

DINAMIČNE METRIKE ZA OCENO DNEVNE OSVETLJENOSTI IN NJIHOVA UPORABA PRI ANALIZI UČILNIC V SLOVENSKIH OSNOVNIH ŠOLAH

DYNAMIC DAYLIGHTING METRICS AND ITS APPLICATION FOR THE EVALUATION OF CLASSROOMS IN SLOVENIAN PRIMARY SCHOOLS

Jure Eržen, univ. dipl. inž. grad.

jure.erzen@leag.si

Lokalna energetska agencija Gorenjske
Slovenski trg 1, 4000 Kranj

doc. dr. Mitja Košir, univ. dipl. inž. arh.

mitja.kosir@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 535.612:727(497.4)

Povzetek | Področje obravnave dnevne svetlobe v kontekstu oblikovanja in načrtovanja stavb je izjemno zapostavljeno. Takšno stanje je še dodatno zaostreno zaradi preveč ozkega obravnavanja energetske učinkovitosti stavb. V večini primerov je edini cilj le čim manjša poraba energije ne glede na vpliv na notranje okolje. Tako je pri načrtovanju, nakupu in zamenjavi zastekljenih površin ovoja stavbe v Sloveniji zelo redko upoštevan vpliv optičnih lastnosti zasteklitve na vizualne pogoje in porabo energije v prostoru. V predstavljeni študiji je analiziran vpliv površine in prepustnosti zasteklitve za vidni del svetlobe na vizualne pogoje v prostoru in porabo električne energije za osvetlitev. Za izračune in oceno je bila uporabljena sodobna dinamična metrika za oceno osvetljenosti prostorov, ki omogoča upoštevanje realnih klimatskih razmer, namembnost in način uporabe prostora. Ker gre za relativno novo področje, so bile najbolj razširjene dinamične metrike za oceno osvetljenosti prostorov tudi opisane in predstavljene. Analiza je bila opravljena za tipično osnovnošolsko učilnico v Ljubljani, nato pa smo rezultate primerjali z rezultati dveh realnih učilnic z nekoliko drugačno zasnovo. Rezultati so pokazali zelo velik vpliv izbora zasteklitve na notranje vizualno okolje kot tudi na porabo električne energije za umetno razsvetljavo.

Ključne besede: osvetljenost, naravna svetloba, šolske učilnice, dinamična metrika, uporabna dnevna osvetljenost, avtonomija dnevne osvetljenosti

Summary | Daylighting in buildings is generally a neglected aspect of building design. Situation has even intensified during the last few decades due to the extremely biased treatment of building efficiency, where in most cases designers are optimizing building energy consumption without considering the indoor environment. Therefore, the influence of glazing optical characteristics on visual conditions and energy usage when planning, buying or renovating buildings is rarely taken into consideration in Slovenia. In accordance with this, a study investigating the influence of light transmission and area of glazing on the indoor visual environment and the electricity consumption for artificial lighting was executed. For the evaluation of analysed spaces, climate-based daylight modelling

approach was used, in order to evaluate daylighting in regards to real climate data as well as realistic indoor usage patterns. Due to relative novelty of the field of climate-based daylight modelling, the most widespread approaches are described and presented. The analysis was executed for a hypothetical primary school classroom located in Ljubljana and later compared to the simulation results for two actual classrooms. The performed study demonstrated a high correlation between glazing selection and quality of indoor visual environment as well as electrical energy consumption for artificial lighting.

Key words: illuminance, daylighting, classrooms, climate-based daylight modelling, useful daylight illuminance, daylight autonomy

1 • UVOD

Čeprav slovenska zakonodaja na področju gradnje stavb predpisuje celovito porabo energije za delovanje stavb (PURES, 2010), v katero je všteta tudi poraba energije za umetno razsvetljavo, je realnost pri načrtovanju taka, da se projektanti posvečajo predvsem ukrepom, ki so usmerjeni v zmanjševanje porabe energije za ogrevanje in hlajenje stavb. Predvsem nepremišljeni oz. necelostno zasnovani gradbeni posegi v okviru transparentnega dela stavbnega ovoja lahko negativno vplivajo na osvetljenost prostorov z dnevno svetlobo (kot tudi na druge parametre notranjega okolja), s tem pa na višjo porabo energije za umetno osvetlitev. Pomanjkanje izkušenj in necelosten pristop k rabi energije v praksi se odražata tudi v zakonodaji, saj je v slovenskih pravilnikih in smernicah prepustnost zasteklitve za vidni del sončnega sevanja sicer omenjena (ta mora biti večja od 50 %) v Tehnični smernici TSG-1-004:2010 (TSG4, 2010), vendar se izpolnjevanje te zahteve redko ali nikoli ne preverja, saj se projektanti in upravni organi fokusirajo predvsem na toplotne karakteristike zasteklitve ter s tem na omejitve, ki veljajo za g faktor uporabljenih zasteklitve (TSG4, 2010).

