

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



JAKA POTOČNIK

**VPLIV OPTIČNIH LASTNOSTI POVRŠIN
NOTRANJEGA OKOLJA STAVB NA CIRKADIANI
POTENCIAL DNEVNE SVETLOBE**

DOKTORSKA DISERTACIJA

INTERDISCIPLINARNI DOKTORSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM
GRAJENO OKOLJE

Ljubljana, 2022

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Doktorand

JAKA POTOČNIK

**VPLIV OPTIČNIH LASTNOSTI POVRŠIN NOTRANJEGA
OKOLJA STAVB NA CIRKADIANI POTENCIAL DNEVNE
SVETLOBE**

Doktorska disertacija

**INFLUENCE OF INDOOR SURFACE OPTICAL PROPERTIES
ON THE CIRCADIAN POTENTIAL OF DAYLIGHT IN
BUILDINGS**

Doctoral dissertation

Ljubljana, 2022

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Mentor: doc. dr. Mitja Košir, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani

Somentorica: doc. dr. Mateja Dovjak, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani

Komisija za spremljanje doktorskega študenta/-tke:

prof. dr. Zvonko Jagličič, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani

prof. dr. Zvone Balantič, Fakulteta za organizacijske vede Univerze v Mariboru

izr. prof. dr. Tomaž Novljan, Fakulteta za arhitekturo Univerze v Ljubljani

doc. dr. Matej Bernard Kobav, Fakulteta za elektrotehniko Univerze v Ljubljani

POPRAVKI – ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

»Ta stran je namenoma prazna«

ZAHVALA

V prvi vrsti se zahvaljujem mentorju doc. dr. Mitji Koširju, ki mi je vselej ponujal nepogrešljive usmeritve in podporo ter je pripomogel k razvoju te doktorske naloge in mojega raziskovalnega opusa.

Tudi somentorici doc. dr. Mateji Dovjak se zahvaljujem za pomoč pri razvoju disertacije.

Zahvala gre tudi sodelavcema, Davidu in Luku, ki sta skrbela za znanstveno spodbudno okolje.

Hvala staršem za izkazano podporo in vzgojo, kar mi je pomagalo pri uresničevanju vseh zadanih ciljev.

Posebej pa bi se zahvalil tebi, Maja, ki si moj motivator in moja največja opora.

»Ta stran je namenoma prazna«

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM

UDK:	551.521.16: 159.937(043)
Avtor:	Jaka Potočnik
Mentor:	doc. dr. Mitja Košir
Somentor:	doc. dr. Mateja Dovjak
Naslov:	Vpliv optičnih lastnosti površin na cirkadiani potencial prostora
Tip dokumenta:	doktorska disertacija
Obseg in oprema:	XXXVI, 214 str., 15 pregl., 94 sl., 39 en., 191 virov., 9 pril.
Ključne besede:	osvetljevanje z dnevno svetlobo, cirkadiani ritem, zdravo notranje grajeno okolje, grajeno okolje, cirkadiano svetlobno okolje, cirkadiani potencial, presevnost zasteklitve, odsevnost zidov, barva zidov

Izvleček

Izsledki zadnjih desetletij so prispevali k razumevanju, da je predvsem dnevna svetloba najpomembnejši narekovelec cirkadianega sistema in pomembno sodeluje pri usklajevanju bioritma najpomembnejših človeških telesnih funkcij. Kljub velikemu številu raziskav, opravljenih na temo povezave cirkadianega sistema z dnevno svetlobo, pa vendar še ni povsem jasno, kolikšen je vpliv lastnosti notranjega grajenega okolja na cirkadiane aspekte svetlobnega okolja. Doktorska disertacija tako obravnava tematiko vpliva optičnih in geometrijskih lastnosti notranjega okolja na cirkadiano svetlobno okolje (s poudarkom na optičnih lastnostih). Vpliv lastnosti notranjega grajenega okolja je bil ovrednoten na podlagi enostransko osvetljenih vzorčnih celičnih pisarn, katerih svetlobna okolja smo ovrednotili na podlagi meritev in simulacijskih izračunov. Analize meritev pokažejo, da ima na cirkadiani potencial v prostoru sprememba barve zidov večji vpliv kakor sprememba nasičenosti ter da je vpliv presevnosti zasteklitve na cirkadiani potencial prostora večji kakor vpliv odsevnosti zidov. To dodatno potrdimo s simulacijsko analizo, kjer se okno izkaže kot najvplivnejši arhitekturno-gradbeni element. Vpliv vseh lastnosti notranjega okolja se izkaže za dinamičnega in spreminjajočega v odvisnosti od položaja in usmerjenosti pogleda uporabnika. Dodatne simulacijske analize prostorov v različnih vremenskih razmerah in pri različnih orientacijah pokažejo, da cirkadianega okolja ne moremo vrednotiti zgolj z ustaljenimi vizualnimi metodami, razen ob specifičnih vremenskih razmerah v spektralno nevtralnih prostorih. Spoznanja iz disertacije opozarjajo na pomembnost zavedanja o cirkadianih aspektih grajenega okolja že v načrtovalski fazi in na pomembnost ozaveščanja uporabnikov stavb o lastnostih izbranih materialov, ki kot je pokazala izvedena anketa, izbirajo materiale notranjega grajenega okolja na podlagi osebnih preferenc.

»Ta stran je namenoma prazna«

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 551.521.16: 159.937(043)

Author: Jaka Potočnik

Supervisor: assist. prof. Mitja Košir, Ph.D.

Co-supervisor: assist. prof. Mateja Dovjak, Ph.D.

Title: Influence of indoor surface optical properties on the circadian potential of daylight in buildings

Document type: Doctoral dissertation

Notes: XXXVI, 214 pg., 15 tab., 94 fig., 39 eq., 191 ref., 9 app.

Keywords: daylighting, circadian rhythm, healthy indoor built environment, built environment, circadian lighting, circadian potential, reflectance, transmissivity, wall colour

Abstract

The findings of recent decades have contributed to the understanding that daylight is the most influential mediator of the circadian system and plays a vital role in the human system's essential functions coordination. Despite the large body of research on circadian light, the influence of the properties of the indoor built environment on the circadian aspects of the lighting environment is not yet entirely clear. Therefore, this doctoral dissertation explores the influence of the indoor built environment's optical and geometric properties on the circadian luminous environment (emphasizing optical properties). Latter properties' influence was evaluated based on side-lit cell offices, whose lighting environment was assessed based on experimental measurements and simulations. Experiments have shown that wall colour change more significantly affects the circadian potential than the change in saturation. Furthermore, window transmissivity exerts a more significant impact on the rooms' circadian potential than reflectivity. This was further confirmed by simulations, where the window was identified as the most influential building element. Moreover, the impact of all studied influential properties was identified as dependant on the user's position and view orientation. Simulations under different weather conditions and orientations illustrate that the circadian environment cannot be evaluated by established visual methods, except under specific conditions. The findings of this dissertation emphasize the importance of awareness about circadian aspects in the early design phases and the importance of raising buildings' occupant's awareness of selected materials' properties. Occupants, as shown by the conducted survey, choose materials of the internal environment based on personal preference.

»Ta stran je namenoma prazna«

KAZALO

POPRAVKI – ERRATA.....	I
ZAHVALA.....	III
BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM	V
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT.....	VII
KAZALO.....	IX
KAZALO PREGLEDNIC	XV
LIST OF TABLES.....	XVII
KAZALO SLIK	XIX
LIST OF FIGURES.....	XXV
SEZNAM KRATIC	XXXI
SEZNAM UPORABLJENIH VELIČIN	XXXIII
SEZNAM MANJ ZNANIH TERMINOV.....	XXXV
1 UVOD	1
1.1 Opredelitev problema.....	1
1.2 Namen disertacije	3
1.3 Raziskovalni vprašanji.....	3
1.4 Delovne hipoteze in ostali cilji.....	4
1.5 Struktura doktorske disertacije.....	5
2 TEORETIČNA IZHODIŠČA.....	7
2.1 Svetloba in sevanje.....	8
2.1.1 Standardni opazovalci in fotometrične enote	8
2.1.2 Kolorimetrija.....	11
2.2 Dnevna svetloba – naravni vir svetlobe.....	14
2.2.1 Spektralna gostota sevalne moči dnevne svetlobe.....	15
2.2.2 Statično modeliranje svetlostne distribucije neba.....	16
2.2.3 Klimatsko pogojeno – dinamično modeliranje svetlostne distribucije neba	18
2.3 Človeška zaznava svetlobe	19

2.3.1	Struktura in delovanje vizualnega sistema.....	19
2.3.2	Sistem nevizualne zaznave svetlobe	23
2.3.2.1	Cirkadiane ure.....	24
2.3.2.2	Potek nevizualne zaznave svetlobe.....	25
2.3.2.3	Učinek svetlobe kot posledica časovnih lastnosti izpostavljenosti svetlobi	27
2.3.2.4	Spektralna pogojenost melanopsina in merjenje svetlobe, ki vpliva na cirkadiani sistem	28
2.3.2.5	Potrebne količine svetlobe za primerno cirkadiano usklajenost.....	33
2.3.2.6	Motnje in posledice v cirkadianem ritmu.....	35
2.4	Dnevna svetloba notranjega grajenega okolja.....	36
2.5	Simulacijska orodja za analizo vidne svetlobe.....	38
2.6	Večspektralna simulacijska orodja za analizo cirkadianega aspekta svetlobe.....	40
2.6.1	Lark	40
2.6.2	ALFA	43
3	IZBIRA SIMULACIJSKEGA ORODJA NA PODLAGI PRIMERJAVE Z MERITVAMI MODELA PISARNE	47
3.1	Uvod	48
3.2	Metodologija	48
3.2.1	Zasnova eksperimentalnega modela	48
3.2.2	Zasnova simulacijskega modela.....	51
3.2.3	Izbor materialov in določitev poteka iteracij eksperimenta in simulacij	53
3.2.4	Ovrednotenje simulacijskih programov	54
3.2.4.1	RMSE.....	54
3.2.4.2	Relativna melanopska učinkovitost	55
3.2.4.3	Časovna učinkovitost.....	56
3.2.5	Točnost zunanjih spektralnih razmer	56
3.2.6	Točnost pri variaciji spektralnih lastnosti zidov brez zasteklitve.....	57
3.2.7	Točnost pri variaciji spektralnih lastnosti zidov ob dvoslojni zasteklitvi	58
3.2.8	Točnost pri variaciji spektralnih lastnosti zasteklitve in nevtralnem zidu	59
3.2.9	Točnost izračuna relativne melanopske učinkovitosti in časovna učinkovitost	59
3.2.10	Izbor simulacijskega programa	60
4	VPLIV OPTIČNIH LASTNOSTI ODSEVNOSTI ZIDOV IN PRESEVNOSTI ZASTEKLITEV NA CIRKADIANI POTENCIAL DNEVNE SVETLOBE VZORČNE PISARNE	63

4.1	Uvod.....	64
4.2	Metodologija eksperimentalnih in simulacijskih meritev.....	64
4.2.1	Zasnova eksperimentalnega modela.....	64
4.2.2	Materiali uporabljeni v eksperimentu.....	65
4.2.3	Zunanje svetlobne razmere.....	67
4.2.4	Vzpostavitev simulacijskega dela.....	69
4.2.5	Vrednotenje eksperimentalnih rezultatov.....	70
4.2.6	Primerjava vpliva odsevnosti in barve odsevnih površin na relativno melanopsko in cirkadiano učinkovitost.....	71
4.2.7	Vrednotenje simulacijskih rezultatov.....	72
4.3	Rezultati.....	73
4.3.1	Rezultati eksperimenta.....	73
4.3.1.1	Relativna melanopska učinkovitost - <i>RMU</i>	73
4.3.1.2	Relativna cirkadiana učinkovitost - <i>RCU</i>	76
4.3.1.3	Vpliv zasteklitve v primerjavi z vplivom barvnih odtenkov.....	78
4.3.1.4	Vpliv nasičenosti in barve na <i>RMU</i> in <i>RCU</i>	81
4.3.2	Rezultati simulacij.....	84
4.4	Diskusija.....	90
4.4.1	Vidik cirkadianega potenciala - vpliv na <i>RMU</i> in <i>RCU</i>	90
4.4.2	Vidik vpliva na cirkadiano svetlobno okolje.....	91
4.4.3	Vrednotenje cirkadiane vsebine z gledišča izpolnjevanja vidnih zahtev.....	93
5	OCENJEVANJE NOTRANJEGA CIRKADIANEGA SVETLOBNEGA OKOLJA PRI SPREMENLJIVIH ZUNANJIH SVETLOBNIH RAZMERAH.....	97
5.1	Uvod.....	98
5.2	Metoda.....	99
5.2.1	Določitev zunanjih razmer dnevne svetlobe.....	99
5.2.2	Določitev geometrije prostorov.....	102
5.2.3	Optične lastnosti gradbeno-arhitekturnih elementov.....	103
5.2.4	Vrednotenje cirkadianega svetlobnega okolja.....	104
5.2.4.1	Vrednotenje z vidika časovne komponente s pomočjo Cirkadiane Avtonomije CA in Avtonomije Cirkadianega potenciala RCU+.....	105
5.2.4.2	Prostorsko pogojeno vrednotenje cirkadianega svetlobnega okolja in cirkadianega potenciala.....	105
5.3	Rezultati.....	106

5.3.1	Avtonomija cirkadianega potenciala in cirkadiane svetlobe	106
5.3.2	Prostorsko vrednotenje cirkadiane svetlobe in cirkadianega potenciala	112
5.4	Diskusija	119
6	VREDNOTENJE VPLIVA OPTIČNIH IN GEOMETRIJSKIH LASTNOSTI PARAMETRIČNE CELIČNE PISARNE	123
6.1	Uvod	124
6.2	Metodologija	124
6.2.1	Opredelitev in simulacija parametričnega modela	127
6.2.1.1	Opredelitev pisarniškega modela	127
6.2.1.2	Opredelitev optičnih lastnosti površin	130
6.2.1.3	Opredelitev zunanjih razmer parametričnega modela	131
6.2.2	Način izračuna podatkov	132
6.2.3	Opredelitev in analiza statističnih modelov	133
6.2.4	Izpostavljenost cirkadiani svetlobi v odnosu do najvplivnejših optičnih in geometrijskih parametrov	136
6.3	Rezultati	138
6.3.1	Vpliv lastnosti notranjega okolja v splošnih modelih	138
6.3.2	Vpliv lastnosti notranjega okolja v modelih pogledov	140
6.3.3	Vpliv lastnosti notranjega okolja v consko pogojenih modelih	142
6.3.4	Vpliv najvplivnejše geometrijske in optične lastnosti na cirkadiano učinkovito izpostavljenost dnevni svetlobi	144
6.4	Diskusija	148
7	PREFERENCA UPORABNIKOV GLEDE OPTIČNIH LASTNOSTI POVRŠIN NOTRANJEGA OKOLJA	151
7.1	Uvod	152
7.2	Metodologija	152
7.2.1	Zasnova ankete o preferencah optičnih lastnosti notranjega okolja	152
7.2.2	Zbiranje podatkov	156
7.2.3	Statistična analiza	156
7.2.4	Ovrednotenje vpliva najljubše barve zidu na cirkadiano svetlobno okolje	156
7.2.5	Zasnova simulacijske študije izpostavljenosti cirkadiani svetlobi	156
7.3	Rezultati	158
7.3.1	Rezultati ankete o preferencah uporabnikov do optičnih lastnosti notranjega okolja	158

7.3.2	Barvna preferenca in spol anketirancev	159
7.3.3	Barvna preferenca in starost anketirancev	160
7.3.4	Barvna preferenca in preferenca barve prostora	161
7.3.5	Barvna preferenca prostora in tipologija prostora	164
7.3.6	Preferenca lastnosti zasteklitev	166
7.4	Ocena vpliva najljubših barv anketirancev na cirkadiani vidik notranjega svetlobnega okolja	167
7.5	Diskusija	171
8	ZAKLJUČEK	175
8.1	Temeljno znanstveno vprašanje in zastavljene hipoteze	176
8.2	Drugi zastavljeni cilji	180
8.3	Omejitve in izhodišča za nadaljnje raziskave	189
8.4	Sklep	185
9	POVZETEK	187
10	SUMMARY	191
	LITERATURA IN VIRI	197
	PRILOGE	1-A
	PRILOGA A.1	1-A
	PRILOGA A.2	10-A
	PRILOGA A.3	15-A
	PRILOGA A.4	18-A
	PRILOGA A.5	20-A
	PRILOGA B.1	1-B
	PRILOGA B.2	3-B
	PRILOGA B.3	6-B
	PRILOGA C	1-C

»Ta stran je namenoma prazna«

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Radiometrične količine s pripadajočimi fotometričnimi količinami.	11
Preglednica 2: Tipi distribucij neba, ki hkrati določajo parametre a , b , c in d [46,48].....	18
Preglednica 3: Devet diskretnih spektralnih kanalov programa Lark z vrednostmi na odzivnostnih krivuljah prilagojenih diskretnim intervalom [21].....	41
Preglednica 4: Različice uporabljenih kombinacij materialov pri primerjavi.	56
Preglednica 5: Napaka v RMU med eksperimentom in simulacijskima orodjema za izbrane različice prostorov. Podčrtane so relativne napake simulacije z manjšo ali enakovredno napako ter krajši izmed časov simuliranja.	60
Preglednica 6: Osnovne lastnosti uporabljenih tipov zasteklitev.	67
Preglednica 7: Kriteriji nevizualnega in vizualnega vpliva, uporabljeni pri vrednotenju rezultatov dnevni simulacij.....	73
Preglednica 8: Materiali, uporabljeni v simulacijskem modelu.	104
Preglednica 9: Obravnavane lastnosti notranjega okolja.	125
Preglednica 10: Spremenljivke simulacijskega modela in njihovi pripadajoči kodirani statistični prediktorji.	135
Preglednica 11: Pearsonov korelacijski koeficient za vsako izmed neodvisnih spremenljivk, ki povzroča multikolinearnost (siva polja predstavljajo neodvisne spremenljivke, ki smo jih uporabili v vzpostavitvi splošnih MLR-modelov).....	139
Preglednica 12: Kakovost skupnih modelov in koeficienti prediktorjev za E_v , E_m in CL_A	139
Preglednica 13: Standardna napaka (SE) in determinacijski koeficient (R^2) za vsakega izmed modelov pogledov.	141
Preglednica 14: Demografski podatki anketirancev.	159
Preglednica 15: Rezultati Pearsonovega testa med najljubšo barvno skupino in najljubšim notranjim okoljem pri različnih ravneh nasičenosti.	162

»Ta stran je namenoma prazna«

LIST OF TABLES

Table 1: Radiometric quantities with respective photometric quantities.	11
Table 2: Types of luminous sky distributions, which define the parameters a, b, c and d [46,48].	18
Table 3: Nine Lark spectral output bands with Lark discrete interval adjusted efficacy curves [21].	41
Table 4: Variations of optical material combinations studied.	56
Table 5: Error in <i>RME</i> between experiment and both simulation tools for the chosen room variations. Results with smaller or equal error are underlined. Shorter simulation times are underlined as well.	60
Table 6: Basic glazing type properties.	67
Table 7: Non-visual and visual threshold criteria for the evaluation of the diurnal study results.	73
Table 8: Materials used in the simulation models.	104
Table 9: Studied building-related parameters.	125
Table 10: Simulation model variables and their respective statistical model predictor inputs	135
Table 11: Pearson's correlation factors for each of the independent variables causing multicollinearity (grey coloured fields denote independent variables included in specific overall models).	139
Table 12: Overall MLR models fit and predictor coefficients for <i>E</i> , <i>E_m</i> and <i>CL_A</i>	139
Table 13: Standard error (<i>SE</i>) and coefficient of determination (<i>R</i> ²) for each of the view dependent models.	141
Table 14: Demographic details of respondents.	159
Table 15: Results of the Pearson's test between colour group and favourite environment at different saturation levels.	162

»Ta stran je namenoma prazna«

KAZALO SLIK

Slika 1: Struktura disertacije.....	5
Slika 2: Spekter elektromagnetnega sevanja. Povzeto po Livingston, 2014 [37].....	8
Slika 3: Normalizirana občutljivost standardnega fotopskega opazovalca in skotopskega opazovalca, povzeto po Boyce, 2014 [9].	10
Slika 4: CIE krivulje barvnega ujemanja $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$ za 2° CIE 1931 kolorimetričnega opazovalca in za $x_{10}(\lambda)$, $y_{10}(\lambda)$, in $z_{10}(\lambda)$ za 10° CIE 1964 standardnega opazovalca. Povzeto po Schanda, 2007 [40].	13
Slika 5: CIE 1931 xy kromatični barvnostni diagram z označenim Planckovim lokom. Povzeto po [42].	14
Slika 6: Spektralna gostota sevalne moči dnevne svetlobe na Zemljini površini. Povzeto po The IESNA Lighting Handbook, 2000 [43].....	15
Slika 7: SPD CIE standardnih svetlobnih virov dnevne svetlobe D_{55} (5500 K), D_{65} (6500 K) in D_{75} (7500 K), ki so normalizirani pri 560 nm. Povzeto po Schanda, 2007 [40].....	16
Slika 8: Vizulna pot človeškega vida. Povzeto po Sarrabzoles in sod., 2017 [53].	20
Slika 9: Prerez očesa, ki gleda v daljavo (zgornja simetrala) in v bližino (spodnja simetrala). Povzeto po Boyce, 2014 [9].	20
Slika 10: Struktura poglavitnih plasti retine. Povzeto po Münch in sod. [54].....	21
Slika 11: Distribucija čepkov in paličic na mrežnici. Povzeto po Abel in sod., 2017 [52].....	22
Slika 12: Relativna občutljivost paličic – skotopski vid. Povzeto po Boyce, 2014 [9].	23
Slika 13: Relativna občutljivost čepkov. Povzeto po Boyce, 2014 [9].....	23
Slika 14: Spalno-budni cikel posameznika v periodi 25 dni. Povzeto po Boyce, 2014 [9].	25
Slika 15: Potek nevizualne poti svetlobe sekrecije melatonina in regulacije cirkadiane ure. Povzeto po: Circadian Rhythm sleep disorders, 2016 [68].	26
Slika 16. Naravni ritem oscilacije melatonina in kortizola pri zdravih moških posameznikih. Povzeto po Selmaoui in Touitou, 2003 [69].	27
Slika 17: Zamik cirkadiane faze kot posledica enournega obsevanja s svetlobo širokega spektra, v odvisnosti od časa običajnega spanca. Povzeto po Saeed in sod., 2019 [73].	28
Slika 18: Levo: relativna učinkovitost svetlobe ozkega spektra na supresijo melatonina. Povzeto po: Brainard in sod., 2001 [78] in Thapan in sod., 2001 [79]. Desno: Model nelinearne spektralne občutljivosti cirkadianega sistema. Povzeto po: Rea in sod., 2005 [80].	29
Slika 19: Levo: <i>in vitro</i> spektralna občutljivost melanopsina na polikromatsko svetlobo. Povzeto po Spitschan in Lucas, 2017 [86]. Sredina: Računsko modelirana gostota leče. Povzeto po Amundadottir, 2017 [83]. Desno: <i>in vivo</i> spektralna občutljivost melanopsina v odvisnosti od	

starosti opazovalca, 487 nm za 20- letnega opazovalca in 496 nm za 80 letnega opazovalca. Povzeto po Spitschan, 2019 [87].	30
Slika 20: Supresija nočnega melatonina kot posledica obsevanja z lučmi ozkega spektra. Diamantne oblike predstavljajo podatke Brainarda in sod. [78] po obsevanju subjektov s svetlobnim stimulusom pri 440 nm, kvadratki pa predstavljajo študijo Thapana in sod. [79] pri ozkovalovnem spektru 424 nm. Povzeto po Rea, 2019 [18].	33
Slika 21: Supresija nočnega melatonina kot posledica enournim izpostavljenostim dvema polikromatskima viroma svetlobe pri različnih kornealnih nivojih osvetljenosti kot funkcija CL_A . Rezultati treh neodvisnih študij Rea in Figueiro leta 2013 [89]. Povzeto po Rea, 2019 [18].	33
Slika 22: Vsakodnevna cirkadiana funkcionalna klasifikacija. Povzeto po Andersen in sod., 2012 [6].	35
Slika 23: Ukaz v Radiance-u, ki navaja vnos podatkov za geometrijo s presevnostjo 0,817 (levo) in vnos podatkov za geometrijo z odsevnostjo 0,7 (desno).	40
Slika 24: Algoritem ustvarjanja presevnih materialov v Lark-u. Algoritem izdela tri ločene definicije Radiance materiala s po tremi vrednostmi presevnosti. Vsaka izmed vrednosti presevnosti pripada svojemu območju na spektru, ki je razdeljeno na devet delov.	42
Slika 25: Algoritem ustvarjanja neba v Larku.	43
Slika 26: Material "po meri" v programu ALFA.	44
Slika 27: Ustvarjanje spektralnega neba na podlagi lokacije časovnih podatkov in tipa neba v programu ALFA.	45
Slika 28: Relativna napaka libRadtran v primerjavi z izmerjenimi rezultati izražena v %, v primerjavi z ostalimi obstoječimi barvnimi svetlostnimi modeli neba. Po Bruneton, 2017 [130].	45
Slika 29: Zasnova pomanjšanega modela pisarne, izvedenega v merilu 1:5. Kote v oklepajih so mere eksperimentalnega modela, kote izven oklepajev predstavljajo mere prostora, v kolikor ne bi bil pomanjšan.	49
Slika 30: Spektrometer s konkavnim optičnim rešetom, StellarNet Black Comet CLK-CXR.	50
Slika 31: Kosinusni receptor s 180° vidnim kotom zajemanja.	50
Slika 32: Fotografija eksperimentalne postavitve v notranjosti modela.	50
Slika 33: Eksperimentalna postavitvev na strehi UL FGG.	50
Slika 34: Eksperimentalni in simulacijski model z označenimi merilnimi mesti in položajem na strehi UL FGG.	52
Slika 35: Odsevni in presevni materiali uporabljeni v postopku ocene točnosti simulacij.	53
Slika 36: Primerjava spektra neba, izmerjenega med eksperimentom s simuliranim nebom v Larku in v ALFI. Leva hemisfera prikazuje eksperimentalni posnetek neba, desna hemisfera pa simulirano nebo v ALFA.	57
Slika 37: Primerjava eksperimentalnih meritev in simulacij programa ALFA in Lark prvih treh različic (menjava barve stene, brez nameščene zasteklitve).	58

Slika 38: Primerjava eksperimentalnih meritev in simulacij programov ALFA in Lark za primere brez nameščene zasteklitve z menjavo barve vzhodne stene pri pogledu usmerjenem proti steni.....	58
Slika 39: Primerjava eksperimentalnih meritev in simulacij programa ALFA in Lark za primere z spreminjajočo zasteklitvijo in sivo obarvanim zidom pri pogledu usmerjenem proti steni.	59
Slika 40: Optične lastnosti uporabljenih odsevnih in presevnih materialov, uporabljenih v pomanjšanem modelu. Na vzorcih materialov so narisane odsevnosti/ presevnosti po valovnih dolžinah.....	66
Slika 41: Hemisferski posnetki neba v času trajanja eksperimenta.....	68
Slika 42: Normalizirana spektralna gostota sevalne moči (<i>SPD</i>) izmerjenih zunanjih razmer dnevne svetlobe med eksperimentom 28. 2. in 3. 3. 2019 (graf A). Normalizirane <i>SPD</i> simuliranih zunanjih razmer 21. 3. za jasni tip neba (graf B) in oblačni tip neba (graf C).....	69
Slika 43: Relativna sprememba v <i>RCU</i> glede na referenčno <i>RCU</i> pri 500 lx, v primerjavi z drugimi magnitudami osvetljenosti na vzorcu simuliranih 3 tipov neba (jasno, delo oblačno in oblačno) za vsako uro 21. marca, 21. junija in 21. decembra (za dodatno razlago glej Priloga A.2).	71
Slika 44: Metoda izračuna vplivnosti barv in vplivnosti nasičenosti na relativni melanopski in cirkadiani potencial.	72
Slika 45: Relativna melanopska učinkovitost - <i>RMU</i> za vsako izmed izmerjenih kombinacij, ko je senzor obrnjen proti steni.	75
Slika 46: Relativna cirkadiana učinkovitost (<i>RCU</i>) vsakega izmed merjenih primerov.....	78
Slika 47: Vrednosti <i>RMU</i> (levo) in <i>RCU</i> (desno) za vsako izmed kombinacij barv sten ravni odsevnosti I in vrste zasteklitev. S črnim okvirjem so označeni primeri, kadar pride do izničenja vpliva odsevnosti stene zaradi presevnosti okna.....	79
Slika 48: Vrednosti <i>RMU</i> (levo) in <i>RCU</i> (desno) za vsako izmed kombinacij barv stene nasičenosti II in vrste zasteklitev. S črnim okvirjem so označeni primeri, kadar pride do izničenja vpliva odsevnosti stene zaradi presevnosti okna.....	80
Slika 49: Vrednosti <i>RMU</i> (levo) in <i>RCU</i> (desno) za vsako izmed kombinacij barv stene saturacije III in vrste zasteklitev. S črnim okvirjem so označeni primeri, kadar pride do izničenja vpliva odsevnosti stene s strani presevnosti okna.	81
Slika 50: Relativna sprememba <i>RMU</i> glede na barve nasičenosti I, povzročena s spremembo na raven nasičenosti II (<i>VRII</i>), in sprememba v <i>RMU</i> s spremembo na raven nasičenosti III (<i>VRIII</i>) v primerjavi s spremembo v <i>RCU</i> , ki je posledica spremembe barve pri ravneh odsevnosti I (<i>VBI</i>), II (<i>VBII</i>) in III (<i>VBIII</i>).	82
Slika 51: Relativna sprememba <i>RCU</i> glede na barve ravno nasičenosti I, povzročena s spremembo na raven nasičenosti II (<i>VRII</i>), in relativna sprememba v <i>RCU</i> s spremembo na raven nasičenosti III (<i>VRIII</i>) v primerjavi s spremembo v <i>RCU</i> , ki je posledica spremembe barve pri ravneh odsevnosti I (<i>VBI</i>), II (<i>VBII</i>) in III (<i>VBIII</i>).....	83

Slika 52: Svetlobne razmere 21. marca pod jasnim tipom neba, vsake izmed izbranih kombinacij vrste komercialnih zasteklitev in barv zidu.	87
Slika 53: Svetlobne razmere 21. marca pod oblačnim tipom neba, vsake izmed izbranih kombinacij vrste komercialnih zasteklitev in barv zidu.	89
Slika 54: Osvetljenost, potrebna za zadostitev kriteriju po WELL (levo) in CL_A (desno) za vsakega izmed izmerjenih primerov eksperimenta.	94
Slika 55: Metodološki potek študije.	98
Slika 56: Relativna melanopska in cirkadiana učinkovitost (RMU in RCU) za severno, vzhodno, zahodno in južno nebo treh karakterističnih dni (21. december, junij in september) pri jasnem nebu.	100
Slika 57: Relativna melanopska in cirkadiana učinkovitost (RMU in RCU) za severno, vzhodno, zahodno in južno nebo treh karakterističnih dni (21. december, junij in september) pri delno oblačnem nebu.	101
Slika 58: Relativna melanopska in cirkadiana učinkovitost (RMU in RCU) za severno, vzhodno, zahodno in južno nebo treh karakterističnih dni (21. december, junij in september) pri oblačnem nebu.	102
Slika 59: Zasnova simulacijskih modelov štirih pisarn z identičnimi dimenzijami in enakim deležem okenske zasteklitve.	103
Slika 60: Spektri uporabljenih odsevnih in presevnih materialov.	104
Slika 61: Povprečni $RCU+$ obravnavanih prostorov po mesecih v odvisnosti od pogleda za tople, nevtralen in hladen cikel v vremenskih razmerah jasnega neba.	107
Slika 62: Povprečni CA obravnavanih prostorov po mesecih v odvisnosti od pogleda za tople, nevtralen in hladen cikel v vremenskih razmerah jasnega neba.	108
Slika 63: Povprečni $RCU+$ obravnavanih prostorov po mesecih v odvisnosti od pogleda za tople, nevtralen in hladen cikel v vremenskih razmerah delno oblačnega neba.	109
Slika 64: Povprečni CA obravnavanih prostorov po mesecih v odvisnosti od pogleda za tople, nevtralen in hladen cikel v vremenskih razmerah delno oblačnega neba.	110
Slika 65: Povprečni $RCU+$ obravnavanih prostorov po mesecih v odvisnosti od pogleda za tople, nevtralen in hladen cikel v vremenskih razmerah oblačnega neba.	111
Slika 66: Povprečni CA obravnavanih prostorov po mesecih v odvisnosti od pogleda za tople, nevtralen in hladen cikel v vremenskih razmerah oblačnega neba.	112
Slika 67: Delež točk za $RCU \geq 1,00$ (levo) - T_{RCU} in $CS \geq 0,30$ (desno) - T_{CS} 21. junija pri jasnem nebu z dodatnim časovnim izsekom ob 5.00 najnižjega jutranjega RCU in RMU nevtralnega cikla.	114
Slika 68: Delež točk za $RCU \geq 1,00$ (levo) - T_{RCU} in $CS \geq 0,30$ (desno) - T_{CS} 21. marca pri jasnem nebu z dodatnim časovnim izsekom ob 7.00 najnižjega jutranjega RCU in RMU	116
Slika 69: Delež točk za $RCU \geq 1,00$ (levo) - T_{RCU} in $CS \geq 0,30$ (desno) - T_{CS} 21. decembra pri jasnem nebu z dodatnim časovnim izsekom ob 9.00 najnižjega jutranjega RCU in RMU	118

Slika 70: Metodološki pristop opravljenih analiz.	126
Slika 71: Geometrijske lastnosti parametričnega simulacijskega modela (levo) z distribucijo in konfiguracijo simuliranih točk in smeri pogleda (desno). Za okrajšave glej Preglednica 9.	128
Slika 72: Shematska predstavitev števila opravljenih variacij pisarne in modelov linearne regresije..	129
Slika 73: Optične lastnosti odsevnih materialov.	130
Slika 74: Optične lastnosti uporabljenih presevnih materialov.	131
Slika 75. Simulirano spektralno sevanje z navedenimi zunanjimi osvetljenostmi ($E_{e,h}$) in melanopsko ($E_{e,h,m}$) uteženimi osvetljenostmi (levo), ter model oblačnega neba (desno).	132
Slika 76: Obseg simuliranih normaliziranih spektrov sevanja za 21. december v Ljubljani med 8.00 in 12.00 pri oblačnem nebu.	136
Slika 77: Vpliv lastnosti notranjega okolja na vizualno in nevizualno svetlobno okolje na podlagi poglednih modelov.	142
Slika 78: Vplivnost lastnosti notranjega okolja v odvisnosti od cone in pogleda.	143
Slika 79: Skupna povprečja efektivne cirkadiane izpostavljenosti dnevni svetlobi in uporabne dnevne osvetljenosti (<i>UDI</i> – Usefull Daylight Illuminance) za vsakega izmed simuliranih primerov.	145
Slika 80: Cirkadiano učinkovita izpostavljenost svetlobi in <i>UDI</i> med 8.00 in 12.00 na 21. december pri različnih <i>WWR</i> in $\tau_{v,m}$ pri 0,5 (zgoraj) in 0,8 (spodaj).	146
Slika 81: Cirkadiano učinkovita izpostavljenost svetlobi in <i>UDI</i> med 8.00 in 12.00 na 21. december pri različnih $\tau_{v,m}$ in <i>WWR</i> pri 20 % (zgoraj) in 40 % (spodaj).	147
Slika 82: Vizualna predstavitev variacije notranjega okolja v izvedeni anketi. Levo – generična dnevna soba; desno – generična pisarna. V primeru obeh tipologij je bila spreminjana barva vertikalnega desnega zidu.	153
Slika 83: Primeri digitalnih predstavitev bivalnega (zgornje tri slike) in pisarniškega (spodnje tri slike) notranjega okolja z uporabljenimi zasteklitvijo hladne (levo), nevtralne (sredina) in tople barve (desno).	154
Slika 84: Barvni vzorci in pripadajoče Lab-vrednosti obravnavanih barv v anketi.	155
Slika 85: Metodologija postavljanja vprašanj v anketi.	155
Slika 86: Simulacijski model celične pisarne z uporabljenimi materiali. Rdeča črta in trikotniki predstavljajo ravnino merjenja in orientacijo pogleda meritev osvetljenosti v ravnini očišča (E_v). Siva črta označuje delovno ravnino, uporabljeno pri merjenju <i>D</i> . Spektralne lastnosti materialov so prikazane v spodnjem delu slike.	157
Slika 87: Delež odgovorov [%] anketirancev na individualno preferirano barvo glede na posamezno barvo (levo) in individualno preferirano barvno skupino (desno) glede na spol in skupaj.	160
Slika 88: Delež odgovorov [%] preference barvnih skupin po starostnih skupinah in spolu; levo - moški, desno - ženske.	161
Slika 89: Graf Pearsonovih ostankov povezave najljubše barve z najljubšo barvo zidu.	163

Slika 90: Preferenca barvne skupine (desno) in preferenca barve zidu v odvisnosti od tipologije (levo).	164
Slika 91: Barvna preferenca za pisarniško in bivalno okolje ter različne stopnje nasičenosti.	166
Slika 92: Preferenca obarvanosti stekla (levo) in velikosti okna (desno) v pisarniškem in bivalnem okolju.	167
Slika 93: Urne povprečne vrednosti CS, ločene za poglede in različne prostore vseh merilnih mest za 21. december (zgoraj). Prostorska predstavitev celodnevne cirkadiano efektivne izpostavljenosti dnevni svetlobi za 21. december (spodaj).	169
Slika 94: Urne povprečne vrednosti CS, ločene za poglede in različne prostore vseh merilnih mest za 21. marec (zgoraj). Prostorska predstavitev celodnevne cirkadiano efektivne izpostavljenosti dnevni svetlobi za 21. marec (spodaj).	170

LIST OF FIGURES

Figure 1: Structure of the thesis.....	5
Figure 2: Electromagnetic radiation spectrum. After Livingston, 2014 [37].....	8
Figure 3: Normalized efficacy of standard photopic observer and scotopic observer. After Boyce, 2014 [9].	10
Figure 4: CIE $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$ colour matching functions for 2° CIE 1931 standard colorimetric observer and $x_{10}(\lambda)$, $y_{10}(\lambda)$, and $z_{10}(\lambda)$ of the 10° CIE 1964 supplementary standard observer. After Schanda, 2007 [40].....	13
Figure 5: CIE 1931 xy chromaticity diagram with marked Planckian locus. After [42].....	14
Figure 6: The spectral power distribution of daylight at Earth's surface. After The IESNA Lighting Handbook, 2000 [43].....	15
Figure 7: SPD for CIE standard illuminants for daylight D_{55} (5500 K), D_{65} (6500 K), and D_{75} (7500 K), each normalized at 560 nm. After Schanda, 2007 [40].	16
Figure 8: The visual pathway of the human vision. After Sarrabzoles et al., 2017 [53]	20
Figure 9: A section through the eye looking in the distance (above the symmetral) and up close (bottom symmetral). After Boyce, 2014 [9].....	20
Figure 10: Main retinal structure. After Münch et al. [54].	21
Figure 11: Cone and rods distribution in the retina, adapted after Abel et al., 2017 [52].	22
Figure 12: Relative sensitivity of rods - scotopic vision. After Boyce, 2014 [9].	23
Figure 13: Relative sensitivity of cones. After Boyce, 2014 [9].	23
Figure 14: Sleep-wake cycle of a individual over a period of 25 days. After Boyce, 2014 [9].	25
Figure 15: Non-visual light system pathway of melatonin secretion and regulation of circadian clock After: Circadian Rhythm Sleep Disorders, 2016 [68]	26
Figure 16: Natural oscillation of melatonin and cortisol of healthy male individuals, after Selmaoui and Touitou, 2003 [69].	27
Figure 17: Circadian phase shift after 1-hour of bright broad spectrum bright light in relation to habitual sleep time. After Saeed et al. [73].	28
Figure 18: Left: Relative efficacy of narrowband light stimuli on the melatonin suppression. After: Brainard et al., 2001 [78] and Thapan et al., 2001 [79]. Right: Nonlinear spectral sensitivity model of the circadian system. After: Rea et al. 2005 [80].	29
Figure 19: Left: In vitro spectral sensitivity of melanopsin, after Spitschan and Lucas, 2017 [86]. Middle: calculated model of eye lens transmissivity in relation to observer age. After: Amundadottir, 2017 [83]. Right: in vivo spectral sensitivity of melanopsin dependent of age. 487 nm for 20-year observer and 496 for 80 year observer. After Spitschan, 2019 [87].	30

Figure 20: Suppression of nocturnal melatonin as a consequence of different narrowband lights. Diamond shapes represent data from Brainard et al. [78] with a narrowband light stimulus at 440 nm. Squares represent results from exposure to 424 nm wavelength narrow spectrum light from the experiment of Thapan et al. [79]. After: Rea 2019 [18].	33
Figure 21: Nocturnal melatonin suppression after one-hour exposure to two polychromatic light sources at different correlated temperatures (CCT) and at different levels of cornel photopic illuminances as a function of circadian light (CLA). From three independent studies of Rea and Figueiro in 2013 [89]. After, Rea, 2019 [18].	33
Figure 22: Diurnal circadian functional classification. After Andersen et al., 2012 [7].	35
Figure 23. Command in Radiance stating the input of glass material applied to geometry with transmissivity of 0.817 (left) and diffuse material applied to geometry with transmissivity of 0.7 (right).	40
Figure 24: Spectral transmissive material creation algorithm in Lark. The algorithm create three seperate definitions of Radiance material with three values of transmissivity. Each of the transmissivity values corresponds to one bin of the actual spectrum (9 bins form the whole spectrum).	42
Figure 25: Sky generation algorithm in Lark.	43
Figure 26: Custom material in ALFA.	44
Figure 27: Spectral sky creation in ALFA, based on location, temporal data and sky typology.	45
Figure 28: Relative error of libRadtran in comparison with measured data expressed in %, compared with other spectral sky models. After Bruneton, 2017 [130].	45
Figure 29: Model design of the office scale model (scale of 1:5). Measurements in brackets represent the measurements of the scale model, measurements out of brackets represent dimensions, if the model was not in scale.	49
Figure 30: StellarNet concave grating spectrometer, Black Comet BLK-CXR.	50
Figure 31: Cosine receptor with 180° field of view.	50
Figure 32: Picture of experimental setup in the model interior.	50
Figure 33: Experimental setup of the model on the roof of UL FGG.	50
Figure 34: Experimental and simulation model with marked measuring points and position on the UL FGG roof.	52
Figure 35: Reflective and transmissive materials chosen for the simulation accuracy assessment.	53
Figure 36: Comparison of experimentally measured sky at 12:00 with simulated sky in Lark and ALFA. Left hemisphere shows a picture of sky during experiment, right picture shows the sky as simulated by ALFA.	57
Figure 37: Comparison of the experimental measurements with the simulations of ALFA and Lark of first try variants (change wall colour, no installed glazing).	58

Figure 38: Comparison of the experimental measurements with the simulations of ALFA and Lark for view towards the wall with varying wall colour and no glazing applied to the window opening.	58
Figure 39: Comparison of the experimental measurements with the simulations of ALFA and Lark for view towards the wall with varying glazing and grey coloured walls.	59
Figure 40: Optical properties of used reflective and transmissive materials used in the scale model. Each material sample (reflective or transmissive) is depicted with its respective plot of spectral reflectivity or transmissivity.	66
Figure 41: Hemispheric photographs of sky state during the experiment conduction.	68
Figure 42: Normalized spectral power distribution (SPD) of measured daylight during experiments on the 28th of February and the 3rd of March. Normalized SPD of exterior simulated sky SPDs on the 21 st of March for the clear (plot B) and overcast sky (plot C).	69
Figure 43: Relative difference in <i>RCU</i> according to <i>RCU</i> at 500 lx in comparison to other magnitudes of illuminance for each daylit hour of 21. March, June and December (for detailed explanation see Priloga A.2).	71
Figure 44: Method for evaluation of the influence of colour and the influence of saturation on the relative melanopic and circadian efficacy.	72
Figure 45: Relative melanopic efficacy - <i>RMU</i> for each of the measured cases when the sensor is facing towards the wall.	75
Figure 46: Relative circadian efficacy (<i>RCE</i>) for each of the measured cases.	78
Figure 47: Values of <i>RMU</i> (left) and <i>RCE</i> (right) for each colour-glazing combination at saturation level I, with marked annulation of the effect of wall reflectance as caused by window transmissivity.	79
Figure 48: Values of <i>RMU</i> (left) and <i>RCU</i> (right) for each colour-glazing combination at saturation level II, with marked annulation of the effect of wall reflectance as caused by window transmissivity.	80
Figure 49: Values of <i>RMU</i> (left) and <i>RCU</i> (right) for each colour-glazing combination at saturation level III, with marked annulation of the effect of wall reflectance as caused by window transmissivity.	81
Figure 50: Change in <i>RME</i> induced by modulation of saturation level from saturation level I to saturation level II (<i>VRII</i>) and change in <i>RMU</i> from saturation level I to saturation level III and (<i>VRIII</i>) in comparison to change in <i>RCU</i> caused by colour modulation at reflectance levels I (<i>VBI</i>), II (<i>VBII</i>), and III (<i>VBIII</i>).	82
Figure 51: Change in <i>RCE</i> ($\Delta RRCE$) induced by modulation of saturation level from saturation level I to saturation level II (<i>VRII</i>) and change in <i>RCE</i> from saturation level I to saturation level III and (<i>VRIII</i>) in comparison to change in <i>RCE</i> caused by colour modulation at reflectance levels I (<i>VBI</i>), II (<i>VBII</i>), and III (<i>VBIII</i>).	83

Figure 52: Luminous environment conditions on the 21st of March under clear sky conditions of all investigated wall cover and glazing combinations.	87
Figure 53: Luminous environment conditions on the 21st of March under overcast sky conditions of all investigated wall cover and glazing combinations.	89
Figure 54: Illuminance required to meet the WELL (left) and CL_A (right) criteria for each of the measured experimental iterations.	94
Figure 55: Study's methodological approach.	98
Figure 56: Relative melanopic and circadian efficacy (RMU and RCU) for north, east, west and south sky in relation for three characteristic days (21st of December, June and September) with clear sky conditions.	100
Figure 57: Relative melanopic and circadian efficacy (RMU and RCU) for north, east, west and south sky in relation for three characteristic days (21st of December, June and September) with intermediate sky conditions.	101
Figure 58: Relative melanopic and circadian efficacy (RMU and RCU) for north, east, west and south sky in relation for three characteristic days (21st of December, June and September) with overcast sky conditions.	102
Figure 59: Design of the simulation models of four identical offices with same room dimensions and window size.	103
Figure 60: Spectrums of the reflective and transmissive materials used in the study.	104
Figure 61: Average $RCU+$ of the studied environments for each month in relation to view for warm, neutral and cold cycle under clear sky conditions.	107
Figure 62: Average CA of the studied environments for each month in relation to view for warm, neutral, and cold cycle under clear sky conditions.	108
Figure 63: Average $RCU+$ of the studied environments for each month in relation to view for warm, neutral, and cold cycle under intermediate sky conditions.	109
Figure 64: Average CA of the studied environments for each month in relation to view for warm, neutral, and cold cycle under intermediate sky conditions.	110
Figure 65: Average $RCU+$ of the studied environments for each month in relation to view for warm, neutral, and cold cycle under overcast sky conditions.	111
Figure 66: Average CA of the studied environments for each month in relation to view for warm, neutral, and cold cycle under overcast sky conditions.	112
Figure 67: Percentage of points above $RCU \geq 1,00$ (left) - T_{RCU} and percentage of points above $CS \geq 0,30$ (right) for the 21 st of June, with additional time slices of lowest RCU and CS at 5:00.	114
Figure 68: Percentage of points above $RCU \geq 1,00$ (left) - T_{RCU} and percentage of points above $CS \geq 0,30$ (right) for the 21 st of March, with additional time slices of lowest RCU and CS at 7:00.	116
Figure 69: Percentage of points above $RCU \geq 1,00$ (left) - T_{RCU} and percentage of points above $CS \geq 0,30$ (right) for the 21 st of December, with additional time slices of lowest RCU and CS at 9:00.	118

Figure 70: Methodological workflow of the conducted study.	126
Figure 71: Geometrical characteristics of parametric simulation model (left) with distribution and configuration of the simulated viewpoints and view directions (right). For abbreviations, see Table 9.	128
Figure 72: Schematic representation and number of simulated office variations used in multiple linear regression models.	129
Figure 73: Optical properties of the used opaque materials.	130
Figure 74: Optical properties of the used transparent materials.	131
Figure 75: Simulated normalized spectral irradiance with corresponding global horizontal illuminance ($E_{e,h}$) and melanopically ($E_{e,h,m}$) weighted global horizontal illuminances (left) and overcast sky model (right).	132
Figure 76: Simulated normalized spectral irradiance range for the 21st of December in Ljubljana between 8:00 and 12:00, solar time, overcast sky conditions.	136
Figure 77: Influence of building parameters visual and non-visual luminous conditions according to view dependent models.	142
Figure 78: Building parameter influence on the indoor illuminance in relation to zone and view direction.	143
Figure 79: Overall averages of effective circadian exposure and <i>UDI</i> – Useful Daylight Illuminance for each of the simulated cases.	145
Figure 80: Effective circadian exposure between 8:00 and 12:00 on the 21 st of December and annual <i>UDI</i> for the same daily period at various <i>WWR</i> s and $\tau_{v,m}$ of 0.50 (top) and 0.80 (bottom).	146
Figure 81: Effective circadian exposure between 8:00 and 12:00 on the 21 st of December and annual <i>UDI</i> for the same daily period at various $\tau_{v,m}$ and <i>WWR</i> of 20 % (top) and 40 % (bottom).	147
Figure 82: Visual representation of indoor environment variation in the survey. Left – generic living room; right; generic office. In both typologies the colour of the right vertical wall was varied...	153
Figure 83: Examples of living environment renders (top three pictures) and office environment renders (bottom three pictures) with applied cold (left), neutral (middle), and warm (right) glazing.	154
Figure 84: Colour swatches and their respective Lab values of the colours used in the survey.	155
Figure 85: Methodology of pairing wall colour preferences in the conducted study.	155
Figure 86: Simulation model of the cellular office with used surface materials. The red line and triangles represent the measurement plane and the orientation of measurement points of corneal illuminance (E_v), while grey line marked plane represents the position of the work plane at which <i>D</i> values were determined (i.e. working plane). Colour and spectral properties (reflectivity and transmissivity) of the used materials are shown in the bottom part of the figure.	157
Figure 87: Percentage of responses [%] according to individual colour swatch preferences (left) and according to colour hue by gender (right).	160

Figure 88: Percentage of responses [%] according to the colour hue preference by age groups of male respondents.....	161
Figure 89: Plot of Pearson’s residuals of association between preferred colour group and wall colour.	163
Figure 90: Colour hue preference (right) and colour swatch preferences by room typology (left).....	164
Figure 91: Colour preference for different environments and saturation choices.	166
Figure 92: Glazing tint preference (left) and window size preference (right) for office and living environment.....	167
Figure 93: Hourly CS value averages for all grid points for each view direction of different office configurations (top) for the 21 st of December. Spatial representation of the diurnal duration of achieved circadian effective exposure for the 21 st of December (bottom).....	169
Figure 94: Hourly CS value averages for all grid points for each view direction of different office configurations (top) for the 21 st of March. Spatial representation of the diurnal duration of achieved circadian effective exposure for the 21 st of March (bottom).	170

SEZNAM KRATIC

CIE	<i>Mednarodna komisija za razsvetljavo (fr. Commission Internationale de l'Eclairage)</i>
CIE A	<i>standardni svetlobni vir, ki predstavlja klasično wolframovo žarnico pri baroni temperaturi svetlobe 2865 K</i>
CIE D ₆₅	<i>standardni svetlobni vir, ki predstavlja povprečno dnevno svetlobo pri podobni baroni temperaturi svetlobe 6504 K</i>
ipRGC	<i>intrinzično fotosenzitivne retinalne ganglijske celice (angl. intrinsically photosensitive retinal ganglion cells)</i>
CIE Lab	<i>tridimenzionalni barvni prostor, ki temelji na percepcijski svetlosti barve (L) in štirih barvah edinstvene človeške percepcije: rdeče, zelene, modre in rumene (kombinacija a*b)</i>
MLR	<i>multipla linearna regresija</i>
PPMDS	<i>podnebno pogojeno modeliranje dnevne svetlobe (angl. CBDM – Climate Based Daylight Modelling)</i>
RGB	<i>tridimenzionalni barvni prostor, ki temelji na opisovanju barv s tremi osnovnimi barvami: rdečo (R), zeleno (G) in modro (B)</i>
SAD	<i>sezonsko pogojena depresija (angl. seasonal affective disorder)</i>
SCN	<i>angl. Suprachiasmatic nucleus, lat. Nucleus superchiasmaticus – majhno območje možganov nad hipotalamusom, ki je odgovorno za regulacijo cirkadianih ritmov</i>
LGN	<i>angl. lateral geniculate nucleus, lat. Corpus geniculatum laterale – lateralno genikulatno jedro</i>

»Ta stran je namenoma prazna«

SEZNAM UPORABLJENIH KOLIČIN

CA	<i>cirkadiana avtonomija (angl. Circadian Autonomy) [%]</i>
CCT	<i>podobna barvna temperatura [K]</i>
CL _A	<i>cirkadiana svetloba – metrika (angl. Circadian Light) [-]</i>
R _a	<i>indeks barvnega videza [-]</i>
CS	<i>cirkadiani stimulus – metrika (angl. Circadian Stimulus) [-]</i>
D	<i>faktor dnevne svetlobe (angl. Daylight Factor). [%]</i>
E _{e, h, m}	<i>zunanja globalna melanopska osvetljenost, merjena na horizontalni ravnini [lx]</i>
E _{e, h}	<i>zunanja globalna osvetljenost, merjena na horizontalni ravnini [lx]</i>
E _h	<i>horizontalna osvetljenost [lx]</i>
E _m	<i>ekvivalentna melanopska osvetljenost [EML – ekvivalentni melanopski lux]</i>
E	<i>osvetljenost [lx]</i>
E _v	<i>vertikalna osvetljenost [lx]</i>
E _{e, sim, i}	<i>normalizirano spektralno sevanje simulacije i-te valovne dolžine v intervalu od 380 do 730 nm, v 5 nm koraku [W/m²]</i>
E _{e, exp, i}	<i>normalizirano spektralno sevanje eksperimentalne meritve i-te valovne dolžine v intervalu od 380 do 730 nm, v 5 nm koraku [W/m²]</i>
RCU	<i>relativna cirkadiana učinkovitost (angl. RCE – Relative Circadian Efficiency) [-]</i>
RCU+	<i>avtonomija cirkadianega potenciala (angl. Autonomy of circadian potential) [%]</i>
R _m	<i>melanopsko utežena odsevnost za dnevno svetlobo [-]</i>
RMSE	<i>povprečni kvadrat napake [%]</i>
RMU	<i>relativna melanopska učinkovitost (angl. RME – Relative Melanopic Efficiency) [-]</i>
RSPD	<i>relativna spektralna gostota sevalne moči (angl. Relative Spectral Power Distribution)[-]</i>
R _v	<i>vidno utežena odsevnost za dnevno svetlobo [-]</i>
SPD	<i>spektralna gostota sevalne moči (angl. Spectral Power Distribution) [W/m²nm]</i>
T _{CS}	<i>prostorsko pogojeno vrednotenje cirkadianega svetlobnega okolja [%]</i>
T _{RCU}	<i>prostorsko pogojeno vrednotenje cirkadianega potenciala [%]</i>
UDI	<i>uporabna dnevna osvetljenost (angl. Usefull Daylight Illuminance) [%]</i>
V'(λ)	<i>relativna spektralna svetlobna učinkovitost pri (nočnem) skotopskem videnju</i>
V(λ)	<i>relativna spektralna svetlobna učinkovitost pri (dnevem) fotopskem videnju</i>
WWR	<i>razmerje površine okna proti površini fasade (angl. Window to Wall Ratio) [%]</i>
T _m	<i>melanopsko utežena presevnost za dnevno svetlobo [-]</i>

τ_v	<i>vidno utežena presevnost za dnevno svetlobo [-]</i>
Err_{RMU}	<i>relativna napaka v RMU [%]</i>
RRCU	<i>relativni vpliv odsevnosti ali barve z vidika RCU [%]</i>
RRMU	<i>relativni vpliv odsevnosti ali barve z vidika RMU [%]</i>
VBI,II in III	<i>vpliv spremembe barve na RCU pri ravni nasičenosti I(VBI), II(VBII) in III(VBIII) [-]</i>
VRII	<i>vpliv spremembe z nasičenosti II na nasičenost I na RCU [-]</i>
VRIII	<i>vpliv spremembe z nasičenosti III na nasičenost II na RCU [-]</i>

Splošno poimenovanje je utemeljeno na podlagi dogovorjenih terminov iz svetlobnotehniškega slovarja[1], Seznam slovenskih izrazov, in standarda SIST EN 17037, Dnevna svetloba v stavbah [2].

SEZNAM MANJ ZNANIH TERMINOV

<i>Cirkadiano svetlobno okolje</i>	<i>Poimenovanje skupka lastnosti (intenziteta in relativna spektralna gostota sevalne moči v odvisnosti od odzivnosti cirkadianega sistema) notranjega grajenega svetlobnega okolja z vidika vpliva svetlobe na cirkadiani ritem in posledično uravnavanje akutnih sprememb v psihofizičnem počutju povprečnih posameznikov v prostoru.</i>
<i>Cirkadiani potencial</i>	<i>Lastnost prejete svetlobe, ki hkrati opisuje količini relativne melanopske učinkovitosti (RMU) in relativne cirkadiane učinkovitosti (RCU). Cirkadiani potencial primarno izraža, ali je merjeno svetlobno okolje cirkadiano stimulativno, nevtralnno ali destimulativno, in kaže pomembno informacijo, ali lahko svetlobo danih spektralnih lastnosti izražamo le s pomočjo ustaljenih vizualnih oz. fotopskih metod.</i>
<i>Cirkadiano učinkovita svetloba</i>	<i>Svetloba, katere spektralne karakteristike povzročijo zadostitev pogojem po izpostavljenosti dnevni svetlobi v količini $CS = 0,30$ oz. $CL_A = 275$.</i>
<i>Cirkadiano stimulativni materiali</i>	<i>Materiali, katerih melanopske optične lastnosti (odsevnost ali presevnost) so višje ali enake kakor vidne optične lastnosti: $\tau_m \geq \tau_v$ ali $R_m \geq R_v$.</i>
<i>Nevtralne barve</i>	<i>Percepcija, ali je barva, hladna, topla ali nevtralna, je navadno odvisna od subjektivne presoje. Zato smo za delitev barv v tri skupine (tople, hladne in nevtralne) v tej doktorski disertaciji uporabili v nadaljevanju podano delitev. Nevtralne barve so tiste, ki so spektralno monotone po celotnem obsegu vidnega spektra (npr. sivi odtenki), in prav tako barve, ki so kumulativno enakovredno zastopane v spektru levo od 380 do 555 nm in od 555 do 780 nm (npr. vijolične in zelene).</i>
<i>Hladne barve</i>	<i>Kot hladne barve označujemo tiste, katerih kumulativna odsevnost je bolj izražena v območju od 380 do 555 nm (npr. modri odtenki).</i>
<i>Tople barve</i>	<i>Kot tople barve označujemo tiste, katerih kumulativna odsevnost je bolj izražena v območju od 555 do 780 nm (npr. rdeči in oranžni odtenki).</i>
<i>Arhitekturno-gradbeni elementi</i>	<i>Elementi, ki fizično zamejujejo notranje grajeno okolje proti zunanosti ali drugim notranjim prostorom ter hkrati bistveno vplivajo na notranjo osvetljenost zaradi svojih optičnih in geometrijskih lastnosti. Neposredno te elemente predstavljajo npr. stena, strop, tla in okna, posredno med takšne elemente spadajo tudi nadstreški, izzidki, balkoni, senčila itd.</i>
<i>Cirkadiano</i>	<i>Nekaj, kar se pojavlja v ponavljajočih se približno 24-urnih periodah. Lat. izvor: circa – približno, diem – dan.</i>
<i>Cirkadiani ritem</i>	<i>Psihofizične in vedenjske spremembe, ki sledijo približnemu 24-urnemu dnevno-nočnemu ciklu in so primarno regulirani s pomočjo pojavnosti dnevne svetlobe.</i>
<i>Cirkadiani učinki dnevne svetlobe</i>	<i>Učinki psihofizičnih in vedenjskih sprememb (z drugimi besedami nevizualni učinki), ki se pojavljajo kot posledica izpostavljenosti dnevni svetlobi ali obratno v njeni odsotnosti. Sopomenka: nevizualni učinki svetlobe.</i>
<i>Vizualni učinki dnevne svetlobe</i>	<i>Učinki dnevne svetlobe, ki opisujejo vpliv svetlobe na vid (percepcija svetlosti, barve itd.).</i>
<i>Nevizualni učinki dnevne svetlobe</i>	<i>Učinki dnevne svetlobe, ki opisujejo vpliv svetlobe na razpoloženje, cirkadiani ritem in druge fiziološke procese, ki jih regulira izpostavljenost svetlobi in ne vplivajo na vid.</i>

<i>Celična pisarna</i>	<i>Tip pisarne, ki ponuja veliko zasebnost in je navadno namenjen le enemu pisarniškem delavcu oz. manjšemu številu zaposlenih.</i>
<i>Nevizualni sistem</i>	<i>Sistem zaznave svetlobe, ki ni neposredno vezan na vidno zaznavo.</i>
<i>Količina</i>	<i>V nalogi je termin količina uporabljen kot sopomenka termina veličina.</i>

1 UVOD

1.1 Opredelitev problema

Dnevna svetloba je v grajenem okolju temeljni gradnik kakovostnega notranjega okolja, česar so se zavedali že snovalci grajenega okolja starega veka. Pred pojavom prvih električnih svetil v 19. stoletju so bili notranji grajeni prostori načrtovani tako, da so zagotavljali primerno količino dnevne svetlobe. Odkritje elektrike in posledično izum električnih svetil pa sta omogočila učinkovitejše razsvetljevanje grajenega okolja kot tehnologije pred tem. Splošna razširjenost umetne razsvetljave in tudi pomanjkljivo zavedanje o vplivu dnevne svetlobe na organizme v stavbah sta zmanjšala interes načrtovalcev za optimizacijo stavb in stavbnih ovojev z vidika naravnega osvetljevanja z dnevno svetlobo. Uporabniki tako začnejo postopoma izgubljati neposredni stik z naravo in naravno dinamiko dnevne svetlobe, s katero so neposredno povezana vsa živa bitja na Zemlji. V štiridesetih letih 20. stoletja so bile opravljene raziskave na področju vizualnih učinkov svetlobe ($V(\lambda)$) [3], šele v devetdesetih letih 20. stoletja pa začnemo spoznavati mehanizme učinkov svetlobe, ki vplivajo na posameznikovo psihološko in fiziološko stanje. Leta 2017 Jeffrey C. Hall, Michael Rosbash in Michael W. Young prejmejo Nobelovo nagrado [4] na področju medicine za svoje dolgoletno delo, katerega plod je razumevanje molekularnih mehanizmov, ki nadzirajo delovanje človeškega cirkadianega ritma in s tem potrjujejo človeško neposredno povezanost z dnevno svetlobo. Fotopigment melanopsin je ključni člen omenjenih molekularnih mehanizmov in je v tretjem tipu fotoreceptorjev ipRGC (intrizično fotosenzitivne retinalne ganglijske celice) [5]. Melanopsin se najbolj intenzivno odziva na svetlobo v modrem spektru (480 nm) [6], zato konvencionalne metode merjenja vpliva svetlobe na dnevno videnje niso primerne (kot npr. merjenje svetlosti, osvetljenosti, utežene z $V(\lambda)$), kajti fotopsko videnje je najbolj občutljivo za rumeno-zeleno svetlobo (555 nm), dodatno pa je vpliv svetlobe na cirkadiani sistem časovno pogojen (kdaj in kako dolgo traja izpostavljenost). Najpomembnejša je zadostna izpostavljenost svetlobi v jutranjih urah [7, 8], v večernih pa se je priporočljivo izogniti močnim svetlobnim virom. Če smo neprimerno izpostavljeni svetlobnim dražljajem, lahko cirkadiani sistem začne delovati neusklajeno z astronomsko uro. Daljša cirkadiana neusklajenost pa lahko negativno vpliva na zdravje in počutje. Raziskave navajajo pojav duševnih težav, kot je depresija [9, 10], nespečnost itd., tudi razne kronične bolezni, npr. diabetes [11], ali gastrointestinalne bolezni [12] itd.

Merjenje in določanje primernih količin svetlobnih dražljajev za spodbuditev in normalno delovanje cirkadianega sistema je zaradi lastnosti odziva sistem zelo kompleksno. Zato je področje cirkadianega vidika osvetljevanja potrebovalo načine ocenjevanja količine svetlobe, ki bodo ta kompleksen odziv na svetlobo lahko opisovali. Metodologija ekvivalentnega alfa-opskega luxa [13] (*Equivalent Melanopic Lux*, ekvivalentni melanopski lux – EML) in metrika cirkadiane svetlobe (cirkadiana svetloba, angl. *Circadian Light* – CL_A in cirkadiani stimulus, angl. *Circadian Stimulus* – CS) [14,15] sta najpogosteje uporabljeni metodologiji ocenjevanja cirkadiano učinkovite svetlobe. Prva (EML) meri delovanje vsakega izmed fotoreceptorjev ločeno (torej v primeru EML le delovanje ipRGC). Druga, CL_A , upošteva sodelovanje vseh fotoreceptorjev, sodelujočih pri cirkadiani zaznavi svetlobe, ki jo lahko pretvorimo v delež supresije melatonina ($CS = 0,3 - 30\%$ supresija melatonina). Veliko raziskav s področja vpliva cirkadianega aspekta osvetljevanja je pripomoglo k temu, da lahko trdimo, da je $CS = 0,3$ mejnik količine svetlobe, ki povzroča večjo budnost in posledično vzdrževanje cirkadianega ritma, še posebej v dopoldanskih urah, kar so v svojih študijah potrdili Figueiro in sod. [8, 16, 17] in Rea in sod. [18]. Vrednost $CS = 0,3$ si lahko predstavljamo kot 180 lx standardnega vira dnevne svetlobe – CIE D_{65} in 275 lx standardnega vira svetilke z žarilno nitjo – CIE A.

Vpliv lastnosti arhitekturno-gradbenih elementov, predvsem odsevnosti in presevnosti površin na količino vidne svetlobe, nam je dobro poznan, ne vemo pa, kako omenjene lastnosti vplivajo na nevizualni oz. cirkadiani vidik prejete svetlobe. Zato je pomembno, da lahko ocenimo potencial svetlobnega spektra z vidika cirkadianega sistema v odvisnosti od odsevnih in presevnih materialov notranjega okolja hipotetičnih uporabnikov prostora, ki prejemajo svetlobo na vertikalni ravnini v višini 1,2 m od tal (povprečna višina oči sedeče osebe). Cai in sod. [19] in Yao in sod. [20] s poenostavljeno računsko metodo na podlagi eksperimentov pokažejo, da ima, kadar upoštevamo le indirektno dnevno svetlobo v notranjem grajenem okolju, odsevnost zidov dominanten vpliv. Inanici in sod. [21], Hartman in sod. [22], Potočnik in sod. [23] in Potočnik in Košir [24] opozorijo na potencialno past pri načrtovanju notranjih prostorov, kajti prostori lahko pri enakih vidnih odsevnostih zaradi različnih spektralnih lastnosti (barve) drugače vplivajo na cirkadiani sistem. Tople barve odsevajo/presevajo manjšo cirkadiano osvetljenost kakor nevtralne barve in hladne barve odsevajo/presevajo večjo cirkadiano osvetljenost kakor nevtralne barve. Na količino cirkadiano učinkovite svetlobe v prostoru vplivajo površina zasteklitve [25], uporaba senčil [26, 27], globina in širina prostora ter spreminjanje smeri pogleda [28, 29, 30]. Očitno je, da smo ljudje prilagojeni na spektralno sestavo dnevne svetlobe. Kakor pokaže Konis [31] v prostorih socialnovarstvenih ustanov, prostori, osvetljeni z dnevno svetlobo, ponujajo več cirkadiano učinkovite svetlobe kakor tisti,

ki so osvetljeni samo z umetno svetlobo. V geriatričnih ustanovah je zadostna osvetljenost s cirkadiano svetlobo še pomembnejša, saj očesna leča s starostjo rumeni in prepušča vedno manj modre svetlobe, ki bi stimulirala cirkadiani sistem [32, 33, 34].

Optične lastnosti površin odločilno vplivajo na cirkadiano efektivno okolje v notranjem grajenem okolju, zato vemo, da obstaja verjetnost, da v fazi snovanja prostora ne bomo zmožni predvideti sprememb optičnih lastnosti gradbeno-arhitekturnih elementov, ki običajno nastanejo kot posledica preferenc uporabnikov notranjega okolja (npr. sprememba barve sten). Zato je zelo pomembno razumeti, kakšen je odnos uporabnikov prostora do določenih barv v prostoru, natančneje, katerim barvam dajejo prednost v notranjem grajenem okolju. Kot vemo, na izbor najljubših barv lahko vplivajo kultura, spol [35, 36] in tudi starostna skupina [37], vendar ne vemo zagotovo, ali najljubša barva določa izbor najljubše barve površin notranjega grajenega okolja.

1.2 Namen disertacije

Namen doktorske disertacije je razumeti in razložiti, kako in koliko lahko arhitekturno-gradbeni elementi (npr. stene, okna, strop in tla), ki so del notranjega grajenega okolja, vplivajo na cirkadiani vidik dnevne svetlobe s perspektive potencialnega uporabnika prostora.

1.3 Raziskovalni vprašnji

Kljub obsežnemu številu raziskav na področju nevizualnih vplivov dnevne svetlobe v notranjem okolju stavb še vedno ni popolnoma jasno, kako se merjeno cirkadiano svetlobno okolje v prostoru spreminja ob spreminjanju spektralne odsevnosti zidov in/ali spreminjanju spektralne presevnosti/vrste zasteklitve ter geometrijskih lastnosti prostora. Je torej možno natančneje določiti vpliv posameznih lastnosti notranjega okolja (npr. odsevnost, presevnost razmerje med površino zasteklitve in zunanjim ovojem, globina prostora itd.) na cirkadiano svetlobno okolje prostora?

Ali je glede na znane vplive svetlobe na človeka ob specifikah grajenega okolja sploh potrebno ocenjevanje cirkadianih vplivov svetlobe ali je zadosten pokazatelj primanjkljaja cirkadianega svetlobnega okolja v prostoru že analiza osvetljenosti le s stališča izpolnjevanja vizualnih zahtev?

1.4 Delovne hipoteze in drugi cilji

Ob postavitvi teme doktorske disertacije so bile vzpostavljene naslednje hipoteze:

1. Ob upoštevanju usmerjenosti normale analizirane ravnine v prostoru ima na velikost vpliva odsevnih površin na cirkadiani potencial nasičenost barve večji vpliv kakor izbor barvnega odtenka.
2. Ob upoštevanju usmerjenosti normale analizirane ravnine v prostoru lahko vpliv presevnosti za dnevno svetlobo tipičnih okenskih zasteklitev izniči vpliv odsevnih površin na cirkadiani potencial v prostoru.
3. V primeru dnevne svetlobe je ob običajnih lastnostih notranjih prostorov in zasteklitev (spektralno nevtralni prostori) zadosten pokazatelj primanjkljaja cirkadianega potenciala v prostoru že analiza osvetljenosti le s stališča izpolnjevanja vizualnih zahtev.

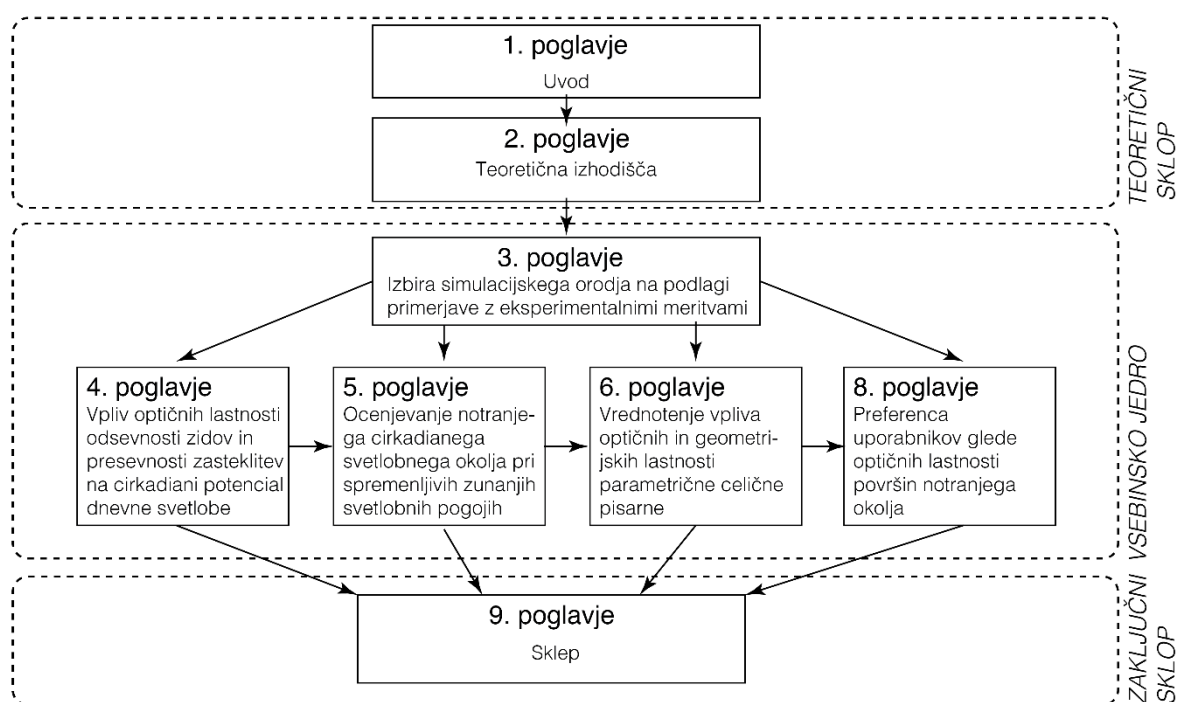
Ter zastavljeni drugi cilji:

1. Če se bo izkazalo kot izvedljivo, predlagati poenostavljeno metodologijo za oceno cirkadianega potenciala na podlagi uveljavljenih pristopov vizualnega ocenjevanja notranjega okolja.
2. Na podlagi simulacij določiti najustreznejšo konfiguracijo notranjega okolja v hipotetičnem pisarniškem prostoru s stališča cirkadianega potenciala prostora.
3. S pomočjo ankete o osebni preferenci barv notranjega okolja določiti, koliko lahko osebne odločitve uporabnikov prostora pri spreminjanju notranjega okolja (spreminjanje barv sten in vrste zasteklitev) vplivajo na cirkadiani potencial prostora v fazi uporabe.

1.5 Struktura doktorske disertacije

Disertacijo lahko razdelimo v tri vsebinske sklope, kakor je prikazano na sliki 1. Prvi sklop disertacije predstavlja teoretični sklop ter zajema uvodno poglavje in teoretična izhodišča, ključna za razumevanje disertacije. Drugi vsebinski sklop predstavlja vsebinsko jedro naloge in je sestavljen iz petih poglavij. V 3. poglavju izberemo simulacijsko orodje, ki ga bomo uporabljali pri štirih neodvisnih eksperimentalnih in simulacijskih študijah, ki pokrivajo široko polje problematik z vidika cirkadianega osvetljevanja prostorov. Zaradi jasnosti in berljivosti disertacije smo vsaki opravljeni študiji dodelili svoje poglavje, ki v podpoglavjih

obsega kratek uvod, predstavitev metode, rezultate in diskusijo. Ob začetku vsakega poglavja je zapisan povzetek v slovenskem in angleškem jeziku, ki na kratko opiše vsebino poglavja. Če je bil iz vsebine objavljen znanstveni prispevek, je to označeno z referenco objavljenega dela. Tri izmed petih študij so bile objavljene tudi kot izvorni znanstveni članki v revijah SSCI (4., 6. in 7. poglavje). Disertacijo sklenemo z zaključnim sklopom, ki zajema poglavje Sklep (8. poglavje), v katerem ovrednotimo temeljna znanstvena spoznanja na podlagi zastavljenega znanstvenega vprašanja, zastavljenih hipotez in drugih zastavljenih ciljev. Dodatno predstavimo omejitve pri delu pri disertaciji in odprte priložnosti raziskovanja v prihodnosti iz obravnavane tematike cirkadianega svetlobnega okolja.



Slika 1: Struktura disertacije.

Figure 1: Structure of the thesis.

»Ta stran je namenoma prazna«

2 TEORETIČNA IZHODIŠČA

Povzetek

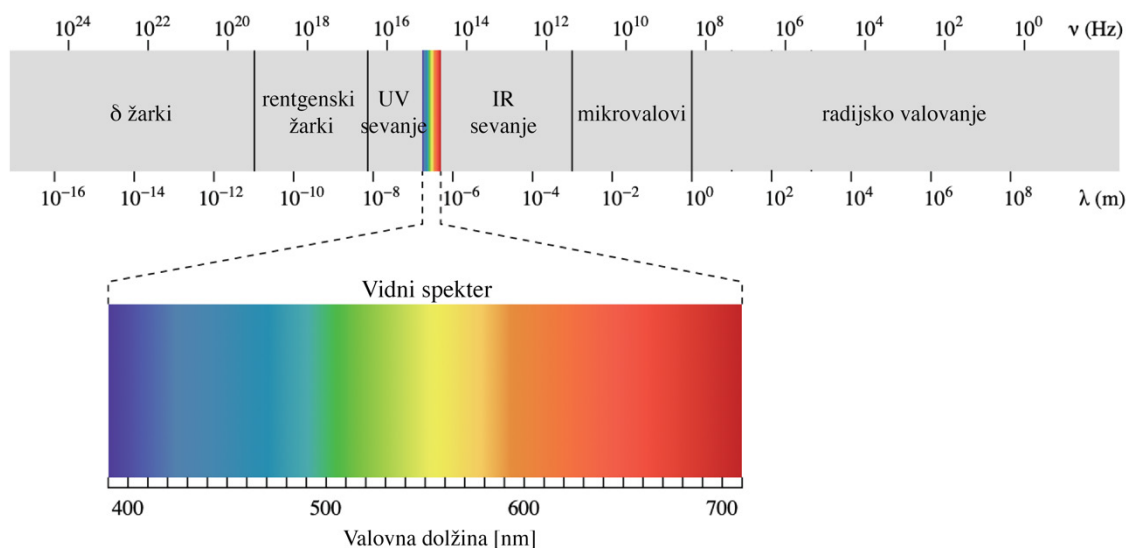
V tem poglavju bodo predstavljena teoretična izhodišča s področja interakcije ljudi in svetlobnega okolja, ki so nujna za razumevanje tematike doktorske disertacije. Sprva predstavimo osnovne fizikalne lastnosti svetlobe in kako jo merimo. Nadaljujemo tako, da predstavimo ustaljena znanja o vidni zaznavi svetlobe; pot svetlobe v očesu in potek fototransdukcije vse do možganov. Vendar kakor je bilo ugotovljeno, svetloba ne predstavlja le vidnega dražljaja, ampak pomembno vpliva na regulacijo spalno-budnega ritma. Svetloba tako vpliva na delovanje pomembnih cirkadianih procesov, ki uravnavajo telesno temperaturo, sintezo hormonov, lokomotorno aktivnost itd. Novoodkriti fotoreceptorji ipRGC s fotopigmentom melanopsinom so zaslužni za odziv na svetlobne dražljaje. Spektralna odzivnost melanopsina na svetlobo se razlikuje od odzivnosti fotoreceptorjev, ki sodelujejo pri vidni zaznavi svetlobe, zato pri vrednotenju vpliva svetlobe na cirkadiani sistem uporabljamo drugačne metrike. V tem poglavju so predstavljeni izsledki najnovejših raziskav s področja cirkadianega osvetljevanja in delovanja cirkadianega sistema. Predstavimo tudi najsodobnejša raziskovalna računalniška orodja, ki simulirajo spektralne svetlobne razmere v grajenem okolju ter tako omogočajo večkratno reprodukcijo cirkadianih in vidnih svetlobnih pogojev.

Abstract

This chapter will present the theoretical basis in the field of human interaction with the luminous environment, which are necessary for understanding of this doctoral dissertation. We first present the basic physical properties of light and how it is measured. We proceed with the presentation of the established knowledge about visual light perception; the light pathway through the eye and the principle of phototransduction all the way to the brain. However, as has been found, light not only represents a visual stimulus, but also has induces a significant effect on the regulation of sleep-wake rhythm. Light thus influences the functioning of important circadian processes that regulate body temperature, hormone synthesis, and so on. The newly discovered ipRGC photoreceptors, containing the photopigment melanopsin, are responsible for the response of the circadian system to the light stimuli. The spectral response of melanopsin to light differs from the response of photoreceptors involved in visual light perception, so different metrics are used to evaluate the effect of light on the circadian system. This chapter presents the results of the latest research in the field of circadian lighting and the operation of the circadian system. We also present state-of-the-art research computer tools that simulate spectral light conditions in a built environment and thus enable multiple reproduction of circadian and visible light conditions.

2.1 Svetloba in sevanje

S fizikalnega vidika je svetloba skoraj zanemarljiv del elektromagnetnega spektra, ki sega vse od gamažarkov z valovnimi dolžinami reda velikosti femtometrov do valovnih dolžin radijskih valov z valovnimi dolžinami reda velikosti kilometrov (slika 2). Vendar kar razlikuje svetlobo od preostalih vrst elektromagnetnega valovanja, je ravno odziv človekovega vidnega sistema, ki se odziva na elektromagnetno valovanje med 380 in 780 nm. Fotoreceptorji v človekovem očesu absorbirajo elektromagnetno valovanje teh valovnih dolžin in tako sprožijo proces vida. Tudi druga živa bitja so občutljiva za različne dele elektromagnetnega spektra, vendar je svetloba termin, ki opisuje elektromagnetno valovanje, za katero je občutljivo človeško oko.



Slika 2: Spekter elektromagnetnega sevanja. Povzeto po Livingston, 2014 [37].

Figure 2: Electromagnetic radiation spectrum. After Livingston, 2014 [37].

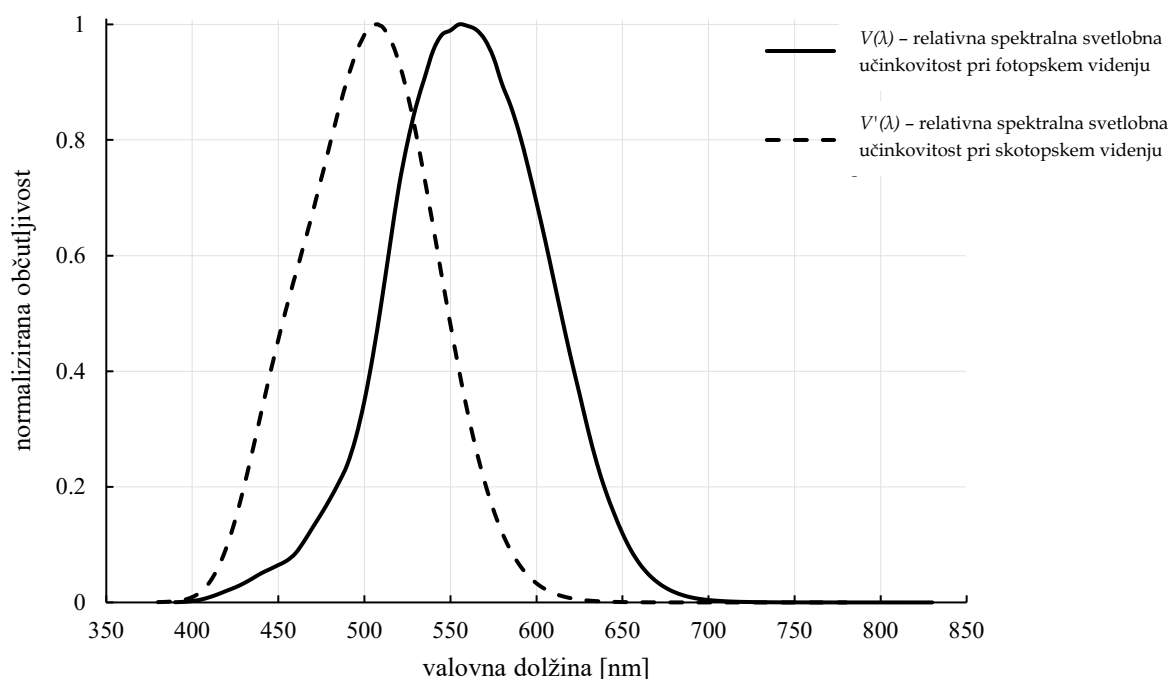
Svetlobo običajno merimo s pomočjo radiometričnih enot (W), vendar se človeško oko ne odziva enako na elektromagnetno valovanje vseh dolžin, zato je bilo treba uvesti posebne fotometrične enote, ki so utežene z relativno spektralno svetlobno učinkovitostjo pri dnevnem videnju ($V(\lambda)$), kar je razloženo v nadaljevanju.

2.1.1 Standardni opazovalci in fotometrične enote

Človeški vidni sistem se odziva le na informacije elektromagnetnega valovanja ozkega spektra 380–780 nm, v primerjavi s sončnim spektrom elektromagnetnega valovanja, ki obsega elektromagnetno valovanje valovnih dolžin vse od približno 10^{-14} do 10^4 m, kar je posledica sodelovanja različnih fotoreceptorjev pri odzivu vidnega sistema (glej poglavje 2.3.1). Odziv

na svetlobo znotraj vidnega razpona zato ni enak za vsako valovno dolžino. Tako za merjenje odziva vidnega sistema na svetlobo ne moremo uporabljati konvencionalnih radiometričnih enot, ampak jih moramo utežiti z ustrezno občutljivostno krivuljo načina delovanja vidnega sistema. Človeški vidni sistem je zmožen obdelave svetlobnih dražljajev ogromnega svetlostnega razpona (od 10^{-6} do 10^5 cd/m²). Prilagajanje na različne magnitude svetlosti omogočajo mehanizmi mehanske/optične adaptacije (prilagajanje velikosti zenice), nevrnalne adaptacije (prilagajanje odziva živčnega sistema) ali fotokemične adaptacije (prilagajanje fotoreceptorjev)[9]. V glavnem lahko vidni sistem razdelimo na tri poglavitne načine delovanja:

- Skotopski način delovanja (nočno videnje) – skotopski vid je aktiven pri zelo nizkih svetlostih pod pribl. 0,005 cd/m². Pri takšnem načinu fotorecepcije sodelujejo paličice, ki so kar 100-krat bolj občutljive za svetlobne dražljaje kakor čepki in posledično potrebujejo manjše število fotonov za aktivacijo. Takšen vid je najbolj občutljiv za svetlobo pri 507 nm [38, 39]. $V(\lambda)$ na sliki 3 prikazuje empirično določeno krivuljo CIE standardnega skotopskega opazovalca.
- Fotopski način delovanja (dnevno videnje) – pri višjih svetlostih, okoli 5 cd/m², se aktivira trikromatski fotopski vid, kjer pri fotorecepciji sodelujejo čepki, ki služijo pri zaznavi barve in večji ločljivosti slike. Občutljivost te vrste vida in pretvorbo iz radiometričnih enot opisuje CIE standardni fotometrični opazovalec $V(\lambda)$ z najvišjo občutljivostjo za svetlobo pri 555 nm (slika 3) [9].
- Mezopski način delovanja – v območju mejnih vrednosti med skotopskim in fotopskim vidom, torej med 0,5 cd/m² in 0,005 cd/m², poznamo še tretjo vrsto vida, pri katerem sodelujejo paličice in čepki – mezopski vid [9].



Slika 3: Normalizirana občutljivost standardnega fotopskega opazovalca in skotopskega opazovalca. Povzeto po Boyce, 2014 [9].

Figure 3: Normalized efficacy of standard photopic observer and scotopic observer. After Boyce, 2014 [9].

Za merjenje odziva človeškega vidnega sistema je tako uveden fotometrični sistem enot, ki temelji na radiometričnih enotah. Najosnovnejša količina elektromagnetnega sevanja, emitirana iz vira, je sevalni tok. Najosnovnejša količina pri merjenju svetlobe pa je svetlobni tok, ki je sevalni tok, pomnožen z relativno spektralno občutljivostjo človeškega vidnega sistema po celotnem vidnem spektru.

To opisuje enačba [40]:

$$\Phi = K_m \int \Phi_{c,\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (1),$$

pri čemer je:

Φ – svetlobni tok [lumini, lm],

$\Phi_{c,\lambda}$ – sevalni tok v majhnem intervalu valovne dolžine $\Delta\lambda$ [W/nm],

$V(\lambda)$ – relativna spektralna svetlobna učinkovitost,

$d\lambda$ – majhen interval valovne dolžine [nm],

K_m – konstanta relativne svetlobne učinkovitosti [lm/W].

V skladu z mednarodnim sistemom SI-enot je sevalni tok merjen v W – vatih, svetlobni tok pa v lm – luminih. Za konstanto K_m se uporabljata dve vrednosti, in sicer 683 lm/W za

standardnega fotopskega opazovalca in 1700 lm/W za standardnega skotopskega opazovalca. Konstanti služita normalizaciji, ki jo predlaga CIE, da 1 W sevalnega toka pri 555 nm predstavlja 683 lm pri fotopskih razmerah. Ker se odzivni krivulji omenjenih merjenih vidnih mehanizmov tako izrazito razlikujeta, je CIE predlagala, da kadar se pogovarjamo o konvencionalnih fotometričnih enotah (sevanje, uteženo z $V(\lambda)$), uporabljamo enote, zapisane v preglednici 1, če pa se uporablja $V'(\lambda)$ pred fotometrično enoto, uporabimo pridevnik skotopski, kot npr. skotopski lm ali skotopski lx. Uporabljane fotometrične enote in njihove pripadajoče radiometrične enote so prikazane v preglednici 1.

Preglednica 1: Radiometrične količine s pripadajočimi fotometričnimi količinami.

Table 1: Radiometric quantities with respective photometric quantities.

Radiometrično			Fotometrično		
Količina	Oznaka	Enota SI	Količina	Oznaka	Enota SI
Sevalni tok	Φ_e	W	svetlobni tok	Φ_v	lumen (lm)
Intenziteta sevanja	I_e	W/sr	svetilnost	I_v	cd
Sevanje	L_e	W/m ²	svetlost	L_v	cd/m ²
Gostota sevalnega toka	E_e	W/m ² -sr	osvetljenost	E_v	lx

2.1.2 Kolorimetrija

Fotometrične enote, ki smo jih opisali v predhodnem poglavju, ne upoštevajo razlikovanja različnih kombinacij valovnih dolžin, prejetih v oko, ki jih označujemo kot barve. Barva je percepcija, ki se je razvila v možganih iz naših predhodnih izkušenj in informacij, svetloba sama ni obarvana [40]. Znano je, da človeški vidni sistem zaznave barv deluje na principu primerjanja valovnih dolžin s pomočjo treh sistemov signalov *R* (rdeča), *G* (zeleni) in *B* (modra) iz čepkov, ki so obdelani v vidnem korteksu. Barvni signali so obdelani v dveh primerjalnih kanalih; rdeče-zelenem (*R-G*-kanal) in modro-rumenem ter akromatskem kanalu. Akromatski kanal prejema aditivne signale *M*- in *L*-čepkov, modro-rumeni kanal (*B-Y*-kanal) primerja vhodne signale *S*-čepkov s kombinacijo signalov čepkov *M* in *L*; rdeče-zeleni kanal (*R-G*-kanal) primerja vhodne signale *M*-čepkov s kombiniranimi signali *L*- in *S*-čepkov. Kombinacija teh kanalov je obdelana na kortikalni ravni (v vidnem korteksu), ki se odrazi v

barvnem vidu [9]. Trikromatska barvna zaznava pri ljudeh omogoča ločevanje približno 1.000.000 barv [41].

Glavni namen CIE barvne metrike je numerično vrednotenje barv. CIE je na podlagi obširnih raziskav vzpostavila tri funkcije spektralnih vrednosti oziroma krivulje barvnega ujemanja $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ [3]. Dejstvo, da število krivulj barvnega ujemanja sovpada z obstojem treh fotoreceptorjev, ki sodelujejo pri vidu, je lahko zavajajoče. Krivulje barvnega ujemanja CIE niso zasnovane na fiziologiji, vendar so matematični konstrukti, ki opisujejo potrebne relativne spektralne občutljivosti, tako da imajo spektralne distribucije, ki jih vidimo kakor enake barve, enako pozicijo v CIE barvno-metričnem sistemu in barve, ki jih zaznamo različno, zasedejo različno mesto.

CIE predpisuje dva standardna kolorimetrična opazovalca, na podlagi katerih lahko matematično izračunamo barvo, tako da pomnožimo spektralno distribucijo meritve po valovni dolžini z vsako izmed barvnih krivulj (slika 4), kar se izrazi v treh primarnih navideznih barvah X , Y , Z , ki so potrebne za matematično določitev barve [40]:

$$X = k \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \Phi_{\lambda}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda, \quad Y = k \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \Phi_{\lambda}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, \quad Z = k \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \Phi_{\lambda}(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (2),$$

pri čemer je:

X, Y, Z – primarne navidezne barve,

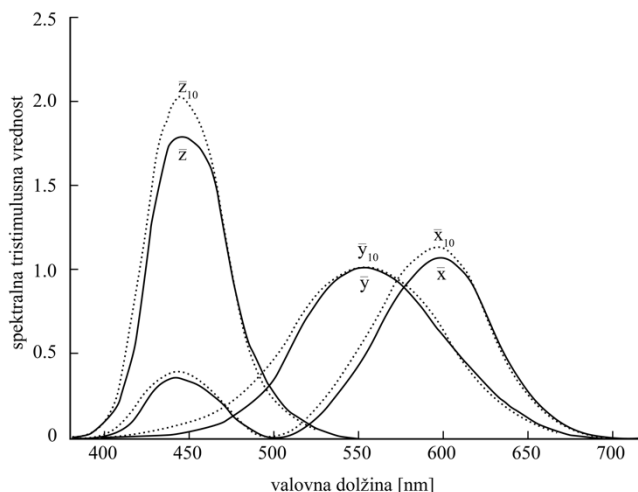
Φ_{λ} – funkcija barvnega dražljaja [W/nm],

$\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ – spektralne tristimulusne vrednosti krivulj barvnega ujemanja,

$d\lambda$ – majhen interval valovne dolžine [nm],

k – konstanta.

Primarne barve X , Y , Z lahko opišemo na dva načina, in sicer na osnovi standardnega kolorimetričnega opazovalca CIE 1931 pri vidnem kotu opazovanja 2° in CIE 1964 dodatnega standardnega kolorimetričnega opazovalca pri vidnem polju 10° [40], kakor je prikazano na sliki 4.



Slika 4: CIE krivulje barvnega ujemanja $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ za 2° CIE 1931 kolorimetričnega opazovalca in za $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, in $\bar{z}_{10}(\lambda)$ za 10° CIE 1964 standardnega opazovalca. Povzeto po Schanda, 2007 [40].

Figure 4. CIE $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ colour matching functions for 2° CIE 1931 standard colorimetric observer and $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, and $\bar{z}_{10}(\lambda)$ of the 10° CIE 1964 supplementary standard observer. After Schanda, 2007 [40].

Kromatične koordinate definiramo s pomočjo naslednjih enačb:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}, \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z}, \quad z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (3),$$

$$x + y + z = 1 \quad (4),$$

pri čemer so:

X , Y , Z – primarne navidezne barve,

x , y , z – barvne koordinate.

Vrednosti x , y in z so poznane kot CIE barvnostne koordinate. Ker je seštevek vseh treh koordinat enak 1 (enačba 4), se, kot je bilo dogovorjeno, uporabljata samo koordinati x in y , iz tega lahko barve upodobimo na 2 dimenzionalnih površinah. Slika 5 prikazuje CIE 1931 barvnostni diagram. Iz barvnostnega diagrama na t. i. Planckovem loku pa lahko razberemo tudi kromatičnost sevanja črnega telesa, ki je določena s Planckovim zakonom [40]:

$$S_{e,h}(\lambda, T) = \frac{2\pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot \left[e^{\left(\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot T \cdot k_B}\right)} - 1 \right]} \quad (5),$$

pri čemer je:

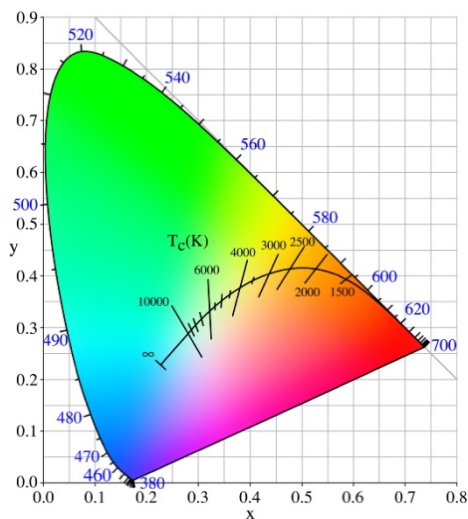
$S(\lambda, T)$ – spekter sevanja črnega telesa,

c – svetlobna hitrost [299792458 m/s],

kB – Stefan-Bolztmannova konstanta [$1,3807 \times 10^{-23}$ J/K],

λ – valovna dolžina [nm],

T – temperatura sevalnega telesa (K).

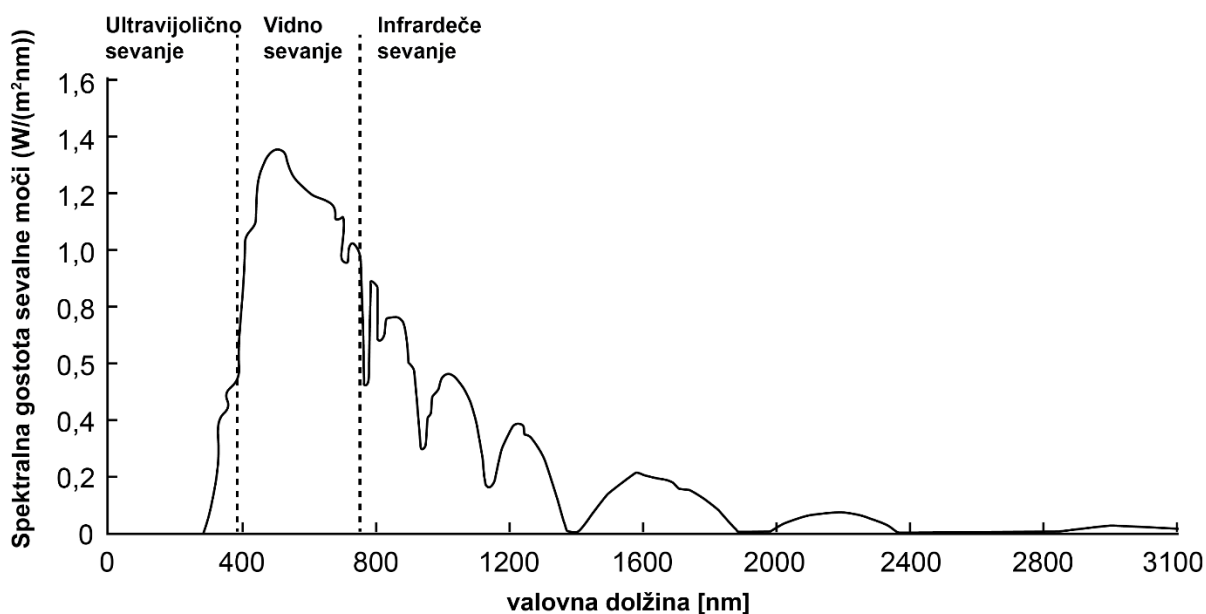


Slika 5: CIE 1931 xy kromatični barvnostni diagram z označenim Planckovim lokom. Povzeto po [42].
Figure 5: CIE 1931 xy chromaticity diagram with marked Planckian locus. After [42].

2.2 Dnevna svetloba – naravni vir svetlobe

Človek je z dnevno svetlobo tesno povezan, človeški cirkadiani sistem je naravnano na naravni časovni ponavljajoči se cikel ter na njegovo spektralno sestavo, ki je bogata v modrem delu spektra. Sonce, ki je vir dnevne svetlobe na Zemlji, večinoma proizvaja elektromagnetno valovanje v spektru od ultravijoličnega sevanja vse do dolgovalovnega infrardečega sevanja (slika 6), od tega le 40 % količine prejetega sevanja zaznamo kot vidno dnevno svetlobo [43]. Primarna karakteristika dnevne svetlobe je njena spremenljivost. Dnevna svetloba se spreminja v svoji magnitudi, spektralni sestavi in distribuciji v odvisnosti od meteoroloških danosti ob različnih časovnih obdobjih (letni čas, ura v dnevu) in različnih geografskih širinah. Na splošno lahko dnevno svetlobo razdelimo na dve komponenti: na direktno komponento – sončno svetlobo, to je sevanje neposrednih Sončevih žarkov na Zemljo, ter na indirektno oz. difuzno komponento – nebesno svetlobo, ki je posledica sipanja Sončeve svetlobe v atmosferi. Direktna komponenta proizvaja ostre in jasne sence, nebesna svetloba pa šibke difuzne sence. Razmerje med Sončevo in nebesno svetlobo pa je odvisno od stanja atmosfere, večja ko je koncentracija vodne pare in aerosolov v atmosferi, večji je delež nebesne – difuzne svetlobe in obratno. Razpon osvetljenosti lahko tako na zemeljskem površju sega od 1000 lx na zimski oblačen dan pa vse do 120.000 lx na jasen poletni dan. Prav tako lahko CCT (najpodobnejša

barvna temperatura) dnevne svetlobe močno variira, od 4000 K na oblačen dan do 25.000 K popolnoma jasnega severnega neba [44].



Slika 6: Spektralna gostota sevalne moči dnevne svetlobe na Zemljini površini. Povzeto po The IESNA Lighting Handbook, 2000 [43].

Figure 6: The spectral power distribution of daylight at Earth's surface. After The IESNA Lighting Handbook, 2000 [43].

2.2.1 Spektralna gostota sevalne moči dnevne svetlobe

Spektralna sestava dnevne svetlobe, ki jo prejmemo na zemeljsko površje, je zvezna in nenehno spreminjajoča se. Lahko jo izmerimo s pomočjo spektrometra ali pa jo izračunamo. Izračun spektralne razporeditve dnevne svetlobe je mogoč z metodo svetlobnega vira dnevne svetlobe. Relativna spektralna gostota sevalne moči (*RSPD*) $S_D(\lambda)$ svetlobnega vira D-serij (dnevne svetlobe) se izračuna na podlagi kromatičnih koordinat in CIE 1931 barvnega prostora (x_D, y_D) po naslednji metodi [40]:

$$x_D = \begin{cases} 0,2444063 + 0,09911 \frac{10^3}{T} + 2,9678 \frac{10^6}{T^2} - 4,6070 \frac{10^9}{T^3} & ; 4000 \text{ K} \leq T \leq 7000 \text{ K} \\ 0,237040 + 0,24748 \frac{10^3}{T} + 1,9018 \frac{10^6}{T^2} - 2,0064 \frac{10^9}{T^3} & ; 7000 \text{ K} \leq T \leq 25000 \text{ K} \end{cases} \quad (6),$$

$$y_D = -3,000x_D^2 + 2,870x_D - 0,275, \quad (7),$$

pri čemer je T osvetljevalčeva podobna barvna temperatura (*CCT*). Kromatične koordinate svetlobnih virov D formirajo tako imenovan lok dnevne svetlobe. *RSPD* po valovni dolžini je tako izračunan s pomočjo koeficientov $M1$ in $M2$ ter karakterističnih vektorjev $S_0(\lambda)$, $S_1(\lambda)$ in $S_2(\lambda)$ [40]:

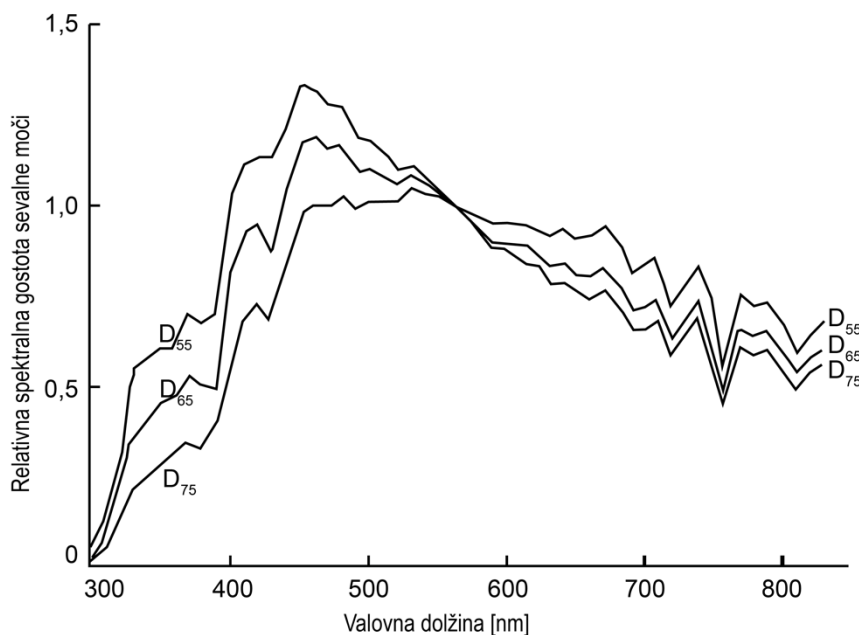
$$M = 0,0241 + 0,2562x_D - 0,7341y_D \quad (8),$$

$$M_1 = \frac{-1,3515 - 1,7703x_D + 5,9114y_D}{M} \quad (9),$$

$$M_2 = \frac{0,03000 - 31,4424x_D + 30,0717y_D}{M} \quad (10),$$

$$S_D(l) = S_0(l) + M_1S_1(l) + M_2S_2(l) \quad (11).$$

CIE je določila D_{65} kot reprezentativni spekter povprečne dnevne svetlobe [3], pri CCT približno 6500 K. Po priporočilih CIE je D_{65} uporabljen v vseh kolorimetričnih izračunih, ki potrebujejo karakteristično dnevno svetlobo, razen takrat, ko je zahtevano drugače. CIE priporoča, da če se pojavi potreba po drugih fazah dnevne svetlobe, uporabimo še D_{55} (CCT \approx 5500 K) in D_{75} (CCT \approx 7500 K), ki sta skupaj z D_{65} prikazani na sliki 7. D_{55} predstavlja srednje jutranjo ali srednje popoldansko sestavo svetlobe, D_{75} pa sestavo svetlobe severnega dela jasnega neba [40].



Slika 7: SPD CIE standardnih svetlobnih virov dnevne svetlobe D_{55} (5500 K), D_{65} (6500 K) in D_{75} (7500 K), ki so normalizirani pri 560 nm. Povzeto po Schanda, 2007 [40].

Figure 7: SPD for CIE standard illuminants for daylight D_{55} (5500 K), D_{65} (6500 K), and D_{75} (7500 K), each normalized at 560 nm. After Schanda, 2007 [40].

2.2.2 Statično modeliranje svetlostne distribucije neba

Kot že omenjeno, je dnevna svetloba pogojena z meteorološkimi razmerami, tako je tudi distribucija svetlosti neba definirana s stanjem atmosfere. Svetlostno distribucijo neba lahko merimo s kalibriranimi digitalnimi kamerami [45] ali mehničnimi skenerji svetlosti neba. Večinoma pa jo računamo s pomočjo matematičnih modelov neba. Za računanje z dnevno svetlobo je bilo treba uvesti matematične modele, ki bodo opisovali stanje svetlosti neba v

odvisnosti od meteoroloških razmer [46]. Najenostavnejši statični model svetlosti neba je nebo z enovito svetlostjo, ki predstavlja nebo s konstantno svetlostjo. Namenjen je reprezentaciji močno oblačnega neba in izvira že iz leta 1901. Ker je gradacija svetlosti takega neba enovita, je slaba reprezentacija katerega koli meteorološkega stanja neba. CIE standardno oblačno nebo je CIE privzela kot tako leta 1955 in je najpogosteje uporabljen tip neba pri modeliranju z dnevno svetlobo. Skupaj z drugim najpogosteje uporabljanim tipom neba – standardnim jasnim nebom sta bila predhodno definirana s standardom CIE EN S003:1996 [47], ki ga nadomesti standard ISO EN 15469:2004 [48]. Ta natančno opisuje model standardne prostorske distribucije svetlosti neba. Distribucija svetlosti CIE standardnega splošnega neba je izražena kot razmerje svetlosti opazovanega dela neba z zenitno svetlostjo [48]:

$$\frac{L_a}{L_z} = \frac{f(\chi) \cdot \varphi(Z)}{f(\chi) \cdot \varphi(0)} \quad (12).$$

Funkcija gradienta svetlosti je $\varphi(Z)$ in izražena tako:

$$\varphi(Z) = 1 + a \cdot e\left(\frac{b}{\cos Z}\right), \quad \text{ko je } 0 \leq Z \leq \frac{\pi}{2} \quad (13),$$

$$\varphi\left(\frac{\pi}{2}\right) = 1, \quad \text{na horizontu} \quad (14).$$

Model omogoča opis 15 tipov neba (tabela 2), ki določajo parametre a , b , c in d , vrednosti a in b parametra gradacije svetlosti in svetlosti v zenitu $\varphi(0)$:

$$\varphi(0) = 1 \div a \cdot eb \quad (15),$$

parametra c in d v funkciji f definirata sipanje svetlobe v odvisnosti od relativne svetlosti izbranega elementa neba in njegovo oddaljenost od Sonca:

$$f(\chi) = 1 + c \cdot \left[e(d\chi) - e\left(d\frac{\pi}{2}\right) \right] + e \cdot \cos^2 \chi \quad (16),$$

vrednost v zenitu $f(Z_s)$ tako znaša:

$$f(Z_s) = 1 + c \cdot \left[e(dZ_s) - e\left(d\frac{\pi}{2}\right) \right] + e \cdot \cos^2 Z_s \quad (17),$$

pri čemer so:

a, b – parametra gradacije svetlosti,

c, d, e – parametri sipanja dnevne svetlobe,

L_a – svetlost izbranega elementa neba [cd/m^2],

L_z – svetlost v zenitu [cd/m^2],

$f(\chi)$ – funkcija sipanja,

$\varphi(Z)$ – funkcija gradacije svetlosti,

Z – kotna razdalja med izbranim elementom neba in zenitom [rad],

Z_s – kotna razdalja med Soncem in zenitom [rad].

CIE oblačno in jasno nebo sta ekstremni reprezentaciji distribucije svetlosti neba, torej gosta oblačnost in popolnoma jasno nebo. Delno oblačno nebo s tankim slojem oblačnosti ali megleno jasno nebo z višjo motnostjo je v realnosti pogostejše [49].

Preglednica 2: Tipi distribucij svetlosti neba, ki hkrati določajo parametre a , b , c in d [46, 48].

Table 2: Types of luminous sky distributions, which define the parameters a , b , c and d [46,48].

TIP	OPIS DISTRIBUCIJE SVETLOSTI NEBA
1	CIE standardno oblačno nebo, strma gradacija svetlosti proti zenitu, azimutalna enovitost.
2	Oblačno nebo s strmo gradacijo svetlosti z naraščanjem svetlosti proti Soncu.
3	Oblačno nebo s srednjo gradacijo in azimutalno enovitostjo.
4	Oblačno nebo s srednjo gradacijo z naraščanjem svetlosti proti Soncu.
5	Nebo z enovito svetlostjo.
6	Delno oblačno nebo brez gradacije proti zenitu, naraščanje svetlosti proti Soncu.
7	Delno oblačno nebo brez gradacije proti zenitu, svetlo območje okoli Sonca.
8	Delno oblačno nebo brez gradacije proti zenitu, svetlo območje okoli Sonca.
9	Delno oblačno nebo z zakritim Soncem.
10	Delno oblačno nebo s svetlim območjem okoli Sonca.
11	Belo-modro nebo z jasno sončno korono.
12	CIE standardno jasno nebo, nizka motnost ozračja.
13	Brezoblačno motno nebo s široko sončno korono.
14	Brezoblačno motno nebo s široko sončno korono.
15	Belo-modro motno nebo s široko sončno korono.

2.2.3 Klimatsko pogojeno – dinamično modeliranje svetlostne distribucije neba

Zaradi naglega razvoja znanosti o modeliranju in računanju dnevne svetlobe je John Mardaljevic leta 2006 [50] na konferenci CIBSE predstavil revolucionarno metodo računanja dnevne svetlobe s pomočjo historičnih reprezentativnih klimatskih podatkov tipičnega meteorološkega leta (TMY3) [51] za vsako uro v letu. Metodo je poimenoval angl. *Climate-based Daylight Modelling* (CBDM), kar v slovenščini pomeni podnebno pogojeno modeliranje dnevne svetlobe (PPMDS). V svoji metodi je uporabil empirični vsevremenski model neba (*ang. all-weather sky model*) – t. i. Perezov tip neba, ki je utemeljen na 16.000 popolnih posnetkih hemisfere neba v različnih vremenskih razmerah, vse od popolnoma jasnega do popolno

oblačnega neba v Berkeleyju v Kaliforniji. Perezov tip neba iz vremenske datoteke tipičnega meteorološkega leta uporablja štiri poglavitne podatke izmed 68 v vremenski datoteki: direktno normalno sevanje (količina sončnega sevanja, prejeta na površino, ki je s svojo normalo orientirana v Sonce v 60-minutni periodi – W/m^2) in difuzno horizontalno sončno sevanje (količina sončnega sevanja, prejetega na horizontalno površino v 60-minutni periodi – W/m^2), ki določata svetlost neba. Delež pokritosti neba (0 – popolnoma jasno nebo, 10 – popolnoma oblačno nebo) določa vremenske razmere (jasno, delno oblačno, oblačno itd.) in temperaturo rosišča, ki vpliva na sipanje svetlobe.

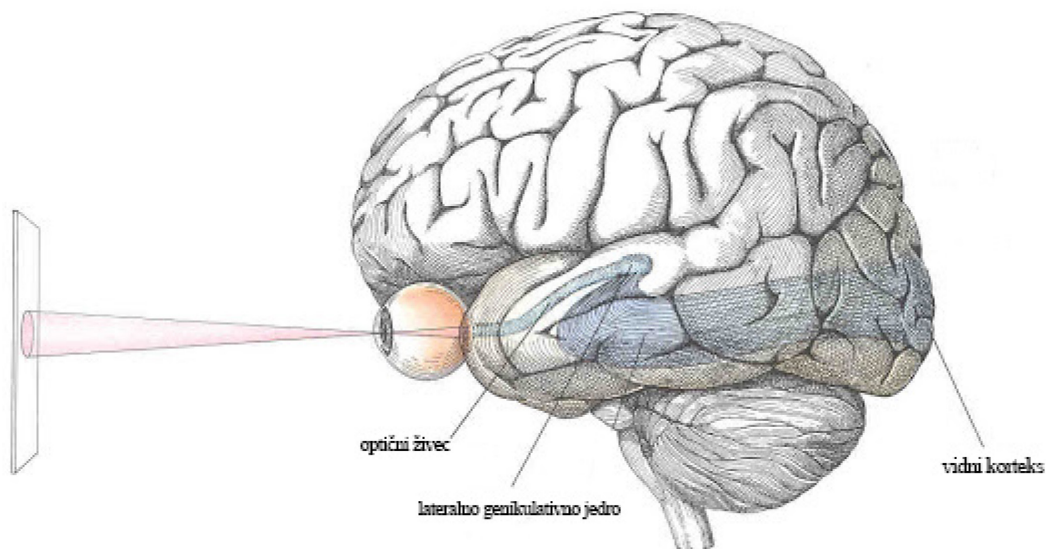
2.3 Človeška zaznava svetlobe

Ljudje smo s svetlobo tesno povezani. Z njeno pomočjo ne le vidimo, ampak tudi vzdržujemo povezanost z zemeljskim svetlo-temnim ciklom (t. i. astronomsko uro), kar potrjujejo raziskave na področju človeške fotobiologije zadnjih tridesetih let. V naslednjih podpoglavjih bodo tako predstavljeni sodobni izsledki raziskav na področju lastnosti in delovanja človeškega sistema dnevnega videnja (vidnega, vizualnega) in nevidnega (nevizualnega) sistema s poudarkom na cirkadianem aspektu nevizualnega sistema.

2.3.1 Struktura in delovanje vizualnega sistema

Vizualna pot poteka skozi tri glavne sestavne dele vizualnega sistema. Prvi del predstavlja dvojje frontalno nameščenih oči – klasična pozicija oči plenilcev, ki potrebujejo dobro globinsko zaznavo. Iz oči vidni signali potujejo po optičnem živcu do lateralnega genikulatnega jedra oz. LGN (angl. *Lateral Geniculate Nucleus*, lat. *Corpus geniculatum laterale*), ki deluje kot krmilnik

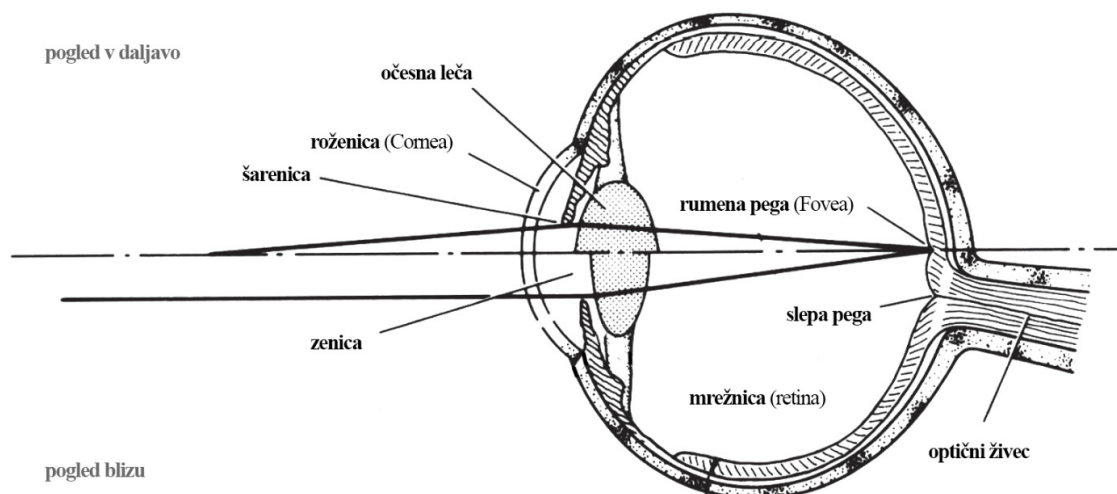
elektromagnetnih signalov iz vidnega živca do tretjega glavnega sestavnega dela – vidnega korteksa v zadnjem temenskem delu možganov [52] (slika 8).



Slika 8: Vizualna pot človeškega vida. Povzeto po Sarrabzoles in sod., 2017 [53].

Figure 8: The visual pathway of the human vision. After Sarrabzoles et al., 2017 [53].

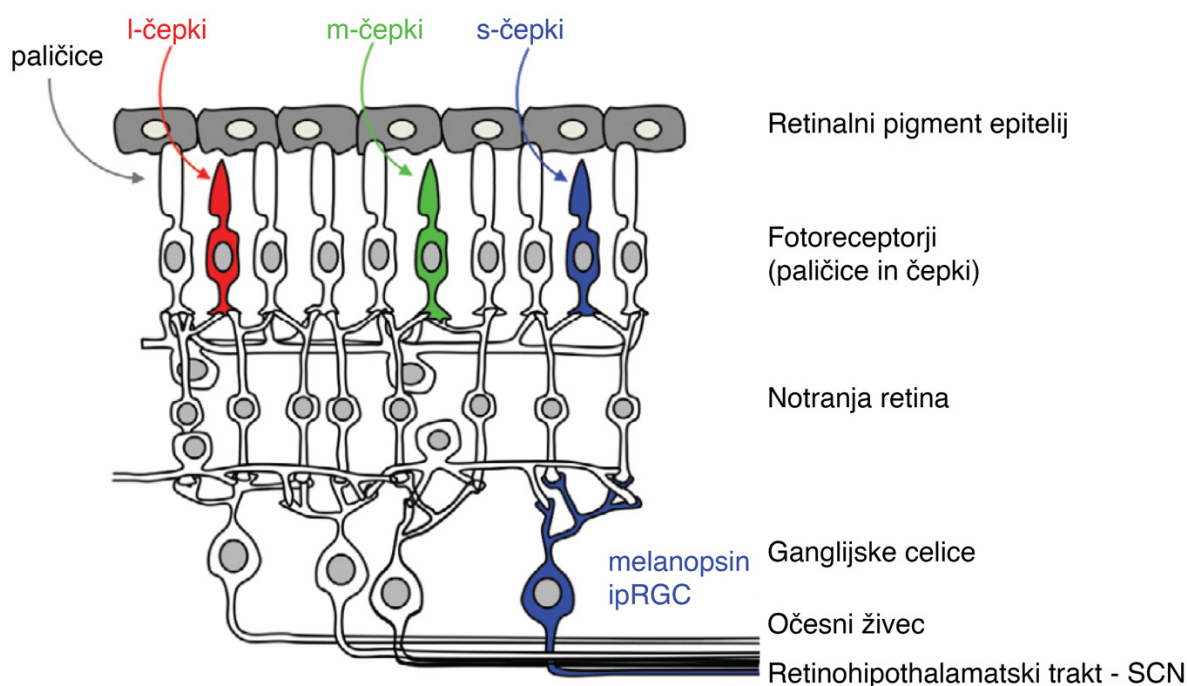
Kakor je prikazano na sliki 9, se prepuščena svetloba nato lomi skozi očesno lečo. Zenica in leča sta dinamični in lahko uravnavata svojo velikost in obliko. Velikost zenice se lahko giblje med 2 in 8 mm in nadzoruje količino dovedene svetlobe v oko, oblika leče pa uravnava goriščno razdaljo očesa – omogoča bližinski in daljinski vid. Svetloba nato iz leče skozi očesno tekočino potuje na mrežnico [9].



Slika 9: Prerez očesa, ki gleda v daljavo (zgornja simetrala) in v bližino (spodnja simetrala). Povzeto po Boyce, 2014 [9].

Figure 9: A section through the eye looking in the distance (above the symmetral) and up close (bottom symmetral). After Boyce, 2014 [9].

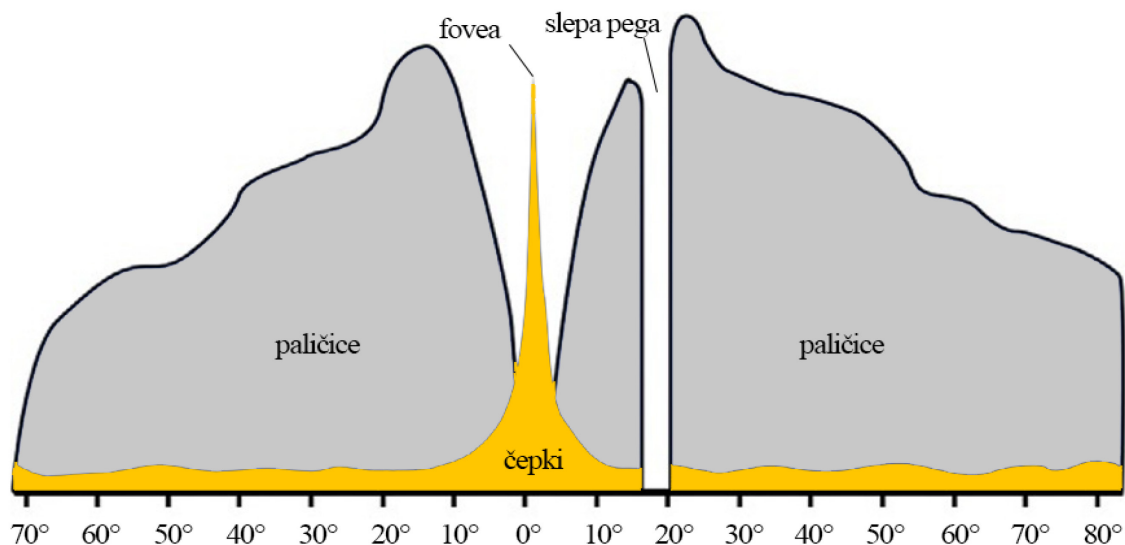
Mrežnica oz. retina je skrajna notranja plast v strukturi očesa in je odgovorna za pretvorbo prejetih elektromagnetnih signalov svetlobe v živčne dražljaje, ki so poslani naprej v lateralno genikulatno jedro in vidni korteks. Svetlobo na mrežnici ujame na milijone fotoreceptorjev (paličice in čepki), ki ustvarjajo električno modulirane signale, katerih informacija potuje skozi kompleksno slojevitost bipolarnih, ganglijskih horizontalnih in amakrinih celic (slika 10). Ti sloji obdelajo in pošljejo signale naprej po vidnem živcu v vidni korteks, kjer možgani interpretirajo končno sliko [52].



Slika 10: Struktura glavnih plasti retine. Povzeto po Münch in sod. [54].

Figure 10: Main retinal structure. After Münch et al. [54].

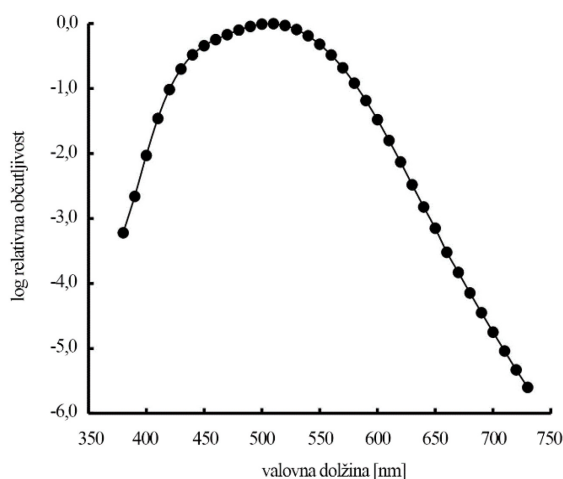
V človeškem očesu so na mrežnici štiri vrste fotoreceptorjev, ki jih v grobem razdelimo na paličice in čepke. Paličice zaznavajo kontrast, svetlost in gibanje, čepki pa pripomorejo k boljši resoluciji slike, globinski zaznavi prostora in zaznavajo barve [55]. Na človeški mrežnici je približno 115 milijonov paličic in 6,5 milijona čepkov, njihova gostota pa se po mrežnici spreminja [55], kot je prikazano na sliki 11. Obrobja mrežnice so močnejše nasičena s paličicami in manj s čepki. Število čepkov narašča koncentrično vse do rumene pege, kjer je njihova koncentracija največja, nasprotno s koncentracijo paličic, ki v smeri proti rumeni pegi upada. Na območju, kjer se mrežnica poveže z vidnim živcem (slepa pega), fotoreceptorjev ni.



Slika 11: Distribucija čepkov in paličic na mrežnici. Povzeto po Abel in sod., 2017 [52].

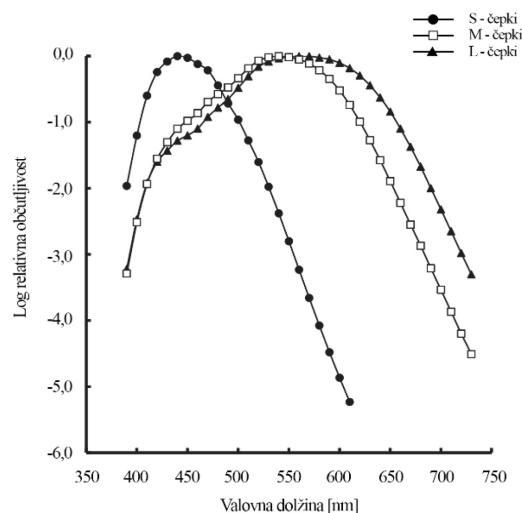
Figure 11: Cone and rods distribution in the retina, adapted after Abel et al., 2017 [52].

Vse paličice so si podobne in so sestavljene iz enakega fotopigmenta, rodopsina in so zato najbolj občutljive za svetlobo pri 507 nm [3], kakor je prikazano na sliki 12. V nasprotju s paličicami čepke ločujemo na tri podskupine, ki so odgovorne za človeško trikromatsko zaznavo barv. Poznamo čepke, odgovorne za kratkovalovno (S-čepki), srednjevalovno (M-čepki) in dolgovalovno (L-čepki) vidno sevanje oz. modri, zeleni in rdeči del spektra. Kakor je lahko razvidno iz slike 13, S-čepki tako vsebujejo fotopsin cianolab z najvišjo občutljivostjo pri 450 nm, M-čepki klorolab z najvišjo občutljivostjo pri 525 nm in L-čepki eritrolab, fotopsin z najvišjo občutljivostjo pri 575 nm [9].



Slika 12: Relativna občutljivost paličic – skotopski vid. Povzeto po Boyce, 2014 [9].

Figure 12: Relative sensitivity of rods – scotopic vision. After Boyce, 2014 [9].



Slika 13: Relativna občutljivost čepkov. Povzeto po Boyce, 2014 [9].

Figure 13: Relative sensitivity of cones. After Boyce, 2014 [9].

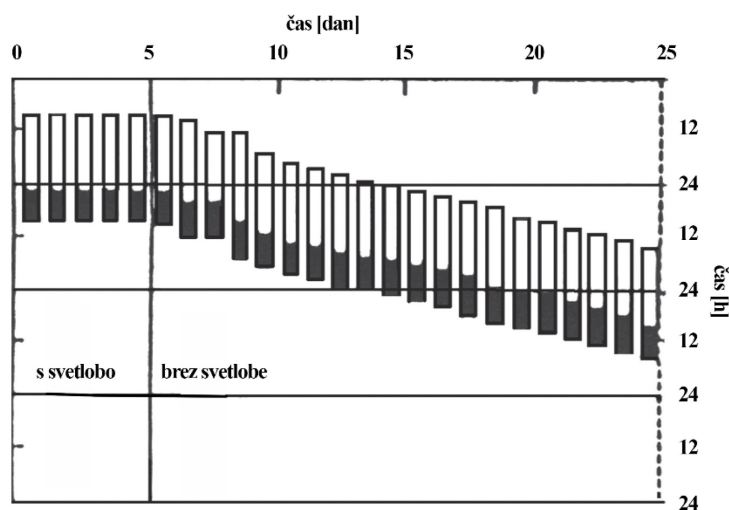
2.3.2 Sistem nevizualne zaznave svetlobe

Že kar nekaj časa je znano, da svetloba vpliva tudi na človekov cirkadiani ritem, fiziologijo in počutje. Vendar je bil odgovor na vprašanje, kako se ti učinki odvijajo, neznan vse do leta 2002, ko je Bersonu in sod. [5] uspelo prepoznati novo vrsto fotoreceptorja v človeški retini, ki sodeluje pri sinhronizaciji človekovih cirkadianih ritmov s solarnim dnevom. Novoodkriti fotoreceptorji se znatno razlikujejo od znanih vidnih fotoreceptorjev paličic in čepkov, saj so vrsta retinalnih ganglijskih celic (RGC), ki je v najbolj notranjem sloju očesa (slika 10). Torej so sposobni komunicirati neposredno z možgani, so manj občutljivi in počasneje odzivni na svetlobo. Poimenovali so jih intrinzično fotosenzitivne retinalne ganglijske celice (ipRGC) [56]. Od odkritja do danes so znanstveniki odkrili, da ipRGC niso samo ena vrsta fotoreceptorja, ampak poznamo kar pet podvrst ipRGC [57]. Vse ipRGC vsebujejo fotopigment, imenovan melanopsin, ki ima in vitro najvišjo absorpcijo v modrem spektru svetlobe pribl. med 460 in 480 nm [5,58–61] in vpliva na uravnavanje količine spalnega hormona melatonina. In vitro občutljivost melanopsina je prikazana na sliki 19, koncentracija melatonina v krvi pa določa potek notranje biološke ure človeka. Med drugim ipRGC sodelujejo tudi pri zeničnem refleksu in posredno tudi pri vidu [57]. V naslednjih podpoglavjih bomo natančneje opisali, kako delujejo mehanizmi regulacije notranje biološke ure in kako so odvisni od lastnosti svetlobe pri človeku, kajti svetloba velja za najvplivnejši cirkadiani sinhronizator pri ljudeh, čeprav

obroki, telesna aktivnost in socialna vključenost prav tako sodelujejo pri sinhronizaciji cirkadianih sistemov [62].

2.3.2.1 Cirkadiane ure

Sistemi cirkadianega časovnega opredeljevanja (angl. *circadian timing*) učinkovito koordinirajo fiziologijo vseh živih organizmov, tudi človeškega, tako da se ujema z zemeljskim astronomskim ciklom 24 ur. Cirkadiani sistemi so endogeni časovno-sledilni (kar pomeni, da lahko potekajo tudi ob odsotnosti zunanjih spodbujevalcev časa), ki omogočajo prilagoditev in predvidevanje dnevnih časovnih sprememb s pomočjo cirkadianih spodbujevalnikov, kot so svetloba, temperatura in socialne interakcije [63]. Torej cirkadiane ure s pomočjo teh krmilijo številne molekularne, biokemične, fiziološke in vedenjske procese. Mnogi izmed teh so nadzorovani s pomočjo cirkadiane ure v suprakiazmatskem jedru oz. SCN (angl. *Suprachiasmatic Nucleus*, lat. *Nucleus suprachiasmaticus*), npr. cikel budnosti-spanja, telesna temperatura, metabolizem, sekrecija hormonov itd. [64, 65]. Ker je povprečen človekov dnevni cikel nekoliko daljši od astronomskega in znaša 24,2 h [62, 66], potrebuje nenehno vzdrževanje ritma s pomočjo svetlobe, ki je po pričevanju številnih študij najboljši usklajevalec cirkadianih ritmov skoraj vseh organizmov na Zemlji [57, 67]. Ob njeni odsotnosti pa lahko pride do zamikanja osebnega cikla z zemeljskim dnevnim, kakor je to prikazal Boyce [9] v poskusu, v katerem je bil zdrav posameznik najprej pet dni normalno izpostavljen zunanjim svetlobnim časovnim kazalnikom, ki pa so jih avtorji po petem dnevu odstranili, tako da so zatemnili prostor in uporabljali samo umetno razsvetljavo. Raziskava pokaže, da se posameznikova biološka ura začne samodejno zamikati že drugi dan po tem, ko je bil prostor zatemnjen in je bil odvzet zunanji svetlobni spodbujevalec dnevnega cikla (slika 14).

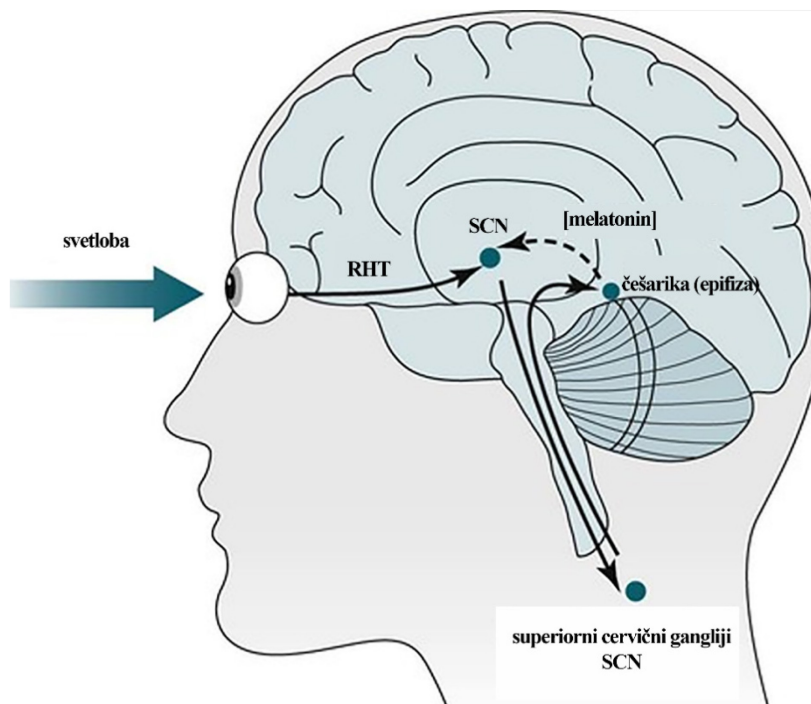


Slika 14: Spalno-budni cikel posameznika v periodi 25 dni. Povzeto po Boyce, 2014 [9].

Figure 14: Sleep-wake cycle of a individual over a period of 25 days. After Boyce, 2014 [9].

2.3.2.2 Potek nevizualne zaznave svetlobe

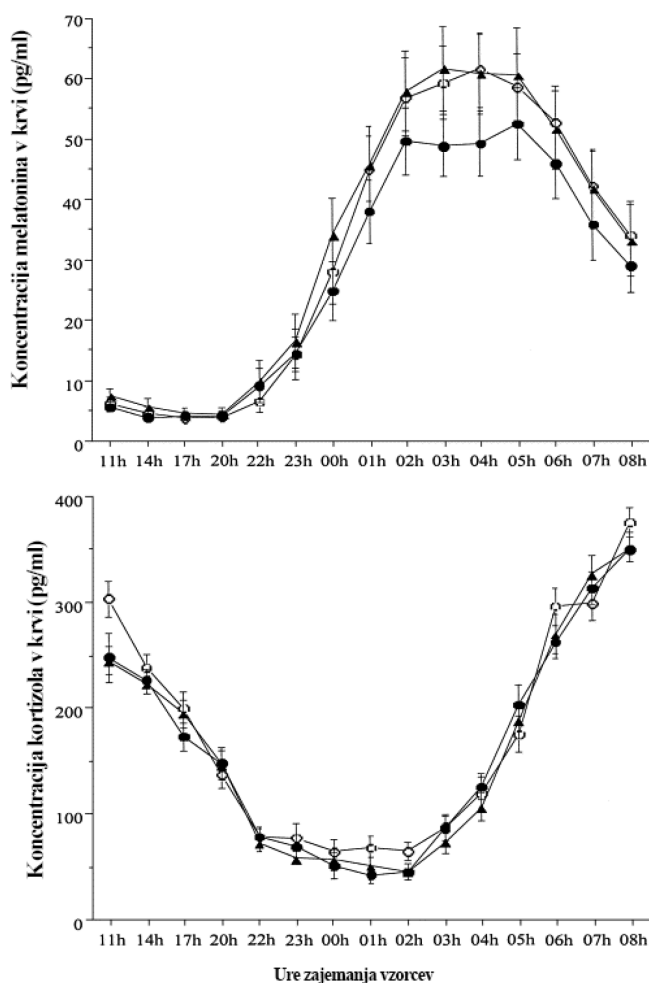
Kakor pri vizualnem sistemu se tudi pri nevizualnem zaznava svetlobnih dražljajev začne v očesu, od koder pa informacije z notranjega dela mrežnice, kjer so ipRGC (slika 10), namesto v vidni korteks prek retinohipotalamičnega trakta oz. RHT (angl. *Retinohypothalamic Tract*, lat. *Tractus retinohypothalamicus*) potujejo do suprakiazmatskega jedra oz. SCN v hipotalamusu navzdol proti hrbtenjači naprej do zgornjega cervikalnega ganglija oz. SCG (angl. *Superior Cervical Ganglion*, lat. *Ganglion cervicale superius*) in na koncu do češerike ali epifize (angl. *pineal gland*, lat. *Epiphysis cerebri*), kjer poteka sekrecija melatonina v temni fazi 24-urnega svetlo-temnega cikla, ne glede na to, ali je bitje aktivno podnevi ali ponoči. Melatonin se prenaša s krvjo po celotnem telesu, njegovi receptorji so namreč v več delih telesa. Informacija o »temi«, ki jo prenaša melatonin, se obdela v suprakiazmatskem jedru, ki služi kot glavna biološka ura. Potovanje nevizualnega signala je prikazano na sliki 15.



Slika 15: Potek nevizualne poti svetlobe sekrecije melatonina in regulacije cirkadiane ure. Povzeto po Circadian Rhythm sleep disorders, 2016 [68].

Figure 15: Non-visual light system pathway of melatonin secretion and regulation of circadian clock After Circadian Rhythm Sleep Disorders, 2016 [68].

Glavna funkcija SCN je, da pravočasno v 24-urnem ciklu sinhronizira aktivacijo številnih najpomembnejših fizioloških funkcij v telesu. V normalnem ritmu nihanja melatonina se največ izloča ponoči med pribl. drugo in peto uro zjutraj, najmanj pa podnevi. Nasprotno velja za hormon kortizol, katerega koncentracija v krvi se izmenjuje s koncentracijo melatonina. Ko koncentracije melatonina dosežejo maksimalne vrednosti med drugo in peto uro zjutraj [69, 70], je koncentracija kortizola v krvi na najnižjih ravneh; obratno je čez dan, ko sta potrebni budnost in osredotočenost. Naravni ritem melatonina in kortizola, merjen na vzorcu 31 zdravih moških študije Selmaoui in Touitou [69], je prikazan na sliki 16.

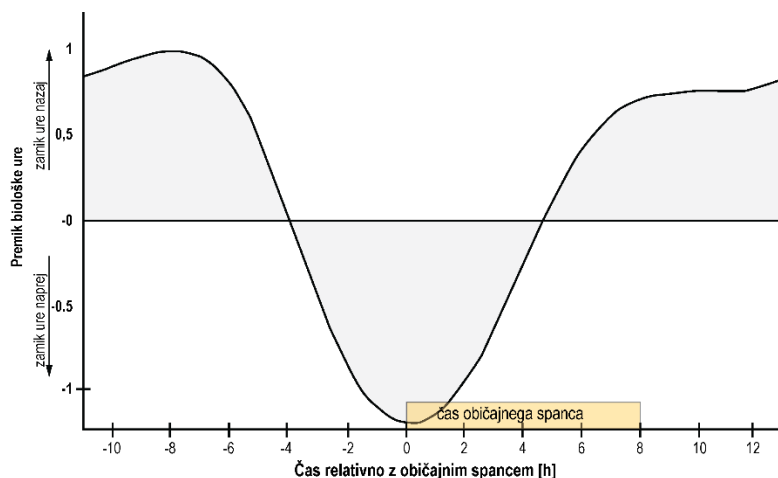


Slika 16. Naravni ritem nihanja melatonina in kortizola pri zdravih moških posameznikih. Povzeto po Selmaoui in Touitou, 2003 [69].
Figure 16: Natural oscillation of melatonin and cortisol of healthy male individuals, after Selmaoui and Touitou, 2003 [69].

2.3.2.3 Učinek svetlobe kot posledica časovnih lastnosti izpostavljenosti svetlobi

Med časovne lastnosti izpostavljenosti svetlobi, ki vplivajo na odziv cirkadianega sistema, uvrščamo časovno opredeljevanje (angl. *timing*), dolžino izpostavljenosti svetlobi in preteklo izpostavljenost svetlobnim dražljajem. Časovno opredeljevanje izpostavljenosti svetlobi določa magnitudo in smernost vpliva cirkadianega premikanja ure. Svetloba lahko povzroči premik cirkadiane ure naprej ali nazaj. Premik ure nazaj je običajno zaželen, saj ima približno 75 % ljudi notranjo cirkadiano periodo večjo kakor 24 ur, zato potrebujejo fazni napredek biološke ure. Petindvajset % ljudi pa potrebuje ravno obratno – zamik biološke ure naprej, ti bi potrebovali veliko količino svetlobe zvečer [20,57]. Kakor je prikazano na sliki 17, ki izhaja iz študije Khalsa in sod. [71] na 21 zdravih udeležencih, izpostavljenost svetlobi širokega

spektra v jutranjih urah povzroči premik ure nazaj, izpostavljenost v večerno-nočnih urah pa zamik ure naprej, podobno ugotavljajo tudi St. Hilaire in sod. [72].



Slika 17: Zamik cirkadiane faze kot posledica enournega obsevanja s svetlobo širokega spektra v odvisnosti od časa običajnega spanca. Povzeto po Saeed in sod., 2019 [73].

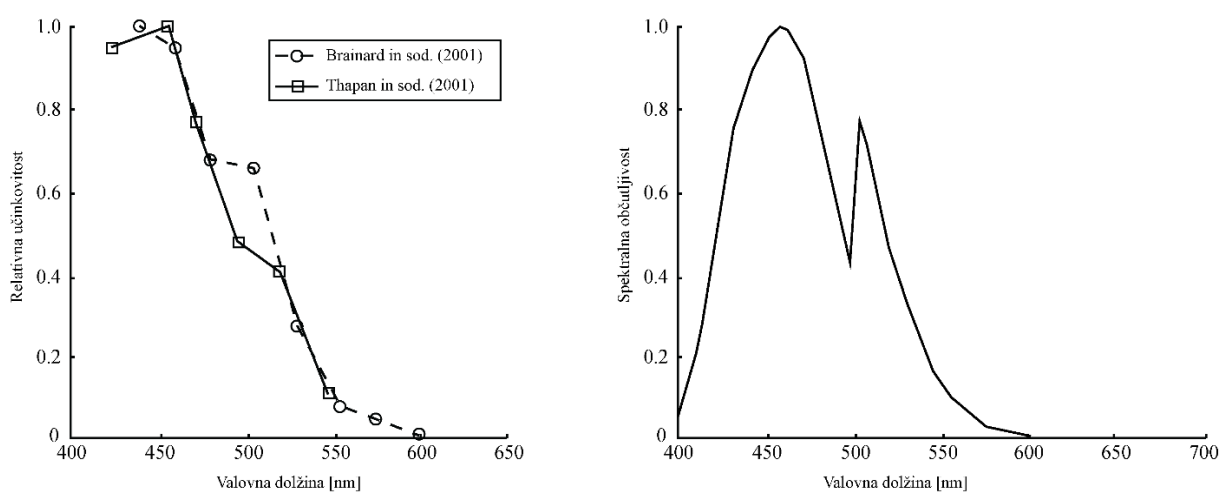
Figure 17: Circadian phase shift after 1-hour of bright broad spectrum bright light in relation to habitual sleep time. After Saeed et al. [73].

Na splošno velja, da daljša izpostavljenost svetlobi povzroča večje fazne premike v cirkadiani uri [74]. Kakorkoli, razmerje med trajanjem osvetlitve in odzivom faznega premika cirkadiane ure je nelinearno. Tako da ima lahko začetni svetlobni pulz večji vpliv na fazni premik kakor preostanek svetlobnih dražljajev. Chang in sod. [67] to dokažejo v svojem eksperimentu na 39 mladih udeležencih raziskave. V njej pokažejo, da je bila izpostavljenost svetlobi širokega spektra pri približno 10.000 lx za 0,2 h učinkovitejša pri zaviranju sinteze melatonina v primerjavi s štiriurno izpostavljenostjo svetlobi pri enakih osvetljenostih. Daljše obdobje izpostavljenosti svetlobi pa praviloma še vedno povzroči kumulativno večji fazni premik kakor krajše obdobje. Vpliv pretekle izpostavljenosti svetlobnim dražljajem so potrdili Hebert in sod. [75]. V svoji študiji ugotavljajo večje supresije melatonina po tednu dni izpostavljenosti manjšim osvetljenosti udeležencev študije kakor po tednu izpostavljenosti z velikimi osvetljenostmi. Kar pomeni, da je cirkadiani sistem bolj občutljiv za svetlobo po manjši izpostavljenosti svetlobi kakor večji. Podobno Chang in sod. [76] izmerijo večje fazne zamike cirkadiane ure pri udeležencih, ki so bili predhodno izpostavljeni manjšim osvetljenostim.

2.3.2.4 Spektralna pogojenost melanopsina in merjenje svetlobe, ki vpliva na cirkadiani sistem

Kot že omenjeno, se občutljivost nevizualnega sistema znatno razlikuje od vizualnega zaradi mehanizmov, ki sodelujejo pri zaviranju nastanka melatonina v odvisnosti od svetlobe.

Absorpcija melanopsina se izkaže za največjo v modrem delu vidnega spektra [61, 77], kar nakazuje, da običajno fotopsko merjenje svetlobe v primerih merjenja nevizualnih vplivov ni več zadosten pokazatelj kakovosti svetlobnega okolja. Namreč, krivulja standardnega fotopskega opazovalca $V(\lambda)$, ki predstavlja človeški vidni sistem, izraža najvišjo občutljivost pri 555 nm (rumeno-zeleni del vidnega spektra). Zato se pojavi potreba po drugačnem načinu merjenja svetlobe, ki ne bi bil utemeljen na občutljivosti vidnega sistema za svetlobo, ampak na občutljivosti nevidnega oz. cirkadianega sistema [70]. Medsebojno neodvisni študiji Brainarda in sod. [78] ter Thapana in sod. [79] sta že leta 2001 nakazali na največjo supresijo melatonina pri svetlobi ozkega spektra na valovni dolžini približno 460 nm (slika 18).

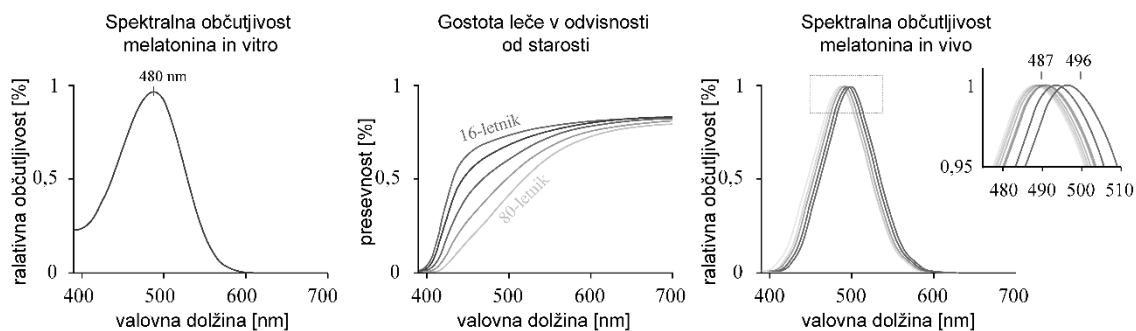


Slika 18: Levo: Relativna učinkovitost svetlobe ozkega spektra na supresijo melatonina. Povzeto po Brainard in sod., 2001 [78] in Thapan in sod., 2001 [79]. Desno: Model nelinearne spektralne občutljivosti cirkadianega sistema. Povzeto po Rea in sod., 2005 [80].

Figure 18: Left: Relative efficacy of narrowband light stimuli on the melatonin suppression. After: Brainard et al., 2001 [78] and Thapan et al., 2001 [79]. Right: Nonlinear spectral sensitivity model of the circadian system. After: Rea et al. 2005 [80].

Vendar kot so ugotovili Figueiro in sod. [81,82] ter Enezi in sod. [61], pri vplivu polikromatske svetlobe (svetloba, sestavljena iz množice valovnih dolžin) na cirkadiani sistem te krivulje niso bile zmožne dobro napovedovati melanopskega osciliranja, kar je moč pripisati sodelovanju preostalih fotoreceptorjev pri delovanju ipRGC [13]. Pri fototransdukciji naj bi v skotopskih razmerah precej sodelovale tudi paličice, pri večjih osvetljenostih pa se vključijo v nevizualni proces tudi čepki, vendar v manjšem obsegu kakor paličice [63]. Ljudje pa smo virom polikromatske svetlobe, kot so npr. dnevna svetloba, električna svetila itd., nenehno izpostavljeni. Tako Enezi in sod. 2011 na podlagi meritev spektralne občutljivosti in vitro melatonina (slika 19, levo), ki se je izkazal za maksimalno občutljivega za polikromatsko svetlobo pri 480 nm, in človeške spektralne presevnosti (slika 19, sredina) leč, ki se z leti zmanjšuje (rumenenje leče) [83, 84], določijo enostaven model spektralne občutljivosti

melanopsina (slika 19, desno) z najvišjo občutljivostjo pri svetlobi med 487 in 496 nm (odvisno od starosti opazovalca). Vendar kot že omenjeno, pri delovanju ipRGC posredno sodelujejo tudi drugi fotoreceptorji (čepki in paličice). Lucas in sod. leta 2014 [13] na podlagi izsledkov Enezi in sod. 2011 [61] predlagajo metodologijo oz. metriko α -opske osvetljenosti oz. α -opskega obsevanja, ki meri količino prejete svetlobe, utežene za vsakega izmed sodelujočih fotoreceptorjev oz. fotopigmentov pri pošiljanju signalov 32-letnega posameznika, ki ga določa standard CIE S 026/E:2018 [85], da je primerljiv s starostjo določitve CIE 1931 standardnih kolorimetričnih osvetljevalcev [3]. Če želimo izračunati α -opske količine za druge starosti, lahko to storimo s posebno funkcijo presevnosti leče, definirane v CIE 203:2012. Grška črka alfa v enačbi ekvivalentnih α -opskih enot predstavlja cianopsko, kloropsko, eritropsko, rodopsko in melanopsko uteženo ekvivalentno osvetljenost in sevanje.



Slika 19: Levo: In vitro spektralna občutljivost melanopsina za polikromatsko svetlobo. Povzeto po Spitschan in Lucas, 2017 [86]. Sredina: Računsko modelirana gostota leče. Povzeto po Amundadottir, 2017 [83]. Desno: In vivo spektralna občutljivost melanopsina v odvisnosti od starosti opazovalca, 487 nm za 20-letnega opazovalca in 496 nm za 80-letnega opazovalca. Povzeto po Spitschan, 2019 [87].

Figure 19: Left: In vitro spectral sensitivity of melanopsin, after Spitschan and Lucas, 2017 [86]. Middle: calculated model of eye lens transmissivity in relation to observer age. After: Amundadottir, 2017 [83]. Right: in vivo spectral sensitivity of melanopsin dependent of age. 487 nm for 20-year observer and 496 nm for 80 year observer. After Spitschan, 2019 [87].

Vsaka izmed α -opskih osvetljenosti predstavlja drugače uteženo fotometrično enoto, ki je s spektralno distribucijo obsevanja povezana s naslednjo enačbo, ki jo predlagajo Lucas in sod. [77, 13]:

$$E_{\alpha} = K_m \int E_{e,\lambda}(\lambda) s_{\alpha}(\lambda) d\lambda \cdot \frac{\int V(\lambda) d\lambda}{\int s_{\alpha}(\lambda) d\lambda} \quad (18),$$

pri čemer je:

- λ - valovna dolžina sevanja [nm],
- $K_m = 683\,002\,lm/W$ - maksimalna svetlostna učinkovitost [3],
- $V(\lambda)$ - relativna spektralna svetlobna učinkovitost pri fotopskem videnju [3],
- $E_{e,\lambda}$ - spektralna distribucija sevanja [W/m^2nm],

- $s_\alpha(\lambda)$ – α -opska občutljivostna krivulja s poljubno normalizacijo.

Na podlagi metode Lucasa in sod. [77,13] CIE v standardu CIE EN S026:2018 [85] predlaga metodo merjenja α -opskih radiometričnih količin ($E_{e,\lambda}$):

$$E_{e,\alpha} = \int E_{e,\lambda}(\lambda) s_\alpha(\lambda) d\lambda \quad (19)$$

ter α -opsko ekvivaletno osvetljenost ($E_{\alpha,V}^{D65}$) z dnevno svetlobo (D_{65}) po enačbi:

$$E_{\alpha,V}^{D65} = \frac{E_\alpha}{K_{\alpha,V}^{D65}} \quad (20),$$

pri čemer je:

- E_α – α -opsko sevanje [W/m^2],
- $K_{\alpha,V}^{D65}$ – kvocient sevalnega toka standardnega svetlobnega vira D_{65} [$mWlm^{-1}$].

Obe izmed α -opskih osvetljenosti obravnavata vpliv α -opskih signalov ločeno. V nasprotju z omenjenima metodama pa se s problemom vpliva polikromatske svetlobe in merjenja cirkadiano dejavne svetlobe spoprimejo tudi Rea in sod. z nekoliko zapletenejšim pristopom deloma sestavljenega spektralnega odziva. Model nevizualne recepcije Rea in sod. [80] temelji na izsledkih Brainard in sod. iz let 2001 [78] in 2008 [88] ter Thapana in sod. iz leta 2001 [79]. Dodatno pa vsebuje vse dosedanje znanje o fotopigmentih in fiziologiji človeške retine, vključno s spektralno presevnostjo leče 32-letnega posameznika. Spektralna občutljivost omenjenega cirkadianega modela je prikazana na sliki 19 desno. Model je maksimalno občutljiv za svetlobo pri približno 460 nm, po Brainardu in sod. ter Thapan in sod. Monotono padanje spektralne občutljivosti je prekinjeno pri 507 nm, kar je posledica dvojnosti delovanja ipRGC. To je posledica modro-rumenega primerjalnega signala vidnega sistema in diodnega obvoza, ki omogoča vhodni signal do ipRGC, ko svetloba izraža spekter, ki bolj stimulira S-stožce kot M- ali L-stožce. Ko svetloba izraža spekter, ki bolj stimulira M- in L-stožce kakor S-stožce, pa se dodatni signal do ipRGC prekine. Rea in sod. [80,14] so sestavljene model cirkadianega vpliva predstavili v novi metodologiji oz. metriki merjenja cirkadiano vplivne svetlobe, ki jo poimenujejo cirkadiani stimulus (angl. *Circadian Stimulus* – CS) oz. cirkadiana svetloba (angl. *Circadian Light* – CL_A). Metriko CL_A izračunamo po naslednji enačbi [81, 82]:

$$CL_A = \begin{cases} 1622 \left[\int Mc_\lambda E_\lambda + \left(a_{b-y} \left(\int \frac{S_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda - k \int \frac{V_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda \right) - a_{rod} \left(1 - e^{-\frac{\int V'_\lambda E_\lambda d\lambda}{RodSat}} \right) \right) \right] \\ \text{če je: } \int \frac{S_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda - k \int \frac{V_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda \leq 0 \\ 1622 \int Mc_\lambda E_\lambda d\lambda \text{ če je: } \int \frac{S_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda - k \int \frac{V_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda > 0 \end{cases} \quad (21),$$

pri čemer je:

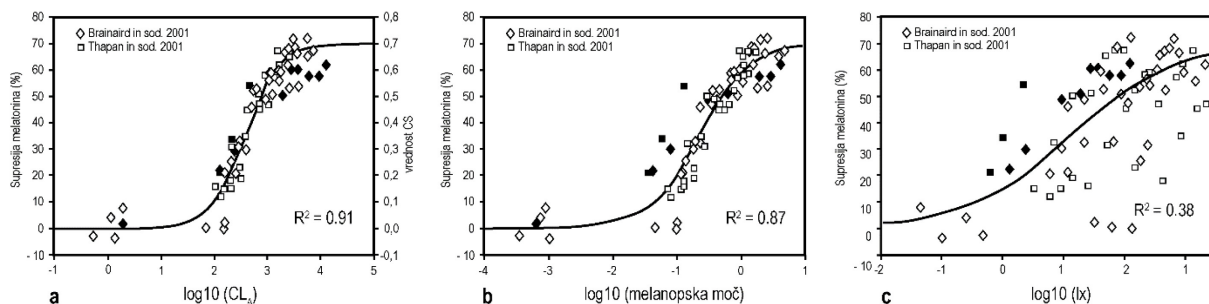
- CL_A - cirkadiana svetloba (angl. *Circadian Light*); konstanta 1622 postavi normalizacijo CL_A tako, da je sevanje črnega telesa pri 1000 lx in 2865 K enako vrednosti 1000 CL_A ,
- E_λ - izmerjena spektralna gostota sevalne moči (SPD),
- Mc_λ - občutljivost melanopsina za presevnost kristalinske leče 32-letnega opazovalca,
- S_λ - osnova S-čepkov,
- mp_λ - presevnost pigmenta rumene pege (makule),
- $V(\lambda)$ - relativna spektralna svetlobna učinkovitost pri fotopskem videnju [3],
- $V'(\lambda)$ - relativna spektralna svetlobna učinkovitost pri skotopskem videnju [3],
- $RodSat$ - polsaturacijska konstanta bledenja paličic = 6,5 W/m²,
- $k = 0,2616^1$,
- $a_{b-y} = 0,7000^2$,
- $a_{rod} = 3,3000^2$.

Popoln model cirkadiane fototransdukcije mora upoštevati, kako količina svetlobe, ki pada na retino, vpliva na odziv cirkadianega sistema od praga aktivacije do popolne saturacije in maksimalnega odziva sistema [18]. Zato so avtorji opisali funkcionalen odnos med $\log_{10} CL_A$ in nivojem cirkadianega stimulusa (CS), ki sovpada z deležem supresije nočnega melatonina z naslednjo enačbo:

$$CS = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{CL_A}{355,7} \right)^{1,1026}} \quad (22)$$

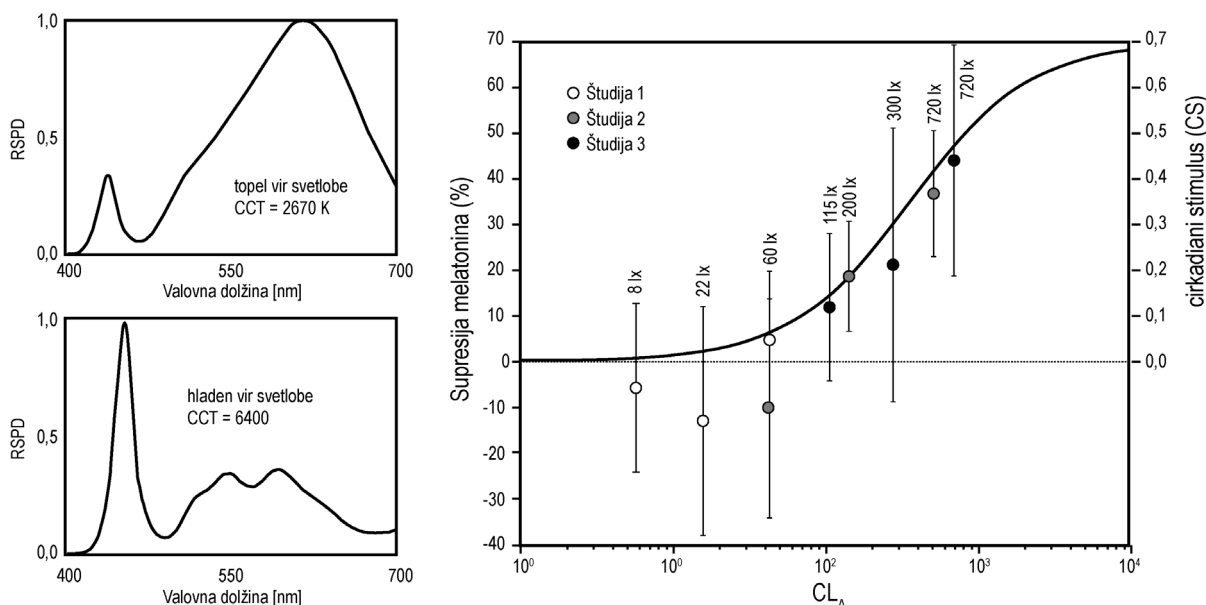
To empirično enačbo so avtorji razvili kot kombinacijo podatkov Brainarda in sod. [78, 88] ter Thapan in sod. [79], kjer so ocenjevali spektralno občutljivost supresije nočnega melatonina pri obsevanju s svetlobo ozkega spektra (slika 20) in intenziteto supresije nočnega melatonina pri polikromatski svetlobi Rea in Figueiro leta 2013 [89], ki je prikazana na sliki 21.

¹ Konstante in interakcije fotoreptorskih tipov, ki predstavljajo mejne vrednosti, in dinamične karkateristike fotoreptorskih tipov, ki sodelujejo pri cirkadiani fototransdukciji.



Slika 20: Supresija nočnega melatonina kot posledica obsevanja z lučmi ozkega spektra. Diamantne oblike predstavljajo podatke Brainarda in sod. [78] po obsevanju subjektov s svetlobnim stimulusom pri 440 nm, kvadratki pa študijo Thapana in sod. [79] pri ozkovalovnem spektru 424 nm. Povzeto po Rea, 2019 [18].

Figure 20: Suppression of nocturnal melatonin as a consequence of different narrowband lights. Diamond shapes represent data from Brainard et al. [78] with a narrowband light stimulus at 440 nm. Squares represent results from exposure to 424 nm wavelength narrow spectrum light from the experiment of Thapan et al. [79]. After Rea 2019 [18].



Slika 21: Supresija nočnega melatonina kot posledica enournim izpostavljenostim dvema polikromatskima viroma svetlobe pri različnih kornealnih ravneh osvetljenosti kot funkcija CL_A . Rezultati treh neodvisnih študij Rea in Figueiro leta 2013 [89]. Povzeto po Rea, 2019 [18].

Figure 21: Nocturnal melatonin suppression after one-hour exposure to two polychromatic light sources at different correlated temperatures (CCT) and at different levels of corneal photopic illuminances as a function of circadian light (CL_A). From three independent studies of Rea and Figueiro in 2013 [89]. After Rea, 2019 [18].

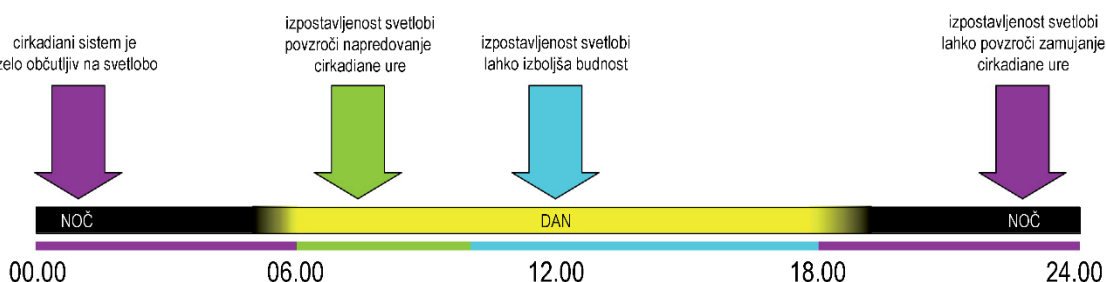
2.3.2.5 Potrebne količine svetlobe za primerno cirkadiano usklajenost

Kljub negotovostim v trenutnem znanju biofizike cirkadiane fototransdukcije obstajajo empirični dokazi, ki potrjujejo, da izpostavljenost količini dnevne svetlobe, ki se kaže v 30 % supresiji melatonina ponoči, torej $CS = 0,30$, lahko povzroča pozitivne učinke na ljudi v smislu izboljševanja spanca ponoči, zmanjšane zaspanosti čez dan in omiljevanja simptomov

depresije [18]. Ta količina cirkadiano učinkovite svetlobe je bila uspešno povezana z izpostavljenostjo svetlobi klinično relevantnih rezultatov številnih laboratorijskih študij, npr. pri študijah z osvetljenimi zasloni [90–92] in tudi pri bolj specializiranih študijah, npr. v jedrskih podmornicah [93], geriatričnih ustanovah za ljudi z Alzheimerjevo boleznijo [94, 95] in pisarnah [8, 17, 96, 97]. Za uporabo v praksi Figueiro in sod. predvidevajo, da je količina cirkadiano učinkovite svetlobe $CS = 0,30$ zadostna za uravnavanje periode cirkadianega sistema, izboljšanje spanja, počutja, in to dokažejo v svojih študijah [94, 95, 98]. Pri izpostavljanju starejših odraslih z diagnosticirano Alzheimerjevo boleznijo izpostavljenost svetlobi nad $CS = 0,30$ od začetka budnosti do 18. ure izboljšuje kakovost spanca, povečuje količino spanca in zmanjšuje simptome depresije in nemirnosti. Podobno Young in sod. pokažejo, da izpostavljenost umetni svetlobi podobnega cirkadianega stimulusa kakor pri Figueiro in sod. izboljša učinkovitost spanca (izmerjeno z aktigrafijo) živečih na podmornici. Prav tako se izboljša subjektivno poročana zaspanost med delovnimi izmenami tistih, ki živijo na podmornici. Figueiro in sod. leta 2019 [17] v študiji na 36 zaposlenih v pisarnah pokažejo, da ti spijo dlje in bolje poleti kakor pozimi. Med poletnimi meseci je količina svetlobe v povprečju znašala $CS = 0,30$, medtem ko je med zimskimi meseci povprečno znašala nekoliko manj kakor prag $CS = 0,30$. Podobno nedavna študija Figueiro in sod. leta 2017 [96] na 109 udeležencih v štirih različnih stavbah po Evropi in Severni Ameriki pokaže, da ljudje, ki so bili izpostavljeni svetlobi s $CS = 0,30$ ali več v jutranjih urah (med 6.00 in 11.00), poročajo o boljšem subjektivnem počutju (skala subjektivne vitalnosti) in so bili manj zaspani na delu (karolinska lestvica zaspanosti) kakor ljudje, ki so bili izpostavljeni svetlobi s $CS = 0,15$ ali manj v jutranjih urah.

Naše védenje o interakciji med časovnim opredeljevanjem izpostavljenosti svetlobi, vzorci osvetljevanja, valovno dolžino, intenziteto, trajanjem in preteklostjo osvetljevanja je še vedno negotovo, vendar je na podlagi dosedanjih fotobioloških raziskav mogoče določiti tri naslednja izrazita časovna obdobja v dnevu [7] (slika 22):

- Zgodnje do srednje zgodnje jutro (6.00–12.00) – zadostna količina dnevne svetlobe lahko povzroči zamik biološke ure naprej pri večini ljudi [7].
- Srednje jutro do zgodnji večer (10.00–18.00) – izpostavljenost veliki količini dnevne svetlobe ne vpliva na cirkadiano fazo, vpliva pa na subjektivno pozornost/budnost [7].
- Večerno-nočni čas – izpostavljenost dnevni svetlobi v tem obdobju ni zaželeno, ker lahko zmoti naravni spalno-budni cikel [7].



Slika 22: Vsakodnevna cirkadiana funkcionalna klasifikacija. Povzeto po Andersen in sod., 2012 [6].
Figure 22: Diurnal circadian functional classification. After Andersen et al., 2012 [6].

2.3.2.6 Motnje in posledice v cirkadianem ritmu

Med najbolj očitne in takojšnje posledice neskladnosti spalno-budnega cikla z biološko nočjo uvrščamo motnje v spancu ali zaspanost v času biološkega dneva. Pomanjkanje spanca pa lahko vodi k slabši zmoglosti pomnjenja in učenja in zmanjšani pozornosti ter koncentraciji [99, 100]. Nespečnost, težavno prebujanje zjutraj in zaspanost, povzročena zaradi cirkadianega neskladja, so tipični simptomi, ki ljudi privedejo tako daleč, da poiščejo pomoč na spalnih klinikah [101]. Kakorkoli, fiziološke in psihološke posledice so mnogo širše kot le motnje v spalno-budnem ritmu. Motnje cirkadianega ritma lahko privedejo do sprememb v časovnih vzorcih prehranjevanja, sprememb metaboličnih funkcij, prav tako pa obstaja tveganje za nastanek vedenjskih motenj [101]. Trenutno poznamo kar nekaj pogostih in vplivnih povzročiteljev porušitve cirkadianega ritma. Najpogostejši je najbrž intenzivno izmensko delo, ki ga opravlja pribl. 15–20 % delovne populacije [102]. Mednarodna agencija za raziskovanje raka (IARC) je izmensko delo označila kot za verjetno karcinogenega za ljudi (skupina 2A) [102–104]. Najprepričljivejši dokazi povezave med cirkadiano neskladnostjo in tveganjem za zdravje lahko najdemo ravno pri raku dojke izmenskih delavk. Daljše časovne periode dela ponoči so najbolj ekstremen primer napačne časovne izpostavljenosti svetlobi, ki privede do zmanjšanja proizvodnje melatonina, pomanjkanja spanca in vsesplošne cirkadiane porušitve. Nedavna metaanaliza pogostosti obolenj za rakom dojke, ki je vključila 86 referenc/raziskav, je pokazala, da je verjetnost obolenja za rakom dojke pri ženskah, ki opravljajo izmensko delo, 40 % večja kakor pri tistih, ki niso izpostavljene izmenskemu delu [63]. Dodatno lahko kronične motnje cirkadianega ritma vodijo k drugim resnim zdravstvenim težavam. Cirkadiano neskladje lahko poleg rakavih obolenj [105–108] povzroči tudi druga kronična bolezenska stanja, npr. kardiovaskularne bolezni [108], endometriozo [109], gastrointestinalne bolezni [12], diabetes [11]. Lahko pa povzroča tudi kronične psihološke motnje, kot so depresija [10, 110] in sezonsko pogojena depresija (angl. *Seasonal Affective Disorder – SAD*), ki

se pojavlja pozno jeseni oz. na začetku zime, ko je fotoperioda kratka. Konstantne svetle in temne razmere namreč privedejo do večje tesnobe in depresivnega počutja [111].

Motnje cirkadiane desinhronizacije se pojavljajo v številnih oblikah. Nekatere desinhronizacije so posledica prehodnih neskladnosti s časovnim pasom, kakor je npr. jetlag (začasne motnje spanja); simptomi jetlaga pa se lahko relativno uspešno lajšajo s pomočjo svetlobne terapije [112]. Kronotip ali preferenca po zelenem času spanja in zbujanja pa je kronični vir desinhronizacije, ki prispeva k neskladnosti cirkadianih ritmov ljudi. Velike epidemiološke študije lastnosti kronotipov so pokazale, da se pogostost tipa kronotipov spreminja z leti in spolom. Mlajša in starejša populacija ter ženske so v povprečju zgodnejši kronotip, adolescenti in mladi odrasli pa poznejši [113]. Študije pa so pokazale, da lahko ljudje z zgodnjim ali poznim kronotipom preidejo v desinhronizacijo z urnikom, ki je nekako družbena norma – ta pojav imenujemo socialni jetlag. Paine in sod. [114] v nacionalni študiji na 2526 udeleženi in anketi pokažejo, da pozni kronotipi 2,5-krat pogosteje poročajo, da je njihovo počutje oz. zdravje slabše kakor jutranji tipi (slabše subjektivno počutje). Prav tako Merinkato in sod. [115] v anketni študiji s 6071 udeleženci pokažejo na 2,5-kratno povečanje pojavnosti diabetesa tipa II pri poznih tipih in 1,3-kratno nagnjenost k hipertenziji (visok krvni tlak) v primerjavi z jutranjimi tipi. Vse te bolezenske znake bi lahko pripisali večji desinhronizaciji s Sončevim ritmom večernih oz. poznih tipov ljudi kakor drugih.

2.4 Dnevna svetloba notranjega grajenega okolja

Kakor je bilo že opisano v poglavju 2.2.1, je spekter dnevne svetlobe zvezen in bogat v modrem delu vidnega spektra, torej je optimalen vir svetlobe za vzdrževanje cirkadianega ritma. Vendar se lahko dnevna svetloba, ki jo prejemamo v notranjem grajenem okolju, zelo razlikuje od svetlobe, neposredno izsevane iz neba. Dnevna svetloba (difuzna in direktna komponenta) in del odbite komponente od okolice (pogojena z odsevnostjo okolice – albedom) primarno potuje skozi okno, ki je primarni arhitekturno-gradbeni element, ki s svojo geometrijo (obliko in deležem zasteklitve) in presevnostjo uravnava količino dnevne svetlobe, ki doseže notranje grajeno okolje. Presevnost za vidno svetlobo (τ_v) izražamo kot količnik med presevano količino sevanja (od 380 do 780 nm) in dovedeno količino sevanja (od 380 do 780 nm). Izračunamo jo po enačbi iz standarda SIST EN 410 [116]:

$$\tau_v = \frac{\sum_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} D_{65} \tau(\lambda) V(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} D_{65} V(\lambda) \Delta\lambda} \quad (23),$$

pri čemer je:

τ_v – fotopska presevnost [-],

D_{65} – relativna spektralna razporeditev standardnega svetlobnega vira D_{65} [-],

$\tau(\lambda)$ – presevnost stekla pri valovni dolžini λ [-],

$V(\lambda)$ – krivulja standardnega fotopskega opazovalca (glej poglavje 2.1.1) [-],

$\Delta\lambda$ – interval valovne dolžine [nm].

Analogno z vidno presevnostjo lahko izpeljemo tudi melanopsko uteženo presevnost, ki jo utežimo z $N_m(\lambda)$ (melanopsko utežno krivuljo) [13]. Ta nam pove, kolikšen delež melanopsko učinkovite svetlobe prejmemo skozi preseven material:

$$\tau_m = \frac{\sum_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} D_{65} \tau(\lambda) N_m(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} D_{65} N_m(\lambda) \Delta\lambda} \quad (24),$$

pri čemer je:

τ_m – melanopska presevnost [-],

D_{65} – relativna spektralna razporeditev standardnega svetlobnega vira D_{65} [-],

$\tau(\lambda)$ – presevnost stekla pri valovni dolžini λ [-],

$N_m(\lambda)$ – melanopska učinkovitostna krivulja (glej poglavje 2.4.4) [-],

$\Delta\lambda$ – interval valovne dolžine [nm].

Ko svetloba vstopi v prostor skozi steklo, se začne odbijati od odsevnih površin v prostoru. Kako se bo odbila od njih, pa je odvisno od odsevnosti materialov. Fotopska odsevnost se izračuna po naslednji enačbi:

$$R_v = \frac{\sum_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} D_{65} R(\lambda) V(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} D_{65} V(\lambda) \Delta\lambda} \quad (25),$$

pri čemer je:

R_v – fotopska odsevnost [-],

D_{65} – relativna spektralna razporeditev standardnega svetlobnega vira D_{65} [-],

$R(\lambda)$ – spektralna presevnost stekla [-],

$V(\lambda)$ – krivulja standardnega fotopskega opazovalca (glej poglavje 2.1.1) [-],

$\Delta\lambda$ – interval valovne dolžine [nm].

Enako kakor pri presevnosti lahko tudi pri melanopski odsevnosti izpeljemo melanopsko odsevnost – R_m , s tem da uporabimo $N_m(\lambda)$ po metodi Lucasa in sod. iz poglavja 2.4.4:

$$R_m = \frac{\sum_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} D_{65} R(\lambda) N_m(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} D_{65} N_m(\lambda) \Delta\lambda} \quad (26),$$

pri čemer je:

R_v – melanopska odsevnost [-],

D_{65} – relativna spektralna razporeditev standardnega svetlobnega vira D_{65} [-],

$R(\lambda)$ – spektralna presevnost stekla [-],

$N_m(\lambda)$ – melanopska učinkovitostna krivulja (glej poglavje 2.4.4) [-],

$\Delta\lambda$ – interval valovne dolžine [nm].

Svetloba se v realnih situacijah ne odbija le enkrat, temveč nastajajo tudi sekundarni odboji. Zato z enostavnim množenjem vira svetlobe s spektralnimi lastnostmi površin računsko ni mogoče popolnoma natančno oceniti, kakšna bo svetloba, ki jo bo hipotetični uporabnik prostora prejel v oko. Za natančno predvidevanje prejete svetlobe so razvita simulacijska orodja (predstavljena v naslednjem poglavju), ki omogočajo predvidevanje in računanje dnevne in umetne svetlobe tudi po mnogokratnem odsevanju in presevanju s površine ali skozi njjo.

2.5 Simulacijska orodja za analizo vidne svetlobe

Trenutno je zaradi hitrega razvoja v računalniški tehnologiji na voljo veliko programov, ki bodisi fizično in/ali vidno natančno reprezentirajo svetlobno okolje. Zaradi množice razpoložljivih simulacijskih orodij je CIE uvedla tudi metodologijo, s katero nadzorujejo natančnost in kakovost simulacijskih orodij. Tako je natančnost vseh simulacijskih orodij, ki so trenutno na voljo v raziskovalne ali komercialne namene, primerljiva. V tej disertaciji bo podrobneje predstavljeno orodje Radiance, ki uporablja metodo vzvratnega sledenja žarkom, saj so bili simulacijski spektralni izračuni v tej doktorski disertaciji narejeni v orodju, ki je zasnovano na Radianceu. Na splošno poznamo še kopico drugih simulacijskih orodij vidne svetlobe, ki delujejo po različnih metodah izračuna svetlobe, kot so Relux, DIALux, DAYSIM, VELUX, in so pogosteje uporabljeni v praksi [117]. Podrobneje bomo predstavili Radiance, ker ga bomo tudi uporabljali v doktorski disertaciji.

Radiance je izjemno sposoben in širok nabor programov, napisanih v okolju Unix, ki omogočajo študijo svetlobnega okolja, osvetljenega s pomočjo dnevne ali umetne svetlobe. Greg Ward je avtor tega programskega paketa, ki je bil eno izmed prvih orodij s fizikalno natančno simulacijo svetlobe. Programi znotraj Radiancea omogočajo računanje podatkov o količini svetlobe na podlagi RGB barvnega prostora (svetlost, osvetljenost in barva). Za izračun

program potrebuje opis tridimenzionalnega prostora, snovne lastnosti površin in vir svetlobe. Če želimo ustvariti digitalno reprezentacijo svetlobnega okolja (vizualizacijo – render), sta za to potrebna še smer in kot pogleda. Ko so omenjeni podatki pravilno opisani, so sestavljeni v strukturo »octree«, ki deluje kot učinkovita struktura podatkov za procese sledenja žarkov (določanje, katera površina prestreže žarek) [118]. Za izračun svetlosti Radiance uporablja naslednjo enačbo:

$$L = 179 * (0.2651 * R + 0.670 * G + 0.065 * B) \quad (27),$$

pri čemer je:

179 – konstanta, ki jo Radiance uporablja za izračun fotometričnih količin,

L – svetlost,

R – rdeči kanal,

G – zeleni kanal,

B – modri kanal.

Računsko jedro Radiancea uporablja hibridni pristop računanja z metodo Monte Carlo in determinističnim sledenjem žarkov za doseganje dovolj natančnih rezultatov v razumnem času. Metoda sledenja žarku se začne v meritvenem mestu (točka ali pogled), nato sledi poti žarka nazaj do izvora svetlobe. Kalkulacijo količine svetlobe lahko razdelimo v tri glavne dele: direktno komponento, indirektno zrcalno komponento in indirektno difuzno komponento. Direktno komponento sestavljajo žarki, ki na ploskev sevajo direktno iz izvora svetlobe, in žarki, ki se zrcalno odbijejo od zelo zrcalnih površin. Indirektno zrcalno komponento sestavljajo svetlobni žarki, ki na površino odsevajo ali presevajo z drugih površin s poudarjeno smernostjo. Difuzno indirektno komponento pa sestavljajo žarki, ki se odsevajo ali presevajo z drugih površin na opazovano površino in so brez izrazite smernosti sevanja. Simulacijski materiali so opisani s pomočjo vnaprej določenih tipov, kakor so svetlobni, plastični in kovinski materiali ter steklo, in so lahko dodatno strukturirani z vzorci in teksturami s pripadajočimi lastnostmi odsevnosti in presevnosti. Primera plastičnega – angl. *plastic* (difuzno odsevnega) in steklenega – angl. *glass* (presevnega) materiala, apliciranega na geometriji – angl. *void*, sta prikazana na sliki 23.

```

void glass
Double_paned_glazing_bca4c8e3
0
0
3 0.817203283871
0.817203283871 0.817203283871

void plastic
Wall_paint_96ab8e09
0 0
0
5 0.7 0.7 0.7 0.0 0.0

```

Slika 23. Ukaz v Radianceu, ki navaja vnos podatkov za geometrijo s presevnostjo 0,817 (levo) in vnos podatkov za geometrijo z odsevnostjo 0,7 (desno).

Figure 23. Command in Radiance stating the input of glass material applied to geometry with transmissivity of 0.817 (left) and diffuse material applied to geometry with transmissivity of 0.7 (right).

Svetlobni viri so tipično modelirani s pomočjo emisijskih površin in algoritmov, ki določajo npr. svetlostno distribucijo neba v odvisnosti od geografske pozicije in časa v dnevu in letu. Radiance v svojih izračunih nima omejitev glede vhodnih geometrijskih podatkov. Kompleksnost scene, ki jo želimo simulirati, je omejena samo z delovnim spominom, kjer približno 2000 ploskev zavzame 1 MB delovnega spomina (RAM), ki linearno narašča s številom ploskev [118].

Programski paket Radiance je sam po sebi omejen na računanje s pomočjo RGB, torej treh kanalov (rdeče, zelene in modre barve), kar je dovolj za izračun barve v prostoru RGB, ne pa za preračunavanje spektrov prejete svetlobe, ki bi omogočali izračun cirkadianega oz. nevizualnega vpliva svetlobe.

2.6 Večspektralna simulacijska orodja za analizo cirkadianega aspekta svetlobe

Spoznanja o nevizualnih oz. cirkadianih vidikih svetlobe so izpostavila potrebo po nadgradnji trenutno uporabljenih simulacijskih orodij za analizo svetlobe (npr. Radiance, glej poglavje 2.6.1), ki so zasnovana na samo treh kanalih – RGB (rdeč, zelen in moder kanal), ki bodo omogočali natančno simulacijo celotnega vidnega spektra. Orodja, ki to omogočajo, imenujemo večspektralna simulacijska orodja (angl. *multispectral simulation tools*). Ta lahko bolje posnemajo spektralno vsebino bodisi dnevne bodisi umetne svetlobe. V tem poglavju sta predstavljeni dve trenutno obstoječi orodji za večspektralno simulacijo svetlobe Lark Spectral lighting [119] in ALFA [120].

2.6.1 Lark

Rupperstberg in Bloj sta leta 2006 [121] validirala uporabo N-koračnega algoritma v Radianceu za natančne simulacije svetlosti in barv. N-koračni algoritem razdeli svetlobni spekter v N-

število zaporednih intervalov valovnih dolžin, tako je za vsakega izmed N-kanalov izvedena RGB-simulacija v Radianceu, ki se nato združi v končni rezultat. Takšna vrsta večspektralnih simulacij je bila izvedena na korakih $N = 3$, $N = 9$ in $N = 81$. $N = 9$ in $N = 81$ sta dosegla največjo natančnost. Inanici in sod. [21] so tako leta 2015 ustvarili odprtokodni vtičnik za Rhinoceros [122] oz. Grasshopper [123], poimenovan Lark, ki temelji na metodi Ruppertsberga in Bloja in omogoča večspektralne simulacije v treh ali devetih kanalih z uporabo Radiancea in je prvi izmed dveh programov, ki omogoča večspektralno simulacijo svetlobe. V preglednici 3 je prikazana razdelitev vidnega spektra v devet diskretnih kanalov programa Lark in pripadajočih koeficientov za izračun fotopske in melanopske svetlosti.

Preglednica 3: Devet diskretnih spektralnih kanalov programa Lark z vrednostmi na odzivnostnih krivuljah, prilagojenih diskretnim intervalom [21].

Table 3: Nine Lark spectral output bands with Lark discrete interval adjusted efficacy curves [21].

Kanal	B1	B2	B3	G1	G2	G3	R1	R2	R3
Začetek [nm]	380	422	460	498	524	550	586	650	714
Konec [nm]	422	460	498	524	550	586	650	714	780
Fotopsko	0,0004	0,0095	0,0522	0,1288	0,2231	0,3174	0,2521	0,0162	0,0002
Melanopsko	0,0166	0,1819	0,3973	0,2468	0,1204	0,0351	0,0018	0	0

Za preračun devetkoračne fotopske svetlosti Lark uporablja naslednjo enačbo:

$$L_v = 179 \left(\begin{array}{l} p1 \cdot B1 + p2 \cdot B2 + p3 \cdot B3 + p4 \cdot G1 + p5 \cdot G2 + \\ + p6 \cdot G3 + p7 \cdot R1 + p8 \cdot R2 + p9 \cdot R3 \end{array} \right) \quad (28),$$

pri čemer je:

L_v – svetlost,

$p1, 2, 3 \dots 9$ – fotopski koeficient v intervalu 1, 2, 3 ... 9,

$B1, 2, 3$ – modri kanali,

$G1, 2, 3$ – zeleni kanali,

$R1, 2, 3$ – rdeči kanali.

Za preračun devetkoračne melanopske svetlosti Lark uporablja naslednjo enačbo:

$$L_m = 179 \left(\begin{array}{l} m1 \cdot B1 + m2 \cdot B2 + m3 \cdot B3 + m4 \cdot G1 + m5 \cdot G2 + \\ + m6 \cdot G3 + m7 \cdot R1 + m8 \cdot R2 + m9 \cdot R3 \end{array} \right) \quad (29),$$

pri čemer je:

L_m – svetlost [cd/m^2],

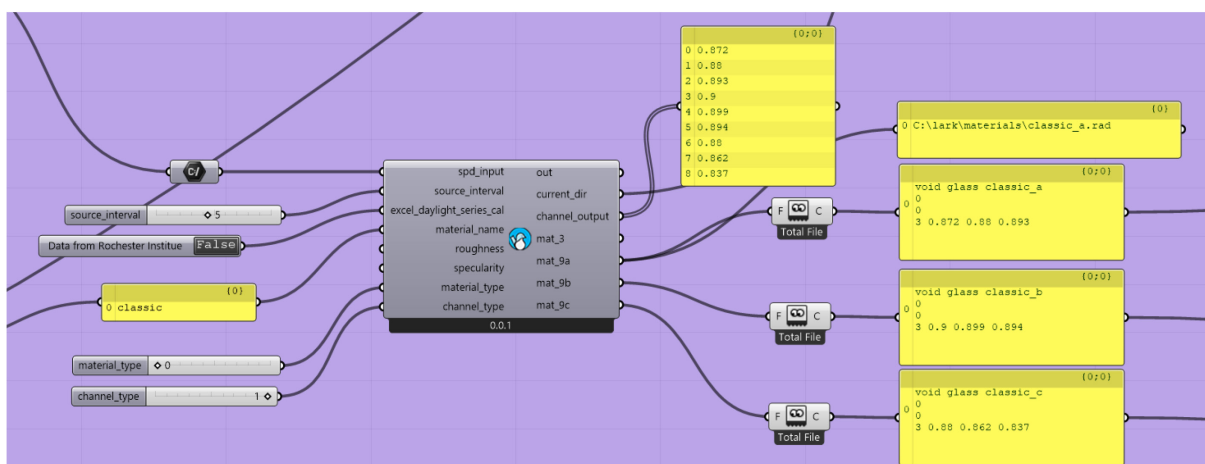
$p_1, 2, 3 \dots 9$ – fotopski koeficient v intervalu 1, 2, 3 ... 9,

$B_1, 2, 3$ – modri kanali,

$G_1, 2, 3$ – zeleni kanali,

$R_1, 2, 3$ – rdeči kanali.

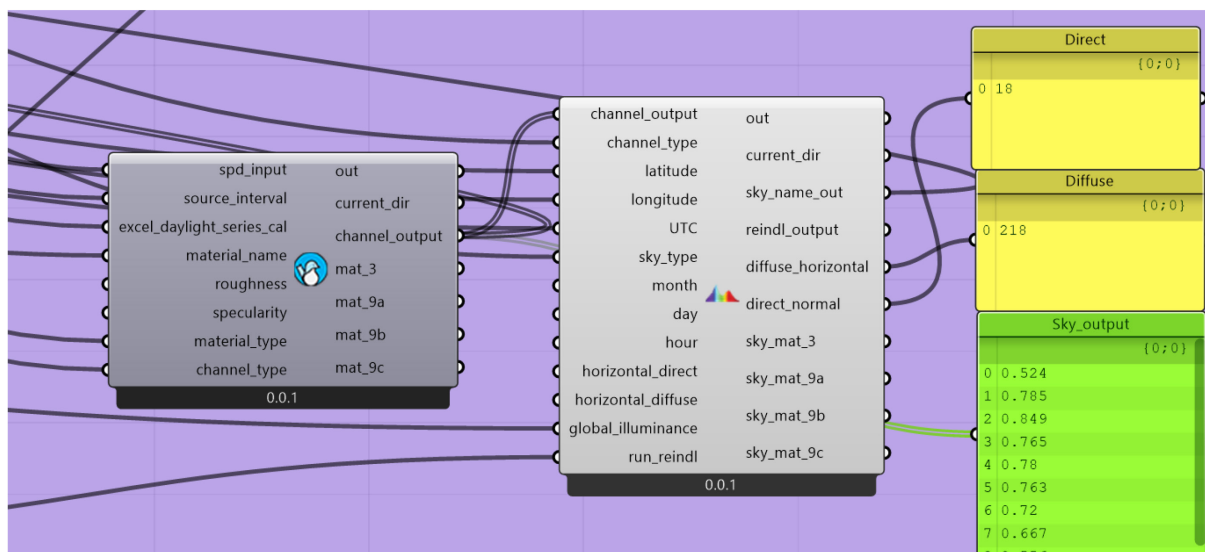
Lark omogoča ustvarjanje lastnih odsevnih in presevnih materialov (slika 24) na podlagi spektrov odsevnosti/presevnosti, ki jih analogno z načinom izračuna svetlosti pretvori v devet kanalov presevnosti/odsevnosti.



Slika 24: Algoritem ustvarjanja presevnih materialov v Larku. Algoritem izdelava tri ločene definicije materiala Radiance s po tremi vrednostmi presevnosti. Vsaka izmed njih pripada svojemu območju na spektru, ki je razdeljeno na devet delov.

Figure 24: Spectral transmissive material creation algorithm in Lark. The algorithm creates three separate definitions of Radiance material with three values of transmissivity. Each of the transmissivity values corresponds to one bin of the actual spectrum (9 bins form the whole spectrum).

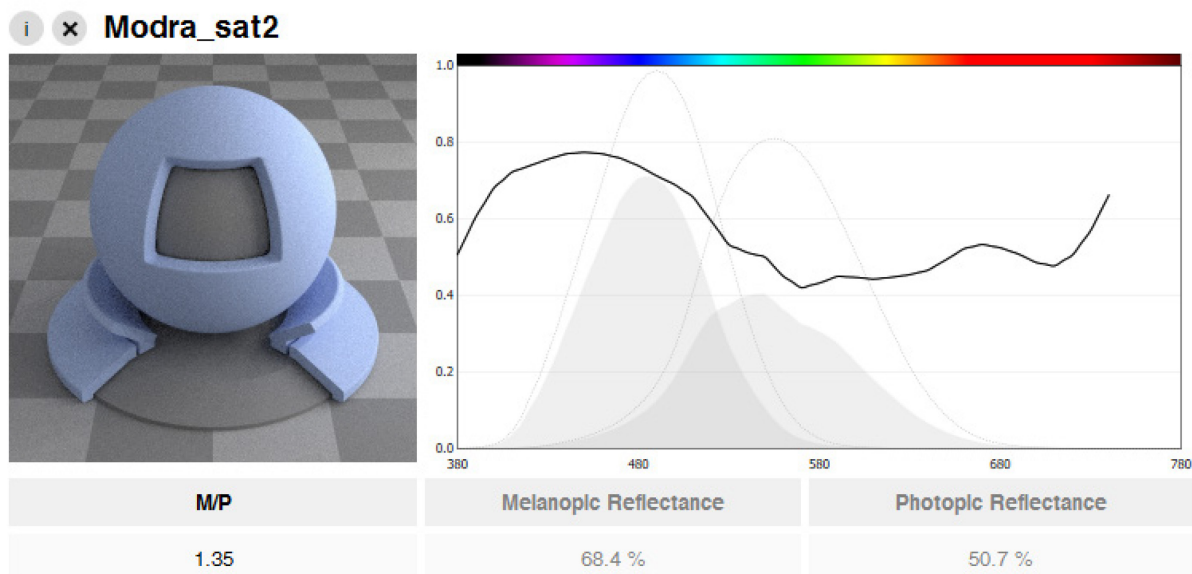
Program Lark prav tako omogoča ustvarjanje več tipov spektralnega neba (slika 25), npr. jasni, delno oblačni in oblačni tip neba. Nebo se generira na podlagi svetlostnih distribucij, ustvarjenih z Radianceom, in vhodnih podatkov spektralne porazdelitve svetlobe, globalnih osvetljenosti, horizontalnega in vertikalnega sevanja. Dejstvo, da Lark ne omogoča simulacije spektralne simulacije direktne komponente (sonca), ga omejuje na zanesljive simulacije samo ob prisotnosti popolnoma oblačnega neba (brez direktne komponente). Izhodni podatki Larka so v obliki fotopskih in melanopskih osvetljenosti, vendar lahko z malo programerskega znanja dostopamo tudi do podatkov RGB vsake izmed devetih izvedenih pods simulacij, ker je vtičnik odprtokoden in napisan v programskem jeziku Python [124].



Slika 25: Algoritem ustvarjanja neba v Larku.
Figure 25: Sky generation algorithm in Lark.

2.6.2 ALFA

ALFA (angl. *Adaptive Lighting for Alertness*) je večspektralni vtičnik v Rhinocerosu za povratno sledenje žarkov in v nasprotju z Radianceem deluje na 81 barvnih kanalih (vsak izmed 81 kanalov predstavlja 5-nm interval). Kanale razčlenjuje program, imenovan Spectree, ki vstavlja spekter izvora v vsakega izmed žarkov (npr. neba ali svetila) in jim sledi od mesta, kjer smo žarek zaznali (npr. oko), do izvora (večspektralno vzvratno sledenje žarkov). Spektri spektralne moči, pridobljeni z metodo spectree, so podobni metodi N-koračnih simulacij Radiance, ki bi v tem primeru potrebovala ponovitev treh kanalov 27-krat za doseganje 81 barvnih kanalov. Ker spectree podatkov ne obdeluje po tej metodi, se je ALFA izkazala za 10- do 15-krat procesno učinkovitejšo in znatno hitrejšo od N-koračne metode [125]. Kljub hitrosti pa se izkaže tudi za izjemno natančno orodje, saj med simulacijami Radiance in ALFA ne prihaja do razlik v izračunih svetlosti, ker ALFA uporablja program sledenja žarkov Radiance (rtrace)[126].

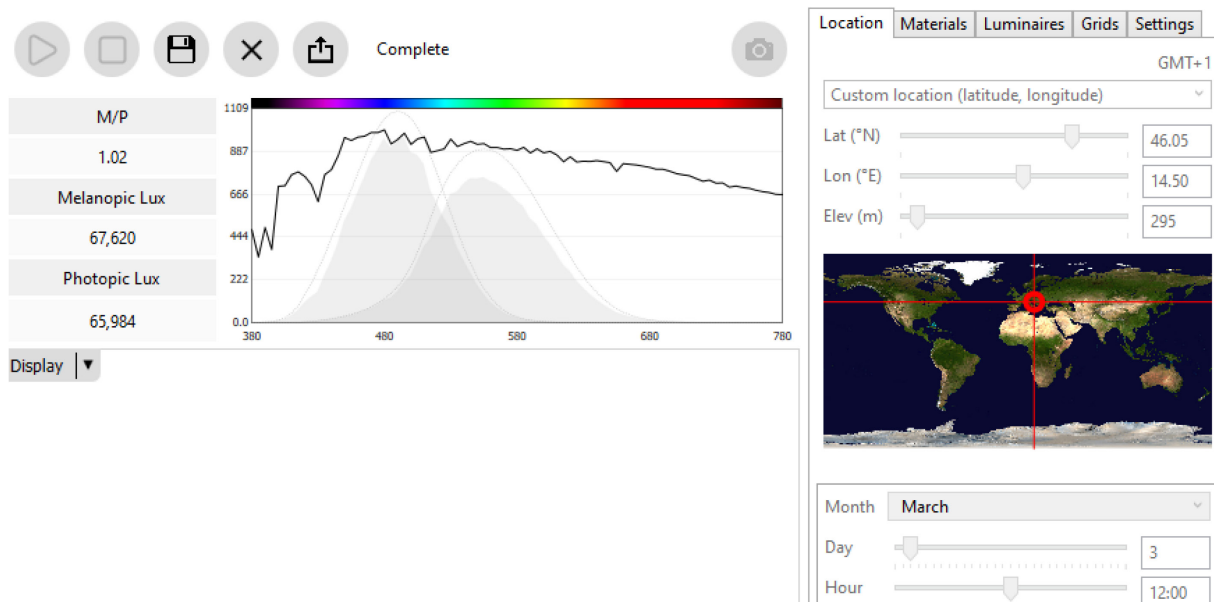


Slika 26: Material »po meri« v programu ALFA.

Figure 26: Custom material in ALFA.

Tako kakor Lark tudi ALFA omogoča ustvarjanje lastnih spektralnih odsevnih ali presevnih materialov. Za ustvarjanje odsevnih materialov je potrebna vhodna informacija spektralne odsevnosti po valovnih dolžinah od 380 nm do 730 nm v resoluciji 5 nm (slika 26). Presevne materiale pa lahko ustvarimo s pomočjo .usr-datotek programskega orodja Optics 6, ki omogoča ustvarjanje stekel po meri iz mednarodne baze zasteklitev IGDB (International Glazing Database) [127]. Program ALFA v nasprotju s programom Lark nima možnosti ustvarjanja spektralnega neba na podlagi izmerjenih podatkov, temveč lahko s pomočjo libRadTran – knjižnice sevalnega prenosa [128] izračunamo spektralne podatke neba (od 380 do 780 nm) neodvisno od geografske lokacije (omejitev na srednjih geografskih širinah) za izbrani časa v dnevu pri štirih stanjih neba. To je mogoče, ker libRadTran deluje na podlagi standardnega atmosferskega profila [126] za srednje geografske širine Geofizikalnega laboratorija Ameriških zračnih sil [129], seveda je to tudi omejitev, če bi želeli simulirati vrednosti za lokacije zunaj srednjih geografskih širin. Če podatkov o lokaciji meritve ni v bazi omenjenega algoritma (spektralna neba lokacij so izračunana vnaprej), program interpolira atmosferski profil med že izračunanimi lokacijami. Na sliki 27 so prikazani izračunani spektri, zunanje globalne osvetljenosti in zunanje melanopske globalne osvetljenosti za jasen tip neba, ki je bilo po omenjeni metodi ustvarjeno v programu ALFA. Dodatno lahko simuliramo še oblačen, delno oblačen in deževen tip neba. Spektralne simulacije so mogoče za katerokoli časovno točko v letu od 1. januarja do 31. decembra. Izračun spektralne svetlobe za daljšo periodo trenutno še ni mogoč, opravljajo se lahko samo t. i. point in time simulacije (simulacije v danem časovnem trenutku). Program omogoča tudi dodajanje električne razsvetljave, ki jo

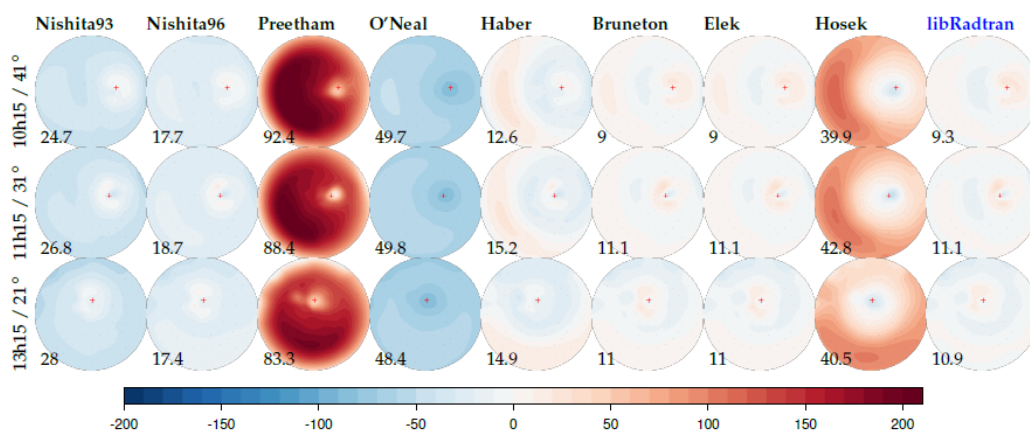
opišemo na podlagi datotek .ies (angl. *Illuminating Engineering Society*), kjer je hranjen zapis svetlostnega profila umetnih svetil, ali pa jo lahko izberemo iz knjižnice spektralnih datotek .ies.



Slika 27: Ustvarjanje spektralnega neba na podlagi lokacije časovnih podatkov in tipa neba v programu ALFA.

Figure 27: Spectral sky creation in ALFA, based on location, temporal data and sky typology.

Na sliki 28 je prikazana relativna napaka različnih tipov spektralnih nebes, ki jih je ustvaril Bruneton leta 2017. Izkaže se, da je libRadtran sposoben zelo dobro reproducirati spektralne podatke merjenega neba.



Slika 28: Relativna napaka libRadtran v primerjavi z izmerjenimi rezultati, izražena v %, v primerjavi z drugimi obstoječimi spektralnimi modeli neba. Povzeto po Bruneton, 2017 [130].

Figure 28: Relative error of libRadtran in comparison with measured data expressed in %, compared with other spectral sky models. After Bruneton, 2017 [130].

Program ALFA v nasprotju s programom Lark kot izhodni podatek izračuna spektralne sevalne razporeditve (*SPD*) za vsako merilno točko. Simulacije *SPD* notranjih svetlobnih razmer so izražene v spektrih od 380 do 730 nm, kar je omejitev programa ALFA, ki na

izračunane osvetljenosti in melanopsko utežene enote ne vpliva (učinkovitosti teh sistemov ne posegajo v območje valovnih dolžin večjih kakor 730 nm). Tako lahko z lahkoto izračunamo tudi druge cirkadiane metrike, npr. CL_A oz. posledično CS. Balakrishnan je v svoji doktorski disertaciji leta 2019 [126] primerjala točnost Larka in ALFE. Obe programske orodji sta se izkazali za relativno natančni. Ker je avtorica modelirala ekvatorialno nebo, so bile spektralne sestave neba zjutraj in zvečer programa ALFA, ki uporablja srednje geografske širine, nekoliko nenatančne v primerjavi z Larkom, kjer lahko sami določimo spektralno sestavo neba. Pa vendar je avtorica tudi pri Larku opazila podcenjevanje modrega dela vidnega spektra. Evalvacija točnosti obeh simulacijskih orodij na primeru Ljubljane, ki ima srednjegeografsko širino, bo predstavljena v 3. poglavju.

3 IZBIRA SIMULACIJSKEGA ORODJA NA PODLAGI PRIMERJAVE Z MERITVAMI MODELA PISARNE

Povzetek

Vpliv optičnih lastnosti površin na cirkadiani potencial prostora bo v tej doktorski disertaciji predstavljen s pomočjo eksperimentov in simulacij. Zato v prvem vsebinskem poglavju raziskovalnega dela predstavljamo rezultate preliminarne študije eksperimentalnih meritev na pomanjšanem modelu celične pisarne, ki je bil postavljen na strehi Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani ob jasnih vremenskih razmerah. Na podlagi eksperimentov so bile ocenjene in primerjane točnost, hitrost in ustreznost simulacijskih orodij Lark in ALFA. Točnost simulacij smo ocenili na podlagi korena povprečnega kvadrata napake (RMSE) spektralne gostote sevalne moči simulacijskih rezultatov (SPD) v primerjavi s SPD eksperimentalnih rezultatov in relativne napake v relativni melanopski učinkovitosti (RMU). Rezultati primerjave simulacijskih izračunov z eksperimentalnimi meritvami pokažejo, da obe izmed orodij dosledno simulirata spektralno nebo – zunanje svetlobne razmere. Vendar se v vrednotenju notranjega svetlobnega okolja simulacijsko orodje ALFA izkaže za veliko hitrejšo in tudi natančnejšo. ALFA dosledneje simulira predvsem spektralno distribucijo neba v modrem delu spektra, ki je s cirkadianega vidika svetlobe pomembnejša. To se izraža tudi v napakah pri preračunu relationalnih melanopskih učinkovitosti, ki so v primeru orodja Lark več kot šestkrat višje kot napake ALFA. Dodatno ugotovimo, da simulacije, vrednotene z orodjem ALFA, potekajo več kot 20-krat hitreje kot simulacije v orodju Lark.

Abstract

The influence of the optical properties of surfaces on the circadian potential of space will be presented in this doctoral dissertation through experiments and simulations. Therefore, we present the performed preliminary studies of experimental measurements on a scale model of a cell office, which was placed on the roof of Faculty of Civil and Geodetic Engineering, University of Ljubljana in the first content chapter of the performed research work. Based on the conducted experiments, accuracy, and speed of the spectral simulation tools Lark and ALFA were evaluated and compared. The accuracy of the simulations was assessed based on the root mean square error (RMSE) of the simulation results in comparison to experimental results and the relative error in relative melanopic efficacy (RMU). The comparison of results obtained from experimental and simulation studies shows that both of the simulation tools accurately simulate the spectral sky – external luminous conditions. However, when assessing the accuracy in the indoor luminous environment, the simulation tools ALFA proves to be faster and also more accurate than Lark. ALFA simulates the spectral distribution of light in the blue part of the spectrum more accurately than Lark. Hence, this is reflected in errors in the calculation of the relative melanopic efficiencies, which are in the case of the Lark tool more than 6 times higher than the errors of ALFA. Additionally, the simulations executed in ALFA are more than 20 times faster than the simulations in Lark.

3.1 Uvod

Cirkadiano svetlobno okolje v grajenem okolju in posledično vplivnost različnih lastnosti notranjega grajenega okolja bomo v tej doktorski disertaciji proučevali na podlagi meritev in simulacijskih izračunov. Zato je pomembno, da so rezultati, pridobljeni z meritvami, in rezultati simulacij spektralnega svetlobnega okolja skladni. Kakor je bilo omenjeno že v poglavju 2.6, sta trenutno najpogosteje uporabljani simulacijski orodji za oceno multispektralne vsebine notranjega okolja ALFA in Lark. Tako smo v študiji, predstavljeni v tem poglavju, na podlagi meritev pomanjšanega modela, opravljenih na strehi Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani (UL FGG), ocenili točnost in hitrost simulacij omenjenih programov pri poustvarjanju spektralnih svetlobnih razmer. Na podlagi točnosti in hitrosti simulacij bomo izbrali simulacijsko orodje, ki bo uporabljeno v simulacijskih študijah te naloge.

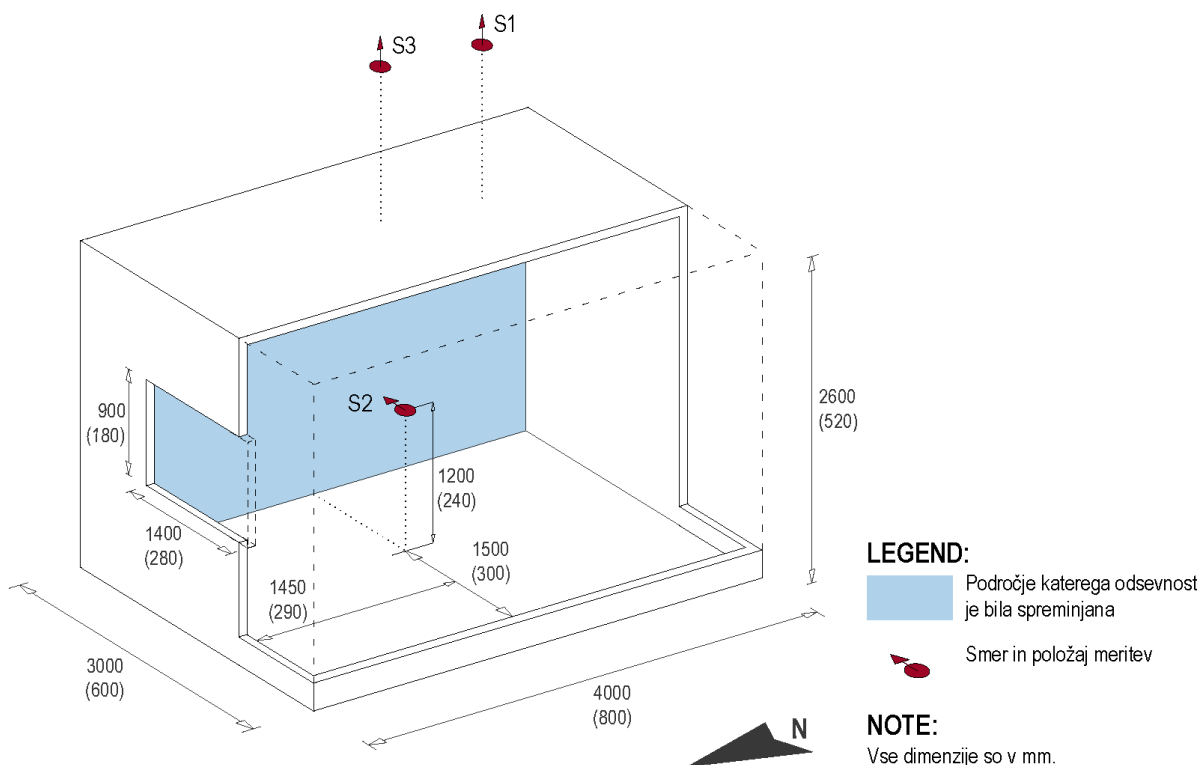
3.2 Metodologija

3.2.1 Zasnova eksperimentalnega modela

Oceno točnosti simulacij orodij Lark in ALFA smo izvedli na podlagi eksperimenta pomanjšane celične pisarne 28. 2. 2019 na strehi Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Model je bil v celoti izdelan iz brezovih vezanih plošč v merilu 1 : 5, kar bi v realnosti znašalo 3000 mm x 4000 mm x 2600 mm (velikost fizičnega modela v izmerah 800 mm x 600 mm x 520 mm) (slika 29). Prostor je enostransko osvetljen skozi vertikalno (fasadno) okensko odprtino v velikosti 1400 mm x 900 mm (2900 mm x 1800 mm v realnem merilu), kar obsega 10,5 % delež fasadne zasteklitve (angl. *Window to Wall Ratio* – *WWR*). Okno je na severno orientirani steni postavljeno simetrično okoli vertikalne osi in ima parapet višine 180 mm (900 mm v realnem merilu).

Kot je to prikazano na sliki 29, smo v točkah S1 in S3 spremljali zunanje svetlobno okolje na horizontalni ravnini. V točki S2 je bilo merjeno notranje svetlobno okolje na vertikalni ravnini, kot ga bi zaznaval hipotetični sedeči uporabnik pisarne. Pri oddaljenosti 1450 mm od okna in 1500 mm od zahodne stene ter višini očišča pogleda 1200 mm, kar predstavlja tipično višino sedečega opazovalca. Pogled hipotetičnega opazovalca je bil usmerjen proti vzhodni steni. V točki S1 je bila merjena spektralna gostota sevalne moči dnevne svetlobe (*SPD*), globalna

osvetljenost ($E_{e,h}$) je bila merjena v točki S3, v točki S2 sta merjeni vertikalna osvetljenost (E_v) in SPD hipotetičnega uporabnika v notranjem okolju pisarne.



Slika 29: Zasnova pomanjšanega modela pisarne, izvedenega v merilu 1 : 5. Kote v oklepajih so mere eksperimentalnega modela, kote zunaj oklepajev pa mere prostora, če ne bi bil pomanjšan.

Figure 29: Model design of the office scale model (scale of 1:5). Measurements in brackets represent the measurements of the scale model, measurements out of brackets represent dimensions, if the model was not in scale.

Pri meritvah SPD prejete dnevne svetlobe neba na horizontalni ravnini (točka S1) in hipotetičnega uporabnika (točka S2) sta bila uporabljena dva identična kalibrirana spektrometra s konkavnim optičnim rešetom StellarNet Black Comet CLK-CXR (slika 30), ki lahko merita spekter v obsegu od 280 do 900 nm pri 1 nm resoluciji [131]. Notranji in tudi zunanji spekter sta bila merjena v vidnem delu svetlobe od 380 do 780 nm v 1 nm koraku z nameščenim kosinusnim receptorjem (slika 31) s 180° kotom zajemanja svetlobe, ki je bil skupaj z merilcem osvetljenosti postavljen na trinožno stojalo v notranjosti modela pisarne v točki S2 (slika 32) in na njem usmerjen v nebo v točki S1 (slika 33).



Slika 30: Spektrimeter s konkavnim optičnim rešetom StellarNet Black Comet CLK-CXR.
Figure 30: StellarNet concave grating spectrometer, Black Comet BLK-CXR.

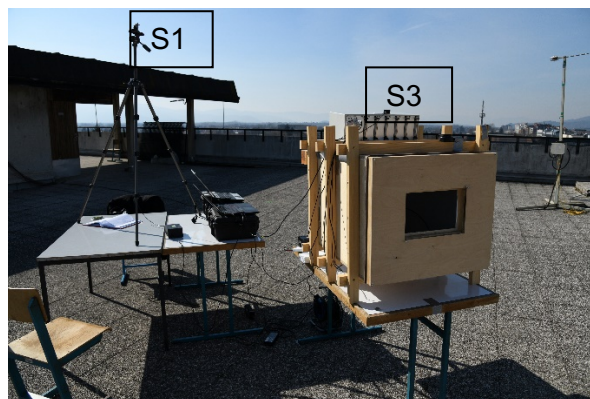


Slika 31: Kosinusni receptor s 180° vidnim kotom zajemanja.
Figure 31: Cosine receptor with 180° field of view.

Zunanja globalna horizontalna osvetljenost – E_{ext} (točka S3) in vertikalna osvetljenost – E_v (točka S2) hipotetičnega uporabnika sta bili merjeni z DIN 5032 [132] kalibriranima senzorjema osvetljenosti Almemo FLA 603-VL4 [133], pri napaki ± 1 lx, ki sta bila prek krmilne enote Almemo 5960-2 2M povezana na prenosni računalnik, kot je to prikazano na slikah 32 in 33.



Slika 32: Fotografija eksperimentalne postavitve v notranjosti modela.
Figure 32: Picture of experimental setup in the model interior.

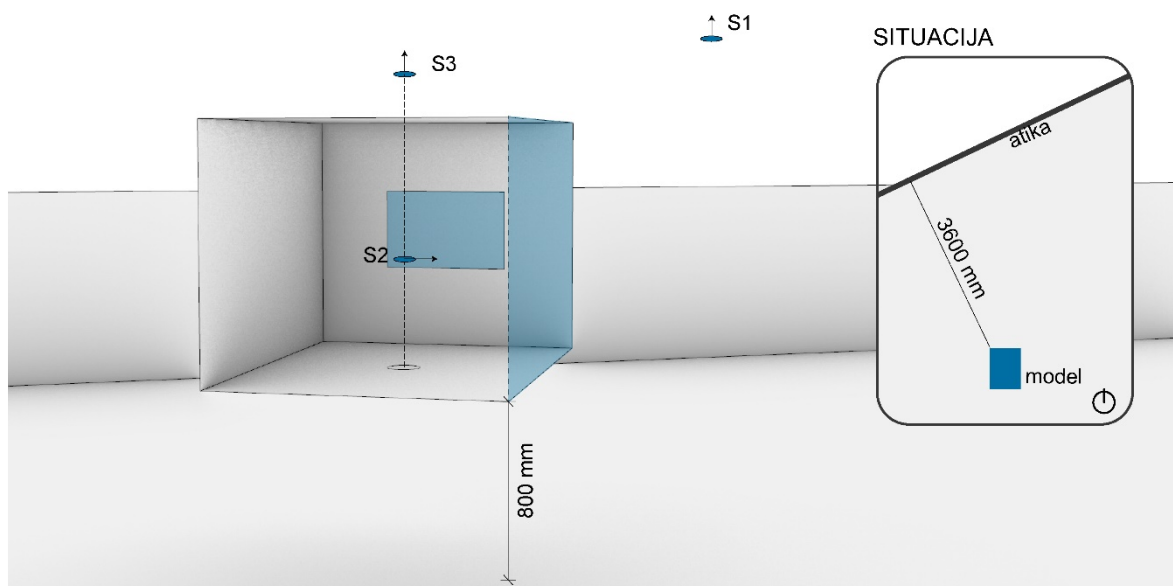
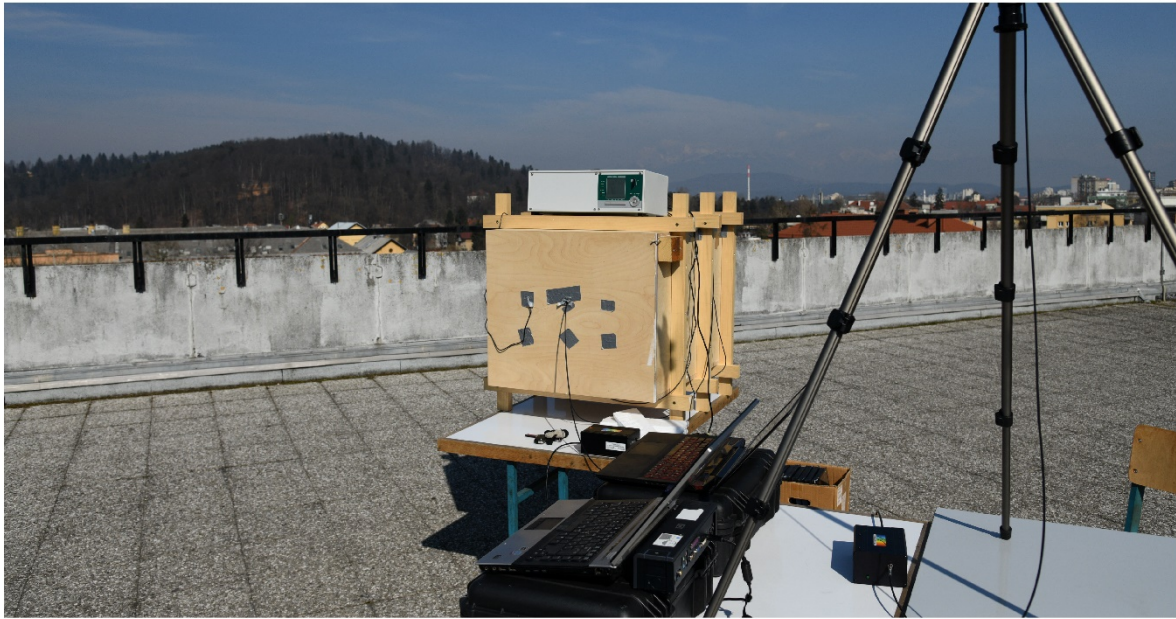


Slika 33: Eksperimentalna postavitve na strehi UL FGG.
Figure 33: Experimental setup of the model on the roof of UL FGG.

Vsako izmed opravljenih meritev z omenjenimi senzorji (spektrometra in merilca osvetljenosti) smo izvajali po 10 s, v tem času je bilo opravljenih 10 meritev, katerih povprečje je bilo uporabljeno kot končni rezultat. Dodatno je bilo vsako uro zajeto tudi stanje neba s pomočjo digitalnih fotografij, posnetih z zrcalno refleksno digitalno kamero NIKON D850 z nameščenim t. i. fisheye (ribje oko) objektivom NIKKOR 8–15 mm f/3,5–4,5E ED, ki zajema 180° vidni kot v enakokotni projekciji.

3.2.2 Zasnova simulacijskega modela

Geometrijski model je bil ustvarjen v računalniškem modelirnem orodju Rhinoceros 6 in je bil uporabljen v obeh simulacijskih orodjih ter predstavlja popolno digitalno repliko eksperimentalnega modela. Postavljen je bil na poenostavljen model strehe UL FGG pri oddaljenosti 3,6 m od strešnega nadzidka – atike in usmerjen z oknom neposredno proti severu, kot je to prikazano na sliki 34. V točki S1 je bila merjena *SPD* dnevne svetlobe, v S2 pa prejeta *SPD* hipotetičnega uporabnika pisarne. Simulacije v Larku so bile računane pri nastavitvah Radiance visoke kakovosti: -ab 8 (ambientalni odboj), -dp 256 (gostota sekundarnega vzorčenja izvora), -ds 0,25 (količnik direktnega vzorčenja), -dt 0,25 (prag direktnega vzorčenja), -ad 2048 (število ambientalnih delitev), -as 2048 (število ambientalnih super vzorcev), -ar 300 (ambientalna ločljivost), -aa 0,1 (ambientalna natančnost). Prav tako so bile simulacije v programu ALFA izvedene v visoki kakovosti: -ab 8, -lw (limita uteži) 0,001 in 180 passes (prehodov izračuna). Kot referenčni spekter izmerjene dnevne svetlobe v eksperimentu smo izbrali povprečje meritev *SPD* dnevne svetlobe 28. 2. med 11.00 in 13.00 (slika 36), ki pa je bilo uporabljeno tudi kot vhodni podatek *SPD* neba v Larku pri dnevni svetlobi ob 12.00. Globalna osvetljenost, ki je bila potrebna za izračun spektralnega neba, je bila izračunana na podlagi algoritma »gensky« programa Radiance, ki za izračun svetlostne distribucije neba potrebuje geografske podatke (Ljubljana, 46,051° S, 14,505° V), tip neba (clear sky – jasno nebo) ter podatke o moči globalnega (540 W) in difuznega sevanja (95 W). Podatki o globalnem in difuznem sevanju so bili pridobljeni iz vremenske datoteke EnergyPlus za Ljubljano [134], kjer so zapisani reprezentativni vremenski podatki za vse leto, za obdobje med letoma 1982 in 1999. Nebo v programu ALFA je bilo ustvarjeno s pomočjo libRadtran knjižnice spektralnih lastnosti neba, ki je podrobneje že predstavljena v poglavju 2.6.2. Nebo je bilo v ALFI ustvarjeno na podlagi vhodnih geografskih podatkov Ljubljane in podnebne profila iz libRadtran za 28. februar 2019 ob 12.00 pri enakomernem albedu okolice 0,20.

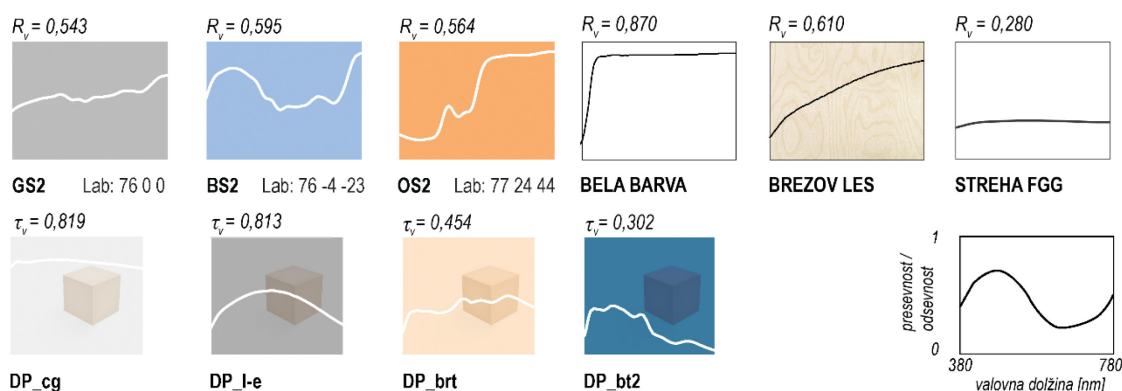


Slika 34: Eksperimentalni in simulacijski model z označenimi merilnimi mesti in položajem na strehi UL FGG.

Figure 34: Experimental and simulation model with marked measuring points and position on the UL FGG roof.

3.2.3 Izbor materialov in določitev poteka iteracij eksperimenta in simulacij

Optične lastnosti površin simulacijskega modela so bile ustvarjene glede na določene lastnosti eksperimentalnega modela, ki je narejen iz brezovega lesa. Notranje severne, južne in zahodne stene ter strop so pobarvani z belo barvo ($R_v = 0,87$), tla so puščena v neobdelanem brezovem lesu ($R_v = 0,61$), barva vzhodne stene (slika 29) pa je bila spreminjana med GS2, BS2 in OS2 (slika 35). GS2, BS2 in OS2 so del nabora realnih izmerjenih materialov v eksperimentalni študiji, ki je natančneje predstavljena v 4. poglavju. Odsevnosti uporabljenih materialov so bile izmerjene v Laboratoriju Oddelka za arhitekturo, grajeno okolje in konstrukcijsko inženirstvo (Department of Architecture, Built Environment and Construction Engineering) na Politehniški fakulteti v Milanu [136] s spektrofotometrom Perkin Elmer Lambda 950 UV-Vis-NIR [137] v območju vidne svetlobe (380–780 nm) pri 1 nm resoluciji. Omenjeni materiali imajo podobno vidno odsevnost R_v ($\approx 0,55$) in z njimi bomo raziskali točnost simulacij v toplen (OS2), nevtralnem (GS2) ali hladnem (BS2) odsevnem okolju. V okenski odprtini bomo preverili štiri komercialne tipe zasteklitve proizvajalca Reflex, d. o. o. Spektralne lastnosti uporabljenih zasteklitev smo izračunali na podlagi podatkov proizvajalca o sestavi zasteklitev in standarda EN 410 [135]. Podobno kakor pri odsevnosti, tudi presevnosti izberemo na podlagi tega, da hočemo preveriti točnost simulacij, kadar uporabljamo tople (DP_brt), hladne (DP_bt2) in nevtralne presevne materiale dvoslojne (DP_cg) in trislojne zasteklitve (TP_2-l-e). Natančnejše lastnosti in sestave zasteklitev so navedene v 4. poglavju.



Slika 35: Odsevni in presevni materiali, uporabljeni v postopku ocene točnosti simulacij.
Figure 35: Reflective and transmissive materials chosen for the simulation accuracy assessment.

Na podlagi materialov, predstavljenih na sliki 35, smo opravili meritve devetih različnih kombinacij (preglednica 4) odsevnih in presevnih materialov. Z izbranimi kombinacijami presevnih in odsevnih materialov smo testirali zanesljivost simulacij pri hladnih (BS2 – modra barva), nevtralnih (GS2 – siva barva) ali toplih odsevnih lastnosti (OS2 – oranžna barva) na

vzhodnem zidu ter točnost pri štirih različnih zasteklitvah (topla – DP_brt, nevtralna – DP_cg in TP-2-l-e in hladna – DP_bt2).

Preglednica 4: Različice uporabljenih kombinacij materialov pri primerjavi.

Table 4: Variations of optical material combinations studied.

#	V zid	Zasteklitev
različica 1	OS2	brez stekla
različica 2	GS2	brez stekla
različica 3	BS2	brez stekla
različica 4	OS2	DP_cg
različica 5	GS2	DP_cg
različica 6	BS2	DP_cg
različica 7	GS2	DP_brt
različica 8	GS2	TP_2-l-e
različica 9	GS2	DP_bt2

S, J, Z zid in strop so pobarvani v belo (glej sliko 35).

Tla so iz brezovega lesa (glej sliko 35).

3.2.4 Ovrednotenje simulacijskih programov

Simulacijska programa Lark in ALFA smo ovrednotili s treh vidikov. Sprva smo izračunali *RMSE* merjenega spektra v hipotetični točki opazovalca. Nato smo primerjali napako med meritvami v *RMU* (relativna melanopska učinkovitost). Nazadnje smo primerjali še hitrost izvedenih simulacij omenjenih simulacijskih orodij.

3.2.4.1 RMSE

V prvem koraku ocenjevanja točnosti smo s pomočjo povprečnega korena kvadratne napake – *RMSE* (angl. *relative mean square error*) izračunali točnost reproduciranja spektrov simulacij obeh programov, kakor je prikazano v enačbi 24. Napaka *RMSE* je bila izračunana za spektralne distribucije, normalizirane na 555 nm (maksimalna učinkovitost $V(\lambda)$), po naslednji enačbi:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_{e,sim,i} - E_{e,exp,i})^2} \quad (30),$$

pri čemer je:

RMSE – koren povprečnega kvadrata napake [-],

$E_{e,sim,i}$ – normalizirano spektralno sevanje simulacije i -te valovne dolžine v intervalu od 380 do 730 nm, v 5 nm koraku [W/m^2],

$E_{e,exp,i}$ – izmerjeno normalizirano spektralno sevanje i -te valovne dolžine v intervalu od 380 do 730 nm, v 5 nm koraku [W/m^2].

Na tej točki moramo omeniti, da so resolucije spektralnih eksperimentalnih podatkov in izhodnih podatkov programov ALFA in Lark različne. Eksperimentalno pridobljene meritve s pomočjo spektrometra so v resoluciji 1 nm med 380 in 780 nm, ALFA izračuna spektre v 5 nm resoluciji med 380 in 730 nm (omejitev programa ALFA, glej poglavje 2.6.2), Lark pa podaja spektralne vrednosti v le devetih diskretnih spektralnih intervalih, kot je to prikazano v preglednici 3 poglavja 2.6.1. Ker je bil cilj primerjati izhodne spektre obeh programskih orodji z eksperimentom, so bili izhodni podatki Larka in eksperimentalni podatki interpolirani na 5 nm natančnost. Koren povprečne kvadratne napake Larka ($RMSE_L$) in koren povprečne kvadratne napake v spektrih programa ALFA ($RMSE_A$) sta bila tako izračunana za interval od 380 nm do 730 nm v 5 nm koraku.

3.2.4.2 Relativna melanopska učinkovitost

Ker bodo simulacije primarno služile namenu preračunavanja radiometričnih količin v vizualno (fotopski lux) in nevizualno utežene količine (ekvivalentni melanopski lux in cirkadiani stimulus), smo v drugem koraku preverili relativno napako v RMU (relativna melanopska učinkovitost). RMU je količnik med ekvivalentno melanopsko osvetljenostjo (E_m) in osvetljenostjo (E) (angl. *relative melanopic efficiency* – RME) [25] in ga izračunamo, kot je prikazano v naslednji enačbi:

$$RMU = \frac{E_m}{E} \quad (31),$$

pri čemer je:

RMU – količnik relativne melanopske učinkovitosti [-],

E_m – ekvivalentna melanopska osvetljenost [EML],

E – osvetljenost [lx].

Napako v RMU pa smo izračunali po naslednjem postopku:

$$Err_{RMU} = \frac{RMU_{exp} - RMU_{sim}}{RMU_{exp}} * 100 \quad (32),$$

pri čemer je:

Err_{RMU} – relativna razlika v RMU [%],

RMU_{exp} – relativna melanopska učinkovitost meritve [-],

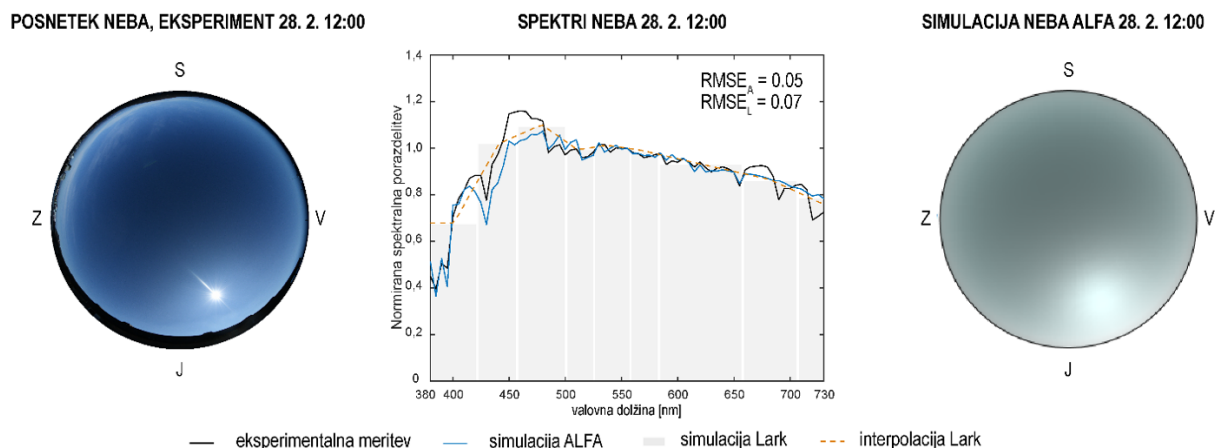
RMU_{sim} – relativna melanopska učinkovitost simulacije [-].

3.2.4.3 Časovna učinkovitost

Časovno učinkovitost smo ocenili na podlagi samodejno ovrednotenih podatkov vsakega izmed programov. Čas, potreben za izračun simulacij, je bil merjen v sekundah. Čas, potreben za izračun programa ALFA, označimo s t_A , čas, potreben za izračun programa Lark, pa s t_L .

3.2.5 Točnost zunanjih spektralnih razmer

Najprej smo preverili točnost zunanjih svetlobnih razmer v obeh simulacijskih orodjih. Merjena normalizirana spektralna gostota sevalne moči (SPD), normalizirana SPD neba, ustvarjena z libRadtran (ALFA), in normalizirana SPD programa Lark so prikazane na sliki 36. Že iz grafične primerjave grafov na sliki 36 je razvidno, da je razlika med izmerjenimi in simuliranimi normaliziranimi spektri majhna, kar se kaže tudi v $RMSE$ spektrov. $RMSE_L$ ($RMSE$ simulacije Lark) znaša 0,07, napaka programa ALFA ($RMSE_A$) pa je 28,5 % manjša in znaša $RMSE_A = 0,05$. Največjo napako v SPD vsakega izmed programov lahko opazimo v modrem delu spektra med 450 in 480 nm, kjer oba programa podcenjujeta količino sevanja. Program ALFA je bolj natančen v odseku od 380 do 450 nm, zato je tudi $RMSE_A$ manjša, ta odsek je zelo pomemben, saj je v tem območju največja melanopska odzivnost (glej poglavje 2.4.4). Oba simulacijska programa dobro sledita eksperimentalnim meritvam spektralne porazdelitve dnevne svetlobe, zato zunanje razmere spektralnega neba Larka in ALFE uporabimo pri nadaljnjem testiranju točnosti simulacij za vsako izmed konfiguracij, posnetih v notranjosti prostora.

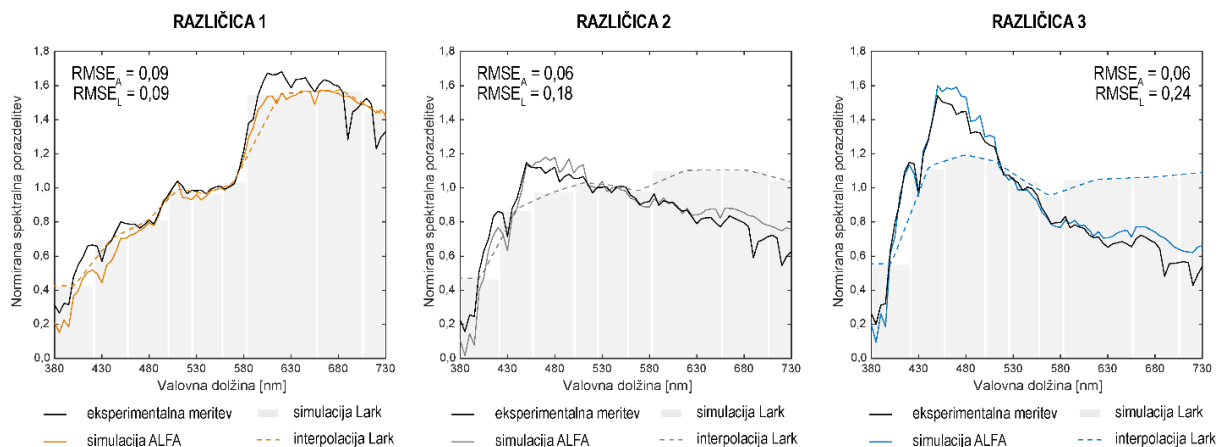


Slika 36: Primerjava spektra neba, izmerjenega med eksperimentom s simuliranim nebom v Larku in ALFI. Leva hemisfera prikazuje eksperimentalni posnetek neba, desna hemisfera pa simulirano nebo v ALFI.

Figure 36: Comparison of experimentally measured sky at 12:00 with simulated sky in Lark and ALFA. Left hemisphere shows a picture of sky during experiment, right picture shows the sky as simulated by ALFA.

3.2.6 Točnost pri variaciji spektralnih lastnosti zidov brez zasteklitve

Točnost simulacij prvih treh različic materialnosti, pri katerih je bila menjana barva vzhodne stene brez nameščenega stekla v okenski odprtini, je prikazana na sliki 37. Iz oblik grafov interpolacije simulacijskih rezultatov Lark druge in tretje različice lahko razberemo jasno odstopanje v obliki grafov od eksperimentalnih meritev. Očitno je, da sta spektra siromašna v modrem delu svetlobe s sočasno preveč nasičenimi valovnimi dolžinami v toplem delu spektra. Kar se odraža v $RMSE_L$, ki znaša 0,18 in 0,24 za različici 2 (siv zid) in 3 (moder zid) in je v primerjavi z $RMSE_A$ kar trikrat oz. štirikrat večji od $RMSE$ programa ALFA, ki znaša 0,06 za vsako izmed različic. Napaka Larka pri različici 1 znaša $RMSE_L = 0,09$, enak $RMSE$ izračunamo tudi za rezultat programa ALFA, torej oba spektra simulacijskih programov dobro sledita obliki spektra eksperimentalne meritve različice 1. To velja tudi za različici 2 in 3 za simulacije s pomočjo programa ALFA.

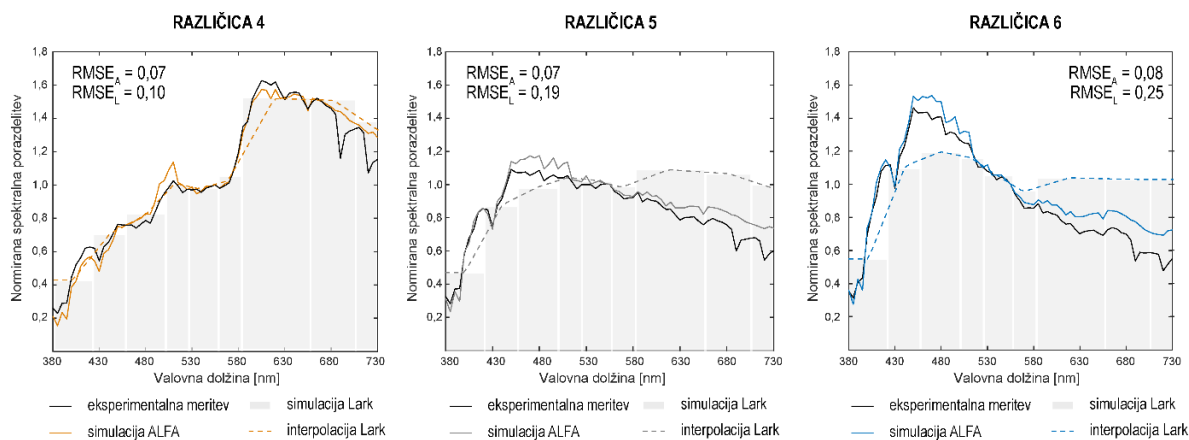


Slika 37: Primerjava eksperimentalnih meritev in simulacij programov ALFA in Lark prvih treh različic (menjava barve stene brez nameščene zasteklitve).

Figure 37: Comparison of the experimental measurements with the simulations of ALFA and Lark of first try variants (change wall colour, no installed glazing).

3.2.7 Točnost pri variaciji spektralnih lastnosti zidov ob dvoslojni zasteklitvi

Tudi pri različicah 4 (oranžen zid), 5 (siv zid) in 6 (moder zid) (slika 38), ko je bilo v okensko odprtino nameščeno steklo DP_cg (dvoslojno steklo brez premazov – glej poglavje 4.2.2), je bil zaznan podoben velikostni red napak kot pri različicah 1–3. Opažena je bila večja točnost programa ALFA pri vsaki izmed različic. $RMSE_A$ je 30,0 % nižji kakor $RMSE_L$ pri različici 4, 63,2 % v primeru različice 5 in 68,0 % v primeru različice 6. Vsak izmed simulacijskih spektrov, pridobljenih s programom ALFA, dobro sledi eksperimentalnim rezultatom. Nasprotno simulacije Larka pri različici 5 in 6 znatno podcenjujejo modri del spektra in precenjujejo rdeči del spektra pri različicah 5 in 6, kar pa ne drži za različico 4, ki dobro sledi obliki eksperimentalnega spektra pri $RMSE_L = 0,10$.

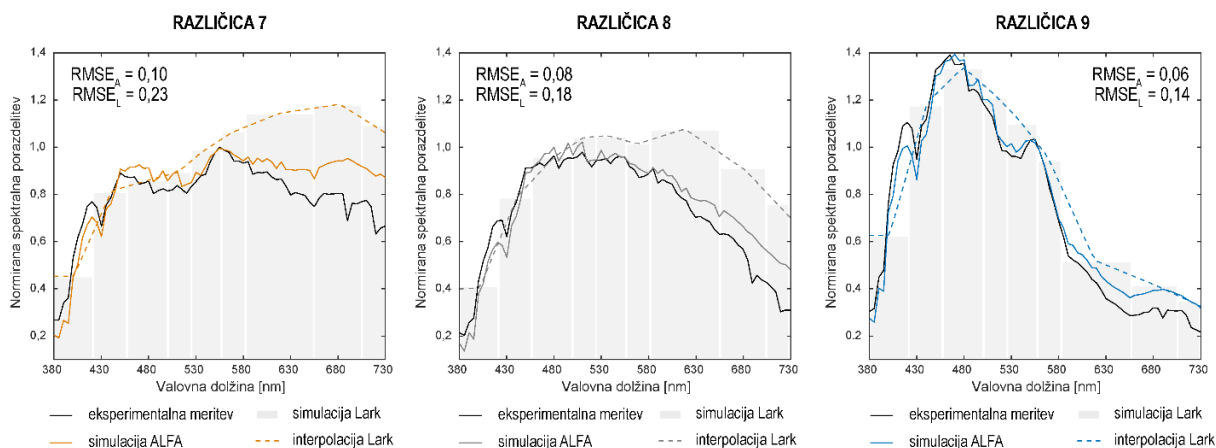


Slika 38: Primerjava eksperimentalnih meritev in simulacij programov ALFA in Lark za primere brez nameščene zasteklitve z menjavo barve vzhodne stene pri pogledu, usmerjenem proti steni.

Figure 38: Comparison of the experimental measurements with the simulations of ALFA and Lark for view towards the wall with varying wall colour and no glazing applied to the window opening.

3.2.8 Točnost pri variaciji spektralnih lastnosti zasteklitve in nevtralnem zidu

Različice 7, 8 in 9, predstavljene na sliki 39, prikazujejo napake v spektrih pri uporabi toplo obarvane zasteklitve (DP_brt), trislojne zasteklitve nevtralne barve (TP_2-l-e) in zasteklitve hladne barve (DP_bt2), ko je vzhodni zid pobarvan z nevtralno sivo (GS2). Tudi v primerih različnih stekel so spektri ALFA znatno natančnejši kakor spektri Larka. Najnižji $RMSE_A$ je bil izračunan pri različici 9 z $RMSE_A = 0,06$, kar je kar 2,3-krat manjša napaka kot $RMSE_L$. Največjo napako pri uporabi programskega orodja ALFA opazimo pri različici 7, kjer napaka $RMSE_A$ doseže 0,10 predvsem zaradi slabše natančnosti v toplem delu spektra (550–730 nm). Spektri simulacij Lark tako kot že v prejšnjih različicah, pri različicah 7, 8 in 9 ponovno precenjujejo rdeči del spektra. Modri del spektra istih različic pa lepše sledi eksperimentalnim krivuljam kot v različicah od 1 do 6.



Slika 39: Primerjava eksperimentalnih meritev in simulacij programov ALFA in Lark za primere s spreminjajočo zasteklitvijo in sivo obarvanim zidom pri pogledu, usmerjenem proti steni.

Figure 39: Comparison of the experimental measurements with the simulations of ALFA and Lark for view towards the wall with varying glazing and grey coloured walls.

3.2.9 Točnost izračuna relativne melanopske učinkovitosti in časovna učinkovitost

Večja točnost programa ALFA pri izračunu spektralnih distribucij prejete svetlobe testnega pisarniškega okolja se posledično odraža tudi v izračunu fotopsko in melanopsko uteženih osvetljenostih oz. njihovem količniku – RMU . Iz izračunanih napak simulacij ALFA ($Err_{RMU,A}$), ki so prikazane v preglednici 5, lahko odčitamo, da je pri različicah 1, 3 in 7 prišlo do popolnega ujemanja RMU z eksperimentom. Najvišja $Err_{RMU,A} = 2,80$ % glede na eksperimentalno meritev je bila izračunana pri različici 5. Največja relativna napaka v RMU simulacij Lark ($Err_{RMU,L}$) je bila opažena pri različici 6 z odstopanjem 16,15 %, najmanjša pa pri različici 1 z 1,33% odstopanjem od eksperimentalne vrednosti. Pri nobeni izmed različic točnosti simulacij Larka ne presegajo točnosti ALFE. Le različica 4 se pokaže v enakovredni Err_{RMU} 2,70 % pri obeh

simulacijah. Dodatno pa so simulacije ALFE v povprečju ($t_{\text{avgA}} = 18,6$ s) več kakor 22-krat hitreje od simulacij programa Lark ($t_{\text{avgL}} = 418,2$ s).

Preglednica 5: Napaka v *RMU* med eksperimentom in simulacijskima orodjema za izbrane različice prostorov. Podčrtane so relativne napake simulacije z manjšo ali enakovredno napako ter krajši izmed časov simuliranja.

Table 5: Error in *RME* between experiment and both simulation tools for the chosen room variations. Results with smaller or equal error are underlined. Shorter simulation times are underlined as well.

Različica	RMU_E	RMU_L	$err_{RMU,L}$	t_L	RMU_A	$err_{RMU,A}$	t_A
1	0,75	0,76	1,33 %	410,0 s	0,75	<u>0,00 %</u>	<u>19,0 s</u>
2	1,07	0,95	8,92 %	447,0 s	1,09	<u>1,86 %</u>	<u>18,0 s</u>
3	1,30	1,09	6,19 %	430,0 s	1,30	<u>0,00 %</u>	<u>18,0 s</u>
4	0,74	0,76	<u>2,70 %</u>	404,0 s	0,76	<u>2,70 %</u>	<u>19,0 s</u>
5	1,07	0,94	8,23 %	420,0 s	1,10	<u>2,80 %</u>	<u>19,0 s</u>
6	1,30	1,09	16,15 %	430,0 s	1,29	<u>0,97 %</u>	<u>18,0 s</u>
7	0,93	0,83	10,75 %	400,0 s	0,93	<u>0,00 %</u>	<u>19,0 s</u>
8	1,03	0,91	11,60 %	405,0 s	1,04	<u>0,77 %</u>	<u>19,0 s</u>
9	1,48	1,36	8,24 %	418,0 s	1,44	<u>2,70 %</u>	<u>18,0 s</u>
AVG			8,23 %	418,2 s		<u>1,33 %</u>	<u>18,6 s</u>

3.2.10 Izbor simulacijskega programa

Glede na opravljeno primerjavo simulacijskih programov z eksperimentalnimi meritvami smo se odločili, da za simulacije v tej doktorski disertaciji uporabljamo simulacijsko orodje ALFA, ki je znatno natančnejše z vidika izračunanih spektrov in tudi posledično *RMU*, obenem pa več kot 22-krat hitreje. Najverjetnejši vzrok podcenjevanja modrega dela spektrov, ovrednotenih v programu Lark, lahko najdemo v tem, da Lark sistematično podcenjuje »modrost neba«, ker povpreči izmerjeno globalno spektralno obsevanje skupaj s Soncem enakovredne energije, torej sta prispevek Sonca in neba zabrisana s povprečjem.

Ker smo se odločili za program ALFA, se moramo zavedati, da smo omejeni z algoritmom libRadtran, ki omogoča simulacijo jasnega, delno oblačnega, oblačnega in deževnega dne, brez možnosti, da bi lahko uporabljali poljubne spektre dnevne svetlobe pri simulacijah (kar omogoča Lark). Vendar lahko kljub temu s pomočjo vgrajenega algoritma libRadtran simuliramo stanje neba vsakega dne v letu brez potrebnih predhodnih meritev *SPD* dnevne svetlobe. *SPD* tako ustvarjenega neba se glede na opravljeno primerjavo v poglavju 3.2.5 izkažejo za zanesljive pri razmerah jasnega neba. Dodatno pa ne bomo omejeni z orientacijo

okenskih odprtih, če bo potek dela pokazal potrebo po simulaciji vseh strani neba. V nasprotju s programom Lark ALFA simulira direktno in difuzno spektralno komponento in ju ne povpreči.

»Ta stran je namenoma prazna«

4 VPLIV OPTIČNIH LASTNOSTI ODSEVNOSTI ZIDOV IN PRESEVNOSTI ZASTEKLITEV NA CIRKADIANI POTENCIAL DNEVNE SVETLOBE VZORČNE PISARNE

Povzetek

Kakovost in količina dnevne svetlobe v zaprtih prostorih sta v prvi vrsti pogojena z značilnostmi stavbnega ovoja in optičnimi lastnostmi odsevnih površin notranjega okolja. Na podlagi eksperimentalnega modela vzorčne pisarne v pomanjšanem merilu (1 : 5), postavljenega na strehi Fakultete za gradbeništvo in geodezijo UL, smo določili vpliv sedmih komercialnih tipov zasteklitve ter šestih barv pri treh ravneh nasičenosti na cirkadiani potencial (relativna melanopska učinkovitost in relativna cirkadiana učinkovitost) z vidika hipotetičnega uporabnika prostora. Tri izbrane vrste zasteklitve in tri barve stene z enako odsevnostjo smo nato uporabili v simulacijah dnevne osvetljenosti notranjega okolja enake pisarne. Analiza rezultatov eksperimentalne študije pokaže, da vpliv komercialne zasteklitve ob upoštevanju usmeritve analizirane ravnine lahko izniči vpliv zidu na cirkadiani potencial prostora. Prav tako ugotovimo, da je vpliv barve na cirkadiani potencial prostora večji kakor vpliv nasičenosti ob upoštevanju usmeritve analizirane ravnine. Celodnevne simulacijske študije pisarne pokažejo, da je kombinacija stekla z nizkoemisivskim premazom (velika vidna presevnost za dnevno svetlobo) in modro steno dosegla najboljše cirkadiano svetlobno okolje. Ravno nasprotno, torej najslabše cirkadiano svetlobno okolje je bilo izračunano za kombinacijo bronastega sončnozaščitnega stekla in oranžne stene. Na splošno je mogoče doseči boljše cirkadiano svetlobno okolje z materiali, za katere je značilna večja vidna presevnost ali odsevnost, kakor pri tistih, ki imajo majhno vidno odsevnost in presevnost.

Abstract

The quality and quantity of daylight indoors are primarily conditioned by the characteristics of the building envelope and the optical properties of the reflective surfaces of the indoor environment. Based on the experimental model of a sample office on a reduced scale (1:5), we determined the influence of 7 commercial types of glazing and 6 colour groups at three levels of saturation on the circadian potential from the perspective of a hypothetical occupant. 3 selected types of glazing and 3 wall colours with the same reflectivity were then used in diurnal simulations of the interior environment of the same office. Analysis of the results of the experimental study shows that the influence of commercial glazing, taking into account the orientation of the analysed plane, can nullify the influence of the wall on the circadian potential of the space. We also find that the influence of colour on the circadian potential of space is higher than the influence of saturation taking into account the orientation of the analysed plane. Diurnal office simulation studies show that the combination of low-emission glass (high visible transmittance for daylight) and blue wall achieved the best circadian lighting environment. On the contrary, the worst circadian lighting environment was calculated for a combination of bronze glass and orange wall. In general, a better circadian lighting environment can be achieved with materials characterized by higher visual transmittance or reflectivity than those with low visual reflectivity and transmissivity.

OBJAVLJENO IZ TEGA POGLAVJA:

Potočnik, J., Košir, M., 2020. Influence of commercial glazing and wall colours on the resulting non-visual daylight conditions of an office. *Building and Environment* 171: 106627. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106627>

4.1 Uvod

Kot je bilo podrobneje predstavljeno že v teoretičnih izhodiščih, se cirkadiani sistem na svetlobo ne odziva kakor vidni. Cirkadiani sistem je bolj občutljiv za modri del spektra svetlobe v nasprotju z vidnim sistemom, ki je najbolj občutljiv za rumenozeleni del vidnega spektra svetlobe. Kar pomeni, da se cirkadiani in vidni sistem drugače odzivata na enak vidni dražljaj (enako barvo svetlobe). Zato smo v prvem delu študije proučili dualnost vpliva enakih vidnih dražljajev različnih izbranih barv pri treh različnih ravneh nasičenosti na steni in različnih pogosto uporabljenih komercialnih zasteklitev. Eksperimentalno smo preverili, koliko lahko sprememba barve ali nasičenost barve stene in menjava zasteklitve vplivajo na cirkadiani in vidni sistem. S tem odgovorimo na vprašanja: »Ali je vplivnost odsevnosti večja kakor vplivnost spremembe barve?« in »Ali lahko vplivnost presevnosti komercialne zasteklitve izniči vpliv odsevnosti stene?« V drugem, simulacijskem delu pa smo na podlagi izbranih kombinacij zasteklitev in barv sten proučili, kakšen je njihov vpliv na cirkadiano in vidno svetlobno okolje med karakterističnim delovnim dnevom 21. marca 2019 v spektralnih razmerah jasnega in oblačnega spektralnega neba v Ljubljani z vidika hipotetičnega statičnega uporabnika v prostoru.

4.2 Metodologija eksperimentalnih in simulacijskih meritev

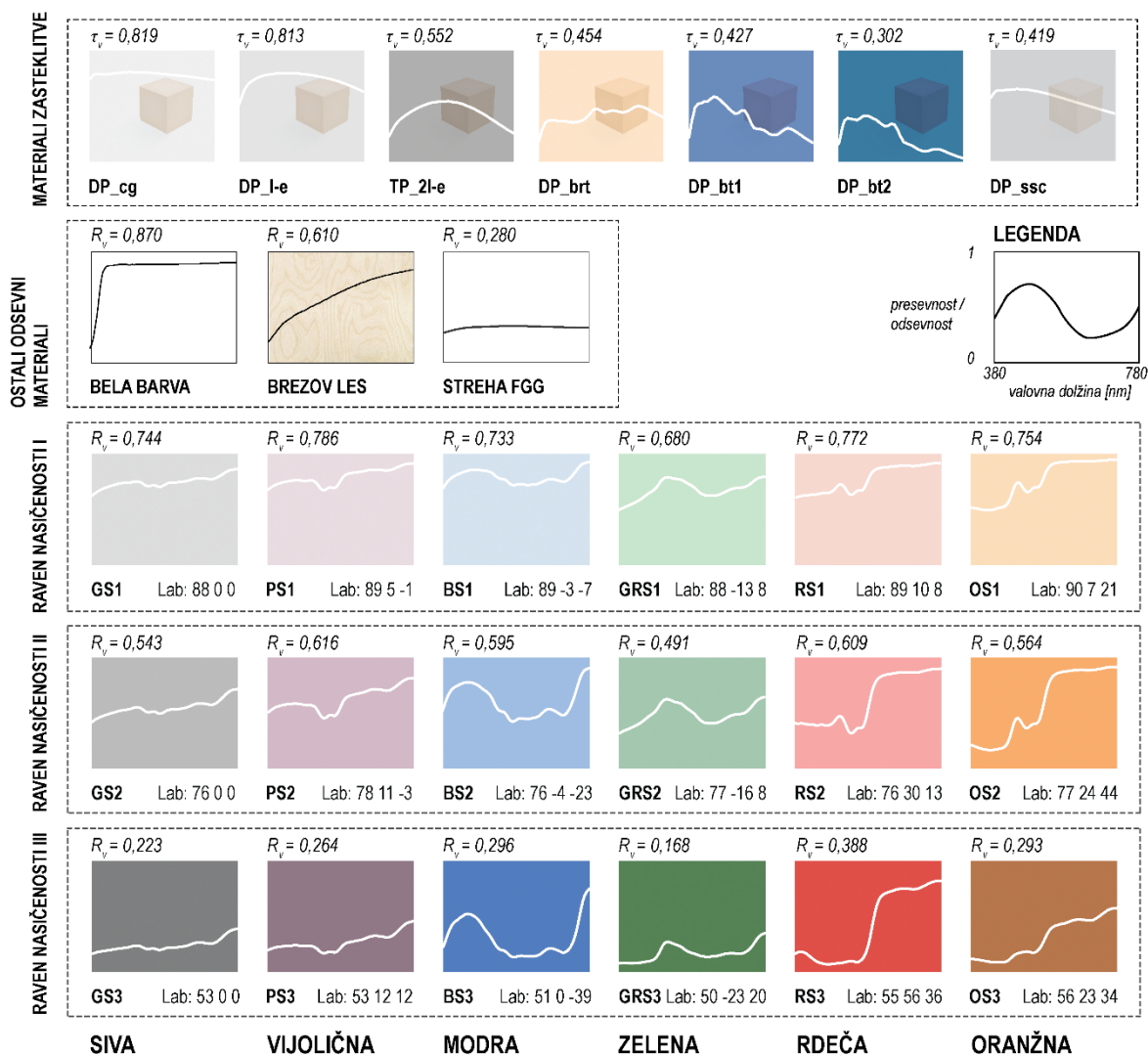
4.2.1 Zasnova eksperimentalnega modela

Na streho Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani je bil 28. februarja 2019 in 3. marca 2019 postavljen eksperimentalen pomanjšan model majhne celične pisarne z enim severno orientiranim oknom. Model je bil podrobneje že predstavljen v poglavju 3.2.1 (slika 29). Namen te eksperimentalne študije je bil določiti vpliv optičnih lastnosti 19 različnih odsevnih materialov in sedmih presevnih materialov na svetlobno okolje, kot bi ga doživljal hipotetični uporabnik prostora (merilno mesto S2, glej sliko 29) v takšni pisarni. V eksperimentu smo sočasno merili svetlobno okolje na horizontalni ravnini v zunanosti (merilno mesto S1 in S3, glej sliko 29) in svetlobno okolje na vertikalni ravnini hipotetičnega sedečega opazovalca v notranjosti, ki je obrnjen proti vzhodni steni, katere spektralne lastnosti (barve) smo spreminjali. Meritve v S1 služijo merjenju stalnosti barve neba (SPD dnevne svetlobe).

4.2.2 Materiali, uporabljeni v eksperimentu

V modelu pisarne je bilo skupaj uporabljenih 20 različnih odsevnih materialov in sedem presevnih materialov – komercialnih zasteklitev, katerih spektri odsevnosti ali presevnosti so prikazani na sliki 40. Kot smo že omenili, je bil model izdelan iz lesenih vezanih plošč brezovega lesa z vidno odsevnostjo $R_v = 0,610$. Vse stene in strop, z izjemo tal, ki so ostala v izvedbi neobdelanega brezovega lesa (imitacija parketa), so bili pobarvani z belo barvo v treh slojih – izmerjena R_v tako pobarvanih sten in stropa je znašala 0,870.

Eksperimentalne meritve so bile izvedene za vsako kombinacijo izmed 19 različnih materialov na vzhodni steni (modro obarvana stena na slikah 32 in 33, glej poglavje 3.2.1), z vsakim izmed 7 tipov zasteklitve, vključno s primeri, ko okenske odprtine niso bile zapolnjene s steklom. Skupaj je bilo tako izmerjenih 152 kombinacij materialnosti vzhodne stene in zasteklitve. Odsevnost vzhodne stene je bila spreminjana tako, da smo na belo pobarvano površino stene nameščali izbrane barve, ki so bile natisnjene na papir s pomočjo visokozmogljivega brizgalnega tiskalnika. Izbranih je bilo pet barvnih odtenkov (vijoličasta, modra, zelena, rdeča in oranžna) ter nevtralni barvni odtenek (siva) pri treh ravneh nasičenosti; raven nasičenosti I – $R_v \approx 0,75$, raven nasičenosti II – $R_v \approx 0,50$ in raven nasičenosti III – $R_v \approx 0,25$ (slika 40).



Slika 40: Optične lastnosti odsevnih in presevnih materialov, uporabljenih v pomanjšanem modelu. Na vzorcih materialov so narisane odsevnosti/presevnosti po valovnih dolžinah.

Figure 40: Optical properties of used reflective and transmissive materials used in the scale model. Each material sample (reflective or transmissive) is depicted with its respective plot of spectral reflectivity or transmissivity.

Odsevnost vsakega izmed materialov je bila izmerjena v Laboratoriju Oddelka za arhitekturo, grajeno okolje in konstrukcijsko inženirstvo (Department of Architecture, Built Environment and Construction Engineering) Politehniške fakultete v Milanu [136] s spektrofotometrom Perkin Elmer Lambda 950 UV-Vis-NIR [137] v območju vidne svetlobe (380–780 nm) pri 1 nm resoluciji.

Sedem izbranih komercialnih tipov zasteklitev je izdelalo podjetje Reflex, d. o. o. [133]. Izbrali smo tri tipe toplotnozaščitnih stekel (preglednica 6). Dvoslojno zasteklitev brez premazov DP_cg, dvoslojno zasteklitev z nizkoemisijemskim premazom na zunanji strani notranjega stekla DP_l-e in trislojno steklo z nizkoemisijemskim premazom na notranjem in zunanjem steklu TP_2l-e. Preostala stekla spadajo med solarno- in toplotnozaščitna dvoslojna stekla z notranjim

prozornim nizkoemisijским steklom in zunanjim steklom, ki je pobarvano bronasto (DP-brt), modro (DP-bt1), temno modro (DP-bt2) ali pa z nanosom spektralno selektivnega premaza (DP-ssc). Presevnosti (τ_v) in indeks barvnega videza (R_a) so bili izračunani v programu Optics 6 [139] po standardu SIST EN 410:2011 [116].

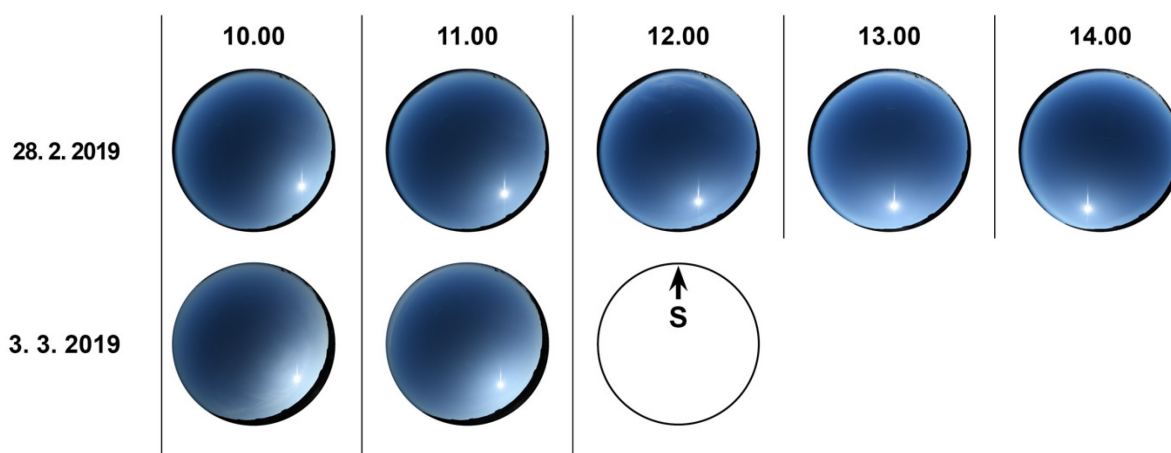
Preglednica 6: Osnovne lastnosti uporabljenih tipov zasteklitev.
 Table 6: Basic glazing type properties.

Skupina	Poimenovanje	Sestava*	τ_v^{**}	τ_m^{***}	R_a^{**}	Opis
Toplotnozaščitna stekla	DP_cg	4/16/4	0,819	0,820	0,99	Dve prozorni stekli.
	DP_l-e	4/16/4	0,813	0,805	0,98	Dve prozorni stekli, notranje z nizkoemisijским premazom.
	TP_2l-e	4/16/4/16/4	0,552	0,813	0,97	Tri prozorna stekla, notranje in zunanje z nizkoemisijским premazom.
Solarno- in toplotnozaščitna stekla	DP_brt	6/16/4	0,454	0,396	0,92	Zunanje steklo pobarvano bronasto, notranje prozorno z nizkoemisijским premazom.
	DP_bt1	8/16/4	0,427	0,540	0,75	Zunanje steklo pobarvano modro, notranje prozorno z nizkoemisijским premazom.
	DP_bt2	6/16/4	0,302	0,401	0,61	Zunanje steklo pobarvano temno modro, notranje prozorno z nizkoemisijским premazom.
	DP_ssc	6/16/4	0,491	0,479	0,94	Zunanje steklo s solarno selektivnim premazom, notranje prozorno z nizkoemisijским premazom.

* Podana v mm (zunanje steklo/medstekelni prostor/notranje steklo).
 ** Izračunano po standardu SIST EN 410:2011 [110].
 *** Izračunano po enačbi 20 iz poglavja 2.5.

4.2.3 Zunanje svetlobne razmere

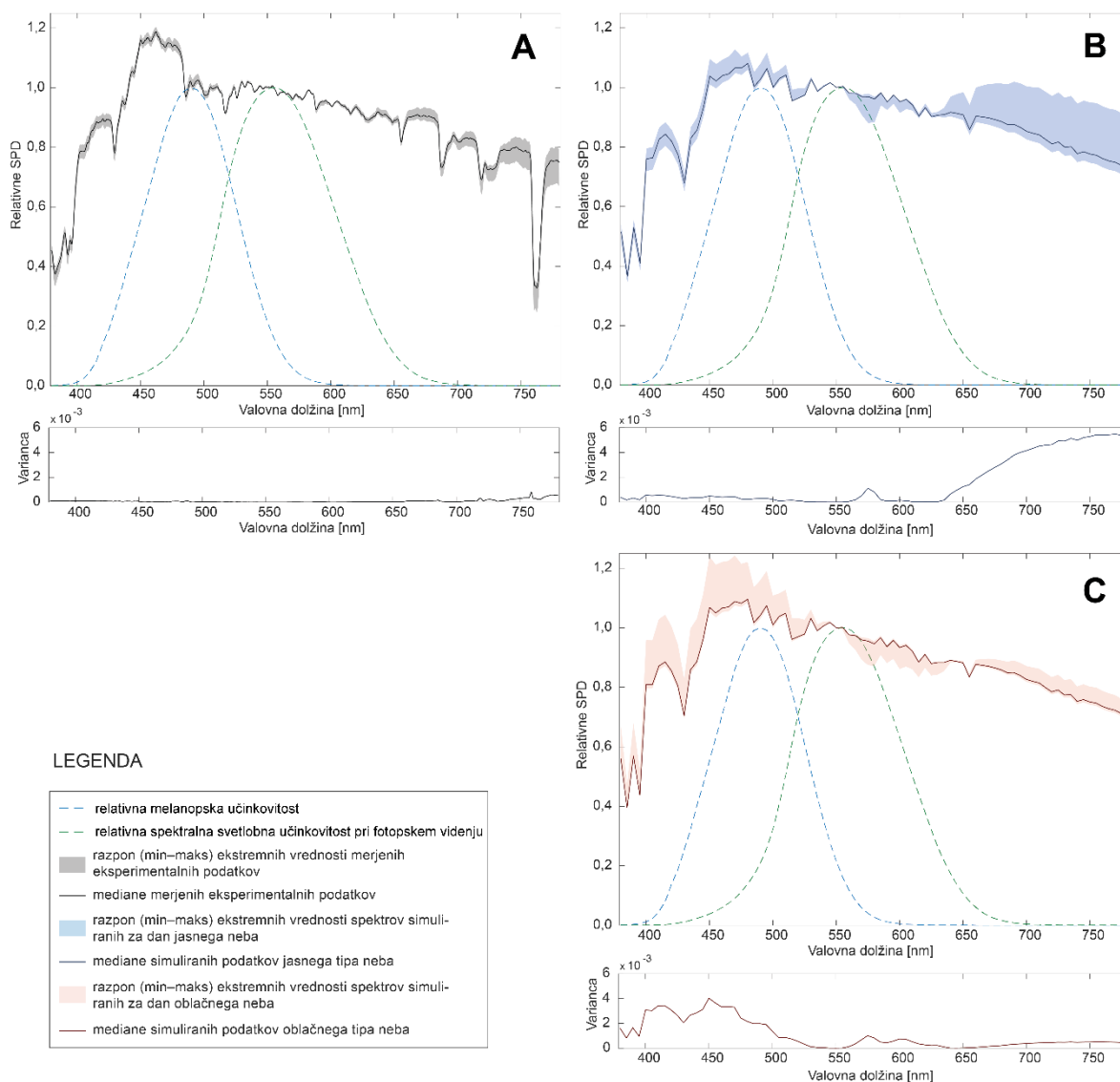
Kot smo že omenili, je eksperiment potekal 28. februarja 2019 med 10.00 in 14.00 ter 3. marca 2019 med 10.00 in 11.00 na strehi FGG UL. Prikazi hemisferičnih posnetkov neba na sliki 41 dokazujejo, da je bilo nebo med izvajanjem eksperimentov tako 28. februarja kakor tudi 3. marca 2019 popolnoma jasno z nizko atmosfersko motnostjo.



Slika 41: Hemisferski posnetki neba v času trajanja eksperimenta.

Figure 41: Hemispheric photographs of sky state during the experiment conduction.

Merjena globalna osvetljenost ($E_{e,h}$) 28. februarja 2019 je znašala med 45.055 lx in 65.470 lx, 3. marca 2019 pa med 46.880 lx in 62.300 lx. O stalnosti barve neba priča tudi normaliziran spekter spektralne gostote sevalne moči dnevne svetlobe (normalizacija na 555 nm), merjene v točki S1, ki je prikazana na sliki 42. Siva ovojnica na grafu prikazuje vse izmerjene spektre med 28. februarjem in 3. marcem 2019, črna črta pa prikazuje povprečje vseh opravljenih meritev. Varianca je najvišja v rdečem delu spektra v območju po 650 nm, kjer ima svetloba minimalen vpliv na vidni ali ničten vpliv na cirkadiani sistem.



Slika 42: Normalizirana spektralna gostota sevalne moči (*SPD*) izmerjenih zunanjih razmer dnevne svetlobe med eksperimentom 28. 2. in 3. 3. 2019 (graf A). Normalizirane *SPD* simuliranih zunanjih razmer 21. 3. 2019 za jasni tip neba (graf B) in oblačni tip neba (graf C).

Figure 42: Normalized spectral power distribution (*SPD*) of measured daylight during experiments on the 28th of February and the 3rd of March. Normalized *SPD* of exterior simulated sky *SPDs* on the 21st of March for the clear (plot B) and overcast sky (plot C).

4.2.4 Vzpostavitev simulacijskega dela

Geometrijski simulacijski model pisarne je bil ustvarjen z uporabo Rhinoceros v6 [44] na podlagi dimenzij, geometrije in usmeritve, kot je predstavljeno v poglavju 3.2.1 in na sliki 32. Predvideli smo, da je model v pritličju z vizualno odsevnostjo okoliških tal $R_v = 0,28$ (izmerjena odsevnost tal strehe UL FGG). Geometrijski model je bil uvožen v spektralno programsko opremo za sledenje žarkom, ki se uporablja za ocenjevanje nevizualnih učinkov svetlobe – ALFA (glej poglavje 2.6.2). Za simulacije so bile uporabljene lastnosti spektralnega neba,

ustvarjenega z uporabo libRadtran [128]. Različne vrste neba so bile izračunane za oblačni in jasni tip neba 21. marca 2019 (slika 42, ploskev B in C) za vsako uro delovnega dne, predvidenega v skladu z urnikom zasedenosti poslovnih stavb, predlaganim v SIST EN 15232-1:2018 [140]. To pomeni, da smo svetlostne razmere proučevali med 7.00 in 18.00 21. marca 2019 v točki S2 s simulacijami, ki so bile izvedene pri nastavitvah -ab 6 (ambientalni odboji), pri 60 računskih prehodih (angl. *passes*) za dnevni cikel jasnega in oblačnega neba. Za vsako izmed stanj neba je bilo ocenjenih devet kombinacij tipa zasteklitve in barv sten. Kombinacije barv zasteklitve in sten smo izbrali glede na rezultate eksperimentalnega dela študije, da bi vključili primere, ki zajemajo celoten razpon ugotovljenih vplivov na nevizualne razmere. Materiali, uporabljeni pri simulaciji, so bili ustvarjeni v skladu z izmerjenimi in/ali izračunanimi podatki o odsevnostih in presevnostih, ki so predstavljene v poglavju 4.2.2. Multispektralni program ALFA lahko natančno izračuna spektralno sevanje na izbrani točki (glej poglavje 2.6.2). Zato smo lahko za vsako izmed simulacijskih sekvenc poleg fotopskih lx in EML izračunali tudi vrednosti cirkadianega stimulusa (CS).

4.2.5 Vrednotenje eksperimentalnih rezultatov

Kot vemo, se intenziteta dnevne svetlobe konstantno spreminja, zato vpliva različnih tipov zasteklitev in barv eksperimentalnega modela ni bilo mogoče primerjati v absolutnih količinah, bodisi melanopskih ali fotopskih. Da bi lahko dosegli primerljivost med vplivi vseh v eksperimentu obravnavanih kombinacij, smo za vsako eksperimentalno meritev izračunali *RMU* (količnik relativne melanopske učinkovitosti), ki omogoča primerljivost rezultatov neodvisno od absolutnih vrednosti osvetljenosti (glej poglavje 3.2.4.2). Dodatno smo v namen te študije analogno z *RMU* opredelili še količnik relativne cirkadiane učinkovitosti – *RCU*. *RCU* temelji na metodologiji metrike cirkadiane svetlobe (CL_A) Rea in sod. [80] (glej poglavje 2.4.4). Vendar moramo omeniti, da je treba *RCU* računati pri enaki osvetljenosti, če želimo, da so rezultati primerljivi. Metrika CL_A je namreč dodatno občutljiva za količino osvetljenosti. Kakor je to prikazano na sliki 43 na vzorcu treh tipov neba treh karakterističnih dni, lahko *RCU* pri 50.000 lx predstavlja več kot 100 % višjo vrednost kakor *RCU* enakega spektra pri 500 lx (glej prilogo A.2). *RCU* notranjega okolja je bil zato računani pri osvetljenostih 500 lx, ki predstavlja osvetljenost, ki je v notranjem okolju pogosta.

Vsi izmerjeni spektri so bili normirani na osvetljenost 500 lx, iz katerih smo *RCU* izračunali po naslednji enačbi:

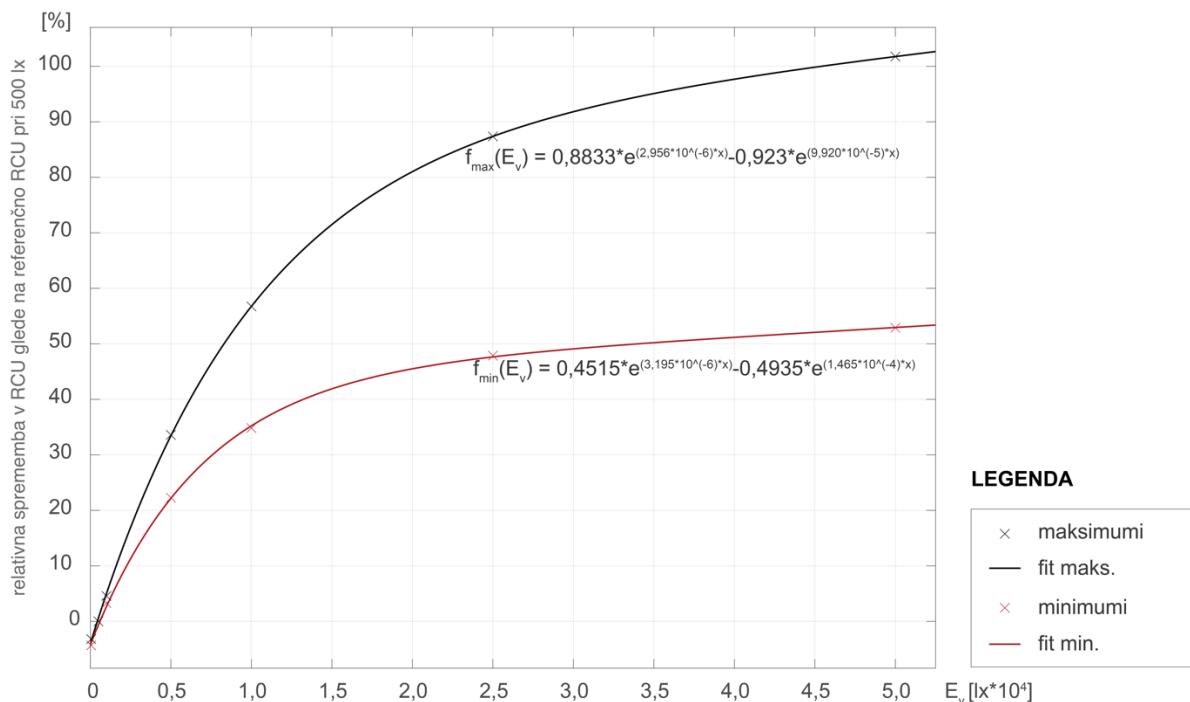
$$RCU = \frac{CL_A}{E} \quad (33),$$

pri čemer je:

RCU – količnik relativne cirkadiane učinkovitosti pri 500 lx [-],

CL_A – količina cirkadiane svetlobe normiranega spektra 500 lx [CL_A],

E –osvetljenost, ki je nespremenljiva pri 500 lx.



Slika 43: Relativna sprememba v RCU glede na referenčno RCU pri 500 lx v primerjavi z drugimi magnitudami osvetljenosti na vzorcu simuliranih treh tipov neba (jasno, delo oblačno in oblačno) za vsako uro 21. marca, 21. junija in 21. decembra (za dodatno razlago glej prilogo A.2).

Figure 43: Relative difference in RCU according to RCU at 500 lx in comparison to other magnitudes of illuminance for each daylight hour of 21. March, June and December (for detailed explanation see Priloga A.2).

4.2.6 Primerjava vpliva odsevnosti in barve odsevnih površin na relativno melanopsko in cirkadiano učinkovitost

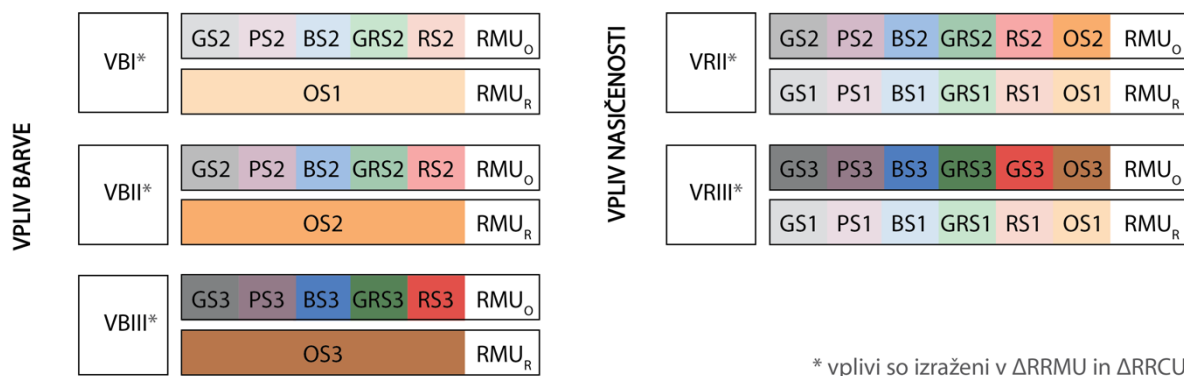
Vpliv barve na relativno melanopsko in cirkadiano učinkovitost smo izračunali pri ravni nasičenosti I (VBI), II (VBII) in III (VBIII). Vpliv nasičenosti pa smo izračunali pri spremembi iz ravni nasičenosti I v II (VRII) in pri spremembi iz ravni nasičenosti II v III (VRIII). Vplivnost barv in nasičenosti smo izračunali po naslednji enačbi:

$$\Delta RRMU = \left(\frac{RMU_O - RMU_R}{RMU_R} \right) \cdot 100 \text{ ali } \Delta RRCU = \left(\frac{RCU_O - RCU_R}{RCU_R} \right) \cdot 100 \quad (34),$$

pri čemer je:

$\Delta RRMU$ ali $\Delta RRCU$ – relativni vpliv odsevnosti ali barve z vidika RME ali RCU [%],
 RMU_O ali RCU_O – opazovana relativna melanopska ali cirkadiana učinkovitost [-],
 RMU_R ali RCU_R – referenčna relativna melanopska ali cirkadiana učinkovitost [-].

Vpliv barve (VBI, VBII in VBIII) smo izračunali za vsako raven nasičenosti posebej. Vpliv barve je bil ovrednoten na podlagi oranžnih odtenkov, ki so bili izbrani kot referenčni materiali – RMU_R in RCU_R . OS1 za VBI, OS2 za VBII in OS3 za VBIII. Oranžni materiali predstavljajo najnižje izmerjene RMU in RCU (glej sliki 45 in 46), torej primerjava z oranžnimi odtenki izraža največja možna odstopanja v kombinaciji z RMU oz. RCU najučinkovitejšim materialom, kar posledično predstavlja tudi največji vpliv zaradi barve. Vpliv odsevnosti smo izračunali za vsako barvo posebej. Vpliv spremembe nasičenosti smo izračunali pri spremembi z nasičenosti II na nasičenost I (VRII) ter pri spremembi z nasičenosti III na nasičenost I (VRIII). Natančna opredelitev parov pri izračunu vpliva nasičenosti in barve je prikazana na sliki 44.



Slika 44: Metoda izračuna vplivnosti barv in vplivnosti nasičenosti na relativni melanopski in cirkadiani potencial.

Figure 44: Method for evaluation of the influence of colour and the influence of saturation on the relative melanopic and circadian efficacy.

4.2.7 Vrednotenje simulacijskih rezultatov

Pridobljene rezultate simulacij smo z vidika cirkadiane osvetljenosti ovrednotili z dvema najpogosteje uporabljenima metrikama v literaturi – cirkadiani stimulus [80] in ekvivalentno melanopsko osvetljenostjo [13] (glej poglavje 2.4.4). Za mejne vrednosti CS in ekvivalentnega melanopskega luxa (EML) za doseganje želenega nevizualnega odziva v notranjih prostorih smo upoštevali priporočila, ki jih navajajo Figueiro in sod. [96] in Chen in sod. [136] za CS ter priporočila po standardu WELL [142] z vidika metrike ekvivalentne melanopske osvetljenosti. Dodatno smo ocenili tudi vizualno udobje z uporabo sprejemljivih vrednosti vertikalne osvetljenosti na višini očišča sedečega človeka, ki ne povzročajo bleščanja, ki jih je predlagalo več raziskovalcev [143–148] za pisarniška opravila, s smerjo pogleda vzporedno z oknom.

Omenjena merila za ocenjevanje so navedena v preglednici 7. Simulacije dnevne osvetljenosti jasnega in oblačnega tipičnega dne so bile ocenjene v skladu z urnikom zasedenosti prostora po standardu SIST EN 15232-1:2018 [140].

Preglednica 7: Kriteriji nevizualnega in vizualnega vpliva, uporabljeni pri vrednotenju rezultatov dnevnih simulacij.

Table 7: Non-visual and visual threshold criteria for the evaluation of the diurnal study results.

Skupina	Poimenovanje	Prag kriterija	Komentarji
Nevizualni vpliv	cirkadiani stimulus	> 0,3 [96, 141]	Vrednosti CS nad 0,3 ali višje so bile spoznane kot zadostne količine svetlobe za zmanjševanje zaspanosti in povečanje pozornosti pri pisarniških delavcih.
	ekvivalentna melanopska osvetljenost	> 200 EML [142]	Naj bi bilo doseženo med 9.00 in 13.00 v najmanj 75-% deležu delovnih mest v pisarni.
Vizualni vpliv	udobna vertikalna osvetljenost na ravnini očišča	< 875 lx [143] < 2000 lx [146]	Zgornje vrednosti udobne vertikalne očiščne osvetljenosti v primeru smeri pogleda vzporedno z oknom, ki so jo določili Wymelenberg in Inanici [143] ter Bian in Luo [146]. Vrednosti, ki so jih predlagali Jakubiec in sod. [144] ter Karlsen in sod. [145], padejo med zgoraj omenjena kriterija Wymelenberg in Inanici ter Bian in Luo.

4.3 Rezultati

Rezultati bodo predstavljeni v dveh delih. V prvem bo predstavljen eksperimentalno izpeljan vpliv različnih izbranih komercialnih vrst zasteklitve in barv stene na nastale *RME* in *RMU* v primeru pogleda, ki je usmerjen proti vzhodni steni pisarne vzporedno z oknom. V drugem delu bodo ocenjene multispektralne simulacije celične pisarne v realnem merilu, kjer bo simuliran vpliv izbranih vrst zasteklitev in barv sten pod jasnim in oblačnim nebom na podlagi meril vizualnega udobja in nevizualnih vidikov dnevne svetlobe na hipotetičnem delovnem mestu uporabnika.

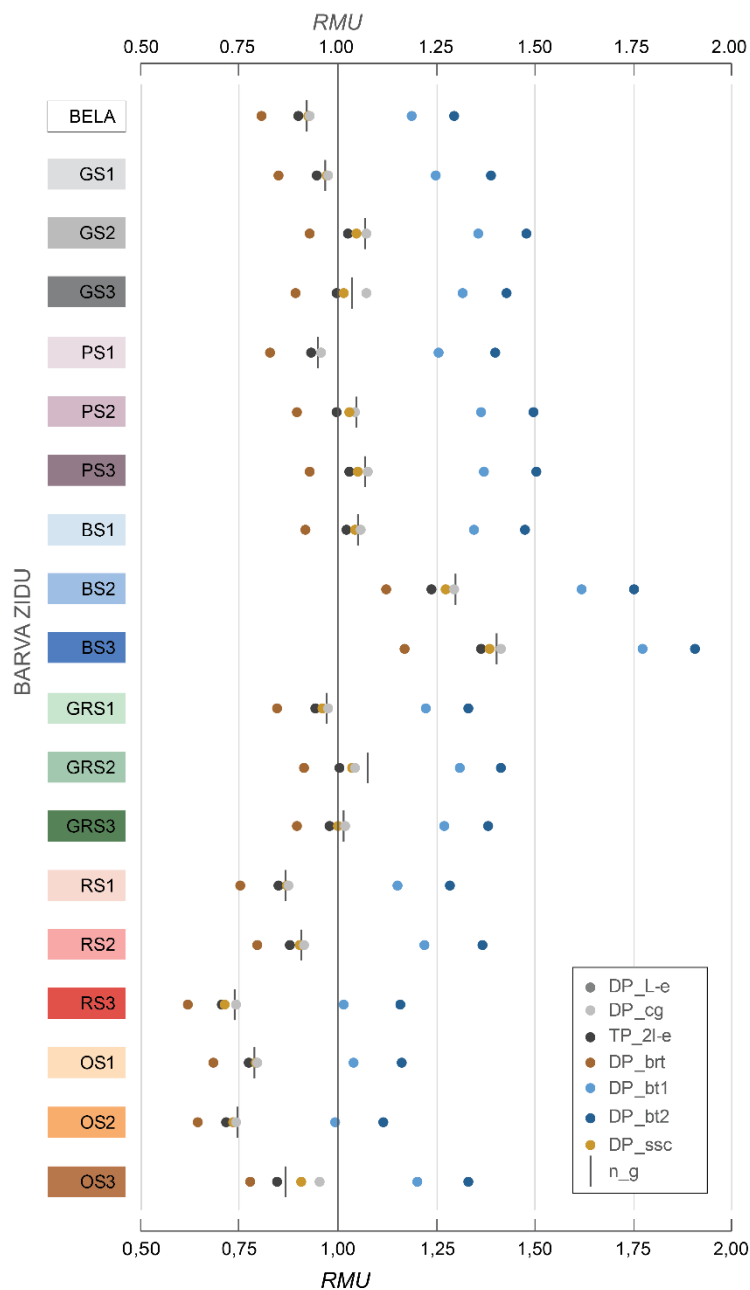
4.3.1 Rezultati eksperimenta

4.3.1.1 Relativna melanopska učinkovitost – *RMU*

Rezultati relativne melanopske učinkovitosti, izraženi kot količnik *RMU* eksperimentalno analiziranih barv stene in različnih komercialnih okenskih zasteklitev, so predstavljeni na sliki 45. Doseženi rezultati s privzetimi spektralno nevtralnimi notranjimi pogoji (vzhodna stena, pobarvana v belo barvo) jasno kažejo, da uporaba toplotnozaščitnih stekel (*DP_cg*, *DP_1-e* in *TP_2l-e*, glej preglednico 7) nima bistvenega učinka na *RMU* v primerjavi z *RMU* referenčnega primera (tj. *n_g* - brez stekla). V nasprotju s tem je skupina solarno- in toplotnozaščitnih stekel (preglednica 6), razen zasteklitve *DP_scc*, pokazala znatno odstopanje *RMU* glede na referenco *n_g* (slika 45). Bronasto obarvana zasteklitve (*DP_brt*) je edina vrsta

izmed obravnavanih zasteklitev, ki znatno negativno vpliva ($RMU = 0,807$) na doseženi melanopski potencial dnevne svetlobe. Ta učinek je jasno izražen z vrednostjo RMU , ki v primerjavi s stanjem brez zasteklitve kaže razliko $-0,115$ in zmanjšanje za $12,5\%$ glede na referenco n_g . V nasprotju z bronasto obarvano zasteklitvijo modro obarvani zasteklitvi (DP_bt1 in DP_bt2) pozitivno vplivata na koeficient RMU . V primeru DP_bt2 je bila dosežena največja relativna melanopska učinkovitost ($RMU = 1,298$) med vsemi vrstami zasteklitve, kar se odraža v $40,8\%$ ($\Delta RMU = 0,376$) večji RMU kot pri referenčnem primeru n_g .

Podobno kot vpliv različnih vrst zasteklitve je tudi vpliv različnih odtenkov barv sten viden z opazovanjem vrednosti RMU različnih barv brez zasteklitve (tj. brez_stekla na sliki 45). Rezultati ne kažejo bistvenih razlik med RMU za vijoličaste in zelene odtenke, neodvisno od ravni odsevnosti, v primerjavi s skupino monokromatskih tonov (tj. sive in bele barve). Vendar pa je mogoče opaziti precejšnje odstopanje v primeru modrih, rdečih in oranžnih barvnih skupin v primerjavi z monokromatskimi barvami (slika 45). Modri odtenki kažejo očiten trend večanja vrednosti RMU z zmanjšanjem odsevnosti. Poleg tega postane očitno, da če dosežene vrednosti RMU modre barvne skupine primerjamo s sivo skupino pri različnih stopnjah nasičenosti, se tudi razlike do sive skupine povečajo z zmanjšanjem nasičenosti. Razlika med RMU omenjenih barvnih skupin znaša $8,6\%$ ($\Delta RMU = 0,083$) pri nasičenosti I, $21,3\%$ ($\Delta RMU = 0,228$) pri nasičenosti II in $35,2\%$ ($\Delta RMU = 0,365$) pri nasičenosti III. Posledično ima modri odtenek na stopnji nasičenosti III največjo vrednost količnika RMU ($RMU = 1,403$) izmed vseh ocenjenih barvnih odtenkov in odsevov (slika 45, glej prilogo A.4).



Slika 45: Relativna melanopska učinkovitost - RMU za vsako izmed izmerjenih kombinacij, ko je senzor obrnjen proti steni.

Figure 45: Relative melanopic efficacy - RMU for each of the measured cases when the sensor is facing towards the wall.

V nasprotju z modro barvno skupino rdeči in oranžni odtenki zmanjšujejo RMU (slika 45). Oranžni se pri nasičenosti I in II pokažejo v očitno najmanjših doseženih RMU v svojih skupinah nasičenosti. OS1 se odraža v 18,8 % ($\Delta RMU = -0,182$) razlike v primerjavi z GS1 in OS2 v 30,2 % ($\Delta RMU = -0,323$) razlike glede na GS2. Rdeča se pri ravni nasičenosti III (RS3) izraža v splošno najnižji vrednosti izmed vseh proučevanih barv ($RMU = 0,738$). Odtенок RS3 izraža 28,9 % ($\Delta RMU = -0,300$) nižjo relativno melanopsko učinkovitost kakor sivo pobarvana stena primerljivega R_v (GS3).

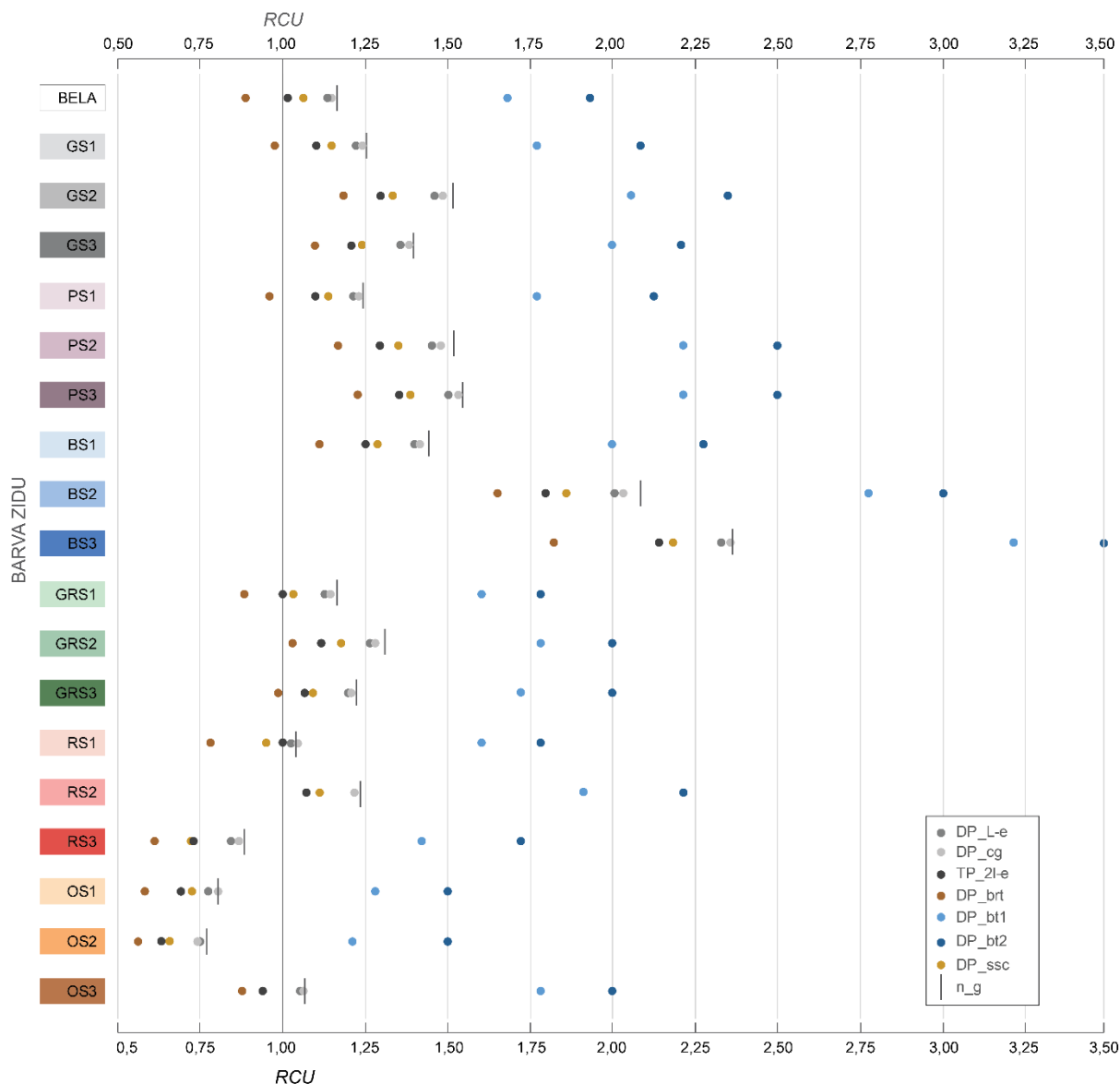
Vzrok, zakaj ima barva stene RS3, in ne OS3, najnižji *RMU* med vsemi analiziranimi barvami, lahko najdemo v spektralni odsevnosti posameznih vzorcev rdeče in oranžne barve, kot je to vidno na sliki 40. Odsevnost pri krajših valovnih dolžinah (tj. vijoličasti in modri del spektra) vzorca RS3 je izjemno majhna v primerjavi z odsevnostjo pri daljših valovnih dolžinah vidnega spektra (tj. oranžni in rdeči del spektra). Razlika v odsevnosti med krajšimi in daljšimi valovnimi dolžinami je manj izrazita, zato tudi manj negativno vplivajo na *RMU*. Zato se je vrednost *RMU* barvnega vzorca RS3 bistveno zmanjšala v primerjavi z vzorci RS1 in RS2, ki imajo bistveno večjo odsevnost pri krajših valovnih dolžinah v primerjavi z odsevnostjo pri daljših valovnih dolžinah (slika 40).

Če opazujemo kombinacije različnih vrst zasteklitve in barve sten, predstavljenih na sliki 45, postane očitno, da so *RMU* vijoličastih in zelenih barv sten primerljive z monokromatskimi barvami (sivine in bela), neodvisno od tega, s katero zasteklitvijo jih kombiniramo. To velja ne glede na stopnjo nasičenosti omenjenih barvnih skupin sten. Za druge analizirane barve sten lahko ugotovimo, da modri odtenki barv sten povečajo doseženo *RMU* ne glede na zasteklitev (slika 45), med tem pa rdeča in oranžna barva zmanjšujeta *RMU* v primerjavi s sivimi stenami. Podobno obnašanje lahko opazimo tudi pri vrstah zasteklitve, med katerimi zasteklitvi DP_bt1 in DP_bt2 zvišata količnik *RMU*, medtem ko DP_brt povzroči zmanjšanje *RMU* v primerjavi s situacijami brez zasteklitve ali s toplotnoizolacijsko skupino zasteklitev (slika 45 in priloga A.4).

4.3.1.2 Relativna cirkadiana učinkovitost – RCU

Rezultati relativne cirkadiane učinkovitosti (*RCU*) so prikazani na sliki 46 in natančneje v prilogi A.4. Kakor že z vidika *RMU*, tudi rezultati *RCU*, doseženi s privzetimi notranjimi pogoji (tj. n_g), pokažejo, da stekla iz toplotnozaščitne skupine zasteklitev (DP_cg, DP_1-e in TP_2l-e, glej preglednico 7) nimajo bistvenega učinka na *RCU* v primerjavi z referenčnim primerom n_g. V nasprotju s skupino toplotnozaščitnih zasteklitev skupina solarno- in toplotnozaščitnih zasteklitev znatno spremeni *RCU* glede na referenco n_g. Bronasta (DP_brt) zniža *RCU* za 23,9 % ($\Delta RCU = -0,280$) glede na primer n_g, *RCU* kombinacije DP_brt in bele barve tako znaša 0,890 in n_g in bele barve 1,170. Vpliv modrih zaseklitev (DP_bt1 in DP_bt2) je izrazito pozitiven. Kombinacija DP_bt2 in bele barve ima največjo *RCU* = 1,89 med meritvami z belo obarvanimi stenami, kar je 61,5 % večji *RCU* v primerjavi z referenčnim primerom n_g.

Podobno kot vpliv različnih vrst zasteklitve je tudi vpliv različnih odtenkov barv sten viden z opazovanjem vrednosti *RCU* različnih barv, kadar ni nameščene zasteklitve (tj. *n_g* na sliki 46). Ko rezultate primerjamo po *RCU*, vijoličasta tona PS1 in PS2 skoraj sovpadata z *RCU* sivih tonov GS1 in GS2. Poudarjen pozitiven vpliv barve v primerjavi s sivinami je mogoče opaziti pri modrih odtenkih, katerih razlika v *RCU* se podobno kot pri ocenjevanju z *RMU* veča z zmanjševanjem odsevnosti. Torej če primerjamo *RCU* sive skupine pri različnih odsevnostih z modro barvo pri enakih odsevnostih, se razlika v *RMU* veča z zmanjševanjem odsevnosti. Razlika pri ravni nasičenosti I znaša 23,0 % ($\Delta RCU = 0,270$), pri ravni nasičenosti II 37,5 % ($\Delta RCU = 0,570$) in 68,6 % ($\Delta RCU = 0,960$) pri ravni nasičenosti III, *RCU* BS3 in *n_g* (slika 46, glej tudi prilogo A.4). Podobno kakor pri ocenjevanju z *RMU* tudi na *RCU* topli odtenki vplivajo negativno. Najbolj izrazite negativne vplive na *RCU* imata OS1 in OS2, ki glede na referenčni GS1 in GS2 brez uporabljenih zasteklitev zmanjšata relativno cirkadiano učinkovitost za 36,5 % ($\Delta RCU = -0,460$) in 38,9 % ($\Delta RCU = -0,490$), OS2 dodatno predstavlja absolutno najnižjo doseženo *RCU* = 0,77, kadar ni nameščenega stekla. Zanimivo tudi zeleni odtenki GRS1, GRS2 in GRS3 zmanjšajo *RCU*, čeprav je njihov vpliv na *RMU* nevtralen. GRS1 zmanjša *RCU* za 7,9 % GRS2 za 13,8 % in GRS3 za 12,8 % glede na GS1, GS2 in GS3. Upoštevajoč vse kombinacije različnih vrst zasteklitve in barve sten, predstavljenih na sliki 46, opazimo, da so *RCU* vijoličastih odtenkov PS1 in PS2 primerljive z monokromatskimi barvami (sivine in bela), neodvisno od kombinacije z zasteklitvijo. Pri drugih barvnih skupinah lahko ugotovimo, da modri odtenki sten občutno povečajo doseženo *RCU*, ne glede na zasteklitev (slika 46), med tem pa rdeča in oranžna očitno zmanjšujeta *RCU* v primerjavi s sivimi stenami. Negativno na *RCU* vplivajo tudi zeleni odtenki, katerih negativni vpliv ni tako poudarjen kot pri oranžni ali rdeči barvni skupini. Podobno obnašanje lahko opazimo tudi pri vrstah zasteklitve, kjer toplo obarvana zasteklitev DP_brt in steklo s spektralno selektivnim premazom (DP_ssc) povzročita manjše *RCU* kot v primeru meritev brez nameščene zasteklitve. Hladna barvna zasteklitev DP_bt1 in DP_bt2 povečuje količnik *RCU* glede na referenčne primere brez nameščenih oken (slika 46 in priloga A.4).

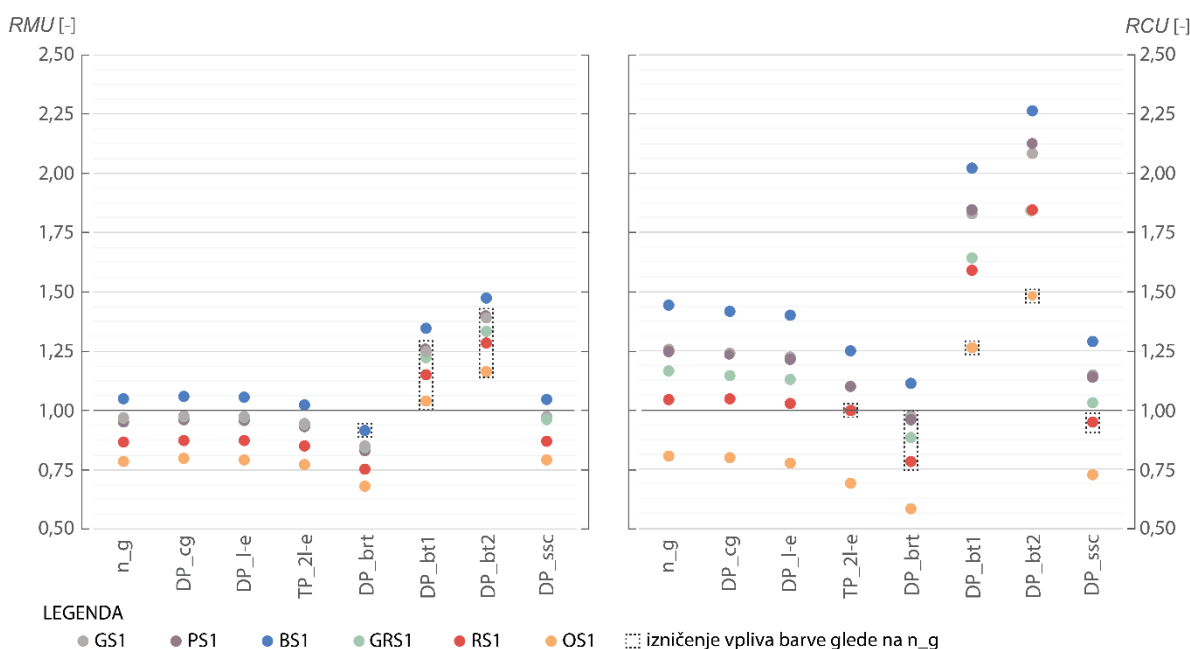
Slika 46: Relativna cirkadiana učinkovitost (RCU) vsakega izmed merjenih primerov.Figure 46: Relative circadian efficacy (RCE) for each of the measured cases.

4.3.1.3 Vpliv zasteklitve v primerjavi z vplivom barvnih odtenkov

Ker smo želeli odgovoriti na vprašanje, ali lahko vpliv oken izniči pozitivni ali negativni vpliv stene na melanopski oz. cirkadiani potencial, smo rezultate RMU in RCU s slik 45 in 46 prikazali ločeno glede na raven nasičenosti, in sicer ločeno za melanopsko in cirkadiano učinkovitost (slike 47, 48 in 49), kar je omogočilo vizualno presojo, ali se izničenje vpliva odsevnega materiala stene pojavi zaradi vpliva presevnega materiala stekla. Na splošno je očitno, da se RMU in RCU kombinacij zasteklitev in barv sten razlikujejo zaradi različnih narav metrike, zato so opisani rezultati obeh metrik.

Slika 47 prikazuje RMU in RCU kombinacij stekel in barv na ravni odsevnosti I, za katere je bilo že v prejšnjem poglavju ugotovljeno, da imajo manjši vpliv na RMU in RCU kot barve z

večjo nasičenostjo (nižji R_v). DP_bt1 in DP_bt2 izničita RMU vsake izmed barv, ki so se v primeru n_g pokazale v $RMU < 1$ (GS1, PS1, GRS1, RS1, OS1). V primeru RCU , DP_bt1 in DP_bt2 očitno povzročita velik vpliv na RCU vsake izmed barv, vendar izničita le vpliv kombinacije OS1 in n_g, katere $RCU < 1$ ($RCU = 0,80$), ko uporabimo DP_bt2, se RCU poveča na 1,49. Bronasto zasteklitev (DP_brt) lahko uvrščamo med zasteklitve s toplim barvnim tonom, zato je tudi razumljivo, da negativno vpliva na RMU in RCU . Povprečni $\Delta RMU_{DP_brt} = -0,12$ izniči vpliv BS1, RS1, GS1 in PS1. S stališča RCU DP_brt izniči le bolj nevtralne barve z $RCU < 1,25$ (PS1, GS1 in RS1), povprečna ΔRCU bronaste zasteklitve znaša $\Delta RCU_{DP_brt} = -0,28$. Nevtralna toplotnoizolacijska stekla ne povzročajo dovolj velikega vpliva, da bi izničila vpliv barv.

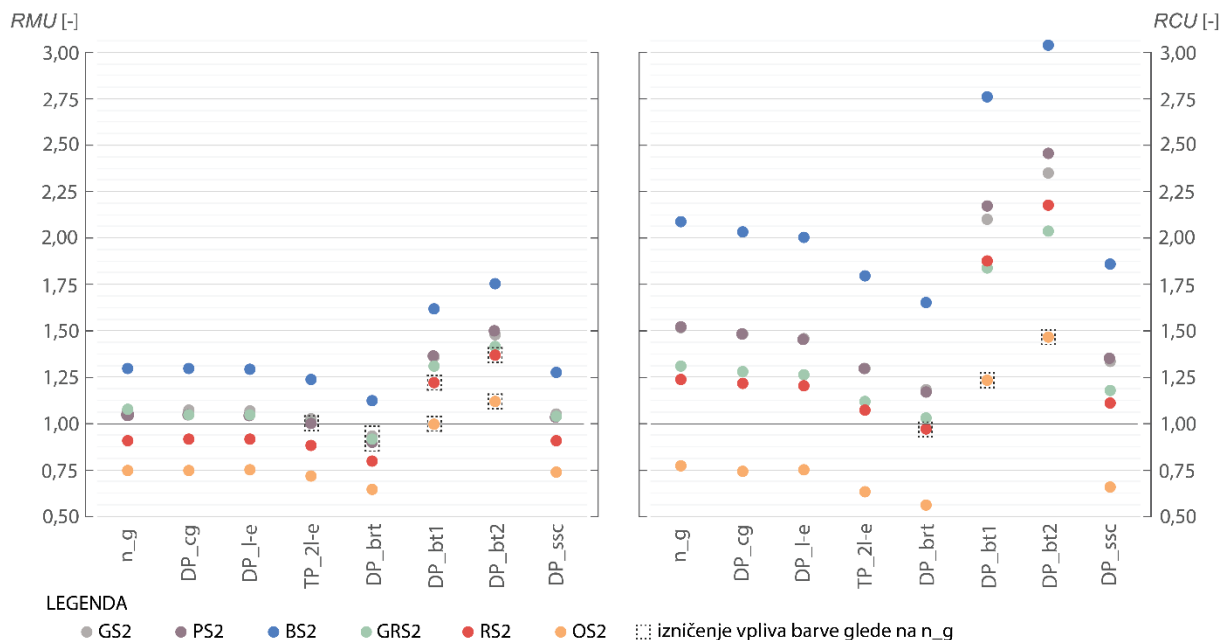


Slika 47: Vrednosti RMU (levo) in RCU (desno) za vsako izmed kombinacij barv sten ravni odsevnosti I in vrste zasteklitve. S črnim okvirjem so označeni primeri, kadar pride do izničenja vpliva odsevnosti stene zaradi presevnosti okna.

Figure 47: Values of RMU (left) and RCE (right) for each colour-glazing combination at saturation level I, with marked annulation of the effect of wall reflectance as caused by window transmissivity.

Vpliv stekel na barve z nasičenostjo II je prikazan na sliki 48. Ponovno sta DP_bt1 in DP_bt2 najbolj vplivna tipa zasteklitve, ki povečujeta RMU in RCU . V povprečju ΔRMU zaradi zasteklitve pri ravni nasičenosti II znaša 0,29 (DP_bt1) in 0,41 (DP_bt2), ΔRCU pa 0,59 (DP_bt1) in 0,85 (DP_bt2). Modri zasteklitvi tako izničita vpliv toplih barv (RS2 in OS2) z vidika RMU in OS2 z vidika RCU (edina barva na ravni nasičenosti II z $RCU < 1$). Vpliv bronastega stekla DP_brt ni dovolj izrazit, da bi lahko izničil učinek modrega odtenka (BS2) s stališča RMU ($RMU_{BS2ng} = 1,30$) ali RCU ($RCU_{BS2ng} = 2,09$). V povprečju ΔRMU in ΔRCU DP_brt znašata -

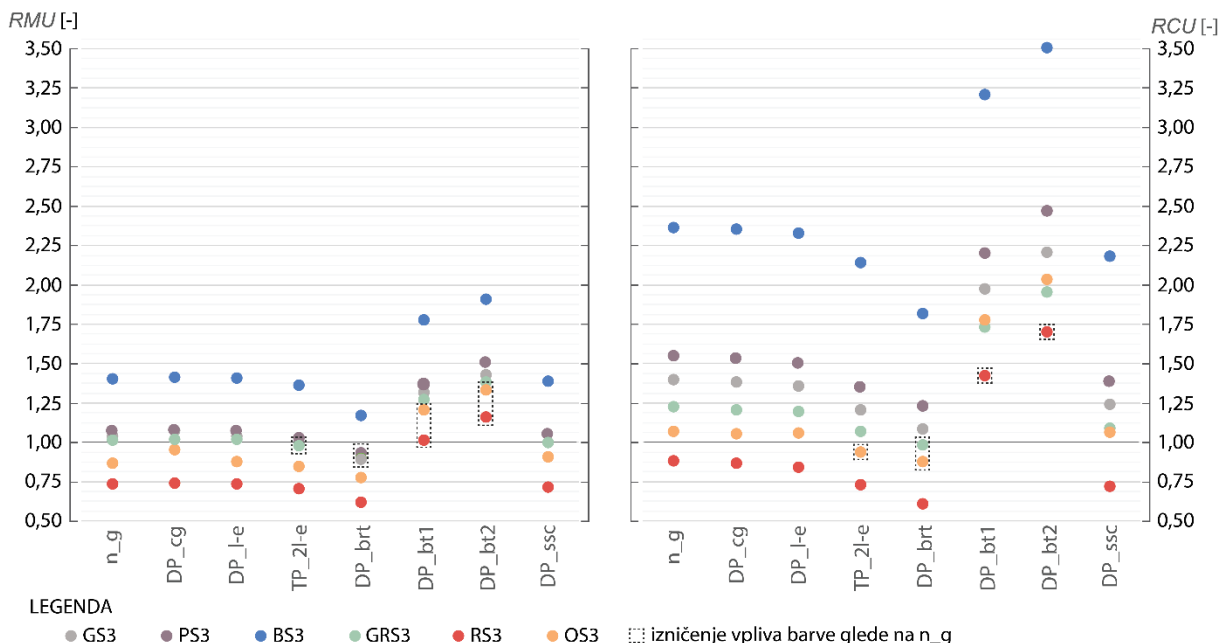
0,14 in -0,31. Obratno velja v kombinaciji z GRS2 in PS2, katerih RMU v kombinaciji z n_g znaša 1,08 in 1,05, po kombiniranju z DP_brt pa 0,92 in 0,90. S stališča RCU DP_brt izniči samo učinek RS2 iz $RCU_{RS2ng} = 1,24$ na $RCU = 0,91$ kombinacije RS2 in DP_brt . Povprečna ΔRCU DP_brt na ravni nasičenosti II znaša -0,31.



Slika 48: Vrednosti RMU (levo) in RCU (desno) za vsako izmed kombinacij barv stene nasičenosti II in vrste zasteklitev. S črnim okvirjem so označeni primeri, kadar pride do izničenja vpliva odsevnosti stene zaradi presevnosti okna.

Figure 48: Values of RMU (left) and RCU (right) for each colour-glazing combination at saturation level II, with marked annulation of the effect of wall reflectance as caused by window transmissivity.

Kakor že pri barvah ravni nasičenosti I in II tudi pri barvah na ravni nasičenosti III modri stekli DP_bt1 in DP_bt2 najmočneje vplivata na spremembo RMU in RCU (slika 49). Povprečna ΔRMU_{DP_bt1} znaša 0,30 in ΔRMU_{DP_bt2} znaša 0,43. ΔRCU je večja in je 0,64 za DP_bt1 in 0,90 za DP_bt2 . S stališča RMU so izničeni vplivi toplih barv OS3 in RS3, s stališča RCU je izničen le vpliv RS3. Povprečna ΔRMU_{DP_brt} pri barvah na ravni nasičenosti III je -0,14, tako izniči vpliv nevtralnih GRS3 ($RMU = 1,02$) in PS3 ($RMU = 1,07$). V primeru RCU bronasto tonirana zasteklitev izniči vpliv GRS3 ($RCU = 1,22$) in OS3 ($RCU = 1,07$), pri stopnji nasičenosti III je povprečna $\Delta RCU_{dp_brt} = 0,31$.



Slika 49: Vrednosti *RMU* (levo) in *RCU* (desno) za vsako izmed kombinacij barv stene nasičenosti III in vrste zasteklitev. S črnim okvirjem so označeni primeri, kadar pride do izničenja vpliva odsevnosti stene zaradi presevnosti okna.

Figure 49: Values of *RMU* (left) and *RCU* (right) for each colour-glazing combination at saturation level III, with marked annulation of the effect of wall reflectance as caused by window transmissivity.

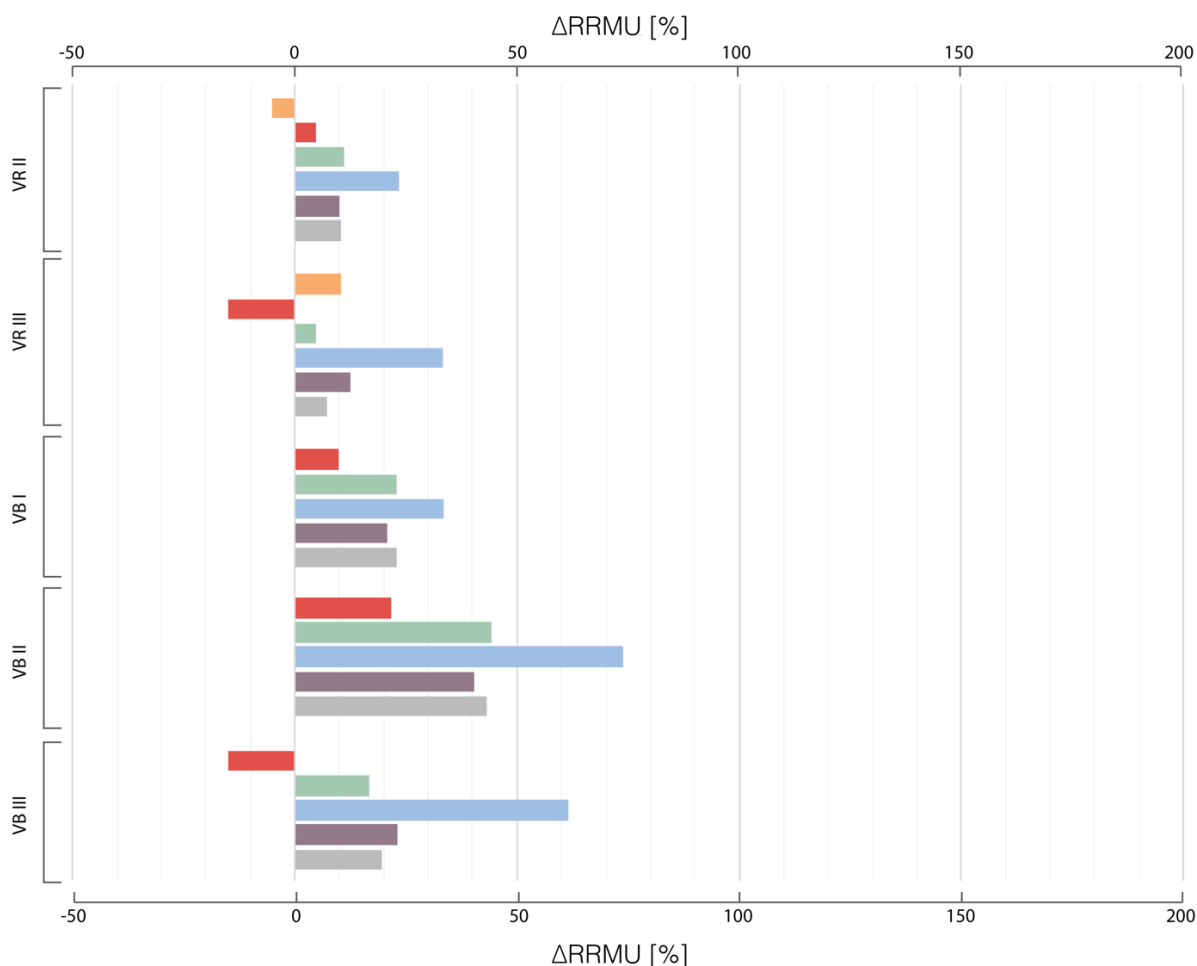
4.3.1.4 Vpliv nasičenosti in barve na *RMU* in *RCU*

Relativni vpliv nasičenosti pri spremembi z nasičenosti II v nasičenost I (*VRII*, glej poglavje 4.2.5.1) in pri spremembi z nasičenosti III v nasičenost I (*VRIII*, glej poglavje 4.2.5.1) in barve pri nasičenosti I, II in III (*VBI*, *VBII*, *VBIII*, glej poglavje 4.2.5.1) smo izračunali z vidika relativne melanopske učinkovitosti in relativne cirkadiane učinkovitosti, po metodologiji, predstavljeni v poglavju 4.2.5.1. Rezultati z vidika *RMU* so predstavljeni v sliki 50, z vidika *RCU* na sliki 51, natančnejši podatki pa so predstavljeni v prilogi A.4.

Sprememba z ravni nasičenosti I na II (*VRII*) se odraža v najmanjših spremembah $\Delta RRMU$ (slika 50). Največji pozitivni vpliv *VRII* imajo modri odtenki z $\Delta RRMU = 33,7\%$. Obratno najmanjšo $\Delta RRMU$ izmed vseh opazovanih sprememb povzročijo rdeči odtenki *VRII* z $\Delta RRMU = 10,2\%$. S spremembo z ravni nasičenosti II na III (*VRIII*) se $\Delta RRMU$ vseh, razen zelenih in sivih odtenkov, poveča. Največjo spremembo izmed *VRIII* opazimo pri modrih odtenkih ($\Delta RRMU = 10,2\%$), najmanjšo (absolutna vrednost) pa pri zeleni barvi ($\Delta RRMU = 4,6\%$).

Največji vpliv modre barve opazimo tudi ob spremembi barve v vseh ravneh nasičenosti (*VBI*, *VBII* in *VBIII*). Največjo $\Delta RRMU$ kot posledico menjave barve lahko razberemo pri modrem odtenku ravni nasičenosti III (*VBIII*). V skupini *VBIII* ima rdeči odtenek najmanjši *RMU* (v

drugih primerih je referenca oranžni odtenek, glej poglavje 4.3.1.4), zato moramo sešteti $\Delta RRMU$ rdečega odtenka ($|\Delta RRMU| = 15,1 \%$) in $\Delta RRMU$ modrega odtenka ($\Delta RRMU = 61,4 \%$) in dobimo največji vpliv v VBIII, ki znaša $\Delta RRMU = 76,5 \%$. Največja sprememba, kadar spreminjamo barvo v ravni nasičenosti II (VBII) $\Delta RRMU = 73,9 \%$, se pojavi pri spremembi v modro barvo in enako, kadar spreminjamo barve v ravni nasičenosti I (VBI) z $\Delta RRMU 33,7 \%$. Torej vpliv modre barve narašča z nasičenostjo in na vsaki ravni povzroči največjo $\Delta RRMU$. Podobno kakor pri modri barvi tudi pri drugih odtenkih na ravni nasičenosti II (VBII) opazimo večje $\Delta RRMU$ pri spremembi barve kot pri spremembi barve na ravni nasičenosti I (VBI), vendar v nasprotju z modro barvo manjšo $\Delta RRMU$ pri spreminjanju barve na ravni nasičenosti III kakor pri nasičenosti II.

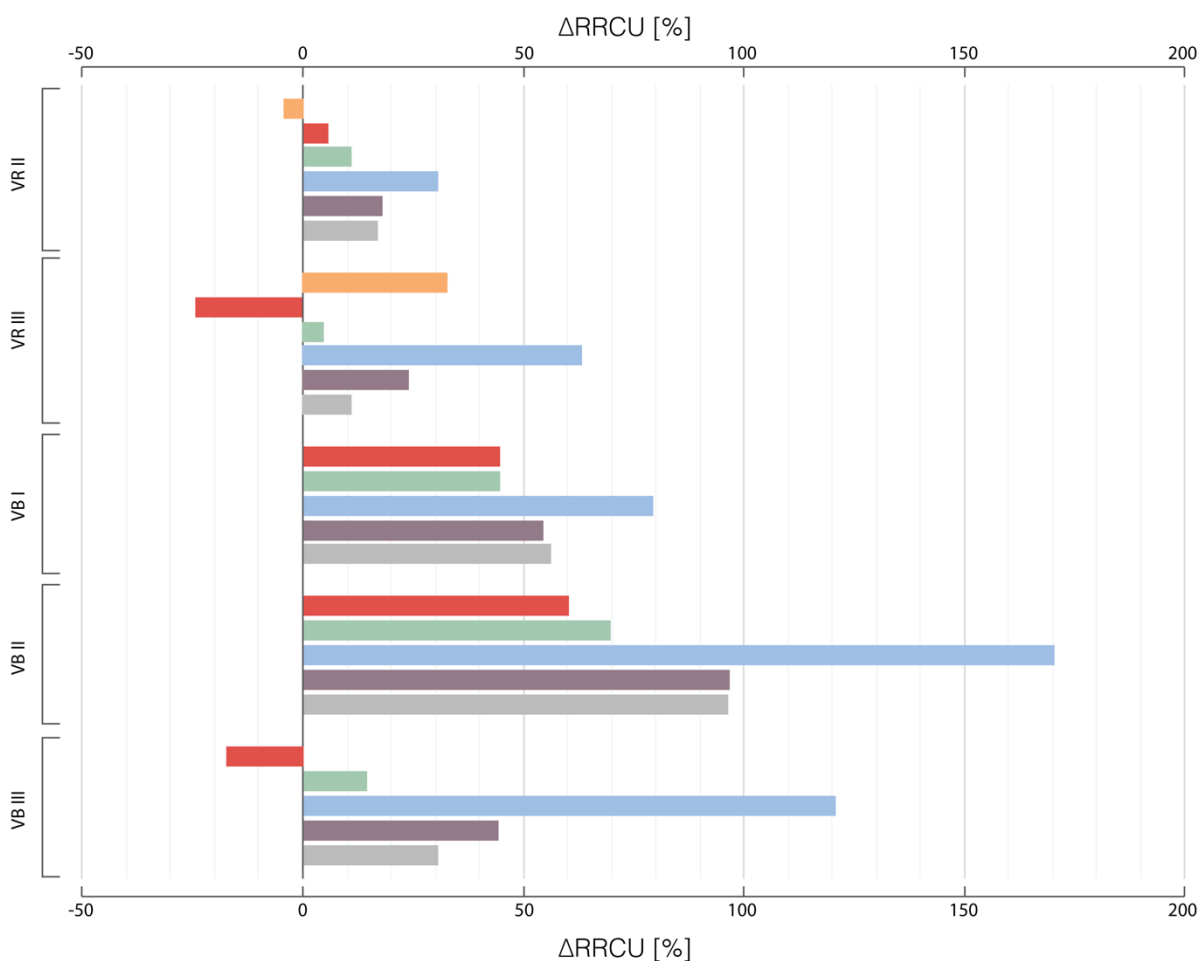


LEGENDA

■ rdeči odtenki ■ zeleni odtenki ■ modri odtenki ■ vijolični odtenki ■ sivi odtenki ■ oranžni odtenki

Slika 50: Relativna sprememba RMU glede na barve nasičenosti I, povzročena s spremembo na raven nasičenosti II ($VR II$), in sprememba v RMU s spremembo na raven nasičenosti III ($VR III$) v primerjavi s spremembo v RCU , ki je posledica spremembe barve pri ravneh odsevnosti I ($VB I$), II ($VB II$) in III ($VB III$).
Figure 50: Change in RME induced by modulation of saturation level from saturation level I to saturation level II ($VR II$) and change in RME from saturation level I to saturation level III and ($VR III$) in comparison to change in RCE caused by colour modulation at reflectance levels I ($VB I$), II ($VB II$), and III ($VB III$).

Podobno kakor že v poglavju 4.3.1.3 tudi ob spremljanju relativnega vpliva barv (*VBI*, *VBII* in *VBIII*) in ravni nasičenosti (*VRII* in *VRIII*) na relativni cirkadiani potencial lahko opazimo, da se $\Delta RRCU$ (slika 51) pokaže v večjih razponih koeficienta kot $\Delta RRMU$ (slika 50). Vendar so odnosi $\Delta RRCU$ podobni $\Delta RRMU$. Tudi s stališča relativne cirkadiane učinkovitosti sprememba odsevnosti z ravni nasičenosti I na raven nasičenosti II izraža najmanjšo $\Delta RRCU$ oranžnih, rdečih, modrih in vijoličastih odtenkov. Znova ima največji pozitiven vpliv znotraj sprememb *VRII* in *VRIII* modra barva z $\Delta RRCU = 30,8\%$ za *VRII* in $63,8\%$ v *VRIII*. Najvplivnejšo negativno spremembo povzroča sprememba nasičenosti rdečega odtenka s stopnje nasičenosti II na III (*VRIII*) z $\Delta RRCU = -24,1\%$.



LEGENDA

- rdeči odtenki
- zeleni odtenki
- modri odtenki
- vijolični odtenki
- sivi odtenki
- oranžni odtenki

Slika 51: Relativna sprememba RCU glede na barve ravni nasičenosti I, povzročena s spremembo na raven nasičenosti II (*VRII*), in relativna sprememba v RCU s spremembo na raven nasičenosti III (*VRIII*) v primerjavi s spremembo v RCU, ki je posledica spremembe barve pri ravneh odsevnosti I (*VBI*), II (*VBII*) in III (*VBIII*).

Figure 51: Change in RCE ($\Delta RRCU$) induced by modulation of saturation level from saturation level I to saturation level II (*VRII*) and change in RCE from saturation level I to saturation level III (*VRIII*) in comparison to change in RCE caused by colour modulation at reflectance levels I (*VBI*), II (*VBII*), and III (*VBIII*).

Kakor že pri *VRII* in *VRIII* z vidika *CS* tudi pri spremembi barv v vseh ravneh nasičenosti opazimo največjo spremembo v *RCU* modrih odtenkov. Največjo izmed omenjenih $\Delta RRCU$ kot posledico menjave barve razberemo pri modrem odtenku ravni nasičenosti II (*VBII*) z $\Delta RRCU = 170,7$ %. Sledi mu *VBIII*, ki ga enako kot s stališča *RMU* izračunamo tako, da seštejemo absolutno vrednost negativnega rdečega odtenka ($|\Delta RRCU| = 17,4$ %) z $\Delta RRCU$ modrega odtenka ($\Delta RRCU = 120,8$ %) in dobimo največji vpliv v *VBIII*, ki znaša $\Delta RRCU = 138,2$ %. Na splošno je mogoče opaziti nemonoton trend naraščanja $\Delta RRCU$ (naraščanje vpliva barve) za vsako izmed barv, ki nakazujejo, da se vpliv barve povečuje z večanjem nasičenosti oz. zmanjševanjem odsevnosti.

Če povzamemo rezultate, opisane v prejšnjih odstavkih ter na slikah 50 in 51, lahko ugotovimo, da so največje razlike $\Delta RRMU$ in $\Delta RRCU$ pri modrih barvnih odtenkih, kadar spremljamo spremembo barve ali spremembo nasičenosti. Dodatno pa lahko glede na obravnavane rezultate opravljenega eksperimenta, opisane na slikah 50 in 51, s stališča relativne melanopske (*RMU*) in relativne cirkadiane učinkovitost (*RCU*) trdimo, da ima barva večji vpliv kakor raven nasičenosti (odsevnost barve), saj so $\Delta RRMU$ in $\Delta RRCU$ največje spremembe v ravni nasičenosti (odsevnosti) – *VRIII* manjše kakor spremembe barve pri najmanjši nasičenosti (najvišji odsevnosti) – *VBI*.

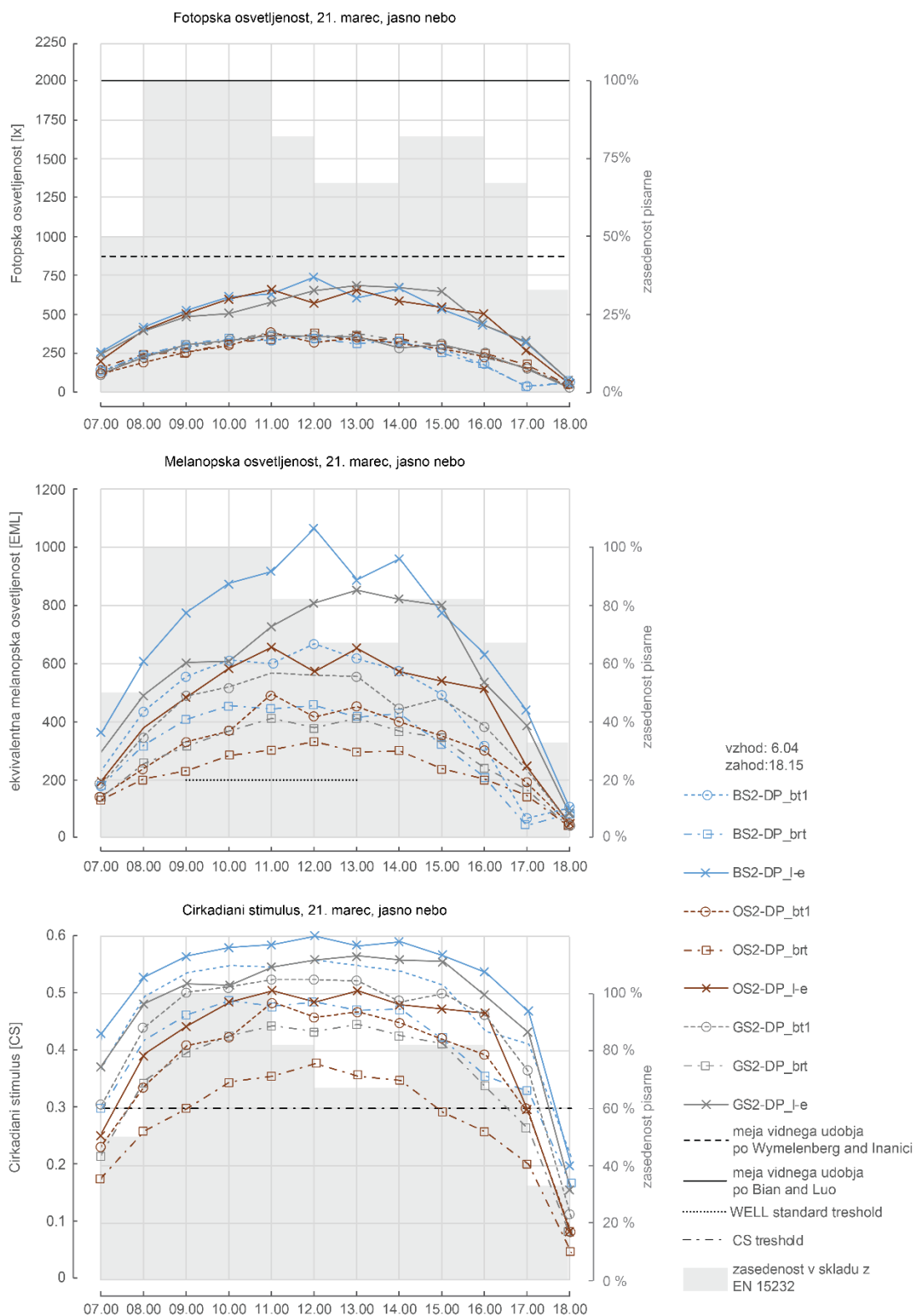
4.3.2 Rezultati simulacij

Prejšnja poglavja so predstavila eksperimentalno določen vpliv kombinacij barv sten in tipa zasteklitve na relativni melanopski (slike 45, 47, 48 in 49) in relativni cirkadiani potencial (slike 46, 47, 48 in 49) dnevne svetlobe v tipični celični pisarni. Za nadaljnjo oceno vplivov izbranih primerov (slike 45 in 46) na notranje svetlobno okolje proučevane pisarne so bile izvedene urne simulacije z uporabo multispektralne programske opreme za sledenje žarkov ALFA (glej poglavje 2.6.2). Za simulacije so bile raziskane vse kombinacije med tremi izbranimi barvami sten (tj. GR2, BS2 in OS2) in tremi vrstami zasteklitve (DP_1-e, DP_bt1 in DP_brt). Izbrane kombinacije predstavljajo primere z nevtralnimi (npr. DP_1-e z GR2, $RMU = 1,068$), visokimi (npr. DP_bt1 z BS2, $RMU = 1,620$) in nizkimi (npr. DP_brt z OS2, $RMU = 0,645$) vrednostmi relativne melanopske učinkovitosti. Barve sten na stopnji nasičenosti III niso bile upoštevane zaradi nizkih vrednosti R_v ($\approx 0,27$), ki so pod priporočili za odsevnost sten v zaprtih prostorih po standardu SIST EN 17037 [2]. Zaradi podobnih razlogov smo iz študije izključili tudi DP_bt2, in sicer zaradi nizkega τ_v (0,25) in R_a (0,61). Obe lastnosti sta premalo za doseganje dobrih notranjih svetlobnih razmer [149, 150]. Za razsvetljavo notranjih prostorov, v katerih se

posamezniki dlje zadržujejo, svetlobni viri z $R_a < 0.8$ niso primerni [151] in je okno pri odsotnosti umetne razsvetljave edini svetlobni vir. Urne simulacije so bile izvedene za oblačno nebo 21. marca 2019 pod pogoji oblačnega in jasnega tipa neba (glej sliko 42, graf B in graf C), izračunani rezultati pa so bili ovrednoteni v okviru tipičnega urnika zasedenosti celičnih pisarn in priporočil za melanopsko osvetljenost [142], vrednosti CS [17] in udobno osvetljenost na vertikalni ravnini [143–146, 152] (glej poglavje 4.2.6).

Rezultati simulacij delovnega dne 21. marca 2019 ob jasnih razmerah neba so prikazani na sliki 52. Ob opazovanju rezultatov v navedenih razmerah ugotovimo, da nobena izmed preiskovanih kombinacij barv zasteklitve in sten ne presega praga fotopske osvetljenosti na vertikalni ravnini 875 lx, ki sta ga za pisarniške naloge predlagala kot zgornjo sprejemljivo mejo Wymelenberg in Inanici [143]. Na primer, zasteklitev DP_l-e s pobarvano steno v BS2 dosega največjo doseženo E_v (tj. vertikalno osvetljenost v točki merjenja S2) med vsemi preiskovanimi različicami. Dosega 741,1 lx (ob 12.00) in posledično največjo povprečno fotopsko osvetljenost 484,5 lx med domnevnim delovnikom. Nasprotno modro obarvana stena v kombinaciji z modro obarvano zasteklitvijo (tj. DP_bt1 in BS1) povzroči najmanjšo skupno povprečno vrednost E_{iv} 241,7 lx med urami, ko je prostor v uporabi. Poleg tega obstaja občutna razlika med doseženimi fotopskimi osvetljenostmi med primerom s toplotnoizolacijsko zasteklitvijo (tj. DP_l-e) in tistimi s sončnozaščitno zasteklitvijo (tj. DP_bt1 in DP_brt), kar je posledica velike razlike v τ_v (preglednica 6). Česar pa ne moremo trditi za melanopsko utežene osvetlitve (EML), za katere se pokažejo bolj razpršeni rezultati med preiskovanimi kombinacijami (slika 52). Z vidika ekvivalentne melanopske osvetljenosti kombinacija DP_l-e in BS1 doseže največjo doseženo ekvivalentno melanopsko osvetljenost (tj. 1063,0 EML) s povprečno 700,2 EML med predvidenim delovnim časom. To je več kot trikratnik (tj. 3,12-krat) povprečne melanopsko utežene osvetljenosti primera (DP_brt in OS2) z najmanjšo doseženo povprečno vrednostjo 224,4 EML (slika 52). Ne glede na bistveno razliko med največjo in najmanjšo izračunano melanopsko osvetljenostjo vsak izmed analiziranih primerov izpolnjuje in presega merila standarda WELL z vidika ekvivalentne melanopske osvetljenosti najmanj 200 EML med 9.00 in 13.00. Nasprotno izmed preiskovanih kombinacij nobena ne izpolnjuje meril z vidika CS (preglednica 7) za celoten delovni dan od 7.00 do 18.00 (slika 52). To je bilo pričakovano, saj je začetek delovnika zjutraj (od 7.00 do 8.00) in konec pozno popoldne (od 17.00 do 18.00) zelo blizu sončnega vzhoda (ob 6.04) in sončnega zahoda (ob 18.15), ko lahko pričakujemo zelo majhne zunanje osvetljenosti in posledično tudi zelo majhne notranje osvetljenosti, ki se kažejo v majhnem CS. V tem času bi pisarne dodatno osvetljevala električna razsvetljava, vendar tega v predstavljenih simulacijah nismo upoštevali. Kljub temu pa, ko

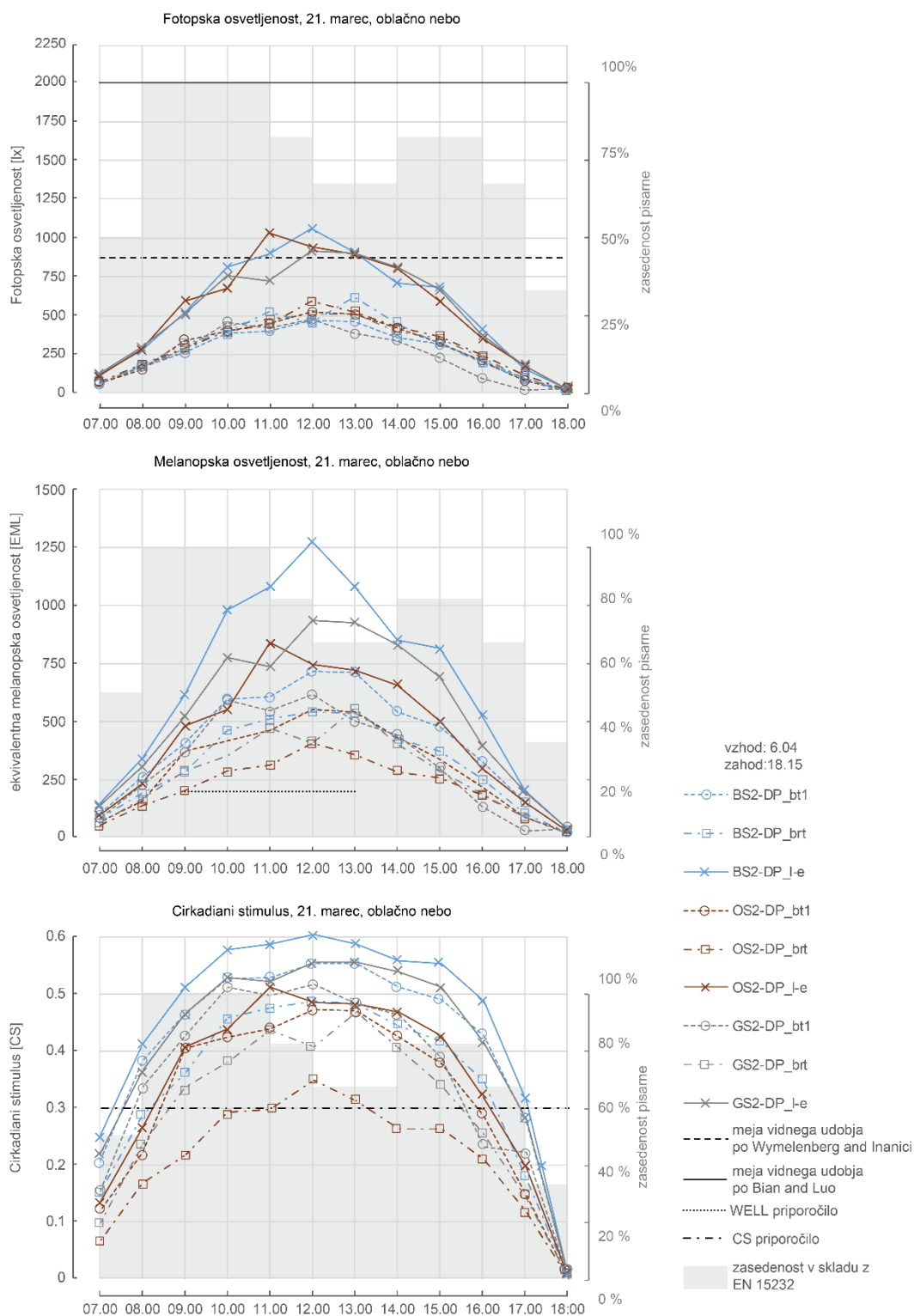
opazujemo rezultate, predstavljene v grafu na sliki 52, postane očitno, da je najdaljše obdobje 10 ur (od 7.00 do 17.00), ko je izpolnjeno merilo $CS \geq 0,3$, doseženo v primeru vseh kombinacij, kadar je stena pobarvana v BS2, neodvisno od uporabljene zasteklitve, in za primere barve stene v barvi GS2 v kombinaciji z zasteklitvami DP_1-e in DP_bt1. Kombinacija zasteklitve DP_1-e in stene barve BS2 se pokaže v na splošno največji preiskovani vrednosti $CS = 0,60$ in največjem povprečju 0,52 v analiziranih urah. Nasprotno zasteklitev DP_brt v kombinaciji z barvo OS2 ponuja najkrajše obdobje šestih ur izpostavljenosti nad pragom CS (med 9.00 in 15.00). Posledično se to kaže v najnižjem maksimumu (0,38) in povprečju (0,27) obravnavanih primerov pod jasnim nebom.



Slika 52: Svetlobne razmere 21. marca pod jasnim tipom neba vsake izmed izbranih kombinacij vrste komercialnih zasteklitev in barv zidu.

Figure 52: Luminous environment conditions on the 21st of March under clear sky conditions of all investigated wall cover and glazing combinations.

Simulacije razmer dnevne svetlobe ob oblačnem nebu na sliki 53 kažejo na izrazito spremembo prejete dnevne svetlobe v analizirani pisarni v primerjavi s simulacijami razmer jasnega neba. Večja enovitost svetlosti oblačnega neba po celotni hemisferi vodi do na splošno nekoliko večjih vertikalnih vidnih osvetljenosti, izmerjenih na vertikalni ravnini v prostoru (E_v), kot v primeru jasnega neba, saj je pisarna z oknom obrnjena proti severu. Posledično vsi primeri s kombinacijami zasteklitev DP_1-e presežejo prag Wymelenberg in Inanici [143] za vizualno udobje osvetljenosti na vertikalni ravnini z največjim E_v 1062,7 lx ob 12.00 za primer zidu, pobarvanega v BS2. Kombinacija DP_1-e in OS2 doseže 1037,2 lx ob 11.00 in DP_1-e z GS2 915,6 lx ob 12.00 (slika 53). Analogno simulacijam jasnega neba (slika 52) je mogoče opaziti znatno razliko v osvetljenostih, kadar je nameščena toplotnozaščitna zasteklitev (tj. DP_1-e) in kadar uporabimo solarno- in toplotnozaščitno zasteklitev (tj. DP_brt in DP_bt1), to je posledica veliko manjše τ_v solarno- in toplotnozaščitnih zasteklitev (preglednica 6). Podobno kot pri rezultatih, dobljenih v razmerah z jasnim nebom, vsaka izmed proučevanih kombinacij zasteklitev in barv sten izpolnjuje in presega zahteve standarda WELL. Zasteklitev DP_1-e v kombinaciji z barvo stene BS2 znova povzroči največjo doseženo povprečno melanopsko osvetljenost 660,2 EML v predvidenem delovnem dnevu. Ta vrednost je 3,14-krat večja od najmanjše simulirane povprečne ekvivalentne melanopske osvetljenosti 210,4 EML, dosežene v primeru zasteklitve DP_brt in stenske barve OS2. Tako kot v primeru jasnega neba nobena kombinacija ne preseže praga CS za ves delovni dan, saj sta sončni vzhod in zahod blizu začetka in konca predvidenega urnika zasedenosti. Vendar je kriterij $CS \geq 0,3$ dosežen za 10 ur (od 8.00 do 17.00) pri zasteklitvi DP_bt1 in barvi BS2 s povprečnim CS v celotnem delovnem dnevu 0,49. Tudi pri drugih kombinacijah zasteklitve DP_1-e (slika 53) je situacija podobna z rezultati, ki so doseženi v razmerah z jasnim nebom (slika 52). Vendar kombinacija zasteklitve DP_brt in barve zidu OS2 komaj presega prag CS za 2 uri (od 12.00 do 13.00). Omenjena kombinacija doseže največjo vrednost 0,34 in povprečje 0,23 CS čez ves delovni dan (slika 53). Čeprav so vrednosti CS, dosežene v zadnjem primeru, primerljive z rezultati pri jasnem nebu, je trajanje zadostne izpostavljenosti svetlobi veliko krajše (tj. štiri ure krajše).



Slika 53: Svetlobne razmere 21. marca pod oblačnim tipom neba vsake izmed izbranih kombinacij vrste komercialnih zasteklitev in barv zidu.

Figure 53: Luminous environment conditions on the 21st of March under overcast sky conditions of all investigated wall cover and glazing combinations.

4.4 Diskusija

Diskusija je razdeljena na tri dele. V prvem opišemo, kakšen je pomen materialnosti sten in različnih tipologij oken za cirkadiani potencial, torej vpliv na relativno melanopsko učinkovitost – *RMU* in relativno cirkadiano učinkovitost – *RCU*. V drugem delu povzamemo, kaj lastnosti materialnosti sten in različnih tipologij oken pomenijo z vidika cirkadianega svetlobnega okolja (absolutne količine). Na koncu pa povzamemo, ali je cirkadiano svetlobno okolje mogoče napovedovati zgolj s stališča vidne osvetljenosti.

4.4.1 Vidik cirkadianega potenciala – vpliv na *RMU* in *RCU*

Izpostaviti je mogoče več splošnih predpostavk o vplivu optičnih lastnosti proučevanega modela na doseženo *RMU* dnevne svetlobe v notranjih prostorih. V zvezi s presevnostjo zasteklitve smo dokazali, da tipi zasteklitve z nevtralnno spektralno presevnostjo v vidnem spektru (npr. *DP_1-e*, *DP_ssc* itd.) na *RMU* ne vplivajo bistveno. Če pa ta stekla vrednotimo z vidika *RCU*, *TP_2-1e* in *DP_ssc* zaradi spektralnih presevnosti, ki so siromašnejše v modrem delu spektra, negativno vplivata na *RCU* in tako ne moremo trditi, da sta *RCU* nevtralni. Podobno se pokaže tudi pri barvah sten, kjer se z vidika *RMU* za nevtralne izkažejo barve, kot so vijoličasta, zelena in siva. Z vidika *RCU* sta nevtralni samo *RS1* in *OS3*, z vidika *RMU* obe barvi negativno vplivata na cirkadiani potencial (*RS1* in *OS3*, $RCU < 1$), podobno majhen vpliv na cirkadiano svetlobno okolje ugotavlja tudi Malovrh Rebec [30]. *RCU* monokromatskih sivih barv se giblje med 1,25 in 1,55, v tem razponu so tudi zelene in vijoličaste barve. Do omenjenih odstopanj v dojetanju nevtralnosti različnih stekel ali barv sten prihaja zaradi različnega načina vrednotenja cirkadianega oziroma melanopskega vpliva. Metrika ekvivalentnega melanopskega luxa – *EML*, iz katere izhaja relativna melanopska učinkovitost (*RME*), pri vrednotenju svetlobe upošteva le občutljivost fotopigmeta melanopsina, kakor je to že podrobneje razloženo v poglavju 2.4.4. Obratno pa metriki cirkadiane svetlobe (CL_A) in posledično cirkadianega stimulusa (*CS*) poleg ipRGC v delovanje cirkadianega sistema v skladu z literaturo vključujeta sodelovanje drugih fotoreceptorjev, katerih občutljivost za svetlobo se razlikuje (za podrobnosti glej poglavje 2.4.4). Kljub razlikam v metrikah se modri zasteklitvi (*DP_bt1* in *DP_bt2*) izkažeta kot tisti, ki najbolj izrazito pozitivno vplivata na cirkadiani potencial (*RMU* in *RCU*), v nasprotju z modrimi zasteklitvami pa bronasta (*DP_brt*) na cirkadiani potencial vpliva izrazito negativno. Enako velja pri barvah, pri katerih imajo modre barve (*BS1*, *BS2*, *BS3*) izrazit pozitiven vpliv, oranžni barvi (*OS1*, *OS2*) in rdeča najvišje nasičenosti (*RS3*) pa izrazito negativen vpliv na cirkadiani potencial.

Na podlagi rezultatov, predstavljenih v poglavju 4.3.1.3, v katerem primerjamo vpliv stekel z vplivom barvnih odtenkov, lahko potrdimo eno izmed postavljenih hipotez doktorske disertacije. Spoznali smo, da ob upoštevanju usmeritve analizirane ravnine v prostoru vpliv presevnosti za dnevno svetlobo tipičnih okenskih zasteklitev lahko izniči vpliv odsevnih površin na cirkadiani potencial v prostoru. To velja predvsem za sončnozaščitna stekla, ki imajo poudarjene spektralne lastnosti, kot npr. modre zasteklitve DP_bt1 ali DP_bt2 izničujeta vplive barv, ki imajo RME in $RCU < 1$. V nasprotju s tem bronasta zasteklitve DP_brt izničujeta vpliv barv z RMU in $RCU > 1$. Toplotnozaščitna okna nevtralnih barv izničujeta le vplive barv sten, ki imajo skoraj nevtralen RMU oz. RCU . Z naraščanjem nasičenosti barv se število primerov izničenih vplivov kot posledica zasteklitve izrazito zmanjša zaradi vedno večjega vpliva barv stene z večanjem nasičenosti uporabljene barve. Kar je posledica pojava, ki smo ga dokazali z eksperimenti, in sicer da nasičenost barv vpliva na RMU in RCU . Barve pri večjih nasičenostih bolj vplivajo na melanopsko in cirkadiano učinkovitost kakor barve pri manjših nasičenostih.

V zadnjem poglavju eksperimentalnega dela smo primerjali vpliv lastnosti barv pobarvane stene na cirkadiani potencial (RMU in RCU) in s tem poskušali odgovoriti na drugo hipotezo. Ta pravi, da ima ob upoštevanju usmeritve analizirane ravnine v prostoru na velikost vpliva odsevnih površin na cirkadiani potencial nasičenost barve večji vpliv kakor izbor barvnega odtenka. Rezultati poglavja 4.3.1.4 kažejo, da je vpliv spremembe barve oz. izbranih odtenkov večji kakor vpliv spremembe nasičenosti barve. Namreč, že sprememba vsake izmed barv pri najmanjši nasičenosti VBI ima večji vpliv kakor največja opazovana sprememba z ravni nasičenosti I ($R_v \sim 25\%$) na III ($R_v \sim 75\%$) $VRII$ z vidika relativne cirkadiane učinkovitosti (RCU). Največja povzročena sprememba v RMU zaradi spremembe barvnega odtenka z oranžne na modro je kar 2,2-krat večja kakor največja sprememba v RMU zaradi večanja nasičenosti, še več, sprememba v RCU zaradi barvnega odtenka povzroči 2,7-krat večjo spremembo kot sprememba v nasičenosti barve. Hipotezo o vplivnosti lastnosti odsevnih površin na cirkadiani potencial lahko na podlagi omenjenih rezultatov ovržemo, saj je očitno, da ima sprememba barve pri enaki odsevnosti večji vpliv na cirkadiani potencial (RMU in RCU) kakor sprememba nasičenosti pri barvi enakega odtenka.

4.4.2 Vidik vpliva na cirkadiano svetlobno okolje

Poudariti moramo, da cirkadiani potencial (tj. RMU in RCU) ne izraža popolnega stanja cirkadianega svetlobnega okolja. Kako velik je vpliv na cirkadiani sistem posameznika, je

predvsem odvisno tudi od količine prejete svetlobe in ne samo od spektralne sestave, ki jo vrednoti cirkadiani potencial. Zato je to, kako velik je vpliv na cirkadiano svetlobno okolje, na splošno odvisno tudi od vidne presevnosti (τ_v) in vidne odsevnosti (R_v) ter seveda zunanje osvetljenosti; vse to pomembno vpliva na skupno količino dnevne svetlobe v prostoru. Na primer, v razmerah jasnega neba z modro obarvanim oknom (DP_bt1) v kombinaciji z modro obarvano steno na stopnji nasičenosti II (tj. BS2) se pokaže v 44 % višji vrednosti *RME* kot zasteklitev z nizkoemisijским premazom (DP_l-e) pri isti barvi stene (slika 45). Uporaba zasteklitve DP_l-e povzroči 60 % večjo povprečno dnevno ekvivalentno melanopsko osvetljenost in 10 % višje vrednosti *CS* v primerjavi z modro obarvano zasteklitvijo (slika 52). Iz tega je razvidno, da je DP_l-e najboljša izbira z vidika vizualnih kakor tudi cirkadianih zahtev v proučevanem primeru severno usmerjene celične pisarne. To je posledica visoke τ_v in spektralno nevtralne narave zasteklitve, kar se kaže v veliki, a še vedno udobni fotopski osvetljenosti (zaradi severne orientacije in posledične odsotnosti bleščanja) in v ugodnejšem cirkadianem svetlobnem okolju, neodvisno od barve stene.

Na splošno so stekla, ki so solarno in toplotno zaščitena (npr. DP_bt1, DP_brt itd.), zasnovana za lokacije z velikimi sončnimi dobitki v hladilni sezoni. Takšna stekla imajo majhno τ_v in se posledično v prostoru izražajo tudi z majhnimi izmerjenimi vertikalnimi osvetljenostmi v primerjavi z DP_l-e (sliki 52 in 53). V nasprotju z manjšimi odstopanji pri doseženih fotopskih osvetlitvah med zasteklitvijo DP_brt in DP_bt1 opazimo bistveno razliko v cirkadianem svetlobnem okolju (sliki 52 in 53), kar se kaže v cirkadianem potencialu (*RMU* in *RCU*) (sliki 47 in 48) in povzroči bistveno večjo ekvivalentno melanopsko osvetljenost in vrednost *CS* modre (DP_bt1) kakor bronasto obarvane zasteklitve (DP_brt), čeprav pri podobnih τ_v (preglednica 6). Ti rezultati so deloma v nasprotju z ugotovitvami Chen in sod. [141], ki poročajo o velikih vrednostih *CS* za rdečo in majhnih vrednostih *CS* za modro obarvano zasteklitev. Vendar predvidevamo, da je neskladje med našimi ugotovitvami in ugotovitvami Chen in sod. posledica velike variabilnosti zunanjih razmer njihove študije in posledično velikih odstopanj v vrednostih izmerjenih osvetljenosti v notranjosti, ki v študiji niso bile podrobno opisane.

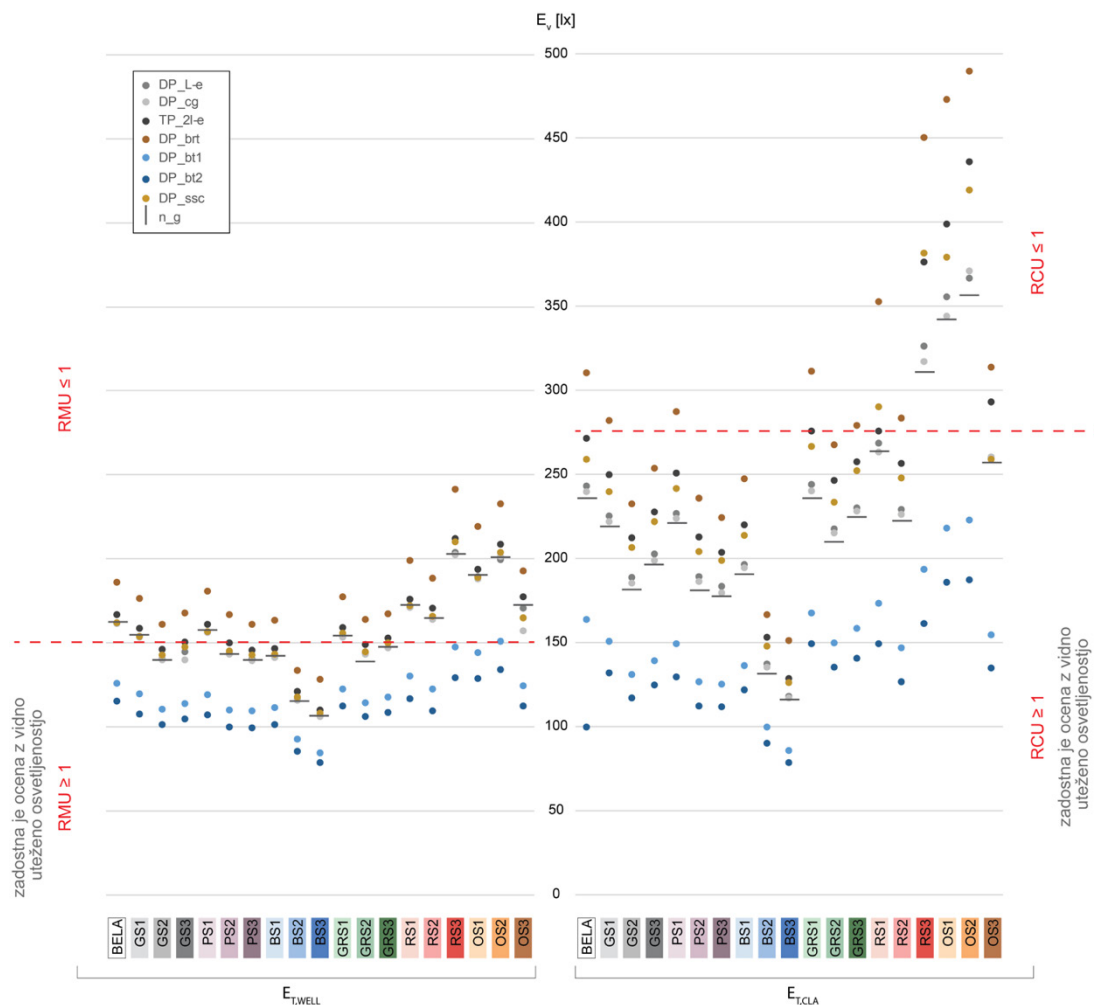
Glede na rezultate bi bila zasteklitev, kot je DP_bt1, primerna za stavbe z velikim razmerjem med okni in stenami (*WWR*) na lokacijah, ki so nagnjene k pregrevanju. Vendar lahko obarvane solarnozaščitne zasteklitve povzročijo majhne vrednosti R_a (indeks barvnega videza), kar povzroči neprimerno barvno upodabljanje in splošno vizualno nesprejemljive svetlobne razmere v zaprtih prostorih. V primeru DP_bt1 ima zasteklitev vrednost $R_a = 0,75$ (preglednica 7), ki je pod mejnikom $R_a = 0,80$, kar se običajno šteje za še sprejemljiv R_a

zasteklitve [149, 153]. Zadnje opozarja na dejstvo, da je treba obarvano, solarnozaščitno zasteklitev uporabljati s previdnostjo, saj lahko bistveno (negativno) vpliva na več vidikov notranjega svetlobnega okolja.

V gradbenih projektih vrsto zasteklitve običajno določijo arhitekti v fazi snovanja in se v življenjski dobi stavbe le redko spremeni. V nasprotju s tem pa se barve notranjih površin, kot so stene, enostavno zamenjajo in jih zato stanovalci in/ali oblikovalci prostorov pogosto spreminjajo. To pa lahko povzroči potencialne pozitivne ali negativne učinke na svetlobno okolje stavbe, to se še posebej pokaže, kadar spremljamo cirkadiano svetlobno okolje. Rezultati simulacij (sliki 52 in 53), predstavljeni v študiji, jasno ponazarjajo različne vplive, ki jih lahko povzročijo barve sten z enakovrednimi vidnimi odsevnostmi (tj. GS2, BS2 in OS2) na cirkadiano svetlobno okolje, obenem pa na vidno svetlobno okolje nimajo posebnega vpliva. Natančneje, izkazalo se je, da je bila pri modro (BS2) pobarvanem zidu izmerjena E_m 27 % večja in pri oranžno (OS2) pobarvanem zidu E_m 22 % manjša kot pri nevtralnno sivi (GS2) barvi. Opisani vpliv izbire barv sten jasno kaže na dejstvo, da izbira barvnih odtenkov sten ni pomembna le z vidika cirkadianega potenciala (RME in RCU), ampak tudi z vidika cirkadianega svetlobnega okolja, saj lahko barve enakih R_v bistveno drugače učinkujejo.

4.4.3 Vrednotenje cirkadiane vsebine glede izpolnjevanja vidnih zahtev

Za pridobljene rezultate RMU in RCU v danih svetlobnih razmerah izpostavljenosti severnega neba pri globalni spektralni sestavi neba v času trajanja eksperimenta 28. 2. 2019 (slika 42) smo izračunali količine dnevne svetlobe v fotopsko uteženih lx, ki bi bile potrebne za doseganje kriterija po WELL-sistemu vrednotenja kakovosti notranjega okolja [142] (potrebnih je najmanj 150 EML na vertikalni ravnini), ter količine svetlobe, potrebne za doseganje kriterijev $CS = 0,3$ po študijah Figueiro in sod. [70, 90, 154], za vsako izmed proučevanih iteracij v eksperimentu.



Slika 54: Osvetljenost, potrebna za zadostitev kriteriju po WELL (levo) in CL_A (desno), za vsakega izmed izmerjenih primerov eksperimenta.

Figure 54: Illuminance required to meet the WELL (left) and CL_A (right) criteria for each of the measured experimental iterations.

Na sliki 54 je za vsako izmed opravljenih eksperimentalnih različic (numerični podatki so prikazani v prilogi A.5) upodobljeno, kolikšna je količina svetlobe, ki bi bila potrebna za izpolnjevanje kriterija bodisi z vidika WELL (levo) ali $CS = 0,3$ (desno). Razvidno je, da je v danih svetlobnih razmerah pri 79 % primerov z vidika RCU zadostno napovedovanje z vidno osvetljenostjo in le pri 55,7 % primerov z vidika RMU . Nižji odstotek primerov pri RMU je posledica tega, ker ta metrika ne upošteva sodelovanja preostalih fotoreceptorjev pri delovanju cirkadianega sistema. Tako bodo v nadaljevanju doktorske naloge tudi rezultati analiz ovrednoteni le z vidika cirkadianega stimulusa (CS) oz. relativne cirkadiane učinkovitosti, saj je ta v nasprotju s priporočili WELL preverjena v eksperimentalnih meritvah, kot je to že omenjeno v poglavju 2.4.5, in zato z gotovostjo vemo, da količina svetlobe pri 0,3 CS dviga pozornost, budnost itd. Pri spektralnih razmerah jasnega severnega neba je očitno, da modra barva stene ali modro obarvana okna izrazito izboljšajo notranje svetlobno

okolje, zato lahko v danih zunanjih razmerah takšne kombinacije ocenjujemo zgolj s stališča vidne osvetljenosti. Prav tako lahko nevtralna okolja (kombinacije GS1,2 in 3 ter ng, DP_cg, DP_le in TP_2-1-e) napovedujemo le s pomočjo vidnih osvetljenosti. Rezultati omenjenih primerov so pod rdečo črto (slika 54), torej je njihova $RCU \geq 1,00$, kar pomeni, da bi za presojo, ali je cirkadiano svetlobno okolje dovolj osvetljeno, s pomočjo podatka o osvetljenosti 275 lx lahko ocenili, da je z vidika cirkadianega svetlobnega okolja osvetljeno vsaj z 275 CL_A , kar zadošča kriteriju $CS = 0,3$. Za nobeno izmed okolij, kadar je bila uporabljena bronasta zasteklitev (DP_brt), ni mogoče ocenjevati cirkadiane vsebine s pomočjo vidnih osvetljenosti – potrebnih je več kakor 275 lx za izpolnjevanje kriterija $CL_A = 275$, omenjeni primeri so na sliki 54 nad rdečo črto.

Omenjene ugotovitve porajajo vprašanje: Ali je torej za nevtralne in modro obarvane prostore res potrebno dodatno ocenjevanje svetlobnega okolja z vidika cirkadianega osvetljevanja? Znano je, da je svetloba spremenljiva in da je njena spektralna sestava odvisna od časa v dnevu in letu. Ta lahko niha vse od približno od 4000 K jutranjega neba do 7500 K jasnega severnega neba (glej poglavje 2.2.1). Eksperiment je bil torej opravljen ravno za najboljšo spektralno sestavo z vidika cirkadianega svetlobnega okolja. Torej če bi želeli natančneje preveriti tretjo hipotezo doktorske disertacije, moramo RCU preveriti v različnih svetlobnih oz. podnebnih razmerah (letni čas, ura v dnevu in vremenske razmere).

»Ta stran je namenoma prazna«

5 OCENJEVANJE NOTRANJEGA CIRKADIANEGA SVETLOBNEGA OKOLJA PRI SPREMENLJIVIH ZUNANJIH SVETLOBNIH RAZMERAH

Povzetek

V prejšnjem poglavju je bilo prikazano, da je za oceno cirkadianega svetlobnega okolja ob razmerah severnega jasnega neba pri spektralno nevtralnih prostorih in prostorih z modrimi površinami zadostna ocena le z vidika vidnega zaznavanja svetlobe. Vendar se zunanje svetlobne razmere skozi dan in leto spreminjajo zaradi navideznega gibanja Sonca po nebu in različnih vremenskih razmer. Zato smo v tem poglavju zasnovali simulacijsko študijo štirih enakih enostransko osvetljenih prostorov. Vsak izmed njih je bil z okensko odprtino orientiran proti svojemu delu neba. Izračunali smo, kakšna je cirkadiana svetlobna vsebina z vidika časovne in prostorske komponente vsakega izmed prostorov ob karakterističnih dnevih za jasno, oblačno in delno oblačno stanje neba od sončnega vzhoda do sončnega zahoda vsakega izmed karakterističnih dni. Kot je bilo pričakovano zaradi velikih globalnih osvetljenosti, rezultati pokažejo najugodnejše cirkadiano svetlobno vsebino prostorov junija. Dodatno ugotovimo, da cirkadiano svetlobno vsebino spektralno nevtralnih prostorov ob oblačnem nebu lahko ocenjujemo zgolj z vidika vidne svetlobe, neodvisno od orientacije prostora in položaja in/ali pogleda hipotetičnega opazovalca za vsako uro v dnevu. Z vidika vidne svetlobe lahko ocenjujemo cirkadiano svetlobno vsebino tudi od septembra do marca za severno orientirane prostore jasnega in delno oblačnega neba, neodvisno od položaja in usmerjenosti pogleda. V preostalih primerih prepoznamo bodisi majhne vrednosti relativne cirkadiane učinkovitosti v jutranjih urah (vzhodno orientirani prostori delno oblačnega in jasnega neba) ali v popoldanskih urah (zahodno orientirani prostori delno oblačnega in jasnega neba). Oranžno pobarvani prostori zmanjšujejo trajanje izpostavljenosti cirkadiano učinkoviti svetlobi, modri pa ga povečujejo neodvisno od orientacije v prostoru ter položaja in usmerjenosti uporabnika.

Abstract

It was shown in the previous chapter, that the assessment from the visual standpoint of light is sufficient to evaluate circadian luminous environment under clear northern sky for spectrally neutral spaces and spaces with blue coloured surfaces. However, daylight conditions are dynamic and change in day and year, due to sun position and weather conditions. Thus, this chapter presents a simulation study of four identical one side lit rooms. Each of the rooms has its own orientation. Circadian luminous environment was calculated from the spatial and temporal standpoint for each room under clear, intermediate and overcast sky conditions from sunrise to sunset for each of the characteristic days. As expected, best circadian environment results are measured in June due to high external illuminances in the summer. Additionally, it was found that the circadian luminous content of neutral spaces can be assessed for each hour in day from the visual standpoint of light, assuming that the weather conditions are overcast. Circadian luminous environment can be assessed from the visual standpoint also from September to March under clear and intermediate sky for the north oriented room. Low values of relative melanopic efficacy are calculated for early morning (east oriented rooms, intermediate and clear sky) or late evening hours (west oriented rooms, intermediate and clear sky) of the rest of the cases. Orange coloured rooms lower the exposure to circadian effective light, while blue coloured rooms elicit the effective circadian exposure.

5.1 Uvod

Glavni namen študije, ki je predstavljena v tem poglavju, je s pomočjo spektralnih simulacij svetlobnega okolja pri različnih vremenskih razmerah odgovoriti na odprto vprašanje iz prejšnjega 4. poglavja: Ali je za vrednotenje cirkadianega svetlobnega okolja dovolj že analiza le z vidika fotopske osvetljenosti E ?

Študija iz prejšnjega poglavja je sicer pokazala, da lahko pri nevtralnih in modrih notranjih okoljih v stanju jasnega neba in dopoldanskih urah vrednotimo cirkadiano svetlobno okolje le z vidika vidne osvetljenosti. Toda, dnevna svetloba se nenehno spreminja glede na vremenske razmere in trenutek opazovanja glede na čas v dnevu in letu. Zato smo na to vprašanje odgovorili s pomočjo študije svetlobnih pogojev enakih vzorčnih pisarn pri različnih orientacijah prostora za tri karakteristične dni v letu: zimski in letni solsticij (21. december in 21. junij) ter pomladanski ekvinokcij (21. marec), pri treh stanjih neba (jasno nebo, delno oblačno in oblačno nebo), za geografsko širino Ljubljane. Študija je sestavljena iz treh metodoloških korakov, ki so bili izvedeni v sosledju, prikazanem na sliki 55, in bodo v enakem vrstnem redu predstavljeni tudi v tem poglavju.



Slika 55: Metodološki potek študije.

Figure 55: Study's methodological approach.

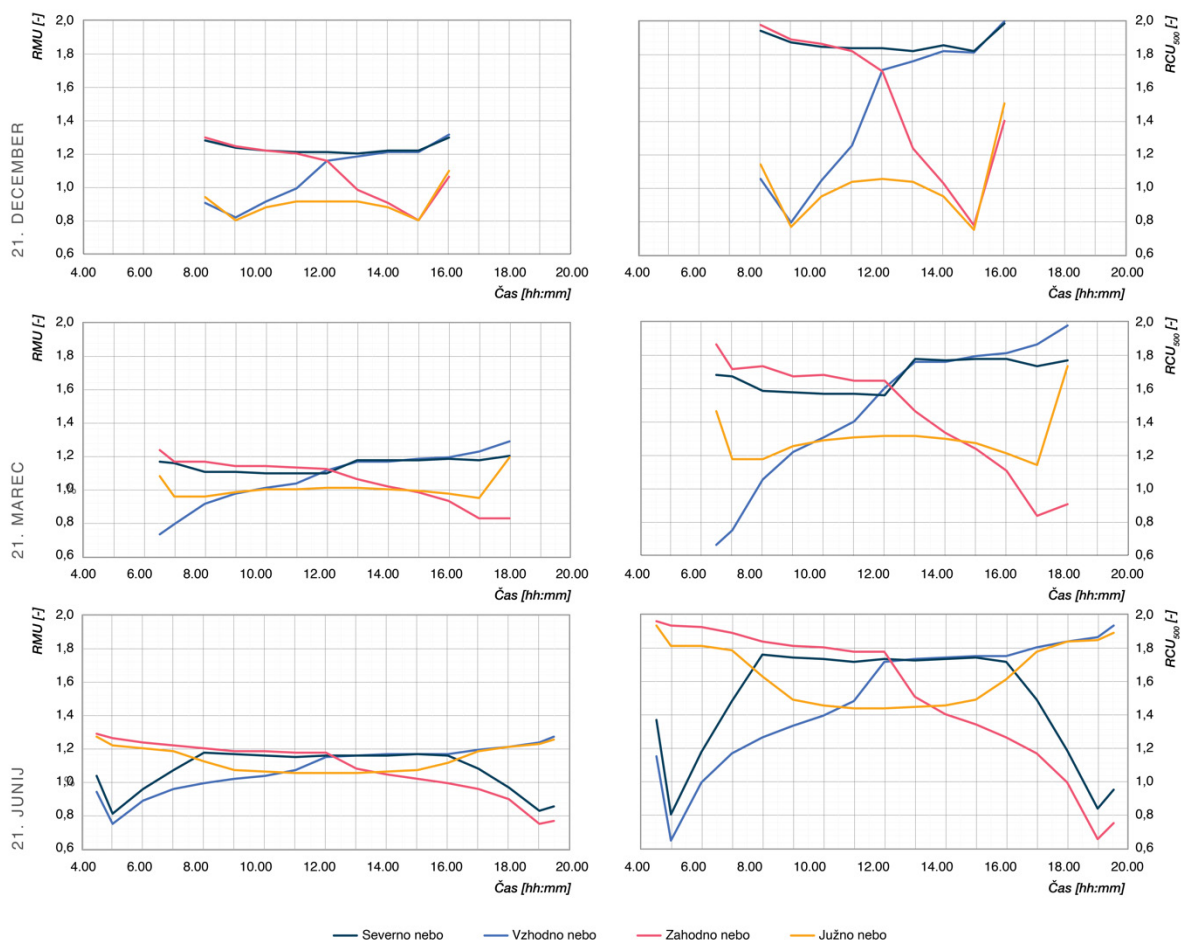
5.2 Metoda

5.2.1 Določitev zunanjih razmer dnevne svetlobe

Zunanje razmere dnevne svetlobe so bile določene tako, da z njimi pokrijemo največji razpon stanj dnevne svetlobe v okvirjih zmogljivosti simulacijskega orodja ALFA in algoritma, ki generira spektralno nebo libRadtran (glej poglavje 2.6.2). Študija je bila zato izvedena za tri tipologije neba: jasno, delno oblačno in oblačno, 21. decembra, marca in junija. Simulacije so bile izvedene v urnih korakih od sončnega vzhoda (sončni vzhod je v orodju ALFA definiran kot prvi neničelni rezultat simulacije) do sončnega zahoda (sončni zahod je v orodju ALFA definiran kot prvi ničelni rezultat v drugi polovici dneva). Podatki spektralne gostote sevalne moči vseh simuliranih razmer dnevne svetlobe so v prilogi A.2. Vse simulirane spektre dnevne svetlobe, uporabljene v študiji, smo preračunali v *RMU* in *RCU*₅₀₀ (relativna cirkadiana učinkovitost pri 500 lx) in so prikazani na slikah 56, 57 in 58. Informacije o relativni učinkovitosti, melanopski ali cirkadiani, nazorno prikazujejo potencial, ki ga ponuja dnevna svetloba čez dan v različnih vremenskih razmerah in obdobjih v letu. Relativna cirkadiana in melanopska učinkovitost zunanjih razmer dnevne svetlobe sta bili izračunani za štiri dele hemisfere – tj. severno, južno, vzhodno in zahodno nebo. Severno nebo označuje *RCU* oz. *RMU*, kadar merimo proti severni hemisferi, vzhodno nebo merimo proti vzhodnemu delu hemisfere itd. To je zelo pomembno, saj se lahko spektralna sestava npr. vzhodne in zahodne hemisfere čez dan očitno razlikuje zaradi prisotnosti/odsotnosti Sonca v različnih delih dneva.

Na sliki 56 so prikazane vrednosti RMU in RCU jasnega neba za 21. december, marec in junij. Z grafov vseh mesecev je razvidno, da je sestava dnevne svetlobe zelo spremenljiva v odvisnosti od časa in dela neba. Vrednosti RCU segajo od najmanjše vzhodnega neba $RCU_{500} = 0,65$ junija ob 5.00 do največje vrednosti $RCU_{500} = 2,02$ decembra ob 16.00. Vzhodno in zahodno nebo se kažeta v največjih spremembah v RCU_{500} zaradi prisotnosti oz. odsotnosti Sonca ob sončnem vzhodu oz. zahodu. RCU_{500} severnega neba se v poteku celotnega dne kaže v $RCU_{500} \geq 1,00$. Podobno kakor za RCU_{500} velja tudi za RMU , variabilnost RMU je največja v primerih vzhodnega in zahodnega neba z največjim $RMU = 1,31$ decembra ob 16.00 in najmanjšim $RMU = 0,81$ junija ob 5.00. RMU severnega neba je analogno z $RCU \geq 1,00$ ves dan 21. decembra in 21. marca.

JASNO NEBO

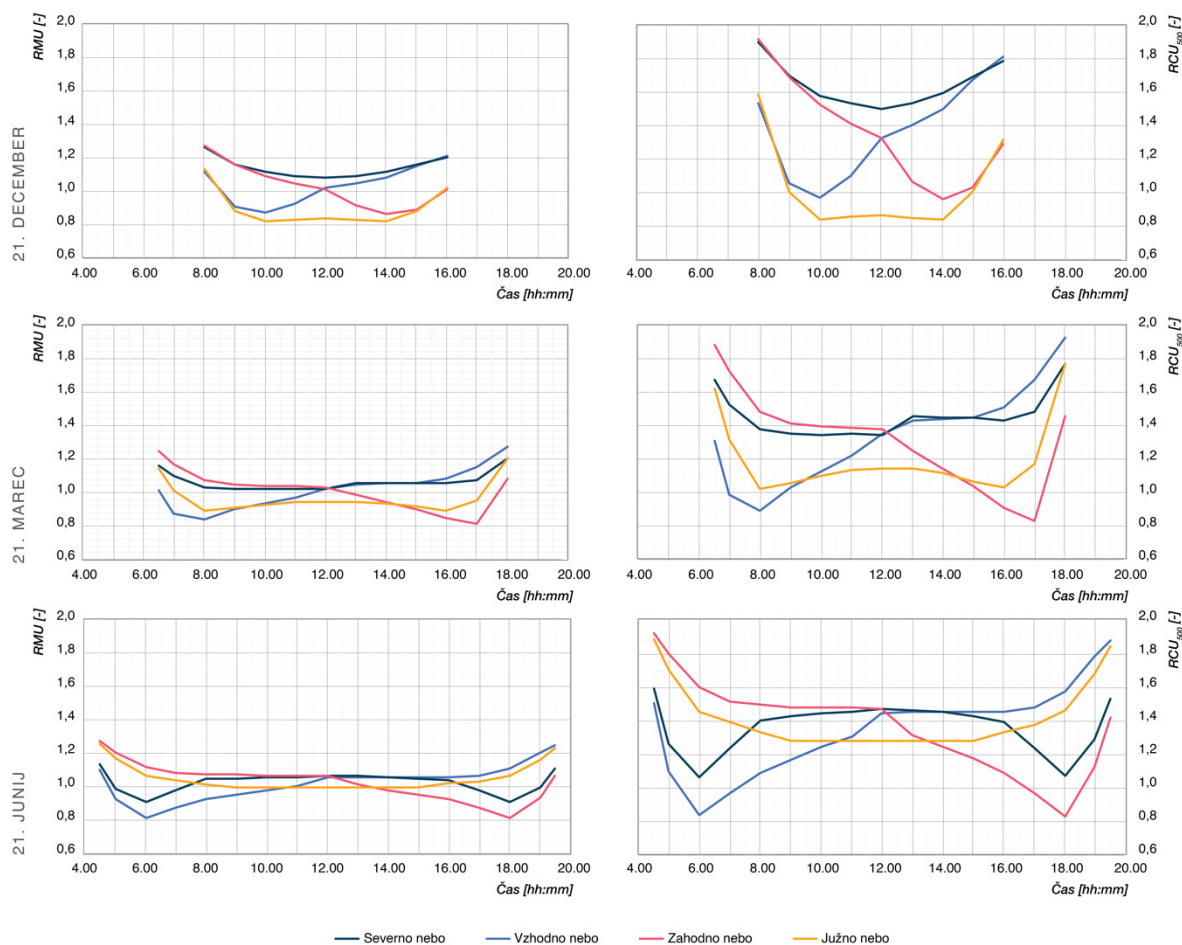


Slika 56: Relativna melanopska in cirkadiana učinkovitost (RMU in RCU) za severno, vzhodno, zahodno in južno nebo treh karakterističnih dni (21. december, junij in september) pri jasnem nebu.

Figure 56: Relative melanopic and circadian efficacy (RMU and RCU) for north, east, west and south sky in relation for three characteristic days (21st of December, June and September) with clear sky conditions.

RCU_{500} delno oblačnega neba se podobno kakor pri jasnem nebu kaže v velikih razponih RCU_{500} z najmanjšimi vrednostmi RCU_{500} in RMU vzhodnega neba zjutraj in zahodnega neba popoldne, vse do najmanjše $RCU_{500} = 0,83$ in $RMU = 0,81$ 21. junija. Največji cirkadiani in melanopski potencial sta dosežena na vzhodnem nebu 21. junija z $RCU_{500} = 1,88$ in $RMU = 1,25$ vzhodnega neba marca. Najboljše spektralne razmere junija se kažejo na južnem nebu, kjer sta RMU in $RCU_{500} > 1$ ves dan. Severno nebo se kaže v $RCU_{500} \geq 1,00$ za potek vseh treh dni, prikazanih na sliki 57.

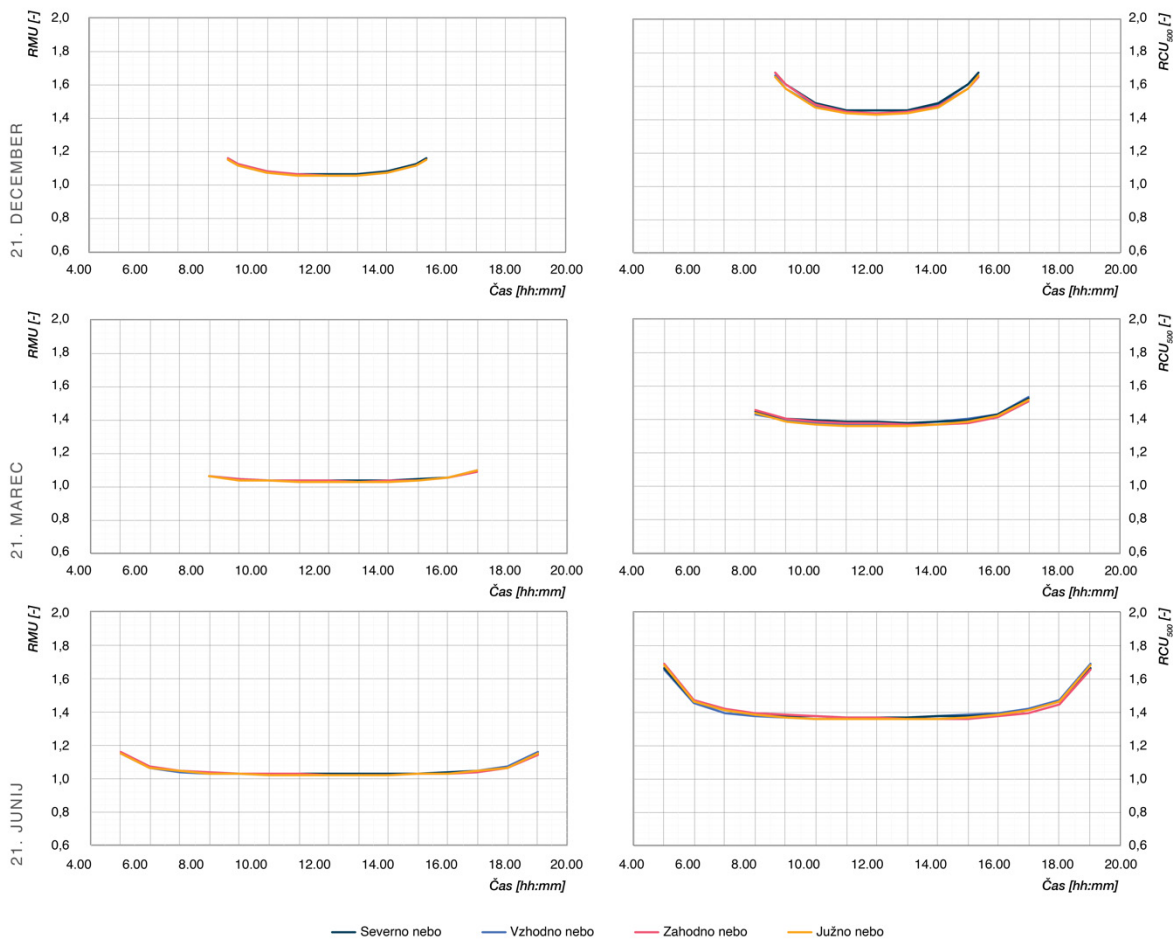
DELNO OBLAČNO NEBO



Slika 57: Relativna melanopska in cirkadiana učinkovitost (RMU in RCU) za severno, vzhodno, zahodno in južno nebo treh karakterističnih dni (21. december, junij in september) pri delno oblačnem nebu.
 Figure 57: Relative melanopic and circadian efficacy (RMU and RCU) for north, east, west and south sky in relation for three characteristic days (21st of December, June and September) with intermediate sky conditions.

RCU_{500} in RMU oblačnega neba se kažejo v splošno najbolj enakomernih spektralnih razmerah izmed treh tipologij neba, ki jih bomo uporabljali v simulaciji svetlobnega okolja notranjih prostorov (slika 58). Severno, vzhodno, južno in zahodno nebo se izražajo v primerljivih RCU_{500} zaradi enakomerne razporeditve oblačnosti, ki se kaže v podobnem sipanju svetlobe z vsake strani neba (azimutna enakomernost neba). Največje RCU_{500} in RMU opazimo zjutraj in zvečer, najmanjše RCU_{500} pa opoldne. RCU_{500} vseh treh karakterističnih dni ob oblačnem nebu presega 1,00.

OBLAČNO NEBO



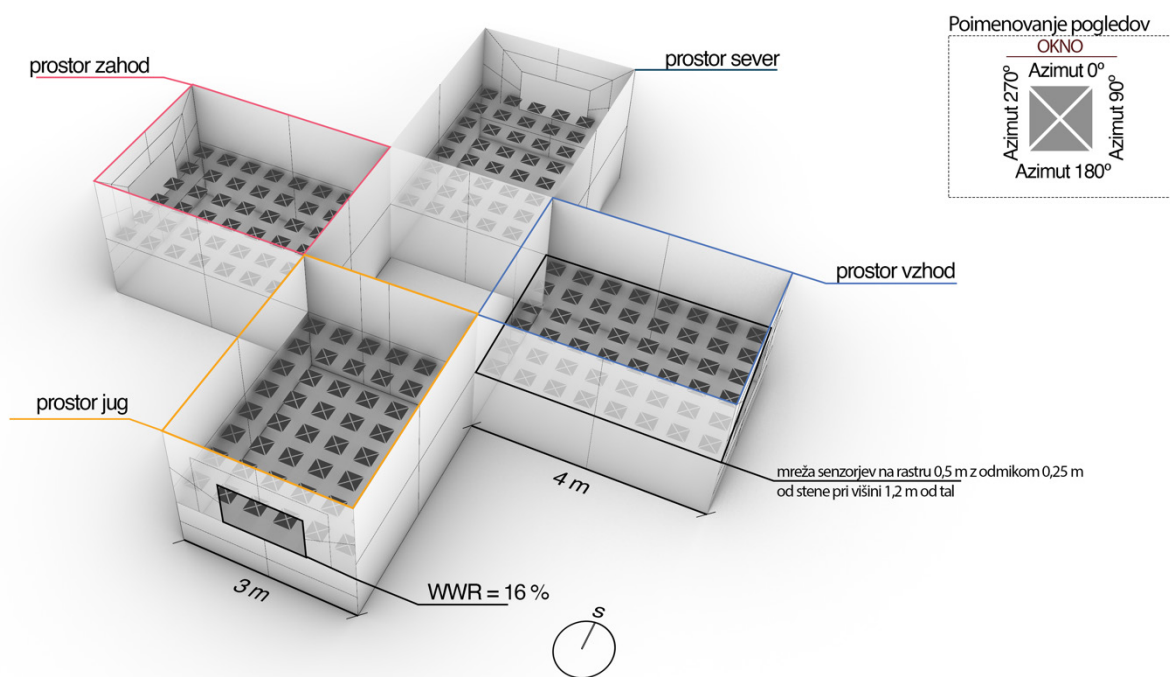
Slika 58: Relativna melanopska in cirkadiana učinkovitost (RMU in RCU) za severno, vzhodno, zahodno in južno nebo treh karakterističnih dni (21. december, junij in september) pri oblačnem nebu.

Figure 58: Relative melanopic and circadian efficacy (RMU and RCU) for north, east, west and south sky in relation for three characteristic days (21st of December, June and September) with overcast sky conditions.

5.2.2 Določitev geometrije prostorov

Za študijo smo zasnovali štiri enake prostore (slika 59) na podlagi eksperimentalnega prostora iz 4. poglavja, dimenzij 4 m x 3 m (dolžina x širina), pri svetli višini 2,6 m, ki so enostransko

naravno osvetljeni s simetrično postavljenim oknom dimenzij 1,4 m x 0,9 m, kar obsega 16-% delež zasteklitve zunanje stene (*WWR*) pri parapetu 0,9 m. Prostore smo poimenovali prostor sever, prostor vzhod, prostor jug in prostor zahod, po orientiranosti normale okenske odprtine. Z orientiranostjo prostorov proti različnim stranem neba smo pokrili prejem različne spektralne sestave dnevne svetlobe v odvisnosti od dela neba za vsako uro karakterističnih dni (poglavje 5.2.1). V vsakem izmed prostorov smo vzpostavili mrežo 8 x 6 merilnih mest (0,25 m odmik od zidu in 0,5 m odmik med sosednjimi točkami) na višini 1,2 m od tal. V vsakem izmed merilnih mest je bila beležena spektralna distribucija prejete dnevne svetlobe v štirih pogledih, ki smo jih poimenovali: Azimut oz. $Az = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ in 270° . $Az 0^\circ$ je vedno orientiran proti zidu z okensko odprtino, nato mu sledijo $Az = 90^\circ, 180^\circ$ in 270° v sourni smeri, kot je to prikazano tudi na sliki 59.



Slika 59: Zasnova simulacijskih modelov štirih pisarn z enakimi dimenzijami in enakim deležem okenske zasteklitve.

Figure 59: Design of the simulation models of four identical offices with same room dimensions and window size.

5.2.3 Optične lastnosti gradbeno-arhitekturnih elementov

Tri različice materialnosti zidov smo preverili v treh simulacijskih ciklih, opisanih v preglednici 8. Vsem variantam so skupne lastnosti za tla, strop in okna, za katere smo izbrali materiale iz eksperimentalnega modela 4. poglavja, ki so ponovno opisani v preglednici 7, njihove spektralne lastnosti pa so prikazane na sliki 60. Tla vseh prostorov so torej iz brezovega

lesa, strop je pobarvan v barvo WS, v okensko odprtino je vstavljeno dvoslojno steklo brez nizkoemisijskega premaza (DP_cg). V nevtralnem ciklu smo za vse zidove določili lastnosti teoretično sive barve (SIVA_50 na sliki 60) pri R_v in $R_m = 0,500$. V toplém ciklu smo vse zidove pobarvali na oranžno z $R_v = 0,500$ in $R_m = 0.294$ (ORANŽNA_50 na sliki 60). V hladnem ciklu smo vse zidove pobarvali v modro barvo z $R_v = 0.500$ in $R_m = 0,684$ (MODRA_50 na sliki 60).

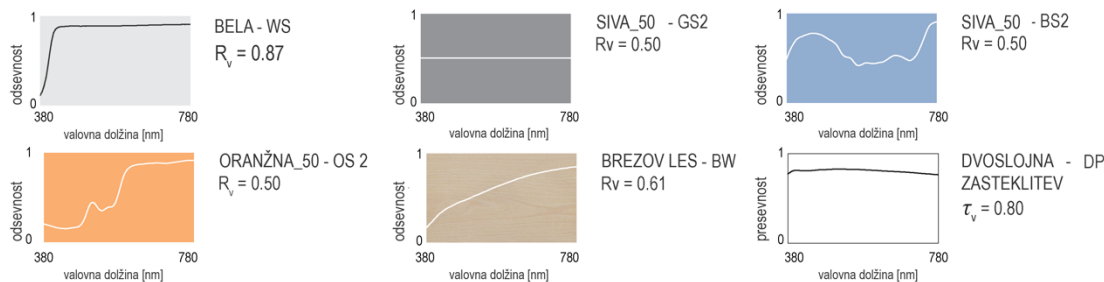
Preglednica 8: Materiali, uporabljeni v simulacijskem modelu.

Table 8: Materials used in the simulation models.

MATERIALI, KI SO ENAKI V VSAKEM IZMED CIKLOV

tla *	brezov les	$R_v = 60,6 \%$	$R_m = 48,6 \%$
strop *	WS	$R_v = 89,0 \%$	$R_m = 89,0 \%$
okno *	DP_cg	$\tau_v = 81,9 \%$	$\tau_m = 82,0 \%$
Nevtralen cikel			
zidovi	SIVA_50**	$R_v = 50,0 \%$	$R_m = 50,0 \%$
Topel cikel			
zidovi	ORANŽNA_50**	$R_v = 50,0 \%$	$R_m = 29,4 \%$
Hladen cikel			
zidovi	MODRA_50**	$R_v = 50,0 \%$	$R_m = 68,4 \%$

* Natančen graf spektralne odsevnosti materiala je na sliki 60.
** Natančen graf spektralne odsevnosti materiala je na sliki 60.



Slika 60: Spektri uporabljenih odsevnih in presevnih materialov.

Figure 60: Spectrums of the reflective and transmissive materials used in the study.

5.2.4 Vrednotenje cirkadianega svetlobnega okolja

Izračunani spektri prejete svetlobe bodo vrednoteni izključno z vidika CS (cirkadianega stimulusa) in RCU (relativne cirkadiane učinkovitosti), saj je, kot je bilo omenjeno že v poglavjih 2.4.4 in 4.5, metrika CS preverjena na eksperimentalnih meritvah z ljudmi in sočasno upošteva sodelovanje vseh sodelujočih fotoreceptorjev pri cirkadiani zaznavi svetlobe. Cirkadiano okolje bo vrednoteno z vidika časovne komponente in prostorske komponente. Omenjeni metodi sta predstavljeni v naslednjih podpoglavjih.

5.2.4.1 Vrednotenje z vidika časovne komponente s pomočjo cirkadiane avtonomije CA in avtonomije cirkadianega potenciala RCU+

Ker smo svetlobne razmere prostorov proučevali v celotnem svetlem delu dneva, smo za vrednotenje cirkadianega svetlobnega okolja uvedli novo metriko, ki vrednoti cirkadiani stimulus v izbranem časovnem intervalu (v našem primeru je to svetel del enega dne). Metriko smo poimenovali cirkadiana avtonomija – CA (angl. *Circadian Autonomy*) po zgledu klimatsko pogojene metrike avtonomije dnevne svetlobe – DA (angl. *Daylight Autonomy*) [155]. CA izraža delež časa v določenem časovnem obdobju, ki zadošča kriteriju cirkadiano učinkovite svetlobe $CS \geq 0,3$. CA izračunamo po naslednji enačbi:

$$CA = \frac{t_{CS}}{t} \cdot 100 \quad (35)$$

pri čemer je:

CA – avtonomija cirkadiane svetlobe [%],

t_{CS} – čas, kadar je dosežen kriterij cirkadiano učinkovite svetlobe $CS \geq 0,3$ [h],

t – izbrani časovni interval [h].

Analogno smo tudi za vrednotenje cirkadianega potenciala uvedli novo metriko, ki smo jo poimenovali avtonomija cirkadianega potenciala – RCU+. Ta izraža delež časa v izbranem časovnem intervalu, ko je $RCU \geq 1,0$. Z drugimi besedami, delež časa v izbranem časovnem intervalu, ko je zadostno že vrednotenje cirkadianega svetlobnega okolja na podlagi fotopskih osvetljenosti E_v . Avtonomijo cirkadianega potenciala smo izračunali po naslednji enačbi:

$$RCU+ = \frac{t_{RCU}}{t} \cdot 100 \quad (36)$$

pri čemer je:

RCU + – avtonomija cirkadianega potenciala pri 500 lx [%],

t_{RCU} – čas, kadar je $RCU \geq 1,0$ [h],

t – izbrani časovni interval [h].

5.2.4.2 Prostorsko pogojeno vrednotenje cirkadianega svetlobnega okolja in cirkadianega potenciala

Cirkadiano svetlobno okolje smo prostorsko vrednotili po naslednji enačbi:

$$T_{CS} = \frac{N_{CS}}{N_{total}} \cdot 100 \quad (37)$$

pri čemer je:

- T_{CS} – delež senzorjev, ki dosegajo kriterij cirkadiano učinkovite svetlobe $CS \geq 0,3$ [%],
- N_{CS} – število senzorjev, ki dosegajo kriterij cirkadiano učinkovite svetlobe $CS \geq 0,3$ [-],
- N_{total} – skupno število senzorjev [-].

Analogno s T_{CS} vrednotimo tudi cirkadiani potencial oz. relativno cirkadiano učinkovitost:

$$T_{RCU} = \frac{N_{RCU}}{N_{total}} \cdot 100 \quad (38)$$

pri čemer je:

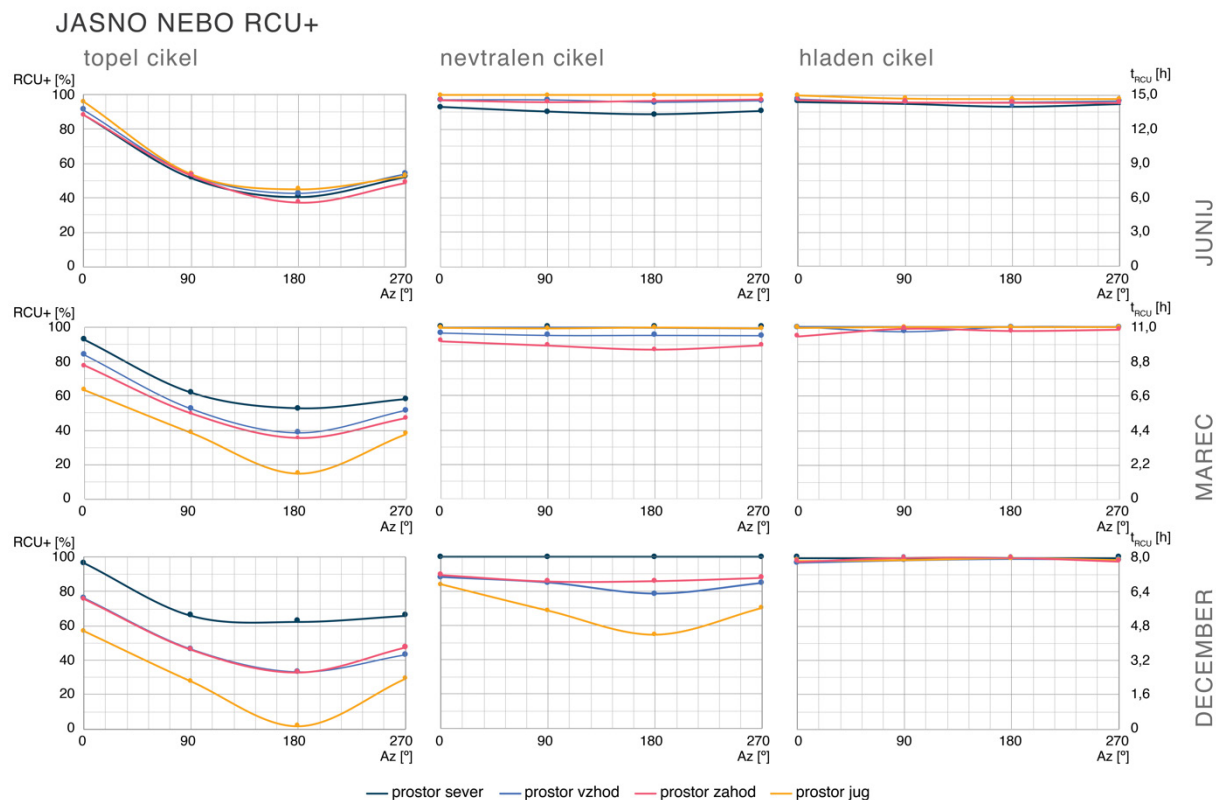
- T_{RCU} – delež senzorjev z $RCU \geq 1,0$ [%],
- N_{CS} – število senzorjev z $RCU \geq 1,0$ [-],
- N_{total} – skupno število senzorjev [-].

5.3 Rezultati

Rezultati cirkadianega svetlobnega okolja in cirkadianega potenciala bodo predstavljeni v dveh delih. V prvem bodo predstavljeni podatki z vidika časovne komponente oz. vidika CA (cirkadiane avtonomije) in $RCU+$ (avtonomije cirkadianega potenciala, glej poglavje 5.2.4.2) vseh proučevanih primerov. V drugem delu bodo nato predstavljeni rezultati CS in RCU s prostorskega vidika jasnega neba (najmanjši RCU_{500} pogojev dnevne svetlobe) marca, junija in decembra s pripadajočimi časovnimi izseki najslabših razmer z vidika RCU_{500} v poteku celotnega dne.

5.3.1 Avtonomija cirkadianega potenciala in cirkadiane svetlobe

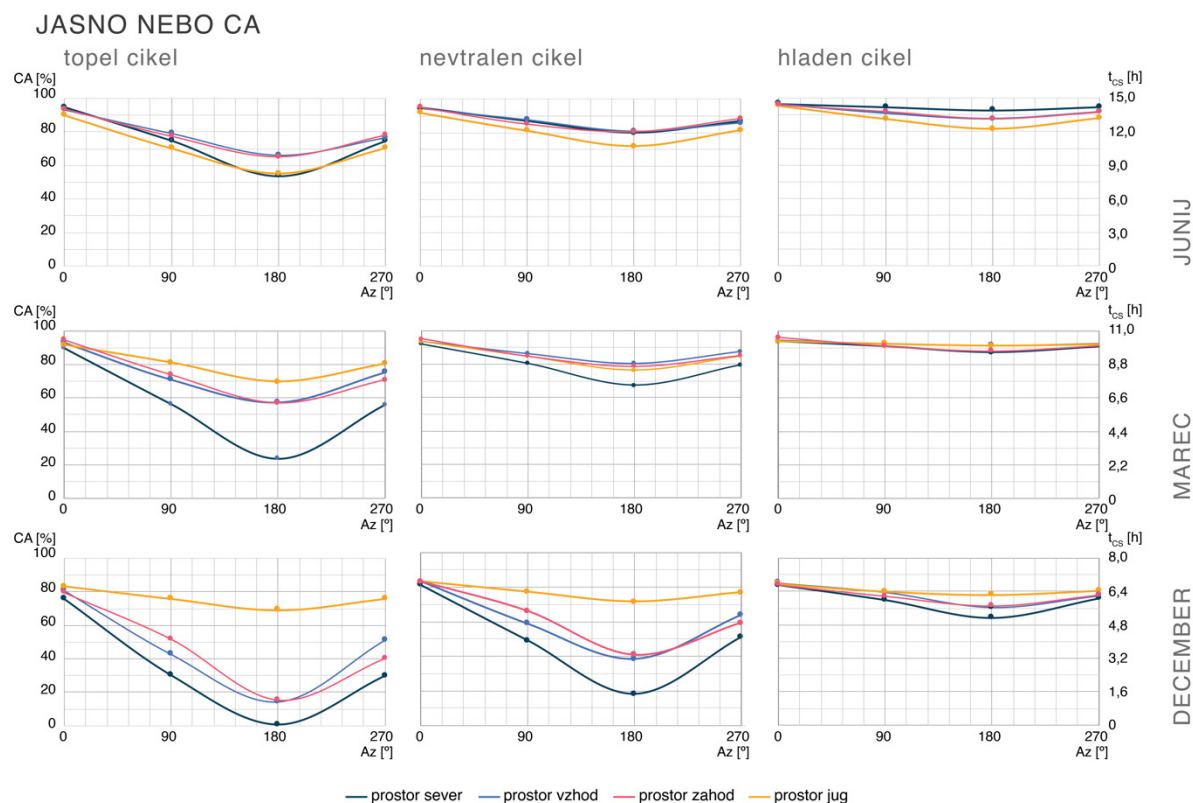
Avtonomije povprečnega cirkadianega potenciala prostorov ($RCU+$) in cirkadiane svetlobe (CA), ko je nebo jasno, so prikazane na slikah 61 in 62. Izkaže se, da se prostor jug junija in marca odraža v RCU , večjih od 1,0 v vseh svetlih urah dneva ($RCU+ = 100$ %). Kar pomeni, da lahko ob takšnih razmerah prostor vrednotimo zgolj z vidika vidne osvetljenosti v trajanju celotnega dne. Prostor jug s pogledom Az (azimut) = 180° decembra v nasprotju z junijem in marcem pa se izkaže za mesec z najmanjšo povprečno $RCU+ = 54,6$ % (povprečni $t_{RCU+} = 4,64$ h) izmed obravnavanih primerov nevtralnega cikla (slika 61).



Slika 61: Povprečni $RCU+$ obravnavanih prostorov po mesecih v odvisnosti od pogleda za tople, nevtralen in hladen cikel v vremenskih razmerah jasnega neba.
 Figure 61: Average $RCU+$ of the studied environments for each month in relation to view for warm, neutral and cold cycle under clear sky conditions.

Decembra in marca se prostor sever izraža v $RCU+ = 100\%$. Najmanjši $RCU+$ prostora sever je zaznan junija s povprečnim $RCU+ = 88,8\%$ pri $Az = 180^\circ$ (povprečni $t_{RCU+} = 13,3$ h). V toplem ciklu zidovi, pobarvani v OS2, občutno poslabšajo povprečne $RCU+$. Največji vpliv oranžne barve je opazen pri $Az = 180^\circ$ (pogled stran od okna) prostora jug decembra z $\Delta RCU+ = -53$ odstotnih točk v primerjavi z $Az = 180^\circ$ nevtralnega cikla. Vrednost $RCU+ = 1,8\%$ omenjenega primera toplega cikla obsega le 8 minut v dnevu, ko bi potencialno lahko ocenili svetlobno okolje s pomočjo fotopskih osvetljenosti. Rezultati hladnega cikla pokažejo, da barva BS2 (hladni cikel) v primerjavi z GS2 (nevtralni cikel) značilno poviša $RCU+$ vseh prostorov v vseh mesecih in vseh pogledih. Vsaka izmed izmerjenih ponovitev presega $RCU \geq 1,00$ najmanj 93,5 % časa pri $Az = 180^\circ$ meseca junija. Torej cirkadianega svetlobnega okolja v povprečju ne bi bilo mogoče oceniti s pomočjo vidno utežene osvetljenosti za 0,95 h v juniju. Največji vpliv modrega zidu je enako kot pri toplem ciklu opazen pri pogledu z $Az = 180^\circ$ prostora jug decembra z $\Delta RCU+ = 54$ odstotnih točk v primerjavi z nevtralnim ciklom.

Rezultati CA jasnega neba na sliki 62 pokažejo, da največje vrednosti CA dosegajo pogledi v okno ($Az = 0^\circ$), najmanjše pa pogledi stran od okna ($Az = 180^\circ$).

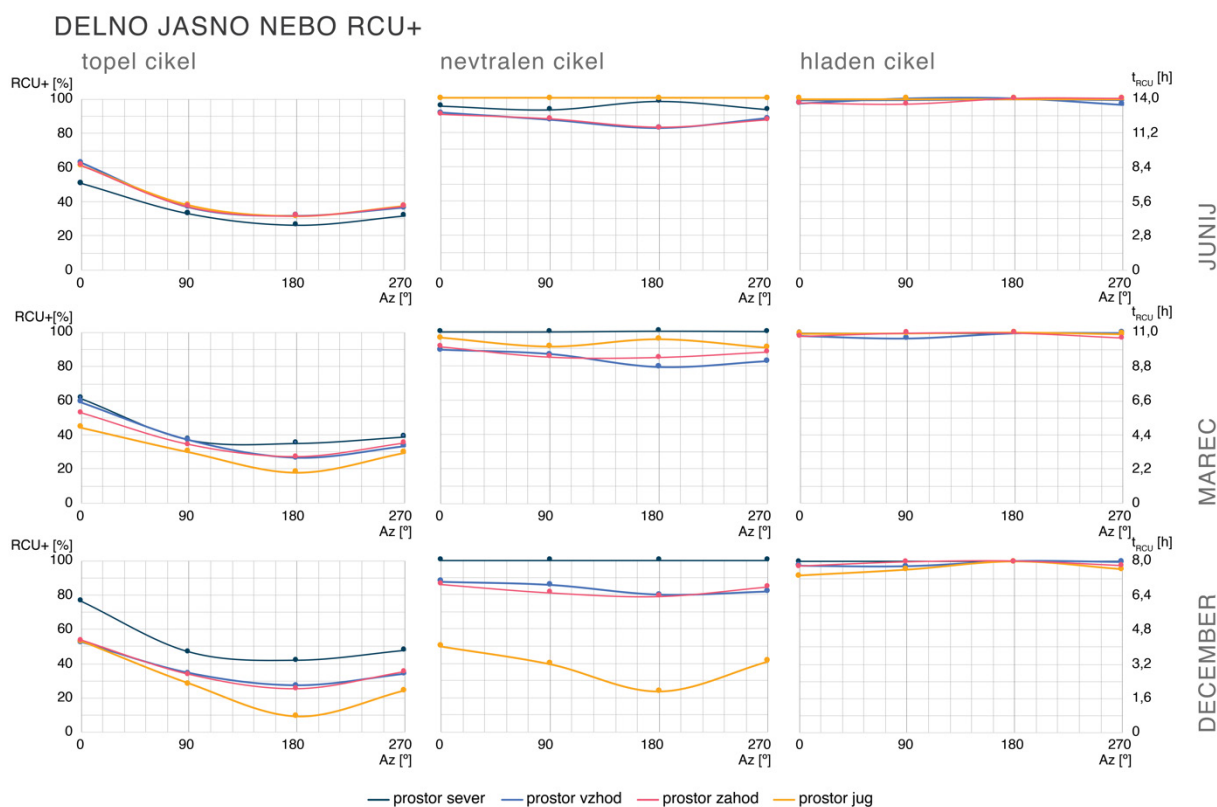


Slika 62: Povprečni CA obravnavanih prostorov po mesecih v odvisnosti od pogleda za tople, nevtralen in hladen cikel v vremenskih razmerah jasnega neba.

Figure 62: Average CA of the studied environments for each month in relation to view for warm, neutral, and cold cycle under clear sky conditions.

Povprečna vrednost CA raste od decembra proti juniju (slika 62), torej sorazmerno z večanjem vpadnih kotov sončnih žarkov in posledično večjimi zunanji osvetljenostmi. Posledično je torej največji CA = 95,4 % ($t_{cs} = 14,3$ h) nevtralnega cikla izmerjen v primeru Az = 180° južnega prostora 21. junija. Najslabši CA = 18,3 % ($t_{cs} = 1,5$ h) so izračunani decembra v prostoru sever in pri pogledu 180°, kljub najboljšim RCU+ decembra (topel, nevtralen in hladen cikel). Čeprav RCU+ južnega prostora marca in decembra dosegajo najnižje vrednosti izmed prostorov, se zaradi velikih osvetljenosti v južnem prostoru izražajo v največjih CA. Očitno je tudi, da kakor je že razvidno iz RCU+, tudi z vidika CA obarvani zidovi nimajo izrazitega vpliva na pogled Az = 0°, vpliv barve zidov je največji v primeru pogledov pri Az = 180°. Posledično največji vpliv oranžnega zidu $\Delta RCU+ = -39,5$ odstotne točke ($\Delta t_{cs} = 1,86$ h) opazimo junija v prostoru sever in Az = 180° in prav tako največji vpliv modrega zidu $\Delta RCU+ = 12,4$ odstotne točke ($\Delta t_{cs} = 1,86$ h).

Sliki 63 in 64 prikazujeta rezultate simulacij vseh iteracij v razmerah delno oblačnega neba, ki se na splošno izražajo v manjših povprečnih vrednostih $RCU+$ in CA kot v razmerah jasnega neba. Kakor že pri jasnem nebu tudi pri delno oblačnem največje izračunane $RCU+ = 100\%$ veljajo za severni prostor decembra in marca ter južni prostor junija (slika 63). Omenjena pojava $RCU+$ južnega in severnega prostora lahko znova razložimo kot posledico spreminjajoče se navidezne poti Sonca na nebu, ki je posledica dnevnih in letnih sprememb položaja Sonca na nebu. Zato se enako kot v primeru jasnega neba prostor jug ob delno oblačnem nebu decembra pokaže v najmanjših vrednostih $RCU+$ med obravnavanimi variantami omenjenega cikla, vrednosti se gibljejo med 23,6 % ($Az = 180^\circ$) in 50 % ($Az = 180^\circ$) ter junija v največjih izmed obravnavanih pogledov. Iz enakega razloga junija prostor sever ne dosega 100 % $RCU+$ ($RCU+ =$ od 93,2 % do 97,9 %).



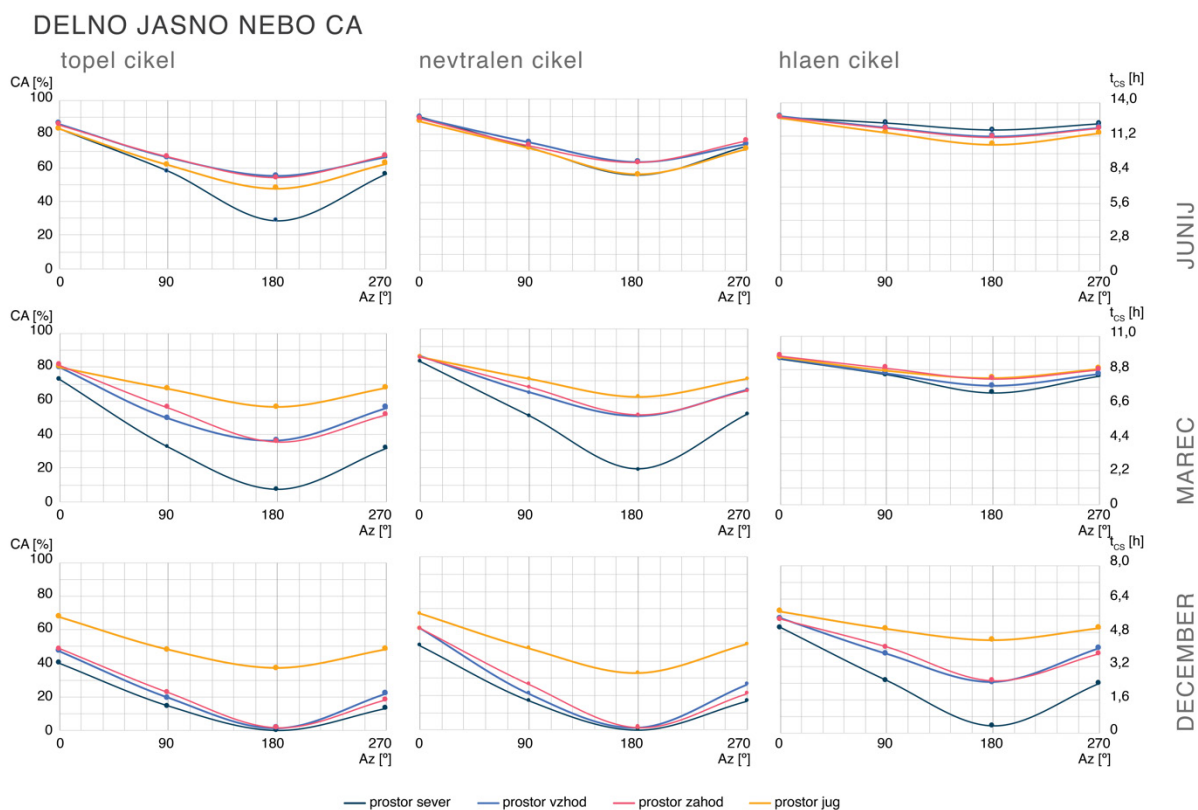
Slika 63: Povprečni $RCU+$ obravnavanih prostorov po mesecih v odvisnosti od pogleda za topel, nevtralen in hladen cikel v vremenskih razmerah delno oblačnega neba.

Figure 63: Average $RCU+$ of the studied environments for each month in relation to view for warm, neutral, and cold cycle under intermediate sky conditions.

Decembra lahko cirkadiano svetlobno vsebino prostorov (slika 63) nevtralnega cikla ocenjujemo na podlagi osvetljenosti najmanj 12,3 izmed 15 ur svetlega dela dneva (prostor vzhod, $Az = 180^\circ$). Marca je ocenjevanje cirkadiane vsebine mogoče najmanj 8,7 od 11 svetlih ur (prostor vzhod $Az = 180^\circ$). Najmanj izmed prostorov nevtralnega cikla, 1,8 od skupno 8 svetlih ur, je mogoče cirkadiano svetlobno okolje napovedovati decembra (prostor jug, $Az =$

180°). Podobno kakor že pri jasnem nebu tudi pri delno oblačnem OS2 drastično zmanjša $RCU+$, BS2 pa ga močno poveča. Največjo negativno $\Delta RCU+ = -66,9$ odstotne točke izračunamo junija za prostor sever in pogled $Az = 180^\circ$ oranžnega cikla, največjo pozitivno $\Delta RCU+ = 76,4$ odstotne točke za prostor jug $Az = 180^\circ$ pa decembra.

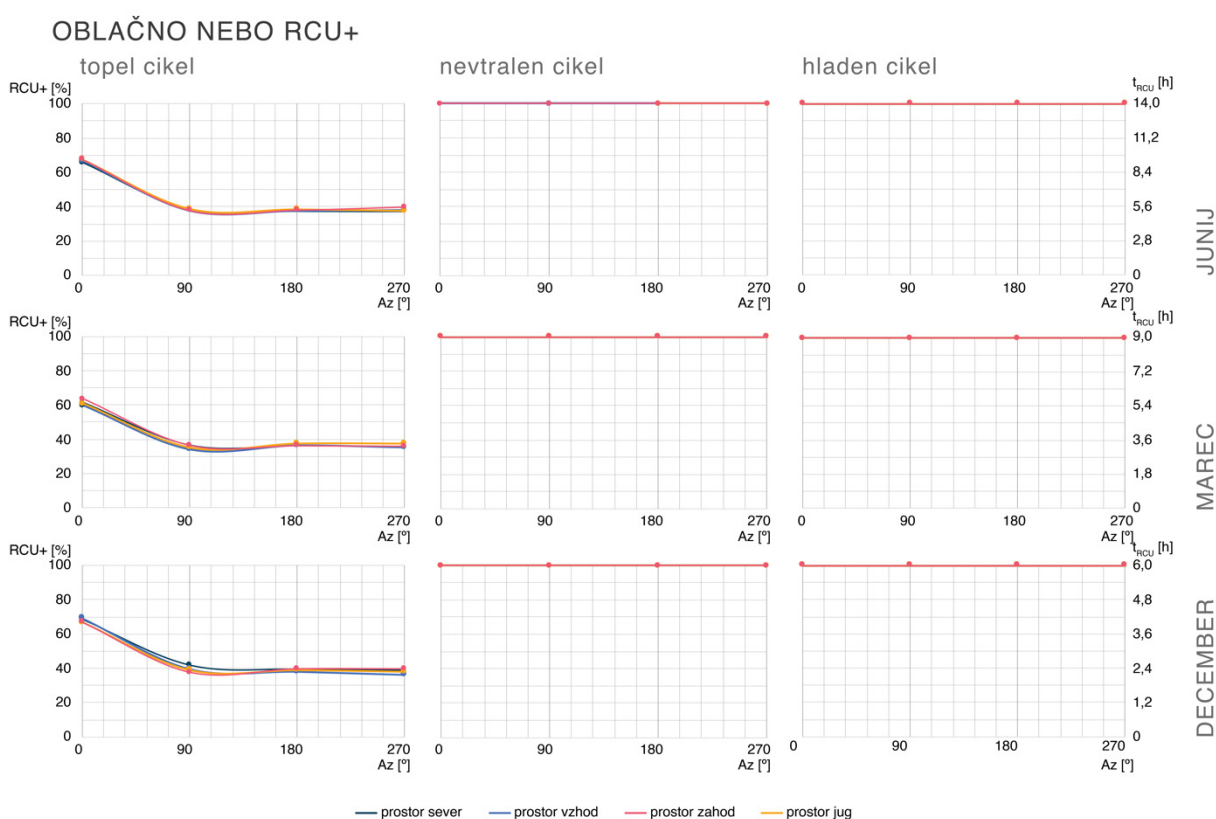
Z vidika CA opazimo vidno razliko med delno oblačnim (slika 64) in jasnem nebu (slika 62). Delno oblačno nebo se izraža v izrazito manjših vrednostih CA kakor jasno nebo, kar je posledica manjših osvetljenosti ob takšnih razmerah. Decembra nevtralnega cikla v prostorih sever, vzhod in zahod $Az = 180^\circ$ razberemo povprečja $CA = 0,0\%$, kar pomeni, da noben pogled čez decembrski dan ne izpolnjuje kriterija $CS \geq 0,3$. Če primerjamo CA toplega in nevtralnega cikla, lahko ugotovimo, da je največja negativna $\Delta CA = -27,8$ odstotne točke (junij, prostor sever, $Az = 180^\circ$), kar nakazuje na manjšo vplivnost oranžne barve na CA kakor v primeru jasnega neba. Enako velja za vplivnost modre barve, kjer je največji pozitivni $\Delta CA = 43,5$ odstotne točke (december, prostor sever, $Az = 180^\circ$). Manjša razlika v CA delno oblačnega neba kot pri jasnem nebu je posledica veliko manjših osvetljenosti v decembru v stanju delno oblačnega neba v primerjavi z jasnim nebom.



Slika 64: Povprečni CA obravnavanih prostorov po mesecih v odvisnosti od pogleda za tople, nevtralen in hladen cikel v vremenskih razmerah delno oblačnega neba.

Figure 64: Average CA of the studied environments for each month in relation to view for warm, neutral, and cold cycle under intermediate sky conditions.

Rezultati razmer, simuliranih za oblačno nebo vseh treh ciklov, so prikazani na slikah 65 in 66. Rezultati nevtralnega cikla potrjujejo naše domneve na podlagi RCU zunanjih razmer (slika 65). Prostori vseh orientacij vsakega izmed kritičnih dni ob oblačnem nebu izražajo $RCU+ = 100 \%$, kar pomeni, da lahko prostore ob oblačnem nebu vrednotimo zgolj z vidika vidne osvetljenosti, neodvisno od orientacije, časa v dnevu, letu ali orientacije pogleda v prostoru. Enako velja tudi za modri cikel, torej prostor, pobarvan v BS2. $RCU+$ v oranžnem ciklu se kot posledica spremembe barve zidov močno zmanjša z največjo izračunano $\Delta RCU+ = 62,5$ odstotne točke $Az = 90^\circ$ prostora zahod. Cirkadiane svetlobe nobene izmed ponovitev toplega cikla ne moremo predvidevati s pomočjo vidnih osvetljenosti.

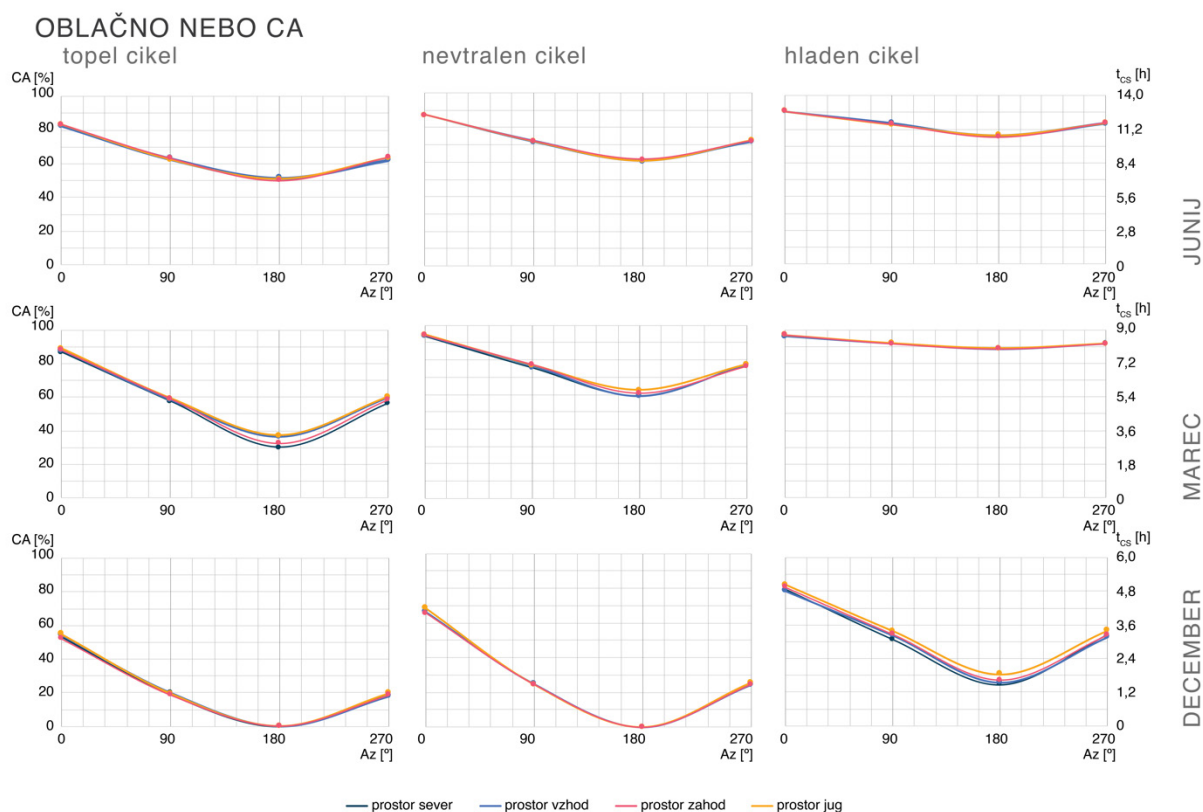


Slika 65: Povprečni $RCU+$ obravnavanih prostorov po mesecih v odvisnosti od pogleda za topel, nevtralen in hladen cikel v vremenskih razmerah oblačnega neba.

Figure 65: Average $RCU+$ of the studied environments for each month in relation to view for warm, neutral, and cold cycle under overcast sky conditions.

Tako kot z vidika $RCU+$ se tudi z vidika CA rezultati vseh štirih orientacij ujemajo (slika 66), kar je posledica enakomerno porazdeljene oblačnosti popolnoma oblačnega dne. $RCU+$ je primerjano po mesecih konstantna od decembra do junija, ravno nasprotno velja za CA , ki je posledica manjšanja osvetljenosti od junija proti decembru, kljub idealnim razmeram RCU . Najmanjše vrednosti CA izračunamo decembra za $Az = 180^\circ$, kjer mejna vrednost cirkadiano učinkovite svetlobe $CS \geq 0,3$ ni nikoli presežena. Zamenjava barve zidov negativno vpliva na

vse štiri orientacije prostora. Največjo negativno razliko zaradi menjave iz nevtralne v oranžno barvo zaznamo marca pri pogledih, usmerjenih proti $Az = 180^\circ$, največjo pozitivno razliko izmerimo v vseh prostorih in pogledu $Az = 180^\circ$ marca z $\Delta CA = 31,2$ odstotne točke. Omeniti je treba odstopanja CA med prostori marca toplega cikla (CA bi morale biti skoraj identične), marca nevtralnega cikla in decembra hladnega cikla, ki so posledica numerične napake programa. Ker so napake dovolj majhne, niso vplivale na naša spoznanja.



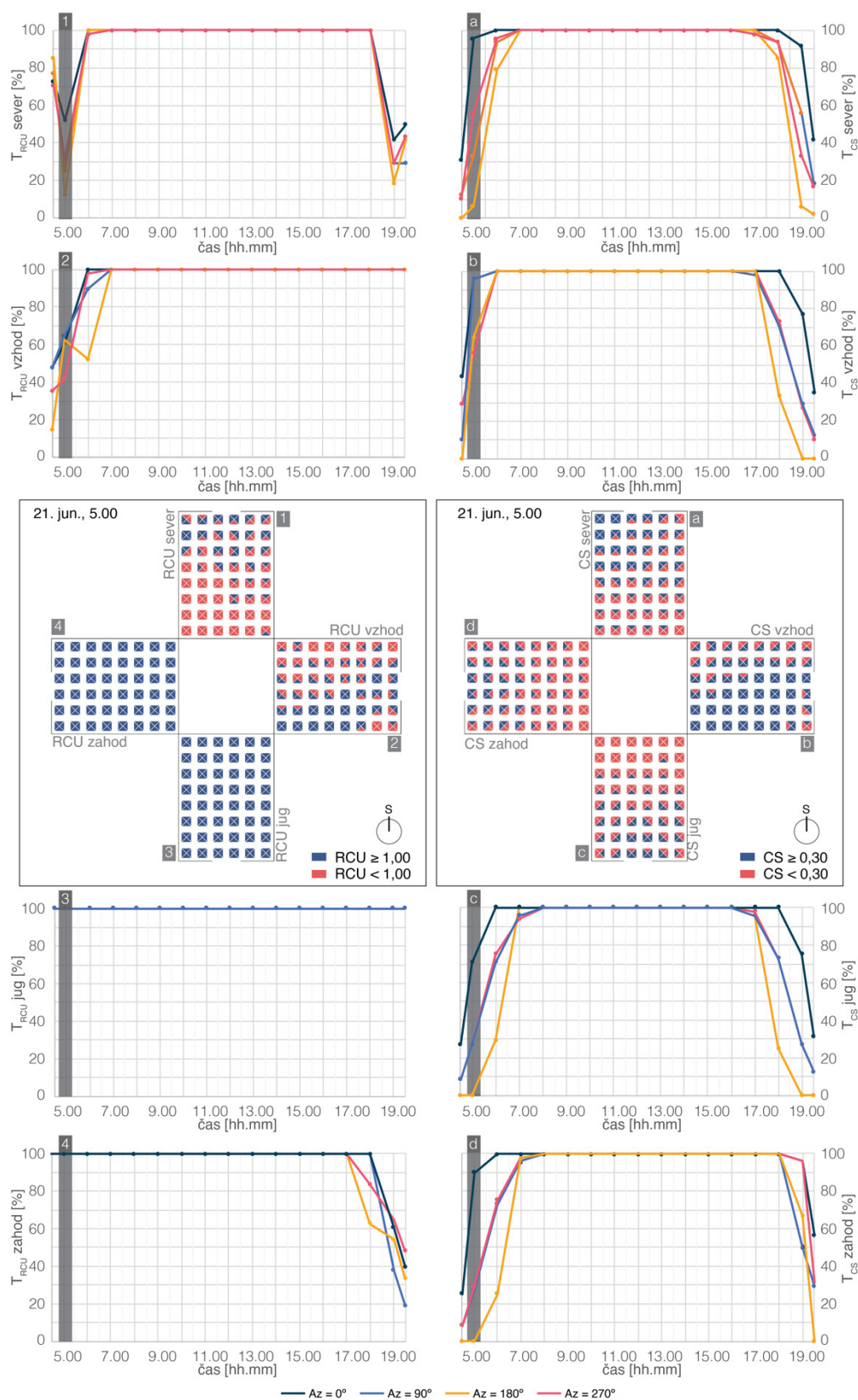
Slika 66: Povprečni CA obravnavanih prostorov po mesecih v odvisnosti od pogleda za tople, nevtralen in hladen cikel v vremenskih razmerah oblačnega neba.

Figure 66: Average CA of the studied environments for each month in relation to view for warm, neutral, and cold cycle under overcast sky conditions.

5.3.2 Prostorsko vrednotenje cirkadiane svetlobe in cirkadianega potenciala

Za prostorsko vrednotenje cirkadiane vsebine v obravnavanih pisarnah smo izbrali variacije simulacij v razmerah jasnega neba, ki se kaže v najnižjih minimumih RCU_{500} spektralnih razmer dnevne svetlobe, ki so $RCU = 0,4$ 21. junija ob 5.00 (slika 56), $RCU = 0,7$ 21. marca ob 7.00 (slika 56) ter $RCU = 0,8$ 21. decembra (slika 56) ob 9.00 (glej poglavje 5.2.1).

Prostorsko ovrednotenje obravnavanih pisarn nevtralnega cikla v poteku 21. junija RCU in CS oz. T_{RCU} in T_{CS} je prikazano na sliki 67. Prostorsko vrednotenje RCU in CS natančneje prikazuje, kolikšen delež prostora zadošča kriterijem cirkadianega potenciala in kolikšen delež kriterijem cirkadianega stimulusa. Iz rezultatov je mogoče razbrati, da 21. junija vsi prostori delno izražajo cirkadiani potencial, ki smo ga zabeležili za vsako izmed orientacij neba in se delno izraža že v povprečjih nevtralnega cikla prostorov prejšnjega poglavja 5.3.1. Najnižji T_{RCU} prostora vzhod je bil zaznan v jutranjih urah (sončni vzhod) in najmanjši T_{RCU} v večernih urah (sončni zahod). Prostor sever se junija zaradi daljše navidezne poti po nebu (Sonce na delu severnega neba) v jutranjih in večernih urah izraža v $T_{RCU} < 100$ %. T_{RCU} zjutraj tako znaša 12,5 % ($Az = 180^\circ$ ob 5.00) in zvečer 18,8 % ($Az = 180^\circ$ ob 19.00). V prostorih vzhod in zahod opazimo le 1 dnevni minimum, ki se pri prostoru vzhod izraža zjutraj (ob 4.30) s $T_{RCU} = 14,6$ % in zvečer v prostoru zahod s $T_{RCU} = 18,8$ % ($Az = 90^\circ$ ob 19.00). Časovna izseka N_{RCU} pokažeta, da kljub nižjim odstotkom T_{RCU} izračunani RCU v prvih treh vrstah prostora sever v 15 od 18 točk pri $Az = 0^\circ$ dosega ali presega vrednost 1,00. Cirkadiano vsebino prostora jug in zahod je mogoče v celoti oceniti s pomočjo osvetljenosti (RCU vsakega pogleda $\geq 1,00$). Pogoj CS je izpolnjen (T_{CS}) za več kakor 90 % prostora v vsakem izmed obravnavanih prostorov 21. junija za 10 ur, med 7.00 in 17.00 (slika 67). Najnižje T_{CS} vsakega primera lahko določimo zjutraj in zvečer, neodvisno od visokih T_{RCU} . Časovni izsek CS pokaže največjo gostoto točk, ki presegajo mejnik CS v bližini okna za prostore sever, jug in zahod. Prostor jug presega mejnik CS v 151 od 192 pogledov, kar je posledica neposredne komponente (sončne svetlobe z velikimi osvetljenostmi) v prostoru.

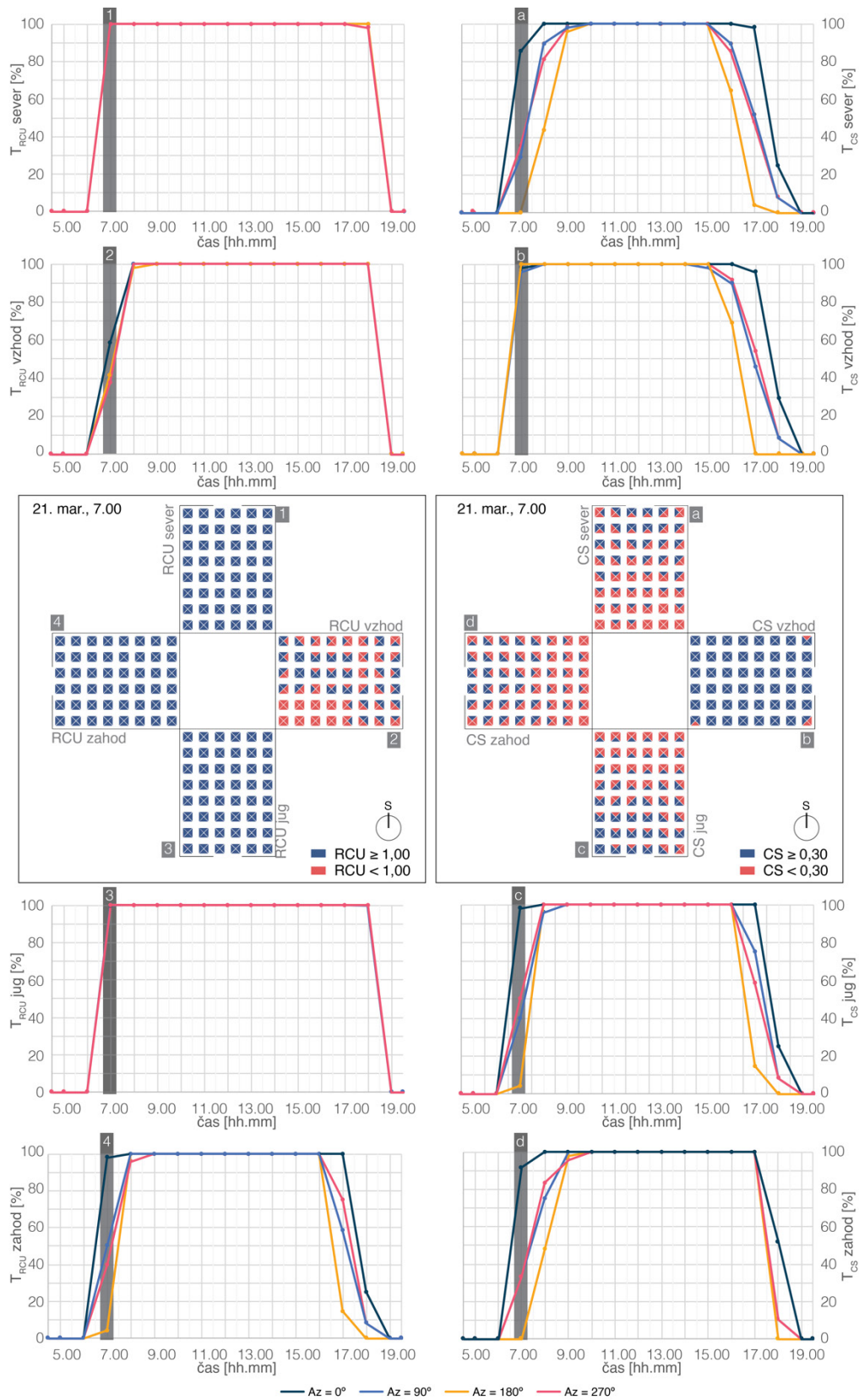


Slika 67: Delež točk za $RCU \geq 1,00$ (levo) - T_{RCU} in $CS \geq 0,30$ (desno) - T_{CS} 21. junija pri jasnem nebu z dodatnim časovnim izsekem ob 5.00 najnižjega jutranjega RCU in RMU nevtralnega cikla.

Figure 67: Percentage of points above $RCU \geq 1,00$ (left) - T_{RCU} and percentage of points above $CS \geq 0,30$ (right) for the 21st of June, with additional time slices of lowest RCU and CS at 5:00.

Slika 68 prikazuje potek T_{RCU} in T_{CS} 21. marca vsakega izmed prostorov nevtralnega cikla. Podobno kakor že 21. junija so tudi 21. marca v prostoru vzhod in prostoru zahod izračunane najnižje T_{RCU} v jutranjih (prostor vzhod) in večernih urah (prostor zahod). Prostora sever in jug pa od sončnega vzhoda (ob 6.00) do sončnega zahoda (18.00) izražata T_{RCU} 100 %. Tako kot že za poletni solsticij tudi ob ekvinokciji (21. marec) izračunamo najnižjo T_{RCU} vzhodnega prostora zjutraj ob 7.00 ($T_{RCU} = 37,5 \%$, $Az = 270^\circ$) ter najnižjo T_{RCU} prostora zahod popoldne ob 18.00 ($T_{RCU} = 90 \%$). Časovni izsek T_{RCU} 21. marca ob 7.00 na sliki 68 pokaže, da lahko cirkadiano vsebino prostorov sever, jug in zahod za dani časovni izsek v popolnosti napovedujemo s pomočjo osvetljenosti. Cirkadiano vsebino prostora vzhod lahko napovemo le s 95 izmed 192 pogledov. Za omenjene poglede ni mogoče razbrati vzorca, kako so razporejeni pogledi z $RCU \geq 1$.

T_{CS} vseh pogledov ($Az = 0^\circ$, $Az = 90^\circ$, $Az = 180^\circ$, $Az = 270^\circ$) prostora sever med 10.00 in 15.00 znaša 100%, v prostoru vzhod velja enako med 8.00 in 14.00, v prostoru jug med 7.00 in 16.00 in med 10.00 in 17.00 v prostoru zahod. Torej so pogoji CS vseh pogledov izpolnjeni za najmanj šest ur. Minimumi T_{RCU} vsakega izmed prostorov so kot posledica manjših osvetljenosti, podobno kot 21. junija, opaženi v jutranjih in večernih urah (jutranji minimum ob 6.00, večerni ob 18.00). V časovnem izseku T_{CS} 21. marca nevtralnega cikla ob 7.00 opazimo, podobno kot že 21. junija, najmanjše T_{CS} v prostorih jug in zahod. V njiju so pogledi, ki zadoščajo CS, zvrščeni ob simetrali prostora v bližini okna ter večinoma orientirani proti oknu ($Az = 0^\circ$). Točke in posledično pogledi, ki zadoščajo CS v prostoru sever, so asimetrično razporejeni proti zahodnem delu prostora, kamor ob 7.00 prodrejo sončni žarki (direktna komponenta). Prostor vzhod se izraža v največjih vrednostih T_{CS} , ki so posledica direktne komponente, ki seže po celotni globini prostora.

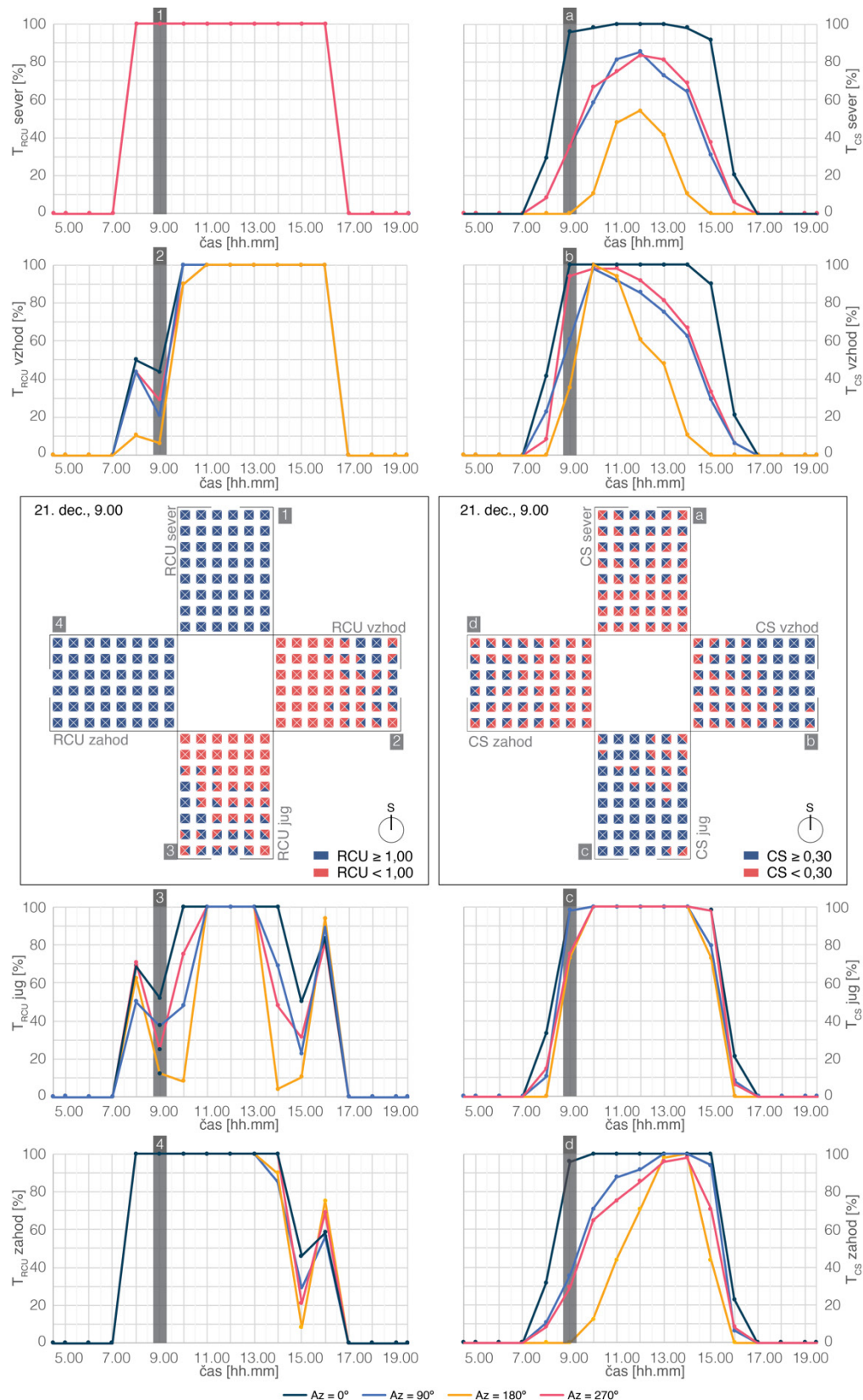


Slika 68: Delež točk za $RCU \geq 1,00$ (levo) - T_{RCU} in T_{CS} 21. Marca pri jasnem nebu z dodatnim časovnim izsekem ob 7.00 najnižjega jutranjega RCU in RMU.

Figure 68: Percentage of points above $RCU \geq 1,00$ (left) - T_{RCU} and percentage of points above $CS \geq 0,30$ (right) for the 21st of March, with additional time slices of lowest RCU and CS at 7:00.

Že v poglavju 5.3.1 smo ugotovili, da je RCU odvisna od variabilnosti gibanja Sonca po nebu, posledično je izračunani T_{RCU} zjutraj 21. decembra 100 % le še v prostorih sever-zahod, saj Sonce okoli zimskega solsticija vzhaja bolj proti jugovzhodu (slika 69). V prostoru sever izračunamo $T_{RCU} = 100$ % v poteku celotnega dne. Medtem ko je $T_{RCU} = 100$ % vseh pogledov za prostor vzhod izračunan od 11.00 do 16.00, le okoli poldneva za prostor jug (od 11.00 do 13.00) in od 8.00 do 13.00 vseh pogledov zahodnega prostora. Najnižji T_{RCU} prostora vzhod izračunamo ob 9.00 ($T_{RCU} = 6,25$ %, $Az = 0^\circ$), prostora jug ob 14.00 ($T_{RCU} = 4,2$ %, $Az = 0^\circ$) ter najnižji T_{RCU} prostora zahod ob 15.00 ($T_{RCU} = 8,3$ %, $Az = 0^\circ$). Opazimo lahko, da so minimumi decembra bolj izraziti kot marca ali junija.

Kot pričakovano, smo za simulacije 21. decembra, prikazane na sliki 69, ovrednotili na splošno najslabše cirkadiane pogoje. $T_{CS} = 100$ % je v prostoru sever dosežen le okoli poldneva (11.00–13.00) za pogled, usmerjen proti oknu ($Az = 0^\circ$). Prav tako le pogledi proti oknu ($Az = 0^\circ$) prostora vzhod med 9.00 in 14.00 ter prostora zahod med 10.00 in 15.00 dosegajo $T_{CS} = 100$ %. Večja osvetljenost se kot posledica prisotnosti Sonca zaradi nizke inklinacije zimskega solsticija odraža v večji T_{CS} prostora jug, ki znaša 100 % za vse obravnavane poglede od 10. do 14. ure 21. decembra. Tako kot že v preteklih mesecih pogledi, usmerjeni v okno, odražajo najvišje pogoje CS , ki so posledica večjih fotopskih osvetljenosti (okno v vidnem polju uporabnika prostora).



Slika 69: Delež točk za $RCU \geq 1,00$ (levo) - T_{RCU} in $CS \geq 0,30$ (desno) - T_{CS} 21. decembra pri jasnem nebu z dodatnim časovnim izsekom ob 9.00 najnižjega jutranjega RCU in RMU.

Figure 69: Percentage of points above $RCU \geq 1,00$ (left) - T_{RCU} and percentage of points above $CS \geq 0,30$ (right) for the 21st of December, with additional time slices of lowest RCU and CS at 9:00.

5.4 Diskusija

Rezultati opravljene študije so pokazali, da je vpliv zunanjih razmer, natančneje spektralne sestave svetlobe, najpomembnejši pri izkazovanju cirkadianih svetlobnih razmer v notranjosti grajenega okolja. Tako je cirkadiani potencial, izkazan v prostoru, primarno odvisen od časa (jutro, poldne, večer), vremena (tipologija neba) in orientacije prostora oz. orientacije okenske odprtine (npr. pogled na severno ali vzhodno ali južno ali zahodno nebo). Posledično zaradi nižje CCT dnevne svetlobe ob zgodnjih jutranjih in poznih popoldanskih urah prostori, ki so orientirani zgolj proti vzhodu ali zahodu, prejmejo manjši cirkadiani potencial (*RCU*) kot prostori, orientirani proti severu ali jugu.

Tretja hipoteza, postavljena ob začetku disertacije, se glasi: »V primeru dnevne svetlobe je ob običajnih lastnostih notranjih prostorov in zasteklitev (spektralno nevtralni prostori) zadosten pokazatelj primanjkljaja cirkadianega potenciala v prostoru že analiza osvetljenosti zgolj z gledišča izpolnjevanja vizualnih zahtev.« Rezultati te študije ob podrobni proučitvi spektralne vsebine štirih različnih orientiranosti prostora in treh različnih tipologij neba pri spektralno nevtralnih razmerah notranjega grajenega okolja le delno potrjujejo hipotezo. Rezultati iz poglavja 5.3.1 pokažejo, da je oblačni tip neba z vidika cirkadianega potenciala izmed proučevanih tipov neba najbolj ugoden. V nevtralnem notranjem grajenem okolju (nevtralen cikel) lahko v razmerah oblačnega vremena v nevtralnem grajenem okolju cirkadiano svetlobno okolje napovedujemo s pomočjo osvetljenosti, neodvisno od orientacije ali pogleda opazovalca. Kar pa ne velja za preostali proučevani tipologiji neba, ki se izražata v visokih nihanjih RCU_{500} zunanjih razmer (sliki 56 in 57) v odvisnosti od časa v dnevu. Izjema sta južno orientiran prostor junija v jasnem in delno oblačnem tipu neba ter severno orientiran prostor marca (posledično tudi septembra) in decembra, torej med septembrom in marcem, ko lahko omenjena prostora prav tako ocenjujemo s pomočjo vidnih osvetljenosti, saj sta izpostavljena le modremu nebu (brez direktne sončne komponente). Omeniti je treba, da so ugotovitve ocenjevanja cirkadiane svetlobe v razmerah jasnega in delno oblačnega neba geografsko specifične – odvisne od geografske širine, ki vpliva na spremembo navidezne poti Sonca v odvisnosti leta, kar na oblačno nebo nima neposrednega vpliva. Podobne ugotovitve lahko strnemo tudi, kadar so stene pobarvane v izbrano modro. Takšne prostore lahko v razmerah oblačnega neba s pomočjo vidnih osvetljenosti ocenjujemo neodvisno od obdobja v letu, pogleda ali orientacije prostora. Za severno orientiran prostor z modro obarvanimi stenami v stanju jasnega ali delno oblačnega neba je zadostno napovedovanje le s pomočjo osvetljenosti, neodvisno od meseca, časa v dnevu ali orientacije pogleda. Napovedovanje s pomočjo

osvetljenosti je dovolj tudi junija v razmerah jasnega in delno oblačnega neba v južnem prostoru vsakega izmed obravnavanih pogledov. Če prostore pobarvamo v oranžno (topel cikel), nobenega izmed obravnavanih prostorov pod različnimi zunanjimi pogoji in orientacijami ni mogoče napovedati s pomočjo vidnih osvetljenosti, ker oranžna poslabša cirkadiano okolje z zmanjšanjem RCU v prostoru, ki je najbolj izrazito na pogledih, usmerjenih stran od okna.

Na splošno so največjega in najbolj stanovitnega cirkadianega potenciala deležni prostori, orientirani zgolj na sever, ki v pomladnih in zimskih mesecih čez dan prejmejo največ modre svetlobe ob jasnem in delno oblačnem nebu, kar je posledica odsotnosti direktne komponente na severnem nebu. To pomeni, da je okno usmerjeno proti konstantno modremu delu neba, ki se odraža v velikih CCT . Najmanjšega cirkadianega potenciala pa so deležni prostori na jugu, predvsem kadar je vpadni kot sončnih žarkov najnižji in je direktna komponenta prisotna v prostoru. Vendar ni dovolj, da cirkadiano svetlobno vsebino ocenjujemo le z vidika RCU , ki je samo pokazatelj, ali lahko cirkadiano svetlobo napovedujemo s pomočjo osvetljenosti. Rezultati CA in T_{CS} pokažejo, da z vidika CS južna orientacija ni tako slaba, kot bi bilo mogoče pričakovati na podlagi $RCU+$ in T_{RCU} . Večje osvetljenosti zaradi pogoste prisotnosti direktne komponente (jasno ali delno oblačno nebo) izničijo slabšo RCU in se izražajo v velikih vrednostih CA in T_{CS} , ki so primerljive z drugimi orientacijami, čeprav se le-te v veliki meri izražajo z večjimi $RCU+$ in T_{RCU} . Dodatno je pozimi južno orientiran prostor celo najugodnejši z vidika cirkadiane svetlobe (CA in T_{CS}). Ravno obratno je pozimi severno orientiran prostor najslabši z vidika cirkadiane svetlobe (CA in T_{CS}), čeprav ima največji cirkadiani potencial. Podoben kontrast zaznamo, kadar primerjamo vzhodno in zahodno orientiran prostor. Vzhodni se zjutraj izraža v manjšem cirkadianem potencialu, vendar velikih vrednostih cirkadiane svetlobe. Nasprotno se zahodni prostor izraža v velikem cirkadianem potencialu zjutraj, vendar so izmerjene vrednosti cirkadiane svetlobe majhne. Enako in obratno velja za večerne ure. Na podlagi teh opažanj bi torej lahko trdili, da je vzhodna orientacija z vidika cirkadianega osvetljevanja bolj optimalna kakor zahodna, saj zjutraj, kadar je z vidika cirkadianega sistema potrebno, ponuja velike vrednosti CS in majhne vrednosti CS v popoldanskih oz. večernih urah, kadar cirkadiani sistem ne potrebuje velikih vrednosti cirkadiano učinkovite svetlobe (glej poglavje 2.4) oziroma je izpostavljenost velikim CS odsvetovana.

Kot smo ugotovili že v 4. poglavju, barve močno vplivajo na cirkadiano svetlobno okolje. To je bilo dodatno potrjeno tudi v tej študiji, ki je pokazala velik vpliv barve zidov, neodvisno od

različnih vremenskih razmer in orientacij prostora. Modro pobarvani zidovi so čas, ko so CS pogoji izpolnjeni, podaljšali, oranžni pa skrajšali. Zato se pri tem poraja vprašanje, kolikšen je vpliv na cirkadiano svetlobno okolje, kadar spremenimo odsevnost tal in stropov ali presevnost stekel oziroma kolikšen je vpliv spreminjanja lastnosti notranjega okolja bodisi geometrijskih (npr. dimenzije prostora, dimenzije oken) ali optičnih (odsevnosti in presevnosti površin) lastnosti grajenega okolja in uporabniških spremenljivk (pogled in položaj v prostoru) na cirkadiano svetlobno okolje v grajenem okolju. Odgovori bodo podani v naslednjem poglavju.

»Ta stran je namenoma prazna«

6 VREDNOTENJE VPLIVA OPTIČNIH IN GEOMETRIJSKIH LASTNOSTI PARAMETRIČNE CELIČNE PISARNE

Povzetek

Povprečen posameznik v sodobni družbi preživi dobršen del tipičnega delovnega dne v pisarniškem okolju. Kar seveda lahko negativno vpliva na njegov/njen cirkadiani sistem, če notranje grajeno okolje ni zasnovano tako, da bi ponujalo zadostno količino dnevne svetlobe za normalno delovanje cirkadianega sistema. Zato je glavni namen študije, predstavljene v tem poglavju, odgovoriti na vprašanje, koliko parametri notranjega okolja vplivajo na nevizualno in vizualno svetlobno vsebino v prostoru, kakor jo prejema hipotetični uporabnik prostora. Da bi lahko odgovorili na to vprašanje, je bila v prvem delu študije uporabljena statistična analiza na parametričnih večspektralnih simulacijah za hipotetično pisarno v Ljubljani. Proučevali smo vpliv treh geometrijskih in štirih optičnih parametrov/lastnosti na kakovost prejete dnevne svetlobe pri štirih smereh pogleda. Rezultati študije so pokazali, da sta WWR in presevnost zasteklitve za dnevno svetlobo najvplivnejša geometrični in optični parameter. Vendar kakor je bilo pokazano v študiji, to ni popolnoma res za poglede, ki so globlje v prostoru in so usmerjeni stran od okna, kajti vplivnost vseh obravnavanih gradbeno-arhitektonskih parametrov se spreminja v odvisnosti od orientacije pogleda in oddaljenosti od okenske odprtine. V drugem delu študije predstavimo vpliv spreminjanja najvplivnejših lastnosti (delež zasteklitve in presevnost) na trajanje ugodnih vidnih in cirkadianih svetlobnih razmer notranjega bivalnega in delovnega okolja. Rezultati pokažejo, da velike cirkadiane vrednosti v glavnem sovpadajo z velikimi vrednostmi uporabne dnevne osvetljenosti, razen v območjih blizu okenskih odprtin, kjer večje osvetljenosti zmanjšujejo delež časa, ko je osvetljenost znotraj udobnih vrednosti osvetlitve.

Abstract

Average working individual in today's society spends a considerate amount of a typical day in an office environment. Which in turn can have negative consequences on hers or his circadian system if the indoor built environment is not designed in order to provide adequate luminous conditions. Therefore, the main objective of the presented study was to address the question to what extent do the indoor built environment parameters influence the indoor non-visual and visual luminous environment as perceived by a hypothetical occupant? In order to answer the stated question a statistical analysis of parametric multispectral simulations for a hypothetical cellular office in Ljubljana, Slovenia was done in the first part of the study. The influence of three geometric and four optical parameters was studied for four cardinal occupant view directions. The results show that the window is the most influential building element as Window to Wall Ratio and glazing transmissivity (either photopically or melanopically weighted) are the most influential geometric and optical parameters. However, it was shown that this is not completely true for views which are deeper in space and facing away from the window, as the influence of all building parameters tends to change with presumed occupant view orientation and view position in respect to the window. Impact of changing the most influential properties (glazing ratio and transmissivity) on the duration of favourable visual and circadian lighting conditions of the indoor living environment was studied in the second part of the study. The results show that high circadian values generally coincide with high values of useful daylight illuminance, except in areas near window openings, where higher illuminances reduce the proportion of time the illuminance is within comfortable illuminance values.

OBJAVLJENO IZ TEGA POGlavJA:

Potočnik, J., Košir, M., 2021. Influence of geometrical and optical building parameters on the circadian daylighting of an office. *Journal of Building Engineering* 42: 102402. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102402>

6.1 Uvod

Notranje grajeno okolje je sestavljeno iz številnih arhitekturno-gradbenih elementov in posledično njihovih optičnih lastnosti, ki oblikujejo notranje grajeno in s tem tudi notranje svetlobno vidno in cirkadiano okolje. Do zdaj smo podrobneje proučili vplivnost optičnih lastnosti oken in zidov ter vplivnost zunanjih svetlobnih razmer na cirkadiano svetlobno okolje. V naslednji študiji smo proučevanje vplivnosti lastnosti notranjega grajenega okolja na cirkadiano svetlobno okolje razširili na preostale pomembne lastnosti notranjega okolja. S pomočjo osnovnih statističnih pristopov in parametričnega simulacijskega modela smo proučili vplivnost geometrijskih lastnosti okolja, npr. velikost oken, velikost prostora, ter optičnih lastnosti notranjega grajenega okolja, npr. odsevnost zidov, tal, stropov in presevnost oken. Sočasno smo preverjali tudi vplivnost uporabe prostora uporabnika (položaj in usmerjenost pogleda). V tem poglavju odgovorimo na drugo postavljeno znanstveno vprašanje: »Ali je torej možno natančneje določiti vpliv posameznih lastnosti notranjega okolja na cirkadiano svetlobno okolje prostora?«

6.2 Metodologija

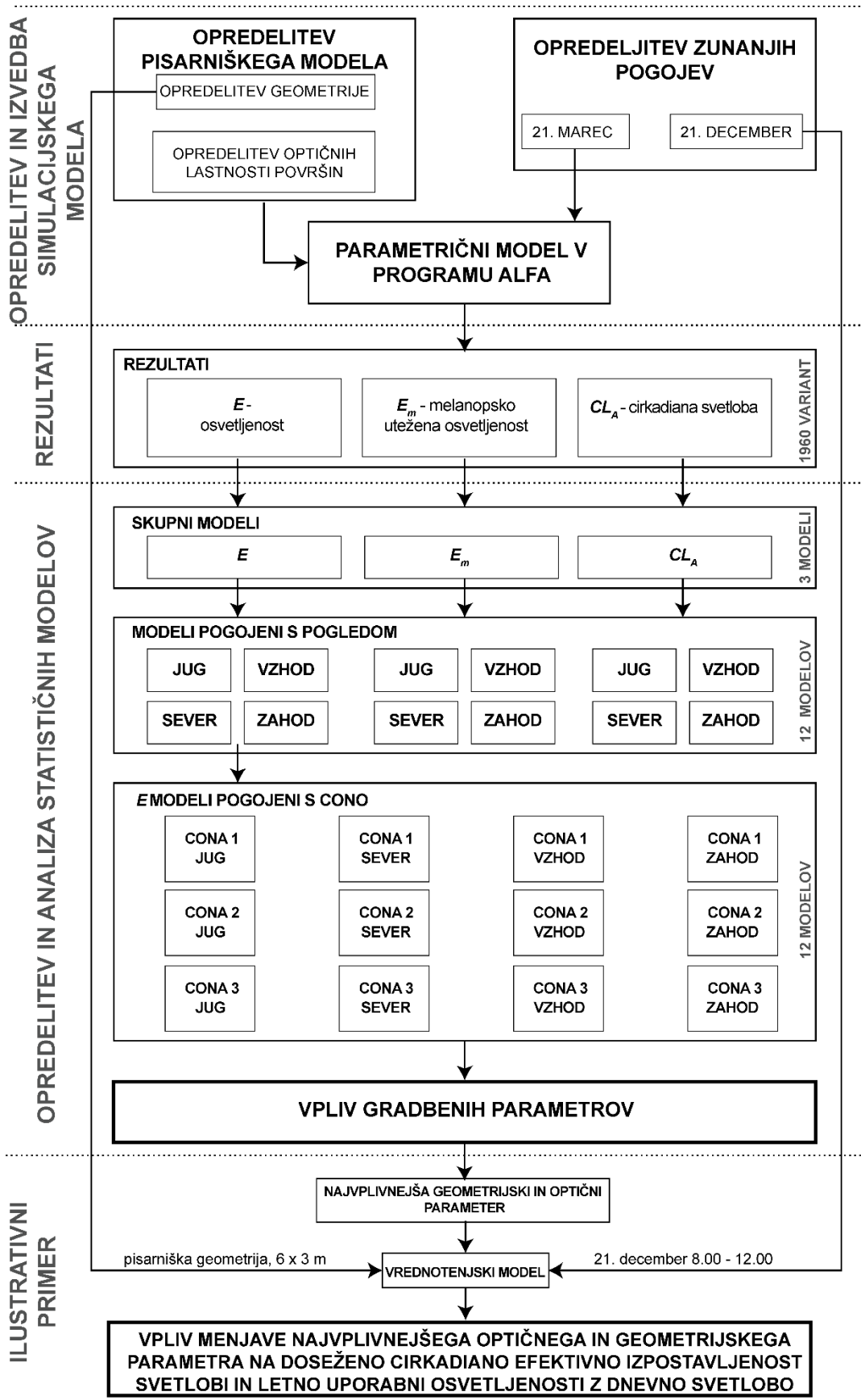
Predstavljena študija je razdeljena na štiri glavne korake, ki so predstavljeni na sliki 70. V prvem koraku je bil opredeljen parametrični simulacijski model z opredelitvijo zunanjih razmer, geometrijskih in optičnih lastnosti celične pisarne z enim oknom, ki je orientirano proti severu. V drugem koraku so bili ovrednoteni rezultati svetlobnega okolja, ki so bili izraženi v enotah osvetljenosti (E), ekvivalentnih melanopskih enotah osvetljenosti (E_m) in enotah cirkadiane svetlobe (CL_A). Vpliv spreminjanja izbranih geometričnih (WWR , a , b), optičnih (R_W , R_C , R_F in τ) in uporabniško pogojenih (V) lastnosti (preglednica 9) na notranje svetlobno okolje je izračunan s pomočjo modelov multiple linearne regresije. Skupaj je bilo opravljenih 27 modelov multiple linearne regresije (MLR), od tega trije skupni, 12 modelov, pogojenih s pogledom, ter 12 consko pogojenih (slika 70). Ti modeli so bili uporabljeni za ugotavljanje obsega učinka izbranega parametra, ki se preiskuje, na notranjo vizualno in nevizualno svetlobno vsebino. Posledično so bili ugotovljeni najbolj vplivni optični in geometrijski parametri, njihovo spreminjanje pa je bilo nadalje raziskano v četrtem koraku študije. V zadnjem, četrtem koraku so bile izvedene celodnevne simulacije za oceno stopnje vpliva opredeljenih parametrov na cirkadiano izpostavljenost uporabnika pisarne dnevni svetlobi. Hkrati je bila ovrednotena tudi vizualna komponenta dnevne svetlobe na vodoravni ravnini z uporabo metrike uporabne dnevne osvetljenosti (angl. *Useful Daylight Illuminance* – UDI), ki

sta jo uvedla Nabil in Mardaljevic [156]. Izračun UDI je bil izveden vzporedno z analizo cirkadiane izpostavljenosti dnevni svetlobi, da bi ugotovili morebitne (če sploh) kompromise med obema vidikoma svetlobnega okolja v notranjih prostorih.

Preglednica 9: Obravnavane lastnosti notranjega okolja.

Table 9. Studied building-related parameters.

Geometrijske lastnosti		enota
WWR	razmerje površine okna proti površini fasade	[%]
a	globina prostora	[m]
b	širina prostora	[m]
Optične lastnosti		
R_W	odsevnost zidu (vizualna - R_{Wv} , melanopska - R_{Wm})	[]
R_C	odsevnost stropa (vizualna - R_{Cv} , melanopska - R_{Cm})	[]
R_F	odsevnost tal (vizualna - R_{Fv} , melanopska - R_{Fm})	[]
τ	presevnost stekla (vizualna - τ_v , melanopska - τ_m)	[]
Uporabniško pogojene lastnosti		
V	smer pogleda uporabnika	[°]



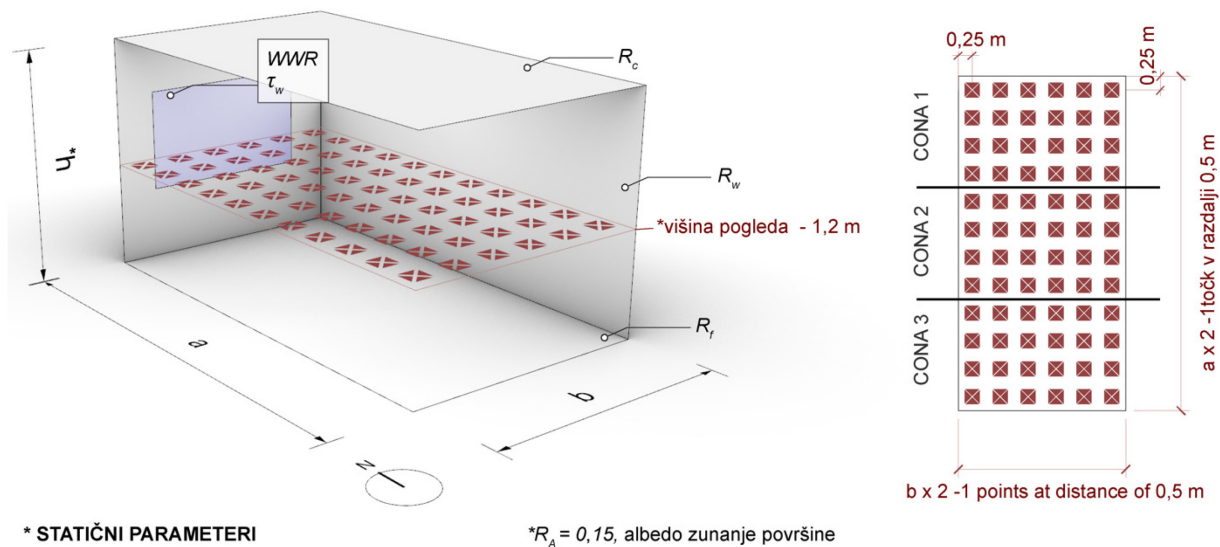
Slika 70: Metodološki pristop opravljenih analiz.

Figure 70: Methodological workflow of the conducted study.

6.2.1 Opredelitev in simulacija parametričnega modela

6.2.1.1 Opredelitev pisarniškega modela

Izhodiščna geometrija celičnega pisarniškega modela je bila določena na podlagi Pravilnika o zahtevah za zagotavljanje varnosti in zdravja delavcev na delovnih mestih (Uradni list RS, št. 89/99, 39/05 in 43/11 – ZVZD-1)[157]. Naslednje geometrijske kombinacije pa so bile izpeljane na podlagi parametričnih sprememb geometrijskih lastnosti (a , b in WWR) modela, predstavljenega na sliki 71. Skladno z omenjenim pravilnikom je najmanjša dovoljena tlorisna površina posamičnega delovnega mesta 8 m^2 . Zato sta bila najmanjša a in b določena pri 3 m , kar je najmanjša tlorisna površina obravnavane pisarne – 9 m^2 . Kot je navedeno v preglednici 10, sta bila oba parametra a in b spreminjana v korakih 1 m do maksimalnih dimenzij 8 m . To pomeni, da je največja modelirana pisarna merila 64 m^2 . Svetla višina (h) je bila konstanta pri vsaki izmed geometričnih variant in je bila določena po minimalni predpisani višini glede na pravilnik in je znašala $2,75 \text{ m}$. Pisarna ima eno severno orientirano okensko odprtino pri fiksnem parapetu $0,85 \text{ m}$. Razmerje med okensko odprtino in fasadnim zidom – WWR je bilo spreminjano med 20 in 40% v koraku po pet odstotnih točk (preglednica 10). Spodnja meja je določena po prej omenjenem pravilniku za zagotavljanje varnosti in zdravja delavcev na delovnih mestih, zgornja meja 40% pa je bila določena glede na študije, ki so pokazale, da ima WWR nad 30% vedno manjši vpliv na doseženo osvetlitev v notranjosti ter obenem negativno vpliva na energijsko bilanco stavbe [158–161]. Obenem pa je omejitev WWR med 20 in 40% omogočila ohranitev konstantnega razmerja med višino in širino okna za vsako izmed različic.

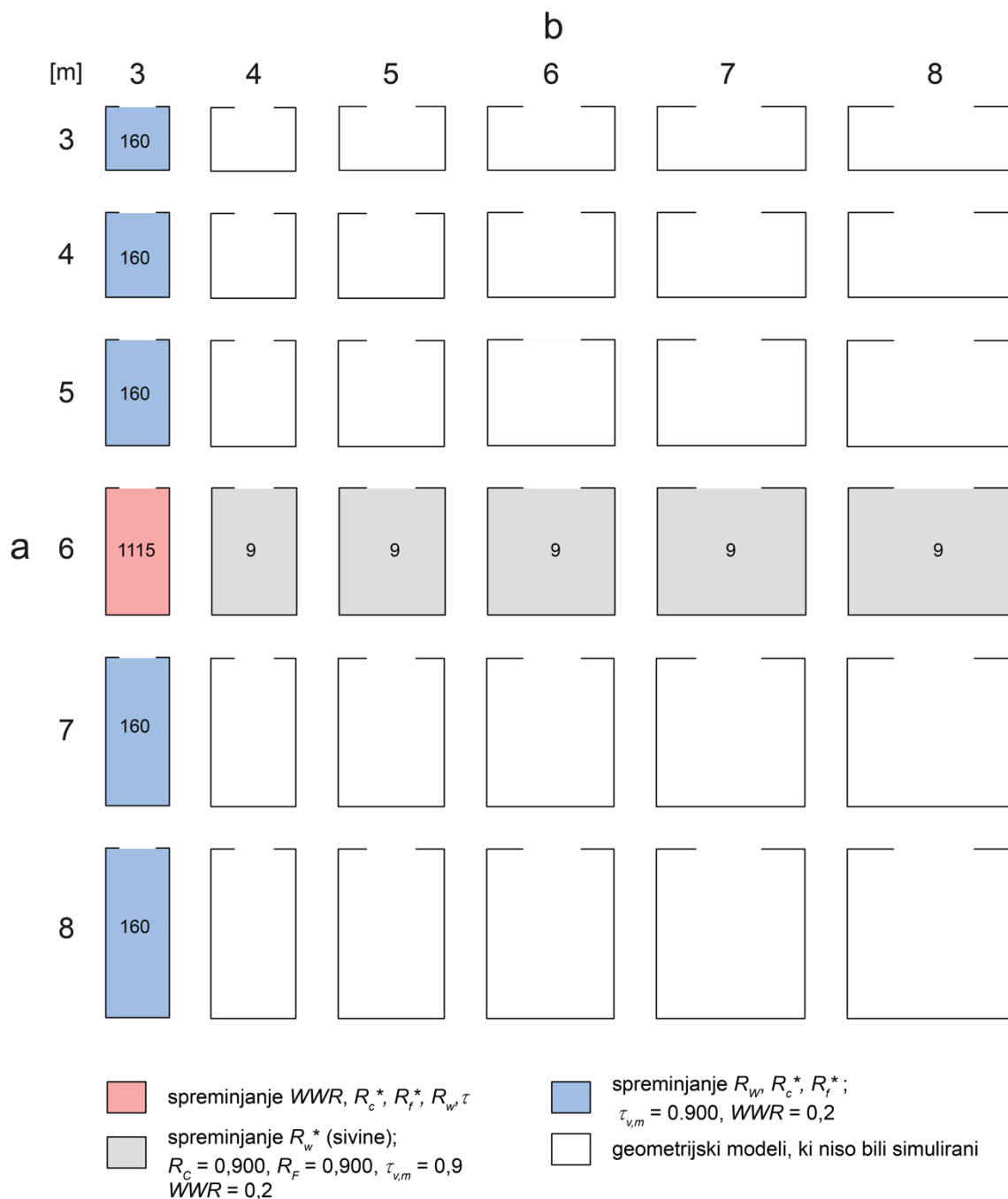


Slika 71: Geometrijske lastnosti parametričnega simulacijskega modela (levo) z distribucijo in konfiguracijo simuliranih točk in smeri pogleda (desno), glej preglednico 9.

Figure 71: Geometrical characteristics of parametric simulation model (left) with distribution and configuration of the simulated viewpoints and view directions (right), see Table 9.

Geometrijski modeli so bili ustvarjeni v Rhinoceros 6 in simulirani v multispektralnem simulacijskem orodju ALFA (glej poglavje 2.6.2), ki je omogočilo spektralno analizo svetlobnega okolja. Simulacije so bile opravljene pri osmih ambientalnih odbojih (-ab ambient bounces), limitih uteži 0.001 (limit weight) in 180 računskih hodih (passes) za vsako izmed merilnih točk na mreži, prikazanih na sliki 71. Točke so na višini 1,2 m, ki predstavlja povprečno zenično višino sedečega človeka, in so razporejene v rastru $2 \times a - 1$ na $2 \times b - 1$ točk za vsako izmed geometrij. Odmik od zidov je 0,25 m, odmik med posamičnimi točkami pa 0,5 m. Za vsako izmed merilnih točk so bile izračunane štiri glavne usmerjenosti pogleda (V) pri azimutih 0° , 90° , 180° in 270° (merjeno v smeri urnega kazalca). Azimut 0° tako predstavlja pogled, orientiran proti oknu. Poglede tako poimenujemo 0° , 90° , 180° in 270° .

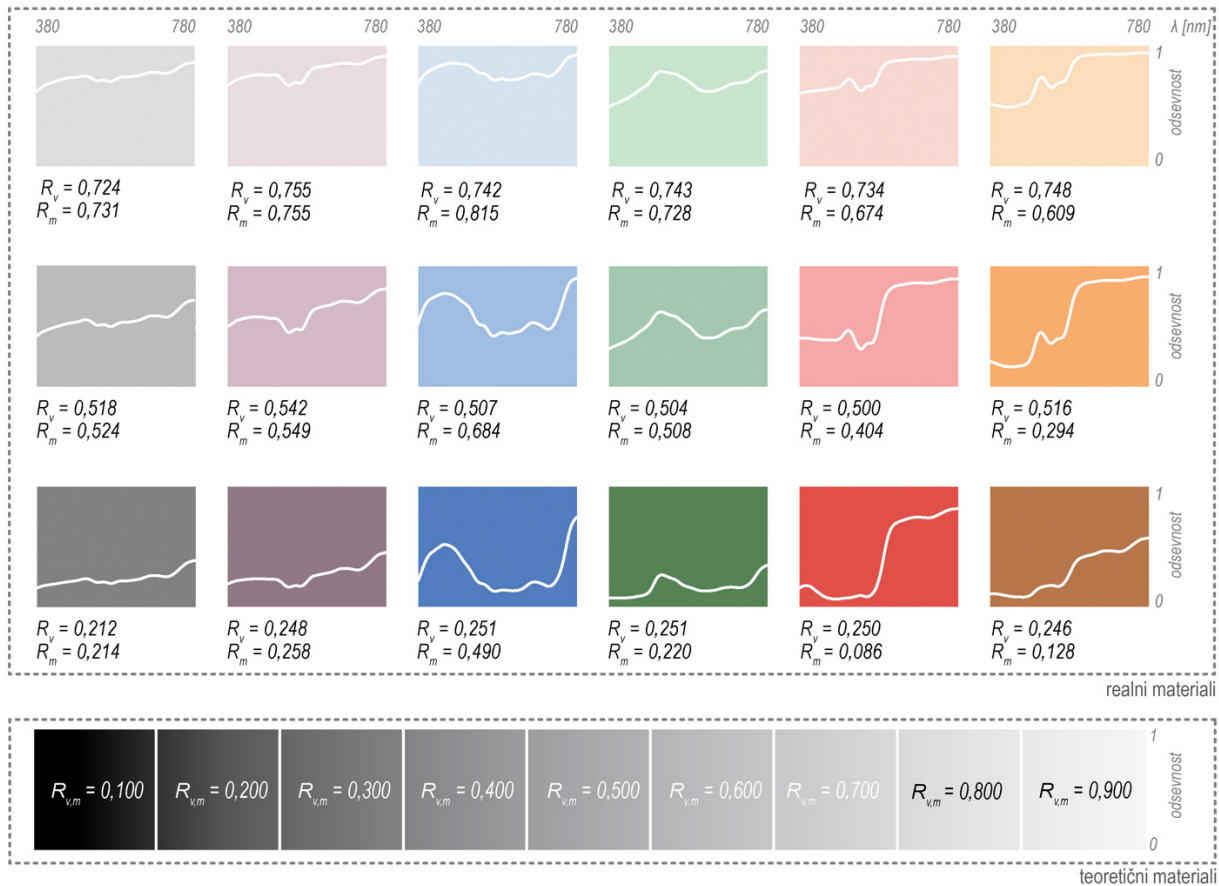
Skupaj je glede na določene meje geometričnih lastnosti možnih 180 različic geometrije pisarne, kar bi seveda zahtevalo preveč časa. Da bi zmanjšali število simulacij, vendar še vedno omogočili zadostno pokritost obsega geometrije, smo geometrijske modele omejili na vse možne kombinacije a , ko je b konstanten pri 3 m, in vse kombinacije b , z a pri 6 m, vse to pri 20 % WWR . Dodatno so bile izračunane kombinacije vsakega WWR pri pisarni z dimenzijami 6 m x 3 m. Skupaj so bile simulacije narejene za geometrije 11 različnih tlorisov, kot prikazuje slika 72.



* odsevni materiali, ki smo jih spreminjali samo med teoretičnimi barvami

Slika 72: Shematska predstavitev števila opravljenih variacij pisarne in modelov linearne regresije.
 Figure 72: Schematic representation and number of simulated office variations used in multiple linear regression models.

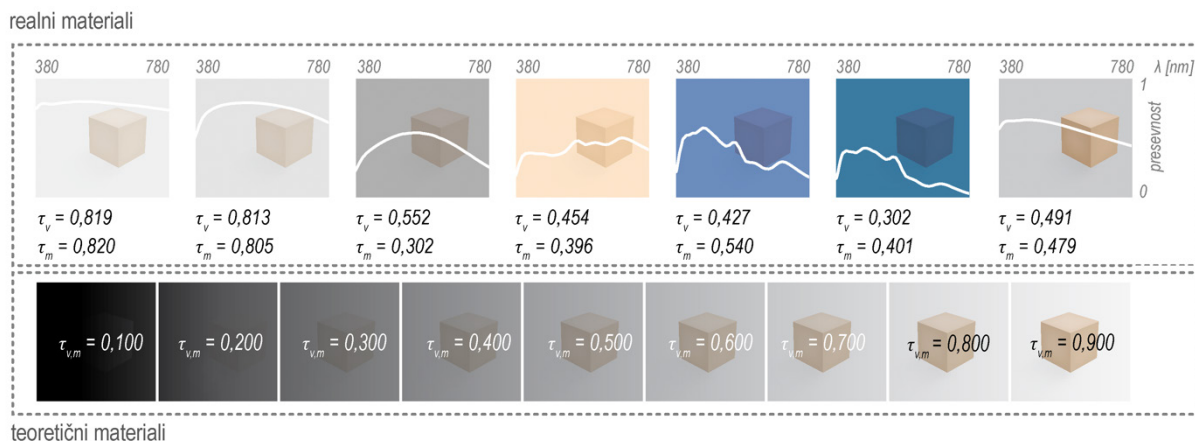
6.2.1.2 Opredelitev optičnih lastnosti površin



Slika 73: Optične lastnosti odsevnih materialov.

Figure 73: Optical properties of the used opaque materials.

Skupaj je bilo v kombinaciji z geometričnimi modeli pisarne izbranih 27 difuzno odsevnih materialov. Materiale lahko razdelimo na dve skupini, kakor je to prikazano na sliki 73. Prva skupina je sestavljena iz devetih teoretičnih materialov, ki odsevajo enako količino svetlobe po celotnem vidnem spektru (kot npr. idealna siva), z vidno in melanopsko odsevnostjo ($R_{v,m}$) od 0,100 do 0,900. V drugi skupini je 18 realnih izmerjenih materialov, ki smo jih uporabili že v 4. poglavju. Torej šest odtenkov barv pri treh ravneh R_v (pribl. 0,250, 0,500 in 0,750), vendar različnih melanopskih odsevnosti R_m . Teoretični materiali so bili uporabljeni za vsako odsevno površino pri vsaki izmed geometrij, realni materiali pa samo pri variaciji R_w , ko je pisarna merila 6 m x 3 m (slika 72).



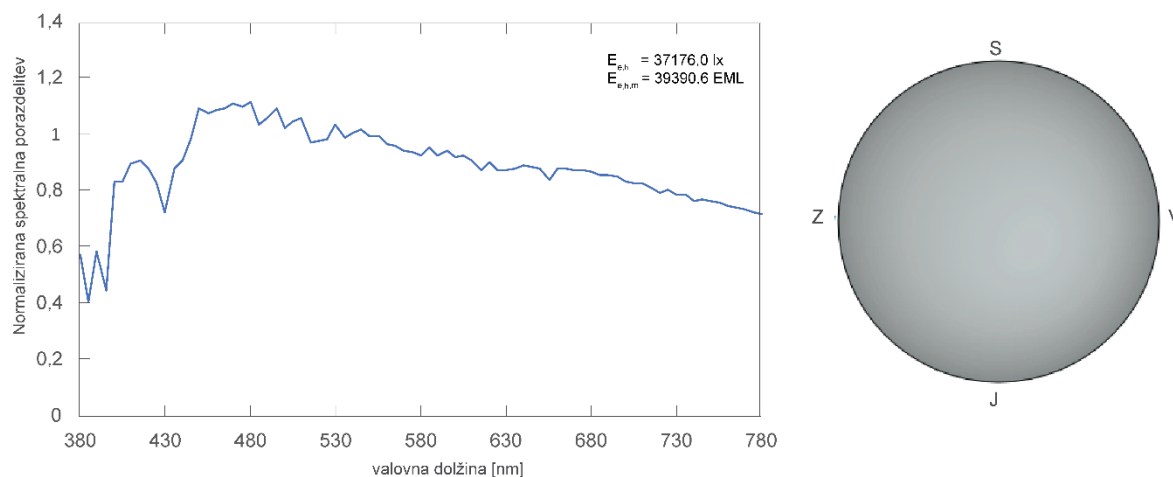
Slika 74: Optične lastnosti uporabljenih presevni materialov.

Figure 74: Optical properties of the used transparent materials.

Podobno kot pri odsevnih materialih smo tudi presevne, uporabljane za zasteklitev v simulacijah, izbirali izmed dveh izbranih skupin – torej realnih in teoretičnih presevni materialov (slika 74). Teoretični presevni materiali imajo enakomerno spektralno prepustnost od 380 do 780 nm (vidna in melanopska presevnost $\tau_{v,m}$ med 0,100 in 0,900). Druga skupina – realni presevni materiali – je tako sestavljena iz sedmih zasteklitvenih materialov proizvajalca Reflex, d. o. o., ki smo jih podrobneje že predstavili v 4. poglavju, dodatno je bila izvedena še različica brez uporabljene zasteklitve ($\tau_{v,m} = 1,000$). Vpliv zamenjave stekel je bil spremljan na geometriji 6 x 3 m, kakor je to prikazano na sliki 72.

6.2.1.3 Opredelitev zunanjih razmer parametričnega modela

Zunanji spektralni in svetlobni podatki so bili ustvarjeni za geografsko lokacijo Ljubljane (46,051° S, 14,505° V) ob spomladanskem ekvinokciju 21. marca ob poldnevu po solarnem času pri spektralnih razmerah oblačnega neba. Podatki so bili generirani v simulacijskem programu ALFA, natančneje z vgrajenim vtičnikom libRadtran, ki smo ga podrobneje že opisali v poglavju 2.6.2. Zunanja globalna osvetljenost ($E_{e,h}$) je znašala 37.161,0 lx, melanopsko utežena zunanja globalna osvetljenost ($E_{e,h,m}$) pa 39.390,6 EML. Normalizirane spektralne gostote sevalne moči zunanjih razmer so predstavljene na sliki 75.



Slika 75. Simulirano spektralno sevanje z navedenimi zunanjsimi osvetljenostmi ($E_{e,h}$) in melanopsko ($E_{e,h,m}$) uteženimi osvetljenostmi (levo) ter model oblačnega neba (desno).

Figure 75: Simulated normalized spectral irradiance with corresponding external global horizontal illuminance ($E_{e,h}$) and melanopically ($E_{e,h,m}$) weighted global horizontal illuminances (left) and overcast sky model (right).

6.2.2 Način izračuna podatkov

Kot smo že omenili v poglavju 6.2.1.1, smo zmanjšali število pisarniških geometrij na 180 geometrijskih variant a , b in WWR . Ko smo skupaj z geometrijami spreminjali še optične lastnosti, je bilo na koncu izvedenih 1960 simulacijskih primerov (slika 72) za vsakega izmed štirih izbranih hipotetičnih pogledov opazovalca (kot npr. pogled 0° , 90° , 180° in 270°). Vsi opravljeni primeri so shematsko predstavljeni na sliki 72. Obseg in korak povečevanja posamičnih simulacijskih parametrov s pripadajočimi statističnimi prediktorji pa sta predstavljena v preglednici 10.

Nastali izračunani primeri so shematsko predstavljeni na sliki 72, medtem ko so obsegi in koraki simuliranih parametrov z ustreznimi statističnimi prediktorji predstavljeni v preglednici 10. Kot je prikazano na sliki 72, smo optične lastnosti in WWR spreminjali na modelih velikosti $6\text{ m} \times 3\text{ m}$. Parametra R_C in R_F sta bila simulirana z uporabo devetih teoretičnih materialov, medtem ko sta bila R_W in τ simulirana z uporabo teoretičnih in resničnih materialov, kot je predstavljeno v poglavju 2.1. Poleg tega smo R_W , R_C in R_F spreminjali iz nabora teoretične skupine materialov za vsako velikost a pri nespremenljivem $b = 3\text{ m}$. V teh simulacijah sta bili τ in WWR nespremenljivi pri 0,900 oziroma 20 %, medtem ko sta bili R_C in R_F določeni na 0,900. Nazadnje smo spreminjali tudi R_W znotraj teoretične skupine materialov v sobi z nespremenljivim $a = 6\text{ m}$, medtem ko smo spreminjali parameter b med 3 m in 8 m (slika 72). Tu so bile lastnosti R_C , R_F in τ nespremenljive pri 0,900, tako tudi za $R_{v,m}$ in $\tau_{v,m}$, medtem ko je bil WWR določen na 20 %. Na podlagi opisane simulacijske

postavitve so bili izračunani spektralni podatki za vsako od točk mreže in ustreznih pogledov (slika 71). Te spektralne rezultate smo nato ovrednotili s stališča vizualnega in cirkadianega svetlobnega okolja. Tako smo simulirano spektralno obsevanje ovrednotili z uporabo treh različnih metodologij, kar se pokaže v treh odvisnih spremenljivkah v statističnem modelu. Ena metodologija za vidno oz. fotopsko vrednotenje svetlobnega okolja in dva za vrednotenje cirkadianega svetlobnega okolja. Obdelava spektrov in dodatni izračuni so bili opravljeni z uporabo lastnih skript, zasnovanih v orodjih Grasshopper [123] in Matlab [162] po naslednjih metodologijah, ki so podrobneje opisane tudi že v poglavjih 2.1.1 in 2.4:

1. E – osvetljenost, ki uporablja metodo osvetljenosti, kot jo je vzpostavila CIE, npr. spektralno sevanje je pomnoženo s svetlostno funkcijo standardnega fotopskega opazovalca – $V(\lambda)$ [3].
2. E_m – pridobljena z metodo ekvivalentne melanopske osvetljenosti, kot so jo predlagali Lucas in sod. Npr. spektralno sevanje je pomnoženo z melanopsko učinkovitostjo N_m . Za pogosto uporabljane prostore je priporočen minimum 150 EML vsaj štiri ure do poldneva, kot je to priporočeno v certifikacijskem sistemu WELL [142] (glej poglavje 2.4.4).
3. CL_A – je pridobljena s pomočjo metodologije cirkadiane svetlobe, kjer je poleg prispevka ipRGC upoštevan tudi prispevek paličic in čepkov. Za mejno vrednost se priporoča $CS = 0,3$, svetloba takšnih vrednosti naj bi spodbujala zburjenost, pozornost, zmanjševala subjektivno zaspanost itd. [158,159] (glej poglavje 2.4.4). Svetlobo pri $CS \geq 0,3$ poimenujemo cirkadiano učinkovita svetloba.

6.2.3 Opredelitev in analiza statističnih modelov

Skupaj je bilo ustvarjenih 27 modelov MLR, in sicer v statističnem orodju Rstudio [165], na podlagi rezultatov 1960 simulacijskih variant vizualnega in cirkadianega svetlobnega okolja obravnavane pisarne. Kot je prikazano na sliki 70, prvi trije modeli predstavljajo splošne modele za vsako izmed treh odvisnih spremenljivk (E , E_m in CL_A). Splošni modeli so zasnovani na povprečnih vrednostih vseh testnih točk in vseh simuliranih smeri skupaj. Naslednjih 12 modelov smo poimenovali modeli pogledov in so zasnovani na povprečnih vrednostih za vsak pogled posebej vseh točk v prostoru. Torej po štirje modeli pogledov za vsako izmed treh odvisnih spremenljivk (E , E_m in CL_A). Zadnjih 12 modelov izhaja iz MLR-modelov pogledov odvisne spremenljivke E in smo jih poimenovali conski modeli MLR. Ti modeli izhajajo iz delitev pisarniškega prostora na tretjine po globini (a), kakor je to prikazano na sliki 71. Pisarne

smo torej razdelili v tri cone. Prva je najbližje oknu (prva tretjina prostora), druga predstavlja drugo tretjino prostora, tretja pa je najgloblje v prostoru in predstavlja zadnjo tretjino prostora. Conski modeli so tako zasnovani na povprečjih posamičnih con v odvisnosti od pogleda.

Vpliv analiziranih lastnosti notranjega okolja na E_v , E_m in CL_A je bil izračunan za vsakega izmed omenjenih modelov MLR na osnovi naslednje enačbe in metode najmanjših kvadratov multiple linearne regresije:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon \quad (39),$$

pri čemer je Y odvisna spremenljivka, $x_{1,2,\dots,n}$ so prediktorji in $\beta_{1,2,\dots,n}$ so skalarni parametri, ki določajo vplivnost posameznih prediktorjev. Torej v našem primeru vplivnost proučevanih lastnosti (a , b , WWR , R_m itd.) na končni rezultat (E , E_m , CL_A), β_0 je začetna vrednost in ε je residual oz. ostanek. Signifikantnost modelov MLR je bila testirana z metodo ANOVA – analizo variance. Signifikantnost vplivnosti prediktorjev oz. lastnosti notranjega okolja je bila preverjena s pomočjo t-testa. Obenem smo preverili modele za morebiten pojav kolinearnosti s pomočjo metode *VIF* (angl. *variance inflating factors*), ki je indikator kolinearnosti [166]. Dodatno smo za vsakega izmed opravljenih modelov predstavili osnovne statistike (min., maks., povprečje), ki so predstavljene v prilogi B.1.

Ker so analizirane lastnosti notranjega okolja izražene v različnih enotah, je bilo treba vsak vhodni parameter normalizirati, da so koeficienti regresije β primerljivi. Kot je prikazano v preglednici 10, smo vsakega izmed vhodnih parametrov normalizirali na skalo od 0–100 %. Izbor desetih vhodnih spremenljivk je bil na voljo za splošne modele, ker smo presevnost stekla in odsevnost zidov obravnavali posebej kot vizualne in melanopsko utežene lastnosti. Prediktor V (usmerjenost pogleda) smo kodirali na naslednji način: ko je pogled hipotetičnega opazovalca usmerjen proti oknu (npr. pogled 0°), V znaša 0° , ko je opazovalec usmerjen proti stranskim zidovom (npr. pogleda 90° ali 270°), V znaša 90° in ko je opazovalec obrnjen v nasprotno smer okna (pogled 180°), V znaša 180° .

Preglednica 10: Spremenljivke simulacijskega modela in njihovi pripadajoči kodirani statistični prediktorji.
 Table 10: Simulation model variables and their respective statistical model predictor inputs

		<i>Neodvisne spremenljivke modela (normirani prediktorji)</i>										<i>Optične lastnosti</i>		<i>uporabnik</i>					
		<i>Geometrijske lastnosti</i>					<i>Optične lastnosti</i>					<i>R_F</i>	<i>R_C</i>	<i>∅*</i>	<i>V</i>				
<i>a</i>	<i>b</i>	<i>WWR</i>	<i>τ_v</i>	<i>τ_m</i>	<i>R_{W,v}</i>	<i>R_{W,m}</i>	<i>R_C</i>	<i>R_F</i>	<i>V</i>	<i>∅*</i>	<i>V</i>	<i>∅*</i>	<i>V</i>						
[m]*	[m]**	[%]**	[%]**	[%]**	∅*	∅*	∅*	∅*	∅*	∅*	∅*	∅*	∅*						
Min	3,00	30,00	3,00	30,00	20,00	0,10	10,00	0,10	10,00	0,10	10	0,086	8,6	0,10	10	0,1	10	0	0,00
Korak	1,00	10,00	1,00	10,00	5,00	/	/	/	/	/	/	/	/	0,10	10	0,1	10	90	50,00
Maks	8,00	80,00	8,00	80,00	40,00	1,00	10,00	1,00	10,00	0,90	90	0,90	90	0,90	90	0,9	90	180**	100,00

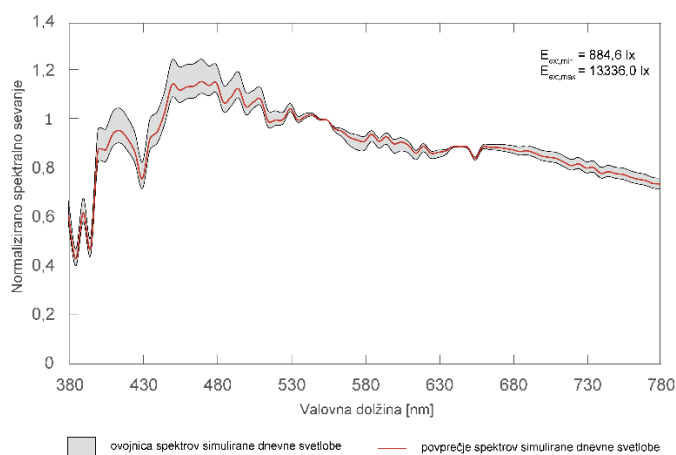
* Realna lastnost, kakor je bila varirana v simulacijskem modelu.

** Normalizirana lastnost, uporabljena kot vhodni podatek statističnega modela.

*** Pogled 270° je kodiran kakor pogled 90°, saj sta si pogleda enakovredna.

6.2.4 Izpostavljenost cirkadiani svetlobi v odnosu do najvplivnejših optičnih in geometrijskih parametrov

Statistični modeli, predstavljeni v prejšnjem poglavju, so bili vzpostavljeni zato, da bi lahko določili velikost vplivnosti posamičnih lastnosti notranjega okolja na notranje svetlobno okolje. V zadnjem koraku tega poglavja je tako bila na podlagi najvplivnejše geometrijske lastnosti in najvplivnejše optične lastnosti opravljena dodatna študija. V njej je bila spremljana izpostavljenost hipotetičnega uporabnika cirkadiano učinkoviti svetlobi v specifičnem modelu pisarne. Kumulativna izpostavljenost cirkadiano učinkoviti svetlobi je izražena v urah CS in je bila izračunana za pogled hipotetičnega sedečega opazovalca na 1,2 m višine v vsaki izmed 12 x 6 točk mreže s pripadajočimi štirimi pogledi na vsako točko. Simulacije so bile izvedene s programom ALFA v dveh ciklih. V prvem ciklu je bil spremljan vpliv spreminjanja WWR na geometriji pisarne 6 x 3 m pri petih različnih vrednostih WWR (od 20 do 40 % WWR v koraku pet odstotnih točk) in dveh teoretičnih materialih zasteklitve ($\tau_{v,m}$ je 0,50 in 0,80). V drugem simulacijskem ciklu pa so bile opravljene simulacije prav tako na pisarni 6 x 3 m ob spreminjanju $\tau_{v,m}$ petih teoretičnih materialov ($\tau_{v,m} = 0,1, 0,3, 0,5, 0,7$ in 0,9) pri WWR 20 in 40 %. Optične lastnosti preostalih površin so bile konstante za vsako izmed opravljenih simulacij in so bile definirane v skladu s SIST EN 17037:2019 [2], ki priporoča odsevnost 0,8 za $R_{W,v}$ in $R_{C,v}$ ter 0,5 za $R_{F,v}$. Oba izmed simulacijskih ciklov sta bila izračunana na podlagi zunanjih razmer za dopoldne 21. decembra (zimski solsticij) od 8.00 do 12.00, pod oblačnim nebom za Ljubljano. Oblačno nebo in zimski solsticij tako predstavljata najslabši možni osvetlitveni scenarij. Obseg spektralnega sevanja za obdobje simulacij in najnižje in najvišje vrednosti $E_{e,h}$ so prikazani na sliki 76.



Slika 76: Obseg simuliranih normaliziranih spektrov sevanja za 21. december v Ljubljani med 8.00 in 12.00 pri oblačnem nebu.

Figure 76. Simulated normalized spectral irradiance range for the 21st of December in Ljubljana between 8:00 and 12:00, solar time, overcast sky conditions.

Za proučitev odnosa in potencialnih kompromisov ali protislovij med značilnostmi/zahtevami cirkadianega in vizualnega okolja smo za vsako od navedenih pisarniških konfiguracij dodatno izvedli letne PPMDS (podnebno pogojeno modeliranje dnevne svetlobe) simulacije vizualne dnevne osvetljenosti. Simulacije smo izvedli z uporabo vtičnika Ladybug tools [167] za vse leto, ob upoštevanju izbrane dnevne periode od 8.00 do 12.00 za mrežo merilnih točk 12 x 6, postavljenih na standardni horizontalni delovni ravnini v oddaljenosti 0,85 m od tal [2]. Simulacije smo izvedli v simulacijskem programu prednastavljenih nastavitve visoke natančnosti z: -pt 0,05, -ds 0,05, -aa 0.1, -dt 0,15, -ad 4096, lw 0,005 in -ab 6. Letno vidno svetlobo smo ocenili z metriko *UDI* (angl. *Usefull Daylight Illuminance* – uporabna dnevna osvetljenost) [156, 168]. *UDI* je letni odstotek časovnih korakov, ko je prostor zaseden in je osvetljenost znotraj določenih mej. V tej študiji smo ovrednotili količino dnevne svetlobe s spodnjo mejo *UDI* pri 100 lx in zgornjo mejo pri 3000 lx (UDI_{100}^{3000}), saj so osvetljenosti med 100 in 3000 lx upoštevane kot učinkovite pri zagotavljanju primernih osvetljenosti za pisarniško delo brez povzročanja problemov z bleščanjem [169]. Opravljena vzporedna študija *UDI* in izpostavljenosti cirkadiano efektivni svetlobi bo pokazala, ali obstaja možnost, da se pojavi v prostoru nizka cirkadiana efektivna svetloba in visoka *UDI* oz. vica versa. To je posebej pomembno za načrtovanje stavb s stališča dnevnega osvetljevanja, saj bi lahko pokazalo na neusklajenost zahtev vidnega in cirkadianega svetlobnega okolja notranjega grajenega okolja.

6.3 Rezultati

Rezultati bodo predstavljeni v dveh delih. V prvem bodo predstavljeni rezultati splošnih, poglednih in conskih modelov, ki bodo izražali vplivnost proučevanih lastnosti na vizualno in cirkadiano svetlobno okolje. V drugem delu pa bo na podlagi najvplivnejše geometrijske lastnosti in optične lastnosti pisarne izračunan njihov vpliv na izraženo izpostavljenost cirkadiano učinkoviti svetlobi v sočasnem spremljanju *UDI*. V splošnem bo drugi del predstavil rezultate, ki bodo služili kot ilustrativni primer, kakšen je vpliv najvplivnejših lastnosti notranjega okolja na cirkadiano izpostavljenost svetlobi ob upoštevanju vidnega aspekta na letni ravni.

6.3.1 Vpliv lastnosti notranjega okolja v splošnih modelih

Za MLR-modele je bilo na voljo skupaj deset prediktorjev (lastnosti notranjega okolja), kot je bilo opisano že v poglavju 6.3.1, vendar je bilo za vsakega izmed treh splošnih modelov izbranih le osem prediktorjev. Kakor je to prikazano v preglednici 11, sta bila modela E_m in CL_A izvedena z melanopsko uteženima odsevnostjo in presevnostjo, R_v in τ_v pa sta bila uporabljena le pri modelu E . Namreč, če so bili sočasno uporabljeni vidno in fotopsko uteženi prediktorji v modelu, je prišlo do velikih vrednosti *VIF* prediktorjev: $R_{W,v}$ (14,768), $R_{W,m}$ (14,814), τ_v (44,253) in τ_m (44,049). Kakor je bilo pojasnjeno že v metodologiji, je *VIF* indikator kolinearnosti. Ker ti prediktorji paroma opisujejo podobne pojave, med sabo močno korelirajo. Zato je bilo treba izmed parov R in τ izključiti po en prediktor za vsakega izmed modelov. Izločitev je bila narejena glede na Pearsonov korelacijski koeficient. Izračunani korelacijski koeficienti so prikazani v preglednici 11. Prediktor, ki je izražal večjo korelacijo z odvisno spremenljivko določenega modela, je bil izbran za nadaljnjo analizo. Kot je bilo tudi pričakovano, sta $R_{W,v}$ in τ_v močneje korelirala z modelom E . Modela, ki opisujeta cirkadiano vsebino, pa sta močneje korelirala z $R_{W,m}$ in τ_m . Po izključitvi nepotrebnih prediktorjev *VIF* se statistika kaže v vrednostih blizu 1, kar pomeni, da kolinearnost v modelu ni več prisotna (preglednica 11), tako smo lahko na podlagi izbranih prediktorjev vzpostavili modele multiple linearne regresije.

Preglednica 11: Pearsonov korelacijski koeficient za vsako izmed neodvisnih spremenljivk, ki povzročata multikolinearnost (siva polja predstavljajo neodvisne spremenljivke, ki smo jih uporabili v vzpostavitvi splošnih MLR-modelov).

Table 11: Pearson's correlation factors for each of the independent variables causing multicollinearity (grey coloured fields denote independent variables included in specific overall models).

Pearsonov korelacijski koeficient ρ^*

Splošni model	$R_{W,v}$	$R_{W,m}$	τ_v	τ_m
E	0,340	0,230	0,350	0,344
E_m	0,236	0,250	0,330	0,335
CL_A	0,198	0,220	0,322	0,331

* Pearsonov korelacijski koeficient je statistično značilen pri $p \leq 0,01$

Analiza variance (ANOVA) pri osmih prostostnih stopnjah vsakega MLR-modela je bila statistično značilna ($p \leq 0,001$). Kakovost vsakega izmed treh modelov je predstavljena v preglednici 12 s pomočjo determinacijskega koeficienta (R^2) in standardne napake (SE). Vsak izmed modelov pojasni najmanj 80 % variance. Najboljša kakovost je dosežena z modelom E, ki pojasni 84,8 % variance pri standardni napaki 353,16, najslabša kakovost pa je dosežena z modelom CL_A , ki opiše 81,6 % variance pri standardni napaki 683,84 CL_A .

Preglednica 12: Kakovost skupnih modelov in koeficienti prediktorjev za E, E_m in CL_A .

Table 12: Overall MLR models fit and predictor coefficients for E, E_m and CL_A .

Model	E^{**}	E_m^{**}	CL_A^{**}
R^2	0,848	0,850	0,816
SE	353,116	361,099	683,835

Lastnost - prediktor	β^{**}	SE	VIF	β^{**}	SE	VIF	β^{**}	SE	VIF
WWR	35,4	0,72	1,4	36,4	0,74	1,4	58,4	1,40	1,4
a	-21,4	0,33	1,0	-22,2	0,34	1,0	-36,3	0,64	1,0
τ_v	18,8	0,19	1,2	/	/	/	/	/	/
τ_m	/	/	/	19,2	0,20	1,2	31,7	0,39	1,2
V	-17,8	0,11	1,0	-18,5	0,12	1,0	-30,8	0,22	1,0
$R_{W,v}$	12,5	0,17	1,1	/	/	/	/	/	/
$R_{W,m}$	/	/	/	12,8	0,17	1,1	19,6	0,32	1,1
b	7,6	0,82	1,0	7,9	0,84	1,1	12,3	1,59	1,1
R_F	6,2	0,20	1,3	6,3	0,21	1,3	9,7	0,39	1,3
R_C	4,2	0,21	1,3	4,3	0,21	1,3	6,4	0,40	1,3

† Prediktorji: R_v , τ_v , a, b, V, WWR.

‡ Prediktorji: R_m , τ_m , a, b, V, WWR.

* ANOVA, $p \leq 0,001$, ** t-test, $p \leq 0,001$.

Rezultati, predstavljeni v preglednici 12, pokažejo na enako razvrstitev po vplivnosti posameznih lastnosti na vizualno (E) in nevizualno oz. cirkadiano svetlobno okolje. Rezultati splošnih MLR-modelov pokažejo na to, da je WWR najvplivnejša geometrijska lastnost

notranjega grajenega okolja, kateri sledi globina prostora (a), kakor za vizualno, tako tudi za nevizualno oz. cirkadiano svetlobno okolje. τ_v in τ_m sta najvplivnejša izmed optičnih lastnosti za pripadajoča modela. Posledično lahko rečemo, da ima okno kot gradbeno-arhitekturni element največji vpliv na svetlobno okolje, njegovo lastnost lahko namreč opišemo s pomočjo WWR (najvplivnejša lastnost) in prepustnosti stekla (tretja najvplivnejša lastnost), vpliv odsevnosti horizontalnih elementov se izkaže za najmanjši. Natančneje, R_C in R_F izkažeta najmanjšo in drugo najmanjšo vplivnost na notranje svetlobno okolje obravnavanih splošnih modelov pisarn (preglednica 12).

6.3.2 Vpliv lastnosti notranjega okolja v modelih pogledov

Že iz skupnih povprečij za vsakega izmed pogledov modelov E , E_m in CL_A , ki so prikazani v prilogi B.2, in β -koeficientov (preglednica 12) usmerjenosti pogleda (V), ki je četrta najvplivnejša proučevana lastnost notranjega okolja, lahko razberemo, da ima pogled pomemben vpliv na zaznano svetlobno okolje hipotetičnega uporabnika prostora. Zato je bil vsak izmed treh skupnih modelov MLR dodatno razdeljen v štiri ločene modele. Vsak izmed njih opiše velikost vpliva parametrov pripadajočega pogleda. Modeli pogledov so bili vzpostavljeni zato, da lahko spoznamo in opišemo vpliv usmerjenosti pogleda na vplivnost posameznih neodvisnih spremenljivk (lastnosti notranjega okolja) in vpliv na odvisno spremenljivko (E , E_m in CL_A). Sedem prediktorjev je bilo uporabljenih za vsakega izmed modelov. Parameter V ni upoštevan v analizi, ker gledamo vsak pogled posebej kot ločen model. Tako kot pri skupnih modelih sta bila R_v in τ_v uporabljena za E -model in R_m in τ_m za E_m ter CL_A modela, da preprečimo pojave kolinearnosti. Vsak izmed izvedenih je bil signifikanten na testiranje z ANOVO pri signifikantnosti, ko je $p \leq 0,001$. Kakor je mogoče razbrati iz preglednice 13, je model pogled 0° opisal največji delež variance. Namreč, 94,8 % variance za E , 94,9 % variance za E_m in 92,9 % variance za CL_A . Najmanjši delež variance pa so opisali modeli pogleda 180° (preglednica 13). Tako kot v skupnih modelih so tudi vsi izbrani prediktorji v modelih pogledov statistično značilni pri vsakem izmed dvanajstih modelov. Prav tako smo modele testirali za multikolinearnost, vendar je vsak izmed prediktorjev izražal $VIF \approx 1$, zato lahko trdimo, da multikolinearnost ni bila prisotna v modelih. Natančni podatki o standardnih napakah in VIF prediktorjev so podrobneje predstavljeni v razpredelnicah v prilogi B.2.

Preglednica 13: Standardna napaka (SE) in koeficient determinacije (R^2) za vsakega izmed modelov pogledov.

Table 13: Standard error (SE) and coefficient of determination (R^2) for each of the view dependent models.

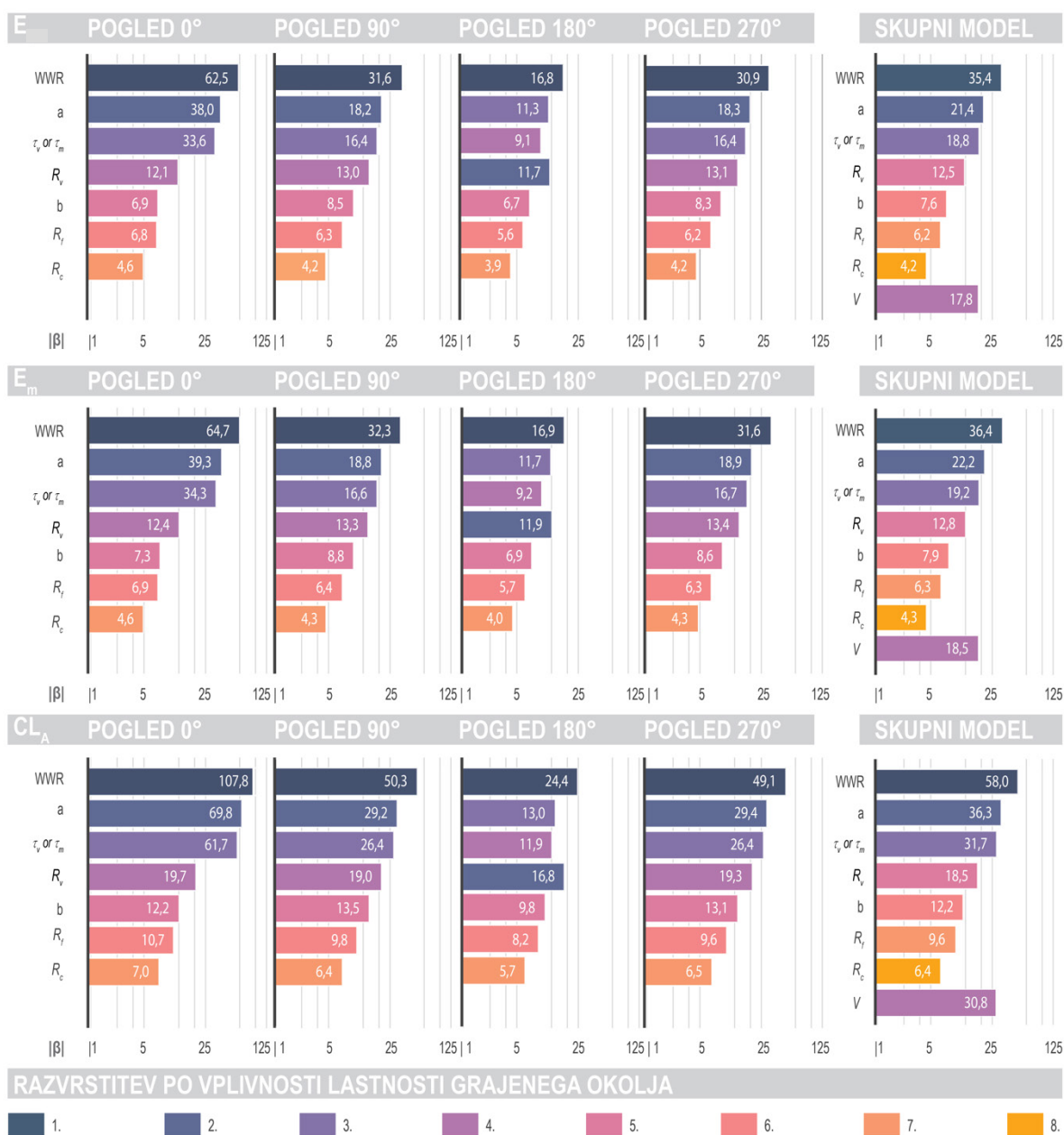
	Pogled 0°			Pogled 90°		
	E [lx] †*	E_m [EML] †*	CL_A [CL _A] †*	E [lx] †*	E_m [EML] †*	CL_A [CL _A] †*
R^2	0,948	0,949	0,929	0,901	0,900	0,871
SE	209,752	248,593	443,614	166,295	171,010	305,807
	Pogled 180°			Pogled 270°		
	E [lx] †*	E_m [EML] †*	CL_A [CL _A] †*	E [lx] †*	E_m [EML] †*	CL_A [CL _A] †*
R^2	0,836	0,833	0,793	0,900	0,897	0,869
SE	158,501	165,118	269,857	168,604	174,164	310,416

† Prediktorji: $R_{W,v}$, τ_v , R_C , R_F , a , b , WWR - t-test $p \leq 0,001$.

‡ Prediktorji: $R_{W,m}$, τ_m , R_C , R_F , a , b , WWR -t-test $p \leq 0,001$.

* ANOVA, $p \leq 0,001$.

Na sliki 77 je prikazana primerjava vpliva vseh proučevanih lastnosti notranjega okolja za vsakega izmed izbranih pogledov z vizualnega (E) in cirkadianega svetlobnega okolja (E_m , CL_A). Koeficienti β lastnosti notranjega okolja pokažejo na to, da je WWR najvplivnejša izmed opazovanih lastnosti, neodvisno od smeri pogleda opazovalca. Globina prostora (a) je druga najvplivnejša lastnost za poglede 0°, 90° in 270°. Kadar je hipotetični opazovalec obrnjen v nasprotno smer od okna (pogled 180°), pa $R_{W,v}$ ali $R_{W,m}$ postane drugi najvplivnejši parameter, a pa zasede tretje mesto na lestvici vplivnosti (slika 77). Presevnost (τ_v ali τ_m) je najvplivnejša optična lastnost (slika 77) pri vseh pogledih, razen pri pogledu 180°, kjer je, kot že omenjeno, $R_{v,m}$ najvplivnejša lastnost. Vpliv $\tau_{v,m}$ pade na četrto mesto za $R_{W,v,m}$, WWR in a . Optične lastnosti horizontalnih površin, torej R_F in R_C , so najmanj vplivne izmed vseh preiskovanih površin za vsakega izmed pogledov. Če primerjamo pomembnost skupnih primerov z modeli pogledov, opazimo identično razvrstitev za poglede 0°, 90° in 270° s splošnim modelom. To pa ne velja za pogled 180°, pri katerem odsevnost zidov postane bolj pomembna kot WWR in $\tau_{m,v}$, torej $R_{v,m}$ postane drugi najpomembnejši parameter za situacijo, kadar je opazovalec obrnjen v smer 180° glede na okno.



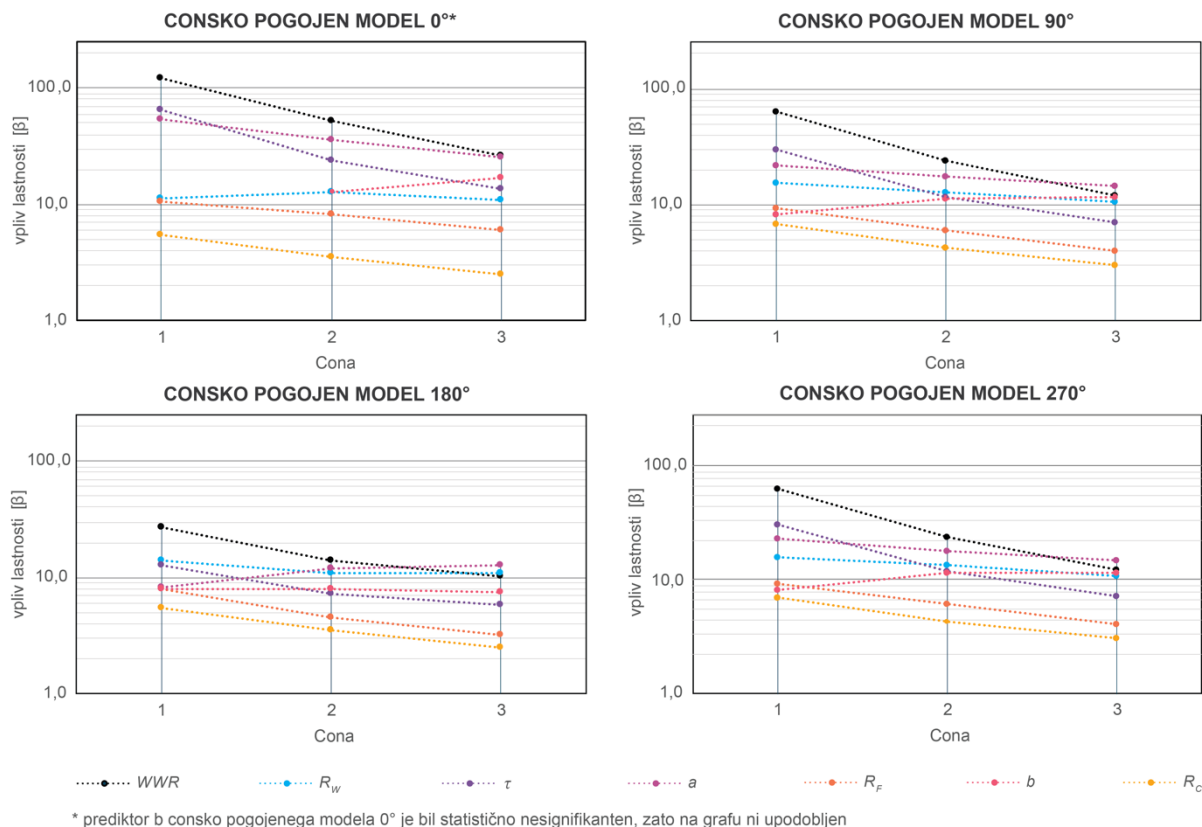
Slika 77: Vpliv lastnosti notranjega okolja na vizualno in nevizualno svetlobno okolje na podlagi poglednih modelov.

Figure 77: Influence of building parameters visual and non-visual luminous conditions according to view dependent models.

6.3.3 Vpliv lastnosti notranjega okolja v consko pogojenih modelih

Osvetljenost, melanopska ali fotopska, se v stransko osvetljenih prostorih spreminja proporcionalno z oddaljenostjo od vira svetlobe – okna. Zato je bil namen consko pogojenih modelov proučiti vpliv geometrijskih in optičnih lastnosti notranjega okolja v odnosu z oddaljenostjo od okna in hkrati usmerjenostjo pogleda. Vpliv globine je bil proučevan tako, da je bil prostor razdeljen v tri enake cone, kakor je prikazano na sliki 78. Consko pogojen vpliv

lastnosti notranjega okolja je bil proučevan samo na modelih E , kajti kot je že razvidno iz poglavij 6.3.1 in 6.3.2, se izražena vplivnost posameznih lastnosti med različnimi modeli, vizualnim ali nevizualnimi, ne razlikuje bistveno. Vsi prediktorji v consko pogojenih prediktorjih, razen b v coni 1 modela 0° , so bili statistično signifikantni. Prediktor b cone 1 je bil tako izključen iz evaluacije.



Slika 78: Vplivnost lastnosti notranjega okolja v odvisnosti od cone in pogleda.
 Figure 78: Building parameter influence on the indoor illuminance in relation to zone and view direction.

Rezultati consko pogojenih modelov so prikazani na sliki 78, natančneje pa v prilogi B.3. Kot je to lahko razvidno s slike 78, se vplivnost posameznih lastnosti notranjega okolja spreminja v odvisnosti od oddaljenosti od okna. Na splošno se vrednosti β vsake izmed lastnosti zmanjšujejo s pomikanjem v globino prostora (oz. z višjo cono). Izjema so prediktorji β za širino pri vseh pogledih in globino pri pogledu 180° , kjer se proporcionalno z oddaljenostjo od okna zvišujejo. Največja sprememba je opažena pri velikosti okenske odprine (WWR), kjer se vpliv v primerjavi z ostalimi obravnavanimi lastnostmi najbolj spremeni. Padec vplivnosti WWR je tako drastičen, da s spremembo iz cone 1, kjer je bil WWR največji, v coni 3 pade na drugo ali tretje mesto pri pogledih 90° , 180° in 270° . V teh pogledih postaneta a in R_W bolj vplivni lastnosti. Natančneje, β prediktorja a in R_W postaneta 23 in 8 % večja kakor β prediktorja WWR

v primerih pogledov 90° in 270° cone 3. Na splošno lahko trdimo, da ima na R_W oddaljenost od okna hipotetičnega opazovalca najmanjši vpliv.

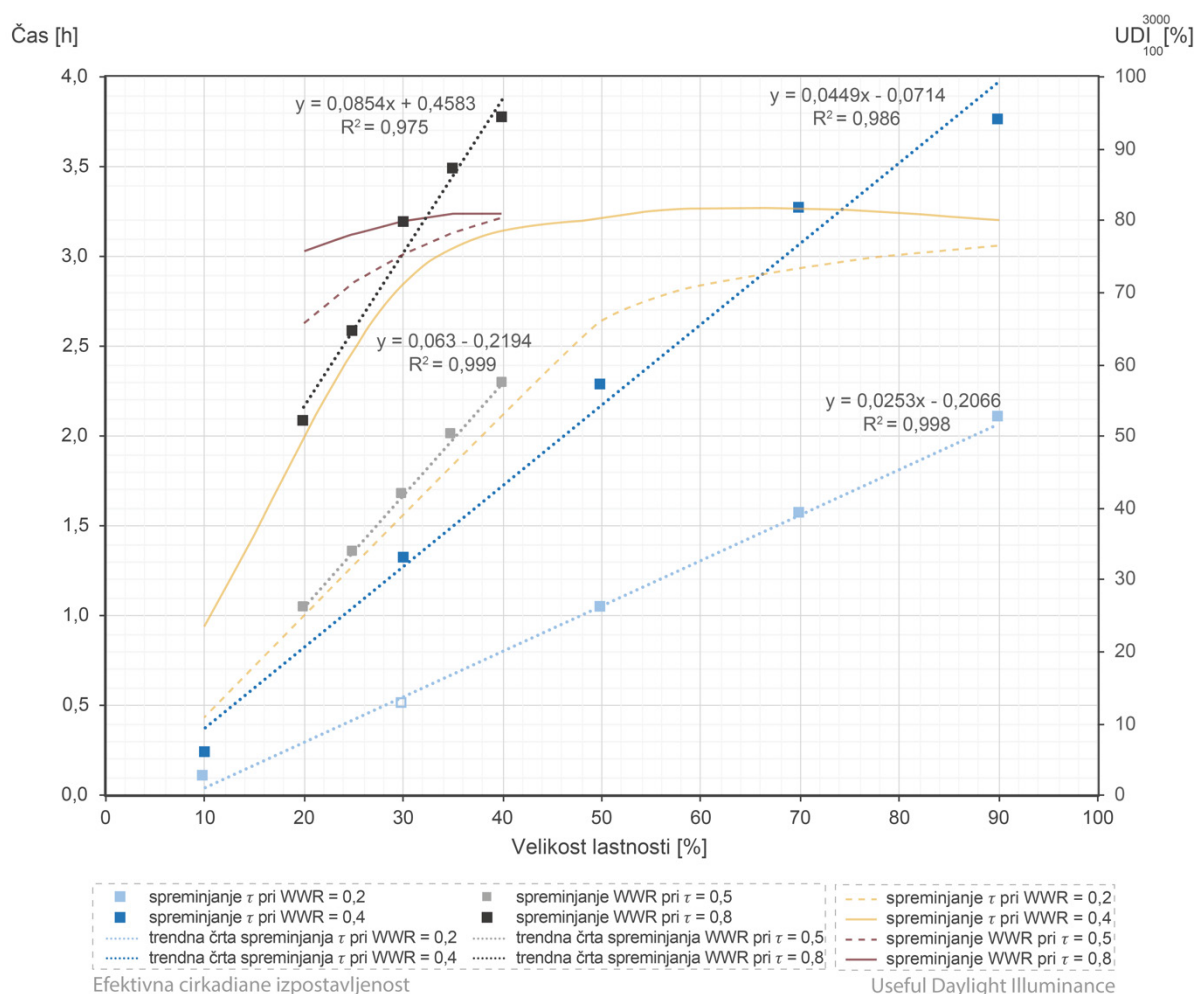
Kot je bilo pričakovati, je obravnavana analiza vplivnosti po conah in smereh pogleda razkrila, da so geometrijske in optične lastnosti okna v coni 1 najvplivnejše izmed proučevanih lastnosti notranjega okolja na svetlobno okolje, presenetljivo tudi kadar je opazovalec obrnjen stran od okna (pogled 180°). Prav tako je WWR najvplivnejša geometrijska lastnost v drugi coni za vsak pogled, odsevnost zidov pa postane najpomembnejša optična lastnost, razen ko je opazovalec obrnjen v smer 0° , kjer je presevnost (τ) še vedno najvplivnejša. Globina (b) postane najvplivnejši geometrijski parameter za vsak pogled, ko se opazovalec premakne v cono 3. Podobno R_W postane najvplivnejša optična lastnost vsakega izmed obravnavanih pogledov.

6.3.4 Vpliv najvplivnejše geometrijske in optične lastnosti na cirkadiano učinkovito izpostavljenost dnevni svetlobi

Kakor je bilo že ugotovljeno v prejšnjih poglavjih (glej poglavje 6.3.1, 6.3.2 in 6.3.3), je WWR na splošno najvplivnejša geometrijska in $\tau_{v,m}$ najvplivnejša optična lastnost v vizualnem in nevizualnem oz. cirkadianem svetlobnem okolju obravnavanih prostorov. Za podrobnejšo proučitev vpliva omenjenih lastnosti so bile izvedene natančnejše urne simulacije, katerih namen je bil ilustrirati vpliv WWR in/ali $\tau_{v,m}$ na cirkadiano učinkovito izpostavljenost uporabnika hipotetične pisarne. Cirkadiano učinkovita osvetljenost je količina svetlobe, ki zadošča kriteriju $CS \geq 0,3$. Dodatno smo opravili letne simulacije za enako dnevno obdobje (med 8.00 in 12.00), da bi lahko proučili odnos med cirkadiano učinkovito svetlobo in vidnimi kriteriji svetlobe ter identificirali morebitne kompromise med zahtevami obeh vidikov dnevne svetlobe.

Rezultati, predstavljeni na sliki 79, prikazujejo povprečno cirkadiano učinkovito (svetloba pri $CS \geq 0,3$) izpostavljenost v pisarni in povprečen UDI_{100}^{3000} , ki temeljita na rezultatih, ki so predstavljeni na slikah 80 in 81. Značilen trend naraščanja učinkovite cirkadiane izpostavljenosti je mogoče opaziti za vsako izmed simuliranih konfiguracij pisarn. Spreminjanje WWR pri $\tau_{v,m} = 0,8$ se izraža v največjem β -koeficientu 0,0854, ki je kar 3,4-krat večji kot najmanjši β -koeficient variacije τ pri 20 % WWR . Rezultati s slike 79 pokažejo, da sta vpliva WWR in τ na trajanje izpostavljenosti svetlobi povezana. Kot npr., WWR pri večjih $\tau_{v,m}$ 0,80 se izraža v 35 % višjem β -koeficientu kakor pri nižji $\tau_{v,m}$ 0,50. Podobno ko je spreminjan $\tau_{v,m}$ pri WWR 40 %, se ta izraža v 77 % večjem β -koeficientu kot takrat, ko $\tau_{v,m}$ spreminjamo pri 20 % WWR . Večji vpliv variacije WWR pri fiksni $\tau_{v,m}$ kakor obratno je posledica splošno

večjega vpliva *WWR* na doseženo cirkadiano učinkovito izpostavljenost dnevni svetlobi (slika 78).

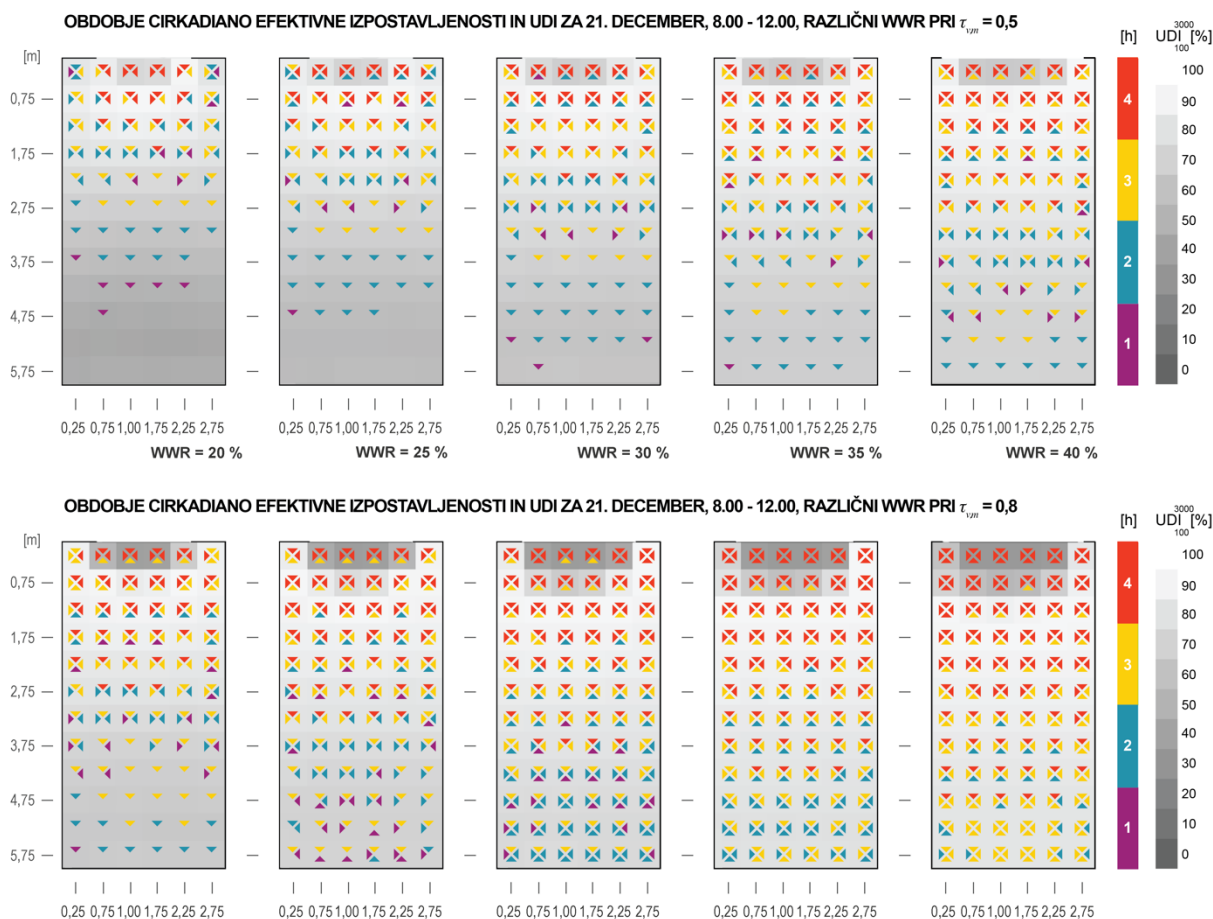


Slika 79: Skupna povprečna efektivne cirkadiane izpostavljenosti dnevni svetlobi in uporabne dnevne osvetljenosti (*UDI* – Usefull Daylight Illuminance) za vsakega izmed simuliranih primerov.

Figure 79: Overall averages of effective circadian exposure and *UDI* – Useful Daylight Illuminance for each of the simulated cases.

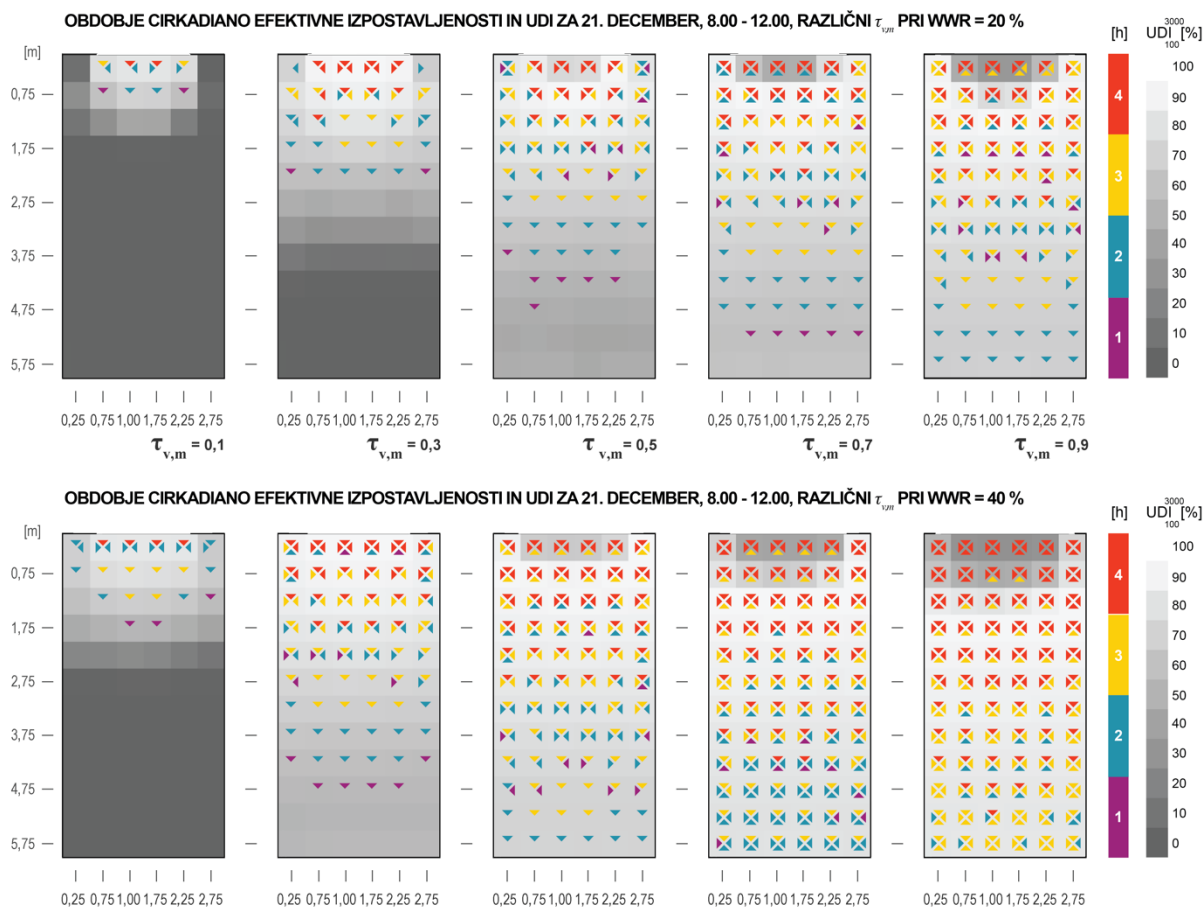
Ker je bil cilj zadnjega dela te študije oceniti efektivno cirkadiano svetlobno izpostavljenost delavca v pisarni, bodo rezultati, ki so predstavljeni na slikah 80 in 81, interpretirani z zornega kota takšnega uporabnika. Delavec v pisarni bi najbrž zasedel delovno mesto nekje v središču širine pisarne, torej pri 1,00 ali 1,75 m oddaljenosti od zahodnega zidu in bi bil obrnjen proti vzhodnemu ali zahodnemu zidu, tako bi dosegel stransko osvetljen delovni prostor. Slika 80 prikazuje trajanje izpostavljenosti $CS \geq 0,3$ obravnavane konfiguracije pisarne, ko je bil spreminjan *WWR* med 20 in 40 % v koraku pet odstotnih točk pri $\tau_{v,m}$ 0,50 in 0,80. Razberemo lahko, da le štiri od 12 vrst merilnih točk dosežejo kriterij $CS \geq 0,3$ vsaj 1 uro, ko je *WWR* 20 % in $\tau_{v,m}$ 0,50. Z večanjem deleža zasteklitve raste tudi delež merilnih mest, ki zadoščajo kriteriju. Vendar ko se *WWR* zveča na 30 %, prva polovica analiziranih vrst točk doseže oz. preseže

dvakratnik izpostavljenosti kot v primeru 20 % *WWR*. Ko se *WWR* poveča na 40 %, pisarna ponuja že primerno cirkadiano izpostavljenost vsaj dveh ur na kar dveh tretjinah izmed vseh merilnih mest (glej sliko 80). Pri uporabi stekla z večjo presevnostjo 0,80 in *WWR* 20 % so doseženi enakovredni pogoji konfiguracije, ko je $\tau_{v,m}$ 0,50 in *WWR* 35 %. Če je cilj doseči zadostno količino cirkadiane izpostavljenosti po celotni globini pisarne stransko osvetljenih konfiguracij delovnih mest, to omogočajo le kombinacije z velikim *WWR* (≥ 30 %) in veliko $\tau_{v,m}$ ($\geq 0,80$). Podobne sklepe je mogoče izpeljati iz rezultatov spreminjanja $\tau_{v,m}$ med 0,10 in 0,90 pri koraku 0,20, ko je *WWR* 20 ali 40 % (slika 81). Opaziti je mogoče, da presevnosti, manjše od 0,50, ne zagotavljajo zadostne cirkadiane izpostavljenosti, kadar je *WWR* 20 %, uporabnikom, ki so obrnjeni proti vzhodni ali zahodni steni. Vendar ko *WWR* povečamo na 40 %, $\tau_{v,m}$ 0,3 (ali višje), cirkadiano učinkovito osvetljenje dosežajo točke v prvi tretjini prostora (slika 81), kar je ekvivalentno primeru pri *WWR* 25 % in $\tau_{v,m}$ 0,5 (slika 80).



Slika 80: Cirkadiano učinkovita izpostavljenost svetlobi in UDI med 8.00 in 12.00 na 21. december pri različnih *WWR* in $\tau_{v,m}$ pri 0,5 (zgoraj) in 0,8 (spodaj).

Figure 80: Effective circadian exposure between 8:00 and 12:00 on the 21st of December and annual UDI for the same daily period at various *WWR*s and $\tau_{v,m}$ of 0.50 (top) and 0.80 (bottom).



Slika 81: Cirkadiano učinkovita izpostavljenost svetlobi in UDI med 8.00 in 12.00 na 21. december pri različnih $\tau_{v,m}$ in WWR pri 20 % (zgoraj) in 40 % (spodaj).

Figure 81: Effective circadian exposure between 8:00 and 12:00 on the 21st of December and annual UDI for the same daily period at various $\tau_{v,m}$ and WWR of 20 % (top) and 40 % (bottom).

Ko primerjamo rezultate cirkadiane učinkovite izpostavljenosti z izvedenimi letnimi rezultati UDI , predstavljenimi na slikah 80 in 81, postane očitno, da na splošno visoko učinkovita cirkadiana izpostavljenost sovпада z velikimi vrednostmi UDI_{100}^{3000} . Vendar obstajajo tudi izjeme. Zlasti v območju blizu okna, do globine 1 m pri pisarniških konfiguracijah, za katere je značilen visok WWR in/ali visoka $\tau_{v,m}$. Majhne vrednosti UDI v tem območju so posledica velike horizontalne osvetljenosti (tj. nad 3000 lx). Hkrati je učinkovita cirkadiana izpostavljenost velika za vse obravnavane smeri pogleda (npr. $\tau_{v,m}$ 0,7 in 0,9 pri 40 % WWR , glej sliko 81). Zato prvi dve ali tri vrstice točk analizne mreže niso optimalne z vidika dosežene horizontalne osvetljenosti dnevne svetlobe na delovni ravnini, če ima prostor visok WWR in visoko $\tau_{v,m}$ brez uporabljenih senčil. Druga izjema se pojavi, ko je uporabnik prostora obrnjen stran od okna (tj. pogled 180°). V tem primeru je lahko učinkovita cirkadiana izpostavljenost izjemno majhna (tj. manj kakor 1 ura), medtem ko je dosežena vrednost UDI lahko velika. Takšni primeri se pojavijo v konfiguracijah, kjer je $WWR = 30$ % ali manj kombiniran s $\tau_{v,m}$ pod 0,5.

6.4 Diskusija

Predstavljene simulacije konfiguracij celičnih pisarn z enim severno orientiranim oknom in enostavnimi pravokotnimi tlorisi so omogočile vzpostavitev 27 parametričnih statističnih modelov s signifikantnimi rezultati prediktorjev. Tako zasnovani statistični modeli so omogočili študij prispevka izbranih lastnosti notranjega grajenega okolja (preglednica 10) ter tudi smeri pogleda na stanje vizualnega in nevizualnega oz. cirkadianega svetlobnega okolja v notranjosti stavbe. Rezultati so dokazali, da je bilo vpliv obravnavanih lastnosti notranjega okolja na vizualno in cirkadiano svetlobno okolje mogoče ovrednotiti s pomočjo enostavnih statističnih metod. Vzporedna analiza vizualnega in cirkadianega okolja je pokazala, da na obe okolji proučevane lastnosti notranjega okolja (vizualno in cirkadiano okolje) enakovredno vplivajo, če vplivnost parametrov vizualnega okolja spremljamo z vizualno uteženimi optičnimi lastnostmi, nevizualno oz. cirkadiano okolje pa z melanopsko uteženimi optičnimi lastnostmi. Priporočamo pazljivost pri izboru materialov, saj enake vizualne odsevnosti ali presevnosti lahko privedejo do različne nevizualno utežene odsevnosti ali presevnosti, kot je bilo to že pokazano v predhodnih raziskavah [19, 25, 170] in v 4. poglavju. Na primer pri modri in rdeči barvi, uporabljenih v naših simulacijah, imata oba materiala približno enako vizualno uteženo odsevnost 0,5, njuni melanopski uteženi odsevnosti pa znašata 0,684 za modro in 0,404 za rdečo barvo (slika 73). Torej, inherentna dvojnost optičnih lastnosti pogostih gradbenih materialov je lahko za snovalce prostora past, če se ti osredotočajo samo na vizualne optične lastnosti materialov. Trenutno se proizvodi, kot so zasteklitve in barve, oglašujejo samo po vizualno uteženih karakteristikah. Po našem mnenju je potrebna sprememba na trgu in tudi v tehničnih smernicah in standardih, ki bi standardizirala podajanje melanopsko uteženih lastnosti. Tako bi lahko snovalci prostora sprejemali prave odločitve pri izboru materiala in lažje predvidevali vpliv na notranje vizualno in nevizualno okolje.

Izsledki opravljene študije so pokazali, da je delež zasteklitve (WWR) najvplivnejša geometrijska lastnost, presevnost stekla ($\tau_{v, m}$) pa najvplivnejša optična lastnost notranjega grajenega okolja, ko upoštevamo povprečja celega prostora. Pomembnosti vpliva zasteklitve nam v naši predhodni študiji [25] ni uspelo prepoznati zaradi omejenega števila pogledov in analiziranih točk, pa vendar se ti podatki ujemajo z Yao in sod. [20]. Vsesplošno velika pomembnost obeh WWR in τ je nazorno ilustrirana v primeru iz poglavja 6.3.4. Kakorkoli, pomembnosti odsevnosti zidov ne smemo zanemariti, saj vplivnost zidov v primerjavi z drugimi parametri po globini narašča. To je očitno za vse poglede, kot to prikazujejo consko pogojeni modeli, predstavljeni v tem poglavju, razen kadar je opazovalec obrnjen proti oknu.

Consko pogojeni modeli pokažejo, da so nekatere izmed proučevanih lastnosti odvisne od pogleda in/ali od globine prostora. Natančneje, vplivnosti WWR , a in $\tau_{v,m}$ so odvisne od pogleda, torej kadar je hipotetični opazovalec obrnjen stran od okna, odsevnost okna $R_{v,m}$ postane vplivnejša kakor $\tau_{v,m}$ in a . Dodatno pa je bilo pokazano, da so vse izmed obravnavanih lastnosti odvisne od globine, kar pomeni, da se prispevek lastnosti notranjega okolja na svetlobno vsebino prostora spreminja z globino opazovanja. Cirkadiane vsebine prostora zato ne moremo ocenjevati z poenostavljenimi metodami [171] s predpostavko, da je opazovalec statičen, saj se glede na položaj uporabnika v prostoru vpliv arhitekturno-gradbenih elementov spreminja.

Dodatno, ilustrativni primer učinkovite cirkadiane izpostavljenosti in letne UDI , predstavljen v poglavju 6.3.4, jasno izpostavi staro mantra dobre prakse načrtovanja z dnevno svetlobo, da je treba tip zasteklitve in velikost okna izbirati sočasno, kar se neposredno prevede v cirkadiano osvetljevanje z dnevno svetlobo. Rezultati obravnavanih geometrij, lokacije in časa kažejo na to, da je za zadostno cirkadiano izpostavljenost v prvi tretjini pisarniškega prostora potrebna učinkovita odprtina (angl. *effective aperture* – $EA = WWR * \tau_{v,m}$) [127] prostora 0,12 ali več (npr. WWR 25 % in $\tau_{v,m}$ ali WWR 40 % in $\tau_{v,m}$ 0,3). To pomeni, da ko je EA približno 0,25 (WWR 30 % pri $\tau_{v,m}$ 0,8 ali WWR 40 % pri $\tau_{v,m}$ 0,7), cel prostor pri 6 m globine ponuja minimalno cirkadiano izpostavljenost hipotetičnemu uporabniku, ko je ta obrnjen proti stranskim zidom pisarne (sliki 80 in 81). Vendar pa je analiza UDI poudarila, da v zadnjem primeru namestitve delovnih mest v bližini okna ni priporočljiva, ker bi velika osvetljenost povzročila potencialno vidno neudobje zaradi bleščanja, če ne uporabljamo senčil.

Poudariti je treba, da so izidi opravljenih statističnih študij že vnaprej omejeni z izbranimi geometrijskimi lastnostmi pisarne. Zavedati se moramo, da bi na primer uvedba dodatnih oken bistveno spremenila njihov vpliv na druge parametre. Poleg tega so ugotovitve statističnih študij omejene na oblačno nebo pri srednjih zemljepisnih širinah (tj. $\approx 45^\circ$ S in J), vendar veljajo za vse orientacije in neodvisno od časa v dnevu, kadar je nebo oblačno. Toda zadnje ne velja, če nebo ni homogeno in je Sonce vidno (tj. prisotna je neposredna sončna komponenta). V takšnih razmerah bi orientacija prostora, nebo in čas dneva pomembno vplivali na relativni vpliv opazovanih parametrov stavbe, kot smo to pokazali že v 5. poglavju. Poleg tega bi senčila znatno vplivala na notranje vizualno okolje [167,168] in cirkadiane svetlobne razmere [26, 172], zato bi predstavljale še eno plast zapletenosti problema. Navedeni vidiki so rezervirani za prihodnje raziskave, v katerih bi raziskali relativni vpliv geometrijskih in optičnih parametrov stavbe na cirkadiane svetlobne razmere tudi pri stanju neba, ko je prisotna direktna sončna komponenta. Nazadnje zaradi omejitev trenutnega stanja tehnike in

pomanjkanja znanja o natančnem zahtevanem odmerku svetlobe za najbolj zdravo notranje grajeno okolje rezultatov študije o učinkoviti izpostavljenosti cirkadiani svetlobi ne smemo razumeti kot natančno priporočilo, temveč le kot vpogled v obseg učinka lastnosti grajenega okolja na svetlobno vsebino, ki veljajo za najslabši dan v letu glede na osvetljenost z dnevno svetlobo.

7 PREFERENCA UPORABNIKOV GLEDE OPTIČNIH LASTNOSTI POVRŠIN NOTRANJEGA OKOLJA

Povzetek:

Kakor je bilo ugotovljeno v študijah iz prejšnjih poglavij te doktorske disertacije, imata spektralna odsevnost in presevnost, posledično tudi barva zasteklitev in sten, pomemben vpliv na pojavnost optimalnega vizualnega oz. cirkadianega svetlobnega okolja. Izbor najljubše barve pogosto povezujemo s preferenco po barvi in trenutnimi trendi. V prvem delu te študije so predstavljeni rezultati ankete med zaposlenimi na Univerzi v Ljubljani, ki je bila opravljena decembra 2019. Cilj ankete je bil spoznati, ali obstaja statistično značilna povezava med osebnimi determinantami, tipologijo prostora, preferirano barvo notranjih površin in splošno barvno preferenco anketirancev. V drugem delu tega poglavja pa je bila opravljena simulacijska študija na generičnem pisarniškem prostoru, kjer je bil predstavljen in analiziran vpliv identificiranih preferenčnih barv pri enaki odsevnosti na nevizualno okolje v prostoru, lociranem v Ljubljani. Rezultati ankete so pokazali jasno in močno povezavo med splošno priljubljenostjo barv in priljubljenostjo barve zidu v prostoru. Prav tako so bile ugotovljene statistično značilne razlike v priljubljenosti barv med spoloma in v starostnih skupinah. Anketiranci so izrazili višjo preferenco do belo, oranžno in modro obarvanih zidov. Izvedene simulacije pa so pokazale, da modri zidovi pri enaki odsevnosti povečujejo cirkadiano osvetljenost, oranžni pa jo zmanjšujejo v primerjavi z nevtralnimi sivimi zidovi. Rezultati predstavljene študije podkrepljujejo, da je vplivnost barv notranjega okolja zelo pomembna, in pokažejo, da lahko uporabnik s svojimi preferencami močno vpliva na notranje cirkadiano okolje.

Povzetek:

As identified in previous studies in former chapters the spectral reflectance and transmittance or in other words colour of interior surfaces has to be considered in order to provide optimal visual and non-visual performance. Colour selection is often related to the occupant's colour preferences. First part of the presented study was a questionnaire-based cross-sectional study among the employees of the University of Ljubljana conducted in December 2019 in order to identify possible association between personal determinants, room typology, preferred colour of indoor surfaces, and general colour preferences. Based on the findings from the survey results, a simulation study on a generic cellular office was executed in order to evaluate the implications of occupant's wall colour preference on the resulting non-visual luminous environment under the climate of Ljubljana. Results showed a strong association between the general colour preference and wall colour preference. Significant differences between gender and age groups were identified. The respondents preferred white, orange, and blue coloured walls, the latter two, as deduced from the simulations, may have a substantial negative or positive impact on the spatial distribution and duration of appropriate non-visual exposure in the indoor environment. The results of the presented study highlight the importance of considering the potential impact of indoor surface colour selection when evaluating the quality of the indoor luminous environment.

OBJAVLJENO IZ TEGA POGLAVJA:

Potočnik, J., Košir, M., Dovjak, M., 2020. Colour preference in relation to personal determinants and implications for indoor circadian luminous environment. *Indoor and Built Environment*.
<https://doi.org/10.1177/1420326X20977609>

7.1 Uvod

Kot smo se naučili v predhodnih študijah, so vpliv zasteklitve (presevnost in velikost) in vpliv sten (odsevnost, posledično barva in nasičenost) najvplivnejše lastnosti v notranjem bivalnem in delovnem okolju, ki vplivajo na cirkadiano svetlobno okolje. Omenjene lastnosti notranjega okolja, predvsem optične lastnosti sten ali oken, uporabniki med življenjsko dobo stavbe mnogokrat spreminjajo sami (posledica vzdrževanja objekta) in jih v fazi načrtovanja ni mogoče predvideti. Zato smo v prvem delu te študije na vzorcu zaposlenih na Univerzi v Ljubljani preverili, kakšna je preferenca do barve zidov in oken ali velikosti zasteklitev uporabnikov. Zanimalo nas je, ali najljubša barva vpliva na izbor barve zidu in ali obstajajo povezave med demografskimi podatki (npr. starost, spol itd.) in preferenco do določene barve ter ali ljudje raje izbirajo spektralno nevtralne (npr. bela, siva) ali spektralno nenevtralne barve (npr. modra, oranžna). V drugem delu študije na podlagi najljubših barv anketiranih zasnujemo tri identična pisarniška okolja pri enakovrednih vidnih odsevnostih, na podlagi katerih ovrednotimo celodnevno cirkadiano svetlobno okolje. Tako predstavimo spremembo v cirkadianem svetlobnem okolju, ki jo lahko povzroči le osebna preferenca uporabnikov prostora.

7.2 Metodologija

Predstavljena študija je sestavljena iz dveh delov, ki sta tudi v strukturi metodologije. Prvi del metodologije opisuje zasnovo ankete in metod, uporabljenih pri določitvi preferenc barv in njihovo povezavo z osebnimi parametri med anketiranci (zaposleni na Univerzi v Ljubljani). V drugem delu pa je predstavljena metodologija vpliva različnih barv zidov pri enaki odsevnosti na razmere osvetljenosti štirih geometrično identičnih generičnih celičnih pisarn, osvetljenih samo z dnevno svetlobo, ki so analizirane v dnevnem svetlobnem ciklu.

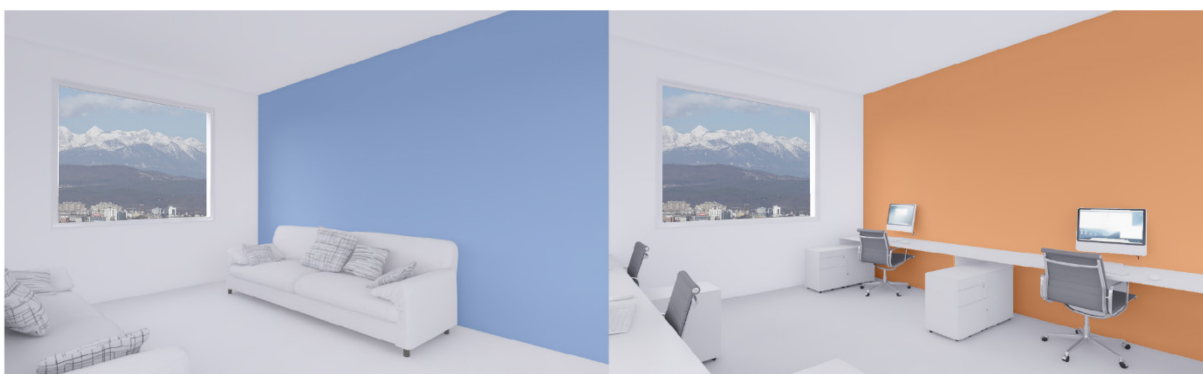
7.2.1 Zasnova ankete o preferencah optičnih lastnosti notranjega okolja

Anketa je bila ustvarjena za pridobitev podatkov o preferencah po barvi (odtenki, nasičenost) notranjih prostorov in karakteristik oken (barva zasteklitve). Anketa, ki je predstavljena v prilogi C, je sestavljena iz 20 vprašanj in naslednjih štirih sklopov:

1. Osebni in geografski podatki (sedem vprašanj): soglasje o zbiranju osebnih podatkov, morebitne diagnoze bolezni barvnega vida, spol, starost, področje dela, statistična regija bivanja.

2. Osebne barvne preference na podlagi prikazanega barvnega izbora (eno vprašanje): šest različnih barvnih odtenkov pri treh ravneh nasičenosti.
3. Preferenca obarvanosti zidov v bivalnem in pisarniškem oz. delovnem okolju (14 vprašanj v sklopu za bivalno in za delovno okolje) s sedmimi vprašanji o preferenci barve zidov pri treh ravneh nasičenosti in šestih barvnih odtenkih.
4. Preferenca velikosti in obarvanosti stekla (štiri vprašanja): dve vprašanji o preferenci velikosti okenskih odprtin in dve vprašanji o preferenci obarvanosti zasteklitve.

Anketiranci so izbirali svoje najljubše svetlobno okolje med več možnimi odgovori. Kakor je prikazano na slikah 82 in 83, so se odločali na podlagi digitalnih vizualizacij prostora dveh tipologij, ki predstavljata bivalno okolje (generična dnevna soba) in delovno okolje (generična pisarna). V teh prostorih smo spreminjali barvo stene (slika 82) ali pa barvo (slika 83) ali velikost zasteklitve.



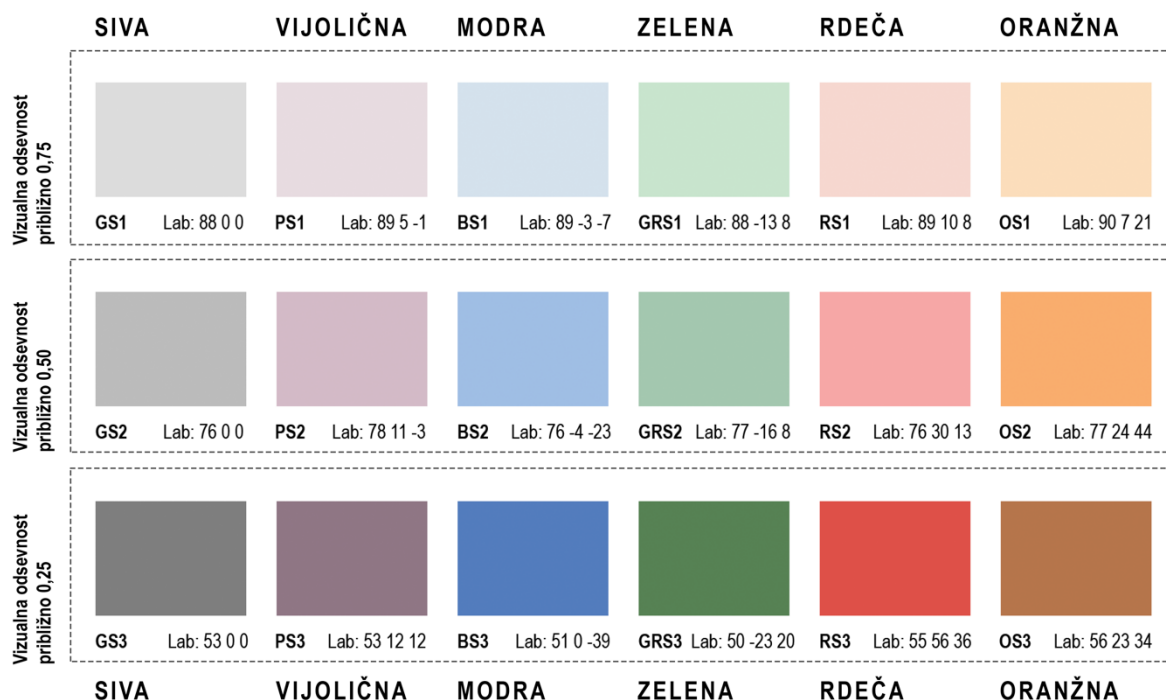
Slika 82: Vizualna predstavitev variacije notranjega okolja v izvedeni anketi. Levo – generična dnevna soba, desno – generična pisarna. Pri obeh tipologijah je bila spreminjana barva vertikalnega desnega zidu.

Figure 82: Visual representation of indoor environment variation in the survey. Left – generic living room; right; generic office. In both typologies the colour of the right vertical wall was varied.

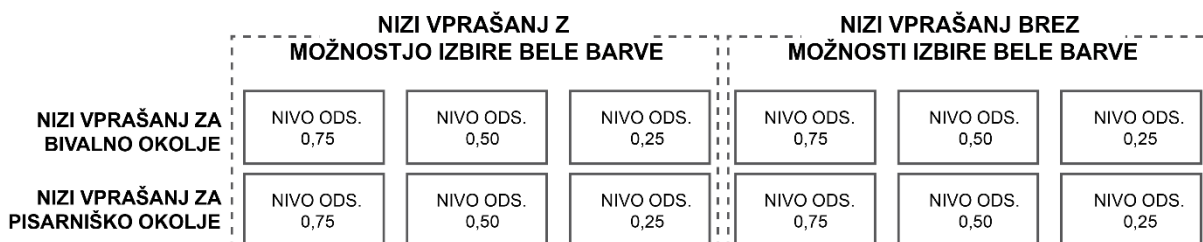


Slika 83: Primeri digitalnih predstavitev bivalnega (zgornje tri slike) in pisarniškega (spodnje tri slike) notranjega okolja z uporabljenimi zasteklitvijo hladne (levo), nevtralne (sredina) in tople barve (desno).
Figure 83: Examples of living environment renders (top three pictures) and office environment renders (bottom three pictures) with applied cold (left), neutral (middle), and warm (right) glazing.

Da bi lahko zanesljivo izmerili in zaznali spremembo v cirkadianem potencialu prejete svetlobe kot posledico spremembe barve, je bila velika pozornost posvečena izboru barv. Izbor je bil zasnovan na predhodno izvedeni študiji iz 4. poglavja. Izbrali smo šest barvnih odtenkov pri treh ravneh nasičenosti oz. odsevnosti (slika 84), ki bi pokrili dober del vidnega barvnega spektra in bi obenem odsevali čim bolj podobno količino vidne svetlobe (enako svetle barve). Sprva smo izbrali tri skupine primarnih barvnih odtenkov, torej rdeči (manjši cirkadiani potencial), zeleni (nevtralni cirkadiani potencial) in modri (večji cirkadiani potencial) barvni odtenki. Nato smo izbrali še skupino vijoličastih barvnih odtenkov, ker so kombinacija med modro in rdečo, ter še skupino oranžnih barvnih odtenkov, ker so kombinacija zelene in rdeče. Med zeleno in rdečo je na spektru rumena, ki pa ni bila uporabljena, ker pri majhnih odsevnostih izgubi kromatske lastnosti, ki bi jo lahko opredeljevale kot rumeno. Dodatno smo izbrali še tri spektralno nevtralne barve – sivine, prav tako pri treh ravneh odsevnosti (slika 84). Barvne odtenke smo poimenovali, kot je zapisano na sliki 84. Na primer, RS1 predstavlja rdečo, najmanj nasičeno barvo. Raven odsevnosti 0,75 poimenujemo nenasičena barva, raven odsevnosti 0,50 srednje nasičena barva in raven odsevnosti 0,25 nasičena barva. Kot je to prikazano na sliki 85, so bili anketiranci povprašani o preferenci specifične barve zidov, pri čemer so imeli na voljo šest različnih nizov kombinacij notranjega okolja (trije nizi z možnostjo izbire belo obarvanega zidu in trije nizi brez možnosti izbire belega zidu) za vsako izmed obravnavanih tipologij notranjega okolja.



Slika 84: Barvni vzorci in pripadajoče Lab-vrednosti obravnavanih barv v anketi.
 Figure 84. Colour swatches and their respective Lab values of the colours used in the survey.



Slika 85: Metodologija postavljanja vprašanj v anketi.
 Figure 85: Methodology of pairing wall colour preferences in the conducted study.

Anketni vprašalnik je bil preizkušen na šestih naključnih anketirancih, zaposlenih na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Na podlagi rezultatov so bila vprašanja nato popravljena in prilagojena ter po potrebi tudi odstranjena. Decembra 2019 je bilo povabljenih 5981 anketirancev po institucijskih e-poštnih naslovih zaposlenih na članicah Univerze v Ljubljani. Podatki so bili zbrani s pomočjo spletnih vprašalnikov. Anketiranci so tako sami izpolnili spletne ankete s pomočjo digitalne naprave (npr. osebni računalnik, mobilni telefon itd.). Večkratno izpolnjevanje enega anketiranca je bilo preprečeno z uporabo piškotkov.

7.2.2 Zbiranje podatkov

5981 predhodno testiranih vprašalnikov je bilo razdeljenih med zaposlene na Univerzi v Ljubljani (23 fakultet in tri akademije), ki predstavljajo enoto opazovanja. Če so anketiranci želeli sodelovati, so se morali strinjati s pogoji deklaracije Regulacije (EU) 2016/679 [175]; sodelovanje je bilo prostovoljno. Vse ankete so bile izpolnjene anonimno.

7.2.3 Statistična analiza

Podatki, pridobljeni z anketiranjem, so bili obdelani s statističnim orodjem Rstudio, v. 1.1.463 [165]. Odnosi med barvnimi preferencami (odtenek, nasičenost), tipologijo prostora, osebnimi in demografskimi podatki anketirancev so bili analizirani z metodo Pearsonovega χ^2 v kombinaciji s Cramerjevo V -korelacijo.

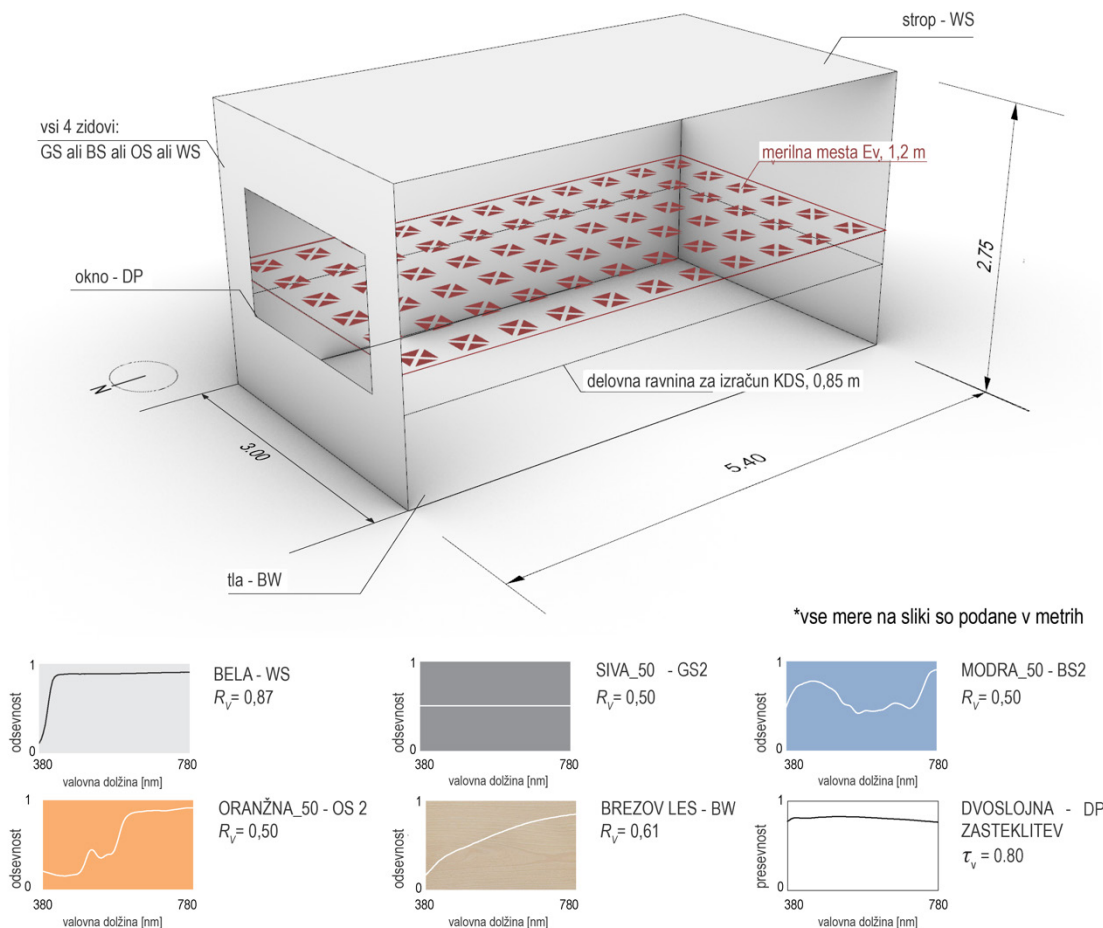
7.2.4 Ovrednotenje vpliva najljubše barve zidu na cirkadiano svetlobno okolje

Rezultati opravljene ankete pokažejo preferenco anketirancev po določenih barvnih odtenkih za bivalno in pisarniško okolje. Tako je bila na podlagi preferenc anketirancev izvedena spektralna simulacijska študija, ki je pokazala, kolikšen je vpliv barve in posledično uporabniških preferenc na cirkadiano svetlobno okolje v generični pisarni skozi ves dan s stališča hipotetičnega uporabnika prostora.

7.2.5 Zasnova simulacijske študije izpostavljenosti cirkadiani svetlobi

Spektralne simulacije notranjega svetlobnega okolja so bile izvedene na štirih modelih celičnih pisarn (slika 86), postavljenih na geografski lokaciji Ljubljane. Pisarne so bile zasnovane tako, da vsaka izmed njih ustreza minimalnim zahtevam standarda SIST EN 17037 [2] za zagotavljanje osvetljenosti z dnevno svetlobo. Torej, najmanj 95 % delovne ravnine mora ustrezati minimalni vrednosti faktorja dnevne svetlobe (D) 0,6 % in vsaj 50 % delovne ravnine mora ustrezati kriteriju $D = 1,8$ %. Modeli pisarne so tako v velikosti 3,00 x 5,40 x 2,75 m (širina x dolžina x višina), z enim severno orientiranim oknom, ki meri 2,04 x 1,20 m (slika 86) pri višini parapeta 0,85 m. WWR tako znaša 35 % in WFR (angl. *Window to Floor Ratio* – razmerje površine okna proti površini tal) 15 %. V vseh štirih modelih so bili uporabljeni materiali: dvoslojna zasteklitev (DP) z vidno presevnostjo (τ_v) 0,80, tla iz brezovega lesa ($R_v = 0,61$) in bel strop ($R_v = 0,87$). Barva vseh štirih vertikalnih zidov je bila menjana sočasno. Vsak izmed

modelov je imel vse vertikalne zidove pobarvane v eno izmed izbranih barv zidov: BS2 ($R_v = 0,50$), OS2 ($R_v = 0,50$), GS2 ($R_v = 0,50$) in WS ($R_v = 0,87$).



Slika 86: Simulacijski model celične pisarne z uporabljenimi materiali. Rdeča črta in trikotniki predstavljajo ravnino merjenja in orientacijo pogleda meritev osvetljenosti v ravnini očišča (E_v). Siva črta označuje delovno ravnino, uporabljeno pri merjenju D . Spektralne lastnosti materialov so prikazane v spodnjem delu slike.

Figure 86: Simulation model of the cellular office with used surface materials. The red line and triangles represent the measurement plane and the orientation of measurement points of corneal illuminance (E_v), while grey line marked plane represents the position of the work plane at which D values were determined (i.e. working plane). Colour and spectral properties (reflectivity and transmissivity) of the used materials are shown in the bottom part of the figure.

Geometrija simulacijskega modela je bila določena v programskih okoljih Rhinoceros v6 in Grasshopper. Preliminarni izračuni simulacij D so bili narejeni s pomočjo vtičnika Ladybug, ki za izračun svetlostnega okolja uporablja Radiance. Tako kot že v predhodnih študijah je bil za multispektralne simulacije uporabljen program ALFA. Vse študije izpostavljenosti so bile opravljene pri nastavitvah -ab 8 in 100 računskih prehodih za 21. december in 21. marec 2019 pri oblačnih razmerah neba, generiranih z libRadtran, za obdobje od 7.00 do 17.00 v urnem koraku za geografsko lokacijo Ljubljane (46,05°S, 14,50°V, 300 m nadmorske višine), s

predpostavljenim albedom 0,2 okoliških tal. Kot je prikazano na sliki 86, je bila simulacija opravljena s stališča hipotetičnega sedečega uporabnika prostora z višino očišča 1,2 m nad tlemi, vertikalna osvetljenost (E_v) in *SPD* za vsako izmed štirih orientacij pogledov (sever, jug, zahod in vzhod) v vsaki izmed 6 x 11 točk na navidezni mreži prostora. Simulirani spektralni podatki so bili nato uporabljeni za izračun *CS* po metodologiji Rea in sod. [80] (za podrobno razlago metodologije glej poglavje 2.4.5). Izpostavljenost cirkadiano efektivni svetlobi je merjena v urah, ko izračunana osvetljenost preseže ali doseže $CS = 0,3$ oz. $CL_A = 275$.

7.3 Rezultati

Rezultati bodo predstavljeni v dveh delih. V prvem bodo predstavljeni izsledki iz opravljene ankete o preferencah notranjega svetlobnega okolja. Rezultati dnevnih študij izpostavljenosti štirih identičnih pisarniških prostorov so predstavljeni v drugem delu rezultatov.

7.3.1 Rezultati ankete o preferencah uporabnikov do optičnih lastnosti notranjega okolja

Skupaj je bilo med zaposlene na Univerzi v Ljubljani poslanih 5981 vprašalnikov, na katere je odgovorilo 316 vprašanih, stopnja odzivnosti je torej znašala 5,4 %. Med izpolnjenimi vprašalniki 6 % (19 anketirancev) ni uspelo rešiti ankete, ker se niso strinjali z določili EU GDPR, 2 % (6 anketirancev) pa smo izključili iz obravnave v analizi, ker so navedli, da imajo eno izmed okvar barvnega vida. Skupaj smo torej pridobili 92 % veljavnih anket ($n = 291$ anketirancev). Osebni in demografski podatki anketirancev so prikazani v preglednici 14.

Preglednica 14: Demografski podatki anketirancev.

Table 14: Demographic details of respondents.

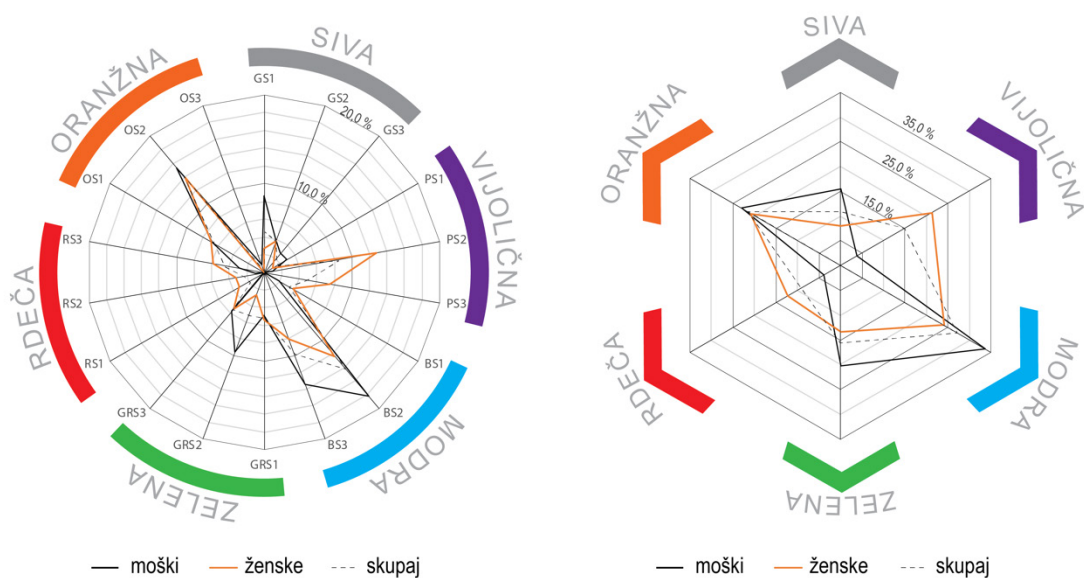
Demografski podatki	[%]
Spol:	
• ženski	64,3
• moški	35,7
Razporeditev starosti (leta), povprečna starost = 40,8 leta.	
• 29	21,0
• 30–39	23,4
• 40–49	31,3
• 50–59	21,0
• 60–69	2,6
• ≤ 70	0,7
Poklicno področje:	
• drugo (npr. računalniškopodporna služba, podporno osebje itd.)	7,3
• družboslovne vede	38,5
• naravoslovne vede	33,7
• inženirstvo in tehnika	18,4
• umetnost	2,1

Anketo je izpolnilo 64,3 % (187) anketirancev ženskega spola in 35,7 % (104) anketirancev moškega spola. Anketirance smo klasificirali v šest starostnih skupin. Povprečna starost udeležencev je znašala 40,8 leta, z največjim deležem v starostni skupini od 40 do 49 let (31,1 %) ter najmanjšim deležem v starostni skupini nad 70 let (0,7 %). Med vprašanimi jih je bilo 38,5 % s področja družboslovnih ved, 33,7 % s področja naravoslovnih ved, 18,4 % s področja tehnike, 2,1 % s področja umetnosti, 7,3 % anketirancev pa je označilo drugo poklicno področje.

7.3.2 Barvna preferenca in spol anketirancev

Barvna preferenca anketirancev je bila določena iz nabora 18 barvnih vzorcev in je bila proučena za vsak spol posebej in skupaj (slika 87). Na vprašanje »Prosimo, izberite svojo najljubšo barvo«, je večina anketirancev izbrala modro barvno skupino (33,7 % moških, 24,1 % žensk). Modri sledi oranžna barvna skupina (23,1 % moških in 20,9 % žensk). Na splošno je bilo mogoče opaziti, da je večji delež moških (15,4 %) izbral nevtralno barvo (siva barvna skupina) v primerjavi z ženskami (8,0 %), ki so na splošno izkazale višjo kumulativno preferenco po toplih barvah, kot so oranžna in rdeča (40,7 % žensk je izbralo toplo barvo). Odgovori žensk so pokazali večjo razpršenost preferenc med različnimi barvnimi skupinami, kar se pokaže v nižji standardni deviaciji ($SD_{\text{ženske}} = 6,3$, $SD_{\text{moški}} = 11,6$) in manj poudarjenimi

razlikami med preferencami različnih barv. V nasprotju z ženskami odgovori moških anketirancev pokažejo na močnejšo polarizacijo odgovorov. Z močnimi preferencami po modri, oranžni in zeleni barvni skupini in večjimi razlikami med najbolj in najmanj priljubljenim barvnim vzorcem ($\Delta_{max, ženske} = 16,0$ odstotne točke, $\Delta_{max, moški} = 29,8$ odstotne točke).



Slika 87: Delež odgovorov [%] anketirancev o individualni preferirani barvi glede na posamezno barvo (levo) in individualni preferirano barvni skupini (desno) glede na spol in skupaj.

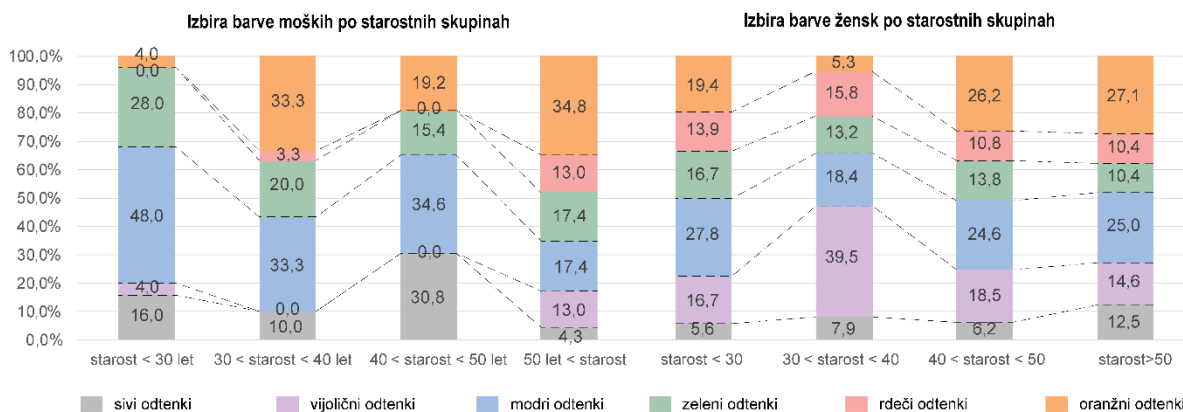
Figure 87: Percentage of responses [%] according to individual colour swatch preferences (left) and according to colour hue by gender (right).

Povezava med spolom in preferenco barvnega vzorca je bila izračunana s Pearsonovim χ^2 -testom. Analiza je pokazala na močno asociacijo med spolom ($\chi^2 = 26,5$, $p = 7,1 \cdot 10^{-5}$, Cramer $V = 0,302$ pri $\alpha = 0,05$) in barvno skupino in prav tako med spolom in barvnim vzorcem ($\chi^2 = 44,08$, $p = 3,3 \cdot 10^{-4}$, Cramer $V = 0,389$ pri $\alpha = 0,05$).

7.3.3 Barvna preferenca in starost anketirancev

Iz levega grafa preferenc moških po barvnih skupinah na sliki 87 lahko opazimo trend rasti preference oranžne barvne skupine. V skupini pod 30 let oranžna barva obsega komaj 4,0 % odgovorov, v skupini nad 50 let pa kar 34,6 % odgovorov. Rast preferenc oranžne barve razloži tudi trend padanja v modri in zeleni barvni skupini, ki sta v starostni skupini pod 30 let najbolj priljubljeni barvi (48,0 % modra barva in 28,0 % zelena barva). Tako je razlika v preferenci oranžne skupine med najmlajšo skupino (<30 let) in najstarejšo skupino (>50 let) 30,8 odstotne točke, razlika v preferenci modre barvne skupine in zelene barvne skupine pa 30,6 in 10,6 odstotne točke (slika 88). Na splošno sta bili rdeča in vijoličasta barvna skupina najmanj preferirani barvni skupini med moškimi anketiranci s 3,3 % in 13,0 % deležem odgovorov.

Preference žensk, prikazane v desnem grafu na sliki 88, v nasprotju z moškimi ne izražajo značilnih trendov padanja ali naraščanja, povezanih s staranjem. Izrazita je le značilno večja preferenca vijoličastih odtenkov žensk v starostni skupini od 30 do 40 let. Kar 39,5 % žensk v omenjeni starostni skupni izbere vijoličasto kot najljubšo barvo, kar je 21,5 odstotne točke višje od druge najbolj priljubljene barvne skupine (modra) v tej starostni skupini.



Slika 88: Delež odgovorov [%] preference barvnih skupin po starostnih skupinah in spolu; levo – moški, desno – ženske.

Figure 88: Percentage of responses [%] according to the colour hue preference by age groups of male respondents.

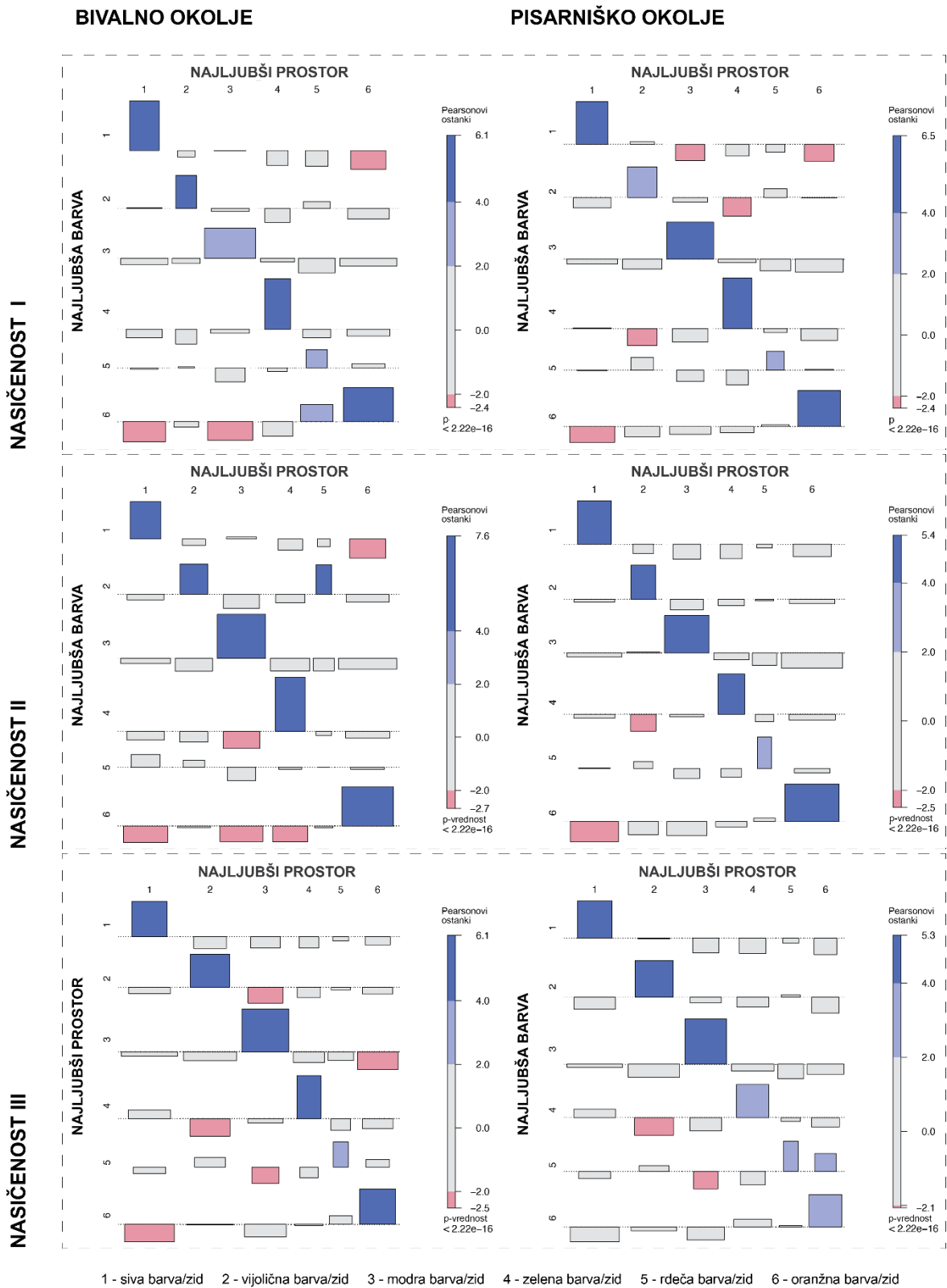
7.3.4 Barvna preferenca in preferenca barve prostora

Za iskanje povezave med anketirančevo splošno najljubšo barvo in barvo zidu v bivalnem in pisarniškem prostoru za vsakega izmed ravni nasičenosti smo izvedli Pearsonov test hi-kvadrat (Pearsonov χ^2). Kot je prikazano v preglednici 15, so bile za vsako izmed preiskovanih kombinacij povezave statistično signifikantne ($p < 0,05$ in $V > 0,3$). Natančnejša analiza Pearsonovih ostankov za omenjene primere, ki je predstavljena na sliki 89, potrjuje, da obstaja močna povezava med anketirančevo najljubšo barvo in izbrano barvo zidu v prostoru, za vsako izmed proučevanih ponovitev tipologij in nasičenosti barve zidu (poudarjena diagonala parov na sliki 89).

Preglednica 15: Rezultati Pearsonovega testa povezave med najljubšo barvno skupino in najljubšim notranjim okoljem pri različnih ravneh nasičenosti.

Table 15: Results of the Pearson's test between colour group and favourite environment at different saturation levels.

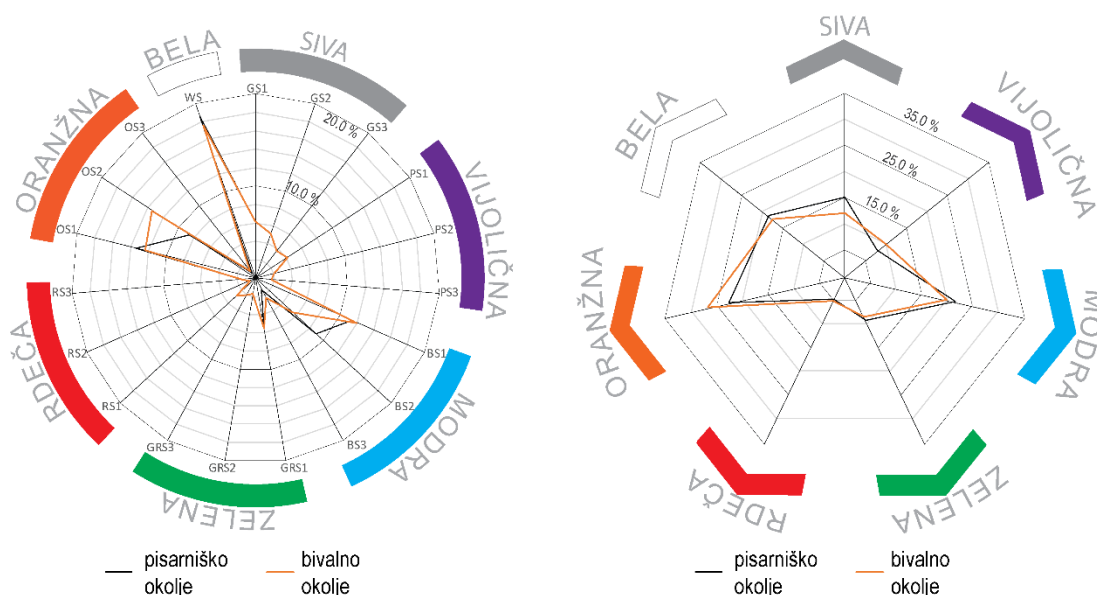
	Prostostne stopnje	χ^2	<i>p</i>	Cramerjev <i>V</i>
Bivalno okolje nasičenost I	25	174,44	$2,31 \times 10^{-24}$	0,346
Bivalno okolje nasičenost II	25	252,38	$1,84 \times 10^{-39}$	0,416
Bivalno okolje nasičenost III	25	221,17	$2,44 \times 10^{-33}$	0,39
Pisarniško okolje nasičenost I	25	192,64	$7,93 \times 10^{-28}$	0,36
Pisarniško okolje nasičenost II	25	173,92	$2,88 \times 10^{-24}$	0,346
Pisarniško okolje nasičenost III	25	159,64	$1,38 \times 10^{-21}$	0,331



Slika 89: Graf Pearsonovih ostankov povezave najljubše barve z najljubšo barvo zidu.
 Figure 89: Plot of Pearson’s residuals of association between preferred colour group and wall colour.

7.3.5 Barvna preferenca prostora in tipologija prostora

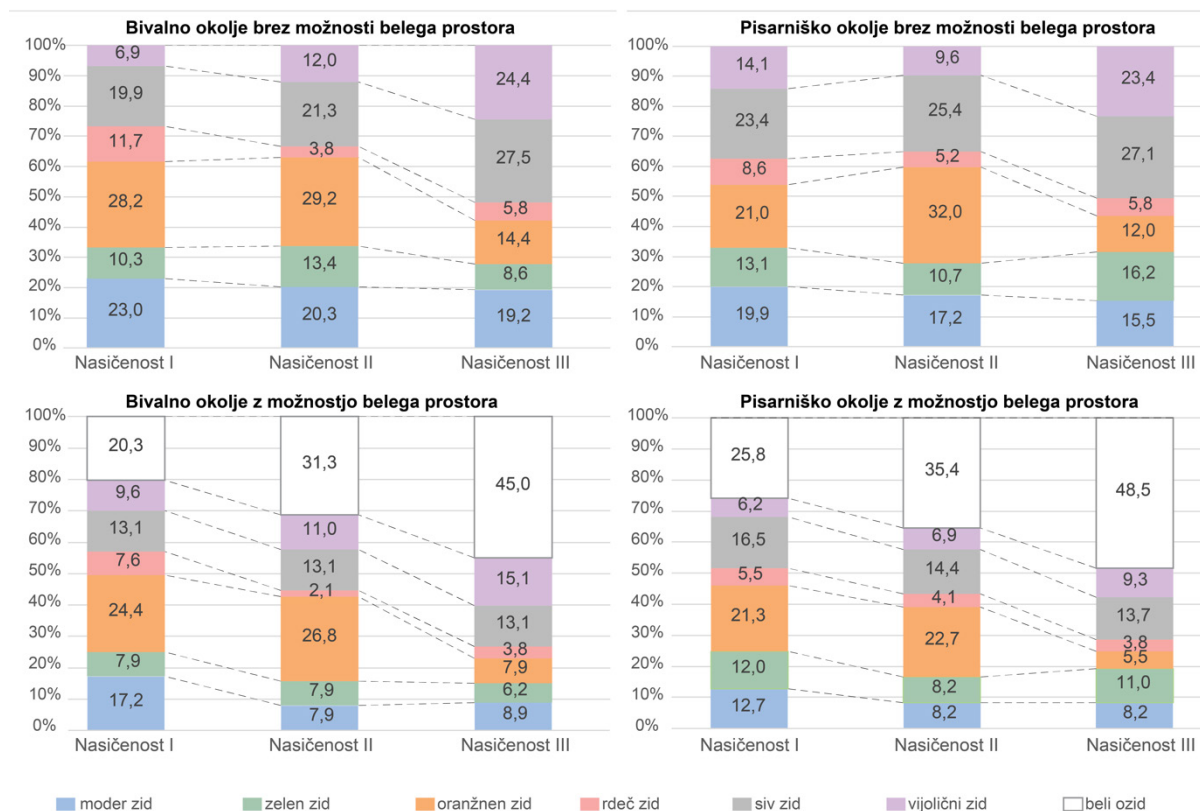
Barvna preferenca zidu anketirancev je bila določena na podlagi 18 primerov notranjih bivalnih okolij. Kot je prikazano na sliki 90, je v odgovoru na vprašanje »Prosimo, izberite najljubše notranje bivalno okolje« največ anketirancev izbralo oranžno barvno skupino (26,5 %), sledijo ji modra barvna skupina (19,9 %), bela barva (17,5 %), siva barvna skupina (12,0 %), vijoličasta (10,0 %), zelena (8,6 %) in najmanj priljubljena rdeča barvna skupina (5,2 %). Podobno kakor pri dnevni sobi je večina anketirancev za pisarniško okolje izbrala največkrat oranžno barvno skupino (22,7 %), nato sledijo modra (21,6 %), bela (17,5 %), siva (15,1 %), zelena (9,3 %), vijoličasta (7,9 %) in rdeča barvna skupina z najmanjšim deležem glasov (5,1 %).



Slika 90: Preferenca barvne skupine (desno) in preferenca barve zidu v odvisnosti od tipologije (levo).
Figure 90: Colour hue preference (right) and colour swatch preferences by room typology (left).

Odgovori anketirancev po preferenci posameznih barv zidu v bivalnem okolju pokažejo, da je bila izrazito najpogosteje izbrana bela barva (WS), ki jo je kot najljubšo izbralo 17,5 % anketirancev. Sledijo ji OS2 (13,4 %), OS1 (12,4 %), BS1 (12,0 %), GS1 (6,2 %), GRS1 (5,5 %), BS2 (5,5 %), preostali delež odgovorov 27,5 % je razdeljen med preostale barve zidov, vse druge barve so bile zastopane manj kakor 5 %. V pisarniškem okolju so anketiranci podobno kot pri bivalnem okolju največkrat izbrali WS (18,6 %), sledijo ji OS1 (13,4 %), BS1 (11,3 %), BS2 (8,9 %), OS2 (8,6 %), GS1 (6,2 %), GRS1 (5,5 %). Vsako izmed preostalih barv zidov je izbralo manj kot 5 % udeležencev. Predstavljeni rezultati so pokazali, da tipologija prostora nima bistvenega vpliva na izbor barve barvne skupine.

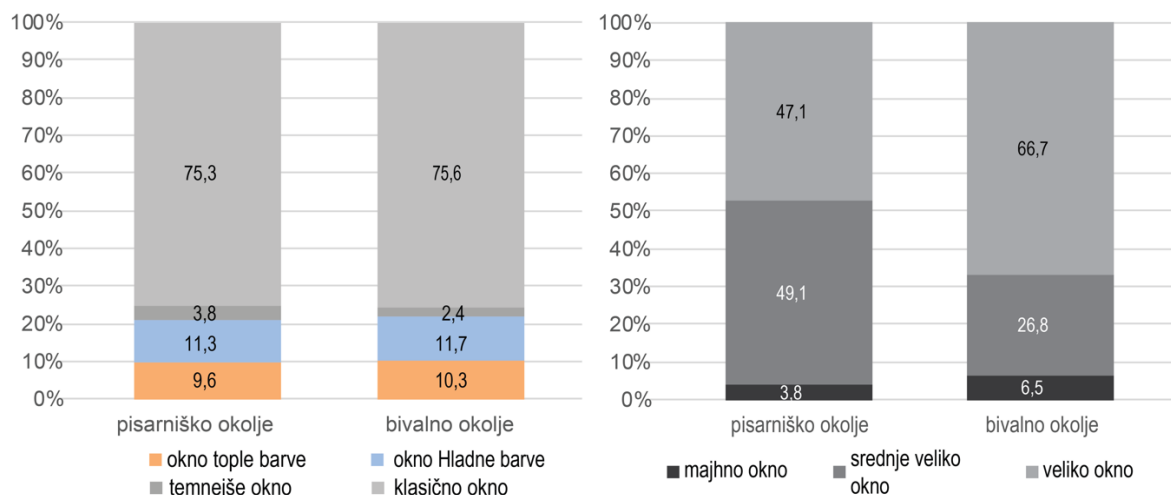
Ko opazujemo rezultate vseh kombinacij vprašanj (slika 85), predstavljene na sliki 90, lahko opazimo, da med odgovori za bivalno in pisarniško okolje ni statistično značilne razlike. Nasprotno pa je mogoče opaziti veliko razliko med izborom preferiranega prostora anketirancev, kadar je na voljo izbira belo obarvanega zidu, v primerjavi s takrat, ko anketiranci tega niso mogli izbrati. Z vpeljavo možnosti izbire belega zidu se preferenca po drugih barvah močno zmanjša z največjim padcem preference po nasičenih sivih ($\Delta_{bivalno} = -14,4$ odstotne točke, $\Delta_{pisarna} = -13,4$ odstotne točke) barvah in nasičenih vijoličastih barvah ($\Delta_{bivalno} = -9,3$ odstotne točke, $\Delta_{pisarna} = -14,4$ odstotne točke). Ko so anketiranci izbirali izmed nenasičenih barvnih odtenkov zidov z dodatno možnostjo bele barve, je bel zid najpogosteje izbran odgovor pri pisarniškem okolju (25,8 %) in drugi najbolj pogosto izbran odgovor v primeru bivalnega okolja (20,3 %). V bivalnem okolju je najpogosteje izmed nenasičenih barv izbran zid oranžne barve (24,4 %), ki je drugi najpogosteje izbrani zid v pisarniškem okolju (21,3 %). Bel zid je najpogosteje izbran, ko je na voljo izbor barv nasičenosti II in nasičenosti III bivalnega okolja in pisarniškega prostora. Če opazujemo priljubljenost bele barve v odvisnosti od nasičenosti izbora barv zidov, lahko opazimo, da se priljubljenost bele barve povečuje s povečevanjem nasičenosti zidov. Pri bivalnem okolju se preferenca belega zidu, ko so na voljo srednje nasičeni zidovi, poveča za 11 odstotnih točk, pri nasičenih barvah zidov pa doseže 48,5-% delež odgovorov s povečanjem za 13,1 odstotne točke. Pri pisarniškem okolju se preferenca belega zidu, ko so na voljo srednje nasičeni zidovi, poveča za 9,6 odstotne točke (35,4 %), pri nasičenih barvah zidov bivalnega okolja pa doseže 45,0-% delež odgovorov s povečanjem za 13,1 odstotne točke.



Slika 91: Barvna preferenca za pisarniško in bivalno okolje ter različne stopnje nasičenosti.
Figure 91: Colour preference for different environments and saturation choices.

7.3.6 Preferenca lastnosti zasteklitev

Preferenca lastnosti oken anketirancev so pokazale, da neodvisno od tipologije prostora dajejo prednost nevtralni »klasični zasteklitvi«, več kakor 75,0 % anketirancev je izbralo klasično zasteklitev za obe tipologiji prostora (slika 92). Najmanj priljubljena je temna zasteklitev, modri in bronasti daje prednost okoli 10 %. Dve tretjini anketirancev (66,7 %) sta izbrali veliko zasteklitev v bivalnem okolju, slaba polovica pa je izbrala veliko zasteklitev v pisarniškem okolju. Najmanj ljudi preferira majhno zasteklitev tako v pisarniškem (3,8 %) kakor tudi v bivalnem okolju (6,5 %). Na splošno lahko tako trdimo, da anketirani preferirajo nevtralne in bolj presevalne zasteklitve z večjimi odprtini v bivalnem okolju in nevtralne svetle zasteklitve s srednje velikimi odprtini v pisarniškem okolju.



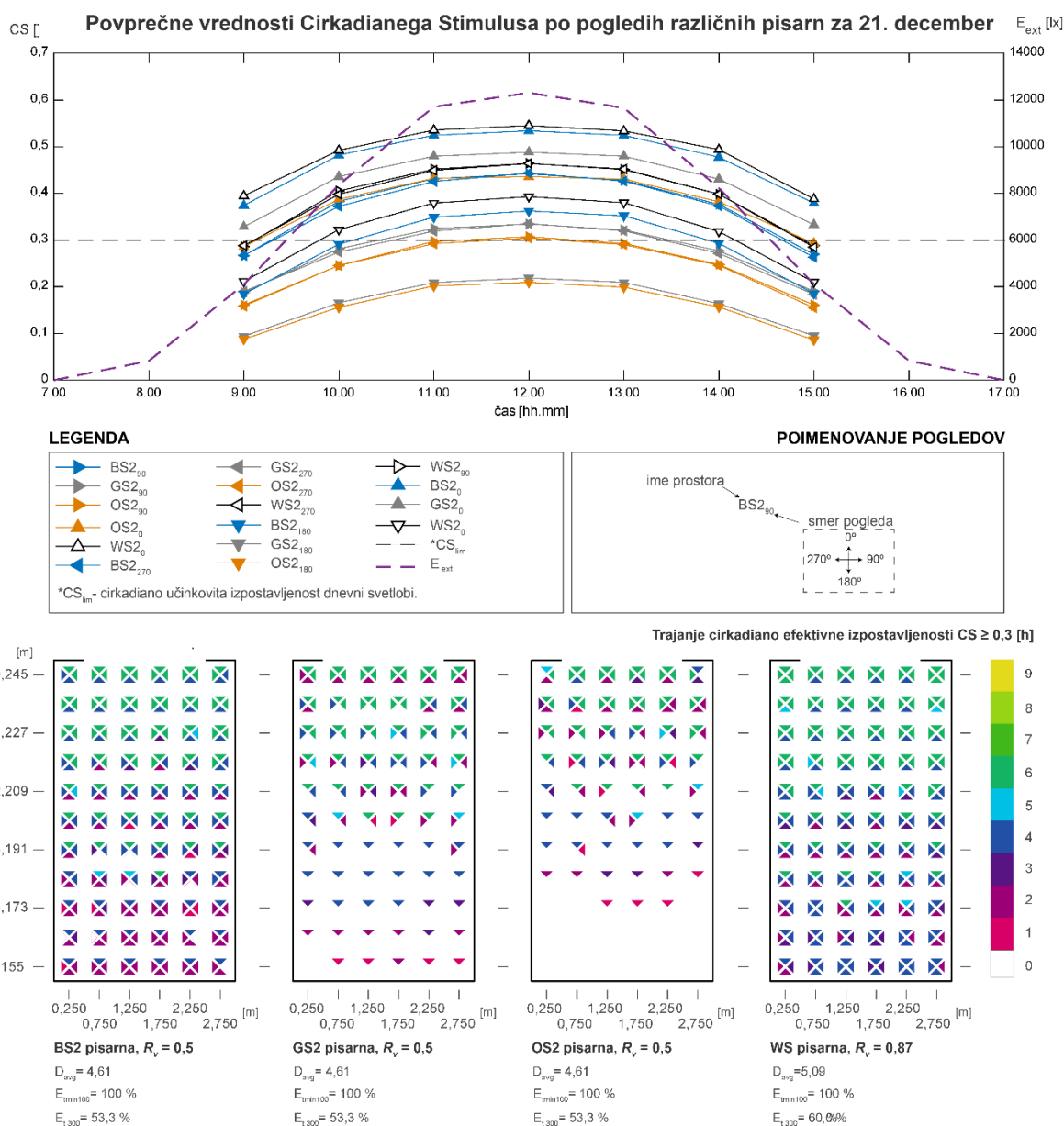
Slika 92: Preferenca obarvanosti stekla (levo) in velikosti okna (desno) v pisarniškem in bivalnem okolju.
 Figure 92: Glazing tint preference (left) and window size preference (right) for office and living environment.

7.4 Ocena vpliva najljubših barv anketirancev na cirkadiani vidik notranjega svetlobnega okolja

Simulacije cirkadianega vidika pisarn so bile izvedene za svetel del dneva, najprej za 21. december 2019, kot je to prikazano na sliki 93. Rezultati so predstavljeni kot povprečja vsakega izmed obravnavanih pogledov (pogled 0°, 90°, 180° in 270°, glej sliko 93) za štiri različna pisarniška okolja (BS2, GS2, OS2, WS), tako npr. posledično označujemo povprečno vrednost pogleda 0° v prostoru BS2 z BS2₀ (glej sliko 93).

Zunanje simulirane globalne osvetljenosti ($E_{e, h}$) dnevne svetlobe so znašale med 826,1 in 12313,0 lx. Zaradi omejitev simulacijskega orodja v tem primeru je bilo notranje svetlobno okolje za december računano med 8.00 in 16.00. Vrednosti sevanja ob 8.00 in 16.00 so bile prenizke, da bi program lahko zaznal sevanje v prostoru (zelo majhne osvetljenosti ob sončnem vzhodu in zahodu). Kot pričakovano, je pogled 0° konfiguracije pisarne z belo pobarvanimi zidovi (WS₀) dosegel največja izračunana povprečja CS skozi ves dan z absolutnim maksimumom CS = 0,545. WS₀ presega kriterij učinkovite cirkadiane izpostavljenosti ($CS_{lim} = 0,3$) v celotnem dnevu. Kar 48 izmed 66 (72,7 %) merilnih mest prostora WS₀ dosega ali presega CS_{lim} v vseh šestih urah. V pisarni WS₀ povprečne vrednosti CS vsakega izmed pogledov dosegajo CS_{lim} kriterij za vsako izmed usmerjenosti pogleda, razen ob 9.00 in 15.00 povprečja simulacij pogledov 180°, 90° in 270° ne dosegajo CS_{lim} (slika 93). To je očitno posledica zmanjšanja cirkadiane izpostavljenosti najglobljih štirih vrst analizirane mreže točk, kjer kumulativna izpostavljenost cirkadiani svetlobi znaša štiri ure za pogled WS₁₈₀ in dve uri za pogleda WS₂₇₀ in WS₉₀. Podobna povprečja vrednosti CS v beli

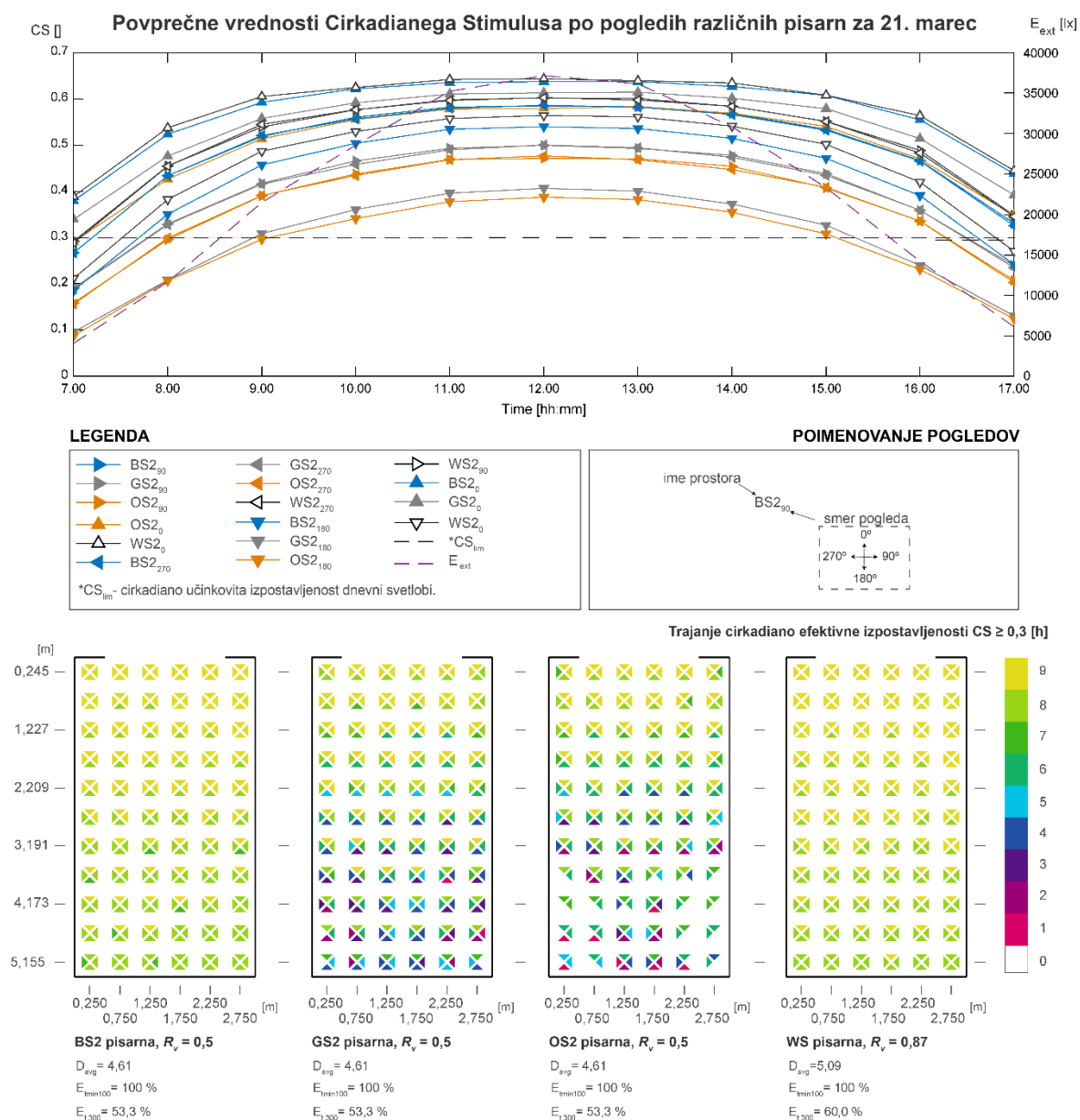
pisarni kljub manjši odsevnosti zaznamo v severnem pogledu pisarne z zidovi, pobarvanimi v BS2 (BS2₀). Maksimum cirkadiane osvetljenosti pisarne BS2, ki je znašal $CS = 0,56$, je bil zaznan ob 12.00, vendar je v nasprotju s pisarno WS CS_{lim} dosežen oz. presežen samo v treh urah (od 11.00 do 13.00). To je jasno vidno tudi v prostorski distribuciji izpostavljenosti. Kot je prikazano na sliki 93, lahko opazimo, da se kumulativna cirkadiana izpostavljenost od 8. do 11. vrste merilnih točk analizne ravnine zmanjša za eno uro v primerjavi s pisarno WS. Čeprav imata pisarni OS2 in GS2 enake vrednosti vizualne odsevnosti $R_v = 0,5$ kakor pisarne BS2, povprečne vrednosti CS obeh pisarn ne dosegajo CS_{lim} v primerih, ko so pogledi orientirani proti jugu (OS2₁₈₀ in GS2₁₈₀). Najvišja povprečna vrednost pisarne OS2₁₈₀ znaša $CS = 0,21$ ob 12.00 in $CS = 0,22$ za pisarno GS2₁₈₀ ob 12.00. Posledično znaša kumulativna izpostavljenost cirkadiano učinkoviti svetlobi prej omenjenih OS2₁₈₀ in GS2₁₈₀ v prvih dveh vrstah najbližje oknu dve uri (slika 93), globlje v prostoru pa kriteriju kumulativne cirkadiane izpostavljenosti dnevni svetlobi za OS2₁₈₀ in GS2₁₈₀ ni zadoščeno. Ko je hipotetični opazovalec orientiran proti pogledu 90° ali 180°, cirkadiano učinkovita izpostavljenost dnevni svetlobi ni dosežena v zadnjih petih vrstah OS2 pisarne in v zadnjih štirih vrstah GS2 pisarne (slika 93).



Slika 93: Urne povprečne vrednosti CS, ločene za poglede in različne prostore vseh merilnih mest za 21. december (zgoraj). Prostorska predstavitev celodnevne cirkadiano učinkovite izpostavljenosti dnevni svetlobi za 21. december (spodaj).

Figure 93: Hourly CS value averages for all grid points for each view direction of different office configurations (top) for the 21st of December. Spatial representation of the diurnal duration of achieved circadian effective exposure for the 21st of December (bottom).

Boljše zunanje razmere simulacij 21. marca (slika 94) se kažejo v več kot trikrat večjih vrednostih globalne zunanje osvetljenosti $E_{e,h}$ (4083 lx ob 7.00 in 37.161 lx ob 12.00) kakor pri simulacijah 21. decembra. Posledično so izračunana povprečja CS vrednosti v prostoru občutno večja in več časa dosega oz. presegajo CS_{lim} .



Slika 94: Urne povprečne vrednosti CS, ločene za poglede in različne prostore vseh merilnih mest za 21. marec (zgoraj). Prostorska predstavitev celodnevne cirkadiano učinkovite izpostavljenosti dnevni svetlobi za 21. marec (spodaj).

Figure 94: Hourly CS value averages for all grid points for each view direction of different office configurations (top) for the 21st of March. Spatial representation of the diurnal duration of achieved circadian effective exposure for the 21st of March (bottom).

Tako kot v času zimskega solsticija tudi ob ekvinokciju pisarna WS (slika 94) ponuja najboljše cirkadiane razmere. 92,4 % (WS₀), 57,6 % (WS₉₀), 59,1 % (WS₂₇₀) in 25,8 % (WS₁₈₀) merilnih mest na testni mreži dosega oz. presega cirkadiano učinkovito osvetljenost devet ali več ur s splošno največjo povprečno vrednostjo CS = 0,643 med vsemi simuliranimi konfiguracijami pisarn. Podobno kakor za belo pisarno velja tudi za pisarno BS2 z maksimalnim povprečnim CS = 0,637 in 81,8 % (BS2₀), 48,5 % (BS2_{90E}), 48,5 (BS2₂₇₀) in 16,7 % (BS2₁₈₀) merilnih mest na testni

mreži dosega oz. presega kriterij CS_{lim} devet ali več ur. V nasprotju s tem je v pisarni OS2 dosežena mnogo slabša cirkadiana izpostavljenost s 56,1 % (OS2₀), 19,6 % (OS2₉₀), 19,6 (OS2₂₇₀) in 0 % (OS2₁₈₀) merilnih mest, ki dosegajo devet ali več ur cirkadiano učinkovite izpostavljenosti dnevni svetlobi (slika 94).

Veliko razliko v doseženi cirkadiano učinkoviti izpostavljenosti dnevni svetlobi med pisarnama OS2 in BS2 lahko razlagamo v spektralni kompoziciji vsake izmed barv, saj OS2 odseva manjši delež svetlobe v krajšem delu vidnega spektra. To je posebej opazno za obe pisarni GS2 in OS2 (slika 94) globlje v prostoru (od 7. do 11. vrste analize ravnine), kjer odsevnost zidov igra signifikantno vlogo pri spektralni kompoziciji v prostoru. Še posebej je to poudarjeno v primeru pisarne OS2, kjer 31 od skupaj 264 pogledov (12,2 %) ne dosega cirkadiano učinkovite izpostavljenosti dnevni svetlobi. Za primerjavo, v primeru pisarne GS2 le trije (0,01 %) pogledi ne ustrezajo kriteriju CS_{lim} . CS_{lim} je presežen vsaj eno uro v vseh pogledih pisarn BS2 in WS. Podobno velja tudi za simulacije 21. decembra (slika 93), z manjšo razliko med pisarnami. Na splošno rezultati, kot je bilo ugotovljeno že v 6. poglavju, potrjujejo, da na točke in poglede bližje oknu bolj vplivajo optične lastnosti oken. Zato so razlike med vsemi štirimi pisarnami v trajanju cirkadiano učinkovite osvetljenosti za solsticij in ekvinokcij majhne (sliki 93 in 94).

7.5 Diskusija

Opravljena študija [176] je pokazala statistično značilno povezavo med spolom in izborom najljubše barvne skupine ($p < 0,05$) ter posledično tudi statistično značilno povezavo med spolom in najljubšo barvo ($p < 0,05$). To se ujema z izsledki Ling in Hurlberta [177], Sinha in sod. [178], Silver in sod. [179] in Bonnardel in sod. [180]. Vsi izmed omenjenih so identificirali signifikantne razlike barvnih preferenc med spoloma. Iz opravljene študije je vidna večja naklonjenost žensk rdečim in modrim barvam v starostni skupini pod 50 let kakor moških v isti starostni skupini, kar se ujema z izsledki Dorcus [181] z večjimi preferencami žensk do vijoličaste barve. Izrazita je predvsem velika razlika v naklonjenosti vijoličasti barvi ženskih anketirank med 30. in 40. letom starosti (39,5 % anketirank) v primerjavi z moškimi enake starostne skupine, v kateri se nobeden izmed anketirancev ni odločil za vijoličasto. Podobno, kot so ugotovili Ling in Hurlbert [177] in Bonnardel in sod. [180], se razlike v naklonjenosti določenim barvam zmanjšajo pri starejši starostni skupinah (> 50 let). Anketirani moški so bili mnogo bolj polarizirani in odločno naklonjeni določenim barvam z znatno večjimi preferencami modre, zelene in nevtralne barve. Prav tako se moška naklonjenost anketirancev po barvnih skupinah močno spreminja med starostnimi skupinami, zgodi se tranzicija iz

predominantno modre preference pri mlajših moških v dominantno preferenco starejših moških po oranžnih barvah. Enak trend spremembe barvnih preferenc moških sta opazila tudi Hurlbert in Ling [70], kjer je bila modra barva najbolj priljubljena barva mladih odraslih, ki je nato pojenjala s starostjo. Na splošno obstaja naklonjenost modrim in oranžnim barvnim skupinam ne samo med spoloma, ampak tudi med izbiro barve zidu celotnega anketiranega vzorca, kar se odraža tudi v močni povezanosti med najljubšo barvno skupino in izborom najljubše barve zidu, kot je to prikazano na sliki 89. Zato lahko trdimo, da najljubša barva vpliva na barvo zidov najljubšega notranjega okolja, kar ima pomembno vlogo pri ustvarjanju primerne svetlobnega okolja z vidika vizualnega in nevizualnega oz. cirkadianega vpliva dnevne svetlobe [19, 23, 141, 182].

Kot je pokazala simulacijska študija štirih pisarn različnih optičnih konfiguracij, barva zidu odločilno vpliva na cirkadiani potencial dnevne svetlobe v prostoru. Če primerjamo modro (BS2), sivo (GS2) in oranžno (OS2) pobarvane zidove z enakimi vidnimi odsevnostmi $R_v(0,50)$, modro pobarvana pisarna ponuja značilno večji delež cirkadiano efektivnega območja kot sivo pobarvana pisarna. Oranžno obarvana pisarna še dodatno zmanjša delež cirkadiano efektivnega področja, ki bi sovpadalo s priporočeno minimalno cirkadiano izpostavljenostjo (CS_{lim}). Kot je prikazano na slikah 93 in 94 in je bilo vrednoteno že v 6. poglavju, je vpliv barve zidu (oz. odsevnosti) močnejši globlje v prostoru in manj izrazit v predelu blizu okna.

Ker je individualna barvna preferenca odvisna od številnih povezanih dejavnikov, kot so spol, starost, kultura, vera, čustva, osebno izkustvo itd., so barve, ki jih uporabniki ali oblikovalci prostora izbirajo za notranje svetlobno okolje, lahko v nasprotju s tem, kar bi bilo optimalno s stališča najbolj optimalnega oz. primerne svetlobnega okolja, kar so poudarili že Bellia in sod. [182] kot značilen vplivni faktor vizualnega in nevizualnega udobja uporabnika prostora. Na neprimerne svetlobne razmere vplivajo tudi trenutni oblikovalski trendi, ki se spogledujejo z zelo nasičenimi barvami notranjega okolja [183]. To smo delno potrdili tudi z rezultati predstavljene študije, kjer se je pokazalo, da je najljubša barva anketirancev (neodvisno od tipologije sobe) oranžna. Vendar se je v študiji pokazalo, da če imajo anketiranci možnost izbirati tudi belo, bo velik delež izbral to (spektralno nevtralno). Simulacije pisarn pa so pokazale, da je belo pobarvana pisarna (zidovi WS) ponujala največji delež cirkadiano efektivno, z dnevno svetlobo osvetljenega prostora. Še več, kot lahko razberemo s slike 90, upad naklonjenosti beli barvi od niza vprašanj, kjer so bile na voljo nasičene barve in bela, do niza vprašanj, v katerem so bile na voljo nenasičene barve in bela, dokazuje, da anketiranci dajejo prednost nenasičenim barvam prostora pred nasičenimi. Dodatno so anketiranci pokazali močno naklonjenost spektralno nevtralnim barvam (npr. bela in siva), ki imajo

enakovreden učinek na vizualno in cirkadiano svetlobno okolje in so zato ugodne za svetlobno okolje [24].

Prepoznana povezava med barvno preferenco in spolom ne ponuja splošnih implikacij za cirkadiane vidike notranjega svetlobnega okolja. Tipologija prostora (pisarniški ali bivalni) prav tako nima značilnega vpliva na barvno preferenco notranjega okolja anketiranih. V nasprotju s tipologijo prostora ima starost značilen vpliv na barvno preferenco anketiranih, še posebej rastoča preferenca po oranžni barvi, ki je bila večja pri starejših moških in negativno vpliva na cirkadiano učinkovito svetlobno okolje, kar je lahko potencialno še posebej problematično zaradi ranljivosti starejše populacije. Očesna leča s staranjem rumeni [72], kar še dodatno zmanjša prejetje modrega spektra vidne svetlobe (glej poglavje 2.4.4).

Čeprav tipologija prostora ne vpliva na barvno preferenco, je zelo pomembna pri določanju ustreznega svetlobnega okolja, vizualnega ali cirkadianega. Določa namreč, kako se bo prostor uporabljal, kje bodo sedeli potencialni uporabniki, kam bodo usmerjeni njihovi pogledi itd. Kakor je bilo pokazano v simulacijah štirih pisarn, je količina cirkadiano učinkovite izpostavljenosti močno pogojena s pogledom in položajem opazovalca v odnosu do okna. Pogledi, ki so usmerjeni proti oknu in ko mu je opazovalec bližje, imajo veliko boljše svetlobne pogoje kakor drugi pogledi, kot je bilo predstavljeno tudi v 6. poglavju.

»Ta stran je namenoma prazna«

8 ZAKLJUČEK

Namen te doktorske disertacije je bil identificirati vpliv optičnih in geometrijskih lastnosti (s poudarkom na optičnih lastnostih površin notranjega grajenega okolja) v notranjem grajenem okolju na cirkadiano svetlobno okolje notranjega bivalnega okolja. Vpliv optičnih in geometrijskih lastnosti v grajenem okolju smo proučili s pomočjo petih študij, v katerih smo določili in ocenili simulacijska orodja multispektralnega upodabljanja razmer dnevne svetlobe v grajenem okolju (poglavje 3), zajeli oceno vplivnosti barv, komercialnih zasteklitev in odsevnosti na cirkadiani potencial s pomočjo eksperimentalnih meritev na pomanjšanem modelu v kombinaciji s simulacijami v realnem merilu (poglavje 4). Izhajajoč iz dognanj 4. poglavja in geometrije eksperimentalnega modela smo s pomočjo multispektralnih računalniških simulacij v 5. poglavju ovrednotili vpliv odsevnosti zidov pod spremenljivimi pogoji širokega nabora simuliranih vzorcev dnevne svetlobe za geografsko lokacijo Ljubljane, ki so odgovorili na vprašanje, ali je ocenjevanje cirkadianega svetlobnega okolja le z vidika osvetljenosti zadosten pokazatelj primanjkljaja cirkadiane svetlobe v okolju. Vplivnost presevnosti zasteklitve in odsevnosti zidov, predstavljena v 4. poglavju, je zelo specifična, saj je bila izmerjena za izbrano geometrijo in en položaj v prostoru. Zato smo v 6. poglavju tematiko proučevanja vplivnosti optičnih lastnosti oken in zidov razširili na večji izbor geometrij ter tako sočasno proučevali tudi vpliv glavnih geometrijskih lastnosti (dimenzije prostora, dimenzije oken) na cirkadiano svetlobno okolje, dodatno smo proučili še vplivnost optičnih lastnosti stropa in tal. Uporaba prostora je dinamična in je bila v modelih dodatno upoštevana (položaj in orientacija pogleda sedečega uporabnika prostora). Sočasno pa je nestanovitno tudi notranje svetlobno okolje, ki ga uporabniki lahko precej spremenijo že samo z zamenjavo barve zidov ali zasteklitve. Zato v sklepnih študiji, ki je predstavljena v 7. poglavju, med zaposlenimi na Univerzi v Ljubljani v spletni anketi proučimo vpliv preferenc pri izboru barv sten in tipov ter velikosti zasteklitev v pisarniškem in bivalnem okolju.

Zaključek doktorske disertacije predstavimo tako, da najprej odgovorimo na poglavitna raziskovalna vprašanja in hipoteze, nato ovrednotimo ostale zastavljene cilje in na koncu izpostavimo omejitve opravljenih študij v disertaciji, ki so sočasno tudi izhodišča za nadaljevanje raziskovanja.

8.1 Temeljno znanstveno vprašanje in zastavljene hipoteze

S pomočjo eksperimentalnih in simulacijskih študij smo odgovorili na dve temeljni znanstveni vprašanji in tri hipoteze, zastavljene v dispoziciji doktorske disertacije. Komentarji in spoznanja v zvezi s hipotezami (*zapisana ležeče*) in temeljnimi znanstvenimi vprašanji (*zapisana ležeče in podčrtano*) so podani za vsakim navedenim vprašanjem oz. hipotezo.

1. temeljno znanstveno vprašanje:

»Ali je možno natančneje določiti vpliv posameznih lastnosti notranjega okolja (npr. odsevnost, presevnost, razmerje med površino zasteklitve in zunanjim ovojem, globina prostora itd.) na cirkadiano svetlobno okolje prostora?«

S pomočjo opravljenih eksperimentalnih in simulacijskih študij na enostransko osvetljenih notranjih okoljih smo pokazali, da je s pomočjo osnovnih statističnih principov in dovolj velikim vzorcem simulacij mogoče določiti vpliv lastnosti grajenega okolja na cirkadiano svetlobno okolje. V dispoziciji doktorske disertacije smo se osredotočali predvsem na vpliv optičnih lastnosti površin grajenega okolja, kar smo v razvoju doktorske disertacije razširili na raziskovanje in proučevanje vpliva ključnih geometrijskih lastnosti, kot so delež zasteklitve ter globina in širina prostora. Sočasno pa smo upoštevali tudi osnovne lastnosti obnašanja uporabnika, in sicer z upoštevanjem usmerjenosti pogleda in njegovega položaja v prostoru. Rezultati pokažejo, da se cirkadiano in vidno svetlobno okolje podobno odzivata na proučevane lastnosti notranjega grajenega okolja, če upoštevamo, da se lastnosti cirkadianega okolja določajo s pomočjo melanopsko uteženih optičnih lastnosti (R_m in τ_m) in vidno okolje v vidno uteženih optičnih lastnostih (R_v in τ_v). Zasteklitev je bila s svojimi optičnimi (presevnost zasteklitve) in geometričnimi (delež zasteklitve) lastnostmi na splošno spoznana za najvplivnejši arhitekturno-gradbeni element. Dodatno ugotovimo, da je velikost vpliva geometrijskih in optičnih lastnosti odvisna od obnašanja uporabnika, torej od njegovega položaja v prostoru in usmerjenosti pogleda. Vpliv posameznih optičnih ali geometrijskih lastnosti na svetlobno okolje, npr. WWR ali R_W , se spreminja glede na to, kam je hipotetični opazovalec obrnjen (pogled 0° , 90° , 180° ali 270°) oz. kako globoko v prostoru je (cona 1, cona 2, cona 3). Tako npr. vpliva WWR ali τ_v padata glede na oddaljenost od okna ter sta sočasno pogojena s tem, ali je okno v vidnem polju uporabnika (večji vpliv WWR in τ_v , pogled, usmerjen proti oknu, ali pogled, usmerjen 90° od okna) ali ne (manjši vpliv WWR in τ_v , pogled, usmerjen stran od okna). Zato je ob načrtovanju notranjega bivalnega okolja pomembno, da se zavedamo, kako bo prostor uporabljan. Torej kakšna je njegova namembnost, saj je od tega

odvisno, kako se bo prostor uporabljal. Npr. v tipični celični pisarni lahko pričakujemo, da bodo uporabniki prostora bolj statični in s pogledom usmerjeni v eno izmed sten, to pomeni, da bodo lastnosti sten bolj vplivale na prejete svetlobne dražljaje kot preostale lastnosti notranjega okolja. Vpliv lastnosti sten pa se bo povečeval z oddaljevanjem uporabnika od okna.

Iz prvega znanstvenega vprašanja izhajata dve hipotezi:

»Ob upoštevanju usmeritve analizirane ravnine v prostoru lahko vpliv presevnosti za dnevno svetlobo tipičnih okenskih zasteklitev izniči vpliv odsevnih površin na cirkadiani potencial v prostoru.«

Rezultati eksperimentalne študije, predstavljene v 4. poglavju, pokažejo, da lahko prvo hipotezo potrdimo. Ob upoštevanju usmeritve analizirane ravnine v prostoru vpliv presevnosti tipičnih okenskih zasteklitev lahko izniči vpliv odsevnih površin na cirkadiani potencial (relativno melanopsko in relativno cirkadiano učinkovitost – RMU in RCU) v prostoru. O izničenju vpliva cirkadianega potenciala govorimo takrat, kadar metriki RMU ali RCU spremenita predznak ali pa se njuna vrednost izvednoti v 1,00 (nevtralen cirkadiani potencial). Pozitivno izničenje vpliva odsevnih površin z RMU in $RCU > 1,00$ na RMU in $RCU \leq 1,00$ tako najpogosteje opazimo pri modro obarvanih solarnozaščitnih zasteklitvah (DP_{bt1} in DP_{bt2} , glej poglavje 4.3.1.3 in sliko 74). Omenjeni zasteklitvi se izražata v večjih melanopskih kakor vidnih presevnostih ($\tau_m > \tau_v$), zato lahko trdimo, da sta omenjeni zasteklitvi cirkadiano stimulatívni. Omenjeni modro obarvani sončnozaščitni zasteklitvi izničita vpliv vsake izmed opazovanih barv sten z $RCU < 1$, in sicer neodvisno od nasičenosti uporabljene barve. Nasprotno velja za bronasto obarvano solarnozaščitno zasteklitev (DP_{brt}) in trislojno toplotnoizolativno zasteklitev (TP_{2-l-e}), ki zavirata cirkadiani vidik svetlobe. Melanopske presevnosti omenjenih zasteklitev so izrazito manjše kot njune vidne presevnosti ($\tau_v > \tau_m$, glej poglavje 4.3.1.3 in sliko 74). Dejstvo, da lahko vpliv zasteklitve izniči vpliv barve stene, dodatno podprejo rezultati 6. poglavja, kjer ugotovimo, da je v splošnem linearnem modelu spremljanja cirkadianega svetlobnega okolja z vidika CL_A koeficient τ_m 1,6 x večji od koeficienta R_W .

»Ob upoštevanju usmeritve analizirane ravnine v prostoru ima na velikost vpliva odsevnih površin na cirkadiani potencial nasičenost barve večji vpliv kakor izbor barvenega odtenka.«

Vpliv stene na cirkadiano svetlobno okolje se spreminja v odvisnosti od vidne in melanopske odsevnosti zidu (R_W). Razmerje med vidno in melanopsko odsevnostjo zidu pogojujeta dve

lastnosti barvne površine: nasičenost in barvni odtenek. Na podlagi rezultatov eksperimentalne študije v poglavju 4.3.1.4 ovržemo zastavljeno hipotezo. Spoznamo, da je vpliv spremembe barve oz. izbranih odtenkov večji kakor vpliv spremembe nasičenosti barve, in ne obratno, kot smo predvidevali v hipotezi. Namreč, že sprememba vsake izmed barv pri najmanjši nasičenosti – *VBI* ima večji vpliv kot največja opazovana sprememba z ravni nasičenosti I ($R_v \sim 25\%$) na raven nasičenosti III ($R_v \sim 75\%$) – *VRIII* z vidika relativne cirkadiane učinkovitosti (*RCU*). Kot smo spoznali, se vpliv barve povečuje z nasičenostjo (zmanjševanje odsevnosti). Zato se vpliv barve pri večjih nasičenosti le še povečuje v primerjavi z vplivom nasičenosti. Omenjene ugotovitve poudarjajo, da je pri izboru optičnih lastnosti notranjega svetlobnega okolja priporočljiva pazljivost predvsem pri izboru barve odsevnih površin, saj lahko močno vpliva na melanopsko utežene optične lastnosti površine in posledično na cirkadiano svetlobno okolje, in to kljub temu, da vidno okolje ustreza kriterijem priporočljive osvetljenosti.

2. temeljno znanstveno vprašanje:

Ali je glede na znane vplive svetlobe na človeka ob specifikah grajenega okolja na osvetljenost notranjih prostorov sploh potrebno ocenjevanje cirkadianih vplivov svetlobe ali je zadosten pokazatelj primanjkljaja cirkadianega potenciala v prostoru že analiza osvetljenosti le s stališča izpolnjevanja vizualnih zahtev?«

Iz drugega znanstvenega vprašanja sledi hipoteza:

»V primeru dnevne svetlobe je ob običajnih lastnostih notranjih prostorov in zasteklitev (spektralno nevtralni prostori) zadosten pokazatelj primanjkljaja cirkadianega potenciala v prostoru že analiza osvetljenosti le s stališča izpolnjevanja vizualnih zahtev.«

Rezultati iz 5. poglavja pokažejo, da predvidevanje cirkadianega svetlobnega okolja na podlagi uveljavljenih pristopov vizualnega ocenjevanja notranjega okolja ni enostavna naloga. Kakor že večkrat omenjeno, se delovanji cirkadianega in vidnega sistema razlikujeta (glej poglavje 2.4). Posledično se odziv cirkadianega sistema pomembno razlikuje od vidnega sistema zaradi drugačne spektralne odzivnosti na svetlobo. Drugačnost odziva vidnega in cirkadianega sistema povzroči velika odstopanja pri določevanju vidno in cirkadiano učinkovite svetlobe. Kot smo pokazali v 6. poglavju, se lahko relativna cirkadiana učinkovitost (*RCU*) svetlobe jasnega neba zaradi spektralne spremenljivosti v poteku dneva in na geografski širini Ljubljane spremeni za 2,5-kratnik. Spektralna spremenljivost ob delno

oblačnem nebu je nekoliko manjša, največji RCU je 2,2-krat večji od najnižje izmerjenega RCU zunanjih pogojev istega pogleda (geografska širina Ljubljane). Le spektralna sestava ob popolnoma oblačnem nebu je bila ugotovljena kot dovolj stanovita ($RCU \geq 1,0$ v poteku celotnega dne) v vseh štirih smereh neba, da bi lahko omogočila ocenjevanje cirkadianega okolja s pomočjo ustaljenih metod ocenjevanja vidnega okolja. V nasprotju z oblačnim nebom je spektralna sestava delno oblačnega in jasnega neba dodatno pogojena s tem, kateri del neba opazujemo, torej je pomembna orientacija okenskih odprtín. Del neba, na katerem je vidno Sonce, se izraža v svetlobi z manjšo CCT , kar pomeni, da je svetloba topla, posledično pa sta manjša tudi RCU in RMU ($\leq 1,0$), medtem ko se RCU in RMU neba ob odsotnosti Sonca in pogledu na modro nebo izražata v večjih CCT in posledično večjih RCU in RMU ($\geq 1,00$). Dodatno je treba poudariti, da so ugotovitve o lastnostih cirkadiane in melanopske učinkovitosti geografsko specifične. Zavedati se moramo, da se spektralna sestava prejete dnevne svetlobe na zemeljskem površju spreminja v odvisnosti od geografske širine. Severnejše geografske širine so na splošno izpostavljene večjim CCT v primerjavi s srednjimi geografskimi širinami (npr. Ljubljana). Večje CCT severnih lokacij so posledica nižjih vpadnih kotov sončne svetlobe, zato obratno velja za ekvatorialna območja, kjer je prejeta dnevna svetloba posledica višjih vpadnih kotov sončne svetlobe in posledično manjših CCT .

Hipotezo lahko torej le delno potrdimo. Ob spektralno nevtralnih prostorih lahko cirkadiano svetlobno okolje v poteku celotnega dne napovedujemo, le kadar so izpolnjene specifične zunanje vremenske razmere, npr. da je nebo popolnoma oblačno (vsestranska spektralna enovitost). Ali pa je zmožnost napovedovanja na podlagi vizualnih zahtev odvisna tudi od tega, kam je prostor orientiran oziroma v katerem mesecu merimo notranje cirkadiano okolje. Tako npr. decembra in marca cirkadiano svetlobno okolje prostorov z zasteklitvijo, orientirano proti severu, ter junija prostore z zasteklitvijo, orientirano proti jugu, lahko ocenjujemo na podlagi znanih vizualnih pristopov ocenjevanja vizualnega svetlobnega okolja.

Ugodnemu cirkadianemu potencialu svetlobnih razmer neba navkljub ni nujno, da lahko cirkadiano svetlobno okolje ocenjujemo na podlagi ustaljenih metod vrednotenja vidnega sistema. S pomočjo ustaljenih metod vidnega vrednotenja dnevne svetlobe lahko ustreznost prostora z vidika cirkadiane osvetljenosti ob oblačnem nebu vrednotimo le ob predpostavki, da so v notranjem okolju uporabljeni spektralno nevtralni materiali ($R_m \approx R_{xs}$) ali pa uporabljeni materiali notranjega grajenega okolja spadajo med melanopsko stimulatívne, v grobem lahko rečemo tudi med hladno obarvane. Kar pomeni, da je melanopsko utežena odsevnost ali presevnost materiala večja od vidno utežene odsevnosti ali presevnosti ($R_m \geq R_v$ ali $\tau_m \geq \tau_v$).

8.2 Drugi zastavljeni cilji

»Če se bo pokazalo kot izvedljivo, predlagati poenostavljeno metodologijo za oceno cirkadianega svetlobnega okolja na podlagi uveljavljenih pristopov vizualnega ocenjevanja notranjega okolja.«

Kakor smo že omenili v odgovoru na tretjo hipotezo, je predvidevanje cirkadianega svetlobnega okolja zapleten problem, ki je primarno pogojen s spektralno sestavo dnevne svetlobe. Ta je odvisna od časa v dnevu in v letu. Kot že omenjeno (glej poglavje 5.4 in poglavje 8.1), le oblačno nebo ponuja spektralne razmere, pri katerih bi lahko neodvisno od orientacije okna in časovno neodvisno ocenjevali cirkadiano svetlobno vsebino notranjega grajenega okolja na podlagi uveljavljenih pristopov vizualnega ocenjevanja notranjega okolja. Ob jasnem in delno jasnem nebu je napovedovanje z uveljavljenimi vidnimi pristopi, neodvisno od časa v dnevu, možno le, kadar je okno usmerjeno v modri del neba (decembra in marca v severno orientiranem prostoru in junija v južno orientiranem prostoru). Omenjena dejstva nakazujejo, da bi bilo vzpostavljanje metodologije, ki bi delovala na podlagi znanih uveljavljenih vidnih pristopov ocenjevanja svetlobnega okolja lahko zavajajoče, saj uveljavljeni vidni pristopi ocenjevanja dnevne svetlobe ne upoštevajo spektralnih lastnosti prejete svetlobe.

»Na podlagi simulacij določiti najustreznejšo konfiguracijo notranjega okolja v hipotetičnem pisarniškem prostoru s stališča cirkadianega svetlobnega okolja notranjega grajenega okolja.«

Med razvojem doktorske disertacije smo ugotovili, da na cirkadiano svetlobno okolje vpliva veliko dejavnikov. Kakšno je vidno ali cirkadiano svetlobno okolje v grajenem okolju, je v prvi vrsti odvisno od razmer dnevne svetlobe, ki se nenehno spreminjajo. Svetlostne in spektralne lastnosti dnevne svetlobe so spremenljive in pogojene z navideznim gibanjem Sonca na nebu in trenutnim stanjem atmosfere (vremenom). Tako lahko spektralne razmere povprečnega neba v dnevu segajo od 3500 K do 7000 K in več ter so dodatno odvisne od letnega časa ali pa geografske širine lokacije. Spektralne razmere neba se dodatno razlikujejo po hemisferi, zato je pomembno, kateri del neba in kdaj opazujemo oz. proti kateremu delu neba je usmerjena okenska odprtina prostora. Na podlagi rezultatov za geografsko širino Ljubljane lahko trdimo, da so vzhodno orientirana okna z vidika cirkadianega svetlobnega okolja najprimernejša za pisarniško okolje, saj ponujajo obilico cirkadiano učinkovite svetlobe zjutraj in manj cirkadiano učinkovite svetlobe zvečer. Rezultati, predstavljeni v 6. poglavju, pokažejo, kakšen je vpliv geometrijskih in optičnih lastnosti notranjega grajenega okolja na cirkadiano svetlobno okolje v notranjem grajenem okolju. Na podlagi rezultatov omenjenega poglavja ugotovimo, da ima okno kot gradbeno-arhitekturni element največji vpliv na vidno in cirkadiano svetlobno okolje. Delež zasteklitve je prepoznan kot najvplivnejša geometrijska lastnost in presevnost

zasteklitve kot najvplivnejša optična lastnost pri vplivih na cirkadiano in vidno svetlobno okolje. Povečevanje deleža zasteklitve in presevnosti stekel se izraža v večjih količinah svetlobnega okolja (vidnega in cirkadianega). Obratno velja za globino prostora – večje globine prostora zmanjšujejo povprečno cirkadiano in vidno svetlobno okolje. Večanje preostalih proučevanih optičnih (odsevnost stropa in tal) in geometrijskih lastnosti (širina prostora) nekoliko manj, vendar kljub temu vpliva na povečevanje cirkadianega in vidnega svetlobnega okolja. Torej iz omenjenih ugotovitev lahko izpeljemo priporočila za čim bolj ustrezno konfiguracijo z vidika cirkadianega svetlobnega okolja enostransko orientiranega prostora.

Na podlagi simulacijskih in eksperimentalnih študij, opravljenih v tej doktorski nalogi, lahko priporočimo vzhodno orientacijo prostora z manjšo globino in večjo širino, velikim deležem zasteklitve in čim večjimi vrednostmi presevnosti in odsevnosti površin arhitekturno-gradbenih elementov notranjega grajenega okolja. Na tej točki moramo poudariti, da je pomembno poznati melanopsko in vidno utežene optične lastnosti površin oziroma material, iz katerega so te površine. Ni nujno, da se velike vrednosti vidne odsevnosti ali presevnosti izražajo v velikih melanopsko uteženih odsevnostih ali presevnostih in obratno. Ugotovili smo, da sta za optimalno konfiguracijo cirkadianega svetlobnega okolja pomembna velika melanopska odsevnost in presevnost. Zato za zagotavljanje boljšega cirkadianega svetlobnega okolja priporočamo uporabo spektralno nevtralnih odsevnih (sivi ali beli zidovi) in presevnih materialov (prozorno brezbarvno steklo) ali modrih odsevnih površin, ki dodatno stimulirajo cirkadiano okolje. Uporabo modrih presevnih površin odsvetujemo, če je R_a izbranega stekla prenizek, saj to lahko povzroča vidno neugodje (glej poglavje 4.5).

Omenjena priporočila za cirkadiano svetlobno okolje ne veljajo nujno za vidno svetlobno okolje. Tako kot rezultati študije uporabne osvetljenosti z dnevno svetlobo – UDI_{100}^{3000} (poglavju 6.3.4) severno orientiranega prostora, kjer se pojavljajo na splošno najmanjše osvetljenosti (če primerjamo severno, južno, vzhodno ali zahodno enostransko osvetljen prostor), pokažejo, da lahko veliki deleži zasteklitve ali velike melanopske odsevnosti oz. presevnosti zmanjšujejo čas, ko so vidne osvetljenosti znotraj mej udobnega vidnega okolja v območjih blizu oken. Dodatno lahko predvidimo, da velike vrednosti omenjenih lastnosti (npr. WWR , R_w , τ itd.) notranjega okolja niso nujno dobre z vidika vidnega svetlobnega ugodja pri orientacijah, kjer direktna sončna komponenta prodre v prostor (vzhod zjutraj, zahod zvečer itd.). Visoke vrednosti osvetljenosti zaradi omenjenega povzročajo bleščanje ob domnevi, da ne uporabljamo senčil, s katerimi lahko uravnavamo vidno udobje v prostoru. Torej če povzamemo, za največjo možno učinkovitost pri zagotavljanju ugodnih cirkadianih svetlobnih razmer priporočamo uporabo cirkadiano učinkovitih materialov ($\tau_m \geq \tau_v$ ali $R_m \geq$

R_v), z velikimi okni in zmerno globino prostorov, ki je priporočena tudi z vidika vidnega osvetljevanja (6 m) ob sočasni uporabi aktivnih načinov preprečevanja bleščanja, npr. premična senčila. V prvi vrsti pa vse omenjene lastnosti prilagodimo uporabi prostora, ki nam pove, kje v njem se bodo uporabniki pretežno zadrževali in kam bodo usmerjeni njihovi pogledi. Kot smo pokazali v 6. poglavju, imata položaj v prostoru in usmerjenost pogleda velik vpliv na prejeto cirkadiano svetlobno vsebino posameznika.

»S pomočjo ankete o osebni preferenci barv notranjega okolja določiti, koliko lahko osebne odločitve uporabnikov prostora pri spreminjanju notranjega okolja (spreminjanje barv sten in vrste zasteklitev) vplivajo na cirkadiani potencial prostora v fazi uporabe.«

Študija preferenc uporabnikov glede optičnih lastnosti notranjega okolja, natančneje barv zidov ter velikosti in barv zasteklitve, pokaže, da bi se, če opazujemo obarvanost zidov, uporabniki najpogosteje odločili za belo. Sledita ji najbolj nasičena modra in srednje nasičena oranžna barva. Če pa to vrednotimo z vidika barvne skupine, je bila na danem vzorcu največja preferenca zaznana pri oranžni barvi, sledita ji modra in nato bela. Če je bila v naboru barv bela, so se torej anketirani v večini odločili za to možnost. Kot najljubši nenevtralni barvi sta bili tako izbrani oranžna in modra, ki sta diametralno nasprotni z vidika cirkadianega osvetljevanja. Rezultati študije tako pokažejo diametralne preference po toplih in hladnih barvah. Iz tega je očitno, da je predvidevanje notranjega cirkadianega svetlobnega okolja še toliko težje, saj lahko uporabniki s svojimi odločitvami, ki so pogojene z osebnimi barvnimi preferencami, drastično spremenijo cirkadiano svetlobno okolje prostora. To je še posebej pomembno v primeru pisarniških okolij, kjer so uporabniki po navadi usmerjeni proti stenam in statično postavljeni globlje v prostoru in je tako vpliv barvnih zidov še toliko večji (glej 6. poglavje).

V nasprotju s preferenco barve zidov preferenca velikosti in tipa zasteklitve anketiranih nakazuje na to, da se uporabniki večinoma odločajo za velikost in tip zasteklitev, ki ugodno vplivata na cirkadiano svetlobno okolje. Ugotovljeno je bilo, da anketirani dajejo prednost nevtralnim oz. brezbarvnim zasteklitvam srednjih oz. velikih dimenzij.

8.3 Omejitve in izhodišča za nadaljnje raziskave

Raziskovanje s področja cirkadianega svetlobnega okolja je pokazalo na nekaj perečih problematik, ki smo jih v okviru te doktorske disertacije spoznali kot omejitve ali kot priložnost za nadaljevanje raziskovanja. Izpostavljene omejitve so posledica nerazvitosti

področja in tako niso vplivale na končne rezultate opravljenih študij v smislu, da bi zmanjševale relevantnost predstavljenih rezultatov.

1. Vse študije, eksperimentalne in simulacijske, so bile opravljene le za lokacijo Ljubljane. Dodajanje novih lokacij v sklop raziskav, predstavljenih v tej doktorski nalogi, ne bi bilo smiselno, saj variabilnost zunanjih razmer zaradi geografske širine (različnih lokacij) ne bi pripomoglo k dodatnemu razumevanju vpliva optičnih lastnosti površin in drugih lastnosti notranjega okolja na cirkadiano svetlobno vsebino. Zavedamo pa se, da se spektralna vsebina dnevne svetlobe spreminja v odvisnosti od geografske širine. Podatki, predstavljeni v tej doktorski disertaciji, veljajo za vse kraje na severni in južni polobli približno 46° severno ali 46° južno od ekvatorja. Raziskovanje vpliva spremembe geografske širine na cirkadiano svetlobno okolje notranjega grajenega okolja smo rezervirali za raziskovanje v prihodnosti. Trenutno smo dodatno omejeni s simulacijskimi orodji, saj omogočajo zanesljivo simuliranje spektralnih razmer dnevne svetlobe le v območju srednjih geografskih širin. Območja bližje ekvatorju in blizu severnemu ali južnemu tečajniku pa so izpostavljena bolj specifičnim svetlobnim razmeram zaradi bolj ekstremnih vpadnih kotov sončne svetlobe.
2. Študije so bile opravljene samo za enostransko osvetljene prostore. Za analizo le enostransko osvetljenih prostorov smo se odločili, ker so nam omogočili vrednotenje vpliva lastnosti notranjega okolja brez dodatnega vpliva direktne komponente tudi pri jasnem ali delno oblačnem nebu. Kar je ključno, saj če je direktna komponenta v prostoru, vpliv lastnosti notranjega okolja postane odvisen od časa. Snop sončne svetlobe npr. v določenem trenutku posije na tla, v drugem na zid, kar je posledica gibanja Sonca v dnevu in ojača vpliv površine, na katero posije, saj visok svetlobni tok sončnih žarkov občutno poveča osvetljenost površine, na katero posije sončna svetloba. Zavedamo se, da bi se vpliv arhitekturno-gradbenih lastnosti notranjega grajenega okolja spremenil, če bi v prostor uvedli dodatne okenske površine. Na podlagi dozdajšnjih študij enostransko osvetljenih prostorov lahko predvidevamo, da bi se z dodajanjem oken vpliv teh še povečeval, proporcionalno pa bi se zmanjšali vplivi vertikalnih in horizontalnih odsevnih površin. Študija cirkadianega svetlobnega okolja kot posledica prostorov, osvetljenih z več strani, pomeni obširno tematiko in je obetavno področje za nadaljevanje študij z vidika cirkadianega osvetljevanja.

3. Trenutno je izvajanje simulacij multispektralnega svetlobnega okolja omejeno na simulacije izbranega trenutka v času. Zavedamo se, da se vremenske razmere in posledično tudi spektralna sestava prejete dnevne svetlobe nenehno spreminjajo, zato t. i. statične simulacije multispektralne svetlobe ne morejo dosledno opisovati letnega potenciala cirkadianega svetlobnega okolja. Točno ovrednotenje cirkadianega svetlobnega okolja bi bilo v teoriji sicer mogoče s pomočjo simulacij točk v času, vendar bi takšne simulacije zahtevale prevelik računalniški vložek in mnogo simulacijskega časa, kar ne bi bilo smiselno. Zato smo obdobje, v katerem smo vrednotili cirkadiano svetlobno okolje v enakomernih časovnih intervalih, omejili na en dan pri izbrani tipologiji neba za tisti dan. Te simulacije so služile kot ilustrativen primer, če bi bilo stanje neba stanovitno, in so bile za namen doktorske naloge zadovoljivo natančne. Nerazvitost področja vrednotenja cirkadianega svetlobnega okolja na letni ravni ponuja priložnost za razvoj. Prvi korak k letnemu vrednotenju cirkadianega svetlobnega okolja na podlagi celotnega leta smo opravili že v doktorski disertaciji z uvedbo metrik cirkadiane avtonomije (*CA*) in avtonomije cirkadianega potenciala (*RCU+*), ki sta metriki, na podlagi katerih bi lahko merili letni vpliv cirkadianega svetlobnega okolja v prostoru. Za hiter in zanesljiv izračun spektralnih razmer dnevne svetlobe pa bi lahko uporabili sodobne metode strojnega učenja, natančneje globokega učenja, ki omogoča predvidevanje številnih kompleksnih naravnih pojavov, med drugim tudi predvidevanje dnevne svetlobe.
4. Kot to potrjujejo številne študije, je odnos med svetlobo in človeško biologijo zelo kompleksen in naša spoznanja o tem se nenehno dopolnjujejo in spreminjajo [6, 184]. To pomeni, da bo preteklo še kar nekaj časa, preden bodo v znanosti na tem področju dosegli soglasje glede kvantitete in kvalitete (spekter) dnevne svetlobe in tudi umetne svetlobe s sočasnim upoštevanjem časovne komponente, ki je potrebna za najprimernejšo cirkadiano stimulacijo [185]. Zato naj vrednotenje absolutne količine cirkadianega svetlobnega okolja v doktorski disertaciji ne služi kot dokončno priporočilo, ampak kot trenutno aktualna smernica, ki velja glede na izsledke študij, podrobneje opisanih v poglavju 2.4.5. V doktorski nalogi uvedemo koeficiente cirkadianega potenciala (*RMU*, *RCU*, *RCU+*), ki opisujejo odnos cirkadiano efektivne svetlobe s fotopsko efektivno svetlobo in ne vrednotijo absolutne količine prejete svetlobe, ampak le njen potencial za izboljšanje cirkadianega svetlobnega okolja.

8.4 Sklep

Izsledki raziskav, predstavljenih v doktorski nalogi, so pomemben prispevek k znanosti in stroki na področju cirkadianega svetlobnega okolja. Smo prvi na tem področju, ki smo kvantificirali vpliv širokega nabora optičnih in geometrijskih lastnosti notranjega okolja ob sočasnem upoštevanju uporabe prostora z vidika vpliva na cirkadiano dnevno svetlobo notranjega grajenega okolja. Opredelitev vpliva lastnosti notranjega okolja na cirkadiano svetlobno okolje je bistveno osvetlila povezavo med grajenim okoljem in svetlobnimi vplivi na uporabnika. Raziskava je neizpodbitno pokazala izjemen vpliv okna kot najpomembnejšega arhitekturno-gradbenega elementa z vidika cirkadianega in tudi splošnega svetlobnega okolja v stavbah. Dodatno so analize pokazale, da je vpliv lastnosti odvisen od uporabe prostora (položaj in smer pogleda uporabnika) in zunanjih razmer dnevne svetlobe. Poudarjena dejstva pa imajo tudi neposredne posledice za načrtovanje grajenega okolja, saj kažejo na pomen zavedanja o lastnostih cirkadianega okolja že v načrtovalskih fazah in so pomoč za vzpostavitev prioritet pri snovanju zdravega notranjega okolja.

Pokazali smo, da je ocena cirkadianega svetlobnega okolja zadostna le pod specifičnimi zunanjimi pogoji, zato dodatno opozarjamo, da bi bilo v prihodnosti priporočljivo, da se za odsevne in presevne materiale, uporabljene v notranjem bivalnem in delovnem okolju, poleg vidnih odsevnosti in presevnosti poroča tudi o njihovih melanopsko uteženih lastnostih, saj te materiale uporabniki pogosto menjajo. Še več, ugotovili smo, da uporabniki barvo sten izbirajo glede na osebno preferenco, zato bi informacija o melanopsko uteženih lastnostih materiala morebiti odvrnila od izbora barve, ki bi negativno vplivala na cirkadiano svetlobno okolje.

»Ta stran je namenoma prazna«

9 POVZETEK

Znanstveni izsledki zadnjih 20 let so potrdili slutnjo, da je dnevna svetloba najvplivnejši in tako glavni usklajevalec cirkadianega ritma skoraj vseh bitij na Zemlji [113]. Odkritje ipRGC [5, 56] odstira popolnoma novo dimenzijo vpliva svetlobe na človeka, do konca 20. stoletja smo namreč njen vpliv povezovali le z vidnim čutnim sistemom. Splošno znano je, da človeški vidni sistem vključuje delovanje dveh vrst fotoreceptorjev – paličic in čepkov in je najbolj občutljiv za svetlobo pri valovni dolžini 555 nm. Novoodkriti fotoreceptorji pa vsebujejo fotopigment melanopsin, ki je maksimalno občutljiv za svetlobo modrega spektra med 460 in 480 nm [58–61, 186, 187]. Kolikšen bo vpliv svetlobe na cirkadiani sistem, pa ni odvisno samo od spektralne sestave svetlobe, ampak tudi od jakosti in časovnih značilnosti svetlobnih dražljajev. Torej, kdaj in kako dolgo je bil posameznik izpostavljen določeni svetlobi. Trenutno je znano, da sta za ohranjanje zdravega cirkadianega ritma potrebni zadostna količina in sestava svetlobe, ki sta pomembni predvsem v jutranjih in dopoldanskih urah, v večernih pa je izpostavljenost močnejšim virom svetlobe odsvetovana, saj povzroča zamikanje cirkadiane faze, kar lahko privede do desinhronizacije cirkadianega ritma. Večja desinhronizacija cirkadianega ritma lahko povzroča številne psihološke [188] ali fiziološke [12, 101, 189] negativne vplive pri posameznikih. Zato lahko trdimo, da je vzdrževanje cirkadiane kakovosti dnevne svetlobe v notranjem grajenem okolju ključno pri skrbi za zdravo življenje in spodbujanje splošnega dobrega počutja, saj sodobni človek na območju ZDA, Kanade in Evrope povprečno preživi od 60 do 90 % svojega časa v notranjih grajenih okoljih [190]. Kakšen je odziv vidnih učinkov svetlobe na lastnosti grajenega okolja, je na splošno dobro poznano, ne vemo pa natančno, kako se nevidni oz. z drugo besedo cirkadiani učinki svetlobe odzivajo na lastnosti notranjega grajenega okolja [191]. Zato v disertaciji predstavimo in obravnavamo odziv nevizualnih oz. cirkadianih vidikov dnevne svetlobe na lastnosti notranjega grajenega okolja (geometrija prostora in izbor materialov) v povezavi z vplivom uporabnika (položaj opazovalca in usmerjenost pogleda) v odvisnosti od lastnosti zunanjih razmer.

Raziskavo vpliva lastnosti notranjega grajenega okolja s poudarkom na vplivu optičnih lastnosti notranjega grajenega okolja na cirkadiani potencial smo izvedli na podlagi eksperimentalnih in simulacijskih študij vizualnih in cirkadianih svetlobnih razmer notranjega grajenega okolja. S pomočjo petih študij, predstavljenih v ločenih poglavjih, smo vplive lastnosti grajenega okolja sistematično proučili. Najprej smo na podlagi eksperimentalno pridobljenih podatkov na pomanjšanem modelu celične pisarne, izmerjenih na strehi

Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, določili najustreznejše simulacijsko orodje za izvedbo vseh simulacijskih izračunov v doktorski nalogi (3. poglavje). Trenutno sta na voljo dve multispektralni simulacijski orodji Lark in ALFA, ki sta sposobni preračunavati spektralne podatke dnevne svetlobe. Izmed omenjenih je bilo za nadaljnje izračune v disertaciji izbrano simulacijsko orodje ALFA, ki se je izkazalo za veliko natančnejše in hitrejše orodje kakor Lark.

V nadaljnji študiji, predstavljeni v 4. poglavju, se osredotočimo na vpliv optičnih lastnosti sedmih tipov komercialnih zasteklitev in 18 izbranih odtenkov barv stene (šest barv pri treh ravneh nasičenosti) na cirkadiani potencial, kot bi ga prejemal sedeči statični uporabnik (višina pogleda 1,2 m, oddaljenost od okna 1,45 m), ki je s pogledom usmerjen proti vzhodnemu zidu, na pomanjšanem eksperimentalnem modelu, postavljenem na strehi Fakultete za gradbeništvo in geodezijo UL, enostransko osvetljene pisarne, orientirane proti severu. Vpliv izbranih optičnih lastnosti na prejeto cirkadiano okolje statičnega uporabnika nato preverimo še na celodnevni simulacijah v pisarni realnih dimenzij v simulacijskem okolju. Eksperimentalni rezultati pokažejo, da lahko ob upoštevanju usmeritve analizirane ravnine v prostoru vpliv presevnosti tipičnih okenskih zasteklitev izniči vpliv odsevnih površin na cirkadiani potencial. Na podlagi eksperimenta spoznamo tudi, da je vpliv spremembe barve večji kakor vpliv spremembe nasičenosti barve. Pri severni orientaciji prostora in fiksnem pogledu lahko nevtralna in modra bivalna okolja z vidika cirkadianega osvetljevanja vrednotimo na podlagi ustaljenih vizualnih metod. Simulacijski rezultati pokažejo, da so nevtralne zasteklitve in nevtralne barve sten z velikimi odsevnostmi in presevnostmi najboljše z vidika cirkadianega osvetljevanja. Modre zasteklitve so najugodnejše z vidika cirkadiane svetlobe, vendar povzročajo vidno neudobje zaradi modre obarvanosti svetlobe (nizek R_a).

V 5. poglavju razširimo problematiko, ali je za vrednotenje cirkadianega svetlobnega okolja zadostno vrednotenje že samo z metodami vizualnega ocenjevanja svetlobe. V 4. poglavju smo sicer pokazali, da je vidno ocenjevanje dovolj ob specifičnih razmerah (jasno nebo, severna orientacija prostora), vendar ali to velja tudi v odvisnosti od časa in pri drugačnih vremenskih razmerah ter različni orientaciji okenskih odprtin, preverimo na cirkadianem svetlobnem okolju štirih identičnih enostransko osvetljenih pisarn. Pisarne z različnimi orientacijami (sever, vzhod, jug in zahod) analiziramo z vidika hipotetičnega uporabnika prostora na vertikalni ravnini 1,2 m v spremenljivih zunanjih razmerah. Simulacije izvedemo v karakterističnih dneh (21. marec, junij, december) od sončnega vzhoda do sončnega zahoda za tri različna stanja neba (jasno, delno oblačno in oblačno). Rezultati študije pokažejo, da lahko

za vrednotenje cirkadianega svetlobnega okolja spektralno nevtralnega notranjega okolja uporabljamo ustaljene vizualne metode, kadar je nebo oblačno, in sicer neodvisno od časa in orientacije prostora za vse karakteristične dni. Enako velja za modro obarvane prostore pri oblačnem nebu. Če je notranje okolje obarvano v oranžno, ocenjevanje cirkadianega svetlobnega okolja na podlagi vidnih metod ni mogoče za nobeno izmed proučevanih kombinacij. Cirkadiano vrednotenje s pomočjo vidnih metod je možno tudi pri nevtralnih in modrih prostorih, orientiranih proti jugu, in pri jasnem in delno oblačnem nebu junija ter pri severni orientaciji prostora in jasnem in delno oblačnem nebu 21. marca in decembra.

V študijah, predstavljenih v 4. in 5. poglavju, smo spoznali, da imajo odsevnost zidov in presevnost oken ter položaj opazovalca v prostoru močan vpliv na prejeto cirkadiano svetlobno vsebino. V 6. poglavju tako zasnujemo parametrično študijo, s pomočjo katere lahko kvantificiramo vpliv omenjenih optičnih lastnosti. Dodatno vključimo študijo vpliva geometrije oken, geometrije prostora (globina, širina), odsevnosti stropa, odsevnosti tal in obnašanja uporabnika (položaj v prostoru in usmerjenost pogleda). Izvedenih je bilo 1960 ponovitev, na podlagi katerih zasnujemo modele multiple linearne regresije. Modeli so zasnovani za povprečje celotnega prostora (splošni model), ločeno po pogledih (pogledni modeli) in sočasno ločeno po pogledih ter conah po globini prostora (consko pogojeni pogledi). Izsledki študije so pokazali, da je velikost okna oziroma delež zasteklitve (WWR) najvplivnejša geometrijska lastnost in presevnost stekla ($\tau_{v, m}$) najvplivnejša optična lastnost notranjega grajenega okolja. Ugotovimo, da so nekatere izmed obravnavanih lastnosti odvisne od pogleda in/ali položaja v prostoru. Natančneje, WWR , globina in presevnost stekla so odvisne od pogleda. Vse obravnavane lastnosti pa so pogojene s položajem uporabnika v prostoru (oddaljenostjo od okna). Na podlagi najvplivnejše optične in geometrijske lastnosti zasnujemo še dodatno simulacijsko študijo, v kateri natančneje spremljamo sočasni vpliv spreminjanja WWR in τ na cirkadiano svetlobno okolje in letno vidno okolje v pisarnah enakih dimenzij konstantnih odsevnih optičnih lastnosti površin. Rezultati omenjenih simulacij izpostavijo, da je treba za načrtovanje dnevne svetlobe sočasno izbirati tip in velikost zasteklitve. Dodatno ugotovimo, da zagotavljanje zelo cirkadiano učinkovitega okolja v severno orientiranem prostoru ne slabša časa izpostavljenosti uporabni vidni dnevni svetlobi (UDI), razen v območju blizu okna pribl. 1 m od njega.

V 4., 5. in 6. poglavju tako zajamemo vidik vpliva lastnosti grajenega okolja. Mnogo lastnosti notranjega grajenega okolja je določenih že v fazi načrtovanja grajenega okolja (dimenzije prostorov, velikost oken), v 7. poglavju pa želimo raziskati, kakšno spremembo v cirkadianem

svetlobnem okolju je mogoče pričakovati v času uporabe prostora, ko uporabniki s svojimi odločitvami spreminjajo lastnosti notranjega grajenega okolja, ki jih lažje spremenimo kot npr. odsevnost sten in presevnost zasteklitev. V ta namen zasnujemo anketo o preferencah uporabnikov glede optičnih lastnosti površin notranjega okolja. V njej raziskujemo, ali so preference uporabnikov do barv sten povezane z osebnimi preferencami, spolom, starostjo itd. Prav tako raziščemo, katere barve sten so uporabnikom najljubše in za kakšno zasteklitev bi se odločili. Rezultati ankete pokažejo, da barvo zidov izbirajo po osebni barvni preferenci. Torej če je posamezniku všeč modra barva, je velika verjetnost, da bo izmed barvnih možnosti zidov izbral ravno modro. Na splošno anketirani pokažejo največje preference do oranžne in modre, in če je na voljo, večinoma bele. Na splošno je mogoče opaziti statistično značilno razliko v barvnih preferencah spolov. Moški so pri izboru barv nekoliko bolj polarizirani, izbirajo predvsem modre, sive in oranžne odtenke. Ženske preference so izrazito večje predvsem pri vijoličastih in rdečih odtenkih. Opazimo tudi, da je preferenca pogojena s starostjo, kar se izraža predvsem pri moški preferenci oranžne, ki se z leti povečuje, preferenca modre pa posledično zmanjšuje. Na splošno ugotavljamo, da so preference po barvah razdeljene v diametralno nasprotno barve, ki lahko povzročajo cirkadiano stimulatívne učinke (modri odtenki), cirkadiano nevtralne učinke (bela barva) ali negativne učinke (oranžni zidovi). To kaže, kako ranljiva je kakovost cirkadianega svetlobnega okolja v fazi uporabe, kar potrdimo s številnimi študijami v tej doktorski disertaciji.

Izsledki doktorske disertacije so pomemben prispevek k znanju o cirkadianih vidikih svetlobnega okolja v notranjem grajenem okolju in pri njegovi optimizaciji. Opredelitev vpliva optičnih in geometrijskih lastnosti notranjega okolja na cirkadiano svetlobno okolje pri upoštevanju zunanjih svetlobnih razmer pomaga pri določitvi prioritete pri snovanju notranjega okolja. Dejstvo, da je okno najvplivnejši arhitekturno-gradbeni element, opozarja na to, da je zelo pomembno, da se problematike cirkadianega svetlobnega okolja zavedamo že v zgodnjih načrtovalskih fazah, zato je pomembna predvsem ozaveščenost stroke, ki lahko že v načrtovalski fazi oblikuje prostor, primeren za predvideno rabo. Dodatno smo pokazali, da osebne preference definirajo izbor barv notranjega grajenega okolja, ki lahko v številnih primerih močno poslabšajo cirkadiane vidike svetlobnega okolja notranjega grajenega okolja. Standardizacija dodatnega navajanja melanopsko in vidno uteženih optičnih lastnosti, tako odsevnosti kot presevnosti, bi lahko potencialno izboljšala splošno zavedanje stroke in tudi splošne javnosti ter tako pripomogla k ustrežnejšemu cirkadianemu svetlobnemu okolju oz. bolj zdravemu bivalnemu in delovnemu okolju.

10 SUMMARY

The scientific findings of the last two decades have confirmed the suspicion that daylight is the most influential circadian time cue and thus the primary coordinator of the circadian rhythm of almost all living beings on Earth [113]. The discovery of ipRGC [5,56] reveals a whole new dimension of the impact of light on humans. Until the end of the 20th century, the influence of light was associated only with the visual sensory system. It is widely known that the human visual system involves the action of two types of photoreceptors - rods and cones, and is most sensitive to light at a wavelength of 555 nm. The newly discovered photoreceptors contain the photopigment melanopsin, which is maximally sensitive to the light spectrum between 460 and 480 nm [58–61,186,187]. The effect of light on the circadian system depends not only on the spectral composition of light but also on light stimuli' intensity and temporal characteristics. Therefore, it is essential to know when and for how long was an individual exposed to a particular light. It is currently known that maintaining a healthy circadian rhythm requires a sufficient amount and composition of light, which is essential, especially in the morning. Exposure to more potent light sources should be avoided in the evening, as it causes a shift in the circadian phase, which can lead to circadian desynchronization. Greater desynchronization of the circadian rhythm can cause many psychological [188] or physiological diseases [12,101,189] in individuals. Therefore, it can be argued that maintaining the circadian quality of daylight in an indoor environment is key to maintaining a healthy life and promoting overall well-being. Especially as a modern man in the US, Canada and Europe spends an average of 60 to 90% of their time in indoor environments [190]. The response of the visible effects of light to the properties of the built environment is generally well known. Still, we do not know precisely how the non-visual or, in other words, the circadian effects of light respond to the properties of the internal built environment [191]. Therefore, we present and discuss the response of the invisible or circadian aspects of daylight on the properties of the interior built environment concerning the influence of the user (position, orientation of the view and the choice of materials) depending on the properties of the external conditions.

Influence of the internal built environment properties with an emphasis on the influence of the optical properties of the interior built environment on the circadian potential was performed based on experimental and simulation studies of visual and circadian light conditions of the indoor built environment. The influence of chosen properties of the built

environment on the circadian and visual luminous environment was presented in 5 studies presented in their respective chapters. Firstly, we have determined the most appropriate simulation tool for all simulation calculations in this doctoral thesis. Simulation accuracy was tested on the results from the experimentally obtained data on the scale model of a cell office measured on the Faculty of Civil and Geodetic Engineering's roof (Chapter 3). Currently, two multispectral simulation tools are available that are capable of calculating daylight spectral content named Lark and ALFA. Of these, the ALFA simulation tool was used for further calculations in the dissertation, which proved to be a much more accurate and faster tool than Lark.

In the further study presented in Chapter 4, the main focus was given on the influence of the optical properties of 7 types of commercial glazing and 18 selected colour swatches of wall colours (6 colours at three levels of saturation) on the circadian potential as perceived by a seated static user (sitting view height of 1.2 m and distance from the window of 1.45 m), who is facing the east wall in an experimental scale model of unilaterally lit office, oriented to the north. The model was placed on the roof of the Faculty of Civil and Geodetic Engineering. The influence of the selected optical properties on the perceived circadian luminous environment of the static user is also calculated in diurnal simulations with the office of actual dimensions. Experimental results show that taking into account the orientation of the analyzed plane in space, the influence of the transmissivity of typical window glazing can nullify the influence of reflective surfaces on the circadian potential. Based on the experiment, we also found that the effect of colour change on circadian potential is higher than the effect of colour saturation change on circadian potential. With a northern orientation of the space and a fixed view, neutral and blue living environments can be evaluated from the circadian point of view solely based on established visual methods for the assessment of visual luminous environments. The simulation results show that neutral glazing and neutral wall colours with high transmittances or reflectances are the best from the circadian standpoint. Blue glazing is most advantageous in terms of circadian light, but it causes visible discomfort due to the blue colouration of the light (low R_a).

In Chapter 5, we expand on whether evaluation through visual assessment of light alone is sufficient for evaluating the circadian lighting environment. In Chapter 4, we showed that calculation with conventional methods for visual luminous environments is acceptable under specific conditions (clear sky, northern orientation of the space). Whether this is true for different temporal and weather conditions and different directions of window openings is

checked on a circadian light environment four identical unilaterally lit offices. Offices with different orientations (north, east, south and west) are analyzed from the point of view of a hypothetical user of space on a vertical plane of 1.2 m under changing external conditions. Simulations are performed on characteristic days (the 21st of March, June and December) from sunrise to sunset for three different sky states (clear, partly cloudy and cloudy skies). The study results show that the circadian luminous environment of a spectrally neutral indoor environment can be evaluated using established methods for visual assessment of luminous environments when the sky is cloudy, regardless of the time and orientation of space for all characteristic days. The same goes for blue-coloured rooms in an overcast sky. If the indoor environment is coloured orange, the assessment of the circadian luminous environment on the basis of visible methods is not possible for any of the studied combinations. Circadian evaluation using visual methods is also possible in neutral and blue south-facing spaces and under clear and partly cloudy skies in June and northern space orientation under clear and partly cloudy skies on the 21st of March and December.

In the studies presented in Chapters 4 and 5, we realized that the reflectivity of the walls and the transmission of the windows and the observer's position in space have a strong influence on the received circadian light content. Thus we have designed a parametric study presented in Chapter 6, by which we can quantify the influence of the mentioned optical properties. Additionally, we include the analysis of the influence of window geometry, space geometry (depth, width), ceiling reflectivity, floor reflectivity and user behaviour (position in space and view orientation). In total, 1960 iterations were performed, based on which we designed multiple linear regression models. The models are established for the average of the entire space (general model), separately by views (view models) and at the same time separately by views and zones by the depth of the room (zone dependent models). The study results showed that the Window to Wall Ratio (WWR) is the most influential geometric property and the glazing transmittance ($\tau_{v,m}$) is the most influential optical property of the internal built environment. It was found out that some of the considered properties depend on the view and/or position in space. Specifically, the WWR , depth and glazing transmittance are view dependant. The influence of all of the studied properties depends on the user's position in the room (distance from the window). Based on the most influential optical and geometric properties, we additionally design a simulation study, where we closely monitor the simultaneous effect of changing WWR and τ on the circadian luminous environment and the annual visible environment in offices of equal dimensions with constant reflective optical properties. The results of the mentioned simulations highlight the fact that for daylight

planning, it is necessary to select the type and size of glazing simultaneously. In addition, we find that providing a highly efficient circadian environment in a north-oriented space does not impair the exposure time to Useful Daylight Illuminance (UDI) except in the areas near the window of approx. 1 m from the window.

The aspects of the influence of the properties of the built environment are covered in Chapters 4, 5 and 6. Many properties of the indoor built environment are already determined in the planning phase of the built environment (room dimensions, window size). Contrary to previous chapters in Chapter 7, we want to explore the change in the circadian lighting environment when the room is used by occupants, in terms of change in reflectivity of walls and transmissivity of windows, which are easily changed and are often changed in a building's lifetime. To this end, we have designed a survey on user preferences regarding the optical properties of the surfaces of the internal built environment. In the survey, we investigate whether users' preferences for wall colours are related to personal preferences, gender, age, etc. We also explore which wall colours are the users' favourite and what kind of glazing they would choose. The survey results show that users select the colour of the walls according to personal colour preference. So if an individual likes blue, there is a high probability that they will choose blue from the colour options of the walls. In general, respondents show the most increased preferences for orange and blue, and, if available, the white option is predominant. In general, a statistically significant difference in colour preferences of the sexes can be observed. Men are a bit more polarized in their choice of colours; they choose mainly blue, grey and orange shades. Women's preferences are higher, especially in purple and red hues. We also notice that the colour preference is age-dependent, mainly expressed in the male preference for orange, which increases on account of the decrease in preference for blue colours with age. In general, we found that the colour preferences of the sample were divided into diametrically opposed colours, which can cause circadian-stimulating effects (blue hues), circadian-neutral effects (white), or adverse effects (orange walls). People's preference for colour shows the vulnerability of circadian luminous environment quality in the phase of use, confirmed by many studies in this doctoral dissertation.

The doctoral dissertation results represent an essential contribution to the state-of-art in the circadian aspects of the internal built environment's luminous environment its optimization. Determination of the influence of the optical and geometric properties of the indoor environment on the circadian lighting environment, taking into account the external lighting conditions, helps to set priorities in the design of the indoor environment. The fact that the window is the most influential architecturally structural element points to the fact that it is

even more important to be aware of the problems of the circadian luminous environment in the early planning stages. This awareness is fundamental with professionals who have the power to determine the overall luminous potential of the space in the early design phases of buildings. Additionally, it has been shown that personal preferences define the choice of colours of the interior built environment, which can significantly impair the circadian aspects of the lighting environment of the interior built environment. The standardization of additional information about melanopically and visibly weighted optical properties, both reflective and translucent on commercial materials, could improve the general awareness of the profession and the general public and thus contribute to a more appropriate circadian luminous environment which leads to a healthier living environment.

»Ta stran je namenoma prazna«

LITERATURA IN VIRI

- [1] Ogrinc, E. , Bizjak, M. , Eršte, S. , Kotnik, M. , Mlakar, F. , Muhič, L. , Neumuller, S., Planinšek V., Podlipnik P., Orgulan A. 1998. Svetlobnotehniški slovar: seznam slovenskih izrazov. Maribor, Slovensko društvo za razsvetljavo/SDR.
- [2] SIST EN 17037: 2019. Dnevna svetloba v stavbah.
- [3] ISO/CIE 11664-1: 2019. Colorimetry- Part1: CIE Standard Colorimetric Observers.
- [4] Rogers, K. 2010. The eye: the physiology of human perception. 1st Edition, New York, Britannica Educational Publishing, Rosen Educational Services.
- [5] Berson, D. M. , Dunn, F. A. , Takao, M. 2002. Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. *Science (New York, N.Y.)* 295, 5557: 1070–1073.
<https://doi.org/10.1126/science.1067262>
- [6] Foster R.G, 2021. Fundamentals of circadian entrainment by light. *Lighting Research and Technology* 53: 377–393.
<https://doi.org/10.1177/14771535211014792>
- [7] Andersen, M. , Mardaljevic, J. , Lockley, S. 2012. A framework for predicting the non-visual effects of daylight – Part I: photobiology- based model. *Lighting Research & Technology* 44, 1: 37–53. <https://doi.org/10.1177/1477153511435961>
- [8] Figueiro, M. G. , Steverson, B. , Heerwegen, J. H. , Rea, M. S. 2015. Daylight in office buildings: Impact of building design on personal light exposures, sleep and mood. V: 28th CIE (International Commission on Illumination) SESSION. 28.6 - 4. 7. 2015, Manchester, UK, CIE p. 1–11.
- [9] Boyce, P. R. 2014. Human factors in lighting, third edition. CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, Florida.
- [10] Brown, M. J. , Jacobs, D. E. 2011. Residential light and risk for Depression and falls: Results from the LARES study of eight European cities. *Public Health Reports* 126, SUPPL. 1: 131–141. <https://doi.org/10.1177/00333549111260s117>
- [11] Kreier, F. , Kalsbeek, A. , Sauerwein, H. P. , Fliers, E. , Romijn, J. A. , Buijs, R. M. 2007. “Diabetes of the elderly” and type 2 diabetes in younger patients: Possible role of the biological clock. *Experimental Gerontology* 42, 1–2: 22–27.
<https://doi.org/10.1016/j.exger.2006.07.004>
- [12] Codoñer-Franch, P. , Gombert, M. 2018. Circadian rhythms in the pathogenesis of gastrointestinal diseases. *World Journal of Gastroenterology*: 4297–4303.

<https://doi.org/10.3748/wjg.v24.i38.4297>

- [13] Lucas, R. J. , Peirson, S. N. , Berson, D. M. , Brown, T. M. , Cooper, H. M. , Czeisler, C. A. , Figueiro, M. G., Gamlin, P. D., Lockley, S. W., O'Hagan. J. B., Price, L. L. A., Provencio, I., Skene, D. J., Brainard, G. C. 2014. Measuring and using light in the melanopsin age. *Trends in Neurosciences* 37, 1: 1–9.
<https://doi.org/10.1016/j.tins.2013.10.004>
- [14] Rea, M. S. , Figueiro, M. G. , Bierman, A. , Hamner, R. 2012. Modelling the spectral sensitivity of the human circadian system. *Lighting Research & Technology* 44, 4: 386–396. <https://doi.org/10.1177/1477153511430474>
- [15] Rea, M. S. , Figueiro, M. G. , Bierman, A. , Hamner, R. 2012. Corrigendum. *Lighting Research & Technology* 44, 4: 516–516.
<https://doi.org/10.1177/1477153512467607>
- [16] Figueiro, M. G. , Nagare R. , Price L. L. A. 2018. Non-visual effects of light: How to use light to promote circadian entrainment and elicit alertness. *Lighting Research & Technology* 50, 1: 38–62.
<https://doi.org/10.1177/1477153517721598>
- [17] Figueiro, M. G. , Kalsher, M. , Steverson, B. C. , Heerwagen, J. , Kampschroer, K. , Rea, M. S. 2019. Circadian-effective light and its impact on alertness in office workers. *Lighting Research & Technology* 51, 2: 171–183.
<https://doi.org/10.1177/1477153517750006>
- [18] Rea, M. S. 2019. Circadian-Effective Light.
<https://www.lrc.rpi.edu/cscalculator/img/CircadianEffectiveLight.pdf> (Dostopano 15. 2. 2021)
- [19] Cai, W. , Yue, J. , Dai, Q. , Hao, L. , Lin, Y. , Shi, W. , Huang, Y., Wei, M. 2018. The impact of room surface reflectance on corneal illuminance and rule-of-thumb equations for circadian lighting design. *Building and Environment* 141: 288–297.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.056>
- [20] Yao, Q. , Cai, W. , Li, M. , Hu, Z. , Xue, P. , Dai, Q. 2020. Efficient circadian daylighting: A proposed equation, experimental validation, and the consequent importance of room surface reflectance. *Energy and Buildings* 210: 109784: 1–16.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109784>
- [21] Inanici, M. , Brennan, M. , Clark, E. 2015. Spectral Daylighting Simulations: Computing Circadian Light. vol. 2015. Hyderabad, International Building Performance Simulation Association p. 1103–1109.

- [22] Hartman, P. , Maňková, L. , Hanuliak, P. , Hraška, J. 2015. Variation in Internal Space Surface Colors and its Possible Effect on Human Biological Responses in Daylight Conditions. *Energy Procedia* 78, Supplement C: 717–722.
[https://doi.org/ 10.1016/j.egypro.2015.11.079](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.079)
- [23] Potočnik, J. , Cadena, J. D. B. , Košir, M. , Poli, T. 2019. Occupant perception of spectral light content variations due to glazing type and internal finish. V: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 296.
- [24] Potočnik, J. , Košir, M. 2020. Influence of commercial glazing and wall colours on the resulting non-visual daylight conditions of an office. *Building and Environment* 171,106627:1–14.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106627>
- [25] Potočnik, J., Košir, M., 2021. Influence of geometrical and optical building parameters on the circadian daylighting of an office. *Journal of Building Engineering* 42: 102402.
[https://doi.org/ 10.1016/j.jobe.2021.102402](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102402)
- [26] Potočnik, J. , Košir, M. 2019. In-situ Determined Circadian and Visual Daylighting Potential of an Office.V: *International Conference on Sustainable Built Environment, SBE19 Seoul, Seoul, Koreja*.
- [27] Parsae, M., Demers, C., Hebert M., Lalonde, J., Potvin A. 2020. Development of shading panels for occupant's light-related health and well-being. V: *10th IAQVEC Conference (Indoor Air Quality, Ventilation & Energy Conservation in buildings): Healthy Nearly Zero Energy Buildings, Bari, Italija*.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31046.22080/1>
- [28] Lu, Y. , Wolf, T. , Kang, J. 2016. Optimization of facade design based on the impact of interior obstructions to daylighting. *Building Simulation* 9, 1: 1–14.
[https://doi.org/ 10.1007/s12273-015-0253-4](https://doi.org/10.1007/s12273-015-0253-4)
- [29] Amundadottir, M. L. , Rockcastle, S. , Sarey Khanie, M. , Andersen, M. 2017. A human-centric approach to assess daylight in buildings for non-visual health potential, visual interest and gaze behavior. *Building and Environment* 113: 5–21.
[https://doi.org/ 10.1016/j.buildenv.2016.09.033](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.09.033)
- [30] Malovrh Rebec, K. 2016. Merjeni in izračunani fotobiološki učinki odbite svetlobe na ljudi. *Gradbeni vestnik*, 67: 178–184.
- [31] Konis, K. 2018. Field evaluation of the circadian stimulus potential of daylit and non-daylit spaces in dementia care facilities. *Building and Environment* 135: 112–123.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.007>

- [32] Dittmar, M. 2001. Changing Colour Preferences with Ageing: A Comparative Study on Younger and Older Native Germans Aged 19–90 Years. *Gerontology* 47, 4: 219–226.
<https://doi.org/10.1159/000052802>
- [33] Malovrh Rebec, K. , Klanjšek-Gunde, M. , Bizjak, G. , Kobav, M. B. 2015. White LED compared with other light sources: age-dependent photobiological effects and parameters for evaluation. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics* 3: 391–398.
<https://doi.org/10.1080/10803548.2015.1085163>
- [34] Kobav, M. B. , Bizjak, G. , Klanjšek Gunde, M. , Malovrh Rebec, K. 2013. LED Spectra and its Photobiological Effects. *Light & Engineering* 21, 1: 22–27.
- [35] McManus, I. C. , Jones, A. L. , Cottrell, J. 1981. The aesthetics of colour. *Perception* , 10: 651–666.
- [36] Gelineau, E. P. 1981. A psychometric approach to the measurement of color preference. *Perceptual and Motor Skills* 53, 1: 163–174.
- [37] Livingston, J. 2014. *Designing With Light: The Art, Science and Practice of Architectural Lighting Design*. Hoboken, NJ, USA, John Wiley & Sons, Inc
- [38] CIE. 1983. *The Basis of Physical Photometry*, CIE Publication 18.2. Dunaj, Avstrija: CIE
- [39] CIE. 1990. *CIE 1988 2° Spectral Luminous Efficiency Function for Photopic Vision*, CIE Publication 86. Dunaj, Avstrija: CIE
- [40] Schanda, J. 2007. *CIE Colorimetry. V: Schanda, J. (ur.) , Colorimetry: Understanding the CIE System*, John Wiley & Sons, Inc p. 459.
- [41] Neitz, J. , Carroll, J. , Neitz, M. 2001. Color Vision: Almost Reason Enough for Having Eyes. *Optics & Photonics News*: 26–33.
- [42] CIE 1931 xy chromaticity space. 2021.
<https://en.wikipedia.org/wiki/Chromaticity#/media/File:PlanckianLocus.png>
(Pridobljeno 13. 4. 2021).
- [43] Block, J. , Bullough, J. , Figueiro M. , R.P. Morgan, M. *The IESNA Lighting Handbook: Reference & Application*. Ninth edition, Illuminating Engineering Society of North America.
- [44] Damjanovski, V. 2014. *Light and Television*. CCTV, Elsevier p. 26–60.
- [45] Kobav, M. B. , Dumortier, D. , Bizjak, G. 2020. Defining the minimum density of a sky luminance grid based on scale model measurements without the sun. *Building and Environment* 169,106562: 1–9.
<https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2019.106562>

- [46] Darula, S. , Kittler, R. 2002. CIE General Sky Standard Defining Luminance Distributions. Canadian conference on building energy simulation, Montreal, Canada p. 1–9.
- [47] CIE EN S003:1996. Spatial distribution of daylight - CIE standard overcast sky and clear sky.
- [48] ISO 15469: 2004. Spatial Distribution of Daylight - CIE Standard General Sky.
- [49] Ward, G. L. , Shakespeare, R. 2004. Daylight simulation. Charleston, Južna Karolina, ZDA, Booksurge LLC.
- [50] Mardaljevic, J. 2006. Examples of climate-based daylight modelling. V: CIBSE national conference: Engineering the Future, Oval Cricket Ground, London, UK p. 1–11.
- [51] Wilcox S., Marion W. 2008. Users Manual for TMY3 Data Sets: Technical Report NREL/TP-581-43156. A national laboratory of the U.S. Department of Energy: 58 str.
- [52] Abel, A. , Barbur, J. L. , Best, J. , Bonanomi, C. , Deraniyagala, H. , Goodman, T. M. , Haller, K., Hanson, A. R., Hidefi, M., Hurlbert, A., Hutchings, J. B., King, J. A., Kopacz, J., Ling, Y., Loe, D. L., MacDonald, J., Major, M., Femao, S., Rizzi, A., Rodriguez-Carmona, M., Setchell, J. S., Sik Lanyi, C., Szucs, V. 2017. Colour Design (Second Edition). Cambridge, Anglija, Woodhead Publishing.
- [53] Sarrabezolles, L. , Manzanera, A. , Hueber, N. , Perrot, M. , Raymond, P. 2017. Dual field combination for unmanned video surveillance. Real-Time Image and Video Processing 10223: 1-20.
<https://doi.org/10.1117/12.2262696>
- [54] Münch, M. , Brown, S. A. , Gjedde, A. , Kantermann, T. , Martiny, K. , Mersch, D. , Skene D.J., Wirz-Justice, A. 2017. The effect of light on humans. V: Sanders, S. (ur.) ,Oberst, J. (ur.) , Changing perspectives on dalylight: Science, technology and culture, Science/AAAS p. 16–23.
- [55] Forrester, J. V. , Dick, A. D. , McMenamin, P. G. , Roberts, F. , Pearlman, E. 2015. The eye: Basic sciences in practice. Elsevier Inc.
- [56] Berson, D. M. 2003. Strange vision: Ganglion cells as circadian photoreceptors. Trends in Neurosciences: 314–320.
[https://doi.org/10.1016/S0166-2236\(03\)00130-9](https://doi.org/10.1016/S0166-2236(03)00130-9)
- [57] Lazzerini Ospri, L. , Prusky, G. , Hattar, S. 2017. Mood, the Circadian System, and Melanopsin Retinal Ganglion Cells. Annual Review of Neuroscience 40, 1: 539–556.
<https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-072116-031324>
- [58] Bailes, H. J. , Lucas, R. J. 2013. Human melanopsin forms a pigment maximally

- sensitive to blue light ($\lambda_{\max} \approx 479$ nm) supporting activation of $G_{q/11}$ and $G_{i/o}$ signalling cascades. *V: Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 280, 1759: 2012–2987.
<https://doi.org/10.1098/rspb.2012.2987>
- [59] Panda, S. , Nayak, S. K. , Campo, B. , Walker, J. R. , Hogenesch, J. B. , Jegla, T. 2005. Illumination of the melanopsin signaling pathway. *Science* 307, 5709: 600–604.
<https://doi.org/10.1126/science.1105121>
- [60] Qiu, X. , Kumbalasisiri, T. , Carlson, S. M. , Wong, K. Y. , Krishna, V. , Provencio, I. , Berson D. M. 2005. Induction of photosensitivity by heterologous expression of melanopsin. *Nature* 433, 7027: 745–749.
<https://doi.org/10.1038/nature03345>
- [61] Al Enezi, J. , Revell, V. , Brown, T. , Wynne, J. , Schlangen, L. , Lucas, R. 2011. A “Melanopic” Spectral Efficiency Function Predicts the Sensitivity of Melanopsin Photoreceptors to Polychromatic Lights. *JOURNAL OF BIOLOGICAL RHYTHMS* 26, 4: 314–323.
<https://doi.org/10.1177/0748730411409719>
- [62] Touitou, Y. , Reinberg, A. , Touitou, D. 2017. Association between light at night, melatonin secretion, sleep deprivation, and the internal clock: Health impacts and mechanisms of circadian disruption. *Life Sciences*: 94–106.
<https://doi.org/10.1016/j.lfs.2017.02.008>
- [63] Wahl, S. , Engelhardt, M. , Schaupp, P. , Lappe, C. , Ivanov, I. V. 2019. The inner clock – Blue light sets the human rhythm. *Journal of Biophotonics* 12, 12: 1–14.
<https://doi.org/10.1002/jbio.201900102>
- [64] Lowrey, P. L. , Takahashi, J. S. 2004. MAMMALIAN CIRCADIAN BIOLOGY: Elucidating Genome-Wide Levels of Temporal Organization. *Annual Review of Genomics and Human Genetics* 5, 1: 407–441.
<https://doi.org/10.1146/annurev.genom.5.061903.175925>
- [65] Kondratov, R. V. , Gorbacheva, V. Y. , Antoch, M. P. 2007. The role of mammalian circadian proteins in normal physiology and genotoxic stress responses. *Current Topics in Developmental Biology* 78: 173–216.
[https://doi.org/10.1016/s0070-2153\(06\)78005-x](https://doi.org/10.1016/s0070-2153(06)78005-x)
- [66] Czeisler, C. A. , Duffy, J. F. , Shanahan, T. L. , Brown, E. N. , Mitchell, J. F. , Rimmer, D. W. , Ronda, J. M., Silva, E. J., Allan., J. S., Emens, J. S., Dijk, D., Kronauer, R. E. 1999. Stability, Precision, and Near-24-Hour Period of the Human Circadian Pacemaker.

- Science 284, 5423: 2177–2181.
<https://doi.org/10.1126/science.284.5423.2177>
- [67] Chang, A. M. , Santhi, N. , St Hilaire, M. , Gronfier, C. , Bradstreet, D. S. , Duffy, J. F. , Lockley, S. W., Kronauer, R.E., Czeisler, C. A. 2012. Human responses to bright light of different durations. *Journal of Physiology* 590, 13: 3103–3112.
<https://doi.org/10.1113/jphysiol.2011.226555>
- [68] Neupsy Key. 2016. Circadian Rhythm Sleep Disorders. Neupsy Key.
<https://neupsykey.com/circadian-rhythm-sleep-disorders-2/>
- [69] Selmaoui, B. , Touitou, Y. 2003. Reproducibility of the circadian rhythms of serum cortisol and melatonin in healthy subjects: A study of three different 24-h cycles over six weeks. *Life Sciences* 73, 26: 3339–3349.
<https://doi.org/10.1016/j.lfs.2003.05.007>
- [70] Figueiro, M. G. , Rea, M. S. 2010. The Effects of Red and Blue Lights on Circadian Variations in Cortisol, Alpha Amylase, and Melatonin. *International Journal of Endocrinology* 2010: 1–9.
<https://doi.org/10.1155/2010/829351>
- [71] Khalsa, S. B. S. , Jewett, M. E. , Cajochen, C. , Czeisler, C. A. 2003. A Phase Response Curve to Single Bright Light Pulses in Human Subjects. *The Journal of Physiology* 549, 3: 945–952.
<https://doi.org/10.1113/jphysiol.2003.040477>
- [72] St Hilaire, M. A. , Gooley, J. J. , Khalsa, S. B. S. , Kronauer, R. E. , Czeisler, C. A. , Lockley, S. W. 2012. Human phase response curve to a 1 h pulse of bright white light. *Journal of Physiology* 590, 13: 3035–3045.
<https://doi.org/10.1113/jphysiol.2012.227892>
- [73] Saeed, Y. , Zee, P. C. , Abbott, S. M. 2019. Clinical neurophysiology of circadian rhythm sleep–wake disorders. *Handbook of Clinical Neurology*, vol. 161. Elsevier B.V. 369–380 str.
- [74] Emens, J. S. , Burgess, H. J. 2015. Effect of light and melatonin and other melatonin receptor agonists on human circadian physiology. *Sleep Medicine Clinics*: 435–453.
<https://doi.org/10.1016/j.jsmc.2015.08.001>
- [75] Hébert, M. , Martin, S. K. , Lee, C. , Eastman, C. I. 2002. The effects of prior light history on the suppression of melatonin by light in humans. *Journal of Pineal Research* 33, 4: 198–203.
<https://doi.org/10.1034/j.1600-079X.2002.01885.x>

- [76] Chang, A. M. , Scheer, F. A. J. L. , Czeisler, C. A. 2011. The human circadian system adapts to prior photic history. *Journal of Physiology* 589, 5: 1095–1102.
<https://doi.org/10.1113/jphysiol.2010.201194>
- [77] Robert J Lucas. , Stuart N Peirson. , David Berson. , Timothy Brown. , Howard Cooper. , Charles A Czeisler. 2013. Irradiance toolbox.
- [78] Brainard, G. C. , Hanifin, J. P. , Greeson, J. M. , Byrne, B. , Glickman, G. , Gerner, E. , Rollag, M. 2001. Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor. *Journal of Neuroscience* 21, 16: 6405–6412.
- [79] Thapan, K. , Arendt, J. , Skene, D. J. 2001. An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. *The Journal of Physiology* 535, Pt 1: 261–267.
- [80] Rea, M. S. , Figueiro, M. G. , Bullough, J. D. , Bierman, A. 2005. A model of phototransduction by the human circadian system. *Brain Research Reviews* 50, 2: 213–228.
<https://doi.org/10.1016/j.brainresrev.2005.07.002>
- [81] Figueiro, M. G. , Bullough, J. D. , Parsons, R. H. , Rea, M. S. 2004. Preliminary evidence for spectral opponency in the suppression of melatonin by light in humans. *Neuroreport* 15, 2: 313–316.
<https://doi.org/10.1097/00001756-200402090-00020>
- [82] Figueiro, M. G. , Bierman, A. , Rea, M. S. 2008. Retinal mechanisms determine the subadditive response to polychromatic light by human circadian system. *Neuroscience Letters* 438, 2: 242–245.
<https://doi.org/10.1016/j.neulet.2008.04.055>
- [83] Amundadottir, M. L. , Lockley, S. W. , Andersen, M. 2017. Unified framework to evaluate non-visual spectral effectiveness of light for human health. *Lighting Research & Technology* 49, 6: 673–696.
<https://doi.org/10.1177/1477153516655844>
- [84] Sagawa, K. , Takahashi, Y. 2001. Spectral luminous efficiency as a function of age. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision* 18, 11: 2659–2667.
- [85] CIE EN S026:2018. CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to light.
- [86] Spitschan, M. , Lucas, R. J. , Brown, T. M. 2017. Chromatic clocks: Color opponency in non-image-forming visual function. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* 78: 24–33.

- <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.04.016>
- [87] Spitschan, M. 2019. Melanopsin contributions to non-visual and visual function. *Current Opinion in Behavioral Sciences*: 67–72.
<https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2019.06.004>
- [88] Brainard, G. C. , Sliney, D. , Hanifin, J. P. , Glickman, G. , Byrne, B. , Greeson, J. M. , Jasser, S., Gerner, E., Rollag, M. D. 2008. Sensitivity of the Human Circadian System to Short-Wavelength (420-nm) Light. *Journal of Biological Rhythms* 23, 5: 379–386.
<https://doi.org/10.1177/0748730408323089>
- [89] Rea, M. S. , Figueiro, M. G. 2013. A Working Threshold for Acute Nocturnal Melatonin Suppression from “White” Light Sources used in Architectural Applications. *Journal of Carcinogenesis & Mutagenesis* 4, 3: 1–6.
<https://doi.org/10.4172/2157-2518.1000150>
- [90] Figueiro, M. , Overington, D. 2016. Self-luminous devices and melatonin suppression in adolescents. *Lighting Research & Technology* 48, 8: 966–975.
<https://doi.org/10.1177/1477153515584979>
- [91] Wood, B. , Rea, M. S. , Plitnick, B. , Figueiro, M. G. 2013. Light level and duration of exposure determine the impact of self-luminous tablets on melatonin suppression. *Applied Ergonomics* 44, 2: 237–240.
<https://doi.org/10.1016/j.apergo.2012.07.008>
- [92] G, F. M. , Brittany, W. , Plitnick, B. , Rea, M. S. 2012. The impact of light from computer monitors on melatonin levels in college students. *Neuro Endocrinology Letters* 32, 2: 158–163.
- [93] Young, C. R. , Jones, G. E. , Figueiro, M. G. , Soutière, S. E. , Keller, M. W. , Richardson, A. M. , Lehmann, B. J., Rea, M. S. 2015. At-sea trial of 24-h-based submarine watchstanding schedules with high and low correlated color temperature light sources. *Journal of biological rhythms* 30, 2: 144–154.
<https://doi.org/10.1177/0748730415575432>
- [94] Figueiro, M. G. , Plitnick, B. A. , Lok, A. , Ejones, G. E. , Higgins, P. , Rhornick, T. R. , Rea, M. S. 2014. Tailored lighting intervention improves measures of sleep, depression, and agitation in persons with Alzheimer’s disease and related dementia living in long-term care facilities. *Clinical Interventions in Aging* 9: 1527–1537.
<https://doi.org/10.2147/CIA.S68557>
- [95] Figueiro, M. G. , Plitnick, B. , Rea, M. S. 2016. Research Note: A self-luminous light table for persons with Alzheimer’s disease. *Lighting Research and Technology* 48, 2:

253–259.

<https://doi.org/10.1177/1477153515603881>

- [96] Figueiro, M. G. , Steverson, B. , Heerwagen, J. , Kampschroer, K. , Hunter, C. M. , Gonzales, K. , Plitnick, B., Rea, M. S. 2017. The impact of daytime light exposures on sleep and mood in office workers. *Sleep Health* 3, 3: 204–215.
<https://doi.org/10.1016/j.sleh.2017.03.005>
- [97] Figueiro, M. , Rea, M. 2016. Office lighting and personal light exposures in two seasons: Impact on sleep and mood. *Lighting Research & Technology* 48, 3: 352–364.
<https://doi.org/10.1177/1477153514564098>
- [98] Figueiro, M. G. , Hunter, C. M. , Higgins, P. A. , Hornick, T. R. , Jones, G. E. , Plitnick, B. , Brons, J., Rea, M. S. 2015. Tailored lighting intervention for persons with dementia and caregivers living at home. *Sleep Health* 1, 4: 322–330.
<https://doi.org/10.1016/j.sleh.2015.09.003>
- [99] Foster, R. G. , Wulff, K. 2005. The rhythm of rest and excess. *Nature Reviews Neuroscience*: 407–414.
<https://doi.org/10.1038/nrn1670>
- [100] Alhola, P. , Polo-Kantola, P. 2007. Sleep deprivation: Impact on cognitive performance. *Neuropsychiatric Disease and Treatment*: 553–367.
- [101] Baron, K. G. , Reid, K. J. 2014. Circadian misalignment and health. *International Review of Psychiatry* 26, 2: 139–154.
<https://doi.org/10.3109/09540261.2014.911149>
- [102] Painting, Firefighting, and Shiftwork - NCBI Bookshelf.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK326814/> (Pridobljeno 27. 7. 2020).
- [103] Straif, K. , Baan, R. , Grosse, Y. , Secretan, B. , El Ghissassi, F. , Bouvard, V. , Altieri A., Benbrahim-Talla, L., Coglianò V. 2007. Carcinogenicity of shift-work, painting, and fire-fighting. *The lancet oncology*: 1065–1066.
[https://doi.org/10.1016/s1470-2045\(07\)70373-x](https://doi.org/10.1016/s1470-2045(07)70373-x)
- [104] International Agency for Research on Cancer. 2021. IARC monographs on the identification of carcinogenic hazards to humans.
<https://monographs.iarc.who.int/list-of-classifications> (Pridobljeno 01. 03. 2021).
- [105] Young, M. E. , Bray, M. S. 2007. Potential role for peripheral circadian clock dyssynchrony in the pathogenesis of cardiovascular dysfunction. *Sleep Medicine* 8, 6: 656–667.
<https://doi.org/10.1016/j.sleep.2006.12.010>

- [106] Poole, E. M. , Schernhammer, E. S. , Tworoger, S. S. 2011. Rotating night shift work and risk of ovarian cancer. *Cancer Epidemiology Biomarkers and Prevention* 20, 5: 934–938.
<https://doi.org/10.1158/1055-9965.EPI-11-0138>
- [107] Kvaskoff, M. , Weinstein, P. 2010. Are some melanomas caused by artificial light? *Medical Hypotheses* 75, 3: 305–311. <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2010.03.010>
- [108] Haus, E. , Smolensky, M. 2006. Biological clocks and shift work: Circadian dysregulation and potential long-term effects. *Cancer Causes and Control*: 489–500.
<https://doi.org/10.1007/s10552-005-9015-4>
- [109] Mahoney, M. M. 2010. Shift Work, Jet Lag, and Female Reproduction. *International Journal of Endocrinology* 2010: 813764. <https://doi.org/10.1155/2010/813764>
- [110] Boyce, P. , Bariball, E. 2010. Circadian Rhythms and Depression. *Australian Family Physician* 39, 5: 307–310.
- [111] Walker, W. H. , Walton, J. C. , DeVries, A. C. , Nelson, R. J. 2020. Circadian rhythm disruption and mental health. *Translational Psychiatry*: 1–13.
<https://doi.org/10.1038/s41398-020-0694-0>
- [112] Gooley, J. J. 2008. Treatment of circadian rhythm sleep disorders with light. *Annals of the Academy of Medicine, Singapore* 37, 8: 669–676.
- [113] Roenneberg, T. , Kuehnle, T. , Juda, M. , Kantermann, T. , Allebrandt, K. , Gordijn, M. , Merrow, M. 2007. Epidemiology of the human circadian clock. *Sleep Medicine Reviews*: 429–438.
<https://doi.org/10.1016/j.smrv.2007.07.005>
- [114] Paine, S.-J. , Gander, P. H. , Travier, N. 2006. The epidemiology of morningness/eveningness: influence of age, gender, ethnicity, and socioeconomic factors in adults (30–49 years). *Journal of biological rhythms* 21, 1: 68–76.
<https://doi.org/10.1177/0748730405283154>
- [115] Merikanto, I. , Lahti, T. , Kronholm, E. , Peltonen, M. , Laatikainen, T. , Vartiainen, E. , Salomaa, V., Partonen, T. 2013. Evening types are prone to depression. *Chronobiology International* 30, 5: 719–725.
<https://doi.org/10.3109/07420528.2013.784770>
- [116] SIST EN410: 2011. 2011. Glass in building - Determination of luminous and solar characteristics of glazing.
- [117] Shikder, S. , Price, A. D. F. , Mourshed, M. 2009. Evaluation of four artificial lighting simulation tools with virtual building reference. V: *European Simulation and*

- Modelling Conference 2009, Leicester, United Kingdom p. 1–7.
- [118] AMcneil. 2017. RADSITE: radiance-online: Documentation.
<https://www.radiance-online.org/learning/documentation> (Pridobljeno 10/28/2020).
- [119] Inanici, M. , LLP, Z. A. 2015. Lark Spectral Lighting.
http://faculty.washington.edu/inanici/Lark/Lark_home_page.html (Pridobljeno 30. 10. 2020).
- [120] LLC Sollemma. 2020. ALFA - Adaptive Lighting for Alertness.
<https://www.sollemma.com/Alfa.html> (Pridobljeno 30. 10. 2020).
- [121] Ruppertsberg, A. I. , Bloj, M. 2006. Rendering complex scenes for psychophysics using RADIANCE: How accurate can you get? *Journal of the Optical Society of America A* 23, 4: 759–768.
<https://doi.org/10.1364/josaa.23.000759>
- [122] Robert McNeel & Associates. 2019. Rhinoceros V6. <https://www.rhino3d.com/> (Pridobljeno 15. 5. 2019).
- [123] Grasshopper. 2020. Algorithmic modelling for Rhino.
<https://www.grasshopper3d.com/> (Pridobljeno 30. 10. 2020).
- [124] Welcome to Python.org.
<https://www.python.org/> (Pridobljeno 23. 4. 2020).
- [125] John, S. 2017. ADAPTIVE LIGHTING FOR ALERTNESS.
https://solemma.com/img/Events/2017/DD2017_3-d_Sargent.pdf (Pridobljeno 23. 4. 2020).
- [126] Balakrishnan, P. 2019. Measuring and Modelling Equatorial Light. Singapore University of Technology and Design (samozaložba Balakrishnan, P.): str. 126
- [127] IGDB: Windows and Daylighting. <https://windows.lbl.gov/software/igdb> (Pridobljeno 23. 4. 2020).
- [128] Emde, C. , Buras-Schnell, R. , Kylling, A. , Mayer, B. , Gasteiger, J. , Hamann, U. , Kylling, J., Richter, B., Pause, C., Dowling, T., Bugliaro, L. 2016. The libRadtran software package for radiative transfer calculations (version 2.0.1). *Geoscientific Model Development* 9, 5: 1647–1672.
<https://doi.org/10.5194/gmd-9-1647-2016>
- [129] Anderson, G. P. 1986. AFGL atmospheric constituent profile (0.120 km).
- [130] Bruneton, E. 2017. A Qualitative and Quantitative Evaluation of 8 Clear Sky Models. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 23, 12: 2641–2655.

- <https://doi.org/10.1109/TVCG.2016.2622272>
- [131] StellarNet Inc. 2018. Black-Comet-SR Spectrometer. StellarNet Inc.
<https://www.stellarnet.us/software/> (Pridobljeno 19.8.2018).
- [132] DIN 5032-7: 2017. Photometry - Part 7: Classification of illuminance meters and luminance meters.
- [133] Radiation Probes for various spectral ranges - Ahlborn Meß- und Regelungstechnik GmbH.
https://www.ahlborn.com/en_UK/products/radiation-probes-for-various-spectral-ranges#technik (Pridobljeno 20. 4. 2020).
- [134] Weather Data | EnergyPlus.
<https://energyplus.net/weather> (Pridobljeno 5. 5. 2020).
- [135] SIST EN 410: 2011. Steklo v gradbeništvu - Določevanje svetlobnih in sončnih karakteristik stekla.
- [136] 2020. Department of Architecture, Built Environment and Construction Engineering (DABC).
https://www2.polimi.it/index.php%3Fid=6098&L=1&sel_dipartimento=33303461.html (Pridobljeno 16. 11. 2020).
- [137] PerkinElmer. Lambda 650, 800, and 950, Spectrophotometers.
<https://www.perkinelmer.com>. (Pridobljeno 21. 4. 2020).
- [138] Reflex d.d. 2019. REFLEX.
<http://www.reflex.si/en/> (Pridobljeno 16. 11. 2020).
- [139] Lawrence Berkley National Laboratory. 2019. Optics Software Downloads: Windows and Daylighting.
<https://windows.lbl.gov/tools/optics/software-download>. (Pridobljeno 21. 4. 2020).
- [140] SIST EN 15232-1: 2018. Energijske lastnosti stavb - 1. del: Vpliv avtomatizacije, regulacije in upravljanja stavb - Moduli M10-4, 5, 6, 7, 8, 9, 10.
- [141] Chen, X. , Zhang, X. , Du, J. 2019. Glazing type (colour and transmittance), daylighting, and human performances at a workspace: A full-scale experiment in Beijing. *Building and Environment* 153: 168–185.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.02.034>
- [142] Circadian lighting design | WELL Standard.
<https://standard.wellcertified.com/light/circadian-lighting-design> (Pridobljeno 25. 11. 2020).
- [143] Van Den Wymelenberg, K. , Inanici, M. 2014. A critical investigation of common

- lighting design metrics for predicting human visual comfort in offices with daylight. *LEUKOS - Journal of Illuminating Engineering Society of North America* 10, 3: 145–164.
<https://doi.org/10.1080/15502724.2014.881720>
- [144] Jakubiec, J. A. , Reinhart, C. F. , Van Den Wymelenberg, K. 2015. Towards an integrated framework for predicting visual comfort conditions from luminance-based metrics in perimeter daylit spaces. V: *Proceedings of BS2015: 14th Conference of International Building Performance Simulation Association, Hyderabad, India. December 7-9, 2015.* p. 1189–96.
- [145] Karlsen, L. , Heiselberg, P. , Bryn, I. , Johra, H. 2015. Verification of simple illuminance based measures for indication of discomfort glare from windows. *Building and Environment* 92: 615–626.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.040>
- [146] Bian, Y. , Luo, T. 2017. Investigation of visual comfort metrics from subjective responses in China: A study in offices with daylight. *Building and Environment* 123: 661–671.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.035>
- [147] Suk, J. , Schiler, M. 2013. Investigation of Evalglare software, daylight glare probability and high dynamic range imaging for daylight glare analysis. *Lighting Research & Technology* 45, 4: 450–463.
<https://doi.org/10.1177/1477153512458671>
- [148] Suk, J. Y. 2019. Luminance and vertical eye illuminance thresholds for occupants' visual comfort in daylit office environments. *Building and Environment* 148: 107–115.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.058>
- [149] Chain, C. , Dumortier, D. , Fontoynt, M. 2001. Consideration of daylight's colour. *Energy and Buildings* 33, 3: 193–198. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00081-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00081-5)
- [150] Ghosh, A. , Norton, B. 2017. Interior colour rendering of daylight transmitted through a suspended particle device switchable glazing. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 163: 218–223. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.01.041>
- [151] Balantič, Z. , Polajnar, A. , Jevšnik, S. 2016. *Ergonomija v teoriji in praksi.* Ljubljana, Nacionalni inštitut za javno zdravje, Slovenija.
- [152] Suk, J. Y. , Schiler, M. , Kensek, K. 2013. Development of new daylight glare analysis methodology using absolute glare factor and relative glare factor. *Energy and Buildings* 64: 113–122.

- <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.04.020>
- [153] Ghosh, A. , Norton, B. 2017. Interior colour rendering of daylight transmitted through a suspended particle device switchable glazing. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 163: 218–223.
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.01.041>
- [154] Figueiro, M. , Kalsher, M. , Steverson, B. , Heerwagen, J. , Kampschroer, K. , Rea, M. 2019. Circadian-effective light and its impact on alertness in office workers. *Lighting Research & Technology* 51, 2: 171–183.
<https://doi.org/10.1177/1477153517750006>
- [155] Lo Verso, V. R. M. , Mihaylov, G. , Pellegrino, A. , Pellerey, F. 2017. Estimation of the daylight amount and the energy demand for lighting for the early design stages: Definition of a set of mathematical models. *Energy and Buildings* 155: 151–165.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.014>
- [156] Nabil, A. , Mardaljevic, J. 2005. Useful daylight illuminance: A new paradigm for assessing daylight in buildings. *Lighting Research and Technology* 37, 1: 41–59.
<https://doi.org/10.1191/1365782805li146ed>
- [157] list RS št. 89/99, 39/05 43/11 – ZVZD-1. 2011. Pravilnik o zahtevah za zagotavljanje varnosti in zdravja delavcev na delovnih mestih.
- [158] Bodart, M. , De Herde, A. 2002. Global energy savings in offices buildings by the use of daylighting. *Energy and Buildings* 34, 5: 421–429.
[https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00117-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00117-7)
- [159] Goia, F. 2016. Search for the optimal window-to-wall ratio in office buildings in different European climates and the implications on total energy saving potential. *Solar Energy* 132: 467–492.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.031>
- [160] Méndez Echenagucia, T. , Capozzoli, A. , Cascone, Y. , Sassone, M. 2015. The early design stage of a building envelope: Multi-objective search through heating, cooling and lighting energy performance analysis. *Applied Energy* 154: 577–591.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.090>
- [161] Ma, P. , Wang, L. S. , Guo, N. 2015. Maximum window-to-wall ratio of a thermally autonomous building as a function of envelope U-value and ambient temperature amplitude. *Applied Energy* 146: 84–91.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.103>
- [162] The Mathworks Inc. 2020. MATLAB - MathWorks - MATLAB & Simulink.

- <https://uk.mathworks.com/products/matlab.html>. (Pridobljeno 25. 11. 2020.)
- [163] Figueiro, M. G. 2017. Disruption of Circadian Rhythms by Light During Day and Night. *Current Sleep Medicine Reports* 3, 2: 76–84.
<https://doi.org/10.1007/s40675-017-0069-0>
- [164] Figueiro, M. G. , Nagare, R. , Price, L. L. A. 2018. Non-visual effects of light: How to use light to promote circadian entrainment and elicit alertness. *Lighting Research & Technology* 50, 1: 38–62.
<https://doi.org/10.1177/1477153517721598>
- [165] RStudio Inc. 2018. R-studio.
<https://www.rstudio.com/>. (Pridobljeno 09/15/2018.)
- [166] Hair, J. 2010. *Multivariate data analysis : a global perspective*. 7th ed. , Upper Saddle River N.J. London, Pearson Education.
- [167] Ladybug Tools LLC. 2021. Ladybug tools.
<https://www.ladybug.tools> (Pridobljeno 18. 2. 2021).
- [168] Nabil, A. , Mardaljevic, J. 2006. Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors. *Energy and Buildings* 38, 7: 905–913.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.013>
- [169] Mardaljevic, J. , Andersen, M. , Roy, N. , Christoffersen, J. 2011. Daylighting Metrics for Residential Buildings.V: CIE 197:20011 Proceedings of the 27th Session of the CIE, Sun City/ZA p. 93–111.
- [170] Bellia, L. , Bisegna, F. , Spada, G. 2011. Lighting in indoor environments: Visual and non-visual effects of light sources with different spectral power distributions. *Building and Environment* 46, 10: 1984–1992.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.04.007>
- [171] Malovrh Rebec, K. 2014. Optične lastnosti, fotobiološki in okoljski učinki svetilk s svetlečimi diodami. Univerza v Ljubljani (samozaložba Malovrh Rebec, K.): 130 str.
- [172] Mangkuto, R. A. , Dewi, D. K. , Herwandani, A. A. , Koerniawan, M. D. , Faridah. 2019. Design optimisation of internal shading device in multiple scenarios: Case study in Bandung, Indonesia. *Journal of Building Engineering* 24, 100745: 1–18.
<https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100745>
- [173] Marzouk, M. , Eissa, A. , ElSharkawy, M. 2020. Influence of light redirecting control element on daylight performance: A case of egyptian heritage palace skylight. *Journal of Building Engineering* 31: 101309.
<https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101309>

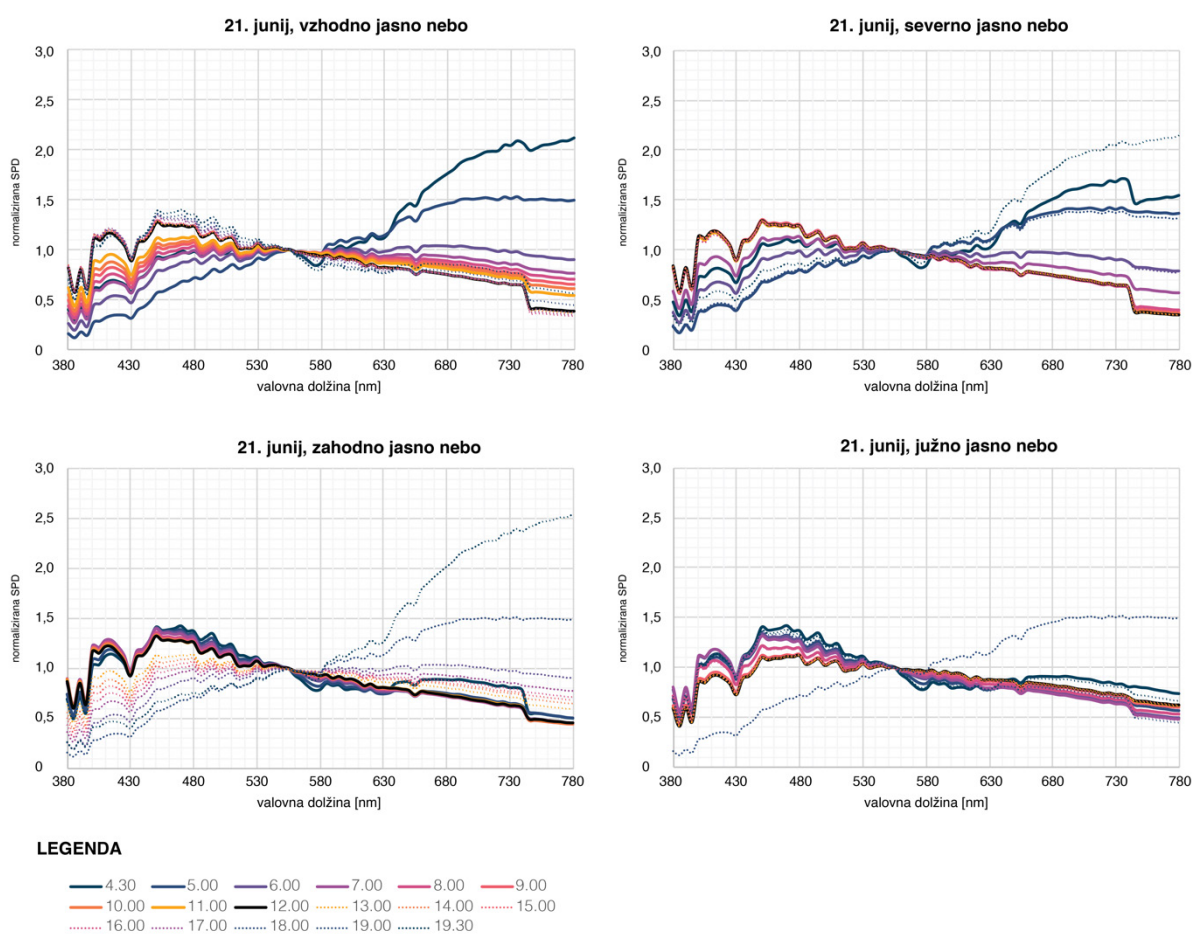
- [174] Parsaee, M. , Demers, C. M. H. , Lalonde, J.-F. , Potvin, A. , Inanici, M. , Hébert, M. 2020. Human-centric lighting performance of shading panels in architecture: A benchmarking study with lab scale physical models under real skies. *Solar Energy* 204: 354–368.
[https://doi.org/ 10.1016/j.solener.2020.04.088](https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.088)
- [175] European Parliament, C. of the E. U. Regulation EU 2016/679.
- [176] Potočnik, J. , Košir, M. , Dovjak, M. 2020. Colour preference in relation to personal determinants and implications for indoor circadian luminous environment. *Indoor and Built Environment*.
[https://doi.org/ 10.1177/1420326X20977609](https://doi.org/10.1177/1420326X20977609)
- [177] Ling, Z. , Hurlbert, A. 2011. Age-dependanc of colour preference in the U.K. population. V: Biggam, C. P. (ur.) ,Hough, C. P. (ur.) ,Kay, C. J. (ur.) ,Simmons, D. R. (ur.) , *New Directions in Colour Studies*, Amsterdam, The Netherlands, John Benjamins Publishing Company p. 347–360.
- [178] Sinha, L. N. K. , Krishna, K. P. , Sinha, J. K. 1970. Sex differences in colour preference of adolescents. *MANAS* 17: 17–20
- [179] Silver, N. C. , Mc Culley, W. L. , Chambliss, L. N. , Charles, C. M. , Smith, A. A. , Waddell, W. M. , Winfeld, E. 1988. Sex and Racial Differences in Color and Number Preferences. *Perceptual and Motor Skills* 66, 1: 295–299.
<https://doi.org/10.2466/pms.1988.66.1.295>
- [180] Bonnardel, V. , Harper, L. , Duffie, F. , Bimler, D. L. 2006. Gender differences in colour preference: men are more predictable than women. *Perception* , 35: 187.
- [181] Dorcus, R. N. 1926. Colour preferences with ageing: A comparative study on younger and older native German aged 19-90 years. *Journal of Genetic Psychology* , 33: 399–434.
- [182] Bellia, L. , Pedace, A. , Fragliasso, F. 2017. Indoor lighting quality: Effects of different wall colours. *Lighting Research & Technology* 49, 1: 33–48.
[https://doi.org/ 10.1177/1477153515594654](https://doi.org/10.1177/1477153515594654)
- [183] Dulux. Dulux ideas. <https://www.dulux.co.uk/en/colour-inspiration> (Pridobljeno 15. 6. 2019).
- [184] Lam, F. 2021. Applying light for human health: What lighting designer need to know. *Lighting Research and Technology* 53: 485–487.
<https://doi.org/10.1177/1477153521996767>
- [185] Mardaljevic, J. 2021. The implementation of natural lighting for human health from a

- planning perspective. *Lighting Research and Technology* 53: 489– 513.
<https://doi.org/10.1177/14771535211022145>
- [186] Bailes, H. J. , Lucas, R. J. 2013. Human melanopsin forms a pigment maximally sensitive to blue light ($\lambda_{\max} \approx 479$ nm) supporting activation of Gq/11 and Gi/o signalling cascades. *Proc. R. Soc. B* 280, 1759: 2012–2987.
<https://doi.org/10.1098/rspb.2012.2987>
- [187] Hattar, S. , Liao, H. W. , Takao, M. , Berson, D. M. , Yau, K. W. 2002. Melanopsin-containing retinal ganglion cells: architecture, projections, and intrinsic photosensitivity. *Science (New York, N.Y.)* 295, 5557: 1065–1070.
<https://doi.org/10.1126/science.1069609>
- [188] Milosavljevic, N. 2019. How Does Light Regulate Mood and Behavioral State? *Clocks & Sleep* 1, 3: 319–331.
<https://doi.org/10.3390/clockssleep1030027>
- [189] Davis, S. , Kaune, W. T. , Mirick, D. K. , Chen, C. , Stevens, R. G. 2001. Residential magnetic fields, light-at-night, and nocturnal urinary 6-sulfatoxymelatonin concentration in women. *American Journal of Epidemiology* 154, 7: 591–600.
- [190] Dovjak, M. , Kukec, A. 2019. *Creating Healthy and Sustainable Buildings*. Cham, Switzerland, Springer Nature Switzerland AG.
- [190] Werner, J. S. 2016. The Verriest Lecture: Short-wave-sensitive cone pathways across the life span. *Journal of Optical Society of America A* 33, 3: 104–122.
<https://doi.org/10.1364/josaa.33.00a104>

PRILOGE

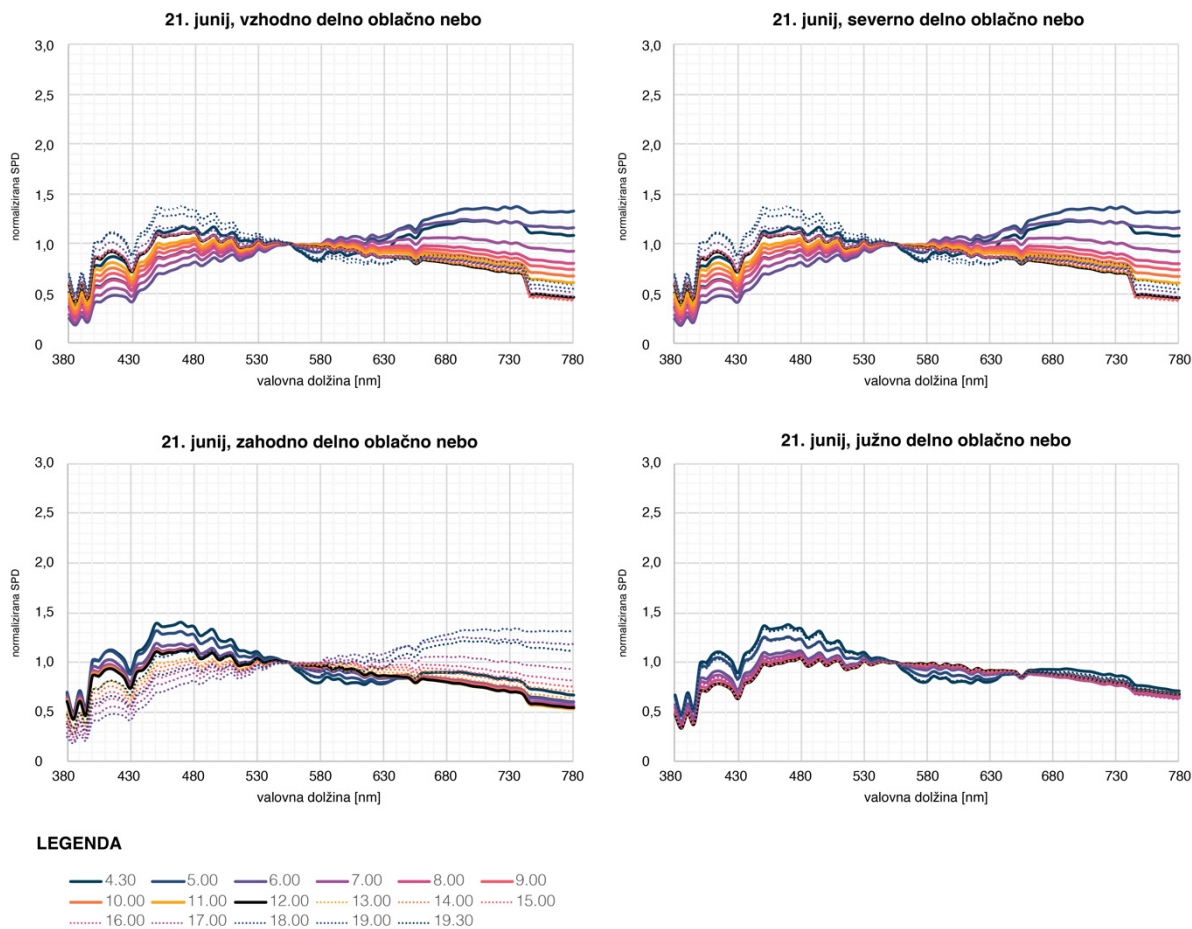
PRILOGA A.1

V tem delu prilog so predstavljene spektralne sevalne distribucije stanj neba za svetle dele dneva 21. junija, 21. marca in 21. decembra, ki so bile uporabljene pri proučitvi obnašanja metrike *RCU* pri različnih magnitudah osvetljenosti v prilogi A.2 in pri ocenjevanju cirkadianega svetlobnega okolja pri spremenljivih svetlobnih razmerah v 5. poglavju. Spektri so izračunani s pomočjo programa ALFA, po metodi, predstavljeni v poglavju 2.6.2.



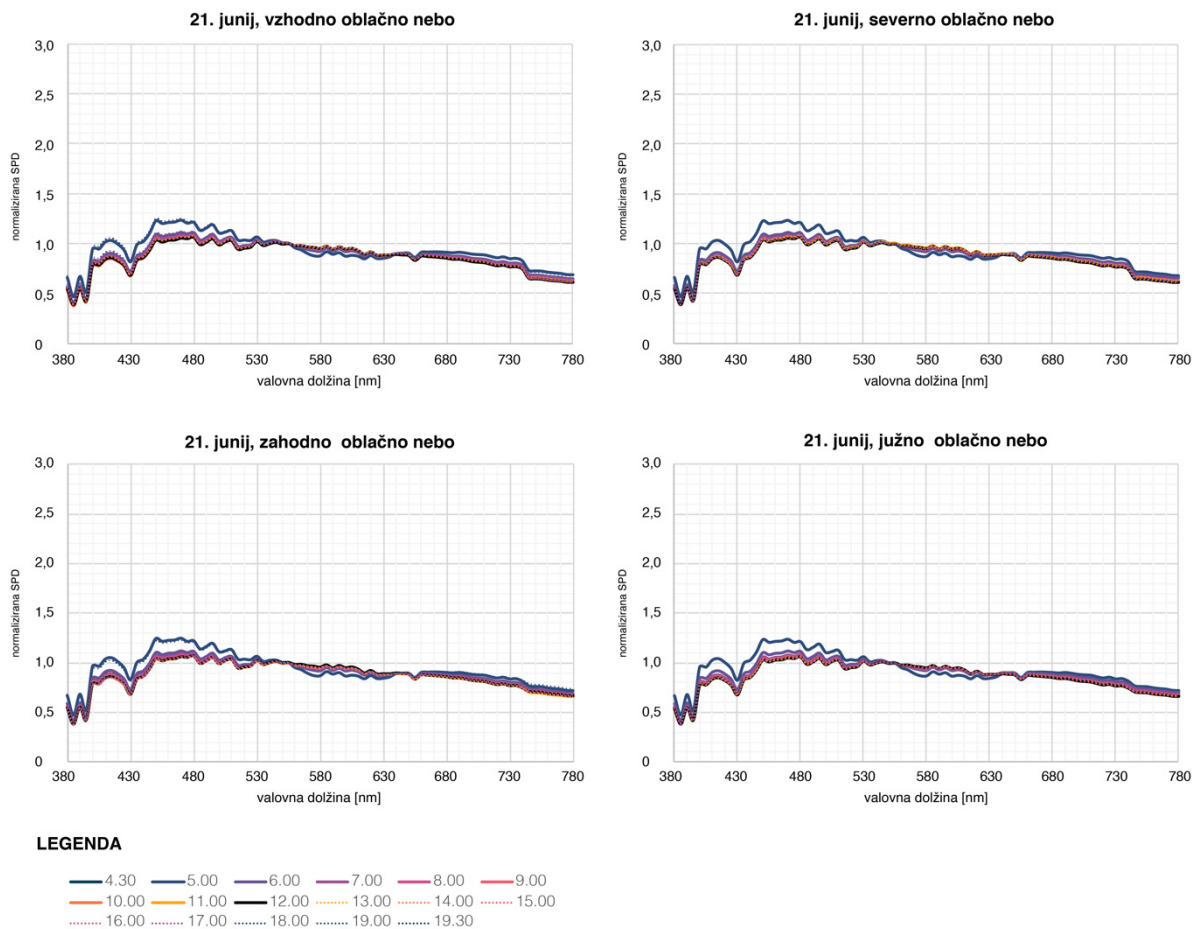
Slika A.1: Normalizirana spektralna gostota sevalne moči 21. junija za Ljubljano, vzhodnega, severnega, zahodnega in južnega jasnega neba.

Figure A.1: Normalised spectral power distribution for the 21st of July for Ljubljana's eastern, northern, western and southern clear sky.



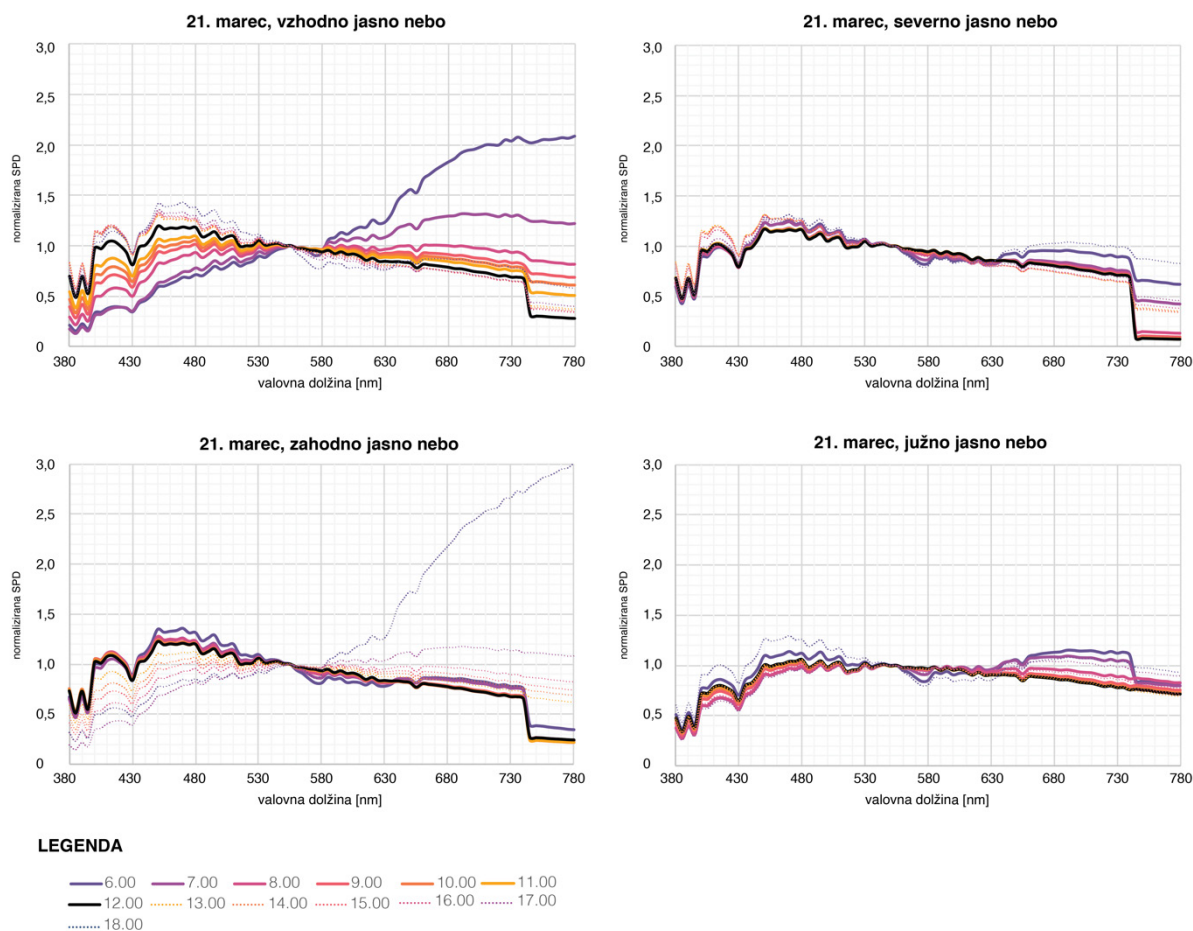
Slika A.2: Normalizirana spektralna gostota sevalne moči 21. junija za Ljubljano, vzhodnega, severnega, zahodnega in južnega delno oblačnega neba.

Figure A.2: Normalised spectral power distribution for the 21st of June for Ljubljana's eastern, northern, western and southern intermediate sky.

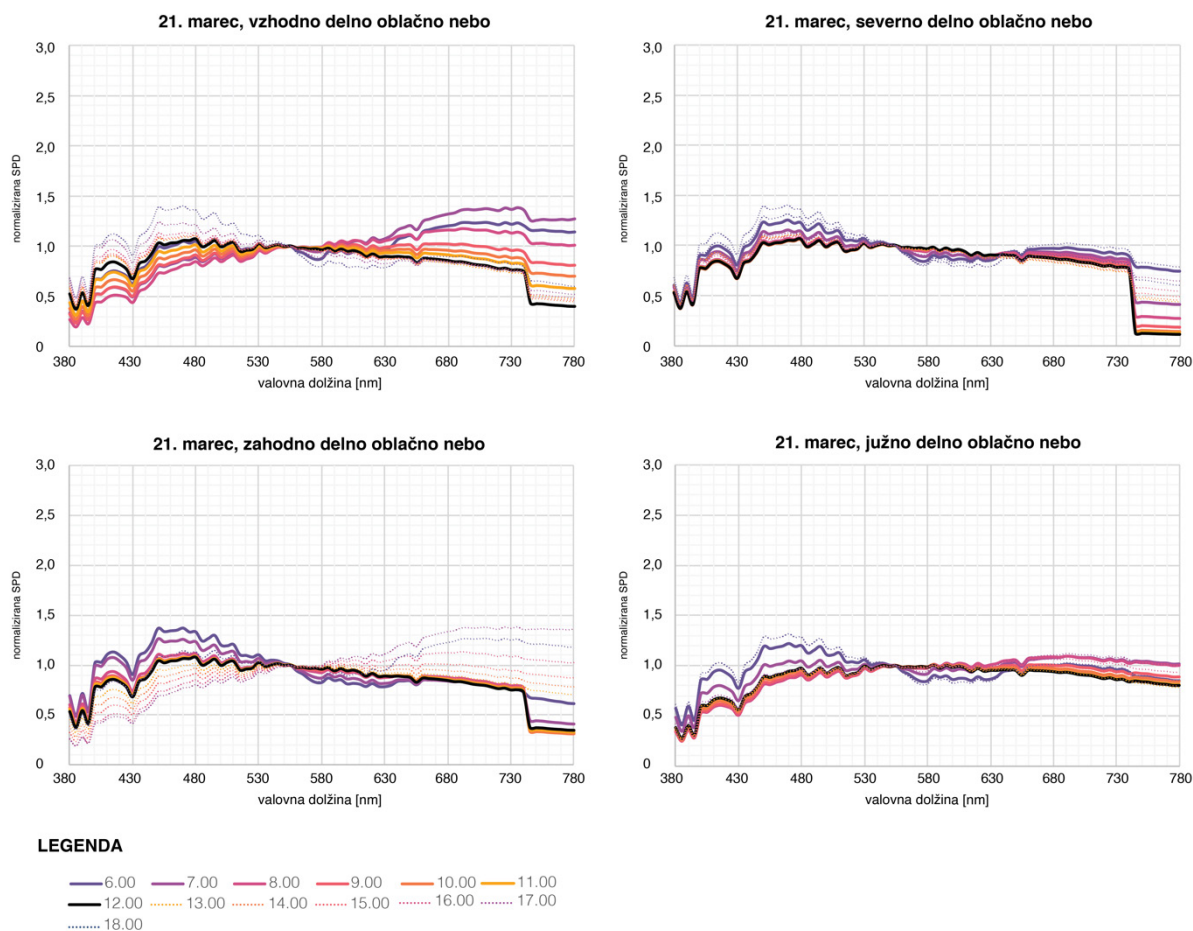


Slika A.3: Normalizirana spektralna gostota sevalne moči 21. junija za Ljubljano, vzhodnega, severnega, zahodnega in južnega oblačnega neba.

Figure A.3: Normalised spectral power distribution for the 21st of June for Ljubljana's eastern, northern, western and southern cloudy sky.

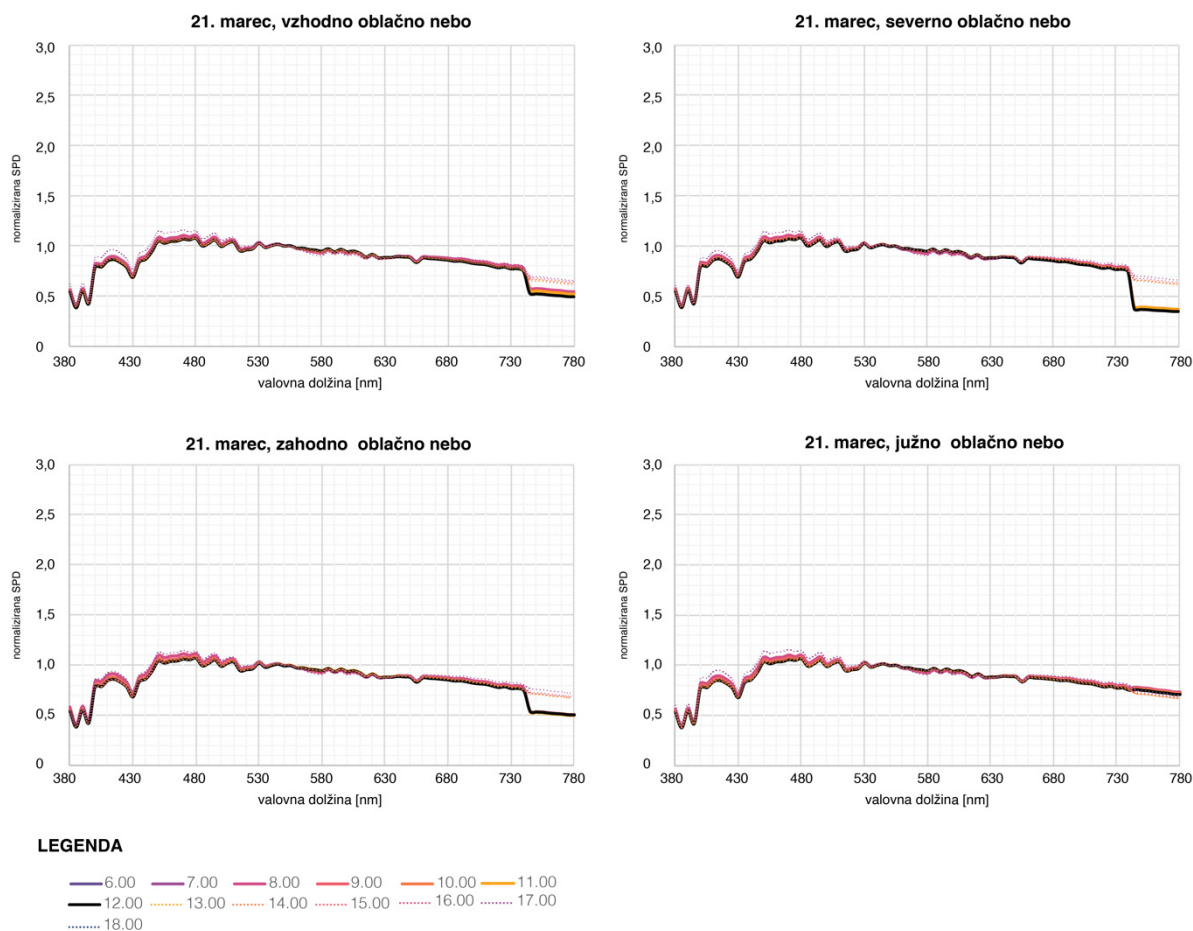


Slika A.4: Normalizirana spektralna gostota sevalne moči 21. junija za Ljubljano, vzhodnega, severnega, zahodnega in južnega jasnega neba.
Figure A.4: Normalised spectral power distribution for the 21st of June for Ljubljana's eastern, northern, western and southern clear sky.



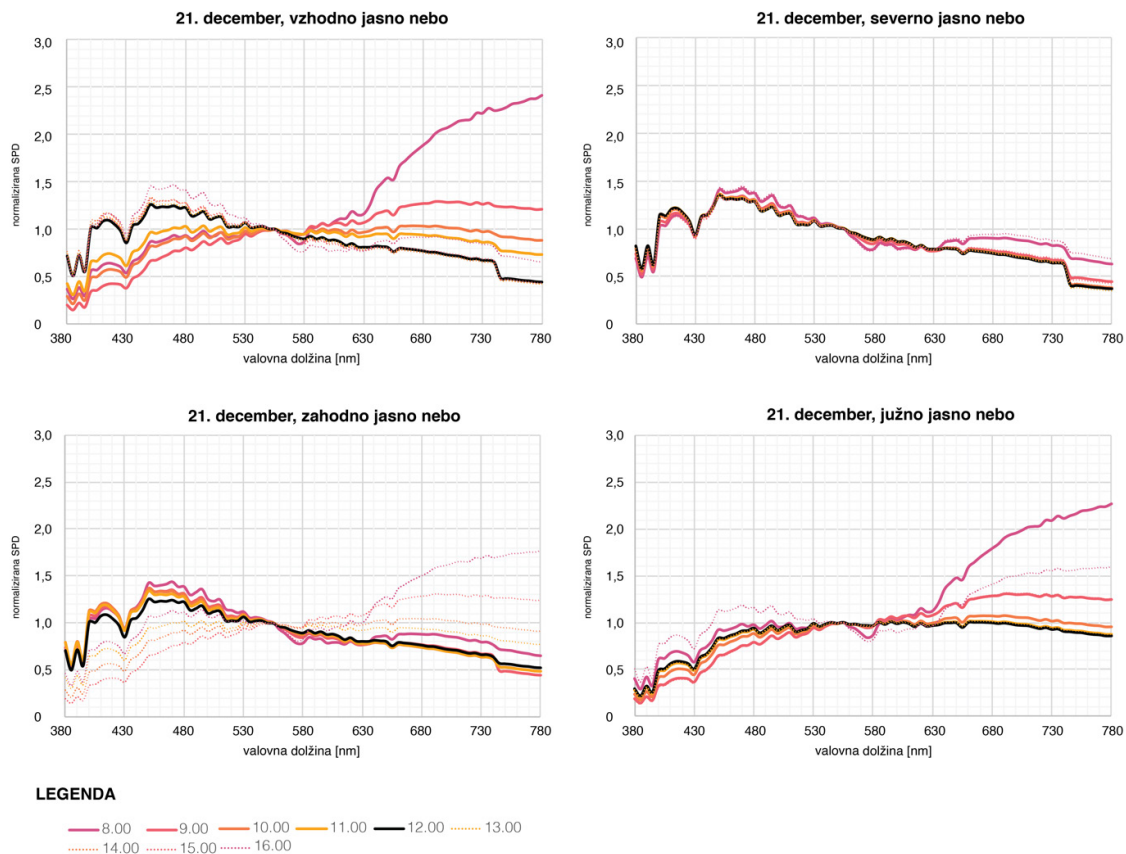
Slika A.5: Normalizirana spektralna gostota sevalne moči 21. junija za Ljubljano, vzhodnega, severnega, zahodnega in južnega delno oblačnega neba.

Figure A.5: Normalised spectral power distribution for the 21st of June for Ljubljana's eastern, northern, western and intermediate sky.



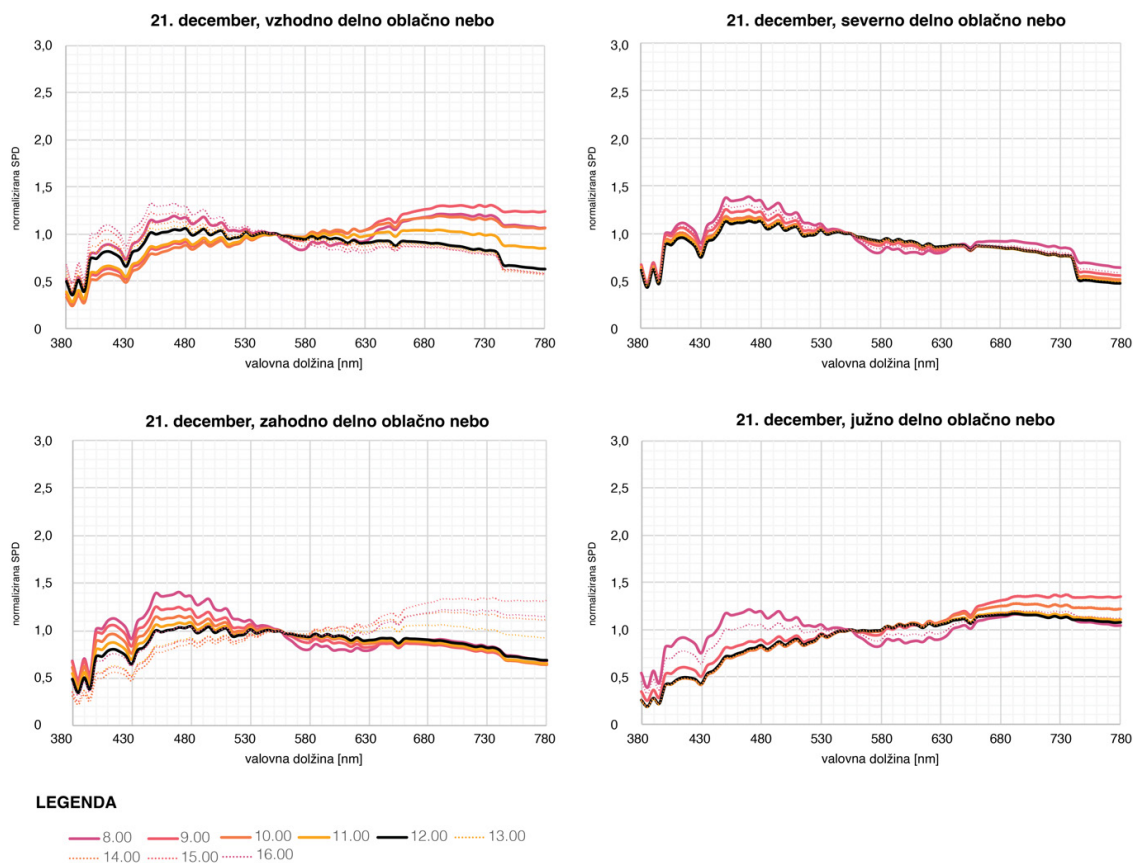
Slika A.6: Normalizirana spektralna gostota sevalne moči 21. marca za Ljubljano, vzhodnega, severnega, zahodnega in južnega oblačnega neba.

Figure A.6: Normalised spectral power distribution for the 21st of March for Ljubljana's eastern, northern, western and southern cloudy sky.



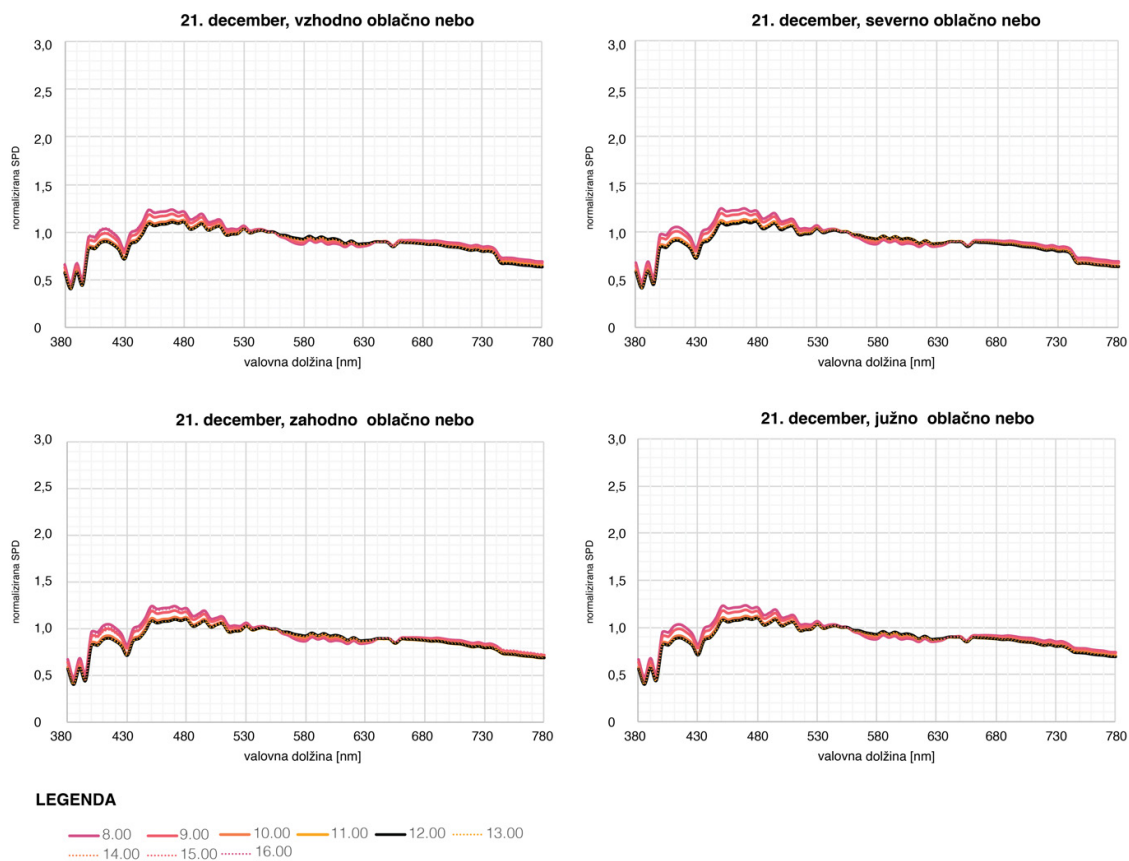
Slika A.7: Normalizirana spektralna gostota sevalne moči 21. decembra za Ljubljano, vzhodnega, severnega, zahodnega in južnega jasnega neba.

Figure A.7: Normalised spectral power distribution for the 21st of December for Ljubljana's eastern, northern, western and southern clear sky.



Slika A.8: Normalizirana spektralna gostota sevalne moči 21. decembra za Ljubljano, vzhodnega, severnega, zahodnega in južnega delno oblačnega neba.

Figure A.8: Normalised spectral power distribution for the 21st of December for Ljubljana's eastern, northern, western and southern intermediate sky.



Slika A.9: Normalizirana spektralna gostota sevalne moči 21. decembra za Ljubljano, vzhodnega, severnega, zahodnega in južnega oblačnega neba.

Figure A.9: Normalised spectral power distribution for the 21st of December for Ljubljana's eastern, northern, western and southern cloudy sky.

PRILOGA A.2

Kot je bilo omenjeno že v 4. poglavju, je metrika cirkadianega stimulusa zaradi narave delovanja cirkadianega sistema dodatno nelinearno občutljiva za intenziteto osvetljenosti in spektralno sestavo svetlobe, ki je posledica dvojnega načina delovanja cirkadianega sistema (glej poglavje 2.4.4). Za proučitev obnašanja metrike RCU v odnosu do različnih magnitud osvetljenosti in različnih podobnih barvnih temperatur (CCT) dnevne svetlobe smo to preverili na 105 različnih stanjih neba, ki so bila ustvarjena s programom ALFA, za Ljubljano treh karakterističnih dni v letu (21. december, 21. marec in 21. junij), od sončnega vzhoda do sončnega zahoda za tri tipe neba (jasno, delno oblačno in oblačno). Vsako izmed različnih stanj neba je bilo simulirano v štirih pogledih, in sicer: pogled proti severnemu delu neba, pogled proti vzhodnemu delu neba, pogled proti južnemu delu neba in pogled proti zahodnemu delu neba. Tako smo pokrili največje območje CCT , ki ga je mogoče ustvariti s programom ALFA za zemljepisno lokacijo Ljubljane. Simulirani normalizirani spektri dnevne svetlobe (normalizacija pri 555 nm) so prikazani v prilogi A.1. Omenjene in prikazane spektralne sevalne distribucije so bile uporabljene tudi v simulacijski študiji v 5. poglavju, kjer so za vsakega izmed izmerjenih stanj neba predstavljene tudi RMU in RCU v odvisnosti od časa.

Relativno spremembo v RCU ($\Delta RRCU$), ki izraža vpliv magnitude osvetljenosti in CCT na RCU , smo izračunali za vsakega izmed omenjenih stanj neba po naslednji enačbi:

$$\Delta RRCU_{mag} = \frac{RCU_{mag} - RCU_{500}}{RCU_{500}} \cdot 100,$$

pri čemer je:

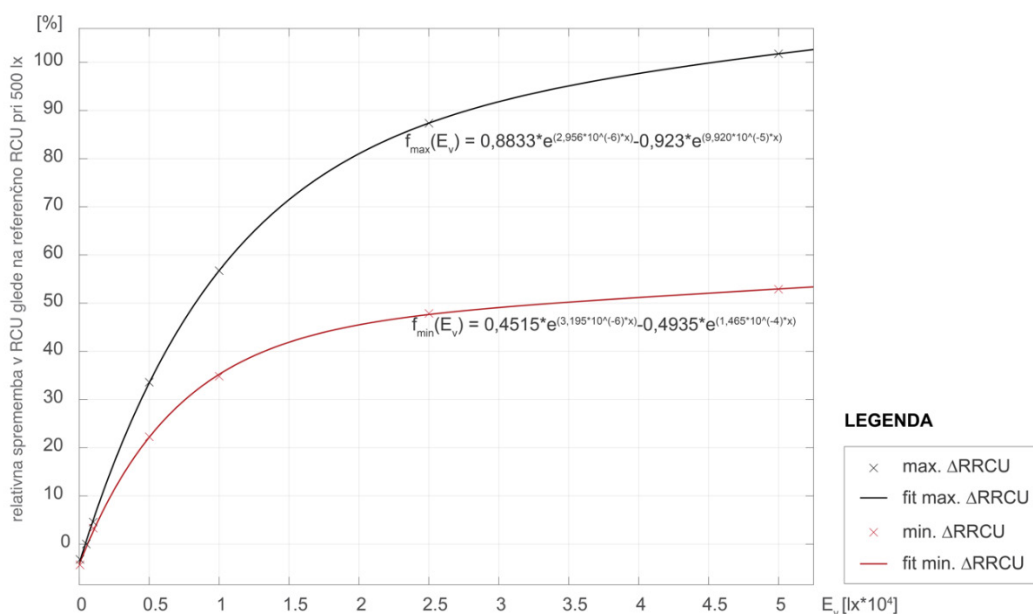
$\Delta RRCU_{mag}$ – relativna sprememba v RCU v primerjavi z izbrano magnitudo osvetljenosti [%],

RCU_{mag} – RCU pri različnih magnitudah osvetljenosti. RCU so bile izračunane za osvetljenosti: 50 lx, 1000 lx, 5000 lx, 10.000 lx, 25.000 lx in 50.000 lx,

RCU_{500} – referenčna RCU pri osvetljenosti 500 lx.

RCU_{500} je bila določena kot referenčna, ker osvetljenosti pri približno 500 lx predstavljajo ugodno bivalno okolje.

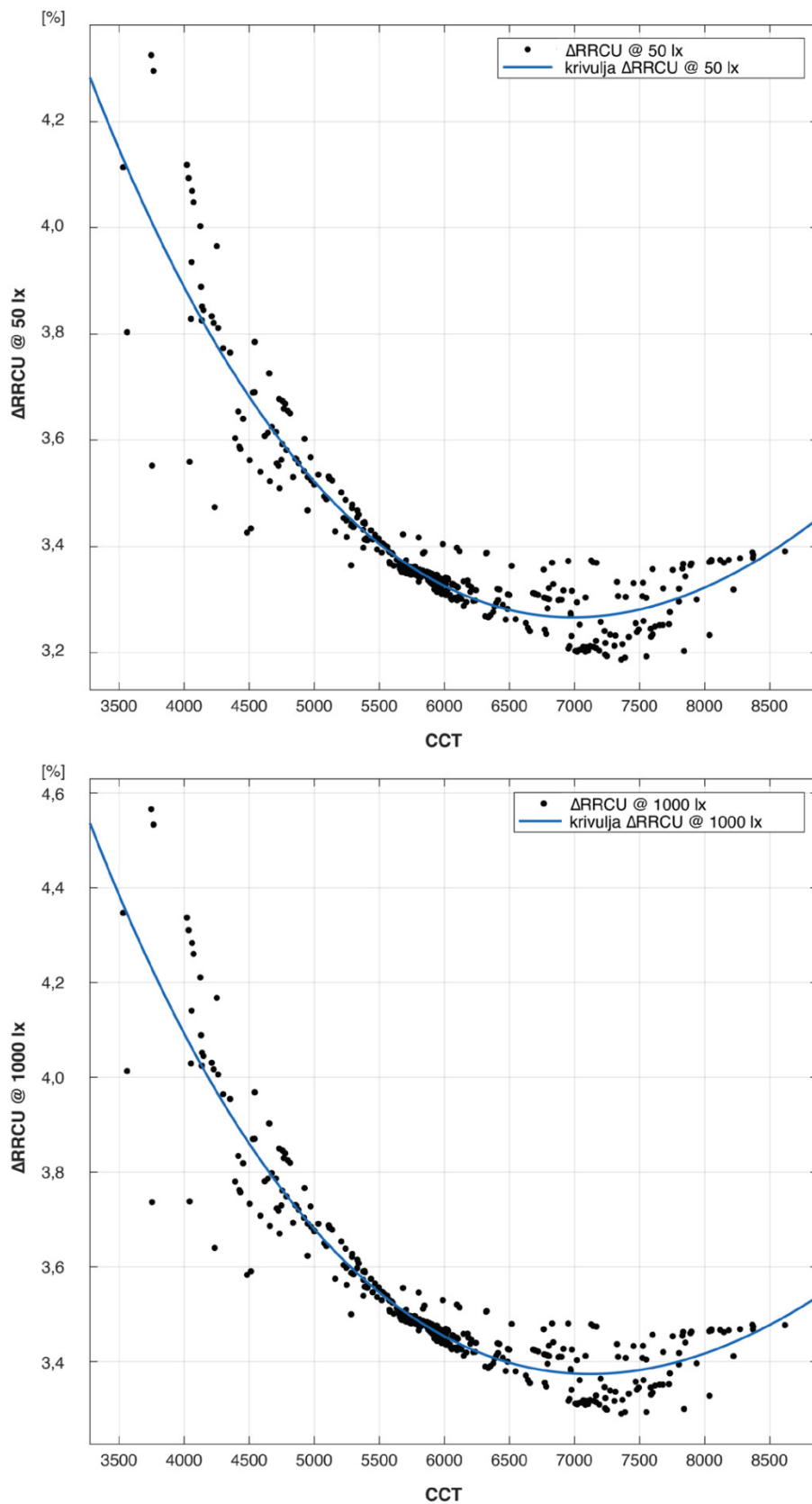
Ovojnici ($f_{\min}(E)$) – funkcija minimalnih $\Delta RRCU$ kot posledica spremembe osvetljenosti in različnih CCT ter $f_{\max}(E_v)$ – funkcija maksimalnih $\Delta RRCU$ kot posledica spremembe osvetljenosti in različnih CCT vseh zruženih rezultatov $\Delta RRCU_{50}$, $\Delta RRCU_{1000}$, $\Delta RRCU_{5000}$, $\Delta RRCU_{25000}$ in $\Delta RRCU_{50000}$ so predstavljeni na sliki A10. Iz omenjenih rezultatov je očitno, da kot smo pričakovali, RCU ni konstantna pri različnih magnitudah osvetljenosti, kakor to velja za RMU. Še več, $\Delta RRCU$ narašča nelinearno z večanjem osvetljenosti.



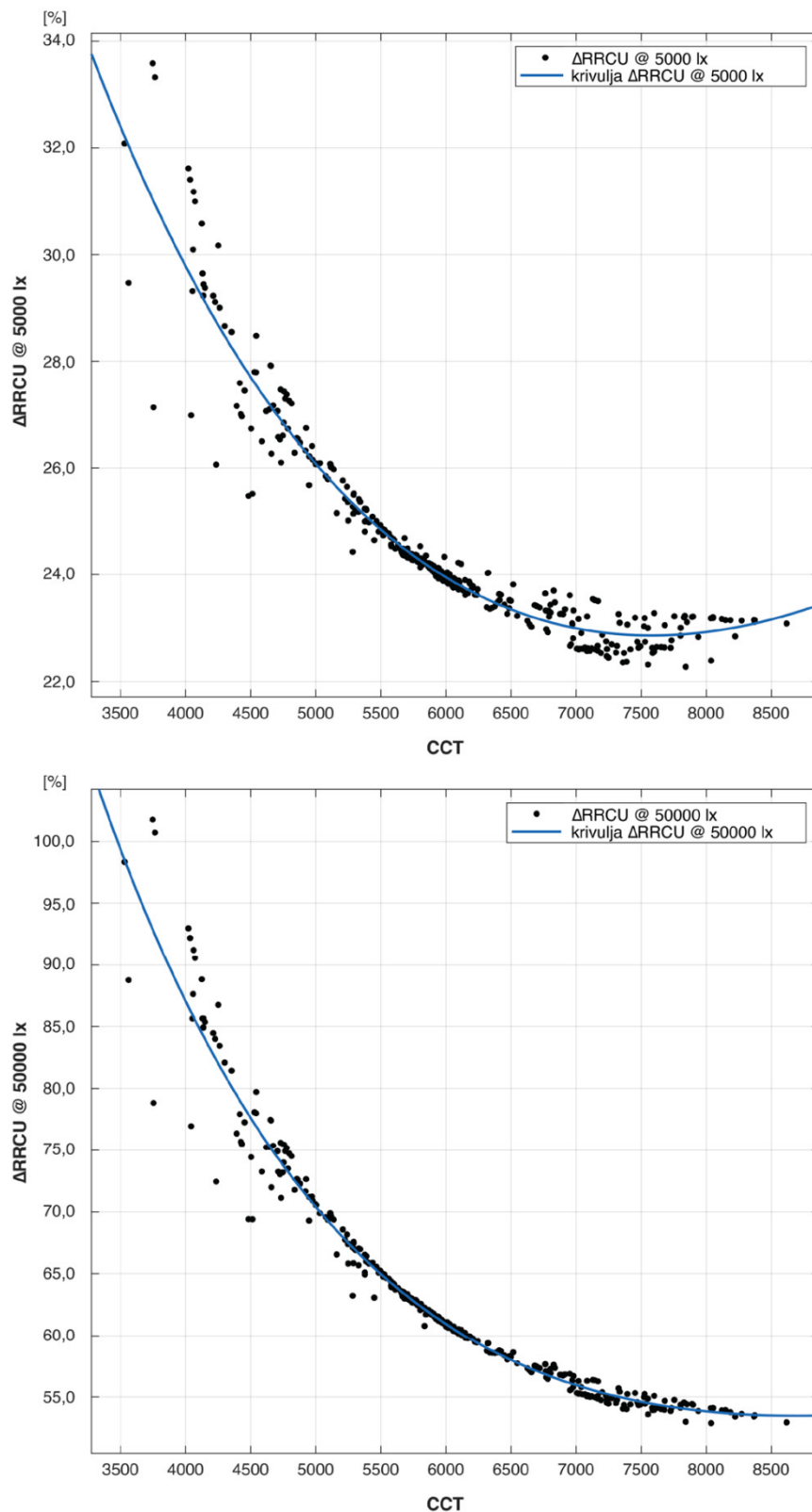
Slika A.10: Relativna sprememba v RCU glede na referenčno RCU pri 500 lx v primerjavi z drugimi magnitudami osvetljenosti na vzorcu simuliranih treh tipov neba (jasno, delo oblačno in oblačno) za vsako svetlo uro 21. marca, 21. junija in 21. decembra severnega, vzhodnega, južnega in zahodnega neba (za spektralne sevalne razporeditve uporabljenih stanj neba glej prilogo A.1. RCU omenjenih stanj neba so prikazane v poglavju 5.2.).

Figure A.10: Relative difference in RCU according to RCU at 500 lx in comparison to other magnitudes of illuminance for each daylight hour on a sample of 3 simulated types (clear, intermediate and overcast sky) for each hour on 21st of March, June and December for north, east, south and west sky (SPD of external sky states are presented in Appendix A.1. RCU of the mentioned states are shown in Chapter 5.2.).

Nastanek ovojnice minimumov in maksimumov relativnih sprememb v RCU pri različnih magnitudah osvetljenosti lahko pripišemo dvojnemu delovanju metrike CS pri različnih magnitudah osvetljenosti. Na sliki A.11 sta prikazani $\Delta RRCU_{50}$ in $\Delta RRCU_{1000}$, na sliki A.12 pa $\Delta RRCU_{5000}$ in $\Delta RRCU_{50000}$. Očitno je, da je vplivnost osvetljenosti na RCU pogojena s CCT. Vplivnost osvetljenosti je največja v toplem območju dnevne svetlobe ($CCT \approx 3500$ K) in nelinearno pada vse do 7000 K, kjer znova začne postopno nelinearno naraščati ($\Delta RRCU_{50}$, $\Delta RRCU_{1000}$, $\Delta RRCU_{5000}$). Podobne oblike krivulj zaznamo pri vseh magnitudah osvetljenosti, razen pri 50.000 lx, kjer vplivnost osvetljenosti monotono nelinearno pada od nižjih do višjih CCT.



Slika A.11: $\Delta RRCU_{50}$ in $\Delta RRCU_{1000}$ v odvisnosti od CCT.
Figure A.11: $\Delta RRCU_{50}$ and $\Delta RRCU_{1000}$ in relation to CCT.



Slika A.12: $\Delta RRCU_{5000}$ in $\Delta RRCU_{50000}$ v odvisnosti od CCT (barvne temperature svetlobe).

Figure A.12: $\Delta RRCU_{5000}$ and $\Delta RRCU_{50000}$ in relation to CCT (Correlated Colour Temperature).

Iz predstavljenih rezultatov RCU treh karakterističnih dni pri različnih CCT in različnih magnitudah osvetljenosti lahko torej sklenemo, da je RCU uporabna metrika, ki

omogoča dober vpogled v cirkadiani potencial svetlobe. Vendar če želimo primerjati *RCU* različnih meritev, moramo rezultate normalizirati na enako magnitudo osvetljenosti. Dodatno lahko iz slike A.11 sklepamo, da je primerjava med *RCU*₅₀, *RCU*₅₀₀ in *RCU*₁₀₀₀ za potrebe ocenjevanja cirkadianega potenciala dnevne svetlobe še vedno smiselna, saj primerjava med takšnimi rezultati pomeni maksimalno napako $\pm 4,5$ %. Napake *RCU*₅₀₀₀ in *RCU*₅₀₀₀₀ pa so že prevelike (napake od 23 do 105 %) za proučevanje cirkadiano učinkovite svetlobe v notranjih prostorih.

PRILOGA A.3

Preglednica A.1: Izmerjene vrednosti zunanjih horizontalnih osvetljenosti ($E_{e,h}$), zunanjih ekvivalentnih melanopskih osvetljenosti ($E_{e,h,m}$), fotopskih ($E_{i,v}$) in melanopskih osvetljenosti ($E_{i,v,m}$) na vertikalni ravnini ter fotopskih osvetljenosti na horizontalni ravnini ($E_{e,h,m}$). Izračunani sta tudi $RMU_i (E_{i,v,m} / E_{i,v})$ in $RMU_e (E_{e,h,m} / E_{e,h,v})$.

Table A.1: Measured values of external horizontal illuminance ($E_{e,h}$), external equivalent melanopic illuminance ($E_{e,h,m}$), indoor illuminance ($E_{i,v}$), and equivalent melanopic illuminance ($E_{i,v,m}$) measured on the vertical plane and indoor horizontal illuminance ($E_{e,h,m}$). Additionally $RMU_i (E_{i,v,m} / E_{i,v})$ and $RMU_e (E_{e,h,m} / E_{e,h,v})$ are calculated.

	ng	DP_cg	DP_l-e	TP-2l-e	DP_brt	DP_bt1	DP_bt2	DP_ssc	
$E_{e,h}$ [lx]	58690,00	58680,00	59250,00	59170,00	59300,00	59100,00	58960,00	58980,00	GS1
$E_{i,v}$ [lx]	1054,60	820,30	791,30	513,80	413,00	404,40	268,20	483,60	
$E_{i,v,m}$ [EML]	1021,40	801,30	771,30	486,20	351,30	506,00	373,00	471,30	
$E_{i,h}$ [lx]	927,60	728,90	694,55	475,50	347,70	337,30	214,70	415,05	
RMU_i [-]	0,97	0,98	0,97	0,95	0,85	1,25	1,39	0,97	
$E_{e,h,m}$ [EML]	62053,00	62017,00	62674,00	62541,00	62620,00	62351,00	62169,00	62190,00	
RMU_e [-]	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,05	1,05	
	ng	DP_cg	DP_l-e	TP-2l-e	DP_brt	DP_bt1	DP_bt2	DP_ssc	
$E_{e,h}$ [lx]	49.500,00	49.800,00	49.900,00	50.500,00	51.200,00	51.800,00	51.600,00	51.800,00	PS1
$E_{i,v}$ [lx]	1035,40	799,90	769,60	501,50	404,80	392,40	260,20	480,90	
$E_{i,v,m}$ [EML]	984,60	768,30	737,93	467,70	336,20	493,50	364,20	460,70	
$E_{i,h}$ [lx]	946,00	738,90	708,40	462,60	360,20	348,20	221,30	433,10	
RMU_i [-]	0,95	0,96	0,96	0,93	0,83	1,26	1,40	0,96	
$E_{e,h,m}$ [EML]	52.603,00	52.892,00	53.019,00	53.519,00	54.269,00	54.858,00	54.642,00	54.795,00	
RMU_e [-]	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	
	ng	DP_cg	DP_l-e	TP-2l-e	DP_brt	DP_bt1	DP_bt2	DP_ssc	
$E_{e,h}$ [lx]	60.600,00	61.200,00	61.400,00	61.800,00	62.200,00	62.400,00	62.200,00	62.300,00	BS1
$E_{i,v}$ [lx]	1106,00	863,50	838,50	535,10	435,10	431,40	284,00	513,50	
$E_{i,v,m}$ [EML]	1163,00	915,54	886,60	548,30	399,30	581,60	419,40	537,50	
$E_{i,h}$ [lx]	950,80	740,00	712,80	457,90	357,80	349,50	223,80	434,50	
RMU_i [-]	1,05	1,06	1,06	1,02	0,92	1,35	1,48	1,05	
$E_{e,h,m}$ [EML]	64.040,00	64.676,00	64.861,00	65.267,00	65.725,00	65.885,00	65.590,00	65.583,00	
RMU_e [-]	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,05	1,05	
	ng	DP_cg	DP_l-e	TP-2l-e	DP_brt	DP_bt1	DP_bt2	DP_ssc	
$E_{e,h}$ [lx]	46.880,00	46.975,00	47.815,00	48.230,00	48.615,00	48.620,00	49.000,00	48.740,00	GS1
$E_{i,v}$ [lx]	996,35	786,40	762,35	486,40	395,60	386,80	256,70	460,15	
$E_{i,v,m}$ [EML]	966,30	768,70	742,40	458,90	334,70	473,70	342,50	443,40	
$E_{i,h}$ [lx]	972,20	769,90	735,20	474,20	367,50	357,30	227,60	432,95	
RMU_i [-]	0,97	0,98	0,97	0,94	0,85	1,22	1,33	0,96	
$E_{e,h,m}$ [EML]	50.020,00	50.065,00	50.870,00	51.252,00	51.678,00	51.630,00	51.961,00	51.643,00	
RMU_e [-]	1,07	1,07	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	
	ng	DP_cg	DP_l-e	TP-2l-e	DP_brt	DP_bt1	DP_bt2	DP_ssc	
$E_{e,h}$ [lx]	56.000,00	56.145,00	56.110,00	56.450,00	57.105,00	57.390,00	57.525,00	57.860,00	RS1
$E_{i,v}$ [lx]	1073,90	826,50	797,60	518,60	422,40	405,20	256,30	490,90	
$E_{i,v,m}$ [EML]	931,15	723,56	698,60	441,80	318,10	467,50	329,80	428,45	
$E_{i,h}$ [lx]	944,70	729,55	703,40	465,10	360,30	340,70	217,15	430,30	
RMU_i [-]	0,87	0,88	0,88	0,85	0,75	1,15	1,29	0,87	
$E_{e,h,m}$ [EML]	59.176,00	59.300,00	59.255,00	59.639,00	60.389,00	60.665,00	60.798,00	61.172,00	
RMU_e [-]	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	
	ng	DP_cg	DP_l-e	TP-2l-e	DP_brt	DP_bt1	DP_bt2	DP_ssc	
$E_{e,h}$ [lx]	52.530,00	52.915,00	53.300,00	53.740,00	54.570,00	54.920,00	55.065,00	55.370,00	OS1
$E_{i,v}$ [lx]	1062,10	834,90	795,30	519,20	420,10	397,70	259,10	493,00	
$E_{i,v,m}$ [EML]	836,13	666,60	629,90	402,00	287,30	414,30	301,60	391,60	
$E_{i,h}$ [lx]	953,90	751,35	721,30	471,60	364,20	349,00	219,00	435,90	
RMU_i [-]	0,79	0,80	0,79	0,77	0,68	1,04	1,16	0,79	
$E_{e,h,m}$ [EML]	55.556,00	55.914,00	56.295,00	56.725,00	57.658,00	58.014,00	58.125,00	58.150,00	
RMU_e [-]	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,05	

Preglednica A.2: Izmerjene vrednosti zunanjih horizontalnih osvetljenosti ($E_{e,h}$), zunanjih ekvivalentnih melanopskih osvetljenosti ($E_{e,h,m}$), osvetljenosti fotopskih ($E_{i,v}$) in melanopskih

($E_{i,v,m}$) na vertikalni ravnini ter fotopskih osvetljenosti na horizontalni ravnini ($E_{e,h,m}$). Izračunani sta tudi $RMU_i (E_{i,v,m} / E_{i,v})$ in $RMU_e (E_{e,h,m} / E_{e,h})$.

Table A.2: Measured values of external horizontal illuminance ($E_{e,h}$), external equivalent melanopic illuminance ($E_{e,h,m}$), indoor illuminance ($E_{i,v}$), and equivalent melanopic illuminance ($E_{i,v,m}$) measured on the vertical plane and indoor horizontal illuminance ($E_{e,h,m}$). Additionally $RMU_i (E_{i,v,m} / E_{i,v})$ and $RMU_e (E_{e,h,m} / E_{e,h})$ are calculated.

	ng	DP_cg	DP_l-e	TP-2l-e	DP_brt	DP_bt1	DP_bt2	DP_ssc		
E_{eh} [lx]	59990,00	59680,00	59.270,00	58.980,00	58.830,00	58.575,00	58.140,00	57.980,00	GS2	
E_{iv} [lx]	839,30	653,10	622,60	404,80	328,50	318,40	209,10	375,00		
E_{im} [EML]	897,35	700,37	665,20	415,44	305,63	432,60	309,16	393,63		
E_{ih} [lx]	706,10	520,20	504,50	331,70	252,80	245,00	154,90	307,20		
RMU_i [-]	1,07	1,07	1,07	1,03	0,93	1,36	1,48	1,05		
E_{em} [EML]	63786,00	63394,00	62942,00	62.593,00	62.487,00	62.233,00	61.732,00	61.516,00		
RMU_e [-]	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06		
	ng	DP_cg	DP_l-e	TP-2l-e	DP_brt	DP_bt1	DP_bt2	DP_ssc		
E_{eh} [lx]	48.790,00	48.400,00	48.055,00	47.330,00	47.000,00	46.860,00	46.270,00	45.815,00		PS2
E_{iv} [lx]	815,40	616,15	592,30	379,70	311,00	305,00	198,65	356,20		
E_{im} [EML]	853,50	644,80	616,80	379,70	279,40	415,80	297,80	367,60		
E_{ih} [lx]	668,20	498,75	477,65	314,90	238,70	231,00	144,90	288,70		
RMU_i [-]	1,05	1,05	1,04	1,00	0,90	1,36	1,50	1,03		
E_{em} [EML]	51.638,00	51.233,00	50849,00	50.318,00	49.967,00	49.877,00	49.269,00	48.802,00		
RMU_e [-]	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,07		
	ng	DP_cg	DP_l-e	TP-2l-e	DP_brt	DP_bt1	DP_bt2	DP_ssc		
E_{eh} [lx]	57.600,00	57.330,00	56.875,00	56.570,00	56.270,00	56.140,00	55.980,00	55.700,00	BS2	
E_{iv} [lx]	836,60	648,30	627,90	403,90	323,40	325,95	219,65	379,30		
E_{im} [EML]	1084,90	840,10	810,50	499,93	363,70	527,90	385,40	483,10		
E_{ih} [lx]	696,70	514,20	500,00	326,90	248,50	244,75	155,70	305,30		
RMU_i [-]	1,30	1,30	1,29	1,24	1,12	1,62	1,75	1,27		
E_{em} [EML]	61.129,00	60.855,00	60379,00	60.055,00	59.738,00	59.606,00	59.451,00	59.178,00		
RMU_e [-]	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06		
	ng	DP_cg	DP_l-e	TP-2l-e	DP_brt	DP_bt1	DP_bt2	DP_ssc		
E_{eh} [lx]	54.965,00	54.810,00	54.560,00	54.360,00	54.200,00	53.650,00	53.380,00	53.070,00		GS2
E_{iv} [lx]	847,40	660,70	625,90	409,50	327,10	324,30	218,10	386,00		
E_{im} [EML]	884,54	691,27	653,90	411,70	299,50	424,95	308,60	400,30		
E_{ih} [lx]	693,80	515,10	490,85	326,90	246,30	238,80	155,05	301,80		
RMU_i [-]	1,04	1,05	1,04	1,01	0,92	1,31	1,41	1,04		
E_{em} [EML]	58.377,00	58.193,00	57.953,00	57.735,00	57.565,00	56.959,00	56.805,00	56.473,00		
RMU_e [-]	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06		
	ng	DP_cg	DP_l-e	TP-2l-e	DP_brt	DP_bt1	DP_bt2	DP_ssc		
E_{eh} [lx]	62.260,00	61.600,00	61.235,00	61.010,00	60.820,00	60.625,00	60.540,00	60.580,00	RS2	
E_{iv} [lx]	851,80	660,10	631,20	413,40	341,90	314,70	207,60	391,80		
E_{im} [EML]	773,10	603,30	576,50	363,57	271,90	384,50	284,03	354,60		
E_{ih} [lx]	726,40	541,10	522,40	346,30	263,40	246,50	154,60	319,10		
RMU_i [-]	0,91	0,91	0,91	0,88	0,80	1,22	1,37	0,91		
E_{em} [EML]	66.147,00	65.315,00	65.047,00	64.863,00	64.676,00	64.511,00	64.426,00	64.464,00		
RMU_e [-]	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06		
	ng	DP_cg	DP_l-e	TP-2l-e	DP_brt	DP_bt1	DP_bt2	DP_ssc		
E_{eh} [lx]	52.750,00	52.330,00	51.860,00	51.760,00	51.190,00	50.970,00	50.725,00	50.310,00		OS2
E_{iv} [lx]	837,30	633,50	621,15	394,60	321,20	298,40	193,20	363,40		
E_{im} [EML]	624,30	471,65	467,30	283,40	207,10	296,70	215,90	267,40		
E_{ih} [lx]	695,20	510,90	494,40	324,30	248,50	232,40	145,30	297,75		
RMU_i [-]	0,75	0,74	0,75	0,72	0,64	0,99	1,12	0,74		
E_{em} [EML]	56.049,00	55.550,00	55.010,00	54.928,00	54.240,00	54.009,00	53.736,00	53.297,00		
RMU_e [-]	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06		

Preglednica A.3: Izmerjene vrednosti zunanjih horizontalnih osvetljenosti ($E_{e,h}$), zunanjih ekvivalentnih melanopskih osvetljenosti ($E_{e,h,m}$), osvetljenosti fotopskih ($E_{i,v}$) in melanopskih ($E_{i,v,m}$) na vertikalni ravnini in fotopskih osvetljenosti na horizontalni ravnini ($E_{e,h,m}$). Izračunani sta tudi $RMU_i (E_{i,v,m} / E_{i,v})$ in $RMU_e (E_{e,h,m} / E_{e,h})$.

PRILOGA A.4

Tabela A.4: Izračunani *RMU* na podlagi eksperimentalnih meritev 4. poglavja.
Table A 4: Calculated *RMU* based on the experimental measurements in Chapter 4.

<i>RMU</i> [-]	n_g	DP_cg	DP_l-e	TP_2-l-e	DP_brt	DP_bt1	DP_bt2	DP_ssc
WS	0,92	0,93	0,93	0,90	0,81	1,19	1,30	0,92
GS1	0,97	0,98	0,97	0,95	0,85	1,25	1,39	0,97
GS2	1,07	1,07	1,07	1,03	0,93	1,36	1,48	1,05
GS3	1,04	1,07	1,04	1,00	0,89	1,32	1,43	1,02
PS1	0,95	0,96	0,96	0,93	0,83	1,26	1,40	0,96
PS2	1,05	1,05	1,04	1,00	0,90	1,36	1,50	1,03
PS3	1,07	1,08	1,07	1,03	0,93	1,37	1,51	1,05
BS1	1,05	1,06	1,06	1,02	0,92	1,35	1,48	1,05
BS2	1,30	1,30	1,29	1,24	1,12	1,62	1,75	1,27
BS3	1,40	1,41	1,41	1,36	1,17	1,78	1,91	1,39
GRS1	0,97	0,98	0,97	0,94	0,85	1,22	1,33	0,96
GRS2	1,08	1,05	1,04	1,01	0,92	1,31	1,41	1,04
GRS3	1,02	1,02	1,02	0,98	0,90	1,27	1,38	1,00
RS1	0,87	0,88	0,88	0,85	0,75	1,15	1,29	0,87
RS2	0,91	0,91	0,91	0,88	0,80	1,22	1,37	0,91
RS3	0,74	0,74	0,74	0,71	0,62	1,02	1,16	0,71
OS1	0,79	0,80	0,79	0,77	0,68	1,04	1,16	0,79
OS2	0,75	0,74	0,75	0,72	0,64	0,99	1,12	0,74
OS3	0,87	0,96	0,88	0,85	0,78	1,20	1,33	0,91

Tabela A 5: Izračunani RCU na podlagi eksperimentalnih meritev iz 4. poglavja.
Table A 5: Calculated RCU based on the experimental measurements of Chapter 4.

RCU [-]	n_g	DP_cg	DP_l-e	TP_2-l-e	DP_brt	DP_bt1	DP_bt2	DP_ssc
WHITE	1,11	1,12	1,10	1,02	0,90	1,68	1,92	1,07
GS1	1,21	1,22	1,20	1,11	0,99	1,84	2,12	1,16
GS2	1,48	1,47	1,45	1,31	1,20	2,12	2,39	1,35
GS3	1,39	1,39	1,37	1,25	1,11	2,01	2,26	1,28
PS1	1,20	1,21	1,20	1,11	0,97	1,86	2,16	1,15
PS2	1,48	1,47	1,44	1,31	1,18	2,19	2,50	1,37
PS3	1,53	1,53	1,51	1,38	1,25	2,21	2,52	1,41
BS1	1,38	1,39	1,37	1,26	1,12	2,03	2,30	1,30
BS2	2,03	2,00	1,98	1,81	1,67	2,78	3,09	1,87
BS3	2,33	2,34	2,32	2,16	1,84	3,24	3,56	2,21
GRS1	1,13	1,13	1,12	1,02	0,91	1,66	1,89	1,05
GRS2	1,28	1,27	1,26	1,14	1,06	1,87	2,09	1,21
GRS3	1,23	1,23	1,22	1,11	1,02	1,78	2,02	1,13
RS1	1,01	1,01	1,01	1,01	0,80	1,60	1,88	0,96
RS2	1,21	1,21	1,20	1,09	0,99	1,89	2,21	1,13
RS3	0,88	0,88	0,85	0,75	0,63	1,45	1,74	0,75
OS1	0,78	0,79	0,77	0,71	0,60	1,28	1,52	0,75
OS2	0,76	0,75	0,76	0,66	0,58	1,26	1,51	0,68
OS3	1,07	1,06	1,07	0,96	0,90	1,81	2,08	1,09

PRILOGA A.5

Tabela A 6: Količina osvetljenosti, potrebna za vsako izmed izmerjenih kombinacij (E_t), da zadošča kriterijem certifikacijskega sistema WELL.

Table A 6: Quantity of illuminance needed for each of the measured case combinations, to meet the criteria of WELL certification system.

E_t [lx]	n_g	DP_cg	DP_l-e	TP_2-l-e	DP_brt	DP_bt1	DP_bt2	DP_ssc
WS1	162,77	161,40	161,69	166,67	185,94	126,12	115,53	162,16
GS1	154,88	153,56	153,89	158,52	176,35	119,88	107,86	153,91
GS2	140,30	139,88	140,39	146,16	161,22	110,40	101,45	142,90
GS3	144,55	139,74	144,45	150,38	167,66	113,90	104,96	147,65
PS1	157,74	156,17	156,44	160,84	180,61	119,27	107,17	156,58
PS2	143,30	143,34	144,04	150,00	166,96	110,03	100,06	145,35
PS3	140,17	139,35	140,16	145,74	161,19	109,34	99,59	142,74
BS1	142,65	141,47	141,86	146,39	163,45	111,26	101,57	143,30
BS2	115,67	115,75	116,21	121,19	133,38	92,62	85,49	117,77
BS3	106,90	106,11	106,41	109,99	128,24	84,46	78,62	108,10
GRS1	154,66	153,45	154,03	158,99	177,29	122,48	112,42	155,67
GRS2	139,26	143,37	143,58	149,20	163,82	114,47	106,01	144,64
GRS3	147,73	147,03	147,18	152,91	167,26	117,89	108,39	149,77
RS1	173,00	171,34	171,26	176,08	199,18	130,01	116,57	171,86
RS2	165,27	164,12	164,23	170,56	188,62	122,77	109,64	165,74
RS3	203,17	202,32	203,60	212,08	241,39	147,63	129,38	210,02
OS1	190,54	187,87	189,39	193,73	219,34	143,99	128,86	188,84
OS2	201,18	201,47	199,38	208,86	232,64	150,86	134,23	203,85
OS3	172,66	156,94	170,46	177,20	192,54	124,50	112,70	164,86

Tabela A 7: Količina osvetljenosti, potrebna za vsakega izmed izmerjenih spektrov (E_t), da zadošča kriterijem Rea in sod. [80, 81].

Table A 7: Quantity of illuminance needed for each of the measured case combinations, to meet the criteria of Rea et al. [80, 81].

E_t [lx]	n_g	DP_cg	DP_l-e	TP_2-l-e	DP_brt	DP_bt1	DP_bt2	DP_ssc
WS	247,6	246,5	248,9	270,4	306,0	163,3	143,5	257,8
GS1	226,7	226,0	228,4	247,5	277,5	149,5	129,8	236,7
GS2	185,9	187,3	189,9	209,2	228,7	129,6	115,0	203,0
GS3	197,1	197,3	200,7	220,8	246,9	136,5	121,6	215,6
PS1	228,6	227,3	229,8	248,2	282,8	147,9	127,4	238,9
PS2	185,2	187,5	190,5	209,9	232,5	125,6	110,2	200,8
PS3	179,2	179,4	182,5	199,9	220,0	124,2	109,3	194,8
BS1	198,6	198,5	200,7	218,8	244,5	135,6	119,7	212,1
BS2	135,7	137,4	139,1	152,2	165,1	99,1	88,9	146,7
BS3	117,9	117,4	118,5	127,0	149,3	84,9	77,2	124,4
GRS1	243,3	243,1	246,5	270,5	303,7	165,4	145,5	261,3
GRS2	214,1	215,9	217,8	240,5	260,5	147,3	131,6	228,0
GRS3	223,7	224,4	226,1	248,6	269,3	154,4	136,1	242,6
RS1	272,4	271,4	271,4	272,7	345,3	171,4	146,1	285,6
RS2	227,2	228,0	230,1	253,1	279,1	145,4	124,4	244,1
RS3	311,0	314,0	322,1	364,9	435,9	189,8	157,6	369,0
OS1	351,0	346,5	356,2	388,0	456,3	214,2	180,5	368,5
OS2	359,9	367,9	362,8	419,6	470,9	217,5	182,0	402,6
OS3	258,2	258,5	257,8	285,4	305,8	151,9	132,0	252,2

PRILOGA B.1

V tem delu prilog so predstavljeni opisni statistični podatki vseh linearnih modelov, ki so bili opravljeni za 5. poglavje. V tabeli B 1 so predstavljeni opisni statistični podatki splošnih vizualnih (E), melanopskih (E_m) in cirkadianih modelov (CL_A) ter povprečja pripadajočih modelov po conah (C1, C2, C3). V tabeli B 2 so nato predstavljeni opisni statistični podatki poglednih in conskih vizualnih modelov, v tabeli B 3 melanopskih poglednih in conskih modelov ter v tabeli B 4 cirkadianih poglednih in conskih modelov.

Tabela B 1: Opisni statistični podatki modelov E , E_m in CL_A . Prvi stolpec predstavlja povprečje vseh treh opazovanih con skupaj. C1, C2, C3 so imena con, kot je opisano v 6. poglavju.

Table B 1: Summary statistics for the overall E , E_m and CL_A statistical models. First column represents average for all zones combined. C1, C2, C3 represent zone names as stated in the Chapter 6.

	E	C1	C2	C3
MIN.	18,02	37,71	13,45	4,74
MAKS.	5626,13	9910,20	4409,78	3221,89
AVG.	1218,23	2296,62	869,12	535,60
	E_m	C1	C2	C3
MIN.	18,63	36,45	13,04	4,59
MAKS.	6117,62	10490,12	4891,45	3472,04
AVG.	1258,82	2390,23	898,74	552,02
	CL_A	C1	C2	C3
MIN.	24,05	48,75	17,29	6,09
MAKS.	11.108,93	20194,39	8361,94	6845,12
AVG.	1948,06	3879,99	1270,46	981,28

Tabela B 2: Opisni statistični podatki za pogledne in conske modele E (lx).

Table B 2: Summary statistics for the E (lx) view and zone dependent models.

E	Pogled 0°	Pogled 0°, C1	Pogled 0°, C2	Pogled 0°, C2
MIN.	218,64	500,93	120,54	54,57
MAKS.	5626,13	9910,20	4409,78	3221,89
AVG.	2296,03	4565,85	1577,53	875,91
	Pogled 90°	Pogled 90°, C1	Pogled 90°, C2	Pogled 90°, C2
MIN.	70,48	172,53	33,81	11,9
MAKS.	3182,02	5421,24	2840,92	729,06
AVG.	1029,19	1943,78	729,06	446,27
	Pogled 180°	Pogled 180°, C1	Pogled 180°, C2	Pogled 180°, C2
MIN.	18,02	37,71	13,45	4,74
MAKS.	2526,56	2749,07	2749,07	2452,02
AVG.	520,49	743,22	442,01	374,356
	Pogled 270°	Pogled 270°, C1	Pogled 270°, C2	Pogled 270°, C2
MIN.	69,54	170,12	33,05	12,29
MAKS.	3211,08	5474,26	2920,56	2546,19
AVG.	1027,21	1933,44	727,81	445,81

Tabela B 3: Opisni statistični podatki za pogledne in conske modele E_m (ekvivalentni melanopski lx).
Table B 3: Summary statistics for the E_m (equivalent melanopic lx) view and zone dependent models.

E_m	Pogled 0°	Pogled 0°, C1	Pogled 0°, C2	Pogled 0°, C2
MIN.	225,87	485,38	116,19	52,63
MAKS.	6117,62	10490,12	4891,45	3472,04
AVG.	2379,89	4767,41	1637,85	907,34
	Pogled 90°	Pogled 90°, C1	Pogled 90°, C2	Pogled 90°, C2
MIN.	72,75	167,21	32,71	11,52
MAKS.	3607,69	6013,41	3230,50	2650,92
AVG.	1061,76	2019,10	752,26	458,76
	Pogled 180°	Pogled 180°, C1	Pogled 180°, C2	Pogled 180°, C2
MIN.	18,63	36,45	13,04	4,59
MAKS.	2610,24	3179,78	2542,04	2591,03
AVG.	534,00	766,18	453,87	383,70
	Pogled 270°	Pogled 270°, C1	Pogled 270°, C2	Pogled 270°, C2
MIN.	71,82	164,77	31,97	11,89
MAKS.	3603,87	5985,72	3167,17	2630,18
AVG.	1059,62	2008,00	750,9	458,24

Tabela B 4: Opisni statistični podatki za pogledne in conske modele CL_A .
Table B 4: Summary statistics for the CL_A view and zone dependent models.

CL_A	Pogled 0°	Pogled 0°, C1	Pogled 0°, C2	Pogled 0°, C2
MIN.	306,08	687,05	156,66	70,81
MAKS.	11108,93	20194,39	8361,94	4361,94
AVG.	3910,45	8290,43	2383,79	1727,29
	Pogled 90°	Pogled 90°, C1	Pogled 90°, C2	Pogled 90°, C2
MIN.	95,7	228,02	43,72	15,35
MAKS.	6131,39	10719,51	4671,85	4669,65
AVG.	1574,79	3098,58	1040,59	810,48
	Pogled 180°	Pogled 180°, C1	Pogled 180°, C2	Pogled 180°, C2
MIN.	24,05	48,75	17,29	6,09
MAKS.	3966,72	5209,73	3848,74	3934,2
AVG.	735,61	1051,16	618,29	579,69
	Pogled 270°	Pogled 270°, C1	Pogled 270°, C2	Pogled 270°, C2
MIN.	94,53	225,02	42,74	15,85
MAKS.	6117,77	10652,73	4679,02	4673,08
AVG.	1571,39	3079,35	1039,04	807,55

PRILOGA B.2

V tem delu prilog so zbrani in predstavljeni vsi pogledni linearni modeli, ki so bili opravljeni v 5. poglavju. Za vsakega izmed vzpostavljenih linearnih modelov so navedeni determinacijski koeficient (R^2), standardna napaka (SE) in koeficienti prediktorjev (β) s pripadajočo standardno napako (SE).

Tabela B 5: Povzetek modelov statistike linearnih regresij pogleda 0° in prediktorjev za E , E_m in CL_A .
 Table B 5: View 0° MLR models fit and predictor coefficients for E , E_m and CL_A .

POGLEDNI MODEL 0°

povzetek modela		E^+	E_m^{**}	CL_A^{\ddagger}		
R^2		0,948	0,949	0,932		
SE		209,752	211,190	434,828		
lastnost okolja – prediktor	β^{**}	SE	β^{**}	SE	β^{**}	SE
WWR	62,5	0,86	64,7	0,86	107,8	1,78
a	-38,0	0,39	-39,3	0,40	-69,8	0,82
τ_v	33,6	0,23	/	/	/	/
τ_m	/	/	34,3	0,24	61,7	0,49
$R_{W,v}$	12,1	0,20	/	/	/	/
$R_{W,m}$	/	/	12,4	0,20	19,7	0,40
b	6,0	0,97	7,3	0,98	12,2	2,02
R_F	5,6	0,24	6,9	0,24	10,7	0,50
R_C	3,9	0,25	4,6	0,25	7,0	0,51

† Prediktorji: $R_{W,m}$, τ_v , a , b , V , WWR

‡ Prediktorji: $R_{W,v}$, τ_m , a , b , V , WWR

* ANOVA, $p \leq 0.001$

** t-test, $p \leq 0.001$

Tabela B 6: Povzetek modelov statistike linearnih regresij pogleda 180° in prediktorjev za E , E_m in CL_A .
Table B 6: View 180° MLR models fit and predictor coefficients for E , E_m and CL_A .**POGLEDNI MODEL 180 °**

povzetek modela		$E^{\dagger*}$		$E_m^{\ddagger*}$		$CL_A^{\ddagger*}$	
	R ²	0,836		0,833		0,793	
	SE	158,501		165,118		269,857	
lastnost grajenega okolja - prediktor		β^{**}	SE	β^{**}	SE	β^{**}	SE
	WWR	16,76	0,65	16,93	0,67	24,36	1,10
	a	-11,28	0,30	-11,67	0,31	-16,84	0,51
	τ_v	9,08	0,17	/	/	/	/
	τ_m	/	/	9,18	0,19	13,12	0,31
	$R_{W,v}$	11,73	0,15	/	/	/	/
	$R_{W,m}$	/	/	11,94	0,15	17,10	0,25
	b	6,66	0,74	6,94	0,77	9,87	1,25
	R_F	5,58	0,18	5,74	0,19	8,26	0,31
	R_C	3,95	0,19	4,03	0,19	5,84	0,32

† Prediktorji: $R_{W,m}$, τ_v , a , b , V , WWR‡ Prediktorji: $R_{W,v}$, τ_m , a , b , V , WWR* ANOVA, $p \leq 0,001$ ** t-test, $p \leq 0,001$ Tabela B 7: Povzetek modelov statistike linearnih regresij pogleda 90° in prediktorjev za E , E_m in CL_A .
Table B 7: View 180° MLR models fit and predictor coefficients for E , E_m and CL_A .**POGLEDNI MODEL 90°**

povzetek modela		$E^{\dagger*}$		$E_m^{\ddagger*}$		$CL_A^{\ddagger*}$	
	R ²	0,901		0,900		0,870	
	SE	166,295		171,010		307,848	
lastnost grajenega okolja - prediktor		β^{**}	SE	β^{**}	SE	β^{**}	SE
	WWR	31,56	0,68	32,31	0,70	50,40	1,26
	a	-18,17	0,31	-18,78	0,32	-29,24	0,58
	τ_v	16,37	0,18	/	/	/	/
	τ_m	/	/	16,63	0,19	26,29	0,35
	$R_{W,v}$	12,98	0,16	/	/	/	/
	$R_{W,m}$	/	/	13,26	0,16	20,13	0,28
	b	8,45	0,77	8,85	0,79	13,62	1,43
	R_F	6,25	0,19	6,42	0,20	9,81	0,35
	R_C	4,22	0,20	4,29	0,20	6,55	0,36

† Prediktorji: $R_{W,m}$, τ_v , a , b , V , WWR‡ Prediktorji: $R_{W,v}$, τ_m , a , b , V , WWR* ANOVA, $p \leq 0,001$ ** t-test, $p \leq 0,001$

Tabela B 8: Povzetek modelov statistike linearnih regresij pogleda 90° in prediktorjev za E , E_m in CL_A .
 Table B 8: View 180° MLR models fit and predictor coefficients for E , E_m and CL_A .

POGLEDNI MODEL 270°

povzetek modela		E^\dagger^*	$E_m^\ddagger^*$	$CL_A^\ddagger^*$			
R^2		0,900	0,897	0,867			
SE		168,604	174,164	312,949			
lastnost grajenega okolja - prediktor		β^{**}	SE	β^{**}	SE	β^{**}	SE
WWR		30,905	0,69	31,64	0,71	49,18	1,28
a		-18,272	0,32	-18,89	0,33	-29,45	0,59
τ_v		16,387	0,18	/	/	/	/
τ_m		/	/	16,66	0,20	26,32	0,35
$R_{W,v}$		13,145	0,16	/	/	/	/
$R_{W,m}$		/	/	13,44	0,16	20,42	0,29
b		8,254	0,78	8,64	0,81	13,22	1,45
R_F		6,181	0,19	6,34	0,20	9,69	0,36
R_C		4,228	0,20	4,30	0,20	6,59	0,37

† Prediktorji: $R_{W,m}$, τ_v , a , b , V , WWR

‡ Prediktorji: $R_{W,v}$, τ_m , a , b , V , WWR

* ANOVA, $p \leq 0,001$

** t-test, $p \leq 0,001$

PRILOGA B.3

V tem delu prilog so zbrani in predstavljeni vsi conski linearni modeli, ki so bili opravljeni v 5. poglavju. Za vsakega izmed vzpostavljenih linearnih modelov so navedeni determinacijski koeficient (R^2), standardna napaka (SE) in koeficienti prediktorjev (β) s pripadajočo standardno napako (SE).

Tabela B 9: Povzetek statistike conskih modelov E_v (determinacijski koeficient - R^2 in standardna napaka - SE) in moči prediktorjev pogleda 180° za cono 1 ($E_{v,C1}$), cono 2 ($E_{v,C2}$) in cono 3 ($E_{v,C3}$).

Table B 9: View 180° zone dependent MLR models fit (coefficient of determination - R^2 and standard error -SE) and predictor coefficients for E_v in Zone 1 ($E_{v,C1}$), Zone 2 ($E_{v,C2}$) and Zone 3 ($E_{v,C3}$).

CONSKI MODELI, POGLED 180°

povzetek modelov		$E_{C1}^{\dagger*}$		$E_{C2}^{\dagger*}$		$E_{C3}^{\dagger*}$	
R^2		0,867		0,812		0,785	
SE		174,019		161,34		170,59	
lastnost okolja - prediktor	β^{**}	SE	β^{**}	SE	β^{**}	SE	
WWR	27,29	0,3	13,78	0,68	24,36	1,10	
a	-8,25	0,34	-12,06	0,31	-12,57	0,33	
τ_v	12,64	0,23	7,30	0,21	5,91	0,224	
τ_m	/	/	/	/	/	/	
$R_{W,v}$	13,81	0,18	10,88	0,17	11,00	0,18	
$R_{W,m}$	/	/	/	/	/	/	
b	7,88	0,81	7,85	0,75	7,46	0,80	
R_F	8,00	0,22	4,59	0,20	3,23	0,21	
R_C	5,53	0,23	3,52	0,21	2,48	0,22	

\dagger Prediktorji: $R_{W,v}$, τ_v , a , b , V , WWR

* ANOVA, $p \leq 0,001$

**t-test, $p \leq 0,001$

Tabela B 10: Povzetek statistike conskih modelov E (determinacijski koeficient – R^2 , in standardna napaka – SE) in moči prediktorjev pogleda 0° za cono 1 (E_{C1}), cono 2 (E_{C2}) in cono 3 (E_{C3}).

Table B 10: View 0° zone dependent MLR models fit (coefficient of determination - R^2 and standard error -SE) and predictor coefficients for E in Zone 1 (E_{C1}), Zone 2 (E_{C2}) and Zone 3 (E_{C3}).

CONSKI MODELI, POGLED 0°

povzetek modelov		$E_{C1}^{\dagger*}$		$E_{C2}^{\dagger*}$		$E_{C3}^{\dagger*}$	
	R^2	0,929		0,914		0,879	
	SE	410,68		226,17		184,47	
lastnost	grajenega						
okolja – prediktor	β	SE	β^{**}	SE	β^{**}	SE	
WWR	122,60**	1,73	52,86	0,954	25,922	0,778	
a	-54,70**	0,79	-35,90	0,435	-25,162	0,355	
τ_v	65,63**	0,539	24,06	0,29	13,430	0,242	
τ_m	/	/	/	/	/	/	
$R_{W,v}$	11,24**	0,425	12,94	0,23	10,759	0,191	
$R_{W,m}$	/	/	/	/	/	/	
b	stat, nesignif,	stat, nesignif,	12,94	1,05	16,924	0,862	
R_F	10,62**	0,516	8,23	0,28	6,074	0,232	
R_C	5,53**	0,23	5,74	0,29	4,588	0,240	

† Prediktorji: $R_{W,v}$, τ_v , a , b , V , WWR

* ANOVA, $p \leq 0,001$

** t-test, $p \leq 0,001$

Tabela B 11: Povzetek statistike conskih modelov E_v (determinacijski koeficient – R^2 in standardna napaka – SE) in moči prediktorjev pogleda 90° za cono 1 (E_{C1}), cono 2 (E_{C2}) in cono 3 (E_{C3}).

Table B 11: View 90° zone dependent MLR models fit (coefficient of determination - R^2 and standard error -SE) and predictor coefficients for E_v in Zone 1 (E_{C1}), Zone 2 (E_{C2}) and Zone 3 (E_{C3}).

CONSKI MODELI, POGLED 90°

povzetek modelov		$E_{C1}^{\dagger*}$		$E_{C2}^{\dagger*}$		$E_{C3}^{\dagger*}$	
	R^2	0,900		0,873		0,815	
	SE	252,89		172,18		164,47	
lastnost	grajenega						
okolja – prediktor	β^{**}	SE	β^{**}	SE	β^{**}	SE	
WWR	63,20	1,07	23,82	0,73	12,17	0,70	
a	-22,11	0,49	-17,73	0,33	-14,64	0,32	
τ_v	30,16	0,33	11,65	0,23	7,04	0,22	
τ_m	/	/	/	/	/	/	
$R_{W,v}$	15,41	0,26	12,88	0,18	10,70	0,17	
$R_{W,m}$	/	/	/	/	/	/	
b	8,15	1,18	11,31	0,80	11,53	0,78	
R_F	9,41	0,32	6,05	0,22	4,05	0,21	
R_C	6,88	0,33	4,29	0,22	3,01	0,22	

† Prediktorji: $R_{W,v}$, τ_v , a , b , V , WWR

* ANOVA, $p \leq 0,001$

** t-test, $p \leq 0,001$

Tabela B 12: Povzetek statistike conskih modelov E_v (determinacijski koeficient – R^2 in standardna napaka – SE) in moči prediktorjev pogleda 270° za cono 1 (E_{C1}), cono 2 (E_{C2}) in cono 3 (E_{C3}).

Table B 12: View 270° zone dependent MLR models fit (coefficient of determination - R^2 and standard error -SE) and predictor coefficients for E_v in Zone 1 (E_{C1}), Zone 2 (E_{C2}) and Zone 3 (E_{C3}).

CONSKI MODELI, POGLED 270°

povzetek modelov		$E_{C1}^{\dagger*}$	$E_{C2}^{\dagger*}$	$E_{C3}^{\dagger*}$			
R ²		0,900	0,869	0,813			
SE		252,08	172,44	167,03			
lastnost okolja – prediktor	grajenega	β^{**}	SE	β^{**}	SE	β^{**}	SE
	WWR	61,93	1,06	23,45	0,74	12,06	0,71
	<i>a</i>	-22,16	0,49	-17,84	0,34	-14,67	0,32
	τ_v	30,00	0,33	11,60	0,23	7,04	0,22
	τ_m	/	/	/	/	/	/
	$R_{W,v}$	15,64	0,26	13,09	0,18	10,76	0,17
	$R_{W,m}$	/	/	/	/	/	/
	<i>b</i>	8,01	1,18	11,37	0,82	11,39	0,78
	R_F	9,18	0,32	5,99	0,22	4,01	0,21
	R_C	6,71	0,33	4,23	0,23	3,01	0,22

[†]prediktorji: $R_{W,v}$, τ_v , *a*, *b*, *V*, WWR

*ANOVA, $p \leq 0,001$

**t-test, $p \leq 0,001$

PRILOGA C

Priloga C povzema vsebino ankete, ki je bila izvedena na Univerzi v Ljubljani decembra 2019, katere rezultati so predstavljeni v 7. poglavju.

Anketa o individualnem dojetanju svetlobe in barve v notranjem grajenem okolju

Dobrodošli v raziskavi individualnega dojetanja svetlobe in barve v notranjem grajenem okolju.

Hvala, ker ste si vzeli čas za sodelovanje v tem vprašalniku. Želimo si izvedeti več o splošnih preferencah javnosti, ko razmišljamo o notranjem svetlobnem okolju. Podatki in rezultati, zbrani v raziskavi, bodo uporabljeni izključno v znanstvene namene.

- Spol
- Starost
- Regija prebivališča

Vprašanja bodo zahtevala navedene osebne podatke, zato se morate za sodelovanje v anketi strinjati s politiko zasebnosti direktive GDPR. Osebni podatki ne bodo povezani z identiteto posameznika; uporabljeni bodo le v statistični analizi.

Se strinjate z zbiranjem osebnih podatkov?

- Ne strinjam se z zbiranjem osebnih podatkov.
- Strinjam se z zbiranjem osebnih podatkov.

Prosimo, izpolnite naslednja demografska vprašanja:

Spol:

- Moški
- Ženski

Starost:

.....

Poklicno področje:

- Naravoslovje
- Družboslovje
- Inženirstvo
- Umetnost
- Drugo

Statistična regija prebivanja:

- Goriška
- Obalno-kraška
- Osrednjeslovenska
- Primorsko-notranjska

- Gorenjska
- Zasavska
- Savinjska
- Podravska
- Drugo
- Jugovzhodna Slovenija
- Posavska
- Koroška
- Pomurska

Ali imate diagnosticirano katero izmed okvar barvnega vida?

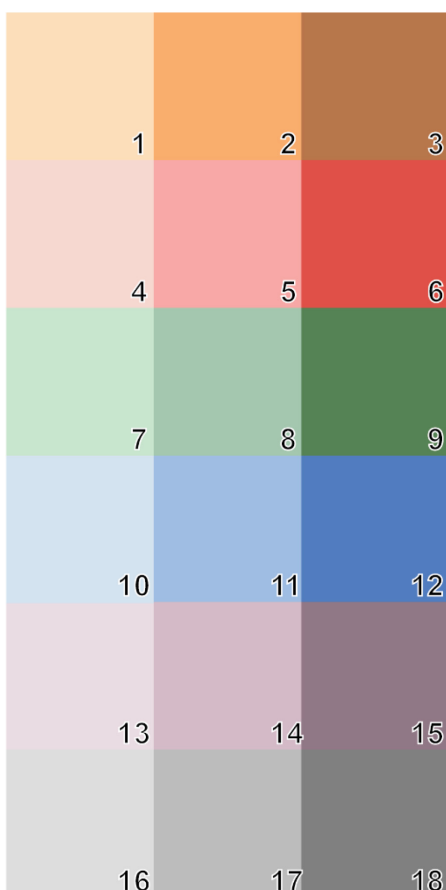
- Da
- Ne

Če je bil vaš odgovor na prejšnje vprašanje pritrdilen, nam, prosim, zaupajte, za kakšno okvaro gre.

.....

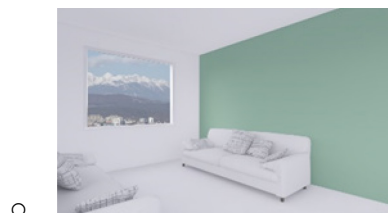
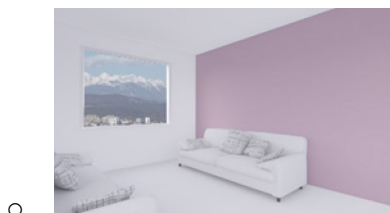
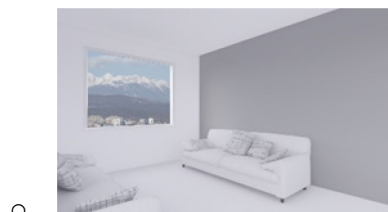
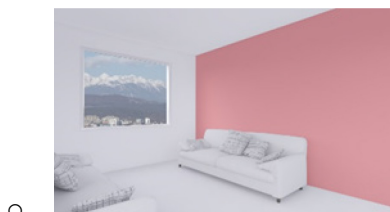
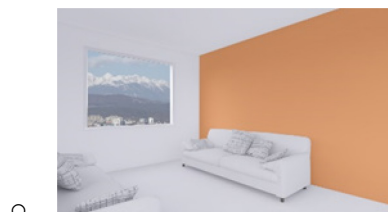
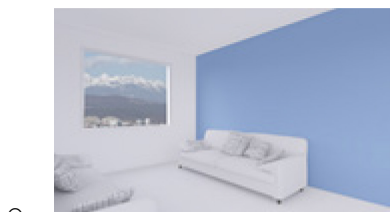
Osebna preferenca barv

Prosimo, izberite najljubši barvni odtenek izmed prikazanih.



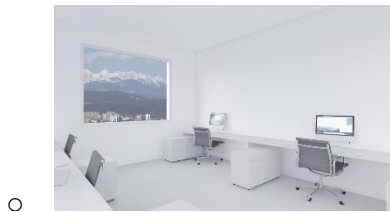
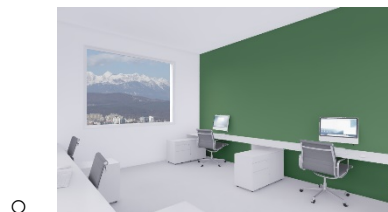
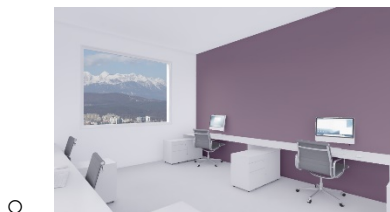
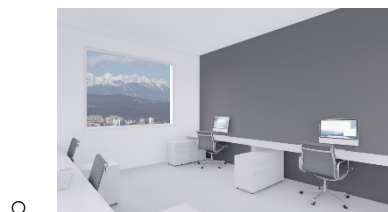
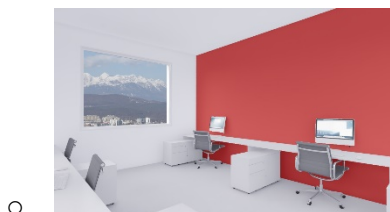
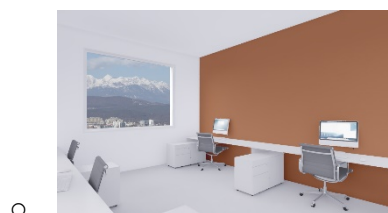
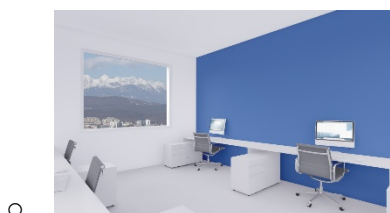
Preferenca vidnega okolja 1

Izberite najljubše svetlobno okolje.



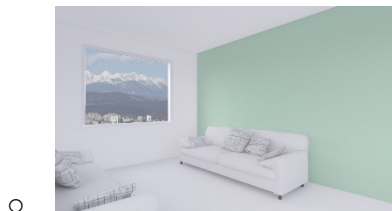
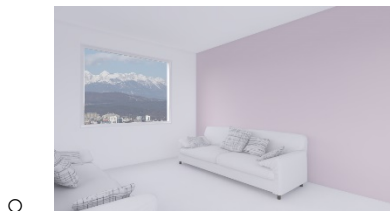
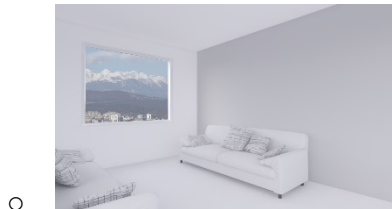
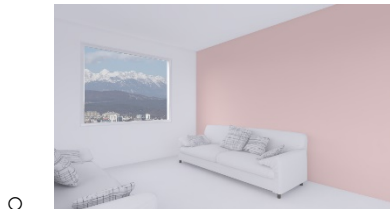
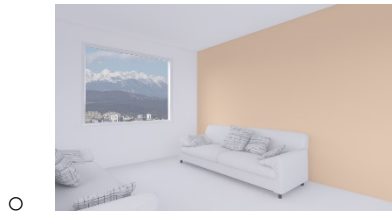
Preferenca vidnega okolja 2

Izberite najljubše svetlobno okolje.



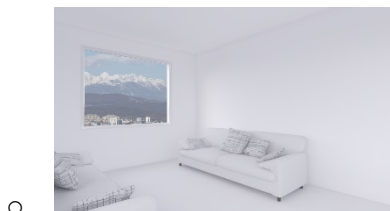
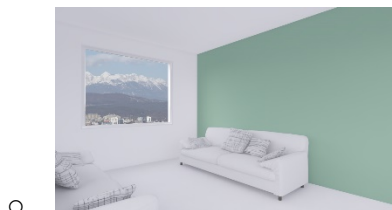
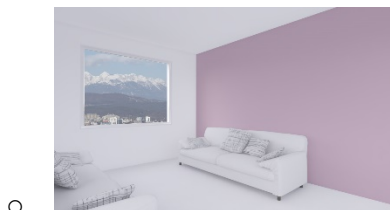
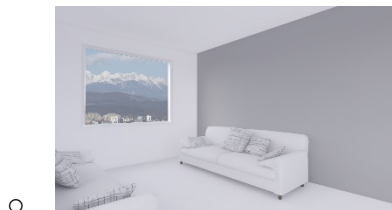
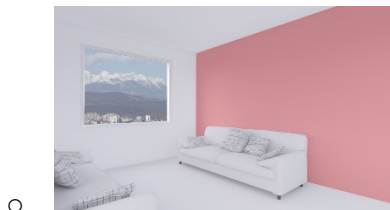
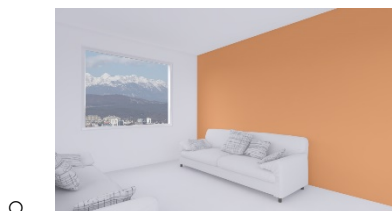
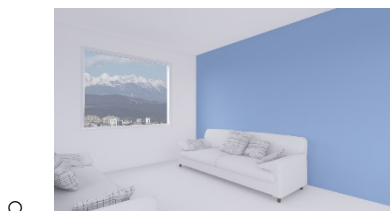
Preferenca vidnega okolja 3

Izberite najljubše svetlobno okolje.



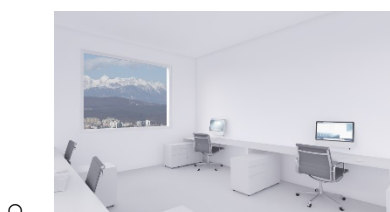
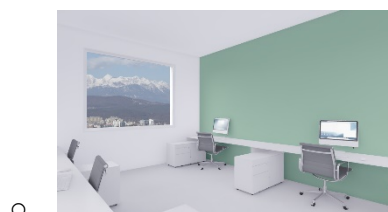
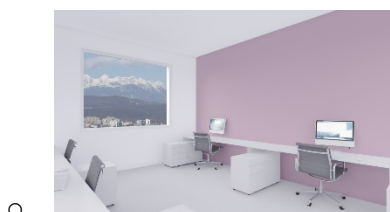
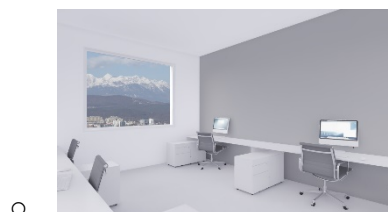
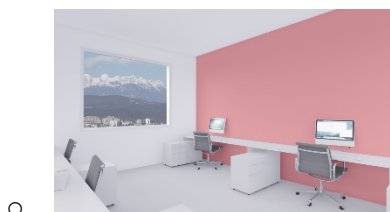
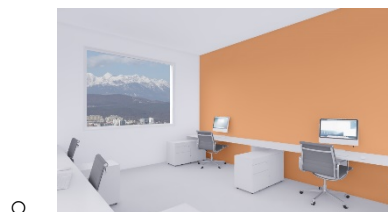
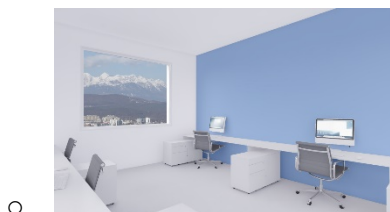
Preferenca vidnega okolja 4

Izberite najljubše svetlobno okolje.



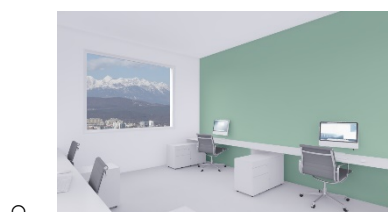
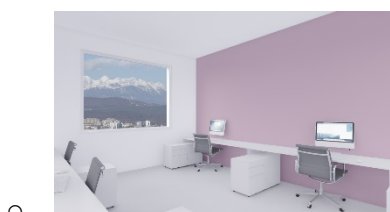
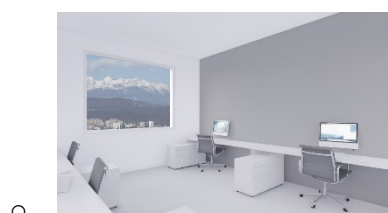
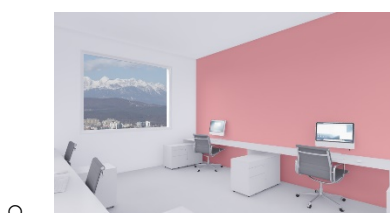
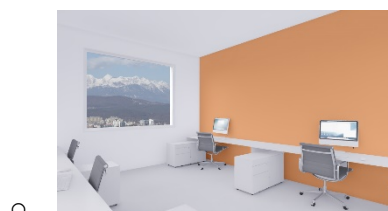
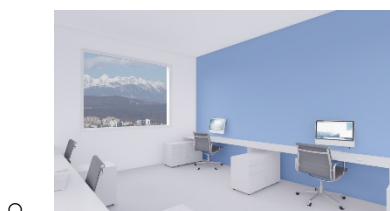
Preferenca vidnega okolja 5

Izberite najljubše svetlobno okolje.



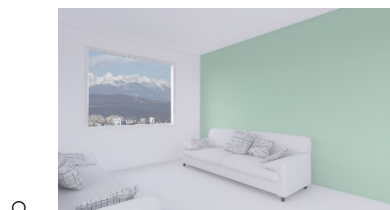
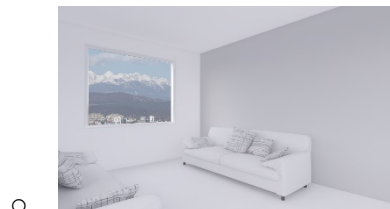
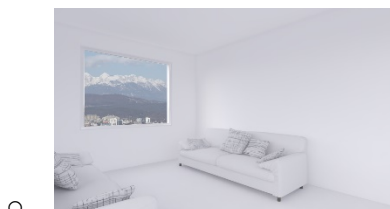
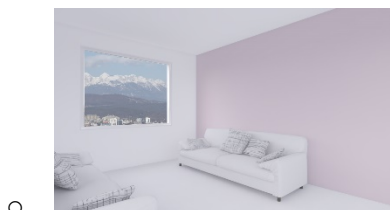
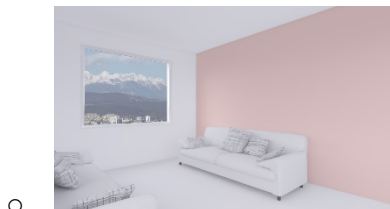
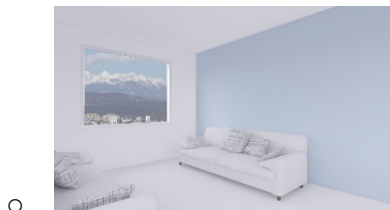
Preferenca vidnega okolja 6

Izberite najljubše svetlobno okolje.



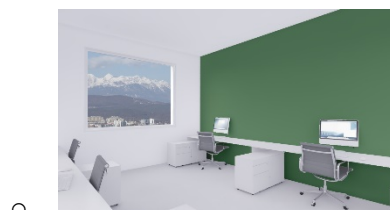
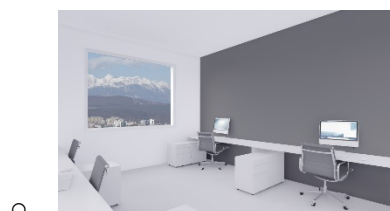
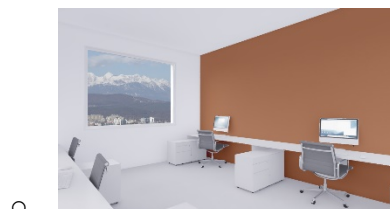
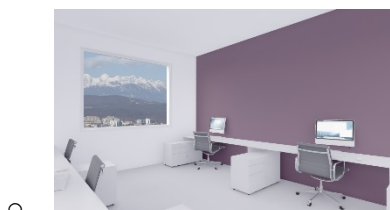
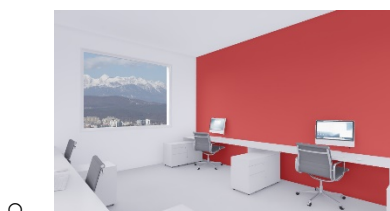
Preferenca vidnega okolja 7

Izberite najljubše svetlobno okolje.



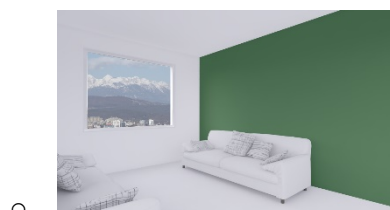
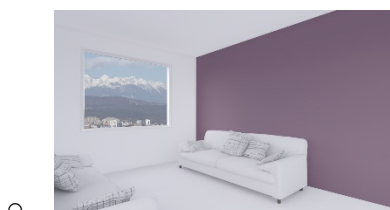
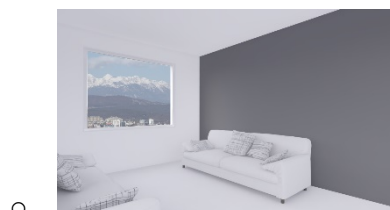
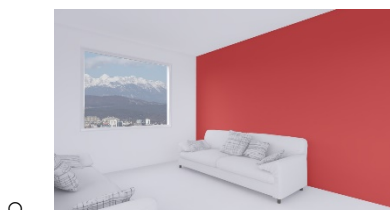
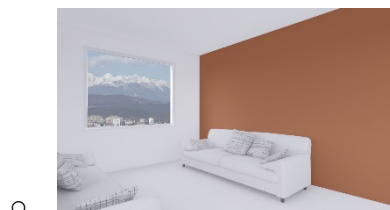
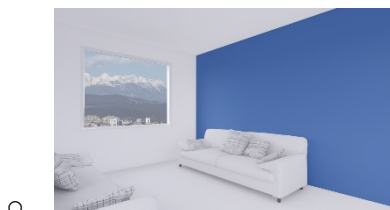
Preferenca vidnega okolja 8

Izberite najljubše svetlobno okolje.



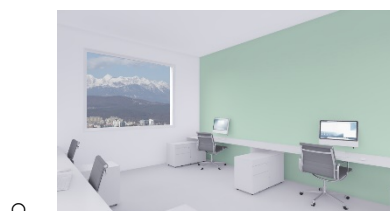
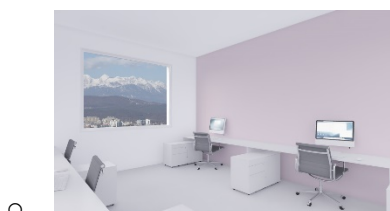
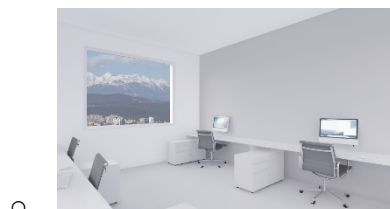
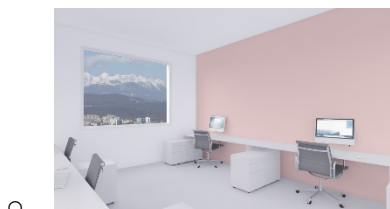
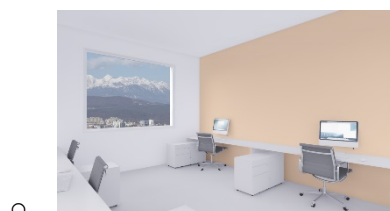
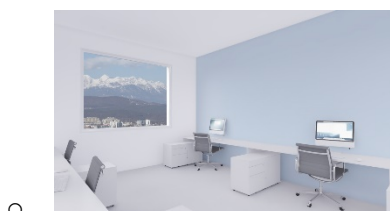
Preferenca vidnega okolja 9

Izberite najljubše svetlobno okolje.



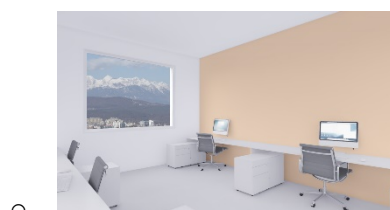
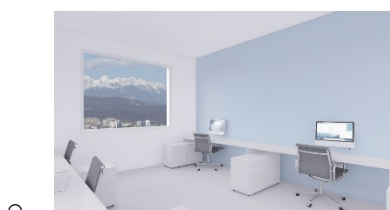
Preferenca vidnega okolja 10

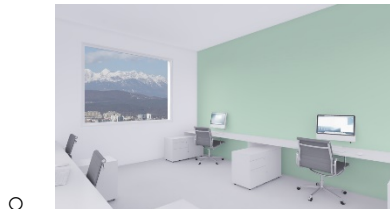
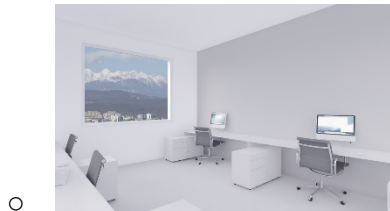
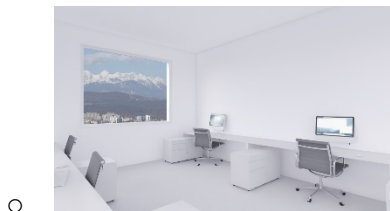
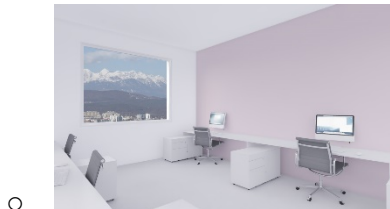
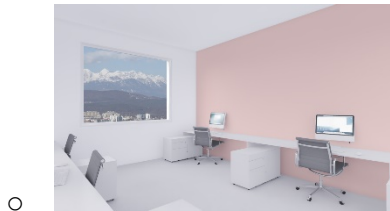
Izberite najljubše svetlobno okolje.



Preferenca vidnega okolja 11

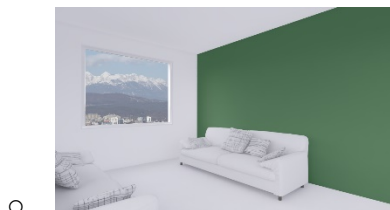
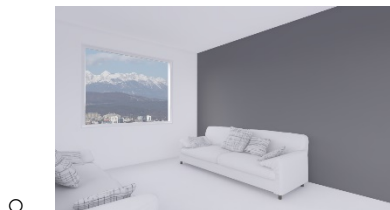
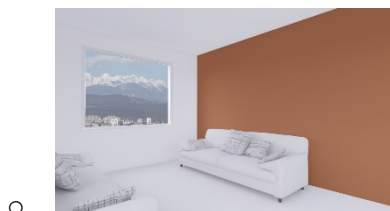
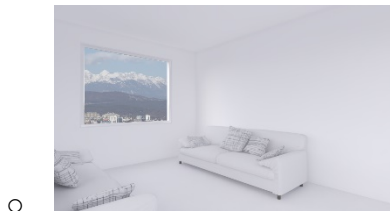
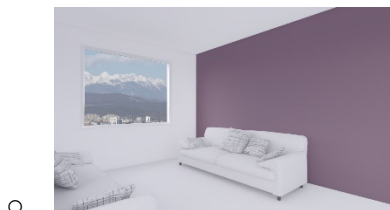
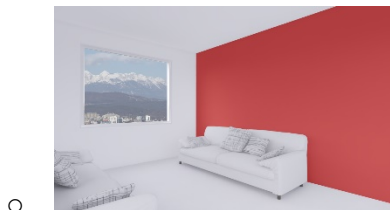
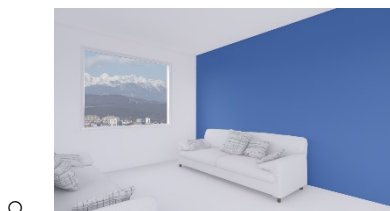
Izberite najljubše svetlobno okolje.





Preferenca vidnega okolja 12

Izberite najljubše svetlobno okolje.



Preferenca vidnega okolja 13

Izberite najljubše svetlobno okolje.



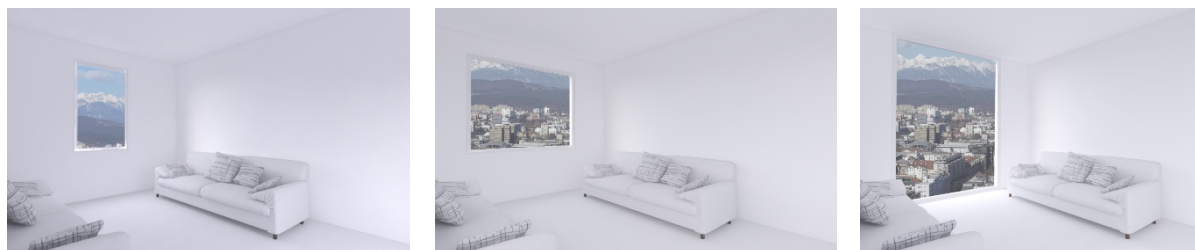
Preferenca vidnega okolja 14

Izberite najljubše svetlobno okolje.



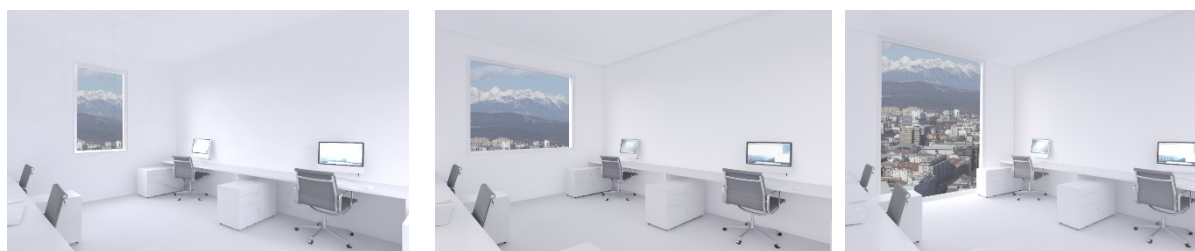
Preferenca vidnega okolja 14

Izberite najljubše svetlobno okolje.



Preferenca vidnega okolja 15

Izberite najljubše svetlobno okolje.



Preferenca vidnega okolja 16

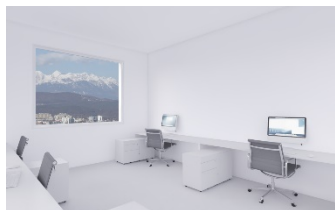
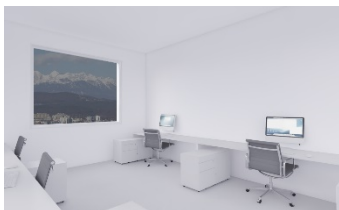
Izberite najljubše svetlobno okolje.



Preferenca vidnega okolja 16

Izberite najljubše svetlobno okolje.





Odgovorili ste na vsa vprašanja v tej raziskavi. Najlepša hvala za sodelovanje!