

asist. dr. Jaka Potočnik, mag. inž. arh.
jaka.potocnik@fgg.uni-lj.si



izr. prof. dr. Mitja Košir, univ. dipl. inž. arh.
mitja.kosir@fgg.uni-lj.si
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana



Znanstveni članek
UDK 628.9.021:72.054

OCENA VEČSPEKTRALNIH SIMULACIJSKIH ORODIJ ZA VREDNOTENJE NEVIZUALNEGA SVETLOBNEGA OKOLJA

ASSESSMENT OF MULTISPECTRAL SIMULATION TOOLS FOR THE EVALUATION OF THE CIRCADIAN LUMINOUS ENVIRONMENT

Povzetek

Svetlobo, predvsem dnevno svetlobo smo z napredki v znanosti preteklih desetletij prepoznali kot usklajevalec vsakodnevnega biološkega ritma – cirkadianega ritma ljudi s 24-urnim solarnim ritmom. Vrsta fotoreceptorja, zadolžena za nevizualno zaznavo, je bolj občutljiva za modri del svetlobe kakor sistem vidne zaznave in zato za oceno učinkov svetlobe na nevizualni sistem zahteva sposobnost vrednotenja okolja tudi z vidika spektralne sestave svetlobe. Namen te študije je bil na podlagi opravljenega eksperimenta ocene notranjega okolja pomanjšane pisarne, postavljene na strehi Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, preveriti, ali so obstoječa orodja večspektralnega vrednotenja notranjega okolja dovolj točna za vrednotenje nevizualnega svetlobnega okolja. Simulacije ovrednotimo z vidika točnosti in hitrosti pri jasnem nebu in severni orientaciji analiziranega prostora. Točnost simulacij ovrednotimo na podlagi korena povprečnega kvadrata napake (RMSE) relativne spektralne porazdelitve svetlobe (RSPD) in relativne napake v relativni melanopski učinkovitosti (RMU). Analiza pokaže nizke RMSE orodij ALFA in Lark, ko obravnavamo RSPD dnevne svetlobe, merjene na horizontalni ravnini zunaj. Kadar točnost vrednotimo z vidika navideznega uporabnika prostora, ALFA vestno simulira svetlobno okolje z največjo RMSE = 0,08 in največjo napako v RMU = 2,8 %. Lark se izkaže za manj natančnega z največjo RMSE = 0,18 in največjo napako v RMU = 16,2 %. Dodatno se izkaže, da je orodje ALFA časovno mnogo učinkovitejše z več kot 20-krat krajšimi simulacijskimi časi v primerjavi z Larkom.

Ključne besede: dnevna svetloba, nevizualni učinki svetlobe, spektralne simulacije, pisarna

Summary

Light, especially daylight, has been recognized by advances in science over the past decades as the main coordinator of the daily biological rhythm of people with a 24-hour solar rhythm. The photoreceptor responsible for the non-visual perception is more sensitive to the blue component of light than the visual perception system. Therefore, it is necessary to evaluate the indoor environment in terms of the spectral composition of light to assess the effects of light on the non-visual system. The purpose of this study was to verify whether the existing tools for multispectral evaluation of the indoor environment are accurate enough to evaluate the non-visual luminous environment. The reliability of the studied tools was tested under clear sky conditions on a north oriented scale model of an office the luminous environment of which was determined experimentally. Experimental results were compared to the simulations evaluated in terms of accuracy and speed. The accuracy of the simulations was evaluated based on the root mean square error (RMSE) of the relative spectral distribution of light (RSPD) and the relative error of the relative melanopic efficiency (RME). The analysis shows that low RMSE of ALFA and Lark tools were achieved when considering RSPD measured outside on the horizontal plane. When evaluating accuracy from the perspective of a hypothetical office user, ALFA adequately simulated the lighting environment with a maximum RMSE = 0.08 and a maximum error in RME = 2.8 %. Lark proves to be less accurate with a maximum RMSE = 0.18 and a maximum error in RME = 16.2 %. Additionally, the ALFA tool proves to be much more time-efficient with more than 20 times shorter simulation runs compared to Lark.

Key words: daylight, non-visual effects of light, spectral simulations, office

1 UVOD

Ljudje v sodobnih industrijskih in postindustrijskih družbah v notranjem grajenem okolju preživimo več kot 90 % časa [Dovjak, 2019], zato je količina naravne svetlobe, ki jo prejmemo v dnevno, v veliki meri pogojena z zasnovo stavbe in njenega okolja. To je še posebej pomembno, saj ima svetloba poleg svojega vizualnega vpliva tudi na mnoge fiziološke in psihološke procese v našem telesu [Siraji, 2022], ki jih poimenujemo nevizualni učinki svetlobe (angl. non-image-forming effects). Nevizualne učinke svetlobe lahko razdelimo v tri kategorije: cirkadiane, nevrovedenjske in nevroendokrine odzive [IES, 2018]. Nevroendokrini odzivi regulirajo, kako možgani regulirajo sintezo hormonov [Berson, 2003], predvsem sintezo melatonina, ki posledno vpliva tudi na cirkadiane odzive, ki usklajujejo našo notranjo 24-urno uro s solarnim ciklom [Czeisler, 2007]. Med nevrovedenjske odzive pa uvrščamo odnos med živčnim sistemom in človeškim vedenjem, med takšne procese uvrščamo pozornost [Rahman, 2017], razpoloženje [Milosavljevic, 2019], kognitivno učinkovitost [Jamrozik, 2019] kot tudi srčni utrip [Cajochen, 2005], telesno temperaturo [Lok, 2019] itd.

Intrinzično fotosenzitivne ganglijske celice (ipRGC) s pomočjo melanopsina v nevizualni recepciji odigrajo ključno vlogo, saj neposredno komunicirajo s superkiazmatskim jedrom v možganih [Berson, 2002], ki regulira naš dnevni ritem in ostale vidike nevizualne zaznave. IpRGC podobno kot paličice in čepki vsebujejo fotopsin – protein, ki sproži prenos svetlobno povzročenega signala do možganov. Fotopsin v ipRGC je poimenovan melanopsin in je najbolj občutljiv za svetlobo v modrem delu spektra pri 480 nm [Foster, 2021], posledično je tudi nevizualna zaznava najbolj občutljiva za takšno svetlobo v nasprotju z vidno zaznavo, ki je najbolj občutljiva za svetlobo v rumeno-zelenem delu spektra pri 555 nm [ISO, 2019]. Dodatno je nevizualna zaznava svetlobe časovno pogojena. To pomeni, da bo vpliv svetlobe na cirkadiani sistem oz. človeško vedenje odvisen od tega, kdaj, kako dolgo smo izpostavljeni svetlobi in kako smo bili izpostavljeni svetlobi v bližnji preteklosti [Wahl, 2019]. Visoka količina svetlobe v jutranjih urah tako premika človekovo uro naprej [Crowley, 2015], čez dan vpliva na razpoloženje ter dviga našo pozornost in produktivnost ([Figueiro, 2017], [Knoop, 2019], [Sahin, 2014]). Velike količine svetlobe zvečer pa obratno zamikajo cirkadiano uro nazaj ter jo s tem desinhronizirajo s solarnim ciklom [Emens, 2015]. Dolgotrajna neustrezna »svetlobna dieta« se lahko prične izražati v mnogih psiholoških ali fizioloških boleznih. Med najpogostejšimi so sezonsko pogojena depresija in motnje spanca [Walker, 2020]. V ekstremnih primerih, kot je izmenska delo, pa lahko takšne motnje privedejo tudi do različnih vrst raka [Straif, 2007].

Drugačnost nevizualnega odziva na svetlobo zato zahteva tudi drugačno vrednotenje svetlobnega okolja. V literaturi se pojavlja vse večje število študij, v katerih sta najpogostejše uporabljani dve metodologiji. Prvo metodologijo ekvivalentnega α -opskega luxa oz. ekvivalentnega melanopskega sevanja, ki so jo predlagali Lucas in sod. [Lucas, 2014], je privzela tudi CIE v [CIE, 2018]. Omenjena metodologija nevizualno količino svetlobe opisuje analogno z metodo osvetljenosti. Vendar za vrednotenje vpliva na ipRGC, namesto $V(\lambda)$ uporablja odzivnost posameznih fotoreceptorjev ob prejetem svetlobnem dražljaju. Pri analizi nevizualnih aspektov je tako najpomembnejši odziv ipRGC, pri čemer se količina svetlobe izrazi s t. i. ekvivalentnimi melanop-

skimi luxi (EML). Vemo pa, da pri nevizualni zaznavi posredno sodelujejo tudi ostali fotoreceptorji, zato lahko s to metodo vrednotimo tudi vplive svetlobe na ostale fotoreceptorje, kljub temu pa koherentni vpliv vseh fotoreceptorjev pri nevizualni zaznavi v tej metriki ni zajet. Celosten vpliv sodelovanja vseh fotoreceptorjev pri nevizualni zaznavi svetlobe pa je zajet v drugi najbolj pogosto uporabljeni metodologiji, poimenovani Circadian Light – CL_A , ki so jo predlagali [Rea, 2012]. Ta metoda ni neposredno primerljiva z metodo fotopske osvetljenosti, vendar za razliko od metode α -opskega sevanja sočasno upošteva delovanja vseh fotoreceptorjev pri nevizualni zaznavi. Iz raziskovalnega dela, ki so ga izvedli [Figueiro, 2017] o nevizualnih vplivih svetlobe na delavce v pisarniških okoljih, pa vemo, da izpostavljenost količini svetlobe 275 CL_A (275 CL_A lahko dosežemo s sevanjem črnega telesa pri 275 lx in 4000 K) ali več, v času delovnika zaposlenih pozitivno vpliva na njihove kognitivne vedenjske sposobnosti.

Pri načrtovanju notranjega bivalnega ali delovnega prostora so simulacije svetlobnega okolja zelo pomembne, saj omogočajo preliminarno testiranje načrtovalskih rešitev, ki vplivajo na razporeditev svetlobe v prostoru. Trenutno je na voljo vrsta različnih simulacijskih orodij, ki omogočajo vrednotenje vidne svetlobe oziroma osvetljenosti notranjega okolja [Gkaintatzi-Masouti, 2021]. Takšna orodja vrednotijo svetlobo preko treh kanalov – R, G in B, skladno s človeško vidno zaznavo in v osnovi niso sposobna simulacij spektralne sestave svetlobe oziroma izračunov rezultatov, uteženih glede na nevizualno zaznavo svetlobe. Med takšna orodja uvrščamo orodja, kot so na primer Radiance [RADSITE, 2021], Daysim [Daysim, 2019], Relux [Relux, 2022] in Velux Daylight Visualizer [Velux, 2022]. Tovrstna orodja omogočajo vrednotenje količine svetlobe v odvisnosti od geometrije, pripadajočih optičnih lastnosti (koeficienti odsevnosti ali presevnosti) in svetlobnih pogojev (dnevna svetloba in/ali električna razsvetljava). Predvsem kadar vrednotimo zgolj vpliv dnevne svetlobe, je s takšnimi orodji smiselno oceniti tudi svetlobno okolje v daljšem časovnem obdobju v odvisnosti od podnebnih razmer. To omogoča metodologija podnebno pogojenega modeliranja dnevne svetlobe ([Brembilla, 2019], [Eržen, 2016]). Vsa izmed do sedaj naštetih orodij in metod vestnega vrednotenja nevizualno učinkovitega svetlobnega okolja niso sposobna, saj so pri takšnih oblikah simulacijah potrebne znatne poenostavitve. Tako so na primer ([Acosta, 2017], [Andersen, 2013], [Mardaljevic, 2013]) v svojih študijah nevizualnih aspektov grajenega okolja zanemarili obarvanosti materialov. To pomeni, da so predvideli uporabo spektralno nevtralnih materialov, kjer so vrednosti faktorjev vidne odsevnosti in presevnosti le pomnožili z generalizirano nevizualno učinkovitostjo povprečne dnevne svetlobe ter tako nespektralno ocenili nevizualne aspekte notranjega okolja s pomočjo orodja Radiance. Za bolj vestno upoštevanje vpliva optičnih lastnosti materialov (npr. obarvanosti materialov) na nevizualni vidik svetlobnega okolja je zato treba uporabiti metodo, ki bo zmožna spektralne simulacije dnevne svetlobe. Trenutno sta na voljo samo dve večspektralni metodi oziroma orodji, ki to omogočata za simulacije z dnevno svetlobo [Gkaintatzi-Masouti, 2021]. Prvo orodje, poimenovano Lark [Lark, 2015], je odprtokodni vtičnik za Rhinoceros [Rhino 6, 2020], ki je osnovan na n-koračni metodi Radiance, predlagani s strani [Inanici, 2015]. Lark sočasno izvede 3 simulacijske izračune Radiance RGB, kar pomeni, da je spekter dnevne svetlobe predstavljen z 9 diskretnimi kanali. Larkova 9-kanalna metoda

preko posebnih uteži za vsakega izmed 9 kanalov omogoča vrednotenje spektra dnevne svetlobe, pri čemer so kanali bolj zgoščeni v območju višje občutljivosti nevizualne zaznave. Kakor je prikazano v preglednici 1, so v ta namen prilagojene tudi relativna spektralna svetlobna učinkovitost pri dnevnem videnju $V(\lambda)$ in relativna spektralna svetlobna učinkovitost melanopsina $N_m(\lambda)$ [Inanici, 2015]. Lark spektralne pogoje dnevne svetlobe generira na podlagi obstoječih predhodno izmerjenih ali drugače definiranih spektralnih distribucij sevanja (SPD) dnevne svetlobe.

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
$V(\lambda)$	0,0004	0,0095	0,0522	0,1288	0,2231	0,3174	0,2521	0,0162	0,0002
$N_m(\lambda)$	0,0166	0,1819	0,3973	0,2468	0,1204	0,0351	0,0018	0	0

Preglednica 1. Prikaz razdeljevanja območja vidnega dela sevanja na 9 diskretnih kanalov v programskem orodju Lark. Podani sta tudi prilagojeni funkciji $V(\lambda)$ in $N_m(\lambda)$.

Druga metoda večspektralnega vrednotenja svetlobe se imenuje ALFA – *Adaptive Lighting for Alertness* [LLC, 2021] in je prav tako vtičnik za Rhinoceros, vendar je ta licenčni oziroma plačljiv. ALFA vrednoti svetlobno okolje v 81 spektralnih kanalih vidne svetlobe pri 5-nm resoluciji med 380 in 730 nm. Omogoča uporabo umetnih svetil kot tudi dnevne svetlobe, lastnosti katere kreira na podlagi knjižnice libRadTran [Emde, 2016] – knjižnice radiacijskega prenosa atmosferskega profila srednjih geografskih širin Geofizikalnega laboratorija ameriških zračnih sil za jasno, oblačno, delno oblačno in deževno nebo.

V literaturi smo zasledili vrsto študij, kjer orodje Lark uporablja jo za vrednotenje notranjega nevizualnega svetlobnega okolja. Kot prvi koncept delovanja predstavijo [Inanici, 2015]. Nato [Ewing, 2017] preizkusijo delovanja Larka za druge α -opske luxe. [Konis, 2017] na podlagi Larka izračuna melanopske osvetljenosti celotnega pisarniškega okolja. Vendar izmed omenjenih študij nobena ne vrednoti, ali izvedene simulacije dobro oz. primerno odražajo realnost. Prvi poskus poenostavljene primerjave točnosti Larka opravimo v študiji pomanjšane pisarne [Potočnik, 2019], vendar zgolj z vidika α -opskih osvetljenosti pri spektralno nevtralnem okolju in oblačnem nebu, kjer je napaka Larka manjša od 0,5 %. Bolj celovito primerjavo sposobnosti spektralne simulacije zunanjega svetlobnega okolja izvedeta [Balakrishnan, 2019], ki sistematično evidentirata specifičnosti obeh programskih orodij ter primerjata simulirane rezultate z eksperimentalnimi meritvami kot tudi standardnimi simulacijami Radiance RGB. Bistven zaključek izvedene študije je spoznanje, da je za izvajanje multispektralnih simulacij z orodjema Lark in ALFA ključnega pomena razumevanje in zavedanje na kakšen način orodji simulirata zunanje hemisferske svetlobne pogoje. Tako ALFA uporablja generični atmosferski profil za srednje geografske širine, kar omogoča simulacijo situacij s soncem pri majhnih dvižnih kotih (npr. zvečer). Nasprotno Lark kot vhodni podatek potrebuje SPD dnevne svetlobe, v primeru prisotnosti sonca pa je to simulirano kot bel disk enakomerne energije. Omenjeni razliki in primerjava avtorjev privedejo do zaključka, da ALFA bolj vestno odraža svetlobne pogoje pri

jasnem tipu neba, nasprotno pa velja v primeru oblačnega neba (tj. brez prisotne direktne komponente) za orodje Lark [Balakrishnan, 2019]. Celostno zasnovano analizo točnosti simulacijskih orodij Lark in ALFA v primerjavi z eksperimentalnimi meritvami so izvedli tudi Pierson in sod., in sicer tako v primeru dnevne svetlobe [Pierson, 2021a] kot tudi uporabe umetne razsvetljave [Pierson, 2021b]. V primerjavi med simulacijskimi in merjenimi rezultati pisarniškega okolja v Eindhovnu in Lausanni pri večinoma oblačnem (Eindhoven) in jasnem (Lausanna) stanju neba ter ob relativno spektralno nevtralnih

optičnih lastnostih notranjih površin se je Lark izkazal kot zelo točen, odstopanja med meritvami in simulacijami pa so bila podobna kot v primeru standardnih simulacij Radiance RGB (± 20 %) [Pierson, 2021a]. Omenjena raziskava je v primeru ALFE pokazala na vestno reproduciranje spektralne distribucije dnevne svetlobe, a na podcenjevanje dosežene absolutne osvetljenosti.

ALFA se vedno pogosteje uporablja pri analizi notranjega svetlobnega okolja [Gkaintatzi-Masouti, 2021]. V naših predhodnih študijah s pomočjo ALFE določamo vpliv različnih arhitekturno-gradbenih elementov v enostransko osvetljeni celični pisarni v točki v času [Potočnik, 2021] ter vpliv barv v poteku celega dne ([Potočnik, 2020a], [Potočnik, 2020b]) izključno pri osvetljevanju z dnevno svetlobo. Na letnem nivoju vrednotijo nevizualno svetlobno vsebino prostora tudi [Vaz, 2020]. V nasprotju [Safranek, 2020] svetlobo notranjega okolja vrednotijo zgolj z vidika umetne razsvetljave. Na podlagi že predhodno omenjenih validacijskih študij Larka in ALFE, ki so jih izvedli ([Pierson, 2021a], [Pierson, 2021b]), se orodje ALFA izkaže za bolj natančno v primeru večspektralnih simulacij pisarniškega okolja, osvetljenega z umetno svetlobo [Pierson, 2021a], v vseh primerih pa za veliko hitrejšo ter uporabniku prijaznejšo.

Pregled literature je pokazal, da sta bili simulacijski orodji Lark in ALFA pogosto uporabljani, izvedenih pa je bilo tudi nekaj validacijskih študij pri osvetljevanju tako z dnevno kot tudi umetno svetlobo, a ob relativno spektralno nevtralnih odsevnih in presevnih lastnostih notranjega okolja. Kljub temu pa še vedno z gotovostjo ne vemo, ali se lahko na rezultate z orodji zanesemo z vidika točnosti simulacijskih rezultatov spektralno nevtralnega okolja. Posledično je poglobitni cilj predstavljene študije v nadaljevanju določiti, kako zanesljivi in točni sta orodji Lark in ALFA pri spektralni reprezentaciji notranjega svetlobnega okolja v primerjavi z meritvami izključno pri jasnem stanju neba ter ob prisotnosti spektralno nenevtralnih površin (npr. obarvana stena) in zasteklitve (npr. obarvane sončno zaščitne zasteklitve). Posledično je bilo preučeno tudi, do ko-

likšne mere sta orodji uporabni (in relevantni) pri vrednotenju melanopsko uteženega svetlobnega okolja, ki je primarni pokazatelj ustreznosti svetlobnega okolja z vidika nevizualnih vplivov svetlobe. Zanesljivost simulacijskih orodij Lark in ALFA ovrednotimo na podlagi eksperimentalnih meritev, pridobljenih na pomanjšanem modelu pisarne z enostransko zasteklitvijo in severno orientacijo.

2 METODOLOGIJA

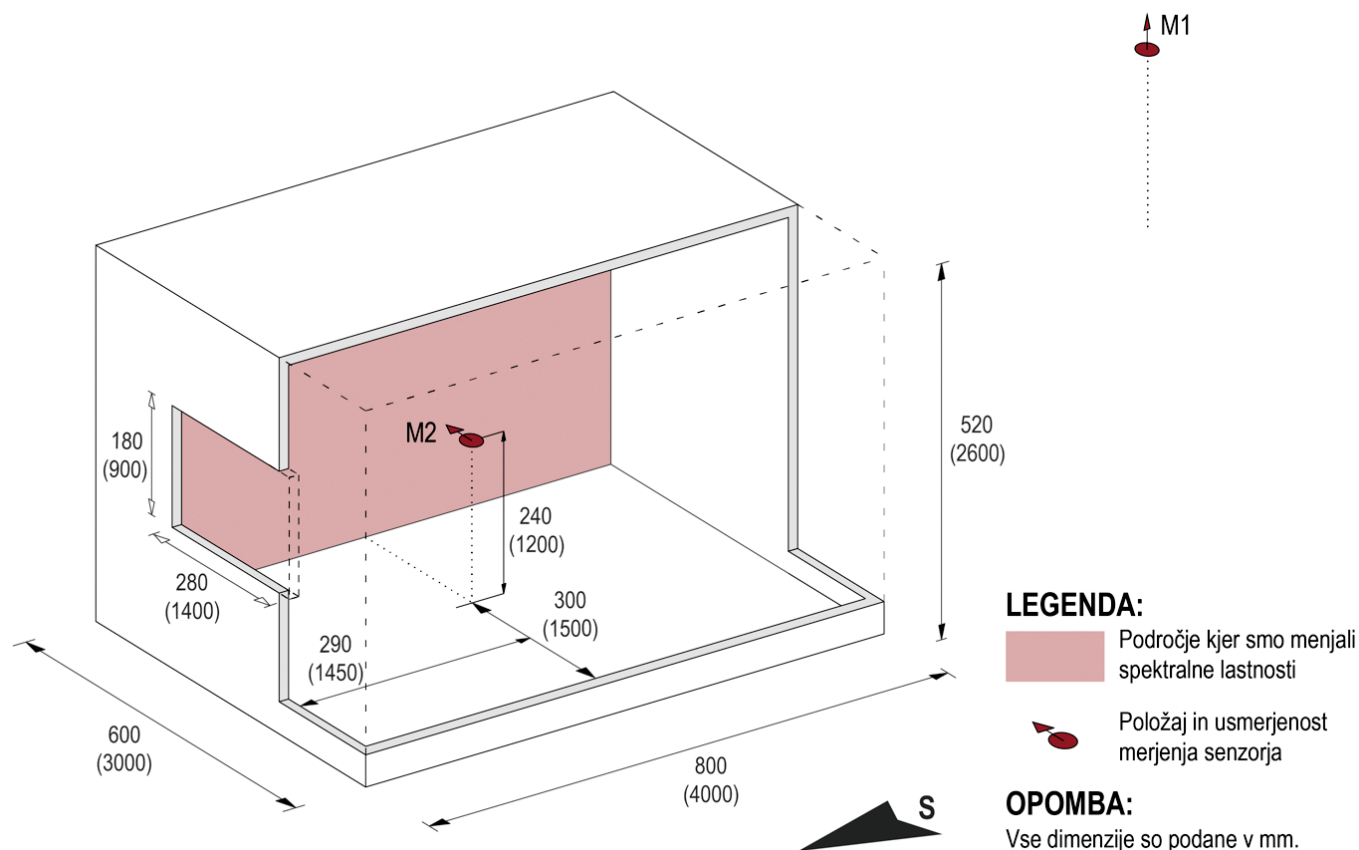
Metodološko je izvedeno raziskavo možno razdeliti na tri poglavitne dele, ki so predstavljeni v nadaljnjih podpoglavjih. V prvem delu (poglavje 2.1) so predstavljene optične lastnosti površin in geometrijska zasnova referenčnega prostora. Prostor je bil uporabljen v pomanjšanem merilu v sklopu eksperimentalnih meritev, katerih izvedba je predstavljena v poglavju 2.2, kot tudi v simulacijskih izračunih (poglavje 2.3). Na koncu so predstavljeni način in metode, uporabljene za ovrednotenje točnosti simulacijskih izračunov v primerjavi z referenčnimi eksperimentalno pridobljenimi rezultati (poglavje 2.4).

2.1 Opis referenčnega prostora

Referenčni prostor predstavlja tipično celično pisarno, namenjeno enemu uporabniku, z dimenzijami 3000 x 4000 x 2600 mm (širina x dolžina x višina), merjenih kot notranje, »svetle« dimenzije. V sklopu eksperimentalnega dela je bil

predstavljen s pomanjšanim modelom v merilu 1 : 5. Tako so dejanske fizične dimenzije eksperimentalnega (pomanjšanega modela) znašale 800 x 600 x 520 mm (slika 1). Referenčni prostor je bil zasnovan kot enostransko osvetljen z vertikalno okensko odprtino, ki je bila izvedena na krajši stranici prostora pri deležu fasadne zasteklitve 10,5 % zunanje stene. Okenska odprtina dimenzij 1400 x 900 mm (širina x višina) je bila orientirana proti severu, v steno pa je bila postavljena simetrično okoli središčne vertikalne osi zidu s parapetom 900 mm. V pomanjšanem eksperimentalnem modelu tako višina parapeta znaša 180 mm, okno pa je 280 mm široko ter 180 mm visoko.

V referenčnem prostoru je bilo predpostavljeno eno delovno mesto, ki je bilo predvideno za stransko osvetljeno delovno mesto, kar pomeni, da svetloba z okna pada na delovno mesto z leve strani, pogled hipotetičnega uporabnika pa je usmerjen proti vzhodni steni. Pozicija omenjenega hipotetičnega uporabnika je bila predvidena v točki, odmaknjeni 1450 mm (v pomanjšanem modelu 290 mm) ter 1500 mm (v pomanjšanem modelu 300 mm) od zahodne stene prostora. Predvideno je bilo, da uporabnik sedi za pisalno mizo, zato je bila za njegovo zenično višino privzeta vrednost 1200 mm (v pomanjšanem modelu 240 mm), kar je tipična višina očesa sedečega opazovalca. Vse lastnosti referenčnega prostora z označenimi realnimi dimenzijami kot tudi dimenzijami pomanjšanega modela so predstavljene na sliki 1, eksperimentalni model pa je prikazan tudi na sliki 3.



Slika 1. Zasnova referenčnega prostora celične pisarne z označenimi merilnimi mesti. Dimenzije, navedene v oklepajih, predstavljajo dejanske dimenzije prostora, dimenzije izven oklepajev pa dimenzije eksperimentalnega modela v merilu 1 : 5.

2.1.1 Optične lastnosti materialov referenčnega prostora

Ujemanje eksperimentalnih meritev in simulacijskih izračunov smo preverjali pri 9 različnih konfiguracijah optičnih lastnosti elementov (površin) notranjega okolja. V osnovi je bil eksperimentalni model pisarne izdelan iz brezovih vezanih plošč, ki so na notranji strani pobarvane v belo barvo z izmerjeno vidno odsevnostjo $R_v = 0,87$, tla smo pustili neobdelana v brezovem lesu, katerega izmerjena vidna odsevnost je znašala $R_v = 0,61$. Optične lastnosti vzhodne stene (na slikah 1 in 3 rdeče označena površina) so bile spreminjane med oranžno (OS), sivo (SS) in modro (MS) barvo pri primerljivi izmerjeni $R_v \approx 0,55$ (slika 2). Barva vzhodne stene je bila v eksperimentalnem modelu reproducirana s pomočjo visokozmogljivega tiskalnika na mat fotopapirju, kar je omogočalo hitro zamenjavo optičnih lastnosti vzhodne stene v sklopu eksperimentalnega dela raziskave. Barve vzhodne stene pisarniškega okolja so bile izbrane z namenom, da omogočijo preveritev točnosti analiziranih orodij Lark in ALFA pri nenevtralnih lastnostih notranjih površin, in sicer v toplem (OS – oranžna barva), nevtralnem (SS – siva barva) ali hladnem (MS – modra barva) odsevnem okolju. Odsevnosti vseh uporabljenih materialov v odvisnosti od valovne dolžine, ki so natančneje prikazane na sliki 2, so bile izmerjene s pomočjo spektrofotometra Perkin Elmer Lambda 950 UV-Vis_NIR v območju vidne svetlobe (380–780 nm) in resoluciji 1 nm v laboratoriju Oddelka za arhitekturo, grajeno okolje in konstrukcijsko inženirstvo na Politehniki v Milanu. Izmerjene vrednosti odsevnosti R_v kot tudi odsevnost v odvisnosti od valovne dolžine so bile uporabljene za poustvaritev optičnih lastnosti v simulacijskih programih Lark in ALFA.

Podobno kot pri odsevnih materialih smo tudi pri presevnih materialih (tj. zasteklitvah) točnost simulacij vrednotili pri toplih (DZ_br – dvoslojna bronasta zasteklitve z nizkoemisijemskim premazom), hladnih (DZ_m – dvoslojna modra zasteklitve z nizkoemisijemskim premazom) in nevtralnih ma-

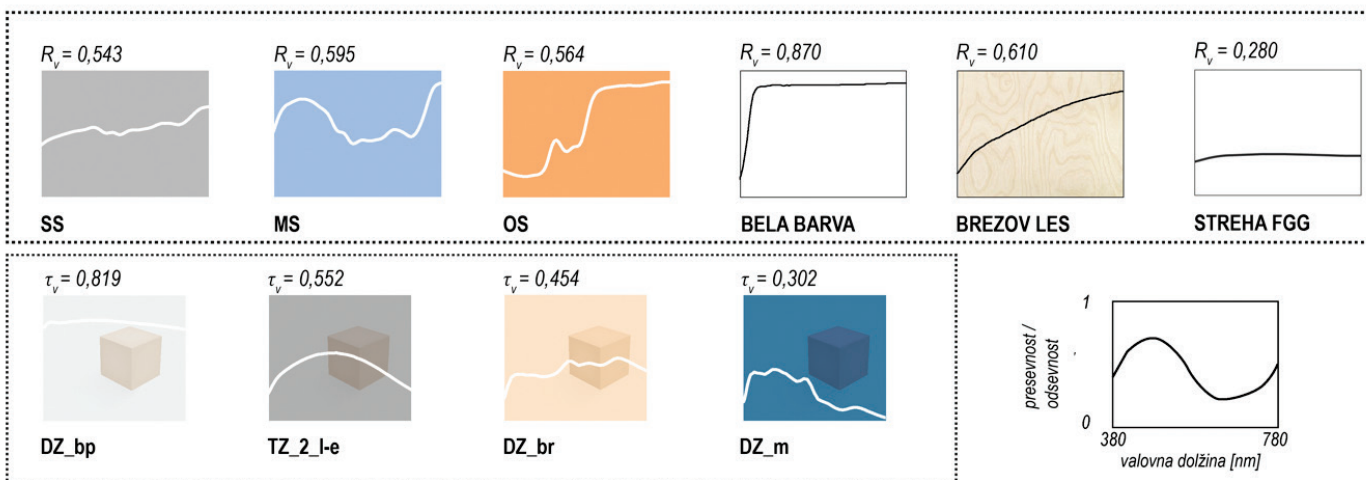
terialih (DZ_bp – dvoslojno steklo brez premazov in TZ_2_l-e – troslojno steklo z nizkoemisijemskim premazom). Ker so omenjene zasteklitve komercialni tipi zasteklitev, ki jih proizvaja podjetje Reflex, d. o. o. [REFLEX, 2022], smo njihovo presevnost (τ_v) določili s pomočjo podatkov proizvajalcev stekel in s programskim orodjem Optics [LBL, 2021]. Izračuni presevnosti zasteklitev so bili izvedeni na podlagi standarda [SIST, 2011]. Vrednosti tako pridobljene presevnosti τ_v kot tudi presevnosti v odvisnosti od valovne dolžine so predstavljene na sliki 2.

2.1.2 Analizirane konfiguracije referenčnega prostora

Kakor smo že omenili, smo materiale izbirali tako, da smo lahko preverili, ali preverjani programski orodji točno računata z materiali različnih poudarjenih valovnih dolžin, torej s spektralno nenevtralnimi materiali. Na podlagi klasifikacije uporabljenih materialov v toplo, hladno in nevtralnno okolje zasnujemo 9 različnih konfiguracij notranjega okolja (preglednica 2), ki bodo eksperimentalno izmerjene in simulacijsko analizirane z ALFO in Larkom.

S konfiguracijami notranjega okolja K1 do K3 smo preverjali zanesljivost simulacij pri hladnih (MS – modra barva), nevtralnih (SS – siva barva) ali toplih odsevnih lastnosti (OS – oranžna barva) vzhodnega zidu, pri čemer v okensko odprtino ni bila vstavljena zasteklitve (preglednica 2). Nadalje s konfiguracijami K4 do K6 preverimo zanesljivost istih odsevnih materialov, vendar z dvoslojno zasteklitvijo (DZ_bp) v okenski odprtini (preglednica 2). Na koncu pa s konfiguracijami K7 do K9 preverjamo, kako točni sta programski orodji pri simuliranju različnih presevnih materialov ob upoštevanju nevtralnih odsevnih lastnosti vzhodne stene (SS – siva barva). Poimenovanja analiziranih konfiguracij z odgovarjajočimi uporabljenimi materiali vzhodnega zidu in zasteklitve so prikazana v preglednici 2.

