

MERJENI IN IZRAČUNANI FOTOBIOLOŠKI UČINKI ODBITE SVETLOBE NA LJUDI

MEASURED AND CALCULATED PHOTOBIOLOGICAL EFFECTS OF LIGHTING ON OBSERVERS

dr. Katja Malovrh Rebec, univ. dipl. inž. arh.

katja.malovrh@zag.si

Zavod za gradbeništvo Slovenije,

Oddelek za gradbeno fiziko, Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 53.043:628.9.021

Povzetek | Pri načrtovanju osvetlitve izračuni le delno napovejo vplive svetlobe na uporabnike prostorov. Svetloba ima namreč poleg dobro poznanih slikovnih učinkov, ki jih možgani interpretirajo na podlagi odzivov čepkov in paličic, tudi neslikovne učinke. Ti ne pripomorejo k orientaciji v prostoru, temveč sporočajo telesu ključne informacije, ki vplivajo na tvorbo hormonov. Vrh te zaznave je v modrem delu spektra vidne svetlobe. Žal delovanja teh fotoreceptorjev še ne opisujemo s parametri, ustaljenimi v praksi projektiranja, zato so vplivi na uporabnike pogosto prezrti. Dodaten izziv pomeni praksa, pri kateri svetlobne učinke preračunavamo v lukse, kar pomeni, da jih množimo s povprečnim človeškim dnevним vidom. Tak pristop ni primeren za vrednotenje neslikovnih učinkov, ker imajo drugo akcijsko krivuljo. Izmerili smo spektralno sestavo odbitih dnevnih svetlob v modelnem prostoru, ker nas je zanimalo, kakšne razlike nastanejo v slikovni in neslikovni zaznavi, če pobarvamo stene z različnimi barvami. Modra in vijoličasta stena neslikovno stimulirata opazovalca bolj kot slikovno v obeh opazovanih smereh pogleda, oranžna v obeh primerih neslikovno vpliva manj, pri zeleni pa je bila neslikovna zaznava bolj stimulirana od slikovne pri pogledu naprej, pri pogledu v mizo pa je bilo obratno.

Ključne besede: fotobiološki učinki, odbita svetloba, spektralna sestava svetlobe, melatonin, dnevna svetloba

Summary | When designing light, the calculations only partially predict the effects of light on the users. In addition to the well-known image forming effects based on rod and cone responses, the light elicits non visual effects as well. The latter is not related to the orientation in ambient, but communicates key information related to hormones secretion. The peak of this perception is in the blue part of the spectrum of visible light. Unfortunately, the responses of these photoreceptors cannot be predicted with parameters currently used in the lighting design practice, so the effects on users are often ignored. An additional challenge is the established practice where the light effects are communicated in lux, which means that they are multiplied by the average human daily vision. Such an approach is not suitable for the evaluation of non-visual effects, because they have a different action curve. We have measured the spectral composition of the reflected daylight in the model room, because we were interested in the differences in image and non-visual forming effects of differently painted walls. Blue and violet walls stimulate observers' non-image forming perception more than image forming in both gazing directions. In both gazing directions orange walls stimulate non-image forming effects far less than the image forming ones. Green walls revealed bigger non image forming effects than non-image forming effects in the forward look, and the other way around in the gaze directed on the table.

Key words: photobiological effects, reflected light, spectral composition of light, melatonin, daylight

1 • UVOD

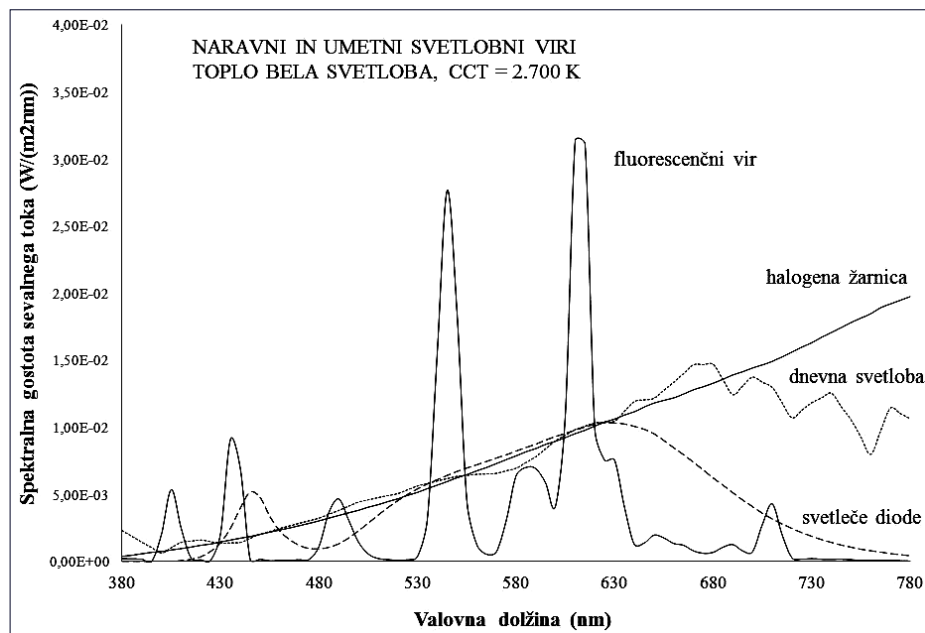
Načrtovanje osvetlitve je lahko v arhitekturi precejšen izziv. Po eni strani vemo, da svetloba bistveno vpliva na raven udobja bivanja v stavbah, po drugi strani je svetloba lahko pomemben faktor pri gradbeni fiziki, zane-mariti pa ne gre tudi umetniške plati svetlobe, s katero lahko spreten načrtovalec pričara v prostoru posebno vzdušje. Poglobljeno poznavanje mehanizmov vplivov svetlobe na ljudi ni ena od pogostih tem med načrtovalci prostorov. Zato je mogoče zdaj pravi trenutek, da pokažemo nekatera prebojna spoznanja na področju zaznavanja svetlobe in vplivov svetlobe na ljudi, ki bodo v prihodnje formirala stroko in usmerjala odločitve pri načrtovanju.

