To pomeni, če stimulatorju a dodamo stimulator b in mešanici c dodamo mešanico d, dobimo ostanek s tem, da iz mešanice c odstranimo a, dobimo enak barvni učinek, kot če bi iz mešanice d odstranili stimulator b. To bi bilo ekvivalentno matematičnemu aksiomu, ki pravi, da, če enakim odvzamemo enako, dobimo enako (rezultat se ne spremeni).
3. Če ima enota enega stimulatorja enako barvo kot enota drugega stimulatorja, potem ima tudi katerokoli število enot ali deležev enote enega stimulatorja enako barvo kot isto število enot ali delov enote drugega stimulatorja. To pomeni, da povečanje ali zmanjšanje svetilnosti, ki označuje velikost dveh stimulatorjev enake barve pod pogojem, da se ne menja njihova spektralna

porazdelitev, se ne bo spremenila njihova skupna barvna mešanica. To je ekvivalentno aritmetičnemu aksiomu, ki pravi, da, če enake vrednosti delimo in množimo z istim številom, je rezultat zmeraj enak (nespremenjen).

Prej omenjeno lahko ilustriramo v barvnem prostoru, čigar koordinate predstavljajo tri osnovne barve: rdeča – R, modra – M in zelena – Z. Če te tri osnovne barve pomešamo v enakih delih, dobimo nevtralno ali belo barvo – N. Na sliki 19.3 je prikazan barvni prostor, omejen s tremi primarnimi barvami (teorija mešanja barvne svetlobe). Poleg tega je narisana tudi osnovna ravnina, na kateri je $R + M + Z = 1$, kot tudi vektor nevtralne barve N.



Slika 19.3: Osnovna ravnina in nevtralna barva N v barvnem prostoru, ki je omejen s tremi stimulatorji barv R, M in Z.

Pri združitvi treh osnovnih barv R, M in Z dobimo rezultanto barvo S. Nevtralna barva je le ena od velikega števila možnih leg vektorja S.

$$R = \sum_{i=1}^{n} R_i \quad ; \quad M = \sum_{i=1}^{n} M_i \quad ; \quad Z = \sum_{i=1}^{n} Z_i \tag{19.1}$$

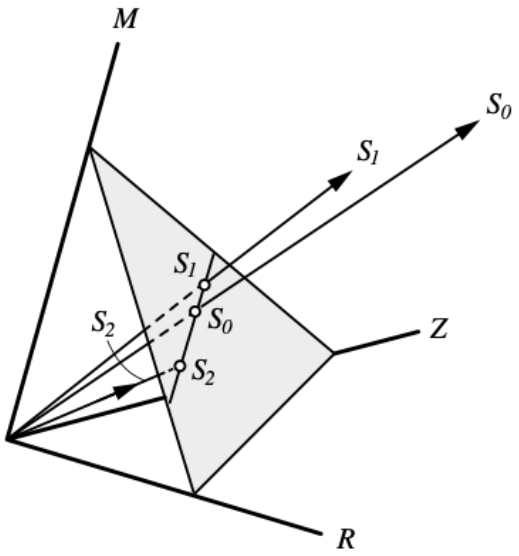
Mešanico več barv lahko izrazimo z naslednjo enačbo

$$\vec{S}(R, M, Z) = R\vec{R} + M\vec{M} + Z\vec{Z} \tag{19.2}$$

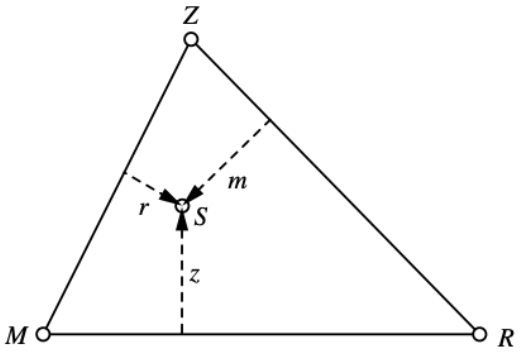
Če imamo dvokomponentno mešanico, katere komponente so S_1 in S_2, potem je rezultanta mešanice S_0 enaka vektorski vsoti komponent $S_0 = S_1 + S_2$. To je prikazano na sliki 19.4. Na sliki 19.5 je prikazana osnovna ravnina ($R = 1$; $M = 1$; $Z = 1$) barvnega prostora, ki je omejen štiribarvnim stimulansom (R, M in Z), ki so naznačeni v vogalih trikotnika. Točka S je kromatična točka s kromatičnimi koordinatami r, m in z barve S na tej osnovni površini. Takšno površino imenujemo kromatični diagram.

Lahko se da dokazati, da se kromatične koordinate r, m in z barve S dajo izraziti s skalarnimi vrednostmi primarnih barv.

$$r = \frac{R}{R + M + Z} \quad ; \quad m = \frac{M}{R + M + Z} \quad ; \quad z = \frac{Z}{R + M + Z} \tag{19.3}$$



Slika 19.4: Seštevanje dveh mešanic barv S_1 in S_2 iz katerih rezultira mešanica barv S_0.



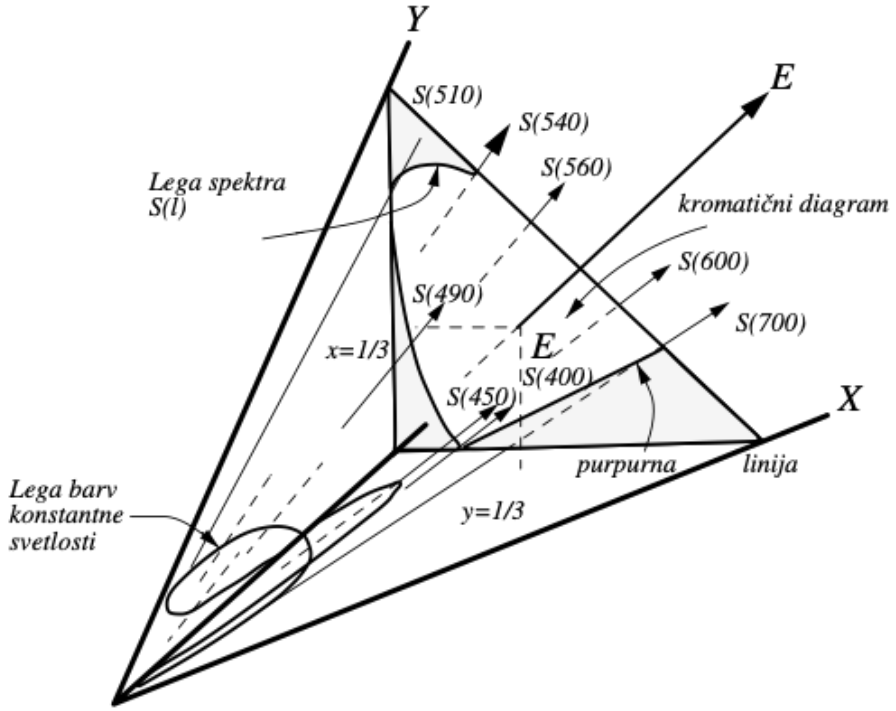
Slika 19.5: Kromatični diagram.

Iz enačbe (19.3) sledi

$$r + m + z = 1. \tag{19.4}$$

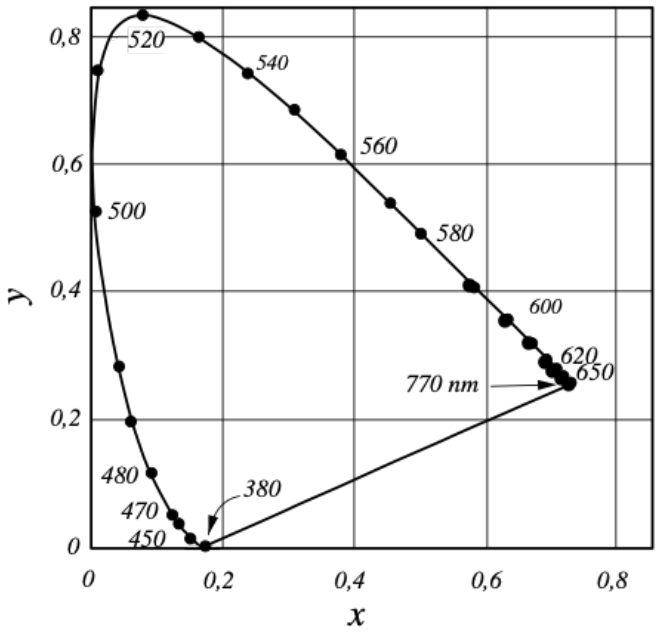
Iz enačbe (19.4) sledi, da je dovolj, če poznamo vrednosti dveh kromatičnih koordinat, da ugotovimo lego prevladujoče barve S, saj tretjo kromatično koordinato lahko izračunamo s pomočjo enačbe (19.4). Geometrično pomeni vektor S_0 na sliki 19.4 vsoto vektorjev S_1 in S_2. Vsi trije vektorji ležijo na ravnini, ki seka osnovno ravnino barvnega prostora na premici S_1, S_0 in S_2. Točke S_0, S_1 in S_2 se imenujejo kromatične točke barv S_0, S_1 in S_2. Osnovna ravnina se imenuje kromatični diagram, slika 19.5. Kromatični diagrami so osnova metode specifikacij barv, ki jo uporablja CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) – Mednarodna komisija za iluminacijo. Barvni prostor je omejen s koordinatami X, Y, Z, ki predstavljajo osnovne barve. Kromatične koordinate pa so x, y, z.

Primer kromatičnega diagrama x, y v barvnem prostoru je prikazan na sliki 19.6. Spektralne barve so znotraj bele ploščine. Na robu spodaj desno je vijolična črta. Prikazane so tudi lege vseh barv $S(\lambda)$ spektralnih stimulatorjev, ki imajo valovno dolžino λ in konstantno svetilnost. Barva E gre skozi kromatični diagram pri $E(x = y = 1/3)$. To je barva, ki ima enako energijo vseh stimulatorjev.



Slika 19.6: Primer kromatičnega diagrama po metodi, ki jo uporablja CIE.

Dejansko CIE uporablja kromatične diagrame v ravnini, ki je prikazana na sliki 19.7. Na abscisi so vrednosti kromatične koordinate x in na ordinati vrednosti kromatične koordinate y. Barve so znotraj meje, na kateri so naznačene valovne dolžine spektralnih barv v nm.



Slika 19.7: Kromatinski diagram x, y, s spektralnim poljem (znotraj mejne linije) in vijolično linijo spodaj desno, glej tudi sliko 19.6.

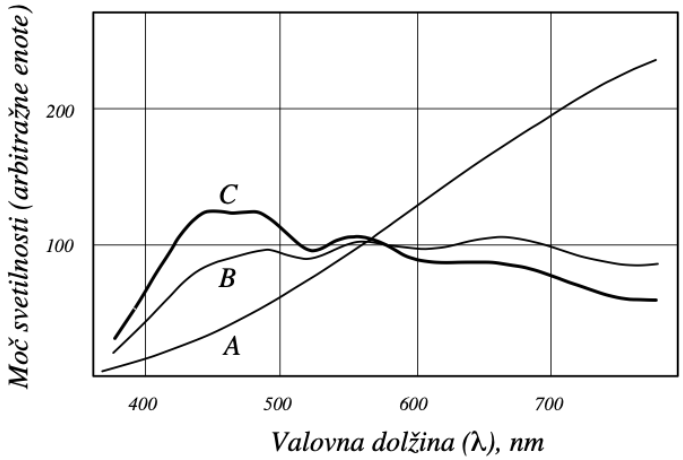
Precizno lego barv na kromatičnem diagramu, izraženih količinsko z valovno dol-

žino in kromatičnimi koordinatami, lahko najdemo v preglednicah. V njih so valovne dolžine v intervalu od 380 nm do 780 nm (vidni del svetlobnega spektra) in sicer v intervalih po 5 nm. Posamezne dele preglednic bomo prikazali v preglednici 19.1. Od 700 nm do 780 nm kromatične koordinate nimajo iste vrednosti (x = 0,7347; y = 0,2653; z = 0,000). Preglednice se nanašajo na kromatični diagram na sliki 19.7.

Preglednica 19.1: Kromatične koordinate spektralnih stimulatorjev CIE iz leta 1931.

Valovna dolžina	Kromatične koordinate			Valovna dolžina	Kromatične koordinate		
nm	$x(\lambda)$	$y(\lambda)$	$z(\lambda)$	nm	$x(\lambda)$	$y(\lambda)$	$z(\lambda)$
380	0,1741	0,0050	0,8209	530	0,1547	0,8059	0,0394
385	0,1740	0,0050	0,8210	535	0,1929	0,7816	0,0255
390	0,1738	0,0049	0,8213	540	0,2296	0,7543	0,0161
395	0,1736	0,0049	0,8215	545	0,2658	0,7243	0,0099
500	0,0082	0,5384	0,4534	575	0,4788	0,5202	0,0010
505	0,0031	0,6548	0,3413	580	0,5125	0,4866	0,0009
510	0,0139	0,7502	0,2359	585	0,5448	0,4544	0,0008
515	0,0389	0,8120	0,1491	590	0,5752	0,4242	0,0006
520	0,0743	0,8338	0,0919	595	0,6029	0,3965	0,0006

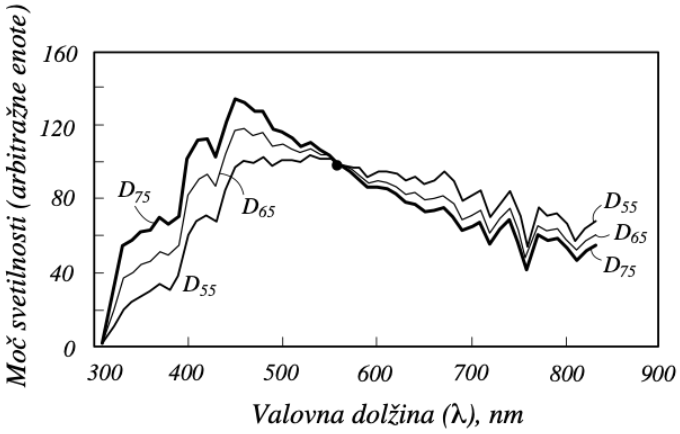
Pri kolorimetriji uporablja CIE standardne izvire svetlobe A, B, C, D_{55}, D_{65} in D_{75}. S standardizirano svetlobo se dajo ugotoviti deleži funkcij s porazdelitvijo relativne spektralne moči združenih barv. Barvni izvor A, slika 19.8, predstavlja svetlobo sevajočega telesa pri absolutni temperaturi 2.856 K. Standardno sevalno telo B ponazarja naravno svetlobo sonca v korelaciji z barvo, ki jo daje temperatura telesa pri 4.870 K. Standardno sevalno telo C ponazarja povprečno dnevno svetlobo z barvo, ki jo daje temperatura telesa pri 6.770 K.



Slika 19.8: Porazdelitev relativne spektralne moči sevanja.

Moč sevanja v dogovorjenih enotah seval A, B in C v odvisnosti od valovne dolžine je podana na sliki 19.8. Sevala D ponazarjajo dnevno svetlobo pod določenimi pogoji. V povprečju simulirajo dnevno svetlobo v korelaciji z barvo, ki jo daje temperatura telesa

pri 6.500 K. Moč sevanja seval D v odvisnosti od valovne dolžine je podana na sliki 19.9. Bolj podrobno razlago dobimo lahko v adekvatni literaturi [1].



Slika 19.9: Porazdelitev spektralne moči sevanja seval D_{55}, D_{65} in D_{75} po CIE standardu.

Kot smo lahko videli, je metoda, ki jo uporablja CIE za ugotavljanje spektralnih barv in njihovih mešanic, zasnovana na valovnih dolžinah in vrednostih kromatičnih koordinat. Toda pokazala se je potreba, upoštevati fiziološki in psihološki učinek barve in barvnih mešanic na porabnika. Zaradi tega je razvitih več sistemov medsebojne primerjave barv ali ugotavljanja lege barve v barvnem telesu, pri katerih so upoštevani vsi parametri, s katerimi lahko opišemo določeno barvo ali mešanico barv, upoštevajoč celo belo in črno, oziroma različne odtenke sive. O teh sistemih bomo bolj natančno razpravljali kasneje.

19.2.2 Pigmentna teorija mešanja barv

Pigmentna teorija sloni na rezultatih, ki jih dobimo pri mešanju barv ali obarvanih pigmentov. Pri mešanju (združevanju) rdeče in zelene svetlobe dobimo rumeno svetlobo. Če združimo rumeno in modro, dobimo belo, če združimo primarne svetlobne barve (rdečo, zeleno in modro) v enakih deležih, dobimo belo barvo.

Pri pigmentnih barvilih so rezultati drugačni. Pri pigmentih so primarne barve rumena, rdeča in modra. Če mešamo rdeči in zeleni pigment, dobimo motno rjavo, oziroma zelenkasto obarvan pigment. Pri mešanju obarvanih pigmentov dobimo barvni efekt, ki nastane na principu absorpcije določenih valovnih dolžin vpadne svetlobe. To se pravi, da z mešanjem dveh različno obarvanih pigmentov, dobimo določeno barvo mešanice, ki se razlikuje od barv pigmentov zaradi tega, ker mešanica odseva drugačne barvne žarke kot njene komponente.

Absorpcijski spekter obarvanega telesa daje barve, ki odsevajo od telesa. Dognano je, da rumeno in modro obarvani pigmenti odsevajo zeleno svetlobo. Če takšna dva pigmenta pomešamo, bo mešanica praktično absorbirala vso vpadno svetlobo, razen zelenih žarkov. Tako modro obarvani pigment absorbira rdeče, oranžne in rumene svetlobne žarke. Rumeni pigment pa absorbira vijolične in modre svetlobne žarke. Če pomešamo modro in rumeno obarvana pigmenta, bo mešanica odsevala zeleno obarvano svetlobo, oziroma bo mešanica oddajala v prostor zelene svetlobne žarke.

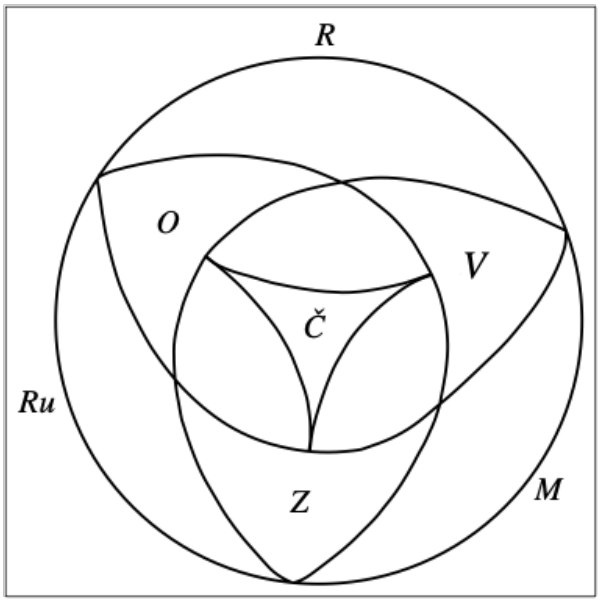
Svetloba, ki jo odsevajo vse komponente mešanice pigmentov, daje barvo te mešanice. Čim več odsevnih žarkov se prekriva, tem bolj blestečo barvo dobimo. Če pa je

malo odsevnih žarkov, ki so skupni vsem komponentam mešanice, bo barva takšne mešanice bolj motna. Mešanica rdečih in rumenih pigmentov odseva oranžno svetlobo, ki je blesteče obarvana. To pa zaradi tega, ker rdeča barva odseva malo rumene in rumena malo rdeče. Žarki, ki jih odseva rdeči in zeleni pigment, se prekrivajo v rumeni, oranžni in rdeči svetlobi, toda količina vsake od njih je majhna, tako da iz te mešanice nastane niansa umazano rjave barve. Učinki, ki jih dobimo z mešanjem obarvanih pigmentov, se dajo dobro razložiti s pomočjo Brewsterjeve teorije [2, 3], ki je prilagojena uporabi barvil v procesu barvanja snovi. Po tej teoriji so rdeča, rumena in modra barva primarne barve, ker jih ne moremo dobiti z mešanjem pigmentov, ki so obarvani v drugih barvah.

Z mešanjem primarnih barv v različnih deležih in dodajanjem črno in belo obarvanih pigmentov, lahko dobimo vse druge barve. Barvo, ki jo dobimo z mešanjem dveh pigmentov, ki sta obarvana v primarnih barvah, imenujemo sestavljeno barvo. Če mešamo po dve primarni barvi, dobimo sekundarne barve. Z mešanjem dveh sekundarnih barv dobimo terciarne barve. Primer mešanja in klasifikacije barv je prikazan v preglednici 19.2 in sliki 19.10.

Preglednica 19.2: Klasifikacija barv.

Primarne	Sekundarne	Terciarne
rdeča	zelena (mešanica rumene in modre)	roza (mešanica vijolične in oranžne)
rumena	vijolčna (mešanica rdeče in modre)	citron (mešanica zelene in oranžne)
modra	oranžna (mešanica rdeče in rumene)	olivna (iz mešanice zelene in purpurne)



Slika 19.10: Pigmentna teorija mešanja barv.

19.3 Modeli barvnih sistemov

CIE sistem je fundamentalni sistem, ki sloni na fizikalnih parametrih spektralne svetlobe. Zaradi tega je možno določeno barvo kvantitativno opisati s fizikalnimi parametri. Za to uporabljamo merilno tehniko. Toda v praktičnem življenju se je pokazala potreba

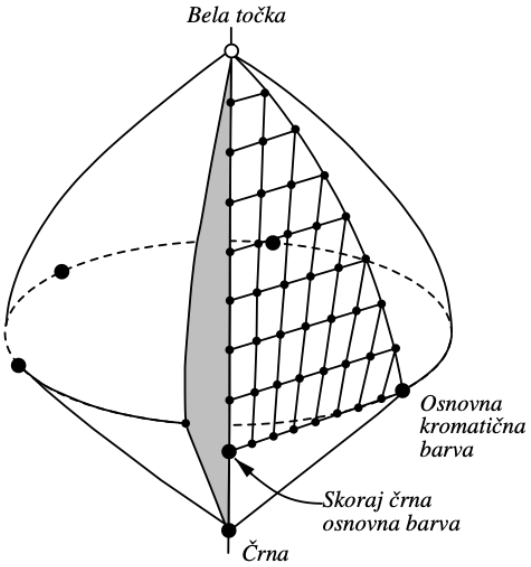
po enostavnejšem sistemu, ki bi omogočil ugotavljanje vrednosti določenih parametrov, ki dovolj natančno opisujejo barvo predvsem s psihološkega vidika.

Kot posledica praktičnih potreb, je bilo razvitih več različnih sistemov, kot so: primerjalni sistem [3, 4, 5, 6], Nu-Hue Custon Color System [7], Munsellov sistem [8], nemški sistem [9], švedski sistem [10, 11, 12], sistem regularne romboederske rešetke [1, 13, 14] ipd. Nekatere teh sistemov bomo obdelali podrobneje. Termin primarna barva smo uporabljali pri teoriji mešanja barvne svetlobe in pigmentni teoriji mešanja barv. Pri barvnih sistemih pa bomo uporabljali termin osnovna barva.

19.3.1 Nu-Hue Color Custon System

Ta sistem vsebuje 1000 barvnih kart (etalonov). To je sistem mešanic barv, ki je razvit iz šestih osnovnih barv, ene barve, ki je zelo blizu črne, in ene bele. Devet različnih mešanic z belo barvo je prikazanih v obliki mape.

Na obrobju najtemnejše mape je 54 nians. Na tem nivoju je devet obročev okrog nevtralnega centra. Vsak obroč barvnih diskov pripada sukcesijskim mešanicam šestih osnovnih barv blizu črne točke. Vsaka naslednja svetlejša mapa ima po en obroč manj, tako da imamo na začetku 9 obročev, vrh pa je brez obroča. Ta sistem je prikazan na sliki 19.11.

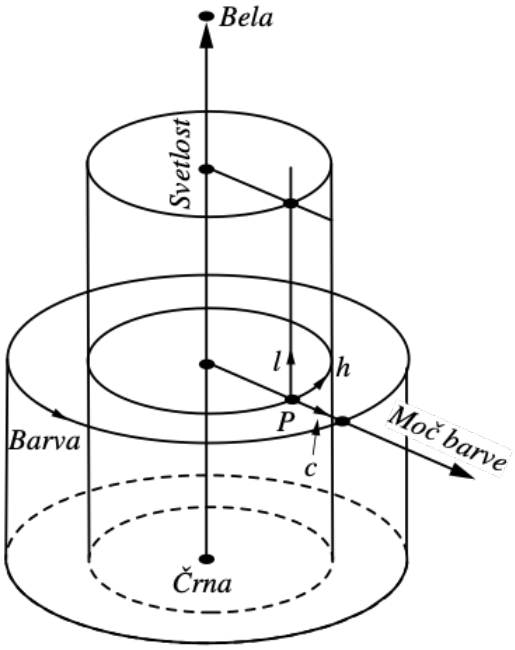


Slika 19.11: Barvno telo, v katerem so zajete vse mape in v mapah vse barvne karte, ki pripadajo Nu-Hue Color Custon Systemu.

19.3.2 Munsellov barvni sistem

Kot vidimo na sliki 19.12, je ta sistem tudi možno prikazati v obliki barvnega telesa. Okrog črno-bele osi (siva lestvica) lahko konstruiramo valje različnega premera. Barva je določena s tremi parametri: svetlostjo, močjo in nianso. Svetlost barve se povečuje, ko gremo od črne proti beli točki navzgor, oziroma od spodnje proti zgornji osnovnici valja (barvnega telesa). To se pravi, da je v določeni mešanici vedno več belega in manj črnega pigmenta. Moč barve se povečuje, ko gremo od nevtralne črno – bele osi proti

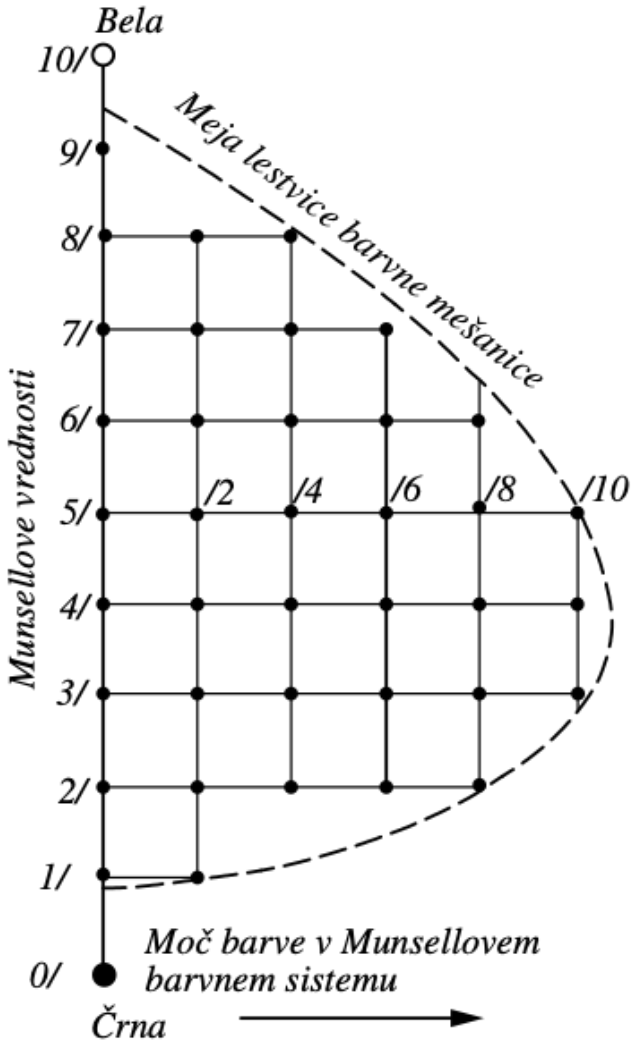
zunanjemu plašču valja. Na površini zunanjega plašča naj bi bile čiste barve. Nianso barve spreminjamo tako, da potujemo okrog valja.



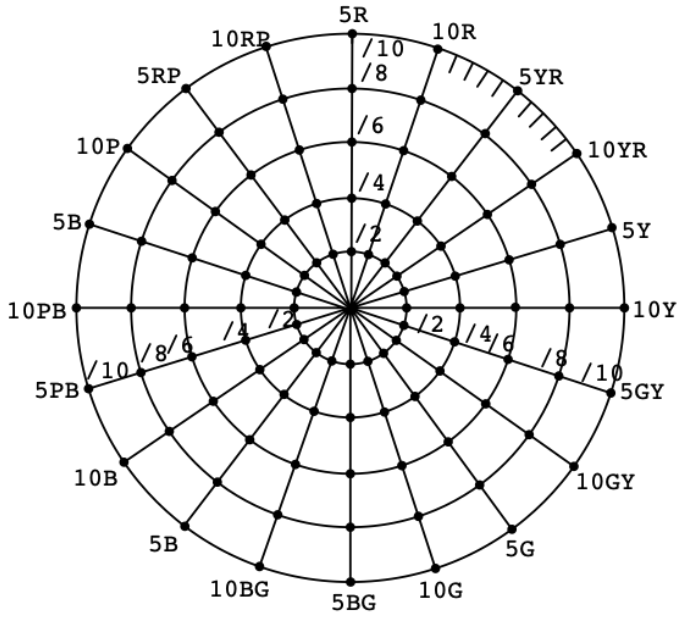
Slika 19.12: Geometrični model barvnega telesa Munsellovega barvnega sistema.

Pri spremembi vrednosti posameznega parametra moramo upoštevati dejstvo, da sta preostala dva parametra konstanti. Slika 19.12 ni dovolj za popolno razlago Munsellovega barvnega sistema. Nujno je prikazati še barvni rez (konstantna niansa) – navpični presek skozi barvno telo. Ena meja barvnega reza je vedno črno-bela – sredica barvnega telesa.