ODSEVNI MATERIALI



PRESEVNI MATERIALI

Slika 2. Materiali, uporabljeni v eksperimentu in simulacijah s predstavljenimi vrednostmi τ_v in R_v kot tudi presevnostjo oz. odsevnostjo v odvisnosti od valovne dolžine svetlobe.

Konfiguracija	Materialnost vzhodnega zidu	Tip zasteklitve
K1	OS	brez zasteklitve
K2	SS	brez zasteklitve
K3	MS	brez zasteklitve
K4	OS	DZ_bp
K5	SS	DZ_bp
K6	MS	DZ_bp
K7	SS	DZ_br
K8	SS	TZ_2_l-e
K9	SS	DZ_m

Preglednica 2. Različice uporabljenih konfiguracij materialov v eksperimentalnem in simulacijskih modelih. Pri vseh konfiguracijah so notranje stene in strop, razen vzhodne stene, belo obarvani, tla pa v neobdelanem brezovem lesu (glej sliko 2).

2.2 Zasnova eksperimentalnih meritev

Model referenčnega prostora celične pisarne je bil nameščen na strehi Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani (UL FGG). Eksperimentalne meritve, uporabljene v pričujoči študiji, so bile izvedene 28. 2. 2019. V merilnem mestu M1, prikazanem na sliki 1, smo na horizontalni ravnini merili stanje zunanjega svetlobnega okolja. V točki M2 smo merili stanje notranjega svetlobnega okolja v vertikalni ravnini z gledišča zaznavanja hipotetičnega sedečega uporabnika pisarne. V merilnem mestu M1 merimo spektralno distribucijo sevanja dnevne svetlobe (SPD) in zunanjo globalno horizontalno osvetljenost ($E_{e,h}$). V merilnem mestu M2 sočasno merimo osvetljenost na vertikalni ravnini – E_v in SPD na vertikalni ravnini z vidika uporabnika pisarniškega prostora. Meritve SPD, $E_{e,h}$ in E_v so bile izvedene v 30-sekundnih intervalih neprekinjenega merjenja – za vsako iteracijo eksperimenta je bilo opravljenih 30 meritev. V namen zmanjšanja vpliva spremenljivosti zunanjih pogojev dnevne svetlobe na podlagi izmerjenih podatkov izvednimo povprečno vrednost vsakega izmed 30-sekundnih intervalov merjenja.

Za meritve SPD prejete dnevne svetlobe na horizontalni ravnini zunaj (merilno mesto M1) in SPD v vertikalni ravnini uporabnika (merilno mesto M2) smo uporabili dva enaka kalibrirana spektrometra StellarNet Black Comet CLK-CXR [BLACK-Comet, 2020] s konkavnim optičnim rešetom s sposobnostjo merjenja spektra v obsegu od 280 do 900 nm pri 1-nm resoluciji [BLACK-Comet, 2020]. SPD zunanjih in notranjih svetlobnih pogojev so merjeni za vidni del sevanja, torej med 380 in 780 nm v 1-nm resoluciji. Spektrometra svetlobo zajemata z nameščenim kosinusnim receptorjem, ki omogoča 180° kot merjenja svetlobe. Receptor spektrometra je bil skupaj z merilcem osvetljenosti nameščen na trinožnem stojalu v notranjosti modela pisarne v merilnem mestu M2 (slika 3), podobno sta bila nameščena tudi receptor spektrometra in merilec osvetljenosti v merilnem mestu M1, pri čemer je tri-

nožno stajalo postavljeno tako, da so okoliške ovire čim manj vplivale na meritve.

Zunanjo osvetljenost na horizontalni ravnini – $E_{e,h}$ (merilno mesto M1) in osvetljenost na vertikalni ravnini v notranjosti modela – E_v (merilno mesto M2) hipotetičnega uporabnika smo merili z merilcema osvetljenosti Almemo FLA 603 [Almemo, 2020], kalibriranima po standardu DIN 5032 z napako ± 1 lx. Senzorja sta bila preko dataloggerja Almemo 5950-2 2M povezana na prenosni računalnik, kjer so se zapisovali podatki.

2.3 Zasnova simulacijskih modelov

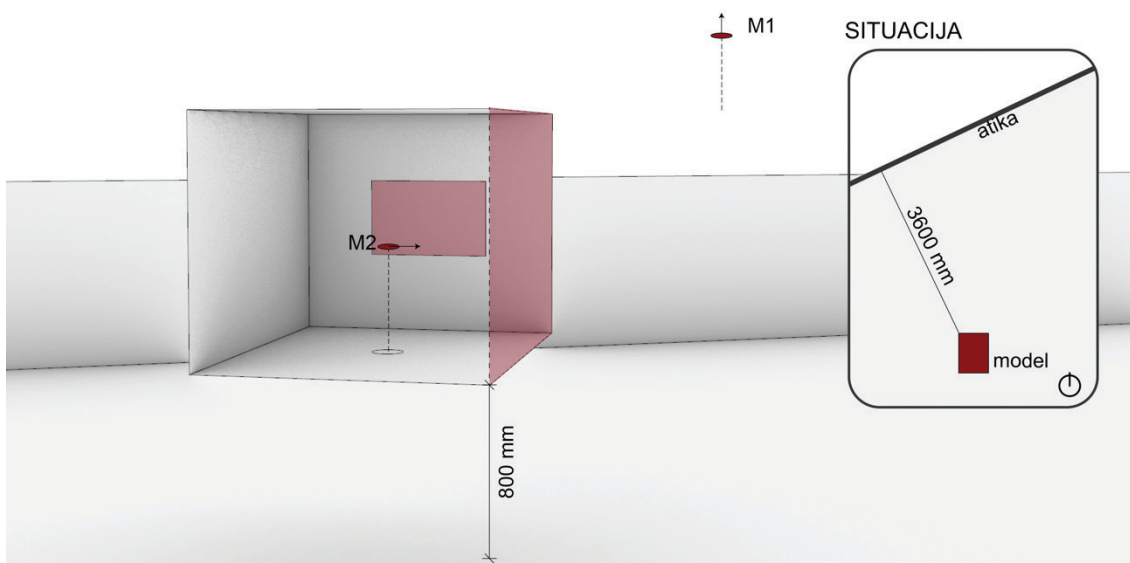
Obe obravnavani orodji, torej Lark in ALFA, sta vtičnika geometrijskega modelirnika Rhinoceros 6 [Rhino 6, 2020], kjer je bila izdelana digitalna replika geometrije referenčnega prostora, opisanega v poglavju 2.1. Z digitalnim modelom smo pustvarili geometrijo izvirnega eksperimentalnega modela v realnih dimenzijah, dodatno smo pri tem upoštevali tudi postavitev eksperimentalnega modela na strehi UL FGG. Model je bil s stranico z okensko odprtino 3600 mm oddaljen od strešnega nadzidka – atike (slika 3). Enako kot v eksperimentalnem modelu sta tudi v digitalnem modelu v merilnem mestu M1 simulirani SPD in globalna osvetljenost z dnevno svetlobo na horizontalni ravnini, v merilnem mestu M2 pa v vertikalni ravnini simuliramo osvetljenost in SPD na zenični višini uporabnika (1200 mm nad tlemi).

Simulacije vtičnika Lark smo izvajali po 9-kanalni metodi orodja, torej smo vzporedno izvajali 9 iteracij Radiance izračunov pri visokih nastavitvah kakovosti: -ab 8 (ambientalni odboji), -ds 0,25 (količnik direktnega vzorčenja), -dp 256 (gostota sekundarnega vzorčenja svetlobnega izvora), -ad 2048 (število ambientalnih delitev), -dt 0,25 (prag direktnega vzorčenja), -as 2048 (število ambientalnih super vzorcev), -aa 0,1 (ambientalna natančnost) in -ar 300 (ambientalna ločljivost). Za vhodni podatek o zunanjih svetlobnih pogojih dnevne svetlobe smo uporabili povprečno eksperimentalno izmerjeno SPD dnevne svetlobe v času izvajanja meritev 28. 2. ob 12.00 pri predpostavljenem enakomernem albedu okolice 0,20.

Simulacije v programu ALFA prav tako izvedemo v visoki kakovosti Radiance simulacij pri -ab 8 in -lw (limita uteži) 0,001 pri 180 prehodih izračuna. Kot vhodni podatek zunanjih svetlobnih pogojev ALFA samodejno izvedniti zunanje pogoje na podlagi algoritma libRadTran za 28. 2. ob 12.00 pri predpostavljenem enakomernem albedu okolice 0,20.

2.4 Ovrednotenje simulacijskih orodij

Rezultate simulacijskih orodij smo ovrednotili na podlagi zmožnosti točnega pustvarjanja zunanjih svetlobnih pogojev ter zmožnosti vestne reprodukcije notranjih svetlobnih pogojev. Orodji ovrednotimo s treh vidikov, predstavljenih v naslednjih podpoglavjih, ki ocenjujejo reprodukcijo spektra prejete svetlobe v analizirani točki, napako v izračunu melanopsko uteženih količin in časovno učinkovitost simulacij, torej hitrost izračuna.



Slika 3. Postavitev eksperimentalnega modela na strehi (levo zgoraj). Trinožno stojalo z merilcem osvetljenosti in receptorjem spektrometra (desno zgoraj). Digitalna reprezentacija fizičnega modela (spodaj).

2.4.1 Točnost reprodukcije spektra svetlobe

Sprva točnost simulacij ovrednotimo z metodo povprečnega korena kvadratne napake – *RMSE* (angl. *relative mean square error*) za spekter med 380 in 730 nm. Napaka *RMSE* je bila izračunana za SPD-je, normalizirane na 555 nm, po naslednji enačbi:

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

pri čemer je:

RMSE – koren povprečnega kvadrata napake [-],

$E_{sim,i}$ – normalizirani SPD simulacije *i*-te valovne dolžine v intervalu od 380 do 730 nm,

$E_{exp,i}$ – izmerjeni normalizirani SPD *i*-te valovne dolžine v intervalu od 380 do 730 nm.

Izpostaviti je treba, da so resolucije spektrov eksperimenta in izračunanih podatkov programov ALFA in Lark različne. Eksperimentalne meritve so zaradi natančnosti uporabljenih spektrometrov v resoluciji 1 nm med 380 in 780 nm. ALFA lahko izračuna sevalne spektre v 5-nm resoluciji med 380 in 730 nm. Kakor je prikazano v preglednici 1, lahko Lark simulira spektralne vrednosti v le devetih diskretnih intervalih med 380 in 780 nm. Ker smo želeli primerjati simulirane spektre

obeh programskih orodij z eksperimentalnimi meritvami, smo spektralne rezultate, pridobljene z orodjem ALFA, in meritve eksperimenta interpolirali na vrednosti 9 kanalov orodja Lark. Vsi spektri so bili nato normalizirani na vrednost sevanja pri 555 nm.

2.4.2 Napaka pri izračunu melanopsko uteženih količin

Točnost simulacij ovrednotimo za metriko relativne melanopske učinkovitosti – RMU (angl. Relative Melanopic Efficiency – RME), ki je definirana kot količnik med ekvivalentno melanopsko osvetljenostjo (enačba 2), določeno po metodi ekvivalentnega α -opskega luxa, in osvetljenostjo [Potočnik, 2020a]. $E_{e,\lambda}(\lambda)$ predstavlja sevanje v odvisnosti od valovne dolžine, $N_m(\lambda)$ relativno spektralno občutljivost melanopsina in $V(\lambda)$ relativno spektralno svetlobno učinkovitost pri fotopskem videnju. RMU orodja ALFA je bil izračunan na podlagi 5-nm podatkov, RMU Larka pa po krivuljah in diskretnih intervalih v preglednici 1.

$$RMU = \frac{\int E_{e,\lambda}(\lambda) N_m(\lambda) d\lambda}{\int E_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}, \quad (2)$$

Napako v RMU izrazimo s pomočjo relativne napake (Err_{RMU}), kot je prikazano v enačbi 3, kjer je RMU_{eks} relativna učinkovitost, določena na podlagi eksperimentalnih meritev, in RMU_{sim} relativna učinkovitost, določena na podlagi simulacijskih rezultatov.

$$Err_{RMU} = \left| \frac{RMU_{eks} - RMU_{sim}}{RMU_{eks}} * 100 \right|, \quad (3)$$

2.4.3 Časovna učinkovitost simulacij

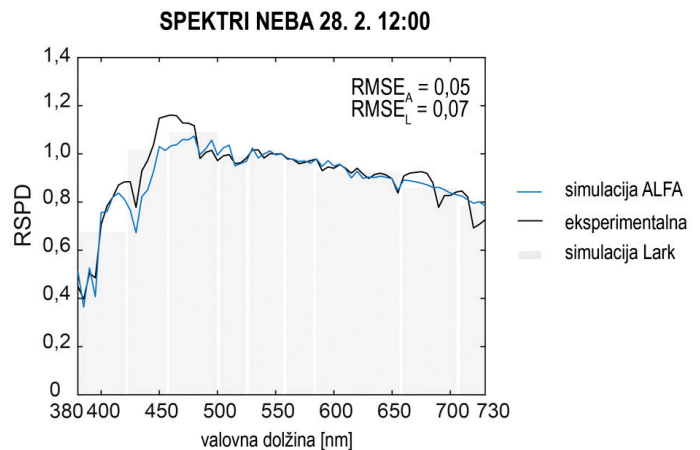
Časovno učinkovitost simulacij ovrednotimo na podlagi samodejno izvedenih podatkov o trajanju izračuna v vsakem od analiziranih orodij. Čas izvajanja simulacij je merjen v sekundah. Količina časa, potrebnega za simulacije, označimo s t_L (simulacijski čas Lark) in t_A (simulacijski čas ALFA).

3 REZULTATI

Zanesljivost simulacij bo predstavljena v treh ločenih sklopih. V prvem ovrednotimo izračunano globalno sončno sevanje na horizontalni ravnini. V drugem delu z vidika hipotetičnega uporabnika pisarniškega prostora ovrednotimo prejeteto sevanje na vertikalni ravnini. V tretjem sklopu podatke prejetega sevanja ovrednotimo v kontekstu vrednotenja notranjega okolja z vidika melanopsko utežene osvetljenosti in časovne učinkovitosti simulacij.

3.1 Točnost reprodukcije spektrov pri simulaciji zunanjih svetlobnih razmer

Eksperimentalno izmerjeno stanje zunanjih svetlobnih razmer v obliki relativnih SPD ($RSPD$) je skupaj s simulacijskimi rezultati obeh programskih orodij prikazano na sliki 4. Že iz vizualne primerjave spektrov na grafikonu slike 4 je očitno, da so razlike med izmerjenimi in simuliranimi spektri majhne, simulirani podatki torej dobro sledijo merjenim pogojem. Posledično se

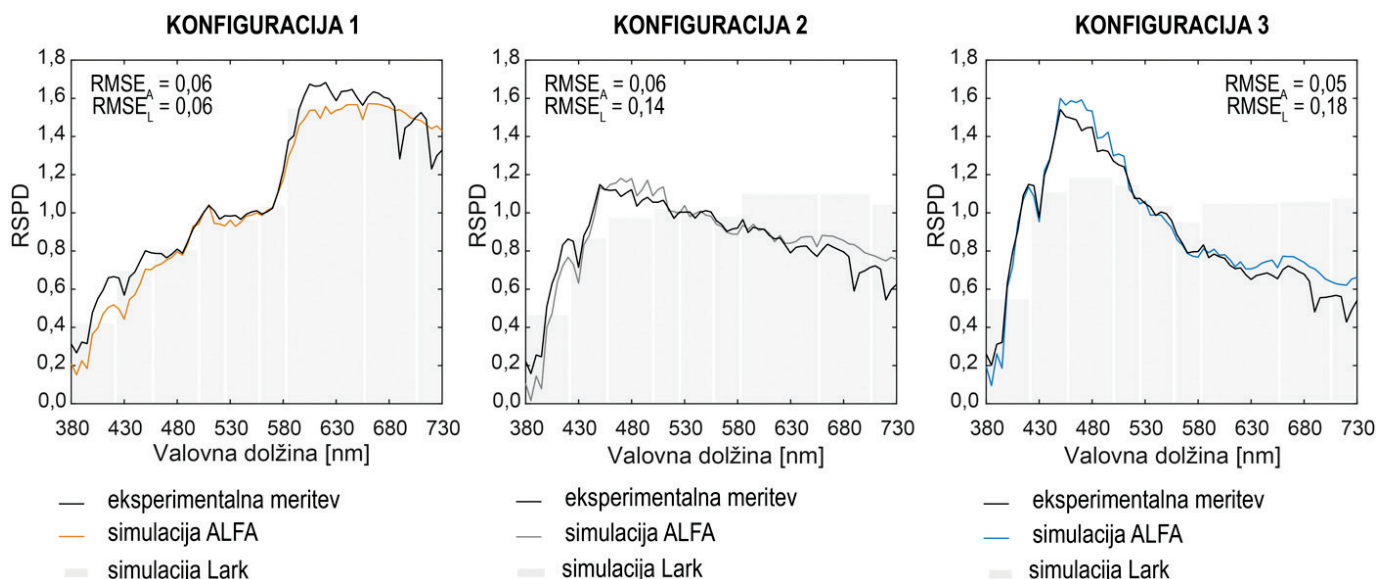


Slika 4. Primerjava $RSPD$ simuliranih spektrov ALFE in Larka z meritvami.

to odraža tudi v $RMSE$, ki je za simulacije Lark $RMSE_L = 0,07$. Še nekoliko manjšo napako (28,5 % manjšo) pa zabeležimo za simulirani spekter programskega orodja ALFA z $RMSE_A = 0,05$. Najmanjšo točnost simulacijskih spektrov je mogoče opaziti v modrem delu spektra, in sicer v intervalu med 450 in 480 nm, kjer obravnavani orodji podcenjujeta količino prejetega sevanja.

3.2 Točnost reprodukcije spektrov simulacij ob spreminjanju odsevnih in presevnih lastnosti materialov notranjega okolja

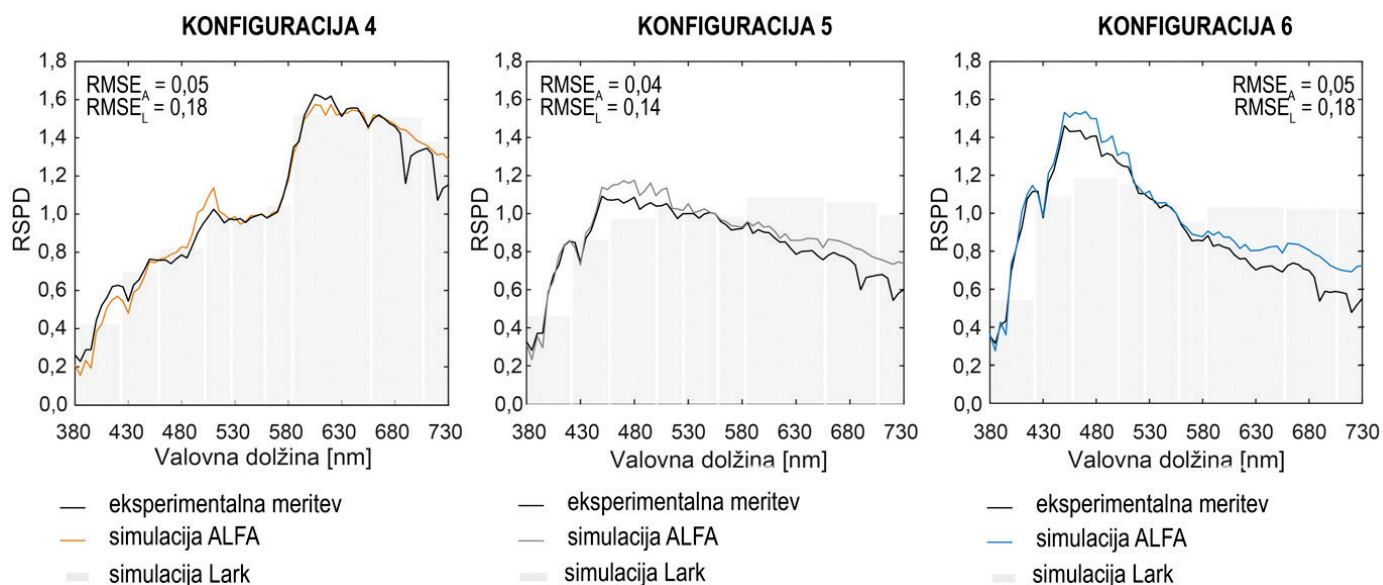
Na sliki 5 so prikazani eksperimentalno izmerjeni in simulirani spektri konfiguracij K1 do K3 (preglednica 2) materialnosti vzorčnega prostora. Pri navedenih konfiguracijah je bila varirana materialnost vzhodne stene, v okenski odprtini pa ni bilo nameščene zasteklitve. V primeru konfiguracije prostora K1 (OS barva vzhodnega zidu), s programskima orodjema dosežemo enakovredno napako pri reprodukciji spektrov, in sicer $RMSE_L = RMSE_A = 0,06$. Na podlagi vizualne primerjave spektrov na sliki 5 ter dosežene vrednosti $RMSE$ lahko zaključimo, da Lark in ALFA razmeroma dobro sledita eksperimentalno izmerjenemu spektru. Enakovredno odstopanje $RMSE_A = 0,06$ in vestno sledenje obliki spektra eksperimentalne meritve zaznamo tudi v primeru simulirane konfiguracij K2 (SS barva vzhodnega zidu), v primeru K3 pa $= 0,05$ (MS barva vzhodnega zidu) pri orodju ALFA. Nasprotno pa je v primeru spektrov, pridobljenih s programskim orodjem Lark, v primeru spektralno nevtralnega okolja (konfiguracija K2) in hladnega okolja (konfiguracija K3) možno zaznati bistveno odstopanje v primerjavi z eksperimentalno izmerjenimi spektri. V Larku simulirani konfiguraciji K2 in K3 sta evidentno podcenjeni v modrem delu vidnega spektra s sočasno preveč izraženimi valovnimi dolžinami v toplem delu spektra (slika 5). Posledično se opisano dejstvo odraža tudi v napaki $RMSE_L$, ki je v primeru konfiguracije K2 2,3-krat ($RMSE_L = 0,14$), v primeru konfiguracije K3 pa kar 3-krat ($RMSE_L = 0,18$) večja kot v primeru konfiguracije K1.



Slika 5. Primerjava RSPD-meritev in simulacij ALFE in Larka pri menjanju odsevnih materialov brez nameščene zasteklitve – konfiguracije K1, K2 in K3.

Tudi pri konfiguracijah prostora K4 (OS barva vzhodnega zidu), K5 (SS barva vzhodnega zidu) in K6 (MS barva vzhodnega zidu), ko je bila v okensko odprtino nameščena zasteklitve DZ_bp (dvoslojna zasteklitve brez nizkoemisjskih premazov), so dosežene $RMSE$ -napake primerljive s tistimi v primeru konfiguracij K1 do K3. Torej v situaciji, ko v okenski odprtini ni nameščene zasteklitve. V primeru simulacijskih rezultatov z oranžno obarvano steno (konfiguracija K4, slika 6) ponovno opazimo dobro ujemanje obeh simuliranih spektrov z eksperimentalno izmerjenim. Napaka ALFE $RMSE_A = 0,07$ je 15 % manjša od napake v primeru $RMSE_L = 0,07$. Manjšo napako programskega orodja ALFA izračunamo tudi v primeru, kadar

je zid pobarvan sivo – konfiguracija K5, in modro – konfiguracija K6. V primeru simulacij s programskim orodjem ALFA vsi simulacijski spektri konfiguracija K4 do K6 vestno sledijo eksperimentalno izmerjenim spektrom (slika 6), kar se odraža tudi v vrednostih $RMSE_A = 0,05$ (konfiguraciji K4 in K6) in $RMSE_A = 0,04$ (konfiguracija K5). Podobno pa ni mogoče trditi za simulacijske rezultate orodja Lark, saj kot v primeru konfiguracij K2 in K3 tudi pri konfiguracijah K5 in K6 zasledimo podcenjevanje modrega dela spektra ter precenjevanje toplega dela. To se odraža v 3,5-krat višji napaki $RMSE_L = 0,14$ pri konfiguraciji K5 in 3,6-krat višji napaki konfiguracije K6 ($RMSE_L = 0,18$) kot pri rezultatih ALFE.



Slika 6. Primerjava RSPD-meritev in simulacij programov ALFA in Lark pri menjanju odsevnih materialov z nameščeno zasteklitvijo DZ_bp – konfiguracije K4, K5 in K6.

3.3 Točnost reprodukcije spektrov simulacij pri spreminjanju presevnosti zasteklitve ob spektralno nevtralnih notranjih površinah

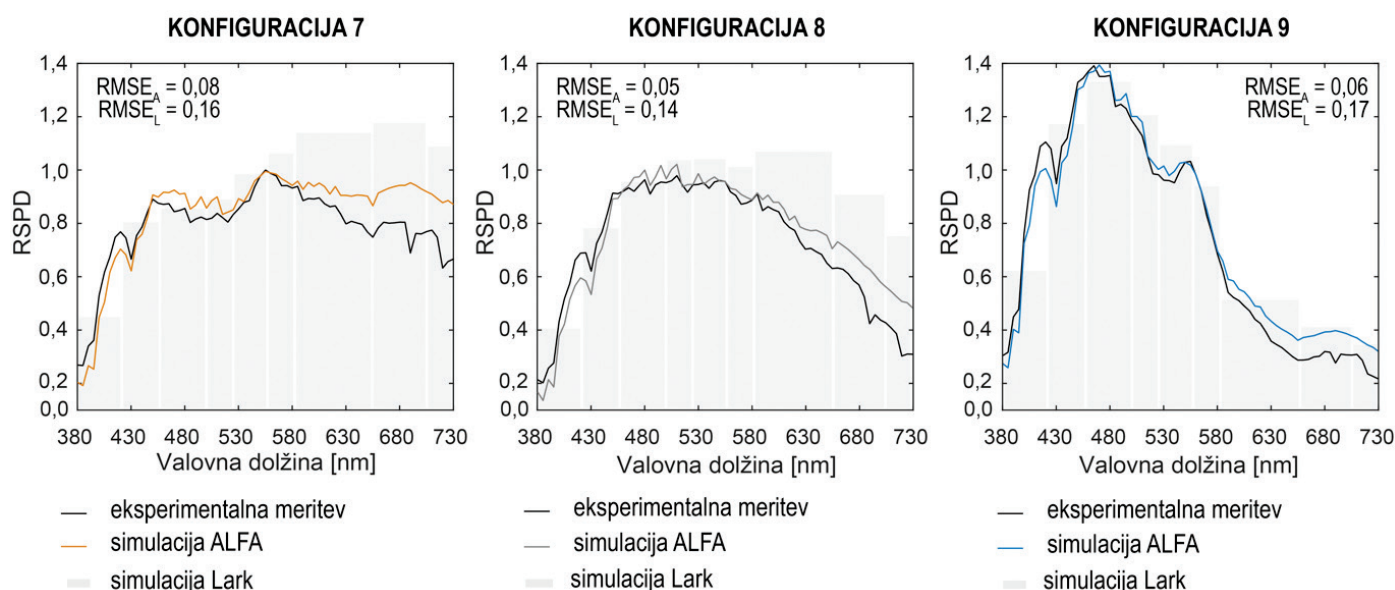
Rezultati simulacij in meritev konfiguracij notranjega svetlobnega okolja K7, K8 in K9 so predstavljeni na sliki 7 in prikazujejo napako spektrov, ko v okensko odprtino namestimo toplo obarvano zasteklitev (DZ_br), trislojno zasteklitev nevtralne barve (TZ_2_l-e) in zasteklitve hladne barve (DZ_m), pri sivo obarvanem vzhodnem zidu (SS). Podobno kot že pri ostalih konfiguracijah (K1 do K6) se programsko orodje ALFA izkaže za natančnejše tudi, ko spreminjamo presevnost oziroma lastnosti zasteklitve. Največjo napako $RMSE_{ALFE}$ izračunamo pri konfiguraciji K7 (zasteklitev DZ_br), ko je $RMSE_A = 0,08$, najmanjšo pa pri konfiguraciji K9 (zasteklitev DZ_m) z napako $RMSE_A = 0,06$. Spektri, pridobljeni z orodjem Lark, so v primeru konfiguracij K1 in K4, kadar smo uporabljali tople odsevni material, izkazovali enakovredne napake tistim, pridobljenimi z ALFO, kar pa ne velja, kadar simuliramo toplo obarvano zasteklitev (konfiguracija K7, zasteklitev DZ_br, glej sliko 7). Izračunana napaka $RMSE_L = 0,16$ je 3-krat višja od tiste, izračunane s simulacijskim orodjem ALFA, saj Lark precenjuje količino sevanja v toplem delu spektra (550 do 730 nm). Podobno kakor v primeru konfiguracije K7 Lark precenjuje količino sevanja v toplem delu spektra tudi v primeru uporabe zasteklitve TZ_2_l-e (konfiguracija K8), kar se izraža v višji napaki $RMSE_L = 0,14$ kot v primeru simulacij z ALFO ($RMSE_A = 0,05$). Simulirani spektri Larka, kadar je nameščeno modro tonirano steklo (DZ_m, konfiguracija K9), pa v nasprotju s primeri, kadar smo stene obarvali modro (konfiguraciji K3 in K6), bolje sledijo poteku eksperimentalno izmerjenega spektra (razmerje med hladnim in toplim delom spektra je podobno tistemu iz eksperimenta). Napaka $RMSE_L (0,17)$ je tako v primeru konfiguracije

K9 2,8-krat višja kot $RMSE_{ALFE}$ (0,06), medtem ko je bila v primerih konfiguracija K3, in K6 več kot 3-krat višja kot $RMSE_A$ omenjenih kombinacij.

3.4 Napaka pri izračunu nevizualnih količin

Rezultati $RMSE$ napake spektrov so ovrednotili, kako dobro sta programski orodji sposobni simulirati spekter prejetega sončnega sevanja v primerjavi z eksperimentalno izmerjenim spektrom. Vendar vidni in cirkadiani sistem nista enakovredno občutljiva za celoten vidni spekter, zato spektre iz prejšnjih poglavij preračunamo s pomočjo $N_m(\lambda)$ (spektralna svetlobna učinkovitost melanopsina) v RMU – relativno melanopsko učinkovitost, izmerjene in simulirane prejete svetlobe ter vrednotimo relativno napako (Err_{RMUL} ali Err_{RMUA}), ki je posledica sposobnosti izvedenja spektrov z orodji ALFA ali Lark. Izračunane napake Err_{RMUL} in Err_{RMUA} so skupaj z RMU simulacij in eksperimenta (RMU_E) predstavljene v preglednici 3. Kot pričakovano, se uporabljeni nevtralni odsevni in/ali presevni materiali (konfiguracije K2, K4 in K6) izražajo v $RMU_E \approx 1,00$ (preglednica 3). Relativne melanopske učinkovitosti konfiguracij K1, K3 in K5, torej kadar so uporabljeni topli odsevni/presevni materiali so $RMU_E \leq 0,93$. Drugače povedano, uporaba toplih odsevnih/presevnih materialov v primerjavi z nevtralnimi barvami slabša relativno melanopsko učinkovitost. V primeru konfiguracij, kjer so uporabljeni modri materiali (konfiguracije K3, K6 in K9), pa lahko opazimo višjo relativno melanopsko učinkovitost z $RMU_E \geq 1,3$.

Pri analizi izračunanih relativnih napak, predstavljenih v preglednici 3, opazimo, da se ALFA, tudi kadar spektre preračunamo v RMU , izkaže za natančnejše programsko orodje. Povprečna relativna napaka Err_{RMUA} znaša 1,33 %, pri čemer je povprečna napaka Err_{RMUL} več kot 6-krat višja in znaša 8,23 %. Izračunane napake ALFE se gibljejo v razponu od 0,00 % do 2,80 %, kjer so najnižje Err_{RMUA} izračunane v primeru konfiguracije



Slika 7. Primerjava RSPD meritev in simulacij programov ALFA in Lark pri nevtralnih odsevnih materialih (SS barva vzhodnega zidu) in menjanju zasteklitve – konfiguracije K7, K8 in K9.

cij K1 (OS barva vzhodne stene, brez zasteklitve), K3 (MS barva vzhodne stene, brez zasteklitve) in K7 (SS barva vzhodne stene, DZ_br zasteklitev), najvišja $Err_{RMU,A}$ pa v primeru konfiguracije K5 (SS barva vzhodne stene, DZ_bp zasteklitev).

Podcenjevanje modrega dela sončnega spektra pri simulacijah Larka se izraža tudi v nižjih vrednostih RMU_L . Do podcenjevanja pride, ko so v notranjem okolju uporabljeni spektralno nevtralni materiali (konfiguraciji K2 in K4) ali modri materiali (konfiguraciji K3 in K6). Posledično najvišjo $Err_{RMU,L}$ izračunamo za konfiguracijo K6 (MS barva vzhodne stene, DZ_bp zasteklitev), in sicer 16,15 %. Najnižja izračunana $Err_{RMU,L} = 1,33$ % se pojavi v primeru konfiguracije K1 (OS barva vzhodne stene, brez zasteklitve). Kadar primerjamo napake Larka in ALFE v odvisnosti od lastnosti posameznih analiziranih konfiguracij, ugotovimo, da je orodje ALFA konsistentno natančnejše pri vseh kombinacijah, razen v primeru konfiguracije K4 (OS barva vzhodne stene, DZ_bp zasteklitev), ko sta $Err_{RMU,L}$ in $Err_{RMU,L}$ enakovredna (2,70 %).

Analiza časovne učinkovitosti, prikazana v preglednici 3, kaže na bistveno krajše simulacijske čase pri orodju ALFA. Ta v povprečju ($t_{povA} = 18,6$ s) več kot 22-krat hitreje izračuna specifično simulacijo kot programsko orodje Lark ($t_{povL} = 418,2$ s).

okolja. Z orodjem Lark lahko sevalno oz. svetlobno vsebino računamo za 9 specifično definiranih intervalov (kanalov) spektra med 380 in 780 nm. Z ALFO je mogoča reprezentacija spektra z 5-nm resolucijo med 380 in 730 nm, kar sicer ne zajame popolnoma celega vidnega spektra, vendar je doprinos sevanja med 730 in 780 nm pri upoštevanju relativni spektralni svetlobni učinkovitosti pri dnevnem videnju $V(\lambda)$ in relativni spektralni svetlobni učinkovitosti melanopsina $N_m(\lambda)$ zanemarljiv. Zaradi te omejitve programskega orodja ALFA je bil pri vrednotenju rezultatov zanemarljiv interval med 730 in 780 nm. Spektri simulacij obeh programskih orodij so se izkazali za primerljivo natančne, kadar je bila v prostoru uporabljena oranžna barva stene. Pri vseh ostalih primerih analiziranih konfiguracijah notranjega okolja se pri orodju Lark pojavljajo mnogo večje napake pri izračunu spektralnih podatkov v poziciji sedečega hipotetičnega uporabnika, s pogledom, obrnjenim v vzhodno (obarvano) steno. Rezultati analize so pokazali, da so spektri, izračunani z orodjem Lark, preveč izraženi v toplem delu spektra (550 do 730 nm) in preveč siromašni v modrem delu spektra (422 do 524 nm). Identificirano sistematično podcenjevanje modrega spektra v primeru orodja Lark je mogoče pripisati uporabljenemu algoritmu izvedenosti spektralnega neba. Algoritem za ustvarjanje neba -gensky [Daysim, 2019], ki ga uporablja Lark,

konfiguracije	RMU_E [-]	RMU_A [-]	RMU_L [-]	$Err_{RMU,L}$ [%]	$Err_{RMU,A}$ [%]	t_L [s]	t_A [s]
K1	0,75	0,75	0,76	1,33	0,00	410,0	19,0
K2	1,07	1,09	0,95	8,92	1,86	447,0	18,0
K3	1,30	1,30	1,09	6,19	0,00	430,0	18,0
K4	0,74	0,76	0,76	2,70	2,70	404,0	19,0
K5	1,07	1,10	0,94	8,23	2,80	420,0	19,0
K6	1,30	1,29	1,09	16,15	0,97	430,0	18,0
K7	0,93	0,93	0,83	10,75	0,00	400,0	19,0
K8	1,03	1,04	0,91	11,60	0,77	405,0	19,0
K9	1,48	1,44	1,36	8,24	2,70	418,0	18,0
POVPR.				8,23	1,33	418,2	18,6

Preglednica 3. Napaka v RMU med eksperimentom in simulacijskima orodjema za analizirane konfiguracije prostorov. Podčrtani so relativne napake simulacije z manjšo ali enakovredno napako ter krajši izmed časov simuliranja.

4 DISKUSIJA IN SKLEP

S predstavljenimi eksperimenti in spektralnimi simulacijami sevalnega okolja celične pisarne smo preiskovali zanesljivost simulacijskih orodij ALFE in Larka pri 9 različnih konfiguracijah spektralnega okolja v razmerah jasnega neba in severni orientaciji zasteklitve. Interpretacija rezultatov, pridobljenih s to študijo, je ovrednotila točnost in uporabnost preiskovanih orodij v namene vrednotenja nevizualnih vidikov vpliva dnevne svetlobe pri spreminjanju lastnosti (obarvanosti zidu in presevnosti zasteklitve) notranjega grajenega okolja.

Rezultati opravljene študije so pokazali, da lahko s pomočjo obeh orodij vrednotimo sevalno okolje notranjega grajenega

ustvarja hemisfersko uniformno nebo, torej ne razlikuje med sevanjem direktne in difuzne komponente dnevne svetlobe, in za kreiranje neba uporabi povprečen spekter celega neba, ki ga določimo za vhodni podatek simulacije. Ker je bil v primeru izvedene analize uporabljen izmerjeni SPD neba pri jasnih hemisferskih pogojih, je posledično prihajalo do ujemanja rezultatov simulacij Larka z meritvami v primeru oranžne barve na vzhodni steni, saj ta predvsem odseva tople del spektra. Obratno se je pokazalo pri nevtralnem sivi in modri barvi stene, v primeru katere je zaradi posploševanja hemisferskih pogojev prišlo do podcenjevanja vpliva severnega dela neba, proti kateremu je bila orientirana odprtina simuliranega pisarniškega prostora. Opisano odstopanje rezultatov simulacij s programskim orodjem Lark v primerjavi

z eksperimentom (in tudi rezultatov orodja ALFA) je do določene mere pričakovano in v skladu z opažanji [Balakrishnan, 2019]. Odstopanje oziroma napako orodja Lark je tako mogoče neposredno povezati z uporabljenim algoritmom za ustvarjanje neba (-gensky) ter zunanjimi pogoji, pri katerih je bil izmerjen uporabljeni SPD neba (jasno nebo). Izmed analiziranih konfiguracij pa izstopa konfiguracija K9 (SS barva vzhodne stene, DZ_m zasteklitev), kjer je z Larkom simuliran spekter skladen z eksperimentalno meritvijo ($RMSE_L = 0,18$, glej sliko 7). Ta rezultat je možno pripisati lastnostim zasteklitve, ki ima skoraj nično presevnost v toplem delu spektra (slika 2), s čimer zmanjša oziroma izniči predhodno opisano odstopanje programskega orodja Lark v delu spektra med 550 in 730 nm.

Presenetljivo, čeprav se pri simulacijah v ALFI primarno zanašamo na algoritem, ki računsko izvednoti hipotetično stanje neba za izbrani trenutek v letu na podlagi generičnega atmosferskega profila srednjih geografskih širin, smo pri uporabi ALFE izračunali dobro ujemanje med izmerjenim in simuliranim zunanjim spektrom. Še boljše ujemanje pa smo izračunali pri simulacijah sevanja v notranjem okolju, ki izkaže vestno upodabljanje spektra vseh analiziranih materialnih kombinacij ($RMSE_A$ med 0,05 in 0,08). V primerjavi z rezultati simulacij, izvedenih z Larkom ($RMSE_L$ med 0,06 in 0,18), simulacije z ALFO konsistentno izražajo večjo točnost v primerjavi z eksperimentalnimi meritvami. To se posledično odraža tudi v majhnih napakah pri vrednotenju nevizualnega vidika dnevne svetlobe (Err_{RMUA}), kjer povprečna relativna napaka znaša komaj 1,33 % z razliko od Larkovih simulacij (Err_{RMUL}), ki v povprečju izrazijo 8,23 % relativno napako v RMU.

Spektralna sestava dnevne svetlobe se nenehno spreminja v odvisnosti od časa v dnevu in letu ter stanja neba. Sočasno na spektralne lastnosti notranjega okolja bistveno vpliva tudi orientacija odprtini, saj je s tem definirano, s katerega dela neba primarno prejemamo dnevno svetlobo v prostor. Zaradi omenjenih lastnosti osvetljevanja z dnevno svetlobo ter poznanih in v uvodu opisanih različnih načinov ustvarjanja hemisferskih pogojev v orodju Lark smo se v predstavljeni študiji omejili na analizo zgolj severno orientiranega pisarniškega prostora. S tem smo omejili vpliv direktne komponente sončnega sevanja pri uporabljenih pogojih jasnega neba, ki bi lahko bistveno vplivala na rezultate simulacij z orodjem Lark. Kljub temu je mogoče večino odstopanj med eksperimentalno izmerjenim in v Larku simuliranimi spektri pripisati ravno načinu ustvarjanja zunanjih hemisferskih pogojev, ki so bili v študiji določeni na podlagi izmerjenega SPD. Ravno zato je uporaba Larka za simuliranje spektralne sestave notranjega okolja bolj delikatna, saj zahteva pri uporabniku veliko več znanja pri nastavitvi simulacij (predvsem določitvi lastnosti neba) ter pazljivost pri interpretaciji rezultatov. Omenjeno višjo kompleksnost pri zasnovi Larkovih simulacij so za omejitve izpostavili tudi [Pierson, 2021a]. Ne glede na rezultate pričujoče študije pa lahko na podlagi ugotovitev naše predhodne študije [Potočnik, 2019] kot tudi študije Pierson in sod. [Pierson, 2021a] zaključimo, da je Lark zanesljiv pri oblačnih razmerah. Glede na rezultate pa lahko predvidevamo, da bi simulacije v orodju Lark v razmerah jasnega neba in pri prostoru z vzhodno, južno ali zahodno orientiranim oknom v času, kadar bi sonce posijalo v prostor, precenjevale količino modre komponente dnevne svetlobe.

Kot glavni zaključek opravljene študije lahko poudarimo, da so rezultati pokazali, da so simulacijsko določeni spektri tako v primeru Larka kot ALFE ob severni orientaciji prostora opoldne natančni. Vendar bi bilo treba vrednotenje točnosti simulacij v ostalih vremenskih pogojih še dodatno raziskati. Če je algoritem ustvarjanja atmosferskih pogojev v ALFI sposoben dobre reprezentacije svetlobnih pogojev v vseh vremenskih razmerah in časovnih trenutkih, bi se lahko tako pridobljeni izračuni uporabili za časovno odvisno, podnebno pogojeno modeliranje nevizualnih vidikov dnevne svetlobe, kar pa pri trenutni zasnovi modeliranja stanja neba v orodju Lark ne moremo trditi. Prehod iz analize nevizualnih vplivov dnevne svetlobe v točki v času (t. i. point-in-time analysis) v časovno in podnebno odvisno analizo pa je ključen naslednji korak na področju ocenjevanja nevizualnih oz. cikadinskih vplivov svetlobe, saj je le tako možno oceniti časovno pogojeno izpostavljenost uporabnikov, ki je v primeru nevizualne zaznave ključna.

5 ZAHVALA

Raziskovalni program št. P2-0158 je sofinancirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije iz državnega proračuna. Avtorja se zahvalujeta Tiziani Poli in Juanu Diegu Blancu Cadeni iz Politehnike v Milanu za pomoč pri določitvi spektralnih odsevnosti materialov ter Rudiju Hajdinjaku iz podjetja Reflex, d. o. o., za vzorce zasteklitev.

6 LITERATURA

Acosta, I., Leslie, R. P., Figueiro, M. G., Analysis of circadian stimulus allowed by daylighting in hospital rooms. Lighting Research & Technology, 49(1), 49–61, <https://doi.org/10.1177/1477153515592948>, 2017.

Almemo, Radiation Probes Almemo for various spectral ranges - Ahlborn Meß- und Regelungstechnik, spletna stran proizvajalca - https://www.ahlborn.com/en_UK/products/radiation-probes-for-various-spectral-ranges#technik, datum vpogleda 20. 2. 2020, 2020.

Andersen, M., Gochenour, S. J., Lockley, S. W., Modelling 'non-visual' effects of daylighting in a residential environment, Building and Environment, 70 (Supplement C), 138–149, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.08.018>, 2013.

Balakrishnan, P., Jakubiec, J. A., Spectral Rendering with Daylight: A Comparison of Two Spectral Daylight Simulation Platforms, 16th IBPSA Conference, 2-4 september, 2019 1191–1198, <https://doi.org/10.26868/25222708.2019.211158>, 2019.

Berson, D. M., Dunn, F. A., Takao, M., Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock, Science, 295(5557), 1070–1073, <https://doi.org/10.1126/science.1067262>, 2002.

Berson, D. M., Strange vision: Ganglion cells as circadian photoreceptors, Trends in Neurosciences, 26(4), 314–320, [https://doi.org/10.1016/S0166-2236\(03\)00130-9](https://doi.org/10.1016/S0166-2236(03)00130-9), 2003.

BLACK-Comet, UV-VIS Concave Grating Spectrometers, spletna stran <https://www.stellarnet.us/spectrometers/black-comet>

-comet-uv-vis-concave-grating-spectrometers/, datum vpogleda 24. 4. 2020, 2020.

Brembilla, E., Mardaljevic, J., Climate-Based Daylight Modelling for compliance verification: Benchmarking multiple state-of-the-art methods, *Building and Environment*, 158, 151-164, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.051>, 2019.

Cajochen, C., Münch, M., Kriebel, S., Kräuchi, K., Steiner, R., Oelhafen, P., Orgül, S., Wirz-Justice, A., High Sensitivity of Human Melatonin, Alertness, Thermoregulation, and Heart Rate to Short Wavelength Light, *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 90(3), 1311-1316, <https://doi.org/10.1210/jc.2004-0957>, 2005.

CIE S 026/E:2018, System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light, CIE Central Bureau, 2018.

Crowley, S. J., Eastman, C. I., Phase advancing human circadian rhythms with morning bright light, afternoon melatonin, and gradually shifted sleep: can we reduce morning bright-light duration?, *Sleep Medicine*, 16(2), 288-297, <https://doi.org/10.1016/J.SLEEP.2014.12.004>, 2015.

Czeisler, C. A., Gooley, J. J., Sleep and Circadian Rhythms in Humans. Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology, 72, 579-597, <https://doi.org/10.1101/sqb.2007.72.064>, 2007.

Daysim, spletna stran

<http://daysim.ning.com/main/index>, datum vpogleda 18. 3. 2019.

Dovjak, M., Kuček, A., Creating Healthy and Sustainable Buildings. Springer Nature Switzerland AG. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-19412-3>, 2019.

Emde, C., Buras-Schnell, R., Kylling, A., Mayer, B., Gasteiger, J., Hamann, U., Kylling, J., Richter, B., Pause, C., Dowling, T., Bugliaro, L., 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>, 2016.

Emens, J. S., Burgess, H. J., Effect of light and melatonin and other melatonin receptor agonists on human circadian physiology, *Sleep Medicine Clinics* 10(4), 435-453, <https://doi.org/10.1016/j.jsmc.2015.08.001>, 2015.

Eržen, J., Košir, M., Dinamične metrike za oceno dnevne osvetljenosti in njihova uporaba pri analizi učilnic v slovenskih osnovnih šolah, *Gradbeni Vestnik*, 65, 2016.

Ewing, P. H., Haymaker, J., Edelstein, E. A., Simulating Circadian Light: Multi-Dimensional Illuminance Analysis, 2017, 2363 - 2371. <https://doi.org/10.26868/25222708-2017.660>, 2017.

Figueiro, M. G., Steverson, B., Heerwagen, J., Kampschroer, K., Hunter, C. M., Gonzales, K., Plitnick, B., Rea, M. S., 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>, 2017.

Foster, R. G., Fundamentals of circadian entrainment by light, *Lighting Research & Technology*, 53(5), 377-393, <https://doi.org/10.1177/14771535211014792>, 2021.

Gkaintatzi-Masouti, M., van Duijnhoven, J., Aarts, M. P. J., Review of spectral lighting simulation tools for non-image-forming effects of light, *Journal of Physics: Conference Series*, 2042 012122, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2042/1/012122>, 2021.

IES, Illuminating Engineering Society, Light and Human Health: An Overview of the Impact of Optical Radiation on Visual, Circadian, Neuroendocrine, and Neurobehavioral Responses, Light and Human Health: An Overview of the Impact of Optical Radiation on Visual, Circadian, Neuroendocrine, and Neurobehavioral Responses, 28, 2018.

Inanici, M., Brennan, M., Clark, E., Spectral Daylighting Simulations: Computing Circadian Light, 2015, 1103-1109, 2015.

Inanici, M., Price L. L., Lark Spectral Lighting, spletna stran programskega orodja - http://faculty.washington.edu/inanici/Lark/Lark_home_page.html, datum vpogleda: 1.5. 2020, 2015.

ISO, ISO/CIE 11664-1:2019, Colorimetry- Part1: CIE Standard Colorimetric Observers, International Organization for Standardization, 2019.

Jamrozik, A., Clements, N., Hasan, S. S., Zhao, J., Zhang, R., Campanella, C., Loftness, V., Porter, P., Ly, S., Wang, S., Bauer, B., Access to daylight and view in an office improves cognitive performance and satisfaction and reduces eyestrain: A controlled crossover study, *Building and Environment*, 165, 106379, 1-13, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106379>, 2019.

Knoop, M., Stefani, O., Bueno, B., Matusiak, B., Hobday, R., Wirz-Justice, A., Martiny, K., Kantermann, T., Aarts, M., Zemmour, N., Appelt, S., Norton, B., Daylight: What makes the difference?, *Lighting Research & Technology*, 52, 423-442, <https://doi.org/10.1177/1477153519869758>, 2019.

Konis, K., A novel circadian daylight metric for building design and evaluation, *Building and Environment*, 113(Supplement C), 22-38, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.025>

LBL, Lawrence Berkley Laboratory, Optics - spletna stran programskega orodja Optics - <https://windows.lbl.gov/tools/optics/software-download>, datum vpogleda 15. 11. 2021, 2021.

LLC Sollemma ALFA, spletna stran programskega orodja Adaptive Lighting for Alertness - <https://www.sollemma.com/Alfa.html>, dostopano 15. 3. 2021, 2021.

Lok, R., Koningsveld, M. J., Gordijn, M. C. M., Beersma, D. G. M., Hut, R. A., Daytime melatonin and light independently affect human alertness and body temperature. *Journal of Pineal Research*, 67(1), e12583. <https://doi.org/10.1111/jpi.12583>, 2019.

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., 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>, 2014.

Mardaljevic, J., Andersen, M., Roy, N., Christoffersen, J., A framework for predicting the non-visual effects of daylight – Part II: The simulation model, *Lighting research and Technology*, 46(4), 388–406. <https://doi.org/10.1177/1477153513491873>, 2013.

Milosavljevic, N., How Does Light Regulate Mood and Behavioral State?, *Clocks & Sleep*, 1(3), 319–331. <https://doi.org/10.3390/clockssleep1030027>, 2019.

Pierson, C., Aarts, M. P. J., Andersen, M., Validation of spectral simulation tools for the prediction of indoor daylight exposure, *IBPSA Building Simulation Conference*, Belgija, September 1–3, 1–8, 2021a.

Pierson, C., Gkaintatzi-Masouti, M., Aarts, M. P. J., Andersen, M., Validation of spectral simulation tools for the prediction of indoor electric light exposure, *CIE X048:2021*, 52–62, 2021b.

Potočnik, J., Cadena, J. D. B., Košir, M., Poli, T., Occupant perception of spectral light content variations due to glazing type and internal finish, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 296 012033, 1–12. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/296/1/012033>, 2019.

Potočnik, J., Košir, M., Influence of commercial glazing and wall colours on the resulting non-visual daylight conditions of an office, *Building and Environment*, 171, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106627>, 2020a.

Potočnik, J., Košir, M., Dovjak, M., Colour preference in relation to personal determinants and implications for indoor circadian luminous environment, *Indoor and Built Environment*, 31(1), 121–138. <https://doi.org/10.1177/1420326X20977609>, 2020b.

Potočnik, J., Košir, M., 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>, 2021.

RADSITE, spletna stran programskega orodja Radiance - <https://www.radiance-online.org/about/detailed-description.html>, datum vpogleda 2. 1. 2021, 2021.

Rahman, S. A., St. Hilaire, M. A., Lockley, S. W., The effects of spectral tuning of evening ambient light on melatonin suppression, alertness and sleep, *Physiology & Behavior*, 177, 221–229. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2017.05.002>, 2017.

Rea, M. S., Figueiro, M. G., Bierman, A., Hamner, R., Modeling the spectral sensitivity of the human circadian system, *Lighting Research & Technology*, 44(4), 386–396. <https://doi.org/10.1177/1477153511430474>, 2012.

REFLEX, spletna stran proizvajalca REFLEX - <http://www.reflex.si/si/>, datum vpogleda 5. 1. 2022, 2022.

Relux, spletna stran - <https://reluxnet.relux.com/en/>, datum vpogleda 5. 1. 2022, 2022.

Rhino 6, spletna stran programskega orodja - <https://www.rhino3d.com/6>, datum vpogleda 6. 10. 2020, 2020.

Safranek, S., Collier, J. M., Wilkerson, A., Davis, R. G., Energy impact of human health and wellness lighting recommendations for office and classroom applications, *Energy and Buildings*, 226, 110365. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2020.110365>, 2020.

Sahin, L., Wood, B. M., Plitnick, B., Figueiro, M. G., Daytime light exposure: Effects on biomarkers, measures of alertness, and performance, *Behavioural Brain Research*, 274, 176–185. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2014.08.017>, 2014.

Siraji, M. A., Kalavally, V., Schaefer, A., Haque, S., Effects of Daytime Electric Light Exposure on Human Alertness and Higher Cognitive Functions: A Systematic Review, *Frontiers in Psychology*, 12, 1–17. <https://doi.org/10.3389/FPSYG.2021.765750>, 2022.

SIST, SIST EN 410:2011, *Steklo v gradbeništvu - Določevanje svetlobnih in sončnih karakteristik stekla*, Slovenski Inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2011.

Straif, K., Baan, R., Grosse, Y., Secretan, B., El Ghissassi, F., Bouvard, V., Altieri, A., Benbrahim-Tallaa, L., Coglian, V., Carcinogenicity of shift-work, painting, and fire-fighting, *The lancet oncology*, 8(12), 1065–1066. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(07\)70373-X](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(07)70373-X), 2007.

Vaz, N. A., Inanici, M., Syncing with the Sky: Daylight-Driven Circadian Lighting Design, *LEUKOS*, 17(3), 291–309. <https://doi.org/10.1080/15502724.2020.1785310>, 2020.

Velux, Daylight visualizer, spletna stran programa - <https://www.velux.com/what-we-do/digital-tools/daylightvisualizer?consent=preferences,statistics,marketing&reforiginal=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F>, datum vpogleda 5. 1. 2022, 2022.

Wahl, S., Engelhardt, M., Schaupp, P., Lappe, C., Ivanov, I. V., The inner clock—Blue light sets the human rhythm, *Journal of Biophotonics*, 12(12). <https://doi.org/10.1002/jbio.201900102>, 2019.

Walker, W. H., Walton, J. C., DeVries, A. C., Nelson, R. J. Circadian rhythm disruption and mental health. *Translational Psychiatry*, 10(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41398-020-0694-0>, 2020.