1.1 O spektralni sestavi naravnih in umetnih svetlobnih virov

V splošni razsvetljavi je najpogostejša uporaba žarnic na žarilno nitko (klasične se opuščajo, vendar je še vedno pogosta uporaba halogenskih), fluorescenčnih sijalk (klasične fluorescenčne »cevi« – FL – kot tudi varčne sijalke – *Compact Fluorescent Lamps*, CFL), vedno bolj pa je razširjena tudi uporaba sijalk s svetlečimi diodami (*Light Emitting Diodes*, LED). Sicer v razsvetljavi uporabljamo tudi metalhalogenidne sijalke, visoko- ter nizkotlačne natrijeve sijalke (cestna razsvetljava) in obločnice. Naštetih umetnih virov se ločijo po načinu nastanka svetlobe (žarenje, razelektritev, polprevodniški vir svetlobe), po svetlobnem izkoristku, dobi delovanja, spektralni sestavi, vsebnosti elementov, kot sta živo srebro in svinec, ločijo se tudi po času, potrebnem za vžig, po ceni in po tem, ali lahko vsebujejo sevanje v UV-delu spektra (čemur se želimo izogniti). Svetlobni viri LED imajo danes največji potencial za zmanjšanje porabe energije v sektorju razsvetljave ((Steigerwad, 2002), (Lister, 2004), (Schubert, 2005)). Eden od načinov ocenjevanja energijske učinkovitosti virov je svetlobni izkoristek: razmerje med svetlobo, ki jo odda vir, v fotometričnih enotah (lm) in porabljeni električni energiji (W). Virom LED, ki se izjemno hitro razvijajo in izboljšujejo, napovedujejo daleč največje svetlobne izkoristke. V tem prispevku pa bo pozornost posvečena spektralni sestavi svetlobnih virov in tudi v tem smislu so LED-viri novost, saj lahko spektralno sestavo izsevane svetlobe manipuliramo glede na potrebe uporabnika. Predpostavljamo namreč, da je spektralna sestava dnevne svetlobe tista, na

katero smo se ljudje in druga živa bitja prilagodili, in verjetno bi morali najti način, kako se z umetnimi viri čim bolj približati njenim značilnostim.

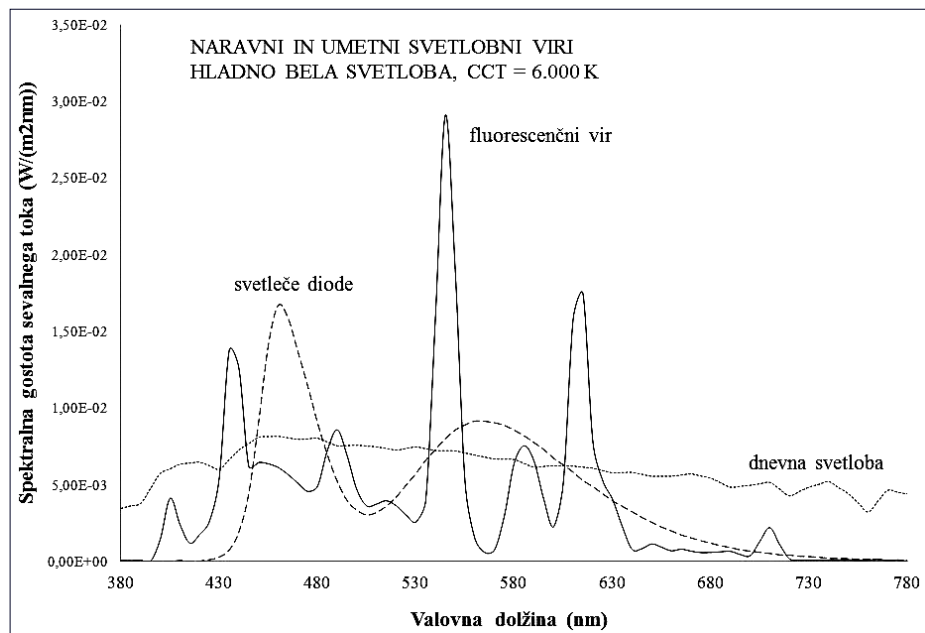
umetnih virov je zelo različna. Niha pa tudi spektralna sestava dnevne svetlobe: zjutraj je dnevna svetloba toplo bela, sredi dneva preide v hladno belo, zvečer pa ponovno postopno preide v toplo belo svetlobo. Človeški organizem se je na spreminjanje spektralne sestave svetlobe prilagodil oziroma ga uporablja kot eno ključnih informacij za uravnavanje



Slika 1 • Na videz podobna toplo bela svetloba in različna spektralna sestava glede na vir svetlobe (primerjava halogene žarnice, fluorescenčnega vira, svetlečih diod in dnevne svetlobe), normirano na 500 lx.

Ljudje zaznavamo svetlobo med valovnimi dolžinami 380 in 780 nm. Spektralna sestava

procesov v telesu. Kljub temu je ta vidik slabo pokrit pri parametrih, ki jih uporabljamo za



Slika 2 • Na videz podobna hladno bela svetloba in različna spektralna sestava glede na vir svetlobe (primerjava fluorescenčnega vira, svetlečih diod in dnevne svetlobe), normirano na 500 lx.

načrtovanje osvetlitve, zato pogosto nastajajo učinki svetlobe, ki jih nismo pričakovali.

Materiali in zasnova površin, ki nas obdajajo, bistveno vplivajo na spektralno sestavo svetlobe, ki doseže oči uporabnika prostorov. Tako lahko načrtujemo intenzivnost kot časovno komponento izpostavljenosti svetlobi in tudi spektralno sestavo svetlobe, ki doseže fotoreceptorje (Andersen, 2013). Pri izračunavanju spektralne sestave in intenzivnosti svetlobe, ki doseže človeško oko, moramo upoštevati razporeditev predmetov v okolici in materiale, iz katerih so sestavljeni (Malovrh Rebec, 2014). Pri predmetih v okolici nas zanimata njihova spektralna odbojnost in vpojnost. Do neke mere se ti učinki upoštevajo pri računalniških simulacijah, s katerimi inženirji načrtujejo razsvetljavo (na primer Relux, Dialux). Vsekakor lahko dobimo vpogled v to, koliko se spusti nivo osvetlitve zaradi absorbirane svetlobe v predmete, stene v okolici. Vendar programska oprema ne omogoča manipuliranja spektralne sestave svetlobnih virov, uporabimo lahko le podatke iz knjižnic, ki jih podajo proizvajalci. Poleg tega je preračun možen le za slikovne učinke, neslikovne zaznave pa ne moremo vrednotiti v takšnih orodjih. Pomembno je vedeti, da je odbita svetloba odvisna od vira, ki obseva material. Če vir ne seva določenih fotonov, potem jih ne moremo zaznati s fotoreceptorji v odbiti svetlobi, kar smo v praksi pogosto srečevali pri fluorescenčnih sijalkah, pri katerih smo slabo razbrali nekatere odtenke barv zaradi diskretnega značaja spektralne sestave izsevane svetlobe fluorescenčnih sijalk.

1.2 Fotometrične vrednosti in vrednotenje spektralne sestave

Človeški fotoreceptorji fotonov z različno valovno dolžino ne zaznavajo enako. Vrh občutljivosti našega vida je dogovorno v območju zelenega odtenka oziroma pri 555 nm. Za izračun osnovnega fotobiološkega učinka – slikovne zaznave svetlobe – uporabljamo akcijsko krivuljo povprečnega človeškega dnevnega vida (akcijska krivulja fotopskega vida) oziroma povprečno spektralno občutljivost človeškega vida. Z njo utežimo radiometrično spektralno porazdelitev svetlobe testnega svetlobnega vira. Fotometrične enote so zasnovane glede na povprečno delovanje čepkov. Ker čepki niso enakomerno razporejeni po mrežnici, poleg tega pa imamo tri tipe čepkov z različnimi spektralnimi občutljivostmi, fotometrične enote ne opisujejo dejanske zaznave in lahko dajejo nepravilne rezultate.

Črno telo absorbira vso vpadno energijo in jo v celoti izseva z natančno določeno spektralno gostoto svetlobnega toka – spekter črnega telesa. Ta je določen z enim samim parametrom – absolutno temperaturo telesa, izraženo v kelvinih (K). Podaja ga Planckov zakon. Maksimum zvezno izsevanih fotonov se z višanjem temperature telesa pomika k manjšim valovnim dolžinam (Wienov zakon) (Jeler, 2001). Za spekter črnega telesa v odvisnosti od temperature določimo barvne vrednosti in jih postavimo v barvni prostor CIE 1931. To je podlaga za določanje podobne barvne temperature (CCT) testnega vira, ki ga uporabljamo za vrednotenje različnih odtenkov bele pri svetlobnih virih. CCT je okvirno od malo pod 2.000 K (toplo bela svetloba) prek nevtralne dnevne svetlobe okrog 3.000 K pa vse do 6.500 K in več, kar dojemamo kot hladno belo svetlobo. Spekter izsevane svetlobe testnega svetila ni nujno podoben spektralni sestavi črnega telesa kljub isti vrednosti CCT. CCT nič ne pove o spektralni sestavi svetila (Malovrh Rebec, 2013) – ali je zvezna ali spominja na sevanje črnega telesa oziroma na dnevno svetlobo. To je v praksi prineslo precej razočaranj pri načrtovanju učinkov svetlobe v prostoru.

Poleg CCT smo v preteklosti poskušali opisati spektralno sestavo svetil s parametrom »indeks barvnega videza« (R_a). S tem parametrom izrazimo, kako dobro testno svetilo prikaže barve objektov in materialov, ki jih osvetljuje. Sposobnost reprodukcije barv testnega svetlobnega vira podamo primerjalno, in sicer za vire do 5.000 K primerjamo rezultat s sevanjem črnega telesa, vire z višjo CCT pa primerjamo z dnevno svetlobo. Za ocenjevanje se uporablja niz vzorcev z določeno spektralno odbojnostjo (različni barvni odtenki). Z uvajanjem novih svetlobnih virov se je pokazalo, da računski rezultati podajo nerealne rezultate R_a v primerjavi s stanjem v naravi. Kljub dopolnitvam (dodajanje testnih vzorcev) ostaja ta metoda določanja sposobnosti reproduciranja barv vira pomanjkljiva.

1.3 Fotobiološki vplivi svetlobe na človeka: slikovna zaznava

Svetlobo sprejemamo skozi oči in prek kože. Fotoreceptorji, s katerimi zaznavamo svetlobo v očeh, so v zadnjem delu očesa, na mrežnici. To pomeni, da moramo podatke o svetlobi premakniti na mrežnico, če hočemo pridobiti točne izračune, za to pa potrebujemo podatke o spektralni prepustnosti očesa. V človeškem očesu so poznani trije tipi fotoreceptorjev:

paličice in čepki, ki prispevajo k slikovni zaznavi, in svetlobno občutljive ganglijske celice (ipRGC – *intrinsically photosensitive retinal ganglion cells*), ki prispevajo k neslikovni zaznavi. Razumevanje zaznave svetlobe s pomočjo naštetih fotoreceptorjev zajema poznavanje: a) akcijskih krivulj fotoreceptorjev, b) doz, pri katerih se fotoreceptorji aktivirajo, in c) mejne vrednosti, pri kateri določeni vplivi postanejo škodljivi.

Ko svetloba doseže mrežnico, jo fotoreceptorji s pomočjo kisika pretvorijo v impulze, ki jih možgani razberejo kot dražljaje z informacijami o naši okolici. Mrežnica vsebuje veliko število različnih kromoforjev, med katerimi so zelo pomembni vidni pigmenti. Ti absorbirajo energijo po vsem delu vidnega spektra, akcijske krivulje za njihovo vzbujanje pa se med seboj prekrivajo. Paličice omogočajo slikovno zaznavo pri šibki osvetlitvi, tj. skotopsko slikovno zaznavo z vrhom pri 505 nm (Schubert, 2005). Trije tipi čepkov, ki omogočajo dnevni barvni vid, pa se aktivirajo šele pri dovolj visoki ravni osvetlitve. Akcijske krivulje zaznave čepkov se prekrivajo, vrhovi so na območju kratkih, srednjih in dolgih valovnih dolžin vidnega dela spektra. Dolgovalovni čepki imajo vrh v rumeno zelenem območju in ne v rdečem (*Longwave cones* – $L(\lambda)_{\max} = 570$ nm). Srednjevalovni čepki dosežejo vrh v zelenem območju (*Middlewave cones* – $M(\lambda)_{\max} = 540$ nm). Kratkovalovni čepki imajo vrh v modrem območju (*Shortwave cones* – $S(\lambda)_{\max} = 450$ nm). Ker v rumeni pegi mrežnice izrazito prevladujejo fotoreceptorji $L(\lambda)$ in $M(\lambda)$, je inženirska stroka standardizirala akcijsko krivuljo fotopskega, povprečnega dnevnega vida kot »seštevek« zaznave teh dveh fotoreceptorjev ($V(\lambda)_{\max} = 555$ nm). Pri srednje visoki ravni osvetlitve se hkrati aktivirajo paličice in čepki, takrat govorimo o mezopski zaznavi. Načelno razmerje med tremi tipi čepkov L : M : S je 16 : 8 : 1.

Razporeditev fotoreceptorjev povzroča razlike med dnevnim in nočnim vidom: dnevni vid pretežno temelji na zaznavi v rumeni pegi, nočni pa izrazito na zaznavi s periferijo. Pomembno je tudi, da človeška mrežnica ni simetrična: področje na polovici bližje nosu ima večji vidni kot kakor področje, obrnjeno k ušesu. Signal iz levega optičnega živca potuje v desno polovico možganov. Slika je sestavljena iz dveh signalov, kar nam omogoča globinsko zaznavo.

Fotoreceptorji so pokriti z bipolarnimi in ganglijskimi celicami, zato jih svetloba ne doseže neposredno. Bipolarni in ganglijski sloj, v ka-

terem so tudi za svetlobo občutljive ganglijske celice (ipRGC – *intrinsically photosensitive retinal ganglion cells*) – to so celice za cirtopsko zaznavo – sta prozorna, vendar preprejena z žilno mrežo. Živčne povezave v mrežnici združujejo signale, ki jih prejmejo od fotoreceptorjev, v tri kanale: 1) akromatični kanal oziroma zaznava svetlosti, 2) modro rumeni kanal in 3) rdeče zeleni kanal. Skupina raziskovalcev (Vienot, 2010) je objavila izsledke, in sicer da opazovalec opiše prostor, osvetljen z viri, ki ima veliko izsevane svetlobe v modrem delu spektra (z visokim CCT), kot svetlejšega v primerjavi s prostorom, ki je osvetljen z viri, ki imajo manj fotonov v modrem delu spektra. Na enak rezultat so naleteli tako pri visokih kot pri nizkih ravneh osvetlitve. Pri šibki osvetlitvi meritve svetlosti po definiciji zanemarijo prispevek paličic k zaznavi svetlosti. Pri visokih ravneh osvetlitve, ko večinoma zaznavamo s čepki, pa veljavna metodologija podcenjuje prispevek kratkovalovnih čepkov.

Veliko procesov, ki potekajo pri slikovni zaznavi, je še vedno relativno slabo razumljenih. V praksi si pomagamo z izmerjenimi odzivi opazovalcev in opredelimo parametre, kot so relativna občutljivost za kontraste (RCS – *relative contrast sensitivity*), faktor primerjave kontrastov (Ogrinc, 1996) (CRF – *contrast rendering factor*), faktor motečega bleščanja v fiziološkem smislu (DGF – *disability glare factor*), neugodno bleščanje (*discomfort glare*) v psihološkem smislu in prehodni adaptacijski faktor (TAF – *transient adaptation factor*).

Pigmenti ali kromoforji so kemične spojine, ki svetlobo absorbirajo in reflektirajo v odvisnosti od valovnih dolžin. V mrežnici je veliko kromoforjev, ki vplivajo na slikovno in neslikovno zaznavo ter bistveno prispevajo k fotobiološkemu učinkom. Širokopasovno absorptivna lipofuskin in melanin (albinizem je pomanjkanje melanina) na primer vplivata na fotobiološki učinek nevarne modre svetlobe, saj njuna absorptivnost narašča z manjšanjem valovne dolžine. Hemoglobin in drugi proteini (npr. mitohondrijski encimi) vsebujejo porfin z vrhom absorpcije pri okrog 400 nm. Flavini in flavoproteini absorbirajo modro svetlobo z vrhom pri približno 450 nm. Pigment makule (rumene pege) močno absorbira med 400 in 530 nm (Boulton, 2001). Če upoštevamo naštetu, postane razumljivo, zakaj akcijski spektri posameznih fotoreceptorjev niso uporabni neposredno, temveč še vedno v svetlobni tehniki merimo odzive ljudi.

Za pravilno upoštevanje fotobioloških vplivov je poleg spektralne sestave bistvena tudi

količina svetlobe, ki doseže fotoreceptorje, torej raven osvetljenosti. Ko svetloba doseže oko, moramo upoštevati vpliv ožjenja in širjenja zenice na velikost slike na mrežnici. Količina vpadnih fotonov na mrežnici določa, kateri fotoreceptorji se aktivirajo. Pri nizki ravni osvetlitve se aktivirajo fotobiološki učinki slikovne zaznave s paličicami, skotopski vid. Pri srednji ravni osvetlitve se aktivirajo paličice in čepki, mezopski vid. Pri visoki ravni osvetlitve pa se aktivirajo samo čepki, fopopski vid. Pri izjemno močnih osvetlitvah (na primer, če zremo v sonce, pri obločnem varjenju ali plazemskem rezanju) nastopijo fotobiološki učinki nevarne modre svetlobe. Za cirtopsko zaznavo, ki uravnava tvorjenje hormona melatonina, pa je pomembno, da v pravih časovnih intervalih dobimo popolno temo ter dovolj visoko raven osvetlitve oziroma dovolj fotonov v modrem delu spektra ((Webb, 2006), (Hubalek, 2010)).

Ožjenje in širjenje zenice upravljajo svetlobno občutljive ganglijske celice v mrežnici, ki vsebujejo melanopsin. Ta mehanizem je izjemno kompleksen. Na ožjenje vplivajo: a) povratna informacija, ki prihaja od fotoreceptorjev na mrežnici (tudi ipRGC) (Vienot, 2010), b) čustveni odziv ter c) razdalja med opazovanim predmetom in očesom. Zenica lahko v premeru meri od 2 do 8 mm. To pomeni, da se lahko v praksi svetlobni tok spremeni za razmerje 16 : 1. Ker pa fotopigmenti niso enakomerno razporejeni po mrežnici, se v oftalmologiji uporablja okvirna vrednost.

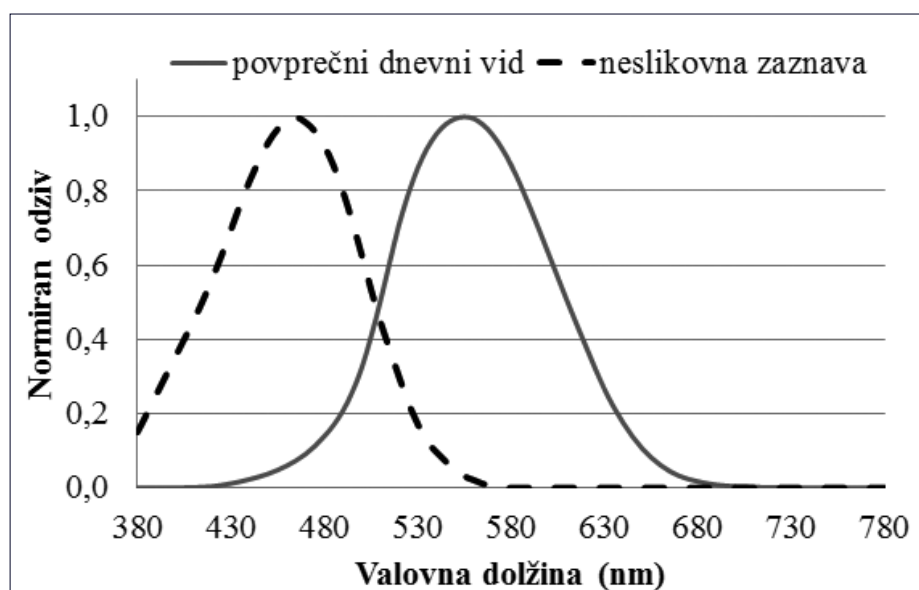
Na zaznavanje svetlobe bistveno vpliva staranje človekovega vidnega organa. Človeški vid s staranjem spremenjeno zaznava predvsem

v modrem delu spektra. Leta 2010 je bila objavljena raziskava (Kessel, 2010), v kateri so izmerili spektralno transmisivnost leč 15 človeških donatorjev. Spektralne transmisije bele svetlobe so merili vzdolž vidne osi v osrednjem delu leče *in vitro* v intaktnih darovanih lečah ljudi različnih starosti (od 18 do 76 let). Rezultati meritev kažejo, da se transmisivnost leč zdravih oseb zmanjša za 72 % v obdobju od 10. leta starosti pa do starosti 80 let. Med obravnavanimi darovalci so imeli tudi primer diabetika, pri katerem se je pokazala izdatno zmanjšana transmisivnost v modrem delu spektra v primerjavi z drugimi darovalci njegovih let.

1.4 Fotobiološki vplivi svetlobe na človeka: neslikovna zaznava

Do nedavnega smo mislili, da vse zaznavanje svetlobe poteka zgolj preko čepkov in paličic. Z odkritjem, da je delež ganglijskih celic svetlobno občutljiv (ipRGC – *intrinsically photosensitive retinal ganglion cells*), pa je postalo jasno, da se cirkadialni ritem uravnava z zaznavanjem svetlobe s temi fotoreceptorji. Tako zaznavanje poimenujemo tudi neslikovna zaznava svetlobe v očeh. Dokazano je, da ipRGC uravnavajo tudi velikost zenic, vrh občutljivosti ipRGC pa je pri 480 nm. Meritve akcijskega spektra sta opravili dve ločeni skupini znanstvenikov ((Brainard, 2001), (Thapan, 2001)), ki sta prišli do podobnih rezultatov.

Pri sesalcih je glavna komponenta biološke ure v dveh gručah nevronov hipotalamusa, imenovanih suprakiazmatično jedro (SCN). Živčni receptorji v očesni mrežnici so preko



Slika 3 • Akcijski krivulji povprečne dnevne slikovne zaznave in povprečne neslikovne zaznave.

mrežnično-hipotalamičnega trakta poveznega s SCN, ki je povezan tudi s češeriko. Svetlobni dražljaji se po mrežnično-hipotalamični povezavi prenesejo v češeriko, ki nadzoruje sintezo melatonina. Začetek sprejemanja svetlobnih dražljajev so fotoreceptorji IpRGC. Melatonin s svojim delovanjem uravnava informacije o dolžini dneva in noči (Kores-Plesničar, 2010). Tvori se med spanjem, vendar se lahko začne tvoriti že v mraku. Z izločanjem melatonina so povezane številne funkcije v človeškem telesu, med drugim nihanje telesne temperature (telesna temperatura ponoči pade) in raven kortizola (naraste, preden se zbudimo). Melatonin sodeluje tudi pri obnovi celic in ima antikancerogen učinek ((Pauley, 2004), (Blask, 2005)). Izpostavitve svetlobi, ko tega telo ne pričakuje, na primer kmalu po

začetku spanja v temi, vodi v odlog faze, to pa zmoti izločanje melatonina. V zadnjih letih se je pokazalo, da motnje pri uravnavanju cirkadialnega ritma vplivajo na nastanek in razvoj različnih patofizioloških stanj pri človeku (npr. rak in metabolični sindrom) (Kvaskoff, 2010).

Neslikovna zaznava je odvisna od naslednjih lastnosti svetlobe: raven osvetlitve, spektralna sestava svetlobe, trajanje obsevanja/vzorec prižiganja, zgodovina izpostavljenosti svetlobi in del dneva, ko smo izpostavljeni svetlobi (Amundadottir, 2013). Določanje minimalnih izpostavljenosti za neslikovno zaznavo je izjemno kompleksno. Starejše študije na primer navajajo, da je za »biološko stimulacijo«, to je začetek tvorjenja melatonina, potrebna minimalna osvetljenost okvirno med 200 in 2000 lx, kar pa je velik razpon (Begemann,

1997). Novejše raziskave so pokazale, da sta za cirtopsko zaznavo pomembni popolna tema ponoči in dovolj velika raven osvetljenosti dovolj časa podnevi. Ponoči tvorbo melatonina popolnoma ustavi že tako majhna osvetljenost, kot je 5–17 lx zelene monokromatične barve oziroma 100–300 lx bele svetlobe (Nassau 1998). Druga študija, v kateri avtorji upoštevajo tudi obrnjenost glave, navaja minimalno cirtopsko osvetljenost 190 lx za svetlobni vir D65 (dnevna svetloba pri 6.500 K). Hkrati ista študija navaja, da je za vir CFL s CCT 4.100 K ta vrednost 300 lx (Amundadottir, 2013). Težava teh študij je, da ne navajajo spektralne sestave svetlobe, ki jo je opazovalec prejel, temveč uporabljajo fotometrične vrednosti, ki upoštevajo akcijske spektre za slikovno zaznavo (namesto za neslikovno).

2 • Metodologija

Izmerili smo spektralno sestavo odbite svetlobe, ki jo prejme opazovalec. Modelni prostor je velik 3 x 4 metre, visok je 2,4 m, prostor ima vse stene bele. Pri eksperimentu smo menjavali barvo ene od štirih sten. Eksperiment smo opravili za štiri barve stenskih opleskov: oranžna, zelena, vijoličasta in svetlo modra. Okna modelnega prostora so v steni, ki stoji pravokotno na barvno steno. Edina svetloba, ki je vstopala v prostor, je bila dnevna svetloba. Meritve smo opravili na dva načina: simulirali smo pogled opazovalca naprej na višini 120 cm (sedeči položaj) in pogled, usmerjen v mizo, na višini 75 cm, kar je običajen način za predpisovanje ravni osvetlitve v zakonodaji. Predpostavljali smo, da se bo spektralna sestava svetlobe za izbrani dve merilni mesti razlikovala zaradi topografije barv površin v prostoru.

Meritve smo opravili na prostem pri dnevni svetlobi 10. junija 2018 pri 25 °C ± 1 °C. Modelna okna eksperimenta so bila obrnjena proti severu. Merilni instrument pri eksperimentu

je bil spektrometrični merilnik Jeti Specbos 1200. Merilno območje je bilo med 380 in 780 nm s korakom 5 nm.

Izračun slikovne in neslikovne stimulacije smo naredili z množenjem izmerjenih spektrov z akcijskimi krivuljami za povprečni dnevni vid in cirtopsko zaznavo. Dobljene zmnožke smo integrirali in vrednosti primerjali z izhodiščno svetlobo, izmerjeno v prostoru s samimi belimi stenami, ki je pomenila 100-% stimulacijo. Želeli smo torej pokazati, da človeški fotoreceptorji fotonov z različno valovno dolžino ne zaznavajo enako. Vrh občutljivosti našega vida je dogovorno v območju zelenega odtenka oziroma pri 555 nm. Za izračun osnovnega fotobiološkega učinka – slikovne zaznave svetlobe – smo torej uporabili akcijsko krivuljo povprečnega človeškega dnevnega vida (akcijska krivulja fotopskega vida) oziroma povprečno spektralno občutljivost človeškega vida. Z njo smo utežili radiometrično spektralno porazdelitev svetlobe testnega svetlobnega vira. Fotometrične enote so zasnovane tako,

da predstavljajo povprečno delovanje čepkov, kar je približek. Enako smo utežili spektralno sestavo izmerjenih odbitih svetlob tudi z akcijsko krivuljo neslikovne zaznave. Ta predstavlja povprečen odziv svetlobno občutljivih ganglijskih celic. To je poskus, kako opredeliti neslikovne učinke, pri katerem pričakujemo določeno napako, saj vemo, da pigmenti ali kromoforji, kot sta lipofuskin in melanin, vplivajo na spektralno sestavo, ki dejansko doseže svetlobno občutljive ganglijske celice. Vemo, da ravno njuna absorptivnost tudi narašča z manjšanjem valovne dolžine. Zato se zavedamo, da akcijski spektri posameznih fotoreceptorjev niso uporabni neposredno, temveč je v svetlobni tehniki še vedno treba meriti odzive ljudi. Če bi želeli enak poskus predstaviti s parametri, ki so trenutno na razpolago (CCT in R_e), bi vsekakor dobili izkrivljene rezultate.

Ker vemo, da dnevna svetloba čez dan spremeni spektralno sestavo (pri naših eksperimentih je imela okvirno CCT 5.500 K), bi bilo zanimivo primerjati enake meritve s takšnimi, ki bi jih opravili pri drugačnih dnevni svetlobah. Na spektralno sestavo vpliva tudi geografska lega, kar bi bila nadaljnja zanimiva poglavitna študija.

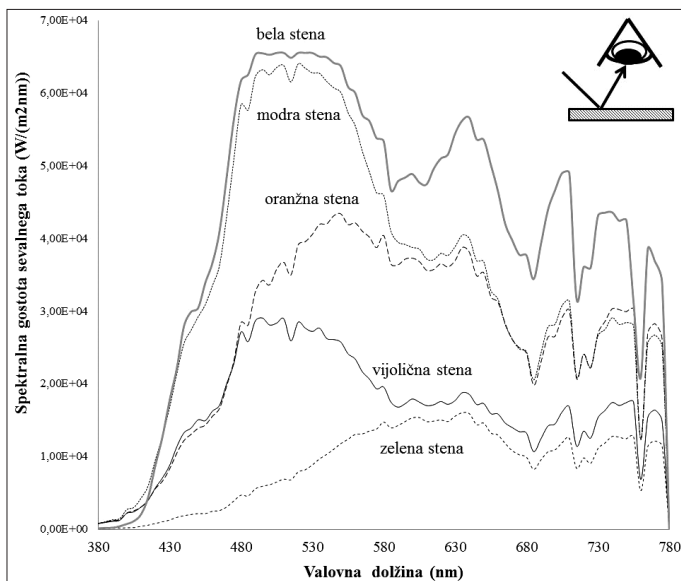
3 • Rezultati

Rezultati eksperimenta kažejo, da je pri enakih svetlobnih pogojih zasnova notranjega bivalnega okolja ključnega pomena za stimulacijo človeške slikovne in neslikovne zaznave. Če primerjamo rezultate, ki smo jih izmerili, kadar

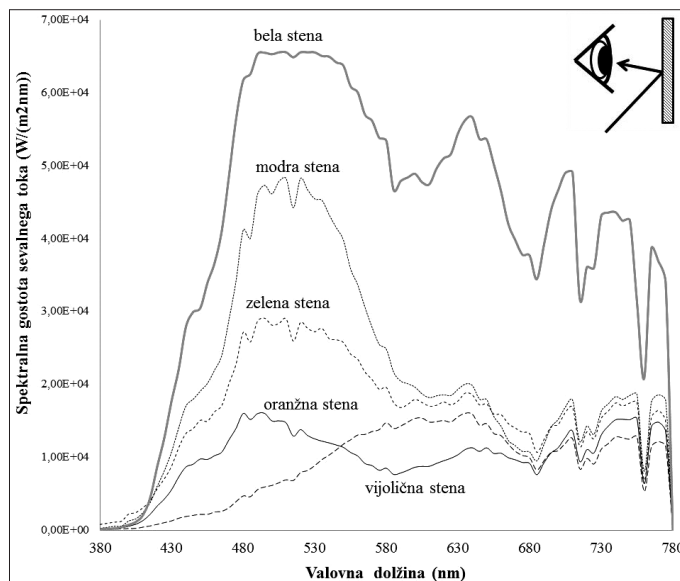
opazovalec gleda predse, na primer pri pogovoru, vidimo, da modra stena pred njim doseže 90 % slikovne stimulacije in 94 % neslikovne glede na izhodiščno 100-% vrednost pri belih stenah. Če je stena oranžna,

je slikovna stimulacija 67 %, neslikovna pa 49 % odziva pri beli steni. Pri vijoličasti steni je slikovna stimulacija 39 %, neslikovna pa 44 % odziva pri beli steni. Pri zeleni steni je slikovna stimulacija zgolj 20 %, neslikovna pa 8 % odziva pri beli steni.

Če opazovalec zre proti mizi, na primer pri branju, dobimo precej drugačne rezultate. V tem primeru je z modro steno slikovno sti-

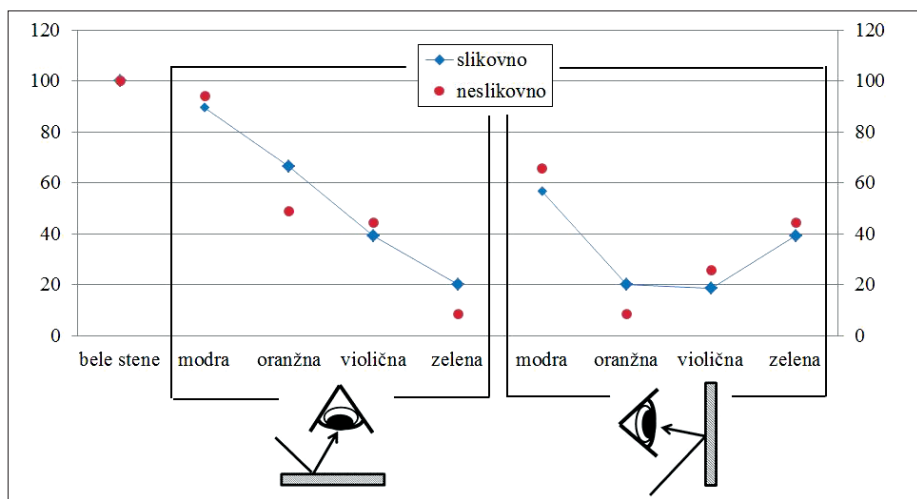


Slika 4 • Spektralna sestava odbitih svetlob, izmerjena horizontalno, za različne barve sten v modelnem prostoru.



Slika 5 • Spektralna sestava odbitih svetlob, izmerjena vertikalno, za različne barve sten v modelnem prostoru.

muliranih le 57 % vrednosti, dobljene z belimi stenami, neslikovno pa 66 %. Pri oranžni steni je slikovno stimuliranih 20 %, neslikovno pa 9 % glede na bele stene. Pri vijoličasti steni je slikovno stimuliranih 19 %, neslikovno pa 26 % glede na bele stene. Pri zeleni steni pa je slikovno stimuliranih 39 %, neslikovno pa 44 % glede na bele stene. To pomeni, da so lahko razlike pri različnih barvah stenskih opleskov za neslikovne odzive samo glede na smer pogleda od 18 do 40 %.



Slika 6 • Izračunana slikovna in neslikovna stimulacija za izmerjene odbite svetlobe.

4 • Razprava in sklep

V notranjem ambientu običajno nastopajo različni materiali in barve površin. Svetloba, ki doseže oko opazovalca, je sestavljena iz različnih deležev svetlobe, odbite od različnih površin ambienta grajene okolice. Obstaja nešteto kombinacij, ki lahko dosežejo oko opazovalca v realnih okoliščinah. Vendar lahko iz prevladujočih površin, njihovih barv in materialov sklepamo na prevladujoče fotobiološke učinke.

Izmerili smo spektralno sestavo odbitih svetlob v modelnem prostoru, ker nas je zanimalo, kakšne razlike nastanejo v slikovni in

neslikovni zaznavi, če pobarvamo stene z različnimi barvami. Uporabili smo moder, zelen, vijoličast in oranžen oplesk. Vir svetlobe, ki smo ga uporabili pri meritvah, je bila dnevna svetloba. Merili smo v dveh smereh pogleda opazovalca, in sicer naravnost predse in s pogledom, usmerjenim v mizo, kot pri branju. Opazili smo tudi padanje intenzivnosti zaradi absorpcije in ne le vpliva spektralne sestave, če normiramo izmerjene rezultate z enako ravno osvetljenosti opazovanih površin. Tak pristop je pri izračunih dnevne svetlobe bolj realen, ko pa preračunavamo osvetlitev z

umetnimi viri, rezultat običajno normaliziramo na tarčno vrednost. V preteklih študijah smo računali posamezne vplive z množenjem spektrov in se ob tem spraševali, kakšna je negotovost glede na delež posameznih prispevkov (Malovrh Rebec 2014). V vsakem primeru so takšni izračuni redki, kar nakazuje veliko potrebo po dogovoru, kako bi lahko neslikovne učinke popisovali, torej po uvedbi novih parametrov za opisovanje spektralne sestave poleg CCT in R_a .

Naše meritve in izračun so potrdili, da modra in vijoličasta stena neslikovno stimulirata opazovalca bolj kot slikovno v obeh smereh pogleda. Tak izid je pričakovan, pri čemer sta zanimiva delež, ki se absorbira, in posledično padec ravni osvetljenosti površin. Tak pojav

v praksi dobro poznamo iz izkušenj, vendar ga z izračuni trenutno ne potrjujemo sistematično. Oranžna barva je v obeh primerih neslikovno vplivala manj, kar je pričakovano. Pri zeleni barvi sten pa je bila neslikovna zaznava bolj stimulirana od slikovne pri pogledu naprej, pri pogledu v mizo pa obratno. Smer pogleda na stimulacijo fotobioloških učinkov ni vplivala sistematično, kar bi bilo treba preveriti z nadaljnjimi obsežnejšimi meritvami.

Pri predmetih v okolici bi morali pri načrtovanju osvetlitve precej pozornosti usmeriti v spektralne lastnosti odbojnosti in vpojnosti materialov. Tudi pri računalniških simulacijah, s katerimi inženirji načrtujejo razsvetljavo

(Relux, Dialux), bo treba preiti v bolj kompleksne izračune, ki bodo upoštevali tako spektralne značilnosti odbojnosti in vpojnosti materialov kot vire svetlobe. Idealno bi bilo, če bi lahko vključili še specifične spreminjanja prepustnosti človeških leč, ki se z leti bistveno spremenijo. Danes lahko v praksi le iz izkušenj in po občutku načrtujemo prostore z zavedanjem, da odtenkov barv ne moremo zaznati s fotoreceptorji v odbiti svetlobi, če vir ne seva določenih fotonov. Enako intuicijo lahko delno prenesemo tudi na vidike neslikovnih učinkov, ki jih imajo prostori na uporabnike.

Sklenemo lahko, da je z znanjem, ki ga imamo trenutno, mogoče okvirno napovedati tudi neslikovne učinke, in ne le slikovnih, čeprav

so raziskave doze še v razvoju. To je pomemben podatek, saj trenutno nimamo sprejetih mednarodno dogovorjenih parametrov, kako bi neslikovno zaznavo opisovali, celo pri slikovni ne moremo preiti nekaterih ovir za nujne posodobitve. Poudariti velja tudi, da je pri razvoju parametrov slikovne zaznave, ki so stari že skoraj sto let, že dolgo znano, da pri izračunih nastajajo precejšnje napake in odstopanja. To ne pomeni, da bi bilo treba parametre kar umakniti, temveč se jih trudimo izboljšati. V tem smislu bi morali verjetno dojemati tudi razvoj neslikovnih parametrov opisa svetlobe in določiti izhodišče za čimprejšnjo uporabo, potem pa z novimi izsledki parametre nadgrajevati in popravljati.

5 • Literatura

- Amundadóttir, M. L., St. Hilaire, M. A., Lockley, S. W., Andersen, M., Modelling non-visual Responses to Light: Unifying Spectral and Temporal Characteristics in a Single Model Structure, CIE Centenary Conference: Towards a New Century of Light, Paris, France, 101–110, 2013.
- Andersen, M., Gochenour, S. J., Lockley, S. W., Modelling »non-visual« effects of daylighting in a residential environment. *Building and Environment*, 70, 138–149, 2013.
- Begemann, S. H. A., van den Beld, G. J., Tenner, A. D., Daylight, artificial light and people in an office environment, overview of visual and biological responses, *International journal of industrial ergonomics*, 20, 231–239, 1997.
- Blask, D. E., Brainard, G. C., Dauchy, R. T., Hanifin, J. P., Davidson, L. K., Krause, J. A., Sauer, L. A., Rivera-Bermudez, M. A., Dubocovich, M. L., Jasser, S. A., Lynch, D. T., Rollag, M. D., Zalatan, F., Melatonin-depleted blood from premenopausal women exposed to light at night stimulates growth of human breast cancer xenografts in nude rats. *Cancer Research*, 65, 11174–11184, 2005.
- Boulton, M., Rozanowska, M., Rozanowski, B., Retinal Photodamage, *Journal of Photochemistry and Photobiology*, 64, 144–161, 2001.
- Hubalek, S., Brink, M., Schierz, C., Office workers' daily exposure to light and its influence on sleep quality and mood, *Lighting Research & Technology*, 42, 33–50, 2010.
- Jeler, S., Kumar, M., Interdisciplinarnost barve, 1. del: V znanosti. Društvo koloristov Slovenije, 2001.
- Kessel, L., Lundeman, J. H., Andersen, T. V., Larsen, M., Age-related changes in the transmission properties of the human lens and their relevance to circadian entrainment. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*, 308–312, 2010.
- Kores-Plesničar, B., Zdravljenje depresije z obnovo cirkadianih ritmov, 12. Fajdigovi dnevi, Kranjska Gora, Slovenija, 11–16, 2010.
- Kvaskoff, M., Weinstein, P., Are some melanomas caused by artificial light, *Medical Hypotheses*, 75, 305–311, 2010.
- Malovrh Rebec, K., Optične lastnosti, fotobiološki in okoljski učinki svetilk s svetlečimi diodami, doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, 2014.
- Malovrh Rebec, K., Klanjšek-Gunde, M., Bizjak, G., Parametri za opis spektralne sestave svetlobe – ali sta podobna barvna temperatura in indeks barvnega videza svetlobe primerna za ocenjevanje fotobioloških učinkov? *Razsvetljava in fotometrija*, Bled, Slovenija, 2013.
- Nassau, K., *Color for Science, Art and Technology*, Elsevier, 1998.
- Pauley, S. M., Lighting for the human circadian clock: Recent research indicates that lighting has become a public health issue, *Medical Hypotheses*, 63, 588–596, 2004.
- Schubert, E. F., Kim, J. K., Solid-State Light Sources Getting Smart, *Science* 308, 1274–1278, 2005.
- Vienot, F., Bailacq, S., Le Rohellec, J., The effect of controlled photopigment excitation on pupil aperture, *Ophthalmic and Physiological Optics*, 30, 484–491, 2010.
- Webb, A. R., Considerations for lighting in the built environment: Non-visual effects of light, *Energy and Buildings*, 38, 721–727, 2006.