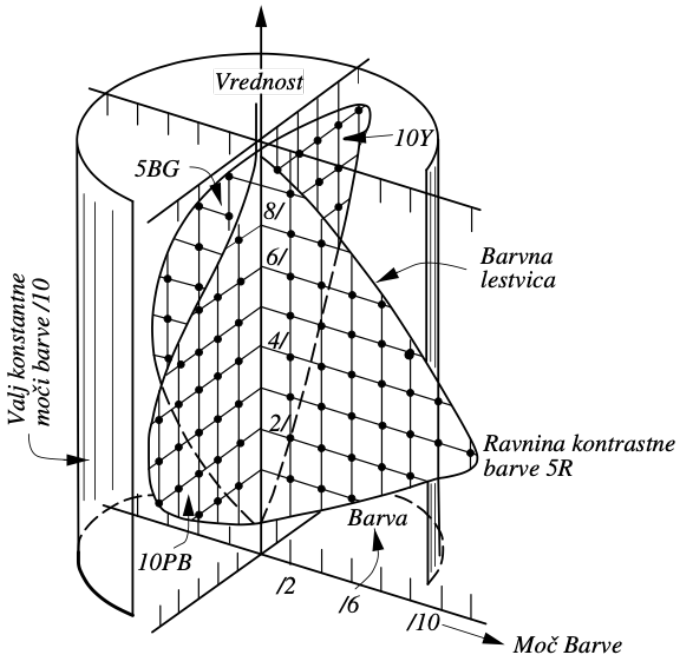
Ta je pri Munsellovem barvnem sistemu razdeljena na deset delov, slika 19.13. To velja tudi za nasičenost barve (polmer valja) vsaj na največjem premeru barvnega telesa, slika 19.14. Struktura barvnega telesa Munselleovega barvnega sistema je prikazana na sliki 19.15 in Prikaz preseka 5/ Munsellovega barvnega sistema na CIE kromatičnem diagramu na sliki 19.16.



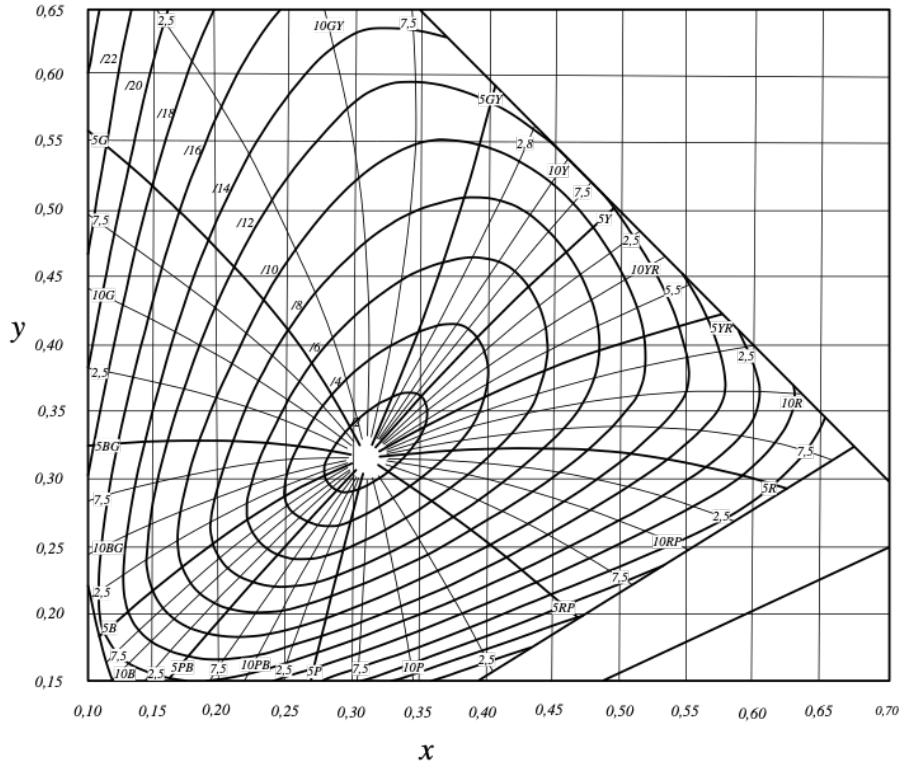
Slika 19.13: Barvni rez pri Munsellovem barvnem sistemu.



Slika 19.14: Barvni krog pri Munselleovem barvnem sistemu. Legenda: R – rdeča, Y – rumena, G – zelena, B – modra, P – vijolična, YR – rumeno-rdeča, GY – zeleno-rumena, BG – modro-zelena, PB – vijolična-modra.



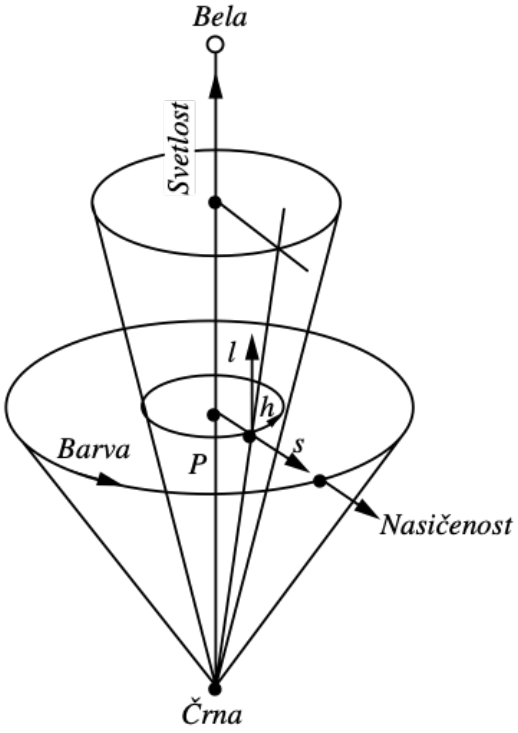
Slika 19.15: Struktura barvnega telesa Munselleovega barvnega sistema.



Slika 19.16: Prikaz preseka 5/ Munsellovega barvnega sistema na CIE kromatičnem diagramu.

19.3.3 Nemški barvni sistem

Nemški barvni sistem je predstavljen na sliki 19.17. Kot vidimo, je barva v tem sistemu določena z nianso (h), nasičenostjo (P) in svetilnostjo barve (l). Vse barve, ki ležijo na površini določenega stožca, ki ima vrh v črni barvi, imajo isto nasičenost. Barve, ki ležijo na določenem rezu, imajo isto nianso. Nasičenost barve se spreminja, ko gremo od površine stožca proti črno-beli osi telesa, ker se povečuje vsebina sive (mešanica bele in črne). Pri tem ostaja svetlost barve nespremenjena.



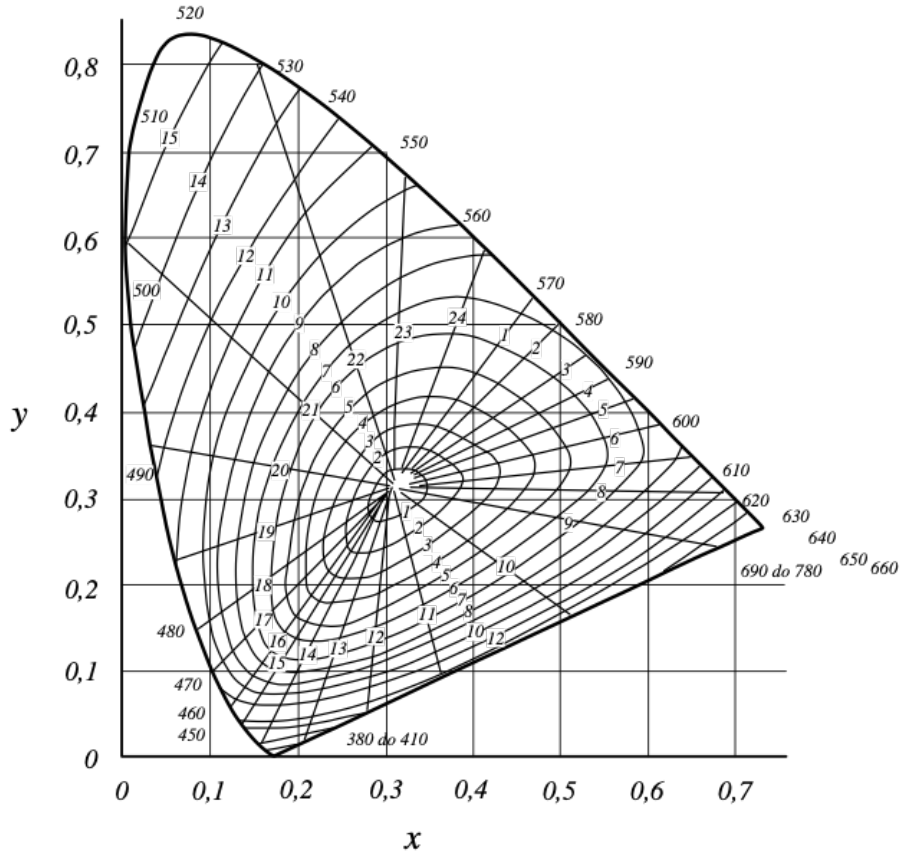
Slika 19.17: Geometrični model barvnega telesa nemškega barvnega sistema.

Dejansko se barvno telo nemškega barvnega sistema sestoji iz dveh stožcev. En stožec ima vrh v črni, drugi pa v beli barvi. Na sredini telesa (ekvator) imamo na krožnici preseka čiste barve z največjo barvno močjo – barvni krog.

Ta sistem ima 24 barvnih rezov, ki so prikazani kot premice iz barvno nevtralnega središča C na sliki 19.18. Krivulje okrog središča C predstavljajo krivulje konstantne nasičenosti barve. Ne glede na število nepravilnih krožnic okrog točke C, ima sistem le osem stopenj nasičenja. Najmanj nasičeno je področje na krivulji 1, ki je najbliže točki C, ki leži na črno-beli osi telesa. Najbolj nasičeno področje je na krivulji 8. Ta sistem sloni na Ostwaldovem barvnem krogu, v katerem so naslednje barve: rdeča, oranžna, rumeno-zelena, zelena, modro-zelena, modra in vijolična. V tem barvnem krogu leži zelena nasproti rdeči in modra nasproti rumeni, kar ni v soglasju z lego barv v barvnem krogu, ki je zasnovan na pigmentni teoriji mešanja barv, slika 19.10.

19.3.4 Švedski naravni barvni sistem

Geometrični model tega sistema je prikazan na sliki 19.19. Kot se vidi s te slike, ima ta model šest osi (šest osnovnih barv). Od tega so štiri barvne (rdeča, rumena, zelena in modra) in dve nevtralni (črna in bela). Tudi ta sistem ni v soglasju s pigmentno teorijo, saj zelena ni primarna barva, temveč sekundarna. V tem sistemu imamo najmanj 16

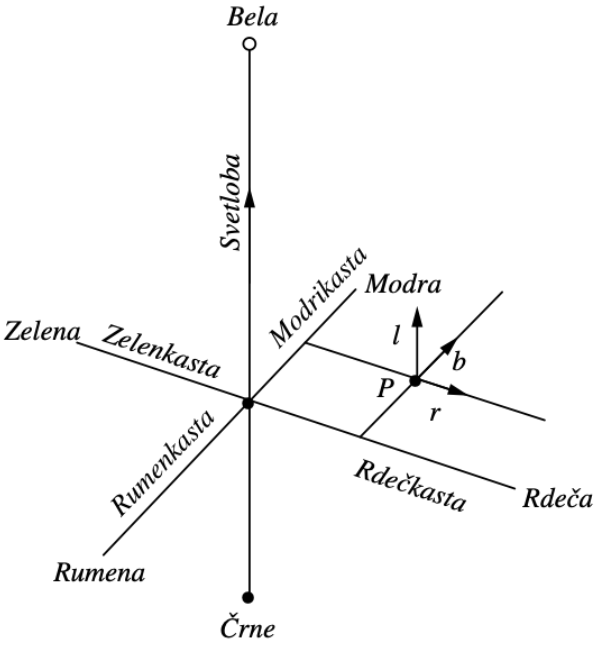


Slika 19.18: Prikaz nemškega barvnega sistema po CIE x, y kromatičnem diagramu.

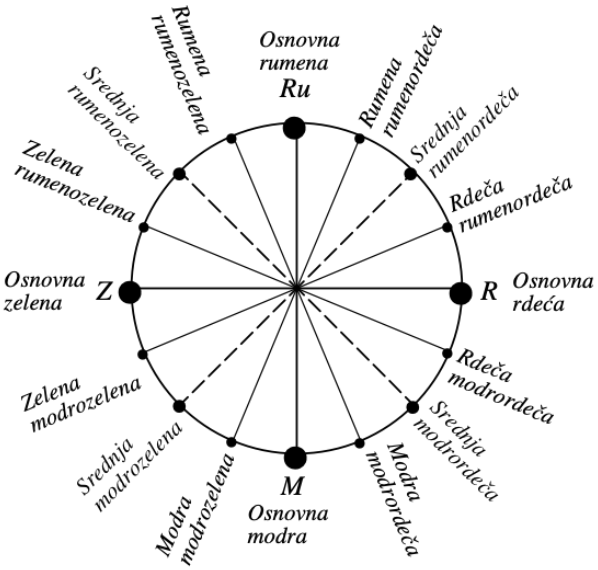
barvnih rezov. Ti rezi sekajo osnovne štiri barve, sredino med njimi in sredino med osnovno barvo ter sredino med osnovnima barvama. To je razvidno iz delitve barvnega kroga, slika 19.20. Omenjene štiri osnovne barve dejansko predstavljajo v teoriji mešanja barvne svetlobe tri primarne in eno sekundarno (rumena) barvo, ker je rumena nasproti modre. Barvno telo švedskega naravnega barvnega sistema predstavlja slika 19.21.

Barvno telo, slika 19.21, je sestavljeno iz dveh stožcev. Eden ima vrh v črni in drugi v beli barvi. Vendar telo ni simetrično glede na črno-belo os telesa. Stožca se stikata v točki, ki predstavlja rumeno barvo. Zaradi tega je barvni rez skozi rumeno barvo trikotnik. Skozi druge barve pa barvni rez nima oblike trikotnika. Na teh rezih obstajajo območja preveč nasičenosti barve, slika 19.22. V preveč nasičenih območjih je isti barvi dodan določen delež temno sive. To pomeni, da v preveč nasičenem območju imamo temne tone rdeče, modre ali zelene barve. Parametri, s katerimi ugotovimo barvo v švedskem naravnem sistemu, so: svetlost, čistost in nasičenost. Svetlost barve se povečuje, ko gremo od črne proti beli, kot je to prikazano na barvnem rezu, slika 19.23, saj je v barvi, ne glede na to, koliko je oddaljena od nevtralno črno-bele osi, vedno manj črne in vedno več bele. Izjema je vogal barvnega reza, kjer je barva čista. Ta vogal leži na krožnici barvnega kroga na najširšem delu barvnega telesa. Na krožnici barvnega kroga so čiste spektralne barve.

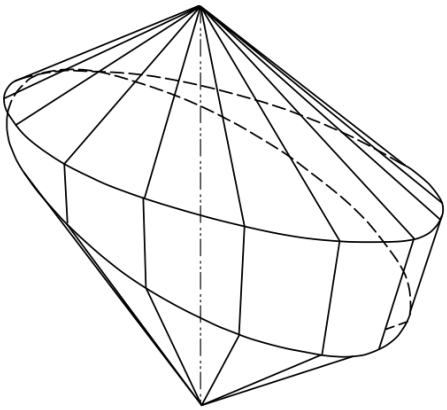
Skozi center barvnega kroga pa gre črno-bela os barvnega telesa. Moč barve se povečuje, ko se oddaljujemo od črno-bele osi barvnega telesa, slika 19.24. S tem se zmanjšuje delež sive barve v mešanici. Največjo barvno moč doseže barva na krožnici barvnega kroga. Čistost barve se povečuje, ko gremo od črne proti premici, ki povezuje belo s čisto barvo; toda premice konstantne čistosti so vzporedne z zgoraj omenjeno



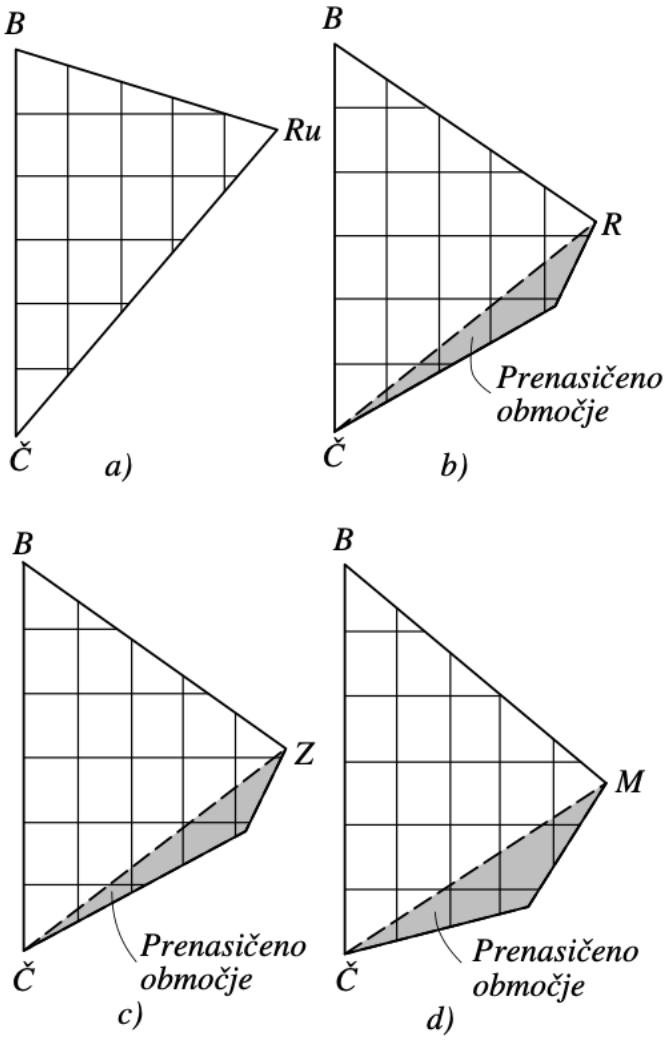
Slika 19.19: Geometrični model švedskega naravnega barvnega sistema.



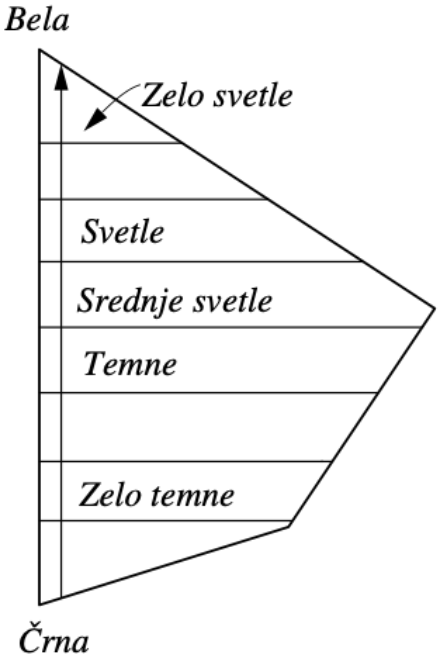
Slika 19.20: Barvni krog pri švedskem naravnem barvnem sistemu.



Slika 19.21: Barvno telo švedskega naravnega barvnega sistema.

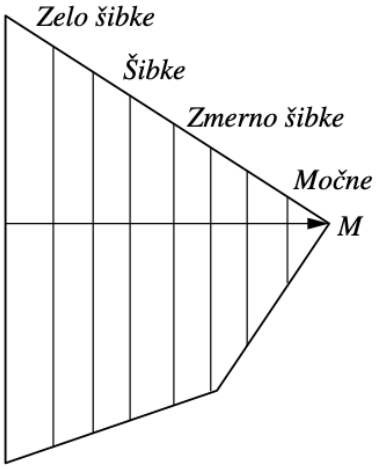


Slika 19.22: Barvni rezi osnovnih barv. Legenda: a) rumena, b) rdeča, c) zelena, d) modra.



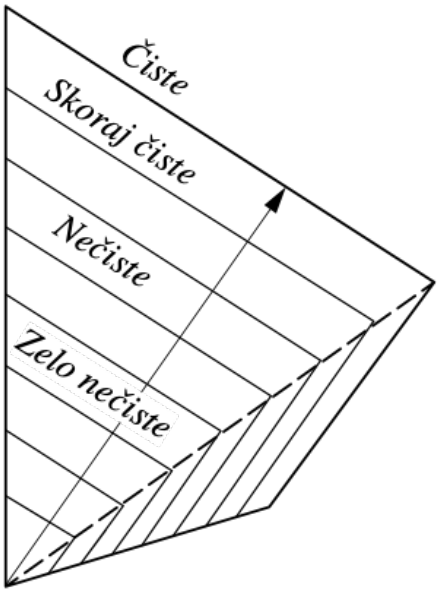
Slika 19.23: Prikaz svetlosti barve na barvnem rezu.

premico barvnega reza, na kateri je čista spektralna barva, slika 19.25.



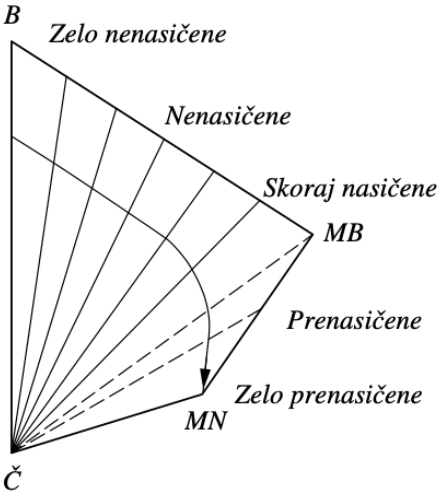
Slika 19.24: Prikaz moči barve na barvnem rezu.

Premice konstantne nasičenosti so prikazane na barvnem rezu, slika 19.26. Vse premice se združijo v točki, ki predstavlja črno barvo in se pahljačasto širijo. Najmanj nasičene so barve, oziroma mešanica določene spektralne barve in sive, v bližini črno-bele osi. Nasičene barve so na črtkani premici, ki povezuje črno in čisto spektralno barvo. Pod to premico imamo opraviti s preveč nasičenimi barvami. To velja za rdečo, zeleno in modro in njihovimi mešanicami. Isto velja tudi za mešanice rdeče in rumene ter zelene in rumene. Ko gremo od rdeče proti rumeni, se področje preveč nasičenosti postopoma zmanjšuje. Pri čisti rumeni barvi ni področja preveč nasičenosti. Največje območje preveč nasičenosti je na barvnem rezu modre barve. To je razvidno iz oblike



Slika 19.25: Prikaz čistosti barve na barvnem rezu.

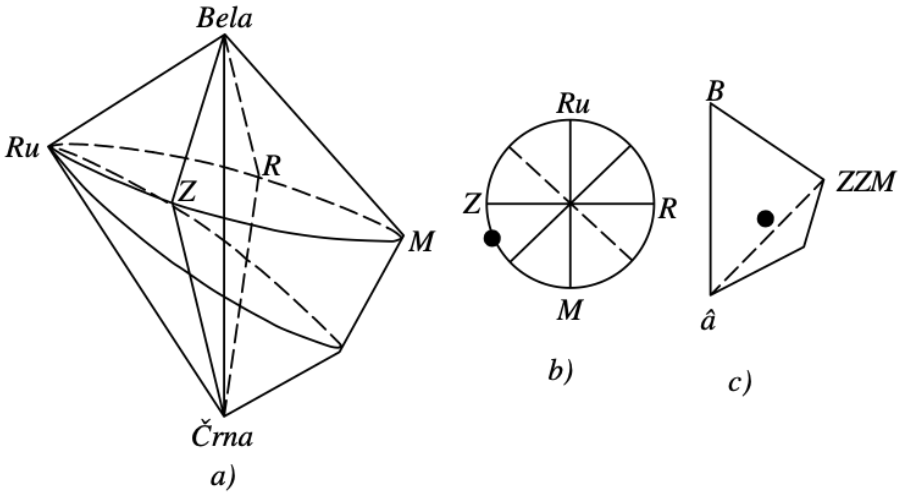
barvnega telesa, slika 19.21, in barvnih rezov spektralnih barv, slika 19.22.



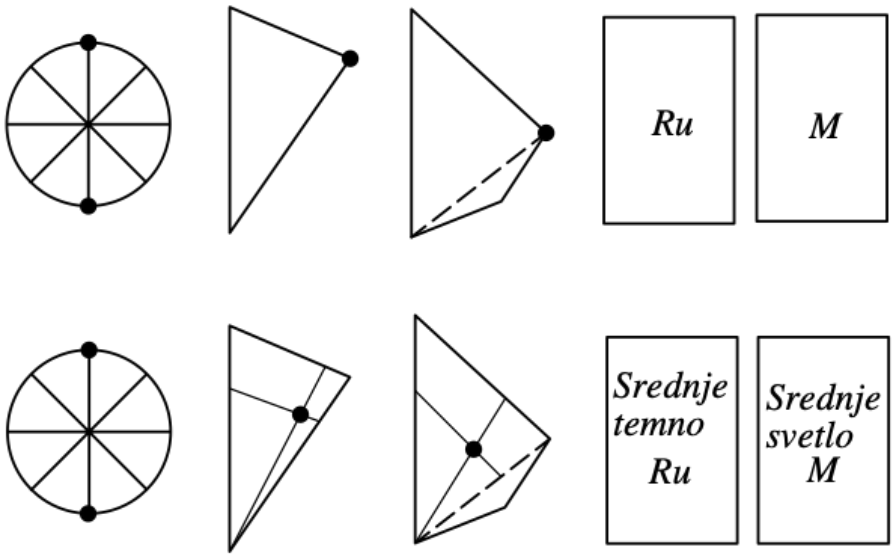
Slika 19.26: Prikaz nasičenosti barve na barvnem rezu.

Lego barve v barvnem telesu lahko ugotovimo s pomočjo barvnega kroga in barvnega reza. Na sliki 19.27a je prikazano barvno telo. Na sliki 19.27b je prikazan barvni krog, na katerem je ZZM barva, ki ima maksimalno barvno moč, medtem ko je na sliki 19.27c prikazana ZZM barva, ki je manj čista in manj močna kot na sliki 19.27b, saj ima precejšen delež temno-sive.

Očitno je, da je težko predstaviti pravo lego barve na barvnem krogu, zlasti če imamo dve ali več barv. Poleg drugega tudi zato, ker je barvno telo nepravilne oblike. Zaradi tega identificiramo barvo na barvnem krogu, na katerem ležijo osnovne barve (glavni barvni krog). Ostale parametre barve (svetlost, čistost, moč in nasičenost) pa ugotovimo iz pripadajočega barvnega reza. To pomeni, da prikažemo vse barve in barvne mešanice na enem barvnem krogu; osnovne parametre vsake posamezne barve pa prikažemo na barvnih rezih, slika 19.28.



Slika 19.27: Ugotavljanje lege barve v barvnem telesu. Legebda: a) barvno telo, b) barvni krog, c) barvni rez.

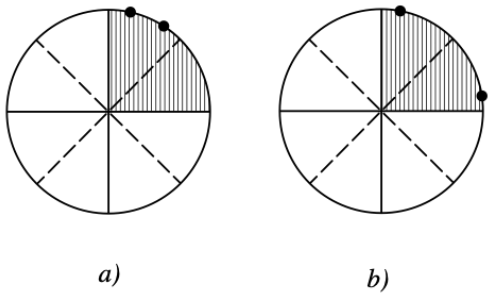


Slika 19.28: Identifikacija barv.

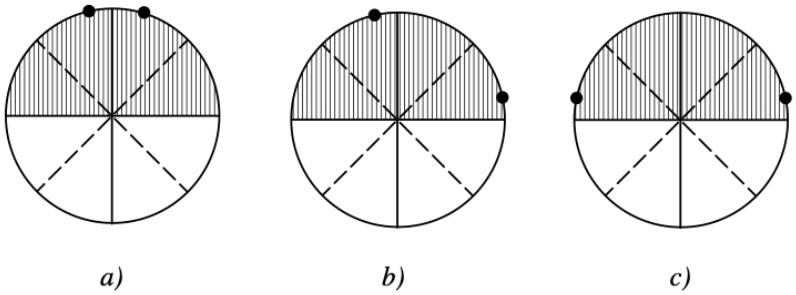
Glede medsebojne barvne odvisnosti dveh barv poznamo v švedskem naravnem barvnem sistemu tri stanja: identiteto, in-diferenco in polarnost. Če barvi ležita v istem kvadrantu, kot je to prikazano na sliki 19.29a in 19.29b, potem tvorita identiteto, saj pripadata dvema osnovnima barvama, ki sledita druga drugi v barvnem krogu. V našem primeru, slika 19.29, sta to rumena in rdeča. Če barvi ležita v sosednjih dveh kvadrantih, tvorita in-diferenco, slika 19.30a in 19.30b ter 19.30c. V tem primeru je vsaka barva sestavljena iz dveh osnovnih barv, toda tako, da imata eno barvno komponento skupno. Na sliki 19.30 je to rumena barva.

Če ležita barvi v nasproti ležečih kvadrantih, nimata skupne barve in ta primer imenujemo polariteta, sliki 19.31a in 19.31b. V tem primeru so zastopane vse štiri osnovne barve, v vsaki barvi po dve. V vseh navedenih primerih je predpostavljeno, da nobena od dveh opazovanih barv ni osnovna barva kljub temu, da sta lahko zelo blizu osnovni barvi.

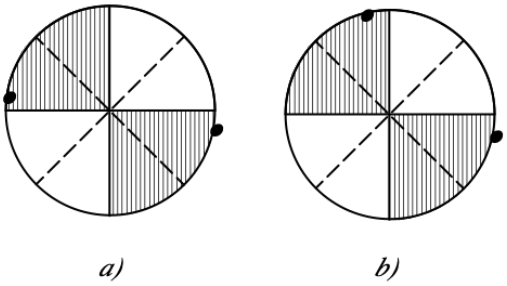
Švedski barvni sistem je imenovan naravni zaradi psihološkega učinka barv. Če



Slika 19.29: Identiteta barv.



Slika 19.30: Indiferenca barv.



Slika 19.31: Polariteta barv.

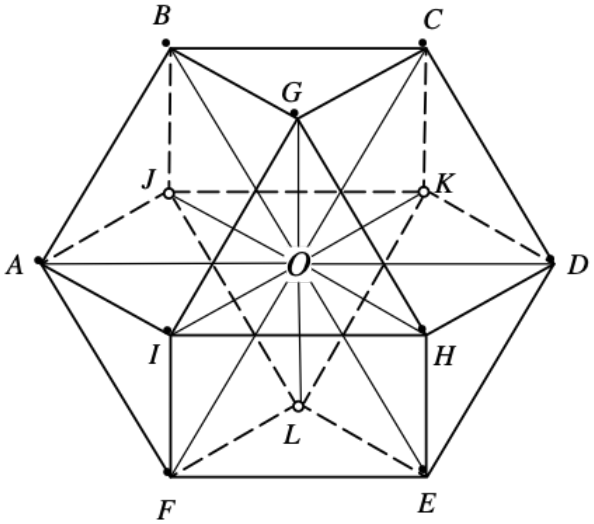
izhajamo iz pigmentne teorije mešanja barv, ta sistem ni naraven, ampak umetno konstruiran, tako da je prilagojen psihološkemu doživetju uporabnika.

19.3.5 Prikaz barvnega prostora objekta v regularni romboederski rešetki

Če želimo objektivno prikazati barvni sistem v popolnoma enoličnem barvnem prostoru, moramo uporabiti takšno shemo, pri kateri ne bomo uporabljali lestvice nians, tonov, nasičenosti ali nekaterih elementov švedskega barvnega sistema. Če uporabljamo takšne parametre, moramo uporabiti polarni koordinatni sistem, kot je prikazan na sliki 19.12. Res je, da je razmak enak vzdolž krožnic, spremembe nians pa tudi vzdolž premic, spremembe tona od centra proti krožnici, toda stopnja razlike med sosednjima barvama raste, ko se oddaljujemo od sive barve (center kroga).

Pri švedskem naravnem barvnem sistemu razlika med sosednjimi osnovnimi barvami ni enaka. Če na primer razdelimo področje med rumeno in rdečo na deset delov (enakomerna sprememba barve ali nianse od rumene do rdeče) in so pri tem sij, nasičenost ali ton konstantni, bi rabili 20 do 50 enakih korakov od osnovne rdeče do osnovne modre za enake spremembe nianse ali barve.

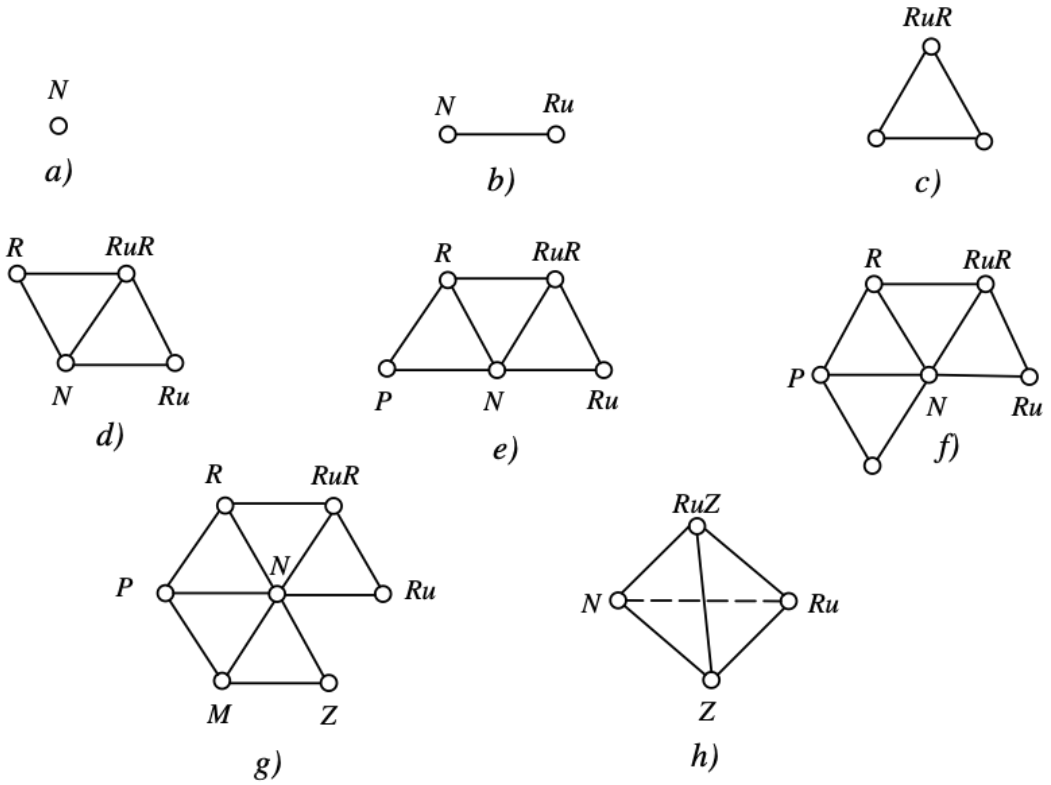
Za enoličen prikaz barv v barvnem prostoru je najbolj primerna regularna romboederska rešetka, slika 19.32. To telo dobimo z rezanjem vogalov kocke do polovice vsakega roba. Potemtakem so vogali od A do L na sliki 19.32 nastali na polovici robov prej omenjene kocke. Vsak vogal je obdan s šestimi drugimi, ki so v enaki oddaljenosti od njega. Pa tudi vsi vogali so enako oddaljeni od centra telesa O. To se pravi, da vogali od A do L ležijo na sferi, katere center je v točki O.



Slika 19.32: Kubični oktaeder kot osnovno telo za tvorbo barvnega prostora v regularni romboederski rešetki.

Lahko vstavimo nevtralno (sivo) barvo na katerikoli vogal telesa in začnemo razporejati barve okrog te točke. Pri tem moramo ugotoviti svetlost nevtralne (sive) barve. Čim bliže je ta barva beli barvi, tem bolj je svetla in čim bliže je črni, tem manj je svetla. Pri tem barvnem sistemu velja osnovna predpostavka, da na določeni lupini (sferi) ležijo barve, ki imajo isto svetlost. Druge parametre kakovosti barve zanemarimo. Svetlost barv bomo predstavili z razdaljo med posameznimi vogali telesa. Če upoštevamo dejstvo, da je okrog izbrane točke (vogala) nevtralne barve nameščeno šest točk (vogalov) v enaki medsebojni razdalji, lahko na teh šestih vogalih razmestimo tri primarne in tri sekundarne barve, tako, kot jih predvideva pigmentna teorija (rumena, oranžna, rdeča, vijolična, modra in zelena). Medsebojna lega teh barv je prikazana na barvnem krogu na sliki 19.36. Center tega barvnega kroga je določena nevtralna bela barva. Ko smo izbrali lego nevtralne (sive) barve, N na sliki 19.33a, povežemo to točko z eno sosednjih točk (vogalov), ki naj bo čista primarna rumena barva, slika 19.33b. Razdalja med tema dvema barvama je izbrana tako, da ima rumena isto svetlost kot nevtralna barva. Potem izberemo lego rumeno-rdeče (oranžne) barve, slika 19.33c, rdeče, slika 19.33d, vijolična P (vijolična), slika 19.33e, modre, slika 19.33f in zelene, slika 19.33g. Dokazati se da [15], razdalja med zeleno in rumeno, oziroma razlika svetlosti med njima nekoliko razlikuje glede na druge barve, prikazane na sliki 19.33g. Zaradi tega se predpostavlja, da naše zaznavanje barv odgovarja razmestitvah le-teh na sferni površini in ne v euklidovskom prostoru, saj je razmerje med krožnico barvnega kroga in polmerom tega kroga večje kot π.

Mogoče niti ni možno sestaviti (dobiti) idealne kolekcije barvnih etalonov, toda lahko dobimo aproksimacijo, ki se približuje idealnemu stanju bolj, kot pri kateremkoli prej omenjenem sistemu. Na sliki 19.33 smo razporejali barve na ravnini. Za rešitev pro-



Slika 19.33: Postopek konstrukcije kolekcije etalonov barv, ki so razvrščeni na podlagi regularne romboederske rešetke.

blema se lahko poslužimo z Riemmannovo geometrijo in zakrivljenega prostora. Podrobna razlaga je precej težka, ker bi morali poznati Riemmannove površine in Riemmanov prostor. Zaradi tega se bomo poslužili le opisa možnega postopka približanja idealnemu stanju. Vsaka premica, MZ, MP, PR ipd. se mora nekoliko podaljšati, tako da se vse izenačijo s premico ZRu. Potemtakem je vsaka od teh premic ali razdalj nekoliko daljša od radialne razdalje NR, NP, NRu ipd. S to metodo nadaljujemo pri vseh barvah enake svetlosti. Pri tem dobimo tudi lestvico barv na različnih nivojih. Nivoji se med seboj razlikujejo; za to vnaprej izbrano stopnjo svetlosti. Naslednji nivo, lupina ali plast barv, je temnejši ali svetlejši od prve plasti, kar je odvisno od lege prve plasti oziroma nevtralne barve in smeri, v katero gremo. Naslednji nivo svetlosti barv začnemo konstruirati po principu, prikazanem na sliki 19.33. Barve R, Z in Ru tvorijo bazo tetraedra in so, na primer, obenem del prve plasti ali nivoja. Potem izberemo četrti vogal tetraedra RuZ, tako da je glede razlike svetlosti enako oddaljen od N, Ru in Z. Potemtakem je ta točka ali vogal tetraedra že na površini naslednje sfere, lupine, nivoja ali plasti.

Naslednji korak je i. V tem koraku najdemo barvo, ki se glede svetlosti enako razlikuje od barv N, P (vijolična – vijolična) in M. V koraku j najdemo barvo, katere svetlost se enako razlikuje od svetlosti barv N, R in RRu. Na ta način prostorsko določena lega treh novih točk obenem pomeni določitev lege naslednje sfere, na kateri ležijo barve, ki se razlikujejo od barv, ki ležijo na prvi sferi, za točno določeno vrednost svetlosti. Po tem postopku se konstruirajo še vse naslednje sfere.

V čem je bistvena razlika med tem sistemom in prej omenjenimi sistemi? Osnovna razlika in prednost tega sistema je v tem, da popolnoma upošteva pigmentno teorijo ali realne lastnosti pigmentov. Navidez bi bila pomanjkljivost te teorije v tem, ker upošteva

le svetlost barv, oziroma razlike stopnje svetlosti, ne pa tudi drugih parametrov kakovosti barv, ki so dostopni našemu zaznavanju. Ne obstaja tudi kontinuirana siva skala. Dejansko so vse te pomanjkljivosti izničene z dodatkom večplastne strukture prikaza barv na zaporednih sfernih lupinah. Med barvami in lupinami lahko izberemo takšno razliko svetlosti barv, ki jo še zaznava oko. Manjše razlike od te nimajo posebnega praktičnega pomena, ker jih ne zaznavamo. V tem sistemu se torej tudi nevtralna barva stopničasto spreminja od svetle (skoraj bele) do temne (skoraj črne). S to spremembo so zajete tudi spremembe parametrov, ki so značilni za prej omenjene sisteme, oziroma lahko sledimo spremembi teh parametrov kljub temu, da nimajo nobene vloge pri konstrukciji sfernih lupin tega sistema. Kot v prejšnjih barvnih sistemih imamo tudi v tem kolekcijo barvnih etalonov, ki tvorijo skupine. Vsaka skupina pripada določeni sferni lupini.

19.4 Barvni standardi in merilna tehnika

19.4.1 Barvni standardi

Najprej je treba definirati, kaj pomeni izraz "barvni standard". Z barvnim standardom bomo razumeli vrednosti določenih parametrov, s katerimi je opredeljena določena barva ali pa barvne karte in lega barve na barvnem krogu in barvnem rezu barvnega telesa kateregakoli barvnega sistema.

Glede na barvne sisteme določimo ali identificiramo barvo na tri različne načine. Po CIE sistemu določimo valovno dolžino ter x, y in z kromatske koordinate pri uporabi iluminantov A, B, C, D_{55}, D_{65} in D_{75}. Čeprav je ta sistem s fizikalnega stališča natančen, ne omogoča opisa psihološkega doživetja barve. Upoštevati je treba dejstvo, da je pri oblikovalcih bolj razvita umetniška kot znanstvena komponenta in da le-ti komunicirajo z uporabniki svojih barvnih kompozicij na podlagi umetniškega ali psihološkega doživetja ne glede na to, ali gre za umetniško delo ali koloristiko industrijskega proizvoda, kot je to obarvani tekstilni izdelek. Če upoštevamo to dejstvo, CIE sistem ni najbolj praktičen kot metoda za kvantificiranje barvnih kompozicij tekstilnih izdelkov.

Drugi način identifikacije ali kvantificiranja barv sloni na sistemih, ki upoštevajo tudi psihološko komponento, kot so Munsellov, nemški ali švedski sistem. Ti sistemi omogočajo plastično ugotavljanja lege določene barve v barvnem telesu; torej v tridimenzionalnem prostoru s pomočjo barvnega kroga in barvnega reza. Pri tem je določena lega barve (rdeča, modra, zelena ipd.) in nekatere njene značilnosti, kot so: čistost, nasičenost, svetlost ipd. Kot je bilo že omenjeno, se ti sistemi lahko povežejo s CIE sistemom in se na ta način dobi popolnejši opis barve. V tem primeru bi bilo nujno, da oblikovalci dobro obvladajo CIE sistem.

Tretji način identifikacije ali kvantificiranja barv nam omogoča sistem regularne romboederke rešetke. Pri tem sistemu je barva določena s svetlostjo in lego sfere glede na sivo lestvico oziroma določeno nevtralno (sivo) barvo. Tu je možno podati kolekcijo barvnih etalonov glede na razdelitev sive lestvice. Ta se ponavadi razdeli od 0 (črna) do 10 (bela). Črna in bela nimata pomena, ker je pri črni svetlost približno 0, pri beli pa približno 100 %. Iz tega izhaja, da bi v tem primeru lahko odbrali vsaj 9 točk na sivi lestvici za ugotavljanje svetlosti barv glede na izbrano nevtralno (sivo) barvo. Torej si lahko zamislimo 9 sfer ali polobel, pri katerih je vrh (pol) poloble določena nevtralna barva. V tem vrhu prehajajo primarne in sekundarne barve v nevtralno (sivo) barvo; oziroma od vrha poloble postopoma prehajajo barve iz nevtralne v določeno primarno ali sekundarno barvo - odvisno od tega, v smeri katere barve gremo proti robu (ekva-

torju) poloble. Pri tem je razlika svetlosti med barvami in nevtralno (sivo) barvo vedno enaka ne glede na to, ali jih opazujemo na ekvatorju (rob poloble) ali na kateremkoli vzporedniku vzdolž meridianov. Svetlost barv se zmanjšuje, ko gremo od bele proti črni. Z vzporedniki bi lahko razdelili poloblo na, na primer, 10 delov (razdelitev poldnevnikov - meridianov na 10 enakih delov). Pri tem bi na vsaki polobli za vsako barvo dobili po 10 etalonov ali skupaj za celotni sistem 540 etalonov. Vsak etalon je možno označiti z dvema številkama in črko. Prva zaporedna številka lahko pomeni številko poloble (1 do 10), druga zaporedna številka vzporednik (1 med ekvatorjem in prvim vzporednikom; 10 med devetim vzporednikom in polom, v katerem je nevtralna (siva) barva). Če je barva označena na primer s $53Ru$, pomeni, da je ta rumena (Ru) barva na peti polobli (približno na polovici razdalje med belo in črno) in leži med drugim in tretjim vzporednikom.

Ti sistemi nam omogočajo locirati barvo, toda ničesar nam ne povedo o medsebojnem vplivu barv v določeni barvni kompoziciji. Zaradi tega se bomo v naslednjem pospoglavju nekoliko podrobneje ukvarjali s tem vprašanjem.

19.4.2 Merilna tehnika

S pomočjo kolorimetrov različnih izvedb lahko celo vizualno opazujemo barve na tkanini ipd. v različnih svetlobnih kombinacijah, ki nam ponazarjajo svetlobo v različnih obdobjih dneva ali različnih stopnjah oblačnosti. Takšna metoda se uporablja predvsem za primerjavo barv standardiziranega vzorca in izdelanega vzorca na podlagi standardiziranega. Se pravi, da se vizualno ugotavljajo razlike parametrov barv (ton, niansa, svetlost, moč, čistost, ipd.).

S pomočjo posebnega kolorimetra je možno izmeriti odstotek refleksije vpadne svetlobe od ploščine, obarvane z določeno barvo. Odstotek refleksije se meri v vidnem in infrardečem delu spektra. Dobljeni rezultati se primerjajo s predpisanimi. Uporablja se predvsem za maskirne predmete (obleke, mreže, ponjave ipd.). Za ta namen se uporabljajo posebne barve. Maskirnost se uporablja izključno za vojaške namene. Vrednosti refleksij posameznih barv se ugotovijo na podlagi meritev refleksij podobnih barv v naravnem okolju v različnih letnih časih. Vsaki barvi pripada določena valovna dolžina. Valovno dolžino lahko izmerimo s spektro foto-metrom. Te meritve so pomembne za CIE sistem.

Druga skupina metod meritvene tehnike so metode, ki služijo za ugotavljanje obstojnosti barv (na svetlobo, proti pranju, drgnjenju, znojenju, vodi, kislinam, alkalijam ipd.). Metode so primerjalne. Ocene obstojnosti so 1 do 5, razen na svetlobo, kjer so ocene od 1 do 8.

Obstojnost na svetlobo merimo s pomočjo Xenotest aparata, v katerem se vzorci in kontrolni vzorci osvetljujejo s xenon žarnico, ki izžareva svetlobo, katere spekter je zelo podoben spektru sončne svetlobe. Kontrolni vzorci so izrezani iz modro obarvanih tkanin, ki imajo obstojnost od 1 do 8. postopek je zelo enostaven. Po določenem času osvetlitve kontroliramo spremembo barve vzorcev ter primerjamo s kontrolnimi vzorci. Če je sprememba barve na vzorcu enaka spremembi barve na primer na kontrolnem vzorcu, ki ima obstojnost 5, potem je obstojnost barve vzorca na svetlobi 5.

Samo del vzorcev in kontrolnih vzorcev je izpostavljen osvetlitvi, da bi se lahko primerjala sprememba odtenka (nianse) barve. Ponavadi je obstojnost predpisana. Dejanska obstojnost se lahko razlikuje od predpisane. Včasih obstojnost ni predpisana; tedaj ne vemo, kakšna je. Zaradi pomanjkanja informacij o obstojnosti in verjetnosti, da so možna določena odstopanja od predpisane vrednosti obstojnosti proti svetlobi,

se v standardih, ki predpisujejo postopek preiskave obstojnosti, predpiše tudi čas prve kontrole obstojnosti na svetlobo. Ta je krajši od standardnega časa preizkušanja. Orientacijski časi preskušanja obstojnosti tkanine na svetlobo v Xenotest aparatu so podani v preglednici 19.3 [16]. Obstojnost barv na svetlobi je možno preizkušati tudi v naravnih okoliščinah, tako da se vzorci in standardni (testni) vzorci izpostavijo naravni sončni svetlobi. Ta metoda je nepraktična (predolgo traja), zaradi česar se ne uporablja. Poleti bi bila za silo še uporabna, toda jeseni in pozimi, ko je premalo sončnih dni, bi preizkušanje trajalo predolgo, kar je nesprejemljivo za normalen potek proizvodnje.

Preglednica 19.3: Čas preizkušanja obstojnosti barv na svetlobi v odvisnosti od stopnje obstojnosti.

Stopnja obstojnosti	Prva kontrola obstojnosti [ur]	Predpisani čas preizkušanja [ur]
1	1 do 2	2 do 4
2	2 do 3	8 do 12
3	3 do 4	30 do 40
4	6 do 8	70 do 100
5	15 do 20	140 do 180
6	30 do 40	240 do 280
7	80 do 100	280 do 360
8	160 do 180	500 do 600

Druge obstojnosti, ki se ocenjujejo z 1 do 5, se preizkušajo s pomočjo predpisanih metod in se dobljena sprememba barve primerja s standardno sivo lestvico. Na podlagi te primerjave se da ocena obstojnosti barve.

19.5 Praktična uporaba barvnih teorij in barvnih sistemov [16]

19.5.1 Lesk

Preden sploh začnemo razpravljati o učinku barve ali barvnih kombinacij na videz določenega tekstilnega izdelka, je nujno pretehtati vpliv strukture površine tekstilnega izdelka na videz površine in tudi učinek barve, če je obarvan. Pri tem mislimo predvsem na lesk, ki je značilen za nekatere vrste tekstilnih izdelkov - predvsem tkanin. Intenziteta leska je odvisna od kakovosti površine vlaken (gladkosti površine in oblike prečnega preseka), lege vlaken v preji (stopnje paraliziranosti vlaken), vezave in uporabljene tehnike oplemenitenja. Če je površina gladka, odseva svetlobo podobno kot zrcalo. Zaradi tega imajo takšna vlakna zelo močan lesk. To velja predvsem za kemična vlakna in tudi za naravno svilo. Bombažu se lahko poveča lesk s postopkom mercerizacije. Lesk pogosto ni zaželen. V tem primeru se vlakna obdelajo s pomočjo soli težkih kovin oziroma pigmentov (TiO_2 ipd.); ali pa se proizvajajo vlakna, ki nimajo okroglega preseka, temveč zvezdastega. Zaradi tega se zmanjša lesk.

Kot je bilo že rečeno, je lesk odvisen tudi od drugih pogojev. Če imamo opravka s štapelnimi vlakni, je lesk, ki ga daje preja in tkanina ali pletenina, izdelana iz te preje, odvisen od lege vlaken v preji. Lega vlaken pa je odvisna od postopka predenja (česanka ali mikanka), števila zavojev kot tudi finosti preje. Če predpostavimo, da je preja predena po enakem postopku, potem bo večja verjetnost, da so vlakna bolj vzporedna (večji lesk) pri finejši preji, kot pri bolj grobi.

Struktura površine tkanin, ki je predvsem odvisna od vrste vezave (pri nespremenjeni gostoti in kakovosti preje), lahko precej vpliva na intenziteto leska. Čim večja je površina enako usmerjenih niti in s tem tudi vlaken, tem večji bo lesk. To dosežemo predvsem z atlasovo vezavo, pri kateri je prevladujoč osnovni ali votkovi efekt.

Poleg mercerizacije lahko dosežemo povečanje leska tudi z likanjem ali kalandriranjem. Zaradi uporabe pare, temperature in visokega pritiska se površina tkanine zelo izravna, kar povzroči bolj pravilno odsevanje vpadne svetlobe s površine tkanine – poveča se lesk tkanine.

Lesk bo vsekakor vplival tudi na učinek določene barve ali barvne kompozicije. Močan lesk vpliva, da živa bleščeča barva še bolj izstopa, kar je včasih nezaželeno. Vsekakor moramo upoštevati lesk kot pomemben element, ki lahko vpliva pozitivno ali negativno na učinek določene barve ali barvne kompozicije.

19.5.2 Uporaba teorije mešanja barvne svetlobe in pigmentne teorije mešanja barv

Teorije mešanja barv igrajo pomembno vlogo tako v tehnologiji barvanja kot pri učinku, ki ga ima obarvan tekstil na naše oko oziroma naše doživetje barve. Preden začnemo barvati, moramo imeti jasno predstavo, kakšno barvo si želimo, oziroma kakšen barvni učinek naj da na primer, obarvana tkanina. Idejo za desen lahko narišemo na papir ali pa že imamo gotove desene na tkanini, ki jih želimo ponoviti. Pri tem moramo vedeti, kakšne obstojnosti morajo imeti barve, iz katere vrste vlaken je izdelana tkanina, katere vrste barv so najbolj primerne za barvanje dane tkanine, s katerimi vrstami barv razpolagamo, koliko katera barva vpliva na ceno ipd. Seveda moramo vedeti, kakšne barve dobimo z mešanjem barv in glede na želene tone in odtenke moramo tudi oceniti deleže posameznih barv v mešanici, ki nam da želen odtenek oziroma barvo. Pri tem uporabimo pigmentno teorijo mešanja barv, slika 19.10 in 19.34c. Kot vidimo s slike 19.10, prihaja pri mešanju pigmentov do subtrakcije barv.

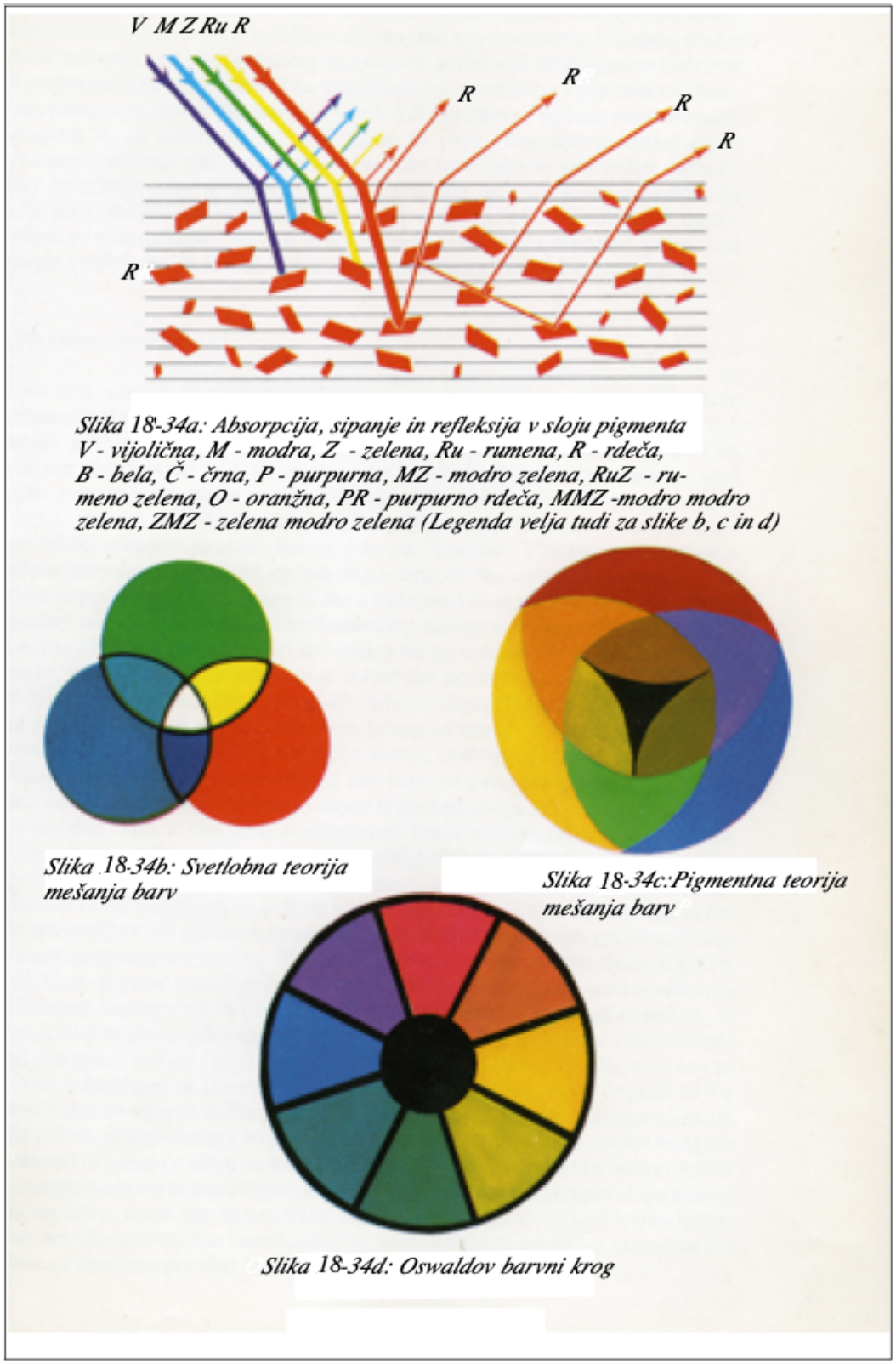
Ta pa je v izjemnem primeru popolna (enaki deleži rumene, rdeče in modre barve). Telo je obarvano s tisto barvo, ki jo zaznamo. Zato pravimo, da je telo obarvano z na primer rdečo barvo, slika 19.35.

Obarvano telo ali kakršnokoli drugo telo vidimo le, če opazovano telo odseva svetlobo določene valovne dolžine (obarvano telo) ali pa odseva kontinuirani spekter vidne svetlobe (belo telo). Če pa telo absorbira vso vpadno svetlobo, ga vidimo kot črno telo. Obarvano telo ima torej to lastnost, da odseva le del vpadne svetlobe, toda samo določene valovne dolžine. Svetlobo drugih valovnih dolžin absorbira.

Na podlagi teorije mešanja pigmentov lahko sklepamo, katere valovne dolžine vpadne svetlobe bo odsevala površina tkanine in kakšna bo intenziteta odsevane svetlobe. Primarne barve bodo odsevale precej svetlobe določene valovne dolžine, sekundarne manj, terciarne pa še manj.

Na tkanini je lahko več različnih barv druga poleg druge. Posamezne barve lahko prekrivajo določen delež površine tkanine, če je tkanina, na primer, tiskana, ali stkana iz raznobarvnih niti (progaste ali kariraste tkanine), ki ležijo druga poleg druge. Postavlja se vprašanje, kako učinkujejo tako locirane različne barve na opazovalca. Oko zaznava odsevano barvno svetlobo s površine tkanine, skupni učinek barv pa se mora ujemati s teorijo mešanja barvne svetlobe.

Teorijo mešanja barvne svetlobe lahko ilustriramo s pomočjo barvnega kroga, slika 19.35, in s teorijo mešanja pigmentov s pomočjo barvnega kroga, slika 19.36.



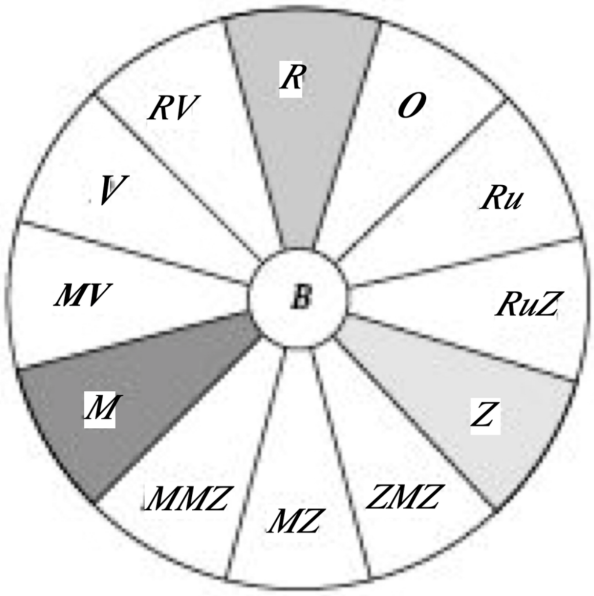
Slika 18-34a: Absorpcija, sipanje in refleksija v sloju pigmenta V - vijolična, M - modra, Z - zelena, Ru - rumena, R - rdeča, B - bela, Č - črna, P - purpurna, MZ - modro zelena, RuZ - rumeno zelena, O - oranžna, PR - purpurno rdeča, MMZ -modro modro zelena, ZMZ - zelena modro zelena (Legenda velja tudi za slike b, c in d)

Slika 18-34b: Svetlobna teorija mešanja barv

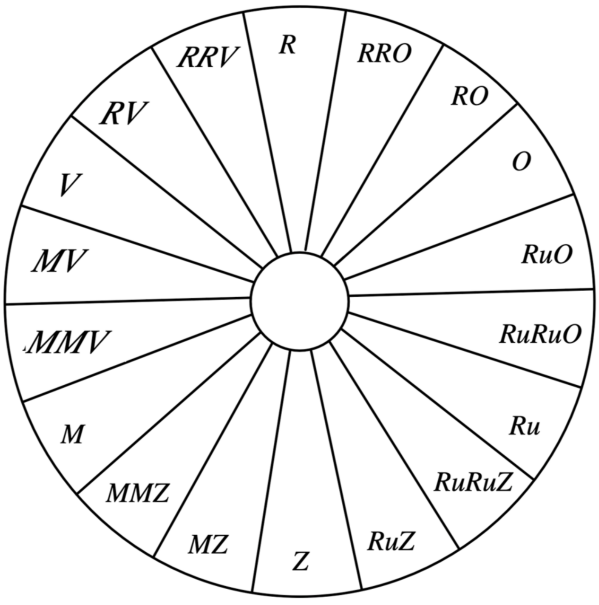
Slika 18-34c:Pigmentna teorija mešanja barv

Slika 18-34d: Oswaldov barvni krog

Slika 19.34: Pregled teorij mešanja barv.



Slika 19.35: Lega barv v barvnem krogu, ki se ujema s teorijo mešanja barvne svetlobe (rdeča, zelena in modra so primarne barve).



Slika 19.36: Lega barv v barvnem krogu, ki se ujema s pigmentno teorijo mešanja barv (rdeča, rumena in modra so primarne barve; v centru kroga je siva barva).

Na sliki 19.35 so nasproti ležeče barve komplementarne in so v maksimalnem medsebojnem kontrastu. To so: rdeča in modro zelena; zelena in vijolična (purpurna) *P*); modra in rumena ipd.

Na sliki 19.36 niso prikazane samo primarne in sekundarne barve, temveč tudi mešanice med primarnimi in sekundarnimi. Zaradi tega je na tem barvnem krogu 18 barv. Barve na barvnem krogu so čiste (primarne) ali pa so nastale z mešanjem in dodajanjem druge barve, dodajanjem bele ali črne ter dodajanjem bele in črne.

Z dodajanjem druge barve spreminjamo odtenek barve, z dodajanjem črne ali bele spreminjamo ton barve; ter z dodajanjem črne in bele spreminjamo tudi ton barve, toda vzdolž sive lestvice. Te tri kombinacije so prikazane v preglednici 19.4. Prikazano je sedem različnih barvnih kombinacij od *A* do *G*. Pri prvi mešanici ima kombinacija *A* 80 % rumene in 20 % modre barve. Torej bo ta kombinacija močno vlekla na rumeno z odtenkom zelene. Pri kombinaciji *D* pa imamo 50 % rumene in 50 % modre. V tem primeru bomo dobili zeleno barvo. Pri kombinaciji *G* pa modro zeleno barvo. V drugi mešanici je kombinacija *A* zelo svetla ali temno rdeča. Ker pa je rdeče barve le 12,5 %, bo rdeča prišla do izraza pri mešanju z belo barvo, pri mešanju s črno pa bo komaj opazna. Odstotek rdeče se veča do kombinacije *G*, pri kateri je le 12,5 % bele ali črne in 87,5 % rdeče barve. S takšnimi kombinacijami lahko dobimo učinek senčenja. Namesto rdeče lahko uporabimo katerokoli drugo barvo.

Preglednica 19.4: Modifikacija barv.

Mešanica	Sestava mešanice	Kombinacija *A*	*B*	*C*	*D*	*E*	*F*	*G*
1	rumena	4	3	2	1	1	1	1
	modra	1	1	1	1	2	3	4
2	bela ali črna	7	5	3	1	1	1	1
	rdeča	1	1	1	1	3	5	7
3	bela	1	2	3	4	5	6	7
	črna	7	6	5	4	3	2	1
	rdeča	1	1	1	1	1	1	1
4	bela	7	7	7	7	7	7	7
	črna	7	7	7	7	7	7	7
	modra	1	2	3	4	5	6	7

V tretji mešanici mešamo belo, črno in rdečo. V kombinaciji *A* je okrog 11 % bele in 11 % rdeče, ostalo je črna. Učinek bo zelo temnordeč. V ostalih kombinacijah se delež rdeče ne spreminja, toda postopno se povečuje delež bele in zmanjšuje delež črne. Pri kombinaciji *D* imata enake deleže in dobimo rdeče-sivo barvo. Pri kombinaciji *G* dobimo svetlo-rdečo barvo. V četrti mešanici sta količini bele in črne nespremenjeni. Spreminja se količina modre barve. Ker je enaka količina črne in bele, daje njihova mešanica sivo. V kombinaciji *A* dobimo sivo-modro, kjer se modra komaj zaznava. Ko gremo proti kombinaciji *G*, je modre barve zmeraj več in je kombinacija *G* v sivo-modri barvi

19.5.3 Učinek barvne kompozicije

19.5.3.1 Barvni kontrast

19.5.3.1.1 Splošno. Barvni kontrast lahko nastane le, če sta dve ali več barv druga poleg druge na obarvani površini. Poznamo mono kromatični in poli kromatični kontrast. Mono kromatični kontrast dobimo pri določeni barvi različnih tonov, kot sta, na primer, svetlo-rdeča in temno-rdeča barva. Če so takšni toni v tonski lestvici drug poleg drugega, kot na primer tretja mešanica v preglednici 19.4, dobimo majhen kontrast, ki je primeren za blago za plašče, obleke in kostime. Če pa je na primer iz tretje mešanice, preglednica 19.4, druga poleg druge kombinacija A in G, bomo dobili močan mono kromatični kontrast. Poli kromatični kontrasti imajo vse kombinacije dveh ali več različnih barv, ki se med seboj lahko razlikujejo tudi po tonu. Tako bosta na primer pri prvi mešanici iz preglednice 19.4 kombinaciji A in B dali majhen poli kromatični kontrast; če pa postavimo kombinaciji A in G drugo poleg druge, bomo dobili močan kontrast.

Glede tona lahko opazujemo poli kromatični kontrast pri dveh različnih barvah, ki imata enak ton (enako količino bele ali črne barve). Tako je na primer kombinacija istega tona svetlo-zelena in svetlo-modra, če ima vsaka enako količino bele. Kombinacija dveh barv različnega tona je, na primer, mešanica svetlo-zelene in temno-rdeče ipd. Na istem izdelku lahko uporabimo oba kontrasta, če je, na primer, blago obarvano v različnih tonih ene barve (mono kromatični kontrast), sukanec pa je obarvan na primer v drugi zelo živi barvi. Ker imamo v tem primeru na enem izdelku dve različni barvi, pri čemer ima sukanec poleg drugega vlogo poživitve pestrosti izdelka in povečanje kontrasta, lahko govorimo o poli kromatičnem kontrastu.

Kontrast je lahko tudi postopen ali istočasen. Postopen kontrast daje barve, ki so druga od druge samo toliko oddaljene, da zaznamo naslednjo barvo potem, ko smo že opazili prvo. V istočasnem kontrastu so barve postavljene druga poleg druge, tako da jih vidimo istočasno, zato ker je med njimi večja razlika. Za oba kontrasta (mono kromatični in poli kromatični) velja isti zakon. Ne glede na vrsto kontrasta (postopen ali istočasen) imajo barve lastnosti spremembe drugih kvalitet; sprememba pa je večja, ko kontrastne barve dejansko vidimo skupaj drugo poleg druge, kot če jih opazujemo ločeno. Barve, ki so postavljene druga poleg druge, imajo dve vrsti kontrasta: “kontrast nianse barve” in “kontrast tona”.

19.5.3.1.2 Kontrast nianse. Kontrast nianse dobimo zaradi medsebojnega vpliva barv, ki so na tekstilnem izdelku druga poleg druge (simultani barvni kontrast). Do tega pride zaradi prej omenjenih fizioloških lastnosti očesa in njegove reakcije na mešanje obarvane svetlobe. Zaradi tega se nam zdi, da vsaka barva v kontrastu nianse vpliva na sosednjo barvo, ker dobimo vtis, da je barva niansi-rana s komplementarno nianso sosednje barve. Če opazujemo blago, ki ima, na primer, rdeče in modre proge, se nam zdijo rdeče proge kot da bi bile niansi-rane z rumeno, ki je komplementarna modri barvi, slika 19.35, in modra se zdi modro-zelena, ki je komplementarna rdeči barvi, slika 19.35.

V tem primeru imamo dve primarni barvi (teorija mešanja barvne svetlobe). Ta pojav je analogen pojavu, ki ga dobimo na belem papirju. Če nekaj časa opazujemo, na primer, rdeč krog in hitro prenesemo pogled na bel papir, bomo videli modro-zeleni krog oziroma komplementarno barvo rdeči barvi (sukcesijski barvni kontrast). Bel papir ima enake deleže rdeče, modre in zelene (teorija mešanja barvne svetlobe). Ko nekaj časa opazujemo rdečo barvo, se utrudi del vidnega živca, ki je občutljiv za valovno dolžino rdeče barve in ko prenesemo pogled na bel papir, vidimo samo refleksijo svetlobe modre in zelene barve, katere mešanica daje modro-zeleno barvo.

V omenjenem primeru je izdelek obarvan izmenoma v rdeče in modre proge. To se pravi, da je modra proga med dvema rdečima in rdeča med dvema modrima progama. Medsebojni barvni vpliv bo odvisen od širine prog v eni in drugi barvi, kot tudi od absolutne širine prog. Zaradi prej omenjenega učinka - pojava komplementarne barve - je ugodno, če sta progi v obeh barvah enako široki. Preizkus izpeljemo tako, da, na primer, najprej opazujemo modro progo in prenesemo pogled na rdečo. Zaradi utrujenosti dela vidnega živca, ki je občutljiv na valovno dolžino modre barve, bomo opazili njej komplementarno (rumeno) barvo. Ker prenesemo pogled na rdečo, bomo istočasno opazili rdečo in rumeno barvo. Zaradi tega se v tem primeru zdi, da je rdeča niansi-rana z rumeno. Ko nekaj časa opazujemo rdečo in prenesemo pogled nazaj na modro, bomo opazili modro barvo pa tudi modro-zeleno, ki je komplementarna rdeči, zaradi utrujenosti dela vidnega živca, ki je občutljiv za rdečo barvo. Zaradi tega se nam bo zdelo, da je modra niansi-rana z modro-zeleno.

Podobno bo, če je izdelek obarvan z modrimi in zelenimi progami. Modra se nam bo zdela, da je niansi-rana s vijolično, ki je komplementarna zeleni, in zelena se nam bo zdela, da je niansi-rana z rumeno, ki je komplementarna modri. Če pa imamo rdeče in zelene proge, se nam bo zdelo, da je zelena niansirana z modro-zeleno, ki je komplementarna rdeči, in rdeča se bo zdela, da je niansi-rana s vijolično, ki je komplementarna zeleni. Oblikovalec mora vsekakor upoštevati te zakonitosti pri kompoziciji barvnih vzorcev, kar je za oceno lepote barvne kompozicije pomembno, kako jo subjektivno dojemamo kot celoto.

19.5.3.1.3 Kontrast tona. Kontrast tona pride do izraza, če sta dva različna tona iste barve drug poleg drugega, na primer svetlo-rdeča in temno-rdeča; ali če sta dve barvi različnih tonov druga poleg druge, na primer svetlo-rdeča ali svetlo-zelena in temno-modra ipd. Oblikovalec mora upoštevati vpliv kontrasta tona. Če sta ena svetla in druga temna barva druga poleg druge, potem se nam barva svetlega tona zdi svetlejša, kot je v resnici in barva temnega tona temnejša, kot če ju opazujemo samo zase. Podobno velja za podlago. Če je svetla barva na temni podlagi, potem se nam zdi svetlejša, kot je dejansko in narobe, če je temna barva na svetli podlagi, se nam zdi temnejša, kot je v resnici. Te vplive moramo vsekakor upoštevati pri oblikovanju barvne kompozicije, sicer se nam lahko zgodi, da dobimo večje kontraste, kot smo želeli in pričakovali.

19.5.3.2 Barvna harmonija.

Zelo težko je definirati barvno harmonijo. V bistvu je barvna harmonija pretežno psihološka kategorija. Različne osebe različno dojemajo določeno barvno kompozicijo. Kar se enim zdi harmonija, drugi doživljajo disharmonično. To se pravi, da je v določeni meri možno z vzgojo razviti sposobnosti za doživetje barvne kompozicije izdelka kot harmonične ali disharmonične. Pri "šolani" publiki bo harmonična barvna kompozicija tista, za katero velika večina ugotovi, da je harmonična. Manjšina bo pač poiskala drug izhod za zadovoljitev svojega okusa. Zaradi tega razhajanja uspevajo zelo dragi butiki, ekstravagantni stili ipd.

Harmonijo barv dobimo takrat, ko različne odtenke združimo oziroma kombiniramo tako, da se vsak del barve sklada z barvno shemo oziroma kompozicijo; ali z drugimi besedami, noben odtenek ali ton barve v barvni kompoziciji ne izstopa, tako da ga doživimo kot tujek v tej kompoziciji. Obstajata dve vrsti harmonije: harmonija podobnosti (analogije) in harmonija kontrasta.

19.5.3.2.1 Harmonija podobnosti. Harmonijo podobnosti dobimo s kombinacijo tonov iste barve, ali pa s kombinacijo odtenkov, ki so druga drugi zelo blizu in imajo isto nasičenost (globino) in ton. Če, na primer, kombiniramo različne tone svetlo-zelene ali temno-modre, dobimo harmonijo podobnosti tona. To velja le, če so razlike med zaporednimi toni opazovane barve skoraj neopazne. Tako lahko dobimo senčni učinek tonov.

Kombinacijo podobnosti odtenka dobimo, če na primer, kombiniramo rumeno-zeleno in modro-zeleno. Rumena in modra sta dve različni barvi, toda skupen element je zelena barva. Če sta niansi približno enaki glede nasičenosti in tonov in če ju damo drugo poleg druge, bodo tvorile harmonijo podobnosti nianse. Harmonija podobnosti igra odločilno vlogo pri nastanku mirnih učinkov (efektov).

19.5.3.2.2 Harmonija kontrasta. Kot harmonijo podobnosti lahko dobimo harmonijo kontrasta na dva načina: lahko kombinirano različne tone iste barve, ki se med seboj zelo razlikujejo; ali pa kombiniramo različne barve, ki si med seboj niso podobne. Če kombiniramo dva tona zelene, ki sta med seboj zelo oddaljena (svetlo-zelena in temno-zelena), dobimo harmonijo kontrasta tona; medtem ko kombinacije rdeče in zelene, če sta harmonični, dasta harmonijo kontrasta nianse.

Harmonijo kontrasta uporabljamo takrat, ko želimo dobiti čiste in ostre efekte. Lahko torej uporabljamo podobnost tona in kontrast nianse; ali pa podobnost nianse in kontrast tona v določeni kombinaciji barve ali več barv.

19.5.3.2.3 Harmonija stopnjevanja nianse. Ta harmonija ima včasih delež v obeh harmonijah (harmoniji podobnosti in harmoniji kontrasta). Harmonija stopnjevanja nianse pomeni postopno prehajanje ene barve v drugo. Svetlobni spekter je izrazit primer takšnega stopnjevanja. Harmonijo stopnjevanja nianse dobimo iz harmonije kontrasta barv tako, da med dve kontrastni barvi vstavimo barvo, ki pomeni prehod druge v drugo. Kombinacije rdeče in rumene daje barvni kontrast. Kontrastu se lahko izognemo tako, da vmes vstavimo serijo lestvice oranžnih odtenkov. V takšnem zaporedju sta lahko dva sosednja odtenka tako blizu drug drugemu, da med njima ni nobenega kontrasta in dobimo harmonijo podobnosti. Podobno lahko rumena neopazno preide v modro prek serije nians zelene barve in modra v rdečo prek nians vijolične barve.

19.5.3.3 Osnova barvne harmonije

Komplementarne barve, ki ležijo druga nasproti druge v barvnem krogu, so harmonične. Moramo pa upoštevati, da dajejo v čistem stanju kontraste, ki so zelo močni. Kontrast lahko zmanjšamo z dodatkom črne ali bele barve ali istočasno z eno in drugo. S to modifikacijo barve dobimo primerne komplementarne pare, ki tvorijo zelo harmonične kombinacije. Študij komplementarnih barv oziroma odtenkov ter njihovih temnih ali svetlih tonov je zelo pomemben za reševanje problemov, ki nastanejo pri kombiniranju barv in je osnova barvne harmonije.

Zelo različna so mišljenja glede pravil tvorjenja barvne harmonije. Barvne harmonije se ne dobi samo s kombinacijo komplementarnih barv. Lahko se kombinirajo tudi barve, ki so oddaljene med seboj v barvnem krogu za manj kot 180 stopinj. Komplementarne barve so med seboj oddaljene za 180 stopinj. Če izberemo odtenke, ki so od komplementarne barve oddaljeni za 20 ali 30 stopinj, dobimo manj kontrastne kombinacije. Toda tudi komplementarne barve dajo različno močan kontrast. Tako na, primer, dajo komplementarne barve v barvnem krogu, ki se ujema s pigmentno teorijo mešanja

barv, sliki 19.10 in 19.36, manjši kontrast kot komplementarne barve v barvnem krogu, ki se ujema s teorijo mešanja barvne svetlobe, sliki 19.2 in 19.35. Vtis, ki ga da kontrast kontrastnih komplementarnih ali skoraj komplementarnih barv, se kaže v obogatitvi (poudarku) barv.

Če želimo dobiti harmonijo kontrasta, je priporočljivo izbirati barve, ki so med seboj oddaljene v barvnem krogu, slika 19.35, vsaj za 90 stopinj. Sorodne barve, ki so 30 do 90 stopinj narazen v barvnem krogu, so ponavadi disharmonične, kot, na primer, modra in vijolična ipd. Barve, ki so v barvnem krogu druga drugi zelo blizu, lahko kombiniramo tako, da dobimo harmonijo podobnosti odtenkov.

Kot osnovo za tvorbo barvne harmonije lahko vzamemo naravno razvrstitev barv, kot je prikazano na sliki 19.36. Če začnemo od vijolične kot najtemnejše barve in gremo preko vijolične, vijolično rdeče, rdeče in oranžne k rumeni, ki je najsvetlejša barva, pridemo k rumeno-zeleni, zeleni, modro-zeleni in preko modre nazaj k vijolični. Naravna razvrstitev daje temnim barvam globlji ali temnejši ton kot svetlim barvam. V kombinaciji rdeče in rumene bo imela rdeča navidez temnejši ton, kot rumena; toda, če rdečo kombiniramo s vijolično, bo navidez imela rdeča svetlejši ton kot vijolična. Kombinacije svetlo-rdeče in temno-rumene ali pa temno-rdeče in svetlo vijolične, ne bodo dale harmonije. To se ujema s prej omenjenimi pravili harmonije.

Če želimo, da so poudarjene bleščeče barve, kot so rdeča, oranžna in rumena, je bolj primerna uporaba temne kot svetle osnove oziroma ozadja. Nasprotno pa so temne barve, kot sta vijolična in vijolično rdeča, temnejše in bogatejše (bolj izrazite) na svetli osnovi (ozadju) in manj izrazite na temnem ozadju ali osnovi.

19.5.3.4 Kompozicija vzorca na površini tkanine

Vprašanje je, kako razporediti barve v progastih barvnih vzorcih, da dobimo primerno harmonično barvno kompozicija. Predvsem moramo upoštevati relativno intenziteto barv oziroma odtenkov. Če je ene barve preveč, oziroma če zavzame preveliko površino, lahko dobimo neprivlačno barvno kompozicijo. Oglejmo si nekaj možnih kombinacij različnega števila niti v barvnem sosledju v odvisnosti od kontrasta. Tako lahko kombiniramo: 2 črni in 2 beli; 4 črne in 4 svetlo-sive; 8 črnih in 8 temnejše sivih; 16 črnih in 16 temno-sivih. Če pa namesto črnih vzamemo bele niti, potem lahko uporabimo naslednje kombinacije: 2 beli in 2 črni; 4 bele in 4 temno-sive; 8 belih in 8 temnejše sivih; 16 belih in 16 svetlo-sivih. Iz teh primerov lahko vidimo, da barve, ki dajo velik medsebojni kontrast (črna in bela) zavzemajo majhno površino. Podobno je s kombinacijami črne s sivimi "barvami". Čim manjši je kontrast med črno in sivo (temno-siva), tem večjo površino lahko zavzame ena in druga barva. Podobno je s kombinacijama bele in sive. Čim bolj se siva približuje beli, tem večjo površino lahko zavzame ena in druga. To je v omenjenem primeru po 16 niti ali osemkrat več. Podobno ravnamo tudi z drugimi barvnimi kombinacijami. Kombinacija temnomodre z intenzivno rumeno bo na primer v harmoniji le, če je modro obarvana površina nekajkrat večja od rumeno obarvane površine. Če bi bilo obratno, vzorec ne bi bil harmoničen in bi vzbujal slab vtis zaradi tega, ker bi rumena prekrila modro, oziroma bi bila modra praktično neopazna. Podobno lahko nekaj niti blesteče rdeče na toni-rani zeleni podlagi izzove prijeten vtis; če pa imamo relativno veliko število rdečih niti, bo barvni vzorec vzbujal neprijeten vtis.

19.5.3.5 Ločevanje barv

Če sta na barvnem vzorcu dve kontrastni barvi druga poleg druge, lahko dobimo vtis kričečih in konfuznih barv. Da se temu izognemo, vstavimo med kontrastni barvi barvo, ki deluje nevtralno. Lahko uporabimo tudi črno, sivo ali belo. Tako zmanjšamo negativen učinek, ki ga povzroči kontrast barv, ki potem dajejo vtis čistih in jasnih barv. Kakovost barve, ki smo jo uporabili za ločevanje kontrastnih barv, naj bi bila nekje na sredini med njima. Črna barva je primerna za ločevanje dveh živih barv. Bela in siva sta primerni za ločevanje žive in temne ("mrtve") barve, ali pa za ločevanje dveh temnih ("mrtvih") barv. Sivo uporabljamo namesto bele v primeru, ko živa in temna barva tvorita zelo močan kontrast. Črna ni najbolj primerna za ločevanje žive in temne barve, toda zelo primerna je za ločevanje dveh živih barv. Črna se lahko uporablja v kombinaciji s temnimi barvami, kot sta modra in vijolična, in tudi za temnejše tone živih barv, tako da tvori harmonijo podobnosti.

19.5.4 Barvanje tekstilij

Omenili bomo nekaj osnovnih možnosti, ki nam jih nudijo vlakna, preja, tkanine, pletenine ipd.; za realizacijo določene barvne kompozicije. Pri tem pa ne bomo neposredno obravnavali tehnologije barvanja. Določene barvne učinke lahko dobimo z mešanjem barvnih efektov (učinkov), s prejo iz mešanice različno obarvanih vlaken, s sukanci raznobarvnih niti, s kombinacijo različno obarvanih niti, z barvnimi progami in križanjem barvnih prog, z enostavnimi regularnimi in neregularnimi barvnimi vzorci, z barvnimi kombinacijami ob upoštevanju vezave ipd.

19.5.4.1 Mešani barvni učinki

Da dosežemo mešane barvne učinke, uporabljamo naslednje metode: mešanje različno obarvanih vlaken, da se dobi melanžirana preja; z dodajanjem majhnih obarvanih kosmičev vlaken v pred-prejo, dobimo efektno obarvano prejo; predenje preje iz različno obarvanih pramenov da prejo, ki je podobna melanžirani, vendar raznobarvna vlakna niso tako dobro pomešana kot pri melanžni preji; tiskanje raznobarvnih prog na preji, iz katere je možno izdelati tako imenovane fantazijske sukance; sukanje raznobarvnih niti daje tudi eno vrsto fantazijskih sukancev; z mešanjem dveh ali več vrst vlaken, ki jih ponavadi pobarvamo v tkanini, če imajo različno afiniteto do uporabljenega barvila, dobimo različno obarvana vlakna oziroma niti v tkanini; uporaba različno obarvanih niti, ki se na licu tkanine pojavijo in izginejo, na primer pri uporabi krep vezave, kar da posebne barvne efekte, zlasti, če da vezava drobno zrnati efekt.

19.5.4.2 Preja iz mešanice različno obarvanih vlaken

V mešanicah različno obarvanih vlaken je enakomernost (egalnost) mešanice odvisna od števila in vrst faz tehnološkega procesa pri fazi medsebojnega mešanja različno obarvanih vlaken. Če so različno obarvana vlakna dobro zmešana in če so vlakna obarvana na primer v rumeno in modro barvo, dobimo poseben odtenek zelene, ki se razlikuje od zelene, ki jo dobimo z mešanjem rumene in modre barve. To pa zaradi tega, ker rumena in modra barva v mešanici še zmeraj obdržita v določenem obsegu originalen odtenek. Tako lahko dobimo zelo veliko število kombinacij različno obarvanih vlaken. Navedli bomo le nekaj možnih kombinacij, ki dajejo določeno rezultanto barvo.

- Mešanica črnih in belih vlaken daje sivo barvo.

- Mešanica vlaken določene barve s črnimi ali belimi vlakni daje različne tone te barve.
- Mešanica različnih tonov iste barve.
- Mešanica dveh ali več barv.
- Mešanica dveh ali več barv s črno ali belo.
- Mešanica črne ali bele oziroma sive z eno ali več barv, da sivo niansi-rane barve.

Če želimo dobiti lestvico odtenkov in tonov ali sivo lestvico, mešamo različne količine določenih komponent po principu teorije mešanja pigmentov. Da bi pravilno izbrali mešanico, se je priporočljivo držati naslednjih pravil:

- V mešanici dveh tonov iste barve mora biti med tonoma dovolj velika razlika. barve, ki jih želimo mešati, morajo biti harmonične, če jih postavimo drugo poleg druge.
- Deleži posameznih barv se morajo ujemati z njihovimi relativnimi intenzitetami, tako da se v mešanici zmanjšujeta relativno največji intenziteti.
- Če imamo zelo žive (bleščeče) barve, dodajamo črno in belo v majhnih količinah.

19.5.4.3 Sukanci iz raznobarvnih niti

Pri sukancih, ki jih tvorijo raznobarvne niti, pri katerih se vlakna raznobarvnih niti med seboj mešajo, dobimo na enostaven način prekinitev določene barve vzdolž sukanca, ker je vidna samo ena polovica zavoja. Izstopanje ene intenzivne barve lahko zmanjšamo, ne da bi spremenili njeno čistočo. Za to so primerni raznobarvni sukanci, ki v kombinaciji s takšno barvo lahko izstopajo s še močnejšim odtenkom, kot ga v resnici imajo, s čimer navidezno zmanjšajo intenziteto osnovne barve, ki jo ima, na primer, tkanina.

Različni odtenki in različne materiale v sukancu lahko kombiniramo na različne načine, tako da se barve različnih sukancev pojavljajo regularno – v pravilnih presledkih, ali pa neregularno – v nepravilnih presledkih in količinah.

19.5.4.4 Kombinacije različno obarvanih niti

Učinek dobimo s kombiniranjem različno obarvanih niti. Osnova je obarvana v eno, votek v drugo barvo. V tem primeru dobimo pri vezavi platno zrnat učinek, pri drugih vezavah pa lahko dobimo različne vzorce glede na razporeditev votkovih in osnovnih veznih točk, če so niti osnove v različnih barvah, votek pa enobarven, dobimo proge vzdolž osnove. Če je osnova enobarvna in votek večbarven, dobimo prečne proge v tkanini. Če sta osnova in votek večbarvna, dobimo kariraste (karo) tkanine.

19.5.4.5 Barvne proge in križanje barvnih prog

Pri kompoziciji tkanin, ki imajo proge vzdolž osnove ali vzdolž votka ali istočasno vzdolž osnove in vzdolž votka, moramo upoštevati, da: morajo biti uporabljene barve v harmoniji, pa tudi barvni toni morajo prispevati k harmoniji; vsaka barva in ton morata zavzeti samo površino, ki je optimalna za doseganje harmonije; na barvni učinek vpliva vezava, ker različne vezave različno vplivajo na nastanek barve ali barvnih kombinacij na površini tkanine. Tako bo barvni učinek, ki ga dobimo pri kepru 2/2 (cirkas), drugačen od učinka, ki ga dobimo pri kepru 3/1. Če imamo osnovni efekt, bodo izrazite

barvne proge vzdolž osnove in obratno, če v vezavi prevladuje votkov efekt oziroma število votkovih veznih točk, bodo izrazite barvne proge vzdolž votka. Če želimo dobiti točkaste barvne učinke, moramo izbrati vezavo, v kateri je število osnovnih niti in votkovih veznih točk enako, toda tudi gostota niti v osnovi in votku, številka preje in barvno zaporedje morajo biti enaki.

Učinke, ki jih dobimo zaradi vzdolžnih in prečnih barvnih prog, lahko razdelimo v: dvobarvne vzorce in vzorce, ki imajo tri ali več barv. V vzorcih (barvnih) so barve lahko urejene regularno ali neregularno. Razporeditev barvnih niti lahko klasificiramo v enostavno ali v sestavljeno zaporedje.

19.5.4.6 Enostavni – regularni barvni vzorci

Primeri za regularne vzorce v dveh barvah so: 4 temne in 4 svetle niti ali 16 temnih in 16 svetlih; za tribarvne vzorce: 8 temnih, 8 srednje temnih in 8 svetlih. Pri štiribarvnih regularnih vzorcih imamo lahko: 6 niti barve A, 6 niti barve B, 6 barve A, 6 barve C, 6 barve A, 6 barve D.

V tem vzorcu smo z barvo A ločili barve B, C in D. Regularni barvni vzorci se redko uporabljajo, vendar lahko vzbujajo zelo prijeten videz, če so majhni. V nekaterih primerih lahko s kombinacijo vezave in barv dosežemo prijeten videz tudi pri velikih barvnih vzorcih (raye). Regularna razvrstitev barv se pogosto uporablja kot osnovni efekt v specialnih progastih vzorcih; včasih se delno modificirajo, da postanejo bolj zanimivi. Na primer vzorec s 6 progami: vsako od teh niti lahko modificiramo tako, da imamo: 6 niti barve A, 6 niti barve B, toda 5-krat; ali pa 6 niti barve A, 2 barvi B, 2 barvi C in 2 niti barve B. V karo vzorcih dasta 2 barvi 3 efekte. Tretji odtenek dobimo na mestu križanja vzdolžnih in prečnih prog. Na podoben način dajo 3 barve 6 efektov - na primer: barve A, B in C posebej, A in B skupaj, A in C skupaj in B in C skupaj na mestih križanja.preglednici 19.5 in 19.6.

Preglednica 19.5: Primeri sestavljenih barvnih zaporedij. Legenda: primer 1 je kombinacija 3 regularnih dvobarvnih zaporedij, primer 2 je kombinacija 2 regularnih tribarvnih zaporedij in primer 3 je kombinacija dvobarvnih neregularnih zaporedij.

Primeri kombinacij raznobarvnih niti					
1		2		3	
1 temna 1 svetla	8 ×	2 temni 2 srednje temni	6 ×	2 temni 1 svetla	8 ×
2 temni	4 ×	2 svetli		4 temne	6 ×
2 svetli		4 temne		2 svetli	
1 temna	8 ×	4 srednje temne	3 ×		
1 svetla		4 svetle			
4 temne 4 svetle	4 ×				

19.5.4.7 Neregularni barvni vzorci

Neregularni barvni vzorci dovoljujejo veliko več barvnih kombinacij kot regularni. Navedli bomo nekaj primerov za kombinacije dveh barv. Na primer: 6 temnih in 2 svetli

Preglednica 19.6: Primeri stopnjevanih barvnih vzorcev.

Primer zaporedje barv in število niti v posamezni barvi.													
1.	*A*	1		3		5		7		9		11	
	B		2		4		6		8		10		12
2.	*A*	2		6		10		14		10		6	
	B		4		8		12		12		8		4
3.	*A*	2		4		8		16		8		4	
	B		4		8		16		8		4		2
4.	*A*	2		4		6		8		10		12	
	B		12		10		8		6		4		2
5.	*A*	2		4		6		8		6		4	
	B		3		3		3		3		3		3
6.	*A*	1		3		5		7		7		5	3
	B		2				6				6		2
	C				4				8			4	

niti; ali 16 temnih in 8 svetlih. Tribarvni vzorec ima lahko: 12 temnih, 8 srednje temnih in 4 svetle barvne niti. Pri karo vzorcu imamo lahko naslednji primer: 12×12, 8×8, 4×4, 12×8, 12×4 in 8×4.

19.5.4.8 Sestavljeno barvno zaporedje

Sestavljeno barvno zaporedje je kombinacija dveh ali več enostavnih zaporedij, ki se lahko večkrat ponavljajo. Tri sestavljena barvna zaporedja so prikazana v preglednici 19.5.

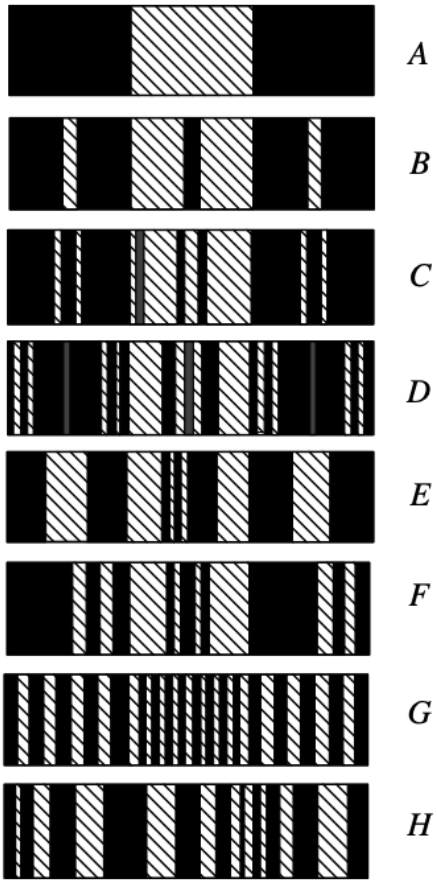
19.5.4.8.1 Barvni vzorci, v katerih barve spreminjajo lego (zaporedje). Obstajajo lahko takšni barvni vzorci, v katerih ena barva prevladuje v enem delu vzorca, v drugem delu pa prevladuje druga barva v istih proporcih, kot, na primer, v naslednjem vzorcu: 8 temnih niti, 2 svetli, 8 temnih, potem 8 svetlih, 2 temni in 8 svetlih. Po istem principu lahko razporedimo barve v tribarvnem barvnem vzorcu, na primer: 12 temnih, 4 srednje temne, 12 temnih, 12 srednje temnih, 4 svetle in 12 srednje temnih.

19.5.4.9 Stopnjevani barvni vzorci

V takšnih vzorcih se površine, ki jih zavzemajo posamezne barve, postopoma večajo ali zmanjšujejo, kot je prikazano v preglednici 19.6. V primeru 1 je ilustrirano enostransko senčenje, v katerem se število niti ene in druge barve postopoma povečuje; v primerih 2 in 3 je obojestransko senčenje, tako da se število niti ene in druge barve najprej povečuje, potem pa zopet zmanjšuje, toda povečanje in zmanjševanje števila niti posameznih barv vzorca je postopno. V primeru 4 je ilustrirano inverzno senčenje - število niti ene barve se postopoma povečuje, istočasno pa se število niti druge barve zmanjšuje. V primeru 5 je pri prvi barvi (barva *A*) obojestransko senčenje, med tem, ko pri drugi barvi ni sprememb števila niti; v primeru 6 je ilustrirano senčenje tribarvnega vzorca.

19.5.4.10 Modifikacije črtastih (progastih) in karirastih barvnih vzorcev

Ena glavnih značilnosti desiniranja črtastih in karirastih barvnih vzorcev je uporaba velikega števila različnih učinkov (efektov) s pomočjo majhnih sprememb medsebojnega zaporedja obarvanih niti. Prikazani primeri na sliki 19.37 ilustrirajo splošen sistem, po katerem modificiramo barvne proge.



Slika 19.37: Modifikacije črtastih in karirastih barvnih vzorcev.

Tu sta prisotni samo dve barvi, toda metoda je primerna tudi za vzorce z večjim številom barv. Pod *A* imamo regularne proge. Prva modifikacija je izvršena pod *B*, kjer so v široke proge ene barve vstavljene ozke proge druge barve. Druga modifikacija je izvršena tako, da sta v centre prog pod *A* vstavljeni po dve ozki progi druge barve (primer *C*). Barvno simetrijo vzorca lahko zmanjšamo z uvajanjem ene črte druge barve pri koncu ene od osnovnih barvnih črt, kot je to narejeno v primeru *C*. V primeru *D* je prikazana modifikacija, ki ima simetrično obliko. V primerih *E* in *F* je ena polovica vzorca simetrična, druga pa asimetrična. Sestavljeno zaporedje barvnih niti je ilustrirano pod *G* in stopnjevani barvni vzorec je prikazan pod *H*.

19.5.4.11 Uravnava kontrastov v barvnem vzorcu.

Primeri, ki so dani v sliki 19.37, se med seboj razlikujejo po obliki in zaradi tega tvorijo različne stile. V barvnih vzorcev je pogosto potrebno dobiti zaporedje efektov, ki tvorijo samo en stil. Pri desiniranju v tem primeru, mora biti zaporedje obarvanih niti enako v vsakem vzorcu v zaporedju, in to gleda na število niti. Razlike med vzorci dobimo s pomočjo različnih barv; toda pravilo je, da stopnja kontrasta odtenka in tona ostane

nespremenjena v vsakem vzorcu. Ko se enkrat odločimo za stil, določimo število barv in njihove relativne intenzitete v različnih sekcijah; najbolj intenzivno barvo bomo uporabili v najmanjših sekcijah (bo zavzela najmanjšo površino). Izberemo barvo za prvi vzorec in ko ugotovimo, da je bila izbira pravilna, so nam te barve v prvem vzorcu osnova za spreminjanje tonov v ostalih delih - sekcijah (vzorcih) celotnega zaporedja barvnega vzorca. Izdelava takšnega zaporedja barvnih prog je prikazana v preglednici 19.7.

Preglednica 19.7: Zaporedje barvnih prog v barvnem vzorcu.

Število niti različnih barv v progi	Zaporedje barvnih prog				
	A	*B*	*C*	*X*	*Y*
16	črnih	črnih	črnih	črnih	rjavih
16	temnozelene	temnomodre	rjave	oranžne	črne
4	črnih	črnih	črnih	črnih	rjavih
2	rdečih	oranžnih	svetlozelenih	temnomodrih	svetlozelenih

V vsakem vzorcu (progi) *A*, *B* in *C* je najmanj intenzivna barva črna, zaradi česar zavzema največjo površino (16 niti), srednje intenzivna barva zavzema manjšo površino (4 niti) in najbolj intenzivna najmanjšo površino (2 niti). Temno zelena, temno modra in rjava barva v srednjem delu prog morajo imeti enako globino tona in obstajati mora enak kontrast med temnomodro in oranžno v progi *B* in med rjavo in svetlo zeleno v progi *C* kot tudi med temnozeleno in rdečo v prvi progi *A*.

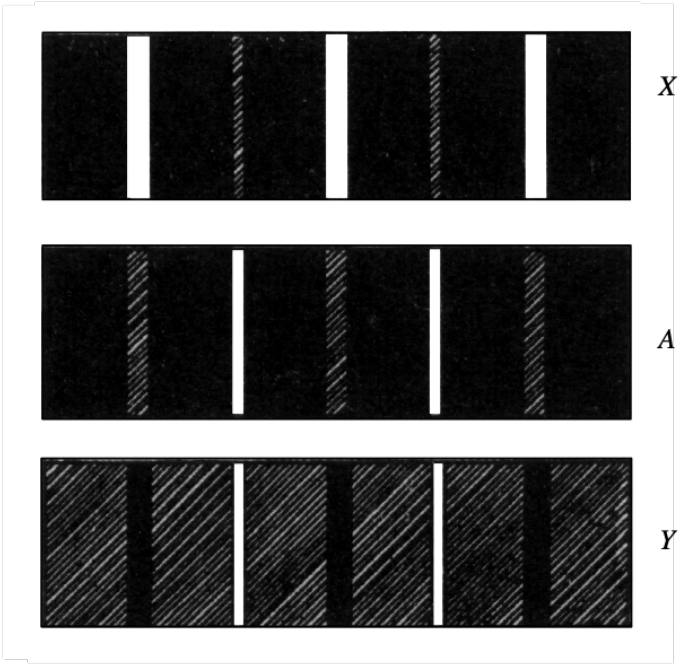
V progah *X* in *Y* je prikazan napačen način ureditve barv. V progah *X* in *Y* imamo enake barve kot v progah *B* in *C*, toda razlika je v vrstnem redu barv in v površinah (število niti), ki jih zavzamejo posamezne barve, zaradi česar se barve ne bodo ujemale – ne bodo v ravnotežju. To je ilustrirano na sliki 19.38, na kateri so relativne intenzitete posameznih barv in njihovi deleži prikazani z belimi, črnimi in senčenimi (šrafiranimi) polji (v vsaki progi so po 3 različne barve). V vsaki progi *A*, *B* in *C* bodo imele barve videz, kot je na sliki 19.35a, torej imamo samo en stil; toda v progah *X* in *Y* bodo imele barve takšen relativen odnos, kakršen je prikazan na slikah 19.38X in 19.38Y. Torej dobimo različne stile in razliko kontrasta med posameznimi progami v vzorcu.

19.5.4.12 Barvne kombinacije glede na vezavo

Vezave, ki jih uporabljamo v zvezi s kombinacijami barvnih niti, lahko na splošno razdelimo v tri skupine:

1. Vezave, ki na površini tkanine imajo približno isto število osnovnih in votkovih veznih točk in omogočajo uporabo obarvanih niti v osnovi in votku (barvni efekti se vidijo na površini tkanine ne glede na to, ali so votkovi ali osnovni). Ta tip vezave daje možnosti za največji obseg barvnih efektov na tkanini.

2. Vezave, pri katerih je prevladujoč osnovni efekt (veliko število osnovnih veznih točk in majhno število votkovih veznih točk). Če imamo takšne vezave v tkanini, je možno barvne niti uporabljati le v osnovi, ker barvne niti votka ne pridejo do izraza. Ko govorimo o veznih točkah, mislimo vedno na lice tkanine.



Slika 19.38: Relativne intenzitete in deleži posameznih barv v barvnih progah barvnega vzorca.

3. Vezave, pri katerih je prevladujoč votkovi efekt, je možno barvne niti uporabljati v glavnem v votku, ker barvne niti osnove ne pridejo do izraza.

19.6 Seznam oznak poglavja

Oznaka	Enota	Opis
$\vec{M}$		vektor modre barve
M		modra barva
m		kromatična koordinata modre barve
$\vec{R}$		vektor rdeče barve
R		rdeča barva
r		kromatična koordinata rdeče barve
$\vec{S}$		vektor mešanice barv
S		mešanica barv
S_0		mešanica barv
S_1		mešanica barv
S_2		mešanica barv
$\vec{Z}$		vektor zelene barve
Z		zelena barva
z		kromatična koordinata zelene barve

19.7 Literatura

[1] D. B. Judd and G. Wyszecki. *Color in Business, Science and Industry.* John Wiley and Sons, New York, 1975.

[2] M. Butina. O barvnih krogih. *Vzgoja in izobraževanje: revija za teoretična in praktična vprašanja vzgojno izobraževalnega dela.*, 28(1):37–38, 1997.

[10] Raben and Sjörgen. *Fargboken färglära für praktiskt bruk.* Svenska Slöjdföreningen, Stockholm, 1965.

[11] A. Härd. Philosophy of the hering-lohanssan natural colour system. *Proceeding of International Colour Meeting, Scientific and Practical Aspects of Colour*, 1:357—366, 1966.

[12] A. Härd. A new colour atlas based on the natural colour system by hering-lohanssan. *Proceeding of International Colour Meeting, Scientific and Practical Aspects of Colour*, 1:367–375, 1966.

[13] D. B. Judd. *Color in visual signaling. V: In Committee on Vision, Division of Behavioral Sciences.* National Research, 1973.

[14] G. Wyszecki and G. H. Fielder. Color-difference matches. *Journal of the Optical Society of America*, 61(11):1501–1513, 1971.

[15] R. K. Ahrenkiel. Modified kramers–kronig analysis of optical spectra. *Journal of the Optical Society of America*, 61(121):1651–1655, 1971.

[16] DIN. Din-en-iso-105-b02, textiles - tests for colour fastness - part b02: Colour fastness to artificial light: Xenon arc fading lamp test (prej din 54004). https://www.documentcenter.com/standards/show/din-en-iso-105-b02 (14. 2. 2018). Technical report, DIN.

POGLAVJE 20

Nekatere prvine estetike oblačil

Kazalo

20.1 Človeško telo kot izhodišče **475**
20.2 Kultura **477**
20.3 Likovna umetnost **479**
20.4 Likovna umetnost kot oblika duhovne in materialne proizvodnje **480**
20.5 Estetika **482**
20.6 Oblikovanje in estetika v pogojih industrijske proizvodnje **485**
20.7 O čem govorijo oblačila **488**
20.8 Slikovna priloga **493**
20.9 Literatura **502**

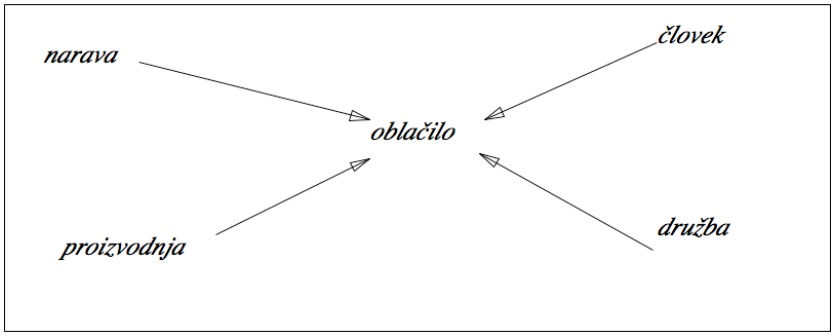
20.1 Človeško telo kot izhodišče

Najbolj splošna definicija oblačila pravi, da je oblačilo vse, kar služi za pokrivanje telesa. Čeprav je takšna definicija preširoka, ker zajema tudi stvari, ki niso oblačila v ožjem smislu, npr. odeje - ki pa lahko postanejo oblačila pa vendar pokaže, da je oblačenje dejavnost, ki vključuje na eni strani telo in na drugi strani oblačilo. Opraviti imamo tedaj z odnosi med človekom in oblačilom, ki nastajajo iz različnih vzrokov in imajo različno naravo. V naši zahodni družbi, piše Bernard Rudofsky v svoji knjigi z zgovornim naslovom “Il corpo incompiuto” - nedovršeno telo, smatramo iz zgodovinskih in čustvenih razlogov, da je golo telo nedokončano, dokler je brez oblačil. To, kar imenujemo "moški"ali "ženska", duhovito pripominja Rudofsky, je proizvod, ki je zavit, omotan v oblačilo, je embaliran proizvod. Bistvo odnosov med telesom in oblačili je v tem, da človek svoje telo dopolnjuje z dodatki, ki imajo različne funkcije. Eugen Fink v svoji razpravici “Moda – zapeljivka”, objavljeni v antologiji tekstov pod naslovom “Nova filozofija umetnosti”, našteje tri glavne vidike [1, 2]:

- oblačenje kot zaščitno sredstvo proti vremenskim neprilikam;

- oblačenje kot konvencionalen način kostimiranja, kakršno je v navadi in uporabi v neki skupnosti in sporoča o položaju, dostojanstvu, privilegijih in funkcijah nosilca; ter
- oblačenje v skladu z moralnimi predstavami nekega naroda ali nekega kulturnega kroga [3].

Človek tedaj z oblačili izraža svoj odnos do narave in do družbe. Že ti vidiki kažejo, da je struktura odnosov med človekom in oblačilom dialektične narave, ker nastajajo ti odnosi iz notranjih nasprotij in protislovij celote, ki jo predstavlja oblečen človek, slika 20.1.



Slika 20.1: Struktura odnosov med človekom in oblačilom. Prirejeno po: Butina M. 1988. Nekatere prvine estetike oblačil. V: Jakšić D. 1988. Projektiranje in konstrukcija tekstilij-II. del. Ljubljana, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, VTOZD Tekstilna tehnologija: 433–489.

Že takoj v začetku lahko ugotovimo, da so tudi na področju oblačenja izhodiščne predpostavke temeljne predpostavke človekovega dela: narava, katere del je človek; človeški organizem kot celota telesa in duha; ter družba, v kateri živi in ki mu omogoča proizvodnjo za življenje potrebnih stvari, med njimi tudi oblačil. Te odnose zapišemo v obliki sheme, ki na nazoren način pokaže njihove dialektične odnose, ki nastajajo med posameznimi sestavinami oblačenja. Iz te sheme lahko razberemo različne funkcije oblačil. V odnosu do narave oblačila.

Oblačila s svojimi oblikami in strukturo označujejo vse te različne funkcije. Toda oblačila so pomembna tudi v osebni in družbeni proizvodnji, menjavi, distribuciji in potrošnji, imajo tedaj tudi izrazito ekonomsko funkcijo. Oblačila so pomemben dejavnik kulture in civilizacije določene družbe.

V odnosu do narave je za našo temo pomembno ravno tisto, kar nam je narava neposredno dala, zaradi česar smo njen del, namreč telo, organizem kot celota telesa in duha. Oblika in struktura človeškega telesa je faktor, ki ga moramo takoj izpostaviti kot stalen in najpomembnejši estetski dejavnik pri oblikovanju oblačil v vseh časih, krajih in kulturah. Zato bo telo in njegova forma v vseh nadaljnjih razmišljanjih stalna referenčna točka, izpostavljena pred vsemi ostalimi dejavniki, ki lahko vplivajo na obliko in funkcijo oblačila. Vse na področju oblačenja se nanaša na človeka kot celoto telesa in duha, iz njega izhaja in se k njemu vrača. Izhodišče bo tedaj golo človeško telo kot naravno dana oblika, ki pa jo oblačila zaradi vpliva drugih faktorjev spreminjajo. Upoštevati moramo torej tudi vplive naslednjih dejavnikov:

- golo človeško telo, s svojimi motoričnimi in fiziološkimi zahtevami in zakonitostmi;
- spolne razlike, hkrati kot naravna določila oblike telesa in kot družbeno določene specifične funkcije spolov;
- razlike v konstituciji telesa, ki so lahko rasna: negroidna velika rasa, mongoloidna velika rasa ali anatomske kot so atletski, leptosomni in pikniški tip;
- razlike v barvi kože in las, ki so tudi lahko rasno, kulturno ali individualno pogojene.

Na funkcijo in normo oblačil tedaj lahko vplivajo in jo so-določajo naravni, antropološki , sociološki, kulturni in individualni faktorji. Njihova estetska forma pa je vedno kulturno določena.

20.2 Kultura

Eduard Kale [4] piše, da so se s kulturo ukvarjali vsi tisti, ki so pisali in razmišljali o stvarnosti, v kateri živi človek kot posebna vrsta in ga ta stvarnost določa, čeprav so jo nazivali z različnimi imeni: država, politika, družba, kolektivna zavest ali kako drugače. Kultura je širok in kompleksen pojem, z njo se ukvarjajo različne znanosti, od arheologije in etnologije do različno usmerjenih zgodovin in drugih družboslovnih znanosti. Prvo definicijo je konec prejšnjega stoletja postavil E. B. Tylor [5], ki je zapisal, da je kultura kompleksna celota in vključuje znanje, vero, umetnost, moralo, pravo, običaje in vse druge sposobnosti, ki jih je človek pridobil kot član družbe. Pri Marxu [6] je pojem kulture istoveten s pojmom družbe, ki ga pri njem tvorijo ekonomska struktura, pravna in politična nadgradnja in vse oblike zavesti, od znanosti do umetnosti. A. Kroeber [7] opiše kulturo kot maso naučenih in naprej predanih reakcij, navad, tehnik, idej in vrednot ter obnašanj, ki jih povzročajo. Kultura je zanj celota proizvodov družbenega človeka.

Sociolog dr. Miloš Ilić je postavil integralno definicijo kulture in v svoji knjigi "Sociologija kulture in umetnosti" pravi, da je kultura "celota vseh tistih procesov, sprememb in tvorb, ki so nastale kot posledica materialne in duhovne intervencije človeške družbe v naravi, družbi in v mišljenju". Osnovni smisel kulture pa je v tem, da olajšuje ohranitev obstajanje in napredek človeške družbe [8]. Ilićeva definicija, ki je v osnovi enaka drugim, pa vnaša pomembno dimenzijo smisla kulture, ki jo druge nimajo, namreč da je kultura predvsem tisto, kar ohranja obstoj in zagotavlja napredek človeštva.

Nekateri razlikujejo kulturo in civilizacijo. Nasploh se pojem civilizacije nanaša bolj na tehnični napredek, medtem ko se pojem kulture uporablja zlasti pri duhovnem napredku. Websterjev slovar angleškega jezika [9] pravi med drugim, da je civilizacija stanje človeške družbe, ki jo označuje visoka stopnja intelektualnega, tehnološkega, kulturnega in družbenega napredka, medtem ko opiše kulturo kot estetske in intelektualne dosežke neke civilizacije. Oba pojma tedaj v veliki meri sovpadata. Za našo temo je pomembno, da se elementi oblačil prepletajo tako z elementi kulture kakor z elementi civilizacije, torej sodelujejo v duhovnem, tehnološkem in materialnem razvoju človeških družb.

Vsi avtorji obravnavajo kulturo kot nadorgansko, telesni eksistenci nadgrajeno družbeno eksistenco človeka. Seveda pa to ne pomeni, da so kulturni elementi samo duhovni. Nasprotno, duhovni elementi se morajo udejanjiti v materializirani, čutom dostopni obliki – v zvoku, v znaku, v sliki; za našo temo v tekstilijah, usnju ipd. Za

razliko od živali, ki so telesno in organsko prilagojene določenim naravnim pogojem, človek s pomočjo akumulirane kulturne izkušnje prilagaja naravo svojim potrebam, ko jo preoblikuje v kulturno obliko. V organski naravi se sprememba dogodi neposredno v organizmu individua, v kulturi pa pojav novega kulturnega elementa ne zahteva sprememb niti v organizmu individua niti v tipu kulture, ki ju le obogati. Kultura obstaja zunaj posameznikov, ki živijo v tej kulturi: kultura živi v kulturnih obrazcih in vzorcih, ustanovah, svetovnih nazorih, vrednotah, običajih, v različnih proizvodih in drugem.,

Eden od najbolj izrazitih kulturnih elementov je uporaba simbolov in znakov. Jacqes Maritain definira kot znak tisto, kar spoznanju daje nekaj, kar ni on sam. Znak je torej nekaj, kar ne kaže sebe samega, temveč na nekaj drugega, na predmet mišljenja ali na stvar, pri tem pa sam ni ta predmet, ga le označuje. Za človeka najbolj značilen način uporabe znakov je govor, v katerem se v zvokih materializira naše mišljenje. Vendar to ni edini način uporabe znakov in simbolov. V vseh dejavnostih, kjer posredujemo svoje misli, v znanosti, tehnologiji, v umetnosti itd., uporabljamo njim lastne sisteme znakov, specifične jezike, v katerih objektiviziramo in sporočamo misli, izkustva in spoznanja sebi in drugim članom družbe [10].

Razne oblike govora in jezika so tedaj možne zato, ker imajo znaki dvojno naravo: so hkrati pojmovni (abstraktni, nematerialni) in fizični, čutni (materialni, čutom dostopni). pojmi brez fizične oblike ne morejo biti sredstvo komunikacije. Pesem, ki ni napisana, slika, ki ni naslikana, oblačilo, ki ni izdelano v materialu, niso ne pesem ne slika ne oblačilo. So samo misli, ki ostajajo v tistem, ki jih misli. Te različne oblike znakovnih sistemov šele omogočajo tvorbo kulturne resničnosti kot nadgradnjo individualnih resničnosti. Kulturo omogočajo znaki in simboli, v katerih se misli oprimejo materialov in pri tem preoblikujejo naravne tvarine v kulturne forme. Spreminjanje naravne oblike telesa z oblačilom je poseben način govora prav tako tudi kretnje telesa, ki jih ta oblačila dopuščajo ali zavirajo.

Posebnost kulturne resničnosti, piše Kale [4], so kulturni vzorci. Osnovni kulturni vzorec je znak (npr. beseda), ki je urejen vzorec in označuje neki pojem, je pojavna oblika pojma. Vse pojavne oblike kake kulture, od besed, oblačil in orodja do ustanov, so kulturni vzorci. To, kar v kaki kulturi ni postalo kulturni vzorec, ni sestavina te kulture. Kulturni vzorci so vzorci za (nekaj), npr. melodija, beseda, risba, formula, oblačilo; poleg tega pa so tudi vzorci o (nečem), o vsebini melodije, besede, risbe, formule, oblačila.

Kulturni vzorci torej vedno prenašajo tudi sporočila, vsebine v svoji obliki, poleg tega, da so tudi ta oblika sama. Prenašajo določene programe za delovanje, in sicer na dveh ravninah, (ravneh) na simbolični in materialni. So, kot piše Kale, simbolično oblikovani vid o stvarnosti in programi ali modeli za stvarnost, za oblikovanje stvarnosti. Kulturni vzorci zato omogočajo podvojitev procesov, ki se na eni strani dogajajo v realnosti, na materialih, na drugi pa istočasno dobivajo svojo kulturno simbolično podobo in pomen v oblikah proizvodov dela.

Človek tedaj na kulturen način preoblikuje svoje okolje hkrati na dveh ravninah. V mišljenju ga zazna, spozna in izrazi s pomočjo znakov. Ker so znaki materialne narave, misel objektivizirajo, jo prenesejo na materialno ravnino (raven) in pri tem materijo preoblikujejo iz prvotnega naravnega stanja v novo, zamišljeno stanje. Te nove oblike materije nosijo pomene, ki so jih preoblikovali, so enotnost in celota pomena in snovi. Vsak kulturni proces združuje in povezuje v celoto miselne in fizične, duhovne in materialne procese v kulturne forme, ki tvorijo duhovno in snovno resničnost kake družbene skupnosti. V kulturi človek proizvaja svojo dejansko resničnost sam.

20.3 Likovna umetnost

Likovno delo navadno uvrščamo med umetnosti. Že sama beseda "umetnost" pove, da to ni nekaj, kar daje narava, temveč nekaj umetno nastalega, je torej proizvod človeka kakor znanost, filozofija, tehnika, proizvodnja. Človeške dejavnosti radi delimo na duhovne in materialne, čeprav je iz oddelka o kulturi razvidno, da ni nobene duhovne dejavnosti brez materialne sestavine, kakor tudi nobene materialne dejavnosti ne more biti. brez mišljenja. Pač pa so različna sorazmerja med duhovnimi in materialnimi sestavinami v različnih človeških dejavnostih.

Če je filozofija čisto miselno iskanje resnice, ki za svoje delo skoraj ne potrebuje materialnih sestavin, če je znanost miselno spoznavanje objektivnih zakonitosti narave, pridobljeno z neposrednim eksperimentiranjem z naravnimi snovmi in energijami, potem lahko rečemo, da je likovna umetnost spoznanje, pridobljeno z neposrednim čutnim zaznavanjem in čustvenim doživljanjem človeka, o prostoru in telesih v njem, izraženo s pomočjo likovnih izrazil in materialov. Likovna misel tedaj spoznava in doživlja vidni in tipni prostor ter ga z uporabo zakonitosti teh dveh čutov preoblikuje v nov prostor, v nove oblike bivanja prostora in telesa v njem. Ker je človeško telo samo in oblačilo na njem del prostora, ker je oblikovana prostornina, se likovna umetnost na področju oblačil ukvarja ravno z oblikovanjem prostorskih lastnosti telesa. Likovno sestavino oblačil zato lahko opišemo kot umetno preoblikovanje naravne oblike človeškega telesa z uporabo ustreznih materialov, tekstilij, usnja in drugih.

Seveda ima že človeško telo samo, glede na to, da je konkretno, materialno in zato čutno zaznavno, določene prostorske lastnosti, ki jih zaznavamo z vidom in tipom. Idealno lepo telo je že kulturno opredeljeno, ker je ideal lepote vedno opredeljen po kulturnih merilih in kriterijih. Nekatere kulture, npr. kulture stare Grčije, so izhajale iz tako opredeljene lepote človeškega telesa, ki je še danes osnova evropskemu pojmovanju telesne lepote. Tudi večina primitivnih kultur izhaja iz naravno lepega človeškega telesa, ki mu dodajajo le malo oblačilnih dodatkov, pač glede na klimo. Večinoma pa kulture le izjemoma dopuščajo golemu telesu, da bi se neovirano kazalo kot kulturna vrednost, navadno dopuščajo samo posameznim delom telesa, da se kažejo nepokriti z oblačili, drugim delom pa z modulacijo oblačil spreminjajo naravno obliko. Tako preoblikuje kultura vidno podobo naravnega telesa v likovno kulturno podobo, ki se razlikuje od naravne prav po preoblikovanih delih.

Proizvod slikarja je slika, oblikovana na dveh dimenzijah slikovne ploskve, proizvod kiparja je kip, oblikovan v treh dimenzijah kiparskega prostora. Proizvod oblikovalca oblačil je oblačilo, ki je preoblikovanje prostorske telesnine, volumna človeškega telesa. Oblikovalec oblačil uporablja tako slikarske elemente v dekorativni podobi dvodimenzionalnih tekstilij kakor tudi kiparske elemente z modulacijo mase telesa z uporabo teh tekstilij.

Oblikovanje oblačil je tedaj oblikovanje kulturne podobe človeka neposredno na človeku samem. V prvem poglavju (delu) smo videli, da imajo oblačila veliko različnih funkcij, od zaščite telesa pred naravnimi pojavi do družbenih in kulturnih funkcij, ki neposredno vplivajo na oblike oblačila. Likovna estetska dimenzija oblačil je neposredno izpeljana iz upoštevanja teh funkcij, ki jih morajo oblikovalci razrešiti z likovnimi sredstvi. Likovna forma oblačila je dvakrat družbeno pogojena: prvič s praktičnimi funkcijami oblačila in drugič s kulturnimi funkcijami, ki označujejo človeka, ki oblačilo nosi, kot pripadnika neke kulture. Oblačila izpolnjujejo uporabne in simbolične funkcije s svojo materialno in estetsko formo.

Funkcija umetnosti nasploh je oblikovanje in izražanje individualnega doživljanja

naravne in družbene stvarnosti. Ima torej individualne in družbene poteze. Nastaja iz individualnega doživetja umetnika, ki svojo stvarnost zaznava in doživlja kot celovito bitje, kot totalni človek, ki se posredno in neposredno udeležuje vsega, kar ga obdaja v naravi in družbi. Družba določa njegov odnos do tega s svojimi kulturnimi navadami, običaji in ustanovami.

Umetniki sprejemajo, deloma pa zavračajo družbena določila in prisilo. V svojih delih ohranjajo tisto, kar lahko sprejmejo in spreminjajo tisto, česar ne morejo več sprejeti. Tako preoblikujejo kulturno dane oblike in predlagajo prenovljene ali docela nove, ki izražajo spremenjene ali nove družbene pogoje in odnose, ki določajo tudi njihovo videnje narave. S tega stališča ima prav Herbert Read [11], ko pravi, da je "narava" samo druga beseda za družbeni kontekst, ki določa pojmovanje in videnje narave. Umetnosti vedno govorijo o položaju individua v družbi in naravi in to izražajo s svojimi oblikami. Kulturo torej spreminjajo in ustvarjajo posamezniki s svojimi odnosi, resnični in delujoči posamezniki, kot je zapisal Marx, s svojimi akcijami in reakcijami na obstoječe družbene in kulturne odnose in oblike. Umetnosti so tedaj po svoji naravi individualne, umetniški odraz in izraz nastaja z akcijo umetnikaindividua, tudi v umetnostih, ki so po svoji naravi kolektivne, npr. v gledališki.

Kadar veliko likovnih umetnikov občuti in doživi prostor svoje družbe na podoben način, tako da ga izrazijo z enakimi izrazili in na enak način, nastaja nov likovni slog. Če ga sprejme večina pripadnikov njihove družbe, postane ta slog nova oblika likovne kulture, slog, ki odseva stanje neke družbe v določenem času njenega razvoja. Vendar pa vsak slog dopušča veliko individualnih formulacij, ki temeljijo na isti temeljni shemi. Ta osnovna shema je ravno tista, ki določa formalne in estetske značilnosti sloga. To velja za čisto likovno umetnost kakor tudi za njeno posebno obliko, oblačila.

20.4 Likovna umetnost kot oblika duhovne in materialne proizvodnje

Kot smo prav v začetku omenili, omogočajo po Marxu vsako proizvodno delo tri osnovne predpostavke. Najprej narava, ki jo Marx opiše kot veliki laboratorij in arzenal, ki daje tako delovna sredstva kot delovni material, pa tudi človek sam je proizvod narave. Narava in človekovo živo telo se kažeta kot naravni eksistenčni pogoj človeka, tudi človekovo lastno telo je naravna predpostavka, ki je ni naredil on. Delavčev odnos do teh objektivnih pogojev njegovega dela je lastniški odnos, ki ga uresničuje kot pripadnik neke družbe, ki določa odnos in uresničevanje lastnine do teh objektivnih pogojev njegovega dela [6].

Tudi likovne umetnosti so specifične oblike proizvodnje. Prva predpostavka likovne produkcije je tedaj človeški organizem, ki omogoča likovno delo. Sposobnosti likovnih čutil očesa, ki vidi na stvareh več kot katerokoli živalsko oko, tipa, ki bistveno dopolni našo podobo in razumevanje stvari, roke, ki je zmožna najbolj zamotanih opravil, na kar je pokazal že Engels – omogočajo oblikovanje likovnih produktov, izražanje z oblikami, barvami, teksturami, ki jih nosijo likovni materiali. šele ta materialnost likovnih izrazil omogoča, da zavesti delujočih individuumov – likovnih producentov in uporabnikov - stopijo v stik v likovnem občevanju. Zavest pa je že od vsega začetka družbeni produkt, ki nastane iz potrebe občevanja z drugimi ljudmi. Jezik je, po Marxu, praktična, tudi za druge eksistirajoča zavest. produkcija idej, predstav in zavesti je zato neposredno vpletena v materialno občevanje ljudi bodisi v jeziku bodisi v oblikah in funkcijah stvari in predmetov.

Predpostavke likovne produkcije se uveljavljajo v več slojih. V prvi sloj lahko uvrstimo naravo:

(a) kot vir likovnih snovi in materialov,

(b) kot izvir vidnega in tipnega zaznavanja in s tem prostora, oblik, barv itd., pa tudi osnovnih oblikovalskih postopkov, ki se jih ljudje naučijo in opazovanja naravnega oblikovanja,

(c) kot vir spoznanj vseh vrst, ki jih je mogoče izraziti na likovni način kakor tudi specifičnih likovnih spoznanj.

Drugi sloj predstavlja sam človeški organizem. Najprej (a) je zakonitost materije same, kakor se kaže v delovanju organizma, še zlasti živčnega sistema, v katerem je, po Engelsovih besedah, narava dosegla zavest same sebe. Nato (b) čutne modalitete, ki določajo likovne izrazne in oblikovalne možnosti, po katerih mora človek preoblikovati vidno naravo in materiale in (c) najpomembnejše, zavest in mišljenje, ki poveže prva dva sloja – naravo in človeški organizem s tretjo predpostavko produkcije, družbo. Prvi dve predpostavki postaneta dostopni človeku na specifično človeški način šele v družbi in njeni kulturi.

V tem tretjem sloju pa lahko razlikujemo:

- proizvodne sile, sredstva in odnose;
- kulturne pridobitve, navade in običaje, načine občutenja in mišljenja ter načine izražanja misli in čustev, pa še
- specifična likovna spoznanja, proizvodna sredstva in tehnične postopke, materiale in likovne izrazne sisteme.

Oba prva sloja, narava in človeški organizem, sta nekakšni stalnici, ki se le malo ali nič ne spreminjata. Zato pa je toliko bolj spremenljiva tretja predpostavka, družbena skupnost, njeni produkcijski odnosi in pogoji ter iz njih izhajajoči odnosi med posamezniki, med njimi in skupnostjo ter skupnostjo in naravo.

Predmet preoblikovanja likovne produkcije je prostor in telesa v njem, namen likovne prakse je preoblikovati vidni in tipni prostor in telesa v njem, njihove prostorske in površinske lastnosti na tak način, da ustrezajo vsakokratnim potrebam posameznika in v skladu z možnostmi, ki jih daje družba. Ker je človeško telo del prostora in njegova oblačila prostorske tvorbe, se likovna praksa ukvarja tudi z oblikovanjem oblačil in prek njih s preoblikovanjem človeškega telesa. V tem procesu je človeško telo stalnica, oblačila pa spremenljivke, ki njegovo naravno obliko spreminjajo z dodajanjem oblek iz različnih ustreznih materialov. Likovna umetnost tedaj producira nove možnosti eksistence teles in prostora s tem, da jih oblikuje v skladu z zahtevami in potrebami posameznika in družbe, v kateri živi. Kiparstvo, arhitektura in oblikovanje dejansko in neposredno spreminjajo človeški bivalni prostor, predmete v njem in samo človeško telo v skladu z načinom doživljanja, čustvovanja in pojmovanja stvarnosti v določeni družbi.

Likovne umetnosti seveda tega ne morejo delati brez pomoči drugih družbenih praks, kot so znanost, tehnologija ipd. Njeni produktivni postopki temeljijo na znanstvenih spoznanjih, na tehničnih postopkih, sredstvih in orodjih in na vseh spoznanjih, ki jih lahko dobijo od drugih človeških dejavnosti. Za namene umetnika velikokrat zadostujejo preprosta orodja in tehnična opravila, čeprav mnogi uporabljajo tudi najbolj zamotane tehnične postopke, ki jih omogoča tehnološka znanost. Slikar lahko nanaša

barvo s prstom, kipar lahko modulira z roko, toda slikar uporablja tudi najmodernejši zračni čopič in kipar najmodernejše načine varjenja. Edino merilo pri tem je, ali mu ta orodja in postopki omogočajo izraziti na čim bolj jasen način njegovo misel in doživetje.

Podobno je tudi pri oblikovanju oblačil. Za tkanje lahko zadostujejo preproste statve, uporabljajo pa lahko tudi najnovejše avtomatske stroje. Obleko lahko skrojijo in sešijejo na roko ali pa to opravijo v kompleksnem in visoko organiziranem načinu industrijske proizvodnje. Oba načina še dandanes ko-eksistirata drug poleg drugega. Veliko ljudi je, ki si še vedno znajo sami oblikovati in sešiti obleko, seveda pa tak ročni način proizvodnje ne more zadostiti množični potrošnji modernih družb, ki ji ustreza samo industrijski način proizvodnje. Več o vplivu le-te na oblikovanje in na estetsko podobno oblačil pozneje.

20.5 Estetika

Izraz "estetika" je v l8.stoletju uvedel nemški filozof A. G. Baumgarten , ki je z njim označil vedo o čutnem spoznanju. Nasploh danes estetiko označujejo kot filozofsko teorijo o lepoti in umetnosti kot ustvarjanju lepote. Sam izraz je nastal iz starogrške besede "aisthesis" – občutek. Estetika ima torej že v nazivu dve sestavini: filozofski nauk o čutnem spoznavanju in filozofski nauk o presojanju lepega [12].

V širšem smislu se estetika ukvarja s preučevanjem udejanjanja harmonije. Na tem pojmu sloni estetska teorija: harmonijo lahko definiramo kot ubranost, skladnost delov in sestavin, miselnih, čustvenih in stvarnih, ki se izraža v občutku telesnega in/ali duhovnega ugodja. Njeno nasprotje je disharmonija, ki je neskladje delov in sestavin in ga občutimo kot neugodje.

Harmonija se lahko uresniči v devetih glavnih estetskih kategorijah: lepo, veličastno, ljubko; vzvišeno, tragično, dramatično duhovito, komično in humoristično. Vse naštete estetske kategorije se lahko izrazijo tudi v oblačilih, vendar se bomo tukaj ukvarjali predvsem z estetiko v ožjem smislu, kot z naukom o lepoti. Pojem lepega pa je različen v različnih družbah, kulturah in časih.

Poznamo dve obliki lepega: naravno lepo in umetno lepo. Naravno lepo je tisto, ki ga narava sama oblikuje. Na področju oblačenja se torej naravno lepo nanaša predvsem na človeško telo, na njegove naravno dane oblike in funkcije. Zdravo in skladno telo občutimo kot lepo in umsko prepoznamo to lepoto, ko dojamemo skladnost telesnih oblik z njihovimi organskimi nalogami. Miselna podlaga lepote je tudi tukaj skladnost, in sicer skladnost oblike (telesa) in vsebine (organskih funkcij).

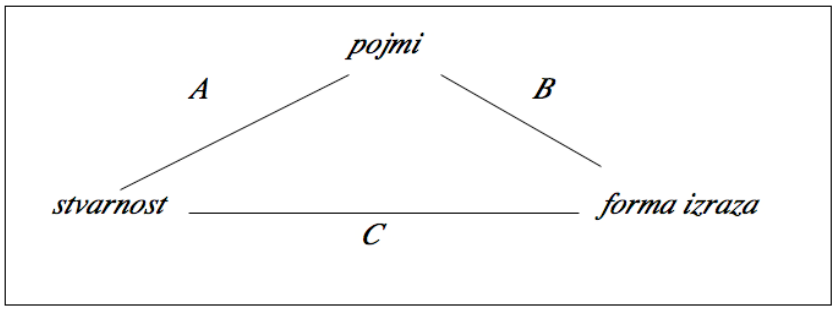
Takšna definicija naravne lepote človeškega telesa je seveda le izhodišče, kateremu se pridružijo še rasni, kulturni in drugi družbeni dejavniki. Doživljanje lepote človeškega telesa je določeno s kulturnimi merili, saj ne občutimo vsakega zdravega in organsko pravilno delujočega telesa kot lepega.

Kot vidimo, so pri estetskem vrednotenju lepote človeškega telesa že vpleteni kulturni kriteriji. Zato se vrednotenje naravne lepote telesa na neposreden način povezuje z vrednotenjem umetne lepote, ki jo ustvarja človek sam. Najprej tako, da s kulturnimi pojmi in merili usmerja izbiro tistih lastnosti naravno lepega telesa, ki so konstitutivni za estetiko določene kulture in ovrednoti kot lepa predvsem tista telesa, ki so že naravno tako oblikovana. Ideal telesne lepote se je zato v raznih kulturah in časih zelo spreminjal.

Šele tako ovrednoteno telo je osnova za oblikovanje oblačil, ki doda svoje (ob) likovne kvalitete. Oblikovanje "dogradi" kulturno določeno lepoto telesa tako, da mu spreminja oblike, premešča težo mase posameznih volumnov z dodajanjem ali odvzemanjem

tekstilij na določenih delih telesa; to dograjevanje ima razpon od npr. komaj opazne vrvice okoli pasu pri nekaterih primitivnih plemenih, prek poslikave in tetoviranja pri drugih kulturah, do spreminjanja naravnih mas telesa, npr. v renesansi in baroku, in celo do popolnega zakritja telesa, kot npr. pri ženskih nošah v nekaterih muslimanskih kulturah. Že iz teh primerov je razvidno, da ni vse, kar je označeno kot lepo, lepo na isti način in lepo za vse. Lepote so različne ne le za posameznike, marveč tudi za človeške skupnosti. Nasprotje lepega je grdo, ki je pomanjkanje lepote, kot je definirana zgoraj. Kakor je relativna lepota, tako je relativna tudi grdota: kar je za nekoga lepo, je za drugega grdo; kar ima neka družba za lepo, druga zavrača kot grdo. Zato je treba poudariti, da je vprašanje presoje lepega bolj družbeno kot subjektivno vprašanje. Posameznik se navadno opredeljuje v okviru meril in navad svoje kulture in svoje družbene skupine.

Čeprav ni mogoče dati splošno veljavne definicije pojma lepega, pa je mogoče orisati njegovo strukturo in odnose njegovih sestavin. Osnovo tvorijo: obstoječa stvarnost (naravna in družbena), spoznanja o stvarnosti, vsebovana v pojmovnih sistemih (filozofija, znanosti in umetnosti) ter v načinu in obliki izraza teh spoznaj. To lahko predstavimo v obliki trikotne sheme, slika 20.2.



Slika 20.2: Shema odnosa-pojmi-stvarnost-izražanja.

V tej shemi lahko spoznanja v pojmih označimo kot vsebino našega odnosa s stvarnostjo, formo pa kot izraz te vsebine; odnosi med posameznimi sestavinami morajo biti skladni. Skladnost mora biti dosežena med stvarnostjo in spoznanji o njej (A), ki jo odražajo. Prav tako mora biti skladnost med spoznanji in formo, ki jih izraža (B); ter med formo, ki je vedno materialna, in s stvarnostjo, na katero se nanaša (C). Razumljivo pa je, da spoznanja nikoli ne odražajo vse stvarnosti, temveč samo tisto, ki jo pojmi zajamejo. stvarnost je vedno bogatejša od iz nje abstrahiranih pojmovnih spoznanj. Zato je razumljivo, da je forma izraza vedno drugačna od stvarnosti, ker izraža abstrahirano splošnost spoznanj, ne pa stvarnosti same. Vendar pa izraža in se nanaša na tisti del stvarnosti, ki je v določenem času za življenje človeka in njegove družbe tako ali drugače pomemben, saj se sicer ne bi z njim ukvarjal.

Vsaka umetnost na drugačen način odraža stvarnost in svoja spoznanja in doživetja izraža z drugačnimi sredstvi svojega specifičnega jezika. Možnost in naloga likovnih umetnosti je, da z likovnimi pojmi odražajo in z njimi zajamejo vsebino doživljanja vidne in tipne stvarnosti prostora in teles, da to svoje doživetje, občutenje in spoznanje izrazijo z likovnimi izrazili - oblikami, barvami in materiali. Tako preoblikujejo obstoječo in izhodiščno formo prostora in teles v novo, družbenemu položaju bolj ustrezno obliko. Takšno trojno skladnost lahko imenujemo lepoto likovne umetnosti in je merilo za estetsko vrednotenje likovne lepote [10].

Vsaka likovna izrazna forma je torej izraz kulturnega vrednotenja na temelju že naštetih družbenih funkcij in njihovih zahtev v danem trenutku zgodovine. Skladnost med formo in kriteriji vrednotenja opišemo z izrazom lepo.

Če prenesemo to strukturo pojma lepega na področje oblačil, bomo rekli, da so, izhajajoč iz naravno in kulturno določene lepote človeškega telesa, oblačila oblikovana tako, da z ustreznimi likovnimi pojmi in z njim ustreznimi likovnimi izrazili ter materiali skladno izpolnjujejo primarne funkcije zaščite telesa in sekundarne družbene funkcije, ki jih posamezna kultura določi kot družbeno pomembne pri oblikovanju oblačila. Estetska lepota oblačila je torej skladnost med družbenimi funkcijami oblačila in likovnimi pojmi ter materiali, ki dopolnjujejo naravno formo telesa tako, da postane telo kulturno sprejemljivo in povzroča občutek ugodja za tistega, ki ga uporablja in za tistega, ki ga gleda. Lepo oblačilo je zato vedno tudi zgodovinsko dosežena harmonija kulturne resničnosti človeškega telesa.

Stari filozofi so učili, da je za lepoto kake stvari potrebno troje: popolnost, pravilno sorazmerje in jasnost. Stvar je popolna, so učili, če ima sebi primerno formo in vse, kar mora imeti; pravilno sorazmerje ima, kadar je med njenimi deli lep odnos, npr. simetrija, zlato sorazmerje ipd.; jasnost pa doseže, kadar zbudi lepe občutke, kadar lepota sije iz nje. Lahko rečemo, da to velja tudi za oblačila.

Poleg para lepo – grdo je med umetniškimi in estetskimi pojmi pomemben tudi par vsebina – forma. Vsebino lahko opredelimo kot vsebino doživljanja in spoznavanja stvarnosti, ki je za človeka vedno družben – pogojena. Zato pri oblikovanju oblačil lahko rečemo, da se vsebina doživljajočega in spoznanega vedno prekriva s kulturno izbranimi funkcijami oblačenja, ker prek teh funkcij družba uravnava odnos do človeškega telesa in določa način njegovega doživljanja. S tem vidno označi odnose med razredi, sloji, spoli in generacijami svojih pripadnikov.

Vsebina se izrazi v formi. Forma v najširšem smislu je vse, kar kakorkoli oblikuje tvar. V likovni umetnosti forma označuje likovno celoto in način njenega likovnega-oblikovnega in prostorskega bivanja. Forma oblačila vedno povezuje razna likovna določila – oblike, mase, volumne, barve, teksture, materiale itd. – v celoto s telesom. Forma se nanaša na likovno strukturo te celote, ki se kaže kot zunanjost oblečenega človeka. S tega stališča je tudi gol človek oblečen, če tako določa kulturna konvencija.

Marksistično gledano je forma nedeljiva od vsebine, je eden od bistvenih elementov (umetniškega) proizvoda. Umetniška forma je izraz vsebine, jo napravi umetniško in s tem estetsko.

Ko govorimo o estetiki in estetskih lastnostih, moramo jasno ločiti med estetiko in umetnostjo. Estetika je veja filozofije, torej ni umetnost. Da bi bila estetika možna, mora najprej obstajati umetnost. Umetnost šele omogoča estetsko razmišljanje o njej. Iz tega izhaja, da umetnik ni filozof-estetik in le-ta ni umetnik, čeprav seveda lahko umetnik tudi filozofira in filozof lahko ustvarja umetniška dela. Estetika je filozofsko razmišljanje o umetnosti ter vrednotenje njenih proizvodov. Je torej opravilo uporabnikov umetnosti - gledalca, poslušalca, bralca. Ker pa je umetnik prvi gledalec svojega dela, seveda lahko razmišlja o njej in tudi o njeni estetski vrednosti. Lepo po svoji biti, pravi filozof Nikolaj Hartman [13], vedno obstaja v odnosu do subjekta, ki opazuje, in katerega posebno aktivno stališče predpostavlja.

Na področju oblačenja lahko srečamo analogne situacije. Dandanes oblikovalec oblačil navadno ni tudi uporabnik tega oblačila, navadno oblikuje za druge, ki sami tega ne delajo. Vendar ni bilo vedno tako, pa tudi danes še najdemo ljudi, ki za sebe sami oblikujejo oblačila. V primitivnih družbah še ni bilo takšne delitve dela, le-ta se je pojavila šele z obrtniki, se razširila z manufakturo in vlada v industrijski proizvodnji. V starih

kulturah so bila kulturna merila znana vsem, zato je vsakdo lahko oblikoval kulturno lepa oblačila. Dandanes tako homogenih kultur ni več, estetske kriterije določajo proizvajalci in specializirani oblikovalci sami, življenje samo pa se tako hitro razvija, da enotnih in trdnih kriterijev ni več. Pravimo, da ni več "okusa".

Izraz "okus" je v estetiki pogost. Za poznavalca lepega pravijo, da ima okus, obleka je okusna itd. Izraz sam - kot jasno kaže - je prišel s področja čuta okusa, torej z živilskega področja, kjer dober okus hrane povzroča občutek ugodja. Okusna hrana pa mora biti tudi lepo servirana, kar dodaja občutek vizualnega ugodja. Tako je termin "okus" začel opisovati splošno sposobnost razločevanja, tisto sposobnost ali moč razuma, s katero razločimo lepo od grdega, dobro od slabega (ne na etičnem področju).

S področja čutnega, telesnega občutenja je izraz prešel na območje intelektualnih operacij. Ker pa je človekov sistem vrednot pogojen z njegovo kulturo, je estetski okus vedno povezan z dobrim poznavanjem kulturnih meril, pravil in običajev, ki veljajo za posamezno območje estetskih predmetov in pojavov, zlasti pa za področje umetnosti. Estetski okus zato lahko definiramo kot dobro poznavanje kulturnih meril, navad in kriterijev, s katerimi je mogoče opredeliti estetsko vrednost kakega kulturnega predmeta ali pojava. Navadno je kakovost estetskega okusa odvisna od dveh dejavnikov: s prirojenim darom in z estetsko izobrazbo, pridobljeno v šoli ali individualno. Estetska sodba vedno izraža stališče uporabnika kakega proizvoda, ne pa njegovega proizvajalca. S tega stališča izraža kritiko ali pohvalo proizvajalcu.

20.6 Oblikovanje in estetika v pogojih industrijske proizvodnje

Likovna umetnost je celota in enotnost duhovnega in telesnega dela. Likovnik svojo zamisel uresniči v materialu s pomočjo tehničnih postopkov, ki so potrebni za likovno proizvodnjo. Likovne materiale in tehnike preučuje likovna tehnologija. V likovni praksi imamo opraviti z umetnostjo in njej ustrezno tehnologijo, ena brez druge ni možna, likovnik lahko misli in oblikuje samo z uporabo ustreznih tehničnih postopkov. Likovna misel se ob tem artikulira v skladu z možnostmi artikulacije izbranega materiala, ta artikulacija pa s svoje strani omogoča misli sami, da se prav artikulira. To dvojno artikulacijo materialov in zamisli posredujejo tehnični postopki, ki jo neposredno omogočajo in pogojujejo. Likovni tehnični postopki so bistvenega pomena za likovno delo. Lahko rečemo, da je likovno ustvarjanje enotnost in celota likovne misli, likovnih materialov in likovnih tehnik.

Tudi v industrijski proizvodnji lahko ugotovimo podobno strukturo: v njej sodelujejo likovna umetnost, znanost in tehnologija. Znanost prispeva svoja spoznanja o zakonitosti narave. Tehnologija ta spoznanja prevede v tehnične postopke, ki so potrebni za preoblikovanje narave v človeku potrebno obliko. Likovna umetnost na temelju oblikovalskih principov in zakonitosti ustvarja nove forma le možnosti kulturne eksistence teles in prostora.

Te odnose lahko shematično zapišemo: umetnost – tehnologija – znanost. Znanost in tehnologija sta neposredno in čvrsto povezani, ker znanstvena spoznanja omogočajo tehnične postopke. Tudi umetnost in tehnologija sta trdno povezani v samem proizvodnem procesu, ko tehnika proizvaja predmete po modelu, ki ga je zasnoval oblikovalec. Med umetnostjo in znanostjo – ki je v tem primeru naravoslovna - pa ni neposredne zveze. Lahko bi rekli, da se v industrijskem oblikovanju povezujejo trije poklici: znanstvenik-naravoslovec (fizik, kemik, matematik), inženir-tehnolog in likovni umetnik-oblikovalec.

Idealni profil na področju industrijskega oblikovanja bi torej združeval vse tri poklice in področja v enega. To pa je prehuda zahteva in preobširno področje znanja, ki bi ga en sam človek zelo težko obvladal.

Teoretiki industrijskega oblikovanja so mnenja, da mora biti oblikovalec sicer dovolj razgledan in izobražen na področju znanosti in tehnologije, ni pa potrebno, da bi bil hkrati umetnik, znanstvenik in inženir. Od umetnosti mora poznati in obvladati predvsem ustvarjalne postopke in oblikovalne principe, na področju tehnologije mora biti dovolj razgledan, da zna upoštevati zahteve tehničnih postopkov in da se zna kompetentno in strokovno pogovoriti z inženirjem tehnologom, ki vodi industrijski proizvodni proces; s področja znanosti pa mora poznati in obvladati racionalno mišljenje in sistematične analitične metode ter eksperimentiranje. Njegova glavna naloga je ustvariti, oblikovati formo proizvoda z upoštevanjem njegovih naravnih in kulturnih funkcij, katerim je namenjen.

Industrijski oblikovalci torej niso umetniki, bolje, ni potrebno, da bi bili. Zakaj? V poglavju o likovni umetnosti smo zapisali, da je naloga umetnosti izražati individualno, subjektivno doživetje in spoznanje stvarnosti. Poudarek je na subjektivni ekspresiji, na tem, kar določeni umetnik sam občuti in spozna. To doživetje je izraženo v umetnini, kjer dobi sebi primerno formo. Vendar umetnina ni predmet iste vrste kot avto, stol, obleka, ki rabijo nekemu praktičnemu smotru. Likovna umetnina spada – kljub svoji snovnosti – na področje duhovnega, namenjena je estetski kontemplaciji, česar za uporabne predmete ne moremo reči. Zato umetnik v svoji umetnini lahko uveljavlja zgolj svojo potrebo po izražanju samega sebe. Če uporabimo ekonomske izraze, bi lahko rekli, da uporabna vrednost umetnine predstavlja vrednost predvsem za umetnika samega, ki je s tem, da jo je ustvaril, zadostil svoji potrebi po likovnem izražanju. Menjalno vrednost dobi umetnina šele takrat, ko nek drug gledalec spozna v njej uporabno vrednost tudi za sebe, ko ugotovi, da je slika takšna, da jo hoče velikokrat videti, ker ga to zadovoljuje. V tem primeru je umetnik izrazil, je ustvaril formo, ki jo kot svojo občuti tudi gledalec. Zato smo tudi zapisali, da postane umetnina družbeno pomembna, ko jo širša družbena skupina ali skupnost prizna za izraz svojega doživljanja sveta. Takrat individualni izraz umetnika postane izraz dobe in družbe, v katerem pripadniki te družbe najdejo uporabno vrednost tudi zase – ker jih izraža tako, kot bi se sami, če bi bili sposobni. Uporabna vrednost se v tem procesu spremeni v kulturno estetsko vrednoto.

Podobni mehanizmi delujejo tudi na področju proizvodnje oblačil. V primitivnih družbah, ko še ni bilo družbene delitve dela, je bil oblikovalec oblačila tudi njegov uporabnik, odnos je bil tedaj tak, kot je opisan zgoraj: forma oblačila je izražala tistega, ki jo je ustvaril, zadostila je njegovi uporabni in estetski potrebi. Z delitvijo dela so se pojavili obrtniki: v obrtniškem obdobju je uporabnik naročil npr. čevelj pri čevljarju, ki mu ga je oblikoval po meri in po okusu. Okus pa sta imela soroden, saj ga je določala njuna skupna kultura. Moderna tovarna čevljev ne pozna več bodočega uporabnika svojih čevljev in njegovih subjektivnih zahtev, zato ga tudi ne more upoštevati. Individualni okus kot delujoči dejavnik lahko upošteva le v določenih mejah, kajti vsaka serija je v ekonomskem smislu odvisna od velikosti naklade [14].

Razkorak med umetniško ekskluzivno formo in "normalnimi" zahtevami ljudi je takoj opazen, piše nemški oblikovalec in teoretik W. Brauneldweg. To je največji problem tako imenovane "industrije okusa". Ker naj bi bil vsak posamezni industrijski izdelek namenjen potrebam individualnega človeka, ta posameznik pa pri izdelavi ne pride do besede, stopi na mesto osebnega dogovora iskanje umetnega stika, s čimer se ukvarja marketing s svojimi načini raziskovanja tržišča [12]. Toda v takšni obliki "stika" z upo-

rabniki se naravni red stvari sprevrže: namesto naravnega zaporedja vprašanj: Kaj? za koga? kako?, nastane zaporedje: kaj? kako? za koga? Namesto, da bi preučil položaj bodočega uporabnika in od tod izpeljal resnično potrebo, marketing navadno poskuša s pomočjo sugestivnih metod prodati že narejen proizvod [13].

Industrijski oblikovalci torej ne delajo več po svojih individualnih nagnjenj jih, temveč skušajo oblikovati tako, kakor jim sugerira marketinška služba. Ker ta največkrat ne ve za resnične želje bodočih uporabnikov, so njene sugestije bolj ugibanja. Na srečo so v vsakem človeku na delu še podzavestni iracionalni tokovi, ki občutljivega in nadarjenega oblikovalca tudi mimo dvomljivih sugestij intuitivno pripeljejo do oblikovnih rešitev, ki izražajo njegovo človeško situacijo v družbi in s tem tudi formo, ki je skupna mnogim, če ne vsem pripadnikom družbe. Veliki oblikovalci imajo prav to sposobnost, da izrazijo tisto, kar je določenemu času in družbi skupno in tako v svojih zamislih ustrežejo svojim soljudem. To je lastnost, ki je prirojena in ji navadno pravimo umetniška nadarjenost ali talent. Vendar je ta sposobnost le na redko posejana.

Ta posebna sposobnost, ki je iracionalna po svoji naravi, se v svobodni umetniški dejavnosti lahko sproščeno in svobodno izrazi, saj je nič ne ovira in ne utesnjuje. Na področju industrijskega oblikovanja pa je drugače. Na eni strani jo utesnjujejo marketinške zahteve, na drugi strani pa zahteve strojev, ki so po svoji naravi racionalni in natančni.

Popoln industrijski proizvod, piše Braun-Feldweg [14], ima brez dvoma racionalen značaj, katerega vzrok je v bistvu stroja in v mehaniziranem poteku produkcije. Stroj normalno dela natančno in popolno. Popolnost in natančnost sta zato resnična kriterija za kontrolo kakovosti vse strojne proizvodnje. Strojni proizvodni proces je neskončno ponavljanje absolutno enakih mehaničnih procesov, zato izključuje slučaj in njegove nepredvidljive učinke, ki so tako značilni za organsko naravo in za človeka, ki je njen del. V ročnem delu človeka je tudi dovolj prostora za ustvarjalno igro in slučaj, česar strogo organizirani proces industrijske produkcije ne prenese.

S strojno reprodukcijo oblikovalske zamisli so nastali pogoji, ki jih prej niso poznali. Ti pogoji, pravi Braun-Feldweg, imajo značaj norm, ki so večinoma tehnološke. Te norme so znamenje industrijske proizvodnje. Funkcija in njene zahteve, proizvodnja in njeni pogoji, prodaja in trgovska distribucija so poglavitne norme, ki jim je vsaka industrijska proizvodnja podvržena in ki neposredno vplivajo na oblikovanje [14].

Prva med temi normami: "Kaj terja funkcija?", je merilo zamisli in določa materiale in njihovo kakovost; kritični kupec izhaja iz nje, ko presoja blago.

Druga norma: : "Kaj zahteva proizvodnja?", sega v normativno mišljenje inženirja. Tu se pokaže racionalizacija z vsemi posledicami: poenostavitev proizvoda po zahtevah množične serijske proizvodnje; prilagajanje napravam obrata; metoda izdelave; čas, cena in kalkulacija izdelave se pojavijo kot delujoči dejavniki tudi za oblikovalca.

Tretja norma je norma trgovca: "Kaj zahteva tržišče?". Na obzorju se pojavi kupec, govori se o prevladujočem okusu, o uspehih in neuspehih prodaje in razpravlja se o njihovih vzrokih.

Vpliv teh norm zavira svobodno ustvarjalnost oblikovalca. Norme povzročijo zanemarjanje individualnih želj v korist splošnih potreb. Vodijo k uniformiranju, k tipiziranju in k standardizaciji. H kompromisom in k prakticističnemu mišljenju, ki je usmerjeno h koristim in k smotrnosti proizvodnje.

Ameriški oblikovalec P. Mueller-Munk je zapisal [15], da marketing ni vreden svojega denarja, če ni pripravljen prevzeti odgovornosti za kakovost izdelkov, ki jih ponuja.

Industrijsko oblikovanje pa nima nobenega opravičila, če ne izpolnjuje naloge, ki je med drugim tudi v tem, da upošteva glas uporabnika. Poudarek v obeh mislih je odgovornost do tovarne in do kupca in šele to daje marketingu in oblikovanju pravo funkcijo. Zato teh dveh dejavnosti ni mogoče ločiti, ena ne more biti brez druge v pogojih množične industrijske proizvodnje in množične rabe.

Braun-Feldweg [14] pravi, da je treba sprejeti naslednje resnice:

- obrtniška kultura starega sveta je pod naletom tehnike že zdavnaj izginila;
- tudi najmanjši kotiček našega individualnega okolja je oblikovala nova sila, industrija;
- toda tej industriji,ki mora zadovoljiti naravne potrebe hitro rastočih družb, je treba vdihniti nekaj tistega, kar je imelo po človeku ustvarjeno okolje pred prvo industrijsko revolucijo: harmonijo in stil. To nalogo je prevzelo oblikovanje.

Ob gornjih ugotovitvah se z olajšanjem zavemo, da so sicer tudi v oblačilni industriji te zahteve enako stroge in neizogibne, vendar jih je dejstvo, da so njeni izdelki namenjeni človeku neposredno, da mu morajo biti dobesedno narejeni "na kožo", omililo v tem smislu, da se skuša industrija čim bolj približati individualnim željam in potrebam kupcev, npr. z manjšimi serijami, ki jih trgovina razprši na večje zemljepisno področje, z izdelavo modelov v različnih vzorcih in barvah ipd. Kajti odločujoči kriterij pri presojanju uporabne vrednosti kakega proizvoda kot njegove estetske vrednote je: ali bomo morali in mogli z njim živeti? Oblačila so za večino ljudi toliko intimna zadeva, da niso pripravljeni kupovati proizvodov, ki ne zadostijo funkcionalnih in kulturnih potreb, ki jih vodijo pri izbiri.

Dober oblikovalec mora poznati zahteve in norme industrijske proizvodnje, saj jih mora upoštevati, da mu preveč ne omejijo njegove ustvarjalne svobode. Zavedati se mora tudi, da mu to znanje omogoča pogovor in posvetovanje z inženirji-tehnologi, ki mu lahko s poznavanjem tehničnih možnosti strojev bistveno olajšajo njegovo težko in odgovorna nalogo.

Estetika industrijske proizvodnje je torej bistveno drugačna in nastaja iz precej drugačnih okoliščin kot estetika umetnosti in obrtniškega ročnega dela.

20.7 O čem govorijo oblačila

Prav gotovo je podnebje eden od tistih naravnih dejavnikov, ki določajo, ali se bo človek zaščitil z oblačili ali ne. Vendar podnebje ne določa tudi načina oblačenja. V Afriki je podnebje večinoma takšno, da bi lahko bili vsi tamkajšnji prebivalci goli, pa niso. Na isti zemljepisni širini živijo ljudstva, od katerih nekatera v celoti zakrivajo svoje telo, npr. Arabci, medtem ko so druga v glavnem gola, npr. nekatera črnska plemena.

Biti oblečen ali gol je vprašanje kulture. Naš etnolog dr. Boris Kuhar pripoveduje [16], da se je na svojem potovanju po Afriki srečal s kirdskim ljudstvom. Dekleta tega plemena, piše, so sedela po skalah ob cesti in se mu na široko smejale. Vse razen ene so bile gole, tako kot je človek sploh lahko gol. Na sebi so imele le ozke pasove, na katerih je spredaj viselo nekaj železnih ali bronastih palčic in obročkov. Na njihovo goloto se je tako navadil, da je sploh ni več opazil, kot je tudi same niso opazile. Fantje in možje so bili prav tako povsem goli, kvečjemu kak kos kožuhovine so nosili na zadnjici. Dekleta te golote sploh niso opazila, kakor tudi možje niso opazili njihove golote. Med golimi, zaključuje Kuhar, golega ni videti.

Isto izkušnjo poznajo nudisti. Če so vsi goli, pravijo, nimaš kaj razkazovati, ker se nihče ne zmeni za to, kar vidi na vsakem koraku. Kdor bi hotel razkazovati svoje spolovilo med nagimi, bi bil zelo razočaran, ker bi kazal nekaj, kar vsi kažejo. Tudi nosov ljudi na cesti ne opazimo. Toda, če bi vsi pokrivali nosove, bi takoj opazili tistega, ki bi ga kazal nepokritega. Razlike vzbujajo pozornost, ne tisto, kar je enako.

Drugi spet trdijo, da se zakrivamo z obleko zaradi sramu, ki je, kot pravijo, prirojen. Oba navedena primera kažeta, da med golimi ni nikogar sram, ker je nag – le zakaj bi ga bilo, če so pa vsi takšni! Tudi sramežljivost je kulturno privzgojena in ne prirojena. Njen izvir je spolna morala, torej kulturna pravila, ki določajo odnose med spoloma. Za moralo, ki je del etike, se vedno skriva svetovni nazor, ki je temelj kulture kake družbe, torej način pojmovanja stvarnosti. Oblačila s svojimi likovnimi značilnostmi izražajo in simbolizirajo tudi veljavni svetovni nazor.

V času pred industrijsko revolucijo je bila osnova evropskega pojmovanja stvarnosti krščanska vera. Osnovni nauk krščanstva pravi, da življenje na tem svetu samo pripravlja človeško dušo na posmrtno življenje na onem svetu. Življenje na tem svetu s svojimi telesnimi in čutnimi zahtevami ni pomembno, odreči se jim je treba ter se posvetiti skrbi za večno življenje na onem. Telo za krščanstvo torej ni bilo vrednota, prej nasprotno, bilo je sinonim grdega in grešnega, zato ga je bilo treba čimbolj skriti, ne pa poudarjati. To je bila naloga obleke. Obleka je imela in še ima v vseh kulturah mistične in magične pomene in prav zakrivanje in odkrivanje telesa ali njegovih posameznih delov je poleg okraševanja vedno bilo pomemben način reguliranja in vizualiziranja družbenih norm v odnosih med spoli, posamezniki, pa tudi med razredi, sloji in poklici.

Lepotičenje in okraševanje oblačil je izraz človekove potrebe, da se razlikuje od drugih ter tako pokaže, da ima lastnosti, ki ga odlikujejo v družbi po kriterijih družbe in kulture, v kateri živi. Z lepotičenjem in okraševanjem skuša na spolnem področju povečati svojo privlačnost. Prav tako pa se s tem dviga nad množico tistih, ki so preveč revni, da bi si lahko privoščili čas in sredstva, ki so za to potrebna. V razredno in drugače trdno razslojenih družbah so vedno veljali strogi predpisi, kako se smejo oblačiti pripadniki posameznih slojev. V kastni družbi Indije so se ljudje vedno ločevali po oblačilih in z njimi izkazovali svojo razredno pripadnost. V evropski fevdalni družbi je bilo posameznikovo življenje trdno določeno z njegovo pripadnostjo kakemu sloju ali razredu, znak le-te pa je bila obleka. Šele francoska revolucija je spremenila in demokratizirala oblačenje s tem,da ni več predpisovala načinov oblačenja, ko je prepustila diferenciacijo bogastvu ali revščini občanov.

Telesno delo je bilo vedno pomemben dejavnik v načinu oblačenja. Telesno delo v sužnjelastniški in fevdalni družbi ni bilo družbeno pomembno, opravljali so ga le nižji sloji. Delo kot visoko cenjena družbena vrednota se je uveljavila z zmago meščanskega razreda v francoski revoluciji. V višjih družbenih plasteh so do tega časa moški tekmovali z ženskami v okraševanju in lišpanju, šele takrat je lišpanje moških izginilo. Strokovnjaki pravijo tej spremembi "velika moška odpoved". Meščanska družba je ustvarila nov ideal "moške lepote". Moč, učinkovitost, poklicna in strokovna uspešnost ipd. so bili novi družbeni kriteriji, po katerih so vrednotili meščanskega moža, pri tem pa je bil lišp odveč. Meščanska družba je delo spoštovala in cenila. Vendar je telesno delo odrinila proletariatu in uvedla razlikovanje v oblačenju ne toliko v dekoraciji kot v kakovosti tekstilij. Zavrgla je prejšnjo delitev družbe in z geslom "svoboda, enakost, bratstvo" omogočila sposobnim iz nižjih prehod v višje plasti družbe. Tip obleke je bil zato bolj ali manj isti in revnejši so si prizadevali v obleki doseči vsaj videz bogatejših.

Moška obleka se v bistvu ni spremenila od francoske revolucije naprej, ker se tudi ideal moškosti ni spremenil. Drugače je bilo z žensko obleko, ker se je v istem obdo-

bju zelo spremenila njena družbena vloga in položaj, spremembe pa so jasno vidne v modi. Moda (iz lat. modus - način) označuje prehodni način družbenega obnašanja, ki v skladu z okusom trenutka ureja način oblačenja in vedenja posameznika v kaki družbeni skupnosti. Moda kot izraz potrebe posameznika po individualnem uveljavljanju, po imitiranju družbeno veljavnih idealov lepote in uspešnosti, je danes postala psihološka potreba večine ljudi..V modi kot načinu oblačenja vidi psiholog globoko podzavestno željo po identifikaciji z veljavnim modelom lepote in mladosti; sociolog jo razume kot družbeno pogojeno obnašanje; zgodovinar v modi spremlja razvoj oblikovanja estetike in njene spremembe; gospodarstvenik se zanjo zanima, ker je produkcija oblačil pomembna ekonomska veja. Moda je že zdavnaj postala tako pomemben družbeni pojav, da je ni več mogoče prepustiti zgolj ženskam samim, bi lahko parafrazirali znano reklo. Dandanes nevidne niti mode vodi družba kot nadosebna instanca.

Pojav novega splošno sprejetega običaja, nove ideologije, izum nove tkanine, novih tekstilnih strojev, nove umetnosti ali ponovno odkritje starega, lahko globoko vpliva na modo. Tako je moda postala pomemben način izražanja družbenega človeka, ki v svojem bistvu izhaja iz potrebe po materialnem preoblikovanju narave za potrebe človeka, istočasno pa tudi iz potrebe po simboličnem označevanju svojega položaja v naravi in družbi. Iz teh istih korenin so nastale umetnosti, estetika, politika, morala, jeziki itd. Moda tako odraža in izraža določeni trenutek družbenega razvoja, njegove dosežke in protislovja.

V resnici je bilo vedno tako: črne in stroge španske obleke v 17. stoletju so izražale protireformacijo in inkvizicijo; čudoviti prosojni muslini, ki so bolj odkrivali kot zakrivali prsi meščanskih žena v času direktorija, niso izginili zaradi Napoleonovega moralizma, ampak zaradi njegove ekonomske politike: prepovedal je uvoz indijskih tkanin, da bi gospodarsko prizadel Angleže in da bi zaščitil lyonsko industrijo svile.

Zanimivi so sociološki vidiki razvoja mode po drugi svetovni vojni. Prvo spremembo je leta 1947 uveljavil Dior z New lookom [17], ko je v oblikah oblačil predpisal ženam ozke pasove, okrogle boke in poudarjen prsni koš, medtem ko je moškim predpisal podložena ramena in ozke boke. Izpostavil je torej spolne sheme telesa, ki bi jih lahko opisali kot dva trikotnika: moški trikotnik stoji na eni konici in doseže največjo širino v ramenih, medtem ko ženski trikotnik stoji na osnovnici in ima konico obrnjeno navzgor. Torej široka ramena in ozki boki za moške, široka in dolga krila in majhne glave za ženske. Dior je tako po celem desetletju, v katerem sta bila oba spola podvržena vojnim naporom, ki so brisali spolne razlike, spet odkril spol kot pomembno kulturno temo.

New look je zamenjala linija, ki so ji nadeli vzdevek "žakelj" [18], ker je obleka v isti širini padala od ramen čez boke do kolen in tako zbrisala pas, krajša krila pa so spet pokazala noge od kolen dalje. Sociologi vidijo v žaklju izraz časa (od 1950 do 1960), ki je ženske množično vključil v produkcijo, ko so ženske postale sestavni del sveta dela in so iz domov in kuhinj vstopile v širše družbene prostore. Stezniki, s katerimi je new look preščipnil telesa, so postali nadležni ob opravljanju delovnih operacij v tovarnah in pisarnah, dolga krila so ovirala vstopanje na avtobuse, vlake in tramvaje, ki so ženske vozili na kraj dela. Poudarek na spolnih razlikah je oviral skupno delo moških in žensk, ker je odvračal pozornost na pojave, ki niso pomembni za delovna opravila.

Obe omenjeni liniji pa sta le ponovili modne rešitve izpred vojne. Dior je uporabil prastaro shemo spolnih razlik, žakelj pa je bil zapozneli odmev modne revolucije Chanellove iz dvajsetih let, ki je prva osvobodila žensko telo iz klešč steznikov in dolgih kril.

Šele 1960 se je zgodil veliki preobrat z mini krili Angležinje Mary Quant [19], ki je nekoč pozneje razložila pomen te revolucije v ženski modi. Mini krilo ni bila samo

moda, temvečznamenje nove dobe, novega družbenega položaja žensk. Škarje, ki so odrezale krilo nad kolenom, so odrezale tudi prejšnjo mentaliteto žena. To je bila doba prvih dolgolascev, Beatlesov, hipijevske filozofije, torej upora proti utesnjenosti družbe, ki je bila usmerjena zgolj k poslovnim uspehom in pridobivanju bogastva. Mini krilo je naznanilo voljo žensk, da same razpolagajo s svojim telesom, voljo, ki jo je izražalo široko gibanje feminizma. Žena je hotela javno pokazati, da njeno telo ni več nikakršen kulturni tabu, nekaj prepovedanega, ki je rezervirano samo za poglede soprogov in tistih, ki si to pravico kupijo. Potreba družbe, da ženske vključi v produkcijo, je morala pospraviti z ostanki stare morale in odpreti novo: mini krilo je afirmiralo žensko kot osvobojen subjekt, hkrati pa je iz nje naredilo seksualen simbol, simbol seksualne "revolucije". Povsem logično se je mini krilo razvilo v vroče "hlačke", za katere pravijo sociologi, da so bile simbol pojmovanja ženske kot predmeta. Predmeta, katerega razne industrije uporabljajo za reklamo svojih proizvodov, od otroške hrane do avtomobilov. Prehod od mini krila na vroče hlačke je bila deformacija prvotne osvoboditve ženske.

Iz te mode se je prek mode, ki se je napajala pri vsemirskih letih, razvil dokaj udoben način oblačenja, ki ,so ga imenovali "casual", slučajna moda, katere glavno vodilo je bilo, da je vsakdo lahko oblekel, kar je "slučajno" dobil pod roke. Ta način ženskega oblačenja je močno posegel po tipično moških oblačilih, od srajc in blazerjev do hlač, ki so postale stalni sestavni del ženske garderobe. Bila je oblikovno ohlapna, oblike telesa povsem prekrivajoča moda. V njej se je združilo nekaj splošnih psiholoških in kulturnih teženj: prodor ženske na tradicionalna moška delovna področja, ki ga je označevalo privzemanje moških oblačil; težnja po udobnosti in svobodnem gibanju pod ohlapnimi oblačili, pa tudi nadaljevanje odpora zoper zlikanost in togost tradicionalno pojmovanega poslovnega sveta in uniformiranosti vedno bolj nasilnega vojaštva, ki je postalo pomembno ob vse bolj pogostih vojnih spopadih po svetu. Na svoj način je govorila o potrebi po svobodi v zaščitenosti, po varnosti in urniku, kakršno je bilo značilno za obdobje po vietnamski vojni, ki je rodila hipijevsko gibanje.

Vsa ta leta se je počasi, pa vedno bolj uveljavljalo staro ameriško oblačilo, jeans hlače, ki so se dokončno uveljavile v času velikih študentskih uporov v letih od 1968 do 1970, in od takrat niso več prenehale biti eno najbolj priljubljenih oblačil. Obleka ameriških delavcev je svoj novi razcvet začela kot uniforma mladih, ki so se združevali v študentskih gibanjih teh let in njihov uspeh sloni na dozorevajočih generacijah, ki so bile spočete po vojni: več kot polovica ljudi na svetu je bila v teh letih stara manj kot 25 let.

Mladi ljudje, ki so takrat spoznali to udobno oblačilo, ga niso odložili, ko so postali starejši, jeans je osvojil svet. Jeans označuje družbeno enakopravnost spolov. Zanimivo je, da je ta izraz enakopravnosti omogočil neki droben in že dolgo znan tehnični izum, zadrga. Prej so hlače zapenjali z gumbi in mesta zapenjanja so bila za ženske na boku, za moške spredaj. V teh letih pa so namesto gumbov uporabili zadrge in zaradi poenostavitve produkcije so jih namestili na istem mestu, spredaj, za oba spola. Nek ameriški modni novinar je v teh letih zapisal, da jeans hlače poudarjajo spolnost tako, da zbližujejo razlike med spoli: moškim dajejo nekaj ženskega in ženskam nekaj moškega. Vendar pa so dovolj jasno ohranile tudi razlike. Zato so bolje izrazile enakovrednost spolov kot poskus unisexa, enakih oblačil za moške in ženske, ki ga je ponudil francoz Esterel. Svojo ponudbo je sicer obrazložil tako, da nikakor ne misli na enak spol, pač pa združitev obeh spolov, na par, ki enako misli in občuti svoj položaj in se zato enako oblači. Očitno pa je, da ljudje potrebujejo zunanje razlike v videzu spolov, le da ne več tako zelo poudarjene, kot so bile, kajti spol nima več enakih kulturnih nalog kot nekoč.

Kot vidimo, forma oblačil označuje celo vrsto družbenih in kulturnih vsebin in pre-

mikov. Za oblikovalca je problem v uporabi pravih likovnih izraznih sredstev in materialov. Sprememba funkcije oblačila se mu kaže zlasti kot sprememba njegove oblike, je torej likovni problem. Ta pa ima svoje notranje zakonitosti in logiko. Takšna logika se kaže npr. v odnosih dolgo-široko in ozko-kratko, ki so tesno povezani z oblikami telesa in z njegovim gibanjem. Dolge obleke in krila pokrivajo noge in da bi bila hoja čim manj ovirana, so navadno široka. Ozka oblačila so navadno kratka, ker bi sicer hoja ne bila možna. Toda široko in dolgo krilo vpliva na navidezno maso spodnjega dela telesa, ki postane zaradi širine prekratko v primerjavi z zgornjim delom. Zato zahtevajo dolga in široka krila podaljšanje nog z visokimi petami na čevljih. Ozka krila tega ne potrebujejo in so zato pete nižje in navadno tudi širše. Na podoben način ti likovni odnosi določajo tudi obliko in velikost glave: široka in dolga krila navadno zahtevajo pričeske, ki manjšajo videz glave, ozka in kratka krila dopuščajo pričeske, ki večajo videz glave. Takšne temeljne likovne odločitve vplivajo na vse dele oblačil, od čevljev, pokrival, uporabe dekorativnih dodatkov in vzorcev do torbic.

Oblikovne spremembe oblačil vplivajo seveda tudi na način gibanja, na kretnje in družabno in spolno igro, ki je s tem v zvezi. Dolga krila zahtevajo drugačen način hoje kot kratka, drugačen način sedenja, stanja, hoje po stopnicah. Spreminjajo tedaj občutenje lastnega telesa v odnosu do drugih in do okolja. Toda podzavestno se človek v novi situaciji sam od sebe drugače obnaša in giblje, ker uporablja kretnje, ki izražajo novo duševno stanje. Zato isti podzavestni in iracionalni tokovi, ki sprožijo spremembo mode, tudi vodijo oblikovalce kot člane te družbe pri oblikovanju. Lahko bi rekli, da podzavestno občutijo in intuitivno spoznajo, katera likovna izrazila, katere oblike in barve so za določeno psihološko in sociološko vsebino najprimernejše. In prav to loči dobre oblikovalce od povprečnih in slabih.

Velikokrat ti iracionalni tokovi pridejo v konflikt z interesi industrije, kot se je zgodilo leta 1970 po zmagi mini krila, za katerega je bilo potrebno malo tekstilnega blaga.

Glasilo ameriške oblačilne industrije "Woman's Wear Daily", ki ima največji vpliv na modo v ZDA, je uprizorilo pravo propagandno vojno zoper mini krilo in čas, ko se je to dogajalo, je bil čas velike zmede v proizvodnji in kupovanju obleke. Ker pa so bila tista leta tudi leta precejšnje blaginje, se je spor razrešil tako, da je vsaka ženska kupila mini in midi pa maksi krilo in se je s tem zavarovala, da ne bi bila prav oblečena. Novinar je v pariškem L'Expressu takole komentiral dogajanje: komaj so se ženske navadile, kako prekrižati noge v mini krilu in kako jih morajo prekrižati v hlačah, so spet morale začeti od začetka in se naučiti, kako se to dela v midi in maksi krilu. Toda ta zadrega je kazala tudi na zmedo v idejah, ki je zajela evropsko in zlasti ameriško družbo po koncu vietnamske vojne.

Vse te stvari so razmeroma malo raziskane. Še vedno najboljše je delo, ki ga je napisal ameriški antropolog A.L. Kroeber leta 1940, z naslovom "Tri stoletja ženskih modnih oblačil". Osnovna misel njegove knjige je, da ni treba prehitro in kar povprek povezovati zgodovinskih dogajanj z modnimi spremembami, ki imajo svoj lastni ritem razvoja. Moda se spreminja v ciklih, katerih amplitude trajajo približno pol stoletja, medtem ko je potrebno za cel interval približno sto let. Tako se je npr. dolžina krila najmanj spreminjala v teh 300 letih. Samo enkrat, v razdobju 1927-30, so se krila hitro in močno skrajšala s posegom Coco Chanell. Bilo je potrebnih nadaljnjih 42 let, da je to mogla ponoviti Mary Quant. V interesu oblačilne in tekstilne industrije je, da se zave pomembnosti teh vprašanj in začne z znanstvenim raziskovanjem njihovih notranjih zakonitosti, da bi lažje načrtovala in usmerjala svojo proizvodnjo. Tudi pri nas.

20.8 Slikovna priloga

a b

Slika 20.3: Tetoviranja telesa. Legenda: a – Indijanci ob Amazonki - minimalno oblačilo okoli pasu, dekorativni krzneni obroči na nadlahti, ter ritualna poslikava telesa z magičnim pomenom (http://rebloggy.com/post/people-brazil-brasil-south-america-tribal-national-geographic-culture-portraits), b – Tetoviranje ima na Japonskem dolgo tradicijo, še iz 3.stoletja n.št. Imelo je ritualni pomen, označevalo pa je pripadnost kasti ali poklicu. Še dandanes je zelo razprostranjeno (https://www.tattoodo.com/guides/styles/japanese).

a b c

Slika 20.4: Lepšanje telesa. Lišpanje telesa je poseben del oblačenja kot dopolnjevanje telesa po kulturnih določilih. Včasih je imelo izrazito ritualen in magičen pomen, od česar je še dandanes nekaj ostalo, npr. nošenje znakov zodiaka (rojstnega znamenja). Legenda: a – http://stravagantejewelry.comrano-glass-jewelry-beads-history.html, b – https://www.pinterest.com/pin/272397477451156054, c – https://courses.lumenlaernin.com/boundllers-arthistory/charter/art-of-new-zealand.

a

b

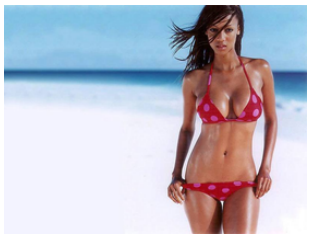
Slika 20.5: Tradicionalna oblačila muslimanov in muslimank. Legenda: a – Muslimani pri molitvi v Marselju Francija, b – Žensko zborovanje v Alžiriji (1972). Islamska vera predpisuje, da se ženske čimbolj zakrijejo. Islamska revolucija v Iranu je spet uvedla tradicionalno črno žensko nošo kot znamenje družbene prenove na temelju vere.

a – 300-400

b – 1875-1927

c 1946

d – 1960



d – 2000

Slika 20.6: Zgodovina ženskih kopalk od rimskih časov do danes. Legenda: a – Dekleta v bikiniju. Freska iz Sirakuze v grških časih, pred več kot 2.000 let. b – Ženska kopalna oblačila pred prvo svetovno vojno (desno). Enodelne kopalke po prvi svetovni vojni. Po drugi svetovni vojni so bile v modi dvodelne kopalke, kot so še zmeraj skupaj z zgoraj brez. Slike niso prikazane. c – 1946 so nazorno prikazana kulturna merila in kriterije za idealno lepo žensko telo v časovni razdalji približno 75 let; pred prvo vojno poudarjeni boki, prsi in ozek pas, zalita postava s tenkimi zapestji in gležnji; v sedemdesetih letih je idealno lepa ženska vitka, mlada in prožna, brez odvečne tolšče, športna postava, katere vitkost je poudarjena z visokimi petami in podplati na obuvalu.

a

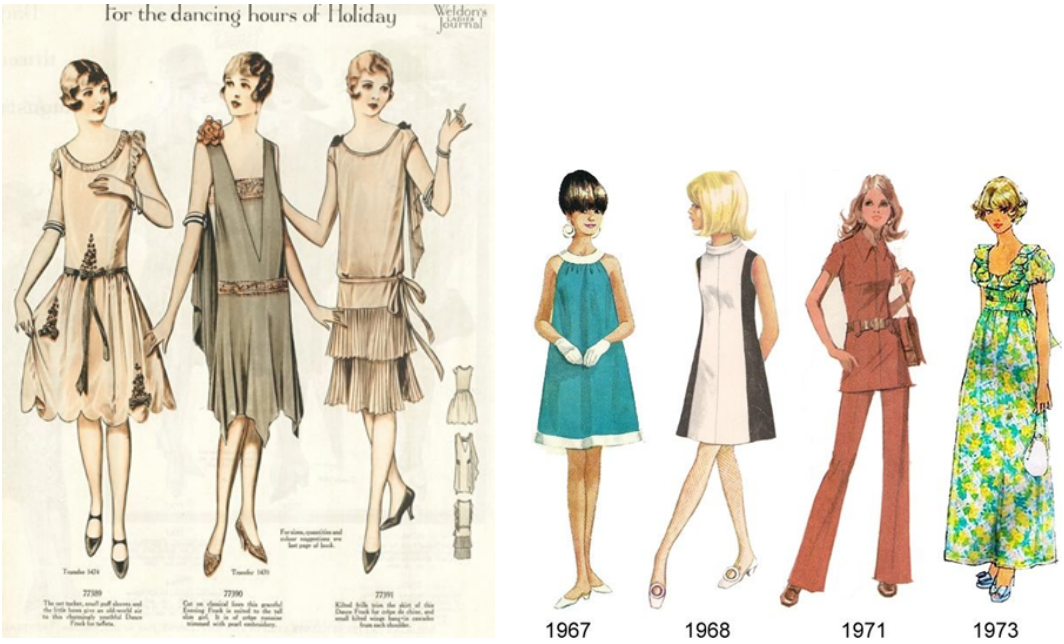
b

c

d

Slika 20.7: Ideali lepote v sredini 20. stoletja. Legenda: Kultura oblačenja je hkrati kultura telesa in v skladu s svojim svetovnim nazorom usmerja pozornost na določene dele telesa, medtem ko druge zanemarja. Jayne Mansfield (a in c) je predstavljala ideal ženske lepote v petdesetih, Twiggi (b) pa je bila ideal v šestdesetih letih. Teenagerski ideal lepote pa je bila Aundrey Hepburn (d).

Slika 20.8: Ženska obleka med 1907 in 1913. Vir: https://www.pinterest.com/pin/151855818660839035/



a b

Slika 20.9: Ženske obleke. Legenda: a – obleke za ples (https://www.pinterest.com/pin/474637248216308281/)- Če telo ni oblikovano v skladu z idealom časa (1907), mu pomagajo posebni za ta namen izdelani deli oblačil: elastični steznik stisne odvečno maščobo na bokih, v pasu in na trebuhu v dopustne meje, b – prosta oblika oblek (https://www.pinterest.com/pin/523754631616450695 33)

a b c

Slika 20.10: Ženska moda 1990–2020. Legenda: a – 1990 (https://www.thefashionfolks.com/blog/20th-century-fashion-history-1990-2000/), b – 2000 (hattps://pinterest.co.kr/pin/423831014912836770), c – 2020 (https://www.thedoublef.com/fr_en/the-rooster/fashion-week-fall-winter-2020-2021-fashion-trends/)

a

b

c

d

Slika 20.11: Kreiranje telesa s pomočjo tkanine. Legenda: a – Osemdeseta (https://encripted-tbno.gstatic.com/images q=tbn:ANd9GcS4spyZ699rCdqH2UEzJvkvLb90iO1DW9Unaw&usqp=CAU), b – Devedeseta (https://fashiontimeless.tumblr.com/post/183882828339/rosemarie-wetzel-for-chanel-spring-1995), c – (https://makeminevogue.wordpress.com/2013/04/30/robe-de-mariee-de-christian-dior-autumn-winter-1979-80/), d – (https://www.pinterest.com/pin/151433606198330395/)

Slika 20.12: Moda na dvoru francoskega kralja Ludvika 14. Legenda: Plemstvo je svoje privilegije in oblast dokazovalo z luksuzno obleko obeh spolov (https://ma-demoiselle-moon.tumblr.com/post/177980432962/fashion-under-the-reign-of-louis-xiv).

Slika 20.13: Nošnje iz druge polovine devetnajstega stoletja. Vir: https://i.pinimg.com/originals/e1/51/19/e151193902c5c697610611c6f38a0f48.jpg

Slika 20.14: Pariške plesne obleke iz začetka devetnajstega stoletja. Vir: https://fashionhistory.fitnyc.edu/1810-1819/

a b

Slika 20.15: Mini krilo prihaja. Legenda: a – (https://stylecaster.com/history-of-the-miniskirt/), b – (https://1.bp.blogspot.com/-q-phNrGGcUM/Uw370wUgBbI/AAAAAAAAeeA/1SR79L4eolw/s1600/Women+in+Mini-skirts+in+the+1960's+(1).jpg)

1948

1958

Slika 20.16: Moda po 2. Svetovni vojni.

a

b

Slika 20.17: Ženski plašč pod katerim so se nosila mini krila (a) in vroče hlačke (hot pants) (b). Legenda: a – sedemdeseta (https://www.pinterest.com/pin/242631498648214290), b – osemdeseta (https://www.pinterest.com/pin/407012885062595572/)

Slika 20.18: Moška obleka se ni bistveno spremenila od Francoske revolucije dalje. Vir: https://www.aliexpress.com/i/32914072860.html

a b

Slika 20.19: Jeans je večen. Legenda: a – (https://www.pinterest.com/pin/63402307235799939/), b – (https://www.pinterest.com/pin/5066618318749325/)

20.9 Literatura

[1] S. Elden. Eugen fink and the question of the world. *Parrhesia: a journal of critical philosophy*, 5:48–59, 2008.

[2] Vetement. *Nouveau Petit Larousse.* Librairie Larousse, Paris, 1975.

[3] B. Rudofsky. *The unfashionable human body.* Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1975.

[4] E. Kale. *Uvod v znanost o kulturi.* Školska knjiga, Zagreb, 1982.

[5] T. Larsen and E. B. Tylor. Religion and anthropology. *The British Journal for the History of Science*, 46(3):467–485, 2013.

[6] K. Marx. *Obdobja ekonomskega formiranja družbe. Očrti kritike politične ekonomije (prvi osnutek) 1857 do 1858.* Cankarjeva založba, Ljubljana, 1967.

[7] A. L. Kroeber and C. Kluckhohn. Culture: a critical review of concepts and definitions. *Peabody Museum of Archaeology and Ethnology, Harvard University*, 47(1):223, 1952.

[8] M. Ilić. *Kultureme : eseji iz kulture i umetnosti.* Naučna knjiga, Beograd, 1985.

[9] Merriam-Webster. *Merriam-Webster's Dictionary and Thesaurus.* Merriam-Webster Inc., 2006.

[10] V. Sruk. *Filozofsko izrazje in repetitorij.* Pomurska založb, Murska Sobota, 1980.

[11] H. Read. *Education through art.* Faber and Faber Publishing, London, 1967.

[12] M. Butina. *Elementi likovne prakse.* Mladinska knjiga, Ljubljana, 1982.

[13] N. Hartman. *Estetika.* BIZG, Beograd, 1979.

[14] W. Braun-Feldweg. *Industrial Design heute: Umwelt aus der Fabrik.* Rowohlt, Hamburg, 1966.

[15] P. Müller-Munk. Industrial design. *Design*, 38(7):12–15, 1937.

[16] B. Kuhar. *Enciklopedija Slovenije, Knjiga 6.* Mladinska knjiga, Ljubljana, 1966.

[17] B. Oeltjenbruns. History of christian dior's new look. cause a frockus, jun 16, 2014. Technical report, 2014. https://www.causeafrockus.com/2014/06/history-christian-diors-new-look/ (13. 8. 2019).

[18] C. Zachary. Born on this day in fashion history: Hubert de givenchy. Technical report, 2015. https://theartofdress.org/2015/02/21/born-on-this-day-in-fashion-history-hubert-de-givenchy/) (13. 8. 2019).

[19] H. Hutchings and L. Writers. Mary quant. *The London Journal*, 44(2):151–154, 2019.

Stvarno kazalo

čas tolerance, 2, 107, 110, 132, 135–137, 150
čelada, 106, 354
čista spektralna barva, 450
čiste barve, 442, 446
čistost, 244, 447, 451, 456, 457
šest osnovnih barv, 446
širina prečnega preseka pore, 156
širina preizkušanca, 424
šotor, 15, 17, 90, 95, 96, 155, 194, 199, 200, 261, 274, 360–363, 388, 394
šotorsko krilo, 194
športna oblačila, 102
športna padala, 364
štapelna vlakna, 389
število por, 108, 139, 157–163, 165, 168, 171–173, 282, 283, 296
število svaljkov, 206, 209, 210, 212, 215, 217, 219
število utripov srca, 143
število zavojev, 226, 332, 333, 361
življenjska doba filtra, 282, 284, 419

absorpcijski spekter, 439
adhezija, 184, 282
adhezijske sile, 283, 284, 289
adhezijsko delo, 184, 185
aditivi zavirajo gorenje, 387
adrenalin, 41, 42, 48, 57
aerodinamično predenje, 390
aerodinamika, 127, 172, 366, 368
agresivno okolje, 108, 284, 387–389
Albrechtov model, 205
alergija, 105, 383
alfa-beta transformacija, 225
alfa-keratin, 225, 237
alfa-vijačnica, 225, 232, 237
alternativni poenostavljeni kinetični model, 208
antropološki faktorji, 477
aramidne tkanine, 361
arheologija, 477
armatura, 285, 335, 339, 343, 344, 352, 389
aromatski poliamidi, 387, 404
arterijska kri, 44–46, 57, 140

bakrena plošča, 110
barvna harmonija, 262, 464
barvne harmonije tkanine, 262
barvne karte, 441, 456
barvne kompozicije, 459, 464, 467
barvni kontrast, 463
barvni krog, 446, 451
barvni prostor, 435, 436
barvni rez, 442, 447
barvno telo, 442, 446, 447, 451
batik tkanina, 96
Baumgarten, 482
bazalni metabolizem, 49, 59, 144
Bernoullijeva enačba, 366
biaksialna tkanina, 330, 414
bikomponentna preja, 242
blazina, 260, 261, 385
blazinjenje pohištva, 260, 262, 385
bojni strup, 108
Boltzmannova konstanta, 287, 301
Brand-Bohnfalkov kinetični model, 206
Braun-Feldweg, 487, 488
Brauneldweg, 486
Brewsterjeva teorija, 440
Brownnovo gibanje, 275–278, 281, 287, 311, 314
Bundesmannova metoda, 193, 194, 197, 199, 200

cerada, 17, 194, 199, 200, 274, 362, 388, 394
Chanell, 490, 492

CIE sistem, 440
cona ugodja, 1–3, 6, 34–36, 39–41, 43, 45, 47, 58, 79, 109–111, 123, 128, 133–141, 143–147, 151, 178

dakron, 211, 212, 219
Darcyjeva enačba, 282
Darwin, 91
dežni plašč, 103
dežnik, 97, 103, 363
debelina oblačila, 125
debelina preizkušanca, 424
debelina preproge, 264
dekorativno blago, 383, 393
delovna halja, 108
delovna oblačila, 102, 387
depilacija, 98
difuzija, 8, 9, 287
difuzijski koeficient, 180, 287
dinamična obtežitev, 265
dinamična viskoznost fluida, 173
dinamični udarec, 364, 366
disharmonično, 362, 464, 466
disharmoničnost, 482
disulfidna prečna vez, 231
dolžina niti v zanki, 414
dolžina preizkušanca, 424
dolžina zanke, 411, 413
drgnjenje, 108, 194, 195, 200, 265, 269
dušenje hrupa, 263
Duprejeva enačba, 184
dynel, 220, 221

Egipt, 94, 97
elastičnost, 103, 224–229, 231, 232, 236, 237, 243, 256, 262, 326, 327, 330, 355, 356, 360–362, 371–373, 385, 388, 389, 394, 395, 406
elektrostatični naboj, 267
energija kapelj, 18, 195, 197
Engels, 480, 481
Esterel, 491

filtrski medij, 3, 274, 279, 284–286, 288, 289, 419
Fink, 475
finost preje, 241, 332, 343, 354, 357, 361, 391, 392, 395, 397, 398, 402, 403, 413
fiziološka adaptacija, 91
fiziološka podobnost, 261
formiranju lasu, 212
frikcijsko predenje, 390

gašenje požarov, 132, 141
gasilska oblačila, 274
geotekstilije, 274, 284, 285, 360, 419, 420, 422, 424
gostota energijskega toka sevanja, 6
gostota fluida, 173, 368
gostota osnove, 401, 402
gostota toplotnega toka, 7
gostota vlaknovine, 424
gostota votka, 356, 402
gravitacijska sedimentacija delcev, 288
grbančenje tkanine, 234–236

harmonična barvna kompozicija, 464
harmonija kontrasta, 464, 465
harmonija podobnosti, 464
Hartman, 484
Heaviside, 151
hemoglobin, 58
hidravlična pora, 172
hidravlični premer, 3, 139, 155–164, 168, 172, 173, 183, 188, 190, 278, 289, 296, 299–303, 334, 355, 377, 394, 419
hidrodinamična metoda, 193
hidrodinamični pritisk, 190
hidrodinamični udarec, 18
hidrofilno, 105, 184, 190, 193, 198, 200, 268
hidrofobno, 138, 184–186, 188, 190, 193, 195, 198, 267, 268, 360
hipijevsko gibanje, 491
hitrost fluida, 173, 303, 304, 312
hitrost izhlapevanja, 15, 18, 44, 46, 81–83, 96, 107, 132, 137, 141, 146, 150, 151, 178, 180
hitrost izločanja znoja, 46, 47, 65, 66, 68, 70, 71, 73, 76, 78, 79, 146, 178
hitrost izstrelka, 323–325
hitrost kroženja krvi, 73
hitrost oddajanja toplote, 147
hitrost pretoka vodne pare, 15, 148, 178, 180–182
hitrost tvorbe svaljkov, 212, 213, 219

hitrost vetra, 3, 18, 19, 23, 35, 45, 107, 115, 123–127, 130, 132, 133, 135–137, 142
hlačne nogavice, 392
Hofmanov model, 205
Hookovo področje, 225, 235, 406

Igle, 418
igle, 317
iglu, 88, 90, 91
Ilić, 477
indeks kisika, 261
infrardeča svetloba, 432
infrardeči spekter, 6, 106, 244, 432, 433, 457
intenziteta radiacije, 56
intenzitete dežja, 187
Inuiti, 88, 90
inverzija, 16
izžarevanje, 34, 36, 104, 141, 144, 148
izgube zaradi izhlapevanja znoja, 49, 135, 151
izhlapevanje znoja, 18, 29, 34, 39, 44, 79, 80, 98, 134–137, 142, 144, 145, 148, 151, 179

jadro, 127, 388, 394
jeans hlače, 491
jedro telesa, 1, 52, 140, 144

Kale, 477, 478
kaplja vode, 184
kaplje dežja pri neurju, 199
kavbojke, 104, 221
Kevlar, 323, 326–328, 332, 334, 348, 354, 355, 357, 361, 388, 389
kinematična viskoznost zraka, 173
kinetična energija, 18, 187, 188, 190, 322, 325, 348, 350
kinetična energija kaplje, 187, 188, 190
klimatska komora, 124
klobučevina, 418
kodravost, 361, 385
koeficient difuzije, 281
koeficient disperzije, 198
koeficient odpornosti niti, 332
koeficient permeabilnosti, 422, 424
koeficient toplotne prevodnosti, 39, 40, 79, 90, 109–112, 116, 126, 128, 130, 131, 133, 145–147, 151, 266
koeficient trenja, 285, 407
koeficient viskoznosti zraka, 279, 282
količina padavin, 19, 23, 30, 91, 95, 97
kolorimetra, 457
kompaktno predenje, 391
komplet zaščitnega oblačila, 138, 142, 146, 148
kompozicija barv, 102
koncentracija svaljkov, 208, 221
kondukcija, 11
konkavna površina vode, 187
konstrukcija tkanin, 180, 214, 375, 395
konstrukciji rokavic, 118
kontrola kakovosti, 109
konvekcija, 9, 40, 44, 49, 57, 111, 124
kord za gume, 389, 395
kosmatenje, 204, 211
kozmični žarki, 432
kravata, 104
kritična temperatura, 135, 141, 146, 147
kritično stanje, 145
kroženje krvi, 40, 45, 56, 57, 72, 73, 93, 140, 260
Kroeber, 492
kroj, 96, 102–107, 109, 132
kroj uniforme, 106
kromatična točka, 435
kromatične koordinate, 435–438
kromatični diagram, 435, 436, 438
krvni tlak, 57
krzno, 88, 90, 91, 95, 105, 109, 180, 197
Kuhar, 488
kurja polt, 44, 47, 48, 56

letalsko krilo, 364, 366
likovni slog, 480
likovno ustvarjanje, 485
linearna hitrost pretoka, 128, 157, 173, 174, 368, 374
ločevanje kontrastnih barv, 467
loputa iz kože, 90

Maji, 97, 98
maksi krilo, 492
Mangusov učinek, 311
Maritain, 478
Marx, 477, 480
Mary Quant, 490, 492
masa gotove tkanine, 402
masa izstrelka, 325

maskirna uniforma, 106, 433
maskirne barve, 388
maskirne mreže, 388, 394
mečkanje, 47, 224
mehanizem drsenja, 235
mehanizem penetracije izstrelka, 324
mehanizma difuzije, 278, 288
meja med plaščem in jedrom telesa, 143
metabolizem, 41, 42, 45, 48, 49, 51, 98
metoda potopitve vzorca, 193
Mezopotamija, 94, 97
moč, 438, 441, 446, 447, 451, 457
moč barve, 441
močenje oblačila, 137, 183
modul elastičnosti, 326, 330, 356, 360, 394, 406, 407
monofilamentne niti, 390
mrzel zrak, 88, 104, 124, 125
Mueller-Munk, 487
multifilamentna preja, 393–395, 408
Mundenov model, 417
Munsellov sistem, 441

nadaljnje trganje, 388, 405, 408, 420
nagnjenost h kosmatenju površine, 211
nagrbančene površine tkanine, 240
najlon, 388
najmanjši hidravlični premer, 160, 161, 172, 300
namembnost oblačil, 102, 109, 385
nasičeni parni tlak, 15, 83, 180
nasičenost, 442, 447, 451, 456
nasičenost barve, 442, 446
natezna sila, 224, 234
negorljiva vlakna, 387
negorljivost posteljnine, 261
neprepustnost za vodo, 132
Newton, 304, 307, 308, 315, 432
niansa, 440–442, 453, 457, 463, 465
Nomex, 323, 332, 357, 361, 388, 389
Nova filozofija umetnosti, 475
Nu-Hue Custon Color System, 441

ožilje, 40, 48, 52, 56, 57, 93, 140
oblačila za posebne namene, 102
oblačilo nevnetljivo, 108
območje X in Y žarkov, 432
obstojnosti barv, 244, 265, 457, 458
odeja, 386, 393
odpadanja svaljkov, 204, 208, 209, 212, 219
odpornost proti deformaciji, 204, 226, 262, 373, 403
odpornost proti drgnjenju, 204, 262, 385, 389, 402
odpornost proti gorenju, 260
odpornost proti pregibanju, 198
odprta površina, 127, 139, 157, 160, 161, 183, 294, 296, 298, 299, 301
Ognjena zemlja, 87, 91
ohlajanje organizma, 47, 52, 93
ohlajevanje vdihanega zraka, 134
oksiceluloza, 361
omočljivost tkanine, 185, 194
oprema bivalnih prostorov, 385
orlon, 221
osnovna barva, 441, 452
osnovna ravnina, 435, 436
otroška oblačila, 102, 103, 105
ozko krilo, 492

PA, 384, 386, 388, 392, 394
padalo, 3, 274, 363, 388, 389, 394, 412
PAN, 108, 219, 234, 267, 386, 388
parjenje preje, 227
penetracije pri zlomu kompozitov, 343
PES, 113, 179, 213, 261, 267, 384, 386, 388, 389
pižama, 260, 386
pigment, 439, 441, 446, 453–455, 459, 465, 468
piling, 206, 262, 268, 385, 387, 393, 402
pisarniško pohištvo, 386
plašč telesa, 1, 140, 141, 143
plasti koprene, 418
pletene srajce, 391
ploski tekstilni izdelek, 112, 116, 156, 157, 181, 274, 395, 408
podhladitev, 39, 65
podhlajen organizem, 140
podkožno tkivo, 1, 35, 40, 42, 45, 48, 52, 57, 93, 132, 140, 178
pojav deformacij v volnenih tkaninah, 225
polariteta, 452
polarna uniforma, 130
polarni koordinatni sistem, 242, 453
poliakrilnitrilna vlakna, 234–237, 241
polmer delca, 279

polmer krogle, 117
polmer kupole padala, 368, 370
polnilo, 419
polnost tkanine, 397
polstenje, 418
pore med nitmi osnove in votka, 112, 142, 155, 156, 163, 164, 172
poroznost, 3, 139, 142, 147, 155, 185, 275, 281–284, 286, 289, 293–296, 299, 301, 302, 360, 361, 368, 370, 371, 373, 375, 377, 389, 395, 397, 419, 420
posteljnina, 3, 260, 261, 383, 393
posteljno perilo, 260, 261
povečanje hitrosti močenja, 190
povprečna temperatura, 39, 42, 48, 49, 93, 95, 97, 134, 142–146, 148, 151
površinska gostota, 183
površinska napetost tekočine, 156
PP, 266, 386, 388
prava svila, 388
prečne polarne vezi, 231
prečne vezi, 225, 226, 231–233, 418
prelon, 388
premer niti, 395, 397, 407, 411, 414
premer preje, 242, 395, 409
preproge, 260, 264–270
prepustnost vodne pare, 102, 107
pretok izhlapelega znoja, 102, 145
pretok skozi omočen vzorec, 159
pretok skozi suh vzorec, 159, 172
pretok toplote, 116, 117, 125, 146, 148
primarne barve, 439, 440, 459
prosta energija, 184
proti prebojni jopič, 346
prstančni predilnik, 390
prsti, 36, 41, 45, 49, 54, 55, 108, 115
pulover, 104, 392

raye, 469
razlika tlakov, 18, 79, 80, 127, 156, 157, 181, 197, 282, 284, 286, 373, 422
razpočna trdnost, 243, 379, 419
raztezek, 210, 211, 225, 231, 254, 255, 326, 330, 332, 333, 379, 404, 406, 407, 414, 417, 419, 425
rešetka, 454
Read, 480
receptorji, 34
refleksija, 267, 268, 432, 457, 463
regresijska krivulja, 66
regularne proge, 471
relativna vlaga, 6, 15, 29, 79–82, 112, 113, 131, 135, 136, 141, 148, 178, 179, 225, 268, 269
Reynoldsovo število, 173, 278, 281, 301
ribiške mreže, 360, 388, 393
Riemmannove površine, 455
Riemmanov prostor, 455
rokavice, 54, 55, 88, 108, 118, 392, 393
rosa, 16, 18
rotameter, 159

sandale, 94, 95, 98
sarong, 97
sedimentacija, 288
sevanje, 6, 9, 11, 22, 57, 111, 124
sila nadaljnjega trganja, 379
sila upora, 349, 372, 373, 375
sintetična pena, 262
skrčenje, 58, 224, 232, 233, 269, 344, 402
skupna toplotna izolacija, 126
slana, 17
snutkovina, 414
sociologija kulture in umetnosti, 477
spalna vreča, 15, 261, 419
specifična toplota, 7, 9, 10, 90, 126, 127, 134, 135, 144, 145
Spectra, 323, 332, 348, 356, 357, 361
spodnje perilo, 102–104, 244, 383, 384, 391, 408
spray test, 193, 197, 199
standardna atmosfera, 111
standardna tkanina, 180–182
stanovanjsko pohištvo, 386
statična elektrika, 179, 206, 243, 268, 283, 383, 384, 419
stenske in talne obloge, 260, 263, 264
stična površina, 188, 215–217, 234
Stocksov premer delca, 286
Stocksovo število, 286, 287
stopala, 36, 43, 56–58, 69–71, 78, 105, 115, 139, 141, 392
stopnja umazanosti, 267, 268
stopnjevani barvni vzorec, 471
strižni gradient, 288
suha in mokra filtracija, 274
svaljek, 204–206

svetlobni spekter, 459, 465
svetlost, 441, 447, 451, 456, 457

talne in stenske obloge, 383, 385, 387
Tasili, 94
Technora, 323, 388
tehnične tekstilije, 3, 383, 387, 393
tehnični postopki, 485
tekstilna vlakna, 284
tekstilni filter medij, 274
teksturiranje, 385
telesna temperatura, 34, 35, 41, 42, 48, 134
temperatura okolja, 34, 36, 39, 41, 42, 45, 46, 49, 54, 66, 68, 70, 71, 73, 79, 88, 104, 123, 135, 144, 145, 147, 148, 151, 178, 261
temperatura rosišča, 15
temperatura ugodja, 128, 140, 141, 144, 145
temperatura zraka, 6, 10, 13, 15, 17, 20, 22, 29, 49, 75, 79–81, 90, 91, 94, 96, 124, 148
temperaturni prag občutljivosti, 93
terciarne barve, 440
termična difuzivnost, 7
termoizolacija, 23, 102, 104, 109, 137, 392
termoizolacijske plasti, 40, 45, 105, 383, 386, 392
termoizolacijski vložek, 392
tetra aksialna tkanina, 330, 351
tkane srajce, 391
tlak vodne pare, 15–17, 46, 79, 83, 103, 180
togost, 210, 216, 390, 395, 402
tokovnica, 3, 127, 274, 275, 277, 278, 281, 286, 294, 304, 366, 370
ton, 432, 447, 453, 457, 459, 462–468, 471, 472
toplota absorpcije vode, 179
toplota ravnovesja, 125
toplotna prevodnost, 7, 17, 18, 112
toplotni šok, 46
toplotni izolator, 37, 39, 40, 42, 97, 99, 118
toplotni upor, 40, 43–45, 47, 48, 52, 54, 57, 104, 105, 107, 109–111, 116–119, 124, 128, 131–135, 144–148, 150
toplotni upor oblačila, 133
torna sila, 205, 211, 215, 217, 346, 403
torni koeficient, 210, 215, 216, 346, 408, 416
trajne deformacije, 225–227, 232, 270
transportni trakovi, 274, 363
tri aksialna tkanina, 330, 351
tunelski učinek, 104
turbulentno gibanje zraka, 10, 173, 278
tvorba svaljkov, 204
Twaron, 323, 332, 388
Tylor, 477

učinkovitost filtracije, 279–283, 286, 287, 289, 293, 389, 419
ugotavljanje parametrov poroznosti, 172, 295
ultravijolično območje, 432
umetniška nadarjenost, 487
uniforma, 2, 102, 105–107, 128, 130, 204, 383, 387, 432, 433, 491
upogib, 188, 213, 216, 237, 354–356, 406, 410, 411
upor pretoku vodne pare, 29, 178–181, 334
upor proti pritisku, 385

valjasto telo, 116
večplastnost, 34, 386
velikost in porazdelitev por, 289
venozna kri, 45, 46, 51, 54, 56, 58, 140, 178
višina zračne plasti, 181, 182
vidna bela svetloba, 432
vidni del spektra, 432
viskozna vlakna, 220, 243, 386
viskoznost tekoče faze, 286, 287
vlakno X, 323, 332
vodo odbojnost, 18, 104, 113, 193, 220
volnene tkanine, 17, 95, 218, 219, 224, 227, 361
volumenska hitrost pretoka, 128, 130, 134, 135, 157, 159, 160, 284, 368, 370, 422
vrhnja plast, 190, 383, 385, 391
vrste kemičnih vlaken, 383
vsakdanja oblačila, 102, 103, 385
vsebnosti vode v oblačilu, 124
vtkanje, 398, 400, 402, 404
vzgon, 364, 366, 368, 369, 371

vztrajnost delca, 275

Xenotest aparat, 457, 458

zaščitni jopič, 322
zadrga, 491
zavese, 260, 263, 360, 386, 388, 393
zbiralni krožnik, 195
zelo gost filter, 390
znojenje, 34, 41, 47, 49, 58, 65, 107, 137
znojne žleze, 46, 72, 75, 178
zvezdast presek, 215
zvok visoke frekvence, 266

Naslov publikacije:
Projektiranje in konstrukcija tekstilij in oblačil

Avtorja:
prof. dr. Danilo Jakšić, univ. dipl. inž.

doc. dr. Nikola Jakšić, univ. dipl. inž. stroj.

Oblikovanje naslovnice:
Jernej Strmec, mag. inž. el.

1. elektronska izdaja na podlagi 3. popravljene izdaje

Izdal in založil:
prof. dr. Danilo Jakšić

Dostopno na: https://www.researchgate.net/profile/Nikola-Jaksic

Ljubljana, november, 2023

Obseg:
IX + 509 strani