Za optimizacijo porabe energije v stavbi je treba uporabiti celostni pristop in upoštevati tudi porabo energije za osvetlitev ((Lee, 2013), (Khezri, 2012)). Za natančen izračun porabe energije za osvetlitev večine prostorov

je treba upoštevati tudi naravno osvetljenost. Analizo naravne osvetljenosti lahko izvedemo z izračunom količnika dnevne svetlobe (Mavromatidis, 2014). Novejši in bolj zahteven pristop pa je analiza dinamičnih faktorjev (Reinhart, 2011). Na podlagi študije naravne osvetljenosti lahko izberemo primerno zasteklitev (velikost, orientacijo, fizikalnooptične lastnosti) in regulacijo umetne razsvetljave. Meritve, opravljene na nekaterih poslovnih objektih, kažejo, da lahko z nadzorom svetilk glede na naravno osvetlitev zmanjšamo letno porabo energije za osvetlitev od 30 do 60 % ((Li, 2001), (Li, 2006)). Primerna naravna osvetljenost prostorov ima poleg ugodnega vpliva na zmanjšanje porabe energije za osvetlitev tudi pomemben in pogosto zanemaren psihofiziološki vpliv na človeka. Pomanjkanje naravne osvetljenosti ima negativen vpliv na zdravje, počutje in produktivnost ljudi (Boubekri, 2004). Dovolj visoke vrednosti (dnevne) osvetljenosti in primerna spektralna sestava svetlobe v ravnini očesa uporabnika pa sta ključna za pravilno sinhronizacijo cirkadianega ritma človeka (Wulund, 2015) ter s tem regulacije mnogih ključnih bioloških procesov v telesu (Boubekri, 2008). Čeprav je primerno sinhronizacijo cirkadianih ritmov možno doseči tudi z umetnimi viri, se izkaže, da je v kontekstu grajenega okolja najbolj praktičen, dostopen in tudi najboljši vir ravno dnevna svetloba, saj ima primerno spektralno

sestavo in primerno usmerjenost (svetloba prihaja delno s strani kot tudi od zgoraj) ((Košir, 2011), (Kristl, 2011), (Bellia, 2013)). Primerna naravna osvetljenost je zato zlasti pomembna pri stavbah, v katerih se opravlja vizualno zahtevno delo, kot so šole, fakultete in pisarne, ter na splošno v sodobnem urbanem okolju, kjer ljudje večino časa preživimo v stavbah (Evans, 1998).

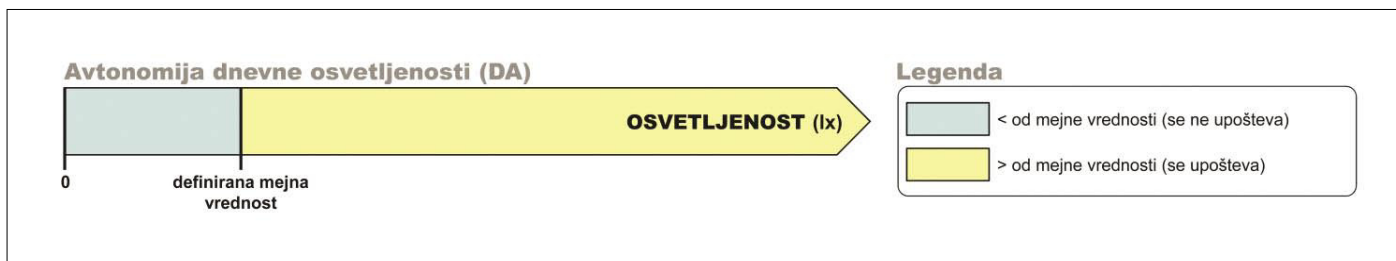
Študija, predstavljena v pričujočem članku, se ukvarja z analizo vpliva ključnih parametrov oblikovanja transparentnih površin v sklopu tipične osnovnošolske učilnice in njihovim vplivom na osvetljenost z dnevno svetlobo ter posledično na porabo električne energije za umetno razsvetljavo. Cilj analize je bil kvantificiranje vpliva površine zasteklitve, orientacije in prepustnosti zasteklitve za vidni del svetlobe (LT-faktor) na vizualne pogoje v prostoru, predvsem pa na porabo energije za umetno razsvetljavo. Za analizo je bila uporabljena dinamična metrika za izračun osvetljenosti analiziranih prostorov. Ta predstavlja sodobnejši pristop k analizi dnevne osvetljenosti v stavbah v primerjavi z uveljavljenima metodama izračuna količnika dnevne svetlobe in/ali izračuna osvetljenosti. Ker je področje dinamičnih metrik za izračun osvetljenosti še relativno novo in zato v razvoju, so v sklopu članka predstavljene in opisane najbolj razširjene metode za dinamični izračun osvetljenosti stavb z dnevno svetlobo.

2 • DINAMIČNE METRIKE ZA IZRAČUN OSVETLJENOSTI Z DNEVNO SVETLOBO

Pri načrtovanju in preverjanju osvetljenosti prostorov v stavbah se najpogosteje uporabljata metodi izračuna osvetljenosti (t. i. lux-metoda) in količnik dnevne svetlobe (KDS)

(Xu, 2015). Predvsem KDS je zelo razširjena in uveljavljena metrika za načrtovanje transparentnih elementov v stavbah. Pri obeh metodah je predvidena uporaba t. i. standardnih

CIE-tipov neba (CIE, 2008). Ti pa predvidevajo statično stanje neba, torej se razporeditev svetlosti neba ne spreminja oz. je v primeru tipov neba, ki upoštevajo direktno komponento sončnega sevanja (tipi 6 do 15), ta omejena le na spreminjanje pozicije sonca v odvisnosti od izbranega trenutka v dnevu, za katerega se izvede izračun. Vpliv atmosferskih pojavov je



Slika 1 • Avtonomija dnevne osvetljenosti

zanemarjen oz. ga je možno upoštevati le z izborom najbolj primernega tipa neba. Čeprav lahko pri pravilnem izboru tipa neba (Andersen, 2014) izračuni osvetljenosti z dnevno svetlobo zadovoljivo predvidijo realnost (Košir, 2011), še vedno ni upoštevana časovna komponenta spreminjanja osvetljenosti v celem letu. Prav časovno spreminjanje osvetljenosti prostora v odvisnosti od stanja neba (vpliv podnebnih danosti) in urnika uporabe prostora (vpliv namembnosti prostora) je tista komponenta, ki odločilno vpliva na izračun potrebe po dodatni porabi električne energije za umetno razsvetljavo ((Gherri, 2013) (Mardaljevic, 2009)). Prihranki pri porabi električne energije za umetno razsvetljavo pa so pogosto argument za uporabo dnevne svetlobe v stavbah. Poleg tega klimatsko odvisno simuliranje bolje odraža realnost in v nasprotju s KDS veliko pove tudi o kvaliteti osvetljenosti prostora (Gherri, 2013).

Zaradi opisanih razlogov se je v zadnjih 20 letih pojavila vrsta t. i. dinamičnih oz. klimatsko pogojenih metrik (climate-based daylight modeling – CBDM) za izračun osvetljenosti z dnevno svetlobo (Reinhart, 2006). Skupna značilnost vsem dinamičnim metrikam je obravnava osvetljenosti stavbe na letnem nivoju z upoštevanjem klimatskih danosti in načina uporabe oz. zasedenosti prostora. Takšen pristop je možen z uporabo naprednejših simulacijskih aplikacij (npr. Radiance, DAYSIM ...) in z uporabo modela neba, ki prilagaja distribucijo svetlosti neba glede na realne klimatske podatke. Model neba, ki omogoča takšno modeliranje, je leta 1993 predstavil Perez s sod. (Perez,

1993), model se imenuje dinamični vseveremski model oz. Perezov model neba. Za izvedbo simulacij s pomočjo takšnega modela neba je treba uporabiti natančne urne klimatske podatke za celotno leto (npr.: TMY – tipično meteorološko leto) na izbrani lokaciji. S tem je omogočeno upoštevanje vpliva oblačnosti ter spreminjanja razmerja med difuzno in direktno komponento sončnega sevanja. V nadaljevanju so predstavljene trenutno najbolj razširjene dinamične metrike.

2.1 Avtonomija dnevne osvetljenosti

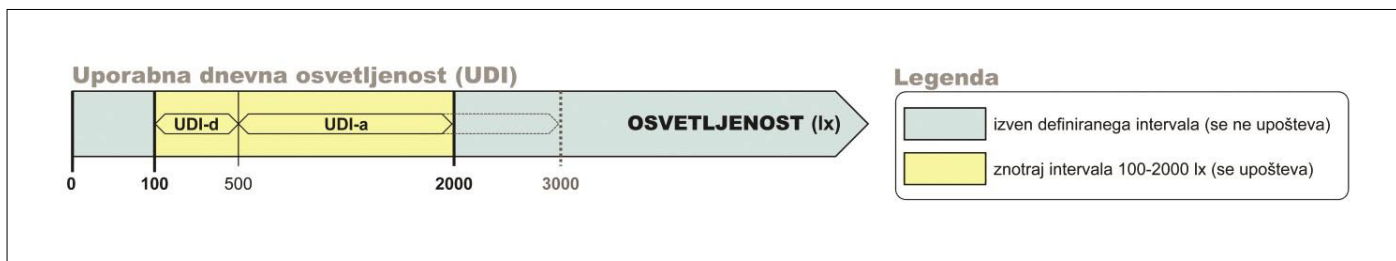
Avtonomija dnevne osvetljenosti (DA – Daylight Autonomy) je bila prva v skupini metrik, ki pristopajo k ocenjevanju osvetljenosti prostora z dnevno svetlobo s stališča dinamičnega spreminjanja zunanjih klimatskih razmer. Osnovna ideja je izračun odstotka časa v specifičnem intervalu (npr. pisarniški delovni čas) v celem letu, ko je analizirana točka oz. delovna ravnina osvetljena z dnevno svetlobo nad določeno mejno vrednostjo (slika 1) ((Reinhart, 2006) (Xu, 2015)). Mejna vrednost je definirana glede na vizualne zahteve opravljanega dela in tako predstavlja osvetljenost, pri kateri delo lahko opravljamo le ob dnevni svetlobi. Opisana ideja izvira iz švicarskega standarda (ASE, 1989) iz leta 1989, tega pa sta 2001. dopolnila Reinhart in Walkenhorst (Reinhart, 2001). Uvedba DA pomeni pomembno inovacijo pri ocenjevanju dnevne osvetljenosti stavb, saj omogoča upoštevanje klimatskih danosti specifične lokacije kot tudi navezavo na potencialno porabo električne energije za umetno razsvetljavo v času, ko

samo z dnevno svetlobo ni mogoče zadostiti zastavljenim mejnim vrednostim osvetljenosti. Če dosežena vrednost DA presega 50 %, se analizirani prostor šteje za dobro osvetljen z dnevno svetlobo (Xu, 2015). Modifikacijo DA-metrike, poimenovano prostorska avtonomija dnevne osvetljenosti (sDA – Spatial Daylight Autonomy), je kot metodo za oceno, ali so prostori v stavbah primerno osvetljeni z dnevno svetlobo, predlagala Illuminating Engineering Society (IES, 2015). Specifično je sDA definiran kot površina prostora, ki prejme 300 lx dnevne osvetljenosti v več kot 50 % časa, ko je prostor v uporabi. Del prostora, ki izpolnjuje navedeni kriterij, se šteje za osvetljen z dnevno svetlobo (t. i. cona dnevne osvetljenosti). V navedeni obliki je sDA implementiran tudi kot ena od dveh metod za preverjanje osvetljenosti stavb v certifikacijskem sistemu stavb LEED v4 ((USGBC, 2015), (Reinhart, 2015)).

Opisana metoda izračuna DA predvideva ostro mejo med prenizko in zadovoljivo osvetljenostjo delovne ravnine. Ta meja je definirana z mejno vrednostjo (slika 1), in učinkovito pomeni, da se čas, ko je osvetljenost na delovni ravnini manjša, ne upošteva pri določitvi odstotka DA, in to čeprav je osvetljenost le za nekaj luksov manjša od zastavljene mejne vrednosti. Takšno obravnavanje seveda ne odraža realnosti (Lindellöf, 2006), kjer bi uporabniki za zadovoljivo osvetljenost ocenili tudi nekoliko manjše vrednosti od predpisane mejne vrednosti. To pomanjkljivost DA-metode je leta 2006 naslovil Rogers (Rogers, 2006) z uvedbo modifikacije, poimenovane kontinuirana avtonomija dnevne svetlobe (cDA



Slika 2 • Kontinuirana avtonomija dnevne osvetljenosti



Slika 3 • Uporabna dnevna osvetljenost

– Continuous Daylight Autonomy). Metoda predvideva, da se časovna obdobja, ko je osvetljenost delovne ravnine oz. točke manjša od mejne vrednosti, upoštevajo diskontirano (slika 2) v odvisnosti od razmerja med dejansko osvetljenostjo in mejno vrednostjo (Reinhart, 2006). Primer; osvetljenost analizirane točke je 200 lx, definirana mejna vrednost je 300 lx, obdobje, ko je dosežena osvetljenost 200 lx, se upošteva s korekcijskim faktorjem 0,67 ($200 \text{ lx} / 300 \text{ lx} = 0,67$). Z opisano modifikacijo postane prehod med izpolnjevanjem in neizpolnjevanjem predpisane zahteve bolj »mehek« in s tem bolje odraža realnost.

Sočasno s cDA je Rogers vpeljal tudi parameter, ki se nanaša na visoke vrednosti notranje osvetljenosti in lahko povzročajo bleščanje, s tem pa vizualno neudobje uporabnikov. Tako pri DA kot tudi cDA lestvica nima zgornje omejitve, kar pomeni, da izjemno visoke vrednosti ne vplivajo na prejeeto oceno o dnevni osvetljenosti. Ta pomankljivost je bila odpravljena z uvedbo maksimuma avtonomije dnevne svetlobe (DA_{max}) (Reinhart, 2006), ta parameter je določen kot 10-kratnik definirane mejne vrednosti (slika 2). Efektivno DA_{max} predstavlja odstotek časa, ko se v analiziranem prostoru pojavljajo razmere (npr.: direktna sončna svetloba visoke intenzitete), ki bi potencialno lahko povzročile bleščanje in s tem vizualno neudobje. Kot sprejemljiva vrednost za DA_{max} je bila predlagana meja 5%. Pri cDA pa so prostori razdeljeni v klase, in sicer v zelo dobro (80–100%), dobro (60–80%) in zadovoljivo (40–60%) osvetljene prostore (Xu, 2015).

2.2 Uporabna dnevna osvetljenost

Podobno kot DA ali cDA tudi v primeru uporabne dnevne osvetljenosti (UDI – Useful Daylight Illuminance) klasificiramo oz. ocenimo osvetljenost prostora glede na čas uporabe in definirane mejne vrednosti osvetljenosti na delovni ravnini. Konceptualno gledano, gre pri UDI za nadgradnjo DA, ki sta jo predlagala Nabil in Mardaljevic ((Nabil, 2005), (Mardaljevic, 2006)). Kot namiguje ime, metrika oceni, koliko časa je v analiziranem prostoru dnevna svet-

loba »uporabna« oz. primerna za vizualno delo. Osvetljenost delovne površine je razvrščena v tri kategorije (slika 3): v območje s prenizko osvetljenostjo (< 100 lx), območje s primerno oz. uporabno osvetljenostjo (100–2000 lx) in območje s previsoko osvetljenostjo (> 2000 lx), ki potencialno povzroča bleščanje ((Xu, 2015), (Gherri, 2013), (Gherri, 2015)). Dodatno je bilo območje uporabe dnevne osvetljenosti nadalje razdeljeno na dopolnilno oz. UDI-d (100–500 lx) in avtonomno oz. UDI-a (500–2000 lx) podobmočje (slika 3) (Mardaljevic, 2009). UDI-d je območje, ki je dovolj osvetljeno za večino vizualnih nalog, vendar občasno potrebuje dopolnilno umetno razsvetljavo, nasprotno v območju UDI-a dopolnilna umetna razsvetljava verjetno ne bo potrebna. Rezultat izračuna UDI tako predstavlja odstotek časa, ko je analizirana točka delovne ravnine znotraj definiranega območja. Vrednost UDI tako kot DA raste z večanjem osvetljenosti prostora, vendar v nasprotju z DA pri UDI, zaradi zgornje meje osvetljenosti, ta ponovno prične padati s pojavljanjem zelo visokih vrednosti osvetljenosti. Mejni vrednosti, ki definirata območje, znotraj katerega se osvetljenost šteje za uporabno, sta osnovani na podlagi študij, opravljenih v pisarniških okoljih. Vendar kot Mardaljevic in sodelavci (Mardaljevic, 2009) izpostavljajo, je bila večina takšnih študij izvedena v času, ko so v pisarnah prevladovali CRT-zaslone, ti pa so veliko bolj dojemljivi za pojav bleščanja kot današnji LCD-zaslone. Prav tako so v stanovanjskih okoljih sprejemljive zgornje vrednosti notranje osvetljenosti višje kot v primeru pisarniških okolij. Zaradi navedenih razlogov je bila zgornja meja območja UDI redefinirana pri 3000 lx (Mardaljevic, 2015a). Kljub temu pa nekatera programska orodja, ki omogočajo izračun UDI-metrike, še vedno upoštevajo zgornjo mejo pri 2000 lx. Primer takšnega orodja je DAYSIM ((DAYSIM, 2015), (Iversen, 2013)).

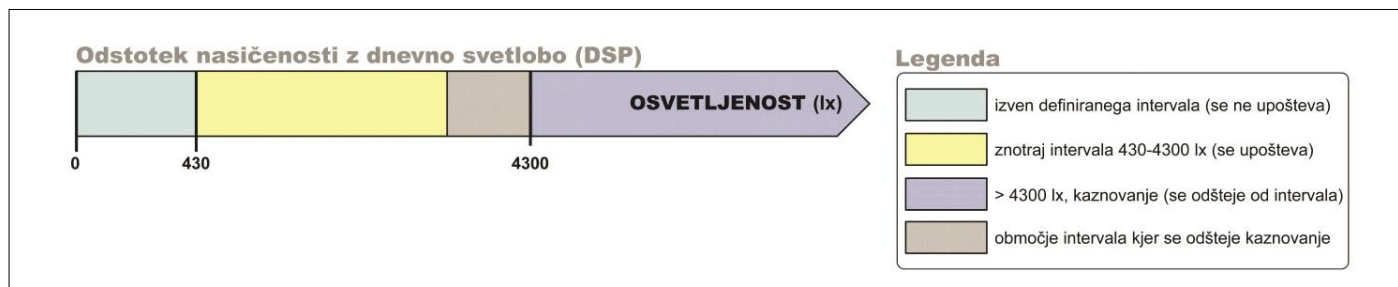
2.3 Odstotek nasičenosti z dnevno svetlobo

Odstotek nasičenosti z dnevno svetlobo oz. DSP (Daylight Saturation Percentage) je

modifikacija UDI- in DA-metrike, ki jo je leta 2006 definirala Collaborative for High Performance Schools (CHPS) v ZDA ((CHPS, 2006), (Gherri, 2013), (Gherri, 2015)). Tako kot UDI tudi DSP razdeli osvetljenost delovne ravnine v tri kategorije (slika 4): podosvetljeno območje (< 430 lx), primerno osvetljeno območje (430–4300 lx) in preosvetljeno oz. bleščavo območje (> 4300 lx). Mejne vrednosti izhajajo iz imperialnega sistema enot in so v ZDA definirane kot 40–400 fc (foot candles), kar natanko odgovarja vrednostim 430–4300 lx v SI-sistemu enot. Spodnja mejna vrednost intervala DSP je bila določena na podlagi priporočil, povezanih z izračunom KDS. Tako spodnja meja DSP odgovarja 2% KDS pri zunanji horizontalni neovirani osvetljenosti 2000 fc ($\approx 21527 \text{ lx}$) (CHPS, 2006). Zgornja meja pa je bila prevzeta glede na kriteriji DA_{max} , torej spodnja meja, pomnožena s faktorjem 10 (CHPS, 2006). V primerjavi z UDI sta bili zvišani spodnja in zgornja meja sprejemljive osvetljenosti z dnevno svetlobo. Poleg tega je pojavljanje vrednosti nad 4300 lx dodatno kaznovano, saj se odstotek časa, ko je analizirana točka osvetljena nad maksimalno vrednostjo, odšteje od vrednosti v sprejemljivem območju (slika 4), torej v razponu od 430–4300 lx. Kazen se aplicira po naslednji enačbi:

$$DSP = DSP_{430-4300} - 2 * DSP_{>4300} \quad (1)$$

Glede na kriterije CHPS se osvetljenost prostorov (specifično učilnic) ocenjuje glede na dosežen DSP v obdobju od 15. 8. do 15. 6., od ponedeljka do petka med 8. in 15. uro. Ocena se poda glede na doseženi odstotek DSP, in sicer v intervalu od 30 do 75%. Vsi prostori z DSP < 30% se ocenijo z 0 točkami, od 30% naprej pa vsakih nadaljnjih 15% prispeva eno točko. DSP > 75% ne prispeva dodatnih točk (Koti, 2009). DSP kot metrika za oceno primerne osvetljenosti prostorov glede na celoletno dinamično spreminjanje zunanjih pogojev ni močno razširjena, saj je bila razvita predvsem in specifično za ocenjevanje osvetljenosti šol v ZDA.



Slika 4 • Odstotek nasičenosti z dnevno svetlobo

Vrsta metrike	STATIČNE METRIKE		DINAMIČNE METRIKE			
	KDS	Osvetljenost ob določenem času	DA ¹	ASE	UDI	DSP
Vhodni parametri						
Lastnosti materialov	X	X	X	X	X	X
Orientacija prostora		X	X	X	X	X
Območje	X ²	X	X	X	X	X
Podnebje		X	X	X	X	X
Časovni interval, urniki			X	X	X	X
Rezultati						
Analiza neposredne svetlobe		X	X	X	X	X
Porazdeljenost svetlobe	X	X	X	X ³	X	X
Izračun porabe el. energije			X		X	X
Uporabnost prostora			X	X	X	X
Prednosti/slabosti						
Hitrost izračunov	X	X				
Zanesljivost izračunov	X	X				
Pomanjkanje vremenskih datotek			X	X	X	X
Težavna izvedba izračunov			X	X	X	X
Dostopnost programske opreme	X	X	X ⁴	X ⁴	X ⁴	X ⁴
Opombe						
¹ DA, cDA, sDA in DA _{max} so zaradi skupnih značilnosti obravnavani združeno.						
² Območje je upoštevano le z geografsko širino.						
³ Metrika je namenjena le spremljanju vpliva direktne komponente dnevne svetlobe.						
⁴ Programska oprema je prosto dostopna, vendar zahteva bolj poglobljeno znanje uporabnikov.						

Preglednica 1 • Primerjava lastnosti posameznih metrik za analizo osvetljenosti prostorov (EDR, 2015)

2.4 Celoletna izpostavljenost soncu

Zadnja od predstavljenih naprednih metrik za dinamično oceno osvetljenosti prostorov v stavbah je celoletna izpostavljenost soncu (ASE – Annual Sunlight Exposure). ASE ni samostojna metrika, torej ne predstavlja celovitega načina za oceno osvetljenosti stavb, njena uporaba je mišljena kot dopolnilo pri uporabi sDA (IES, 2015). S pomočjo ASE ocenimo količino letnih kumulativnih ur izpostavljenosti analizirane točke neposrednemu sončnemu sevanju v času zasedenosti prostora. Torej ASE predstavlja neke vrste zgornjo mejo primerne osvetljenosti prostora,

v tem kontekstu je njen namen podoben kot pri DA_{max} ali zgornji meji UDI in DSP. Ključna razlika med omenjenimi metrikami in ASE pa je v tem, da ASE upošteva le osvetljenost, ki presega določeno mejo v času pojavljanja direktne komponente sončnega sevanja. Z drugimi besedami, visoke vrednosti osvetljenosti in s tem potencialno bleščanje v času difuzne osvetljenosti prostora so zanemarjene (Protzman, 2013). Koncept v ozadju predstavljene metrike je zelo podoben že uveljavljeni metriki za oceno letne izpostavljenosti občutljivih, predvsem muzejskih artefaktov, t. i. letna izpostavljenost svetlobi (Annual Light Expo-

sure). V tem primeru gre za kumulativno celoletno izpostavljenost svetlobnemu sevanju, izraženemu v luks urah na leto (Reinhart in sod., 2006). ASE je kot druga od dveh metod za preverjanje osvetljenosti prostorov vključena v certifikacijski sistem LEED v4 (USGBC, 2015). V LEED v4 je ASE definiran s 1000 lx osvetljenosti v analizirani točki, ki je dosežena pri neposrednem sončnem sevanju. Kumulativno število ur v letu, ko je kriterij presežen, ne sme biti večje od 250 ur za 10 % površine prostora (Reinhart, 2015). Zastavljena meja ASE po mnenju Reinharta pomeni izjemno strog kriterij, ki posledično

lahko privede do načrtovanja zelo nevtralnno osvetljenih in »dolgočasnih« prostorov, v katerih se neposredna sončna svetloba pojavlja redko ali nikoli. Definirana meja je verjetno smiselna pri zelo vizualno zahtevnih delih (npr. šolske table, projekcijska platna ...), nepotrebna pa pri splošnih pisarniških okoljih in

stanovanjih, kjer si uporabniki v večini želijo raznovrstno osvetljenost.

2.5 Prednosti in slabosti

V želji po čim natančnejših izračunih osvetljenosti prostorov je bil v zadnjem obdobju narejen velik korak naprej. Razvilo se je veliko

novih programskih orodij in metrik, ki temeljijo na različnih tipih neba in metodah izračunov. Pri simulacijah osvetljenosti prostorov je treba poznati lastnosti posameznih količin in jih uporabiti v skladu z zastavljenimi cilji. Lastnosti, prednosti in slabosti posameznih metrik so prikazane in primerjane v preglednici 1.

3 • ANALIZA OSVETLJENOSTI UČILNIC V SLOVENSkih ŠOLAH Z UPORABO DINAMIČNIH METRIK

Uporaba dinamičnih metrik za analizo in tudi načrtovanje lastnosti transparentnega dela stavbnega ovoja je predstavljena na primeru slovenskih šolskih učilnic. Prostor oz. namembnost prostora ni bila izbrana naključno, saj so šolske učilnice prostori, kjer je dnevna svetloba ključnega pomena tako za opravljanje učnega procesa (Koti, 2009) kot tudi za učno uspešnost solarjev (Heschong, 2003). Osvetljenost z naravno svetlobo smo analizirali z izračunom DA in UDI. Pri izračunu DA smo za definirano mejno vrednost zahtevane osvetljenosti na delovni ravnini (slika 1) upoštevali 500 lx, ker je bil za izračun DA in tudi UDI uporabljen program DAYSIM, je bila kot zgornja meja pri UDI upoštevana vrednost 2000 lx. Čeprav standard SIST EN 12464-1 navaja 300 lx kot priporočeno minimalno osvetljenost na delovni ravnini v splošnih šolskih učilnicah ter 500 lx ali več za specializirane učilnice in za učilnice za večerni pouk, je bila zaradi nepredvidljivosti uporabe učilnic in zagotovitve ugodnih vizualnih pogojev v šolah izbrana kot zahtevana vrednost višja mejna vrednost (500 lx). Izbrana vrednost sovpadata tudi s priporočili organizacije Illuminating Engineering Society (IES, 2011), ki za splošne šolske učilnice navaja 500 lx priporočene osvetljenosti na delovni ravnini. V programu Autodesk Ecotect Analysis (Autodesk, 2011) smo generirali 5 modelov učilnic z različno površino zasteklitve. Modelom smo nato spreminjali lastnosti zasteklitve (faktor LT) in robne pogoje (3 različne orientacije: S, J, V). Za analizo osvetljenosti z uporabo dinamičnih metrik smo pri vsakem modelu ustvarili ravnino oz. mrežo točk, na kateri so bile točke, v katerih smo opravili izračune, ti so izvedeni v 320 točkah (mreža 16 x 20) na višini 76 cm nad tlemi (delovna ravnina učencev). Izračuni se opravijo za serijo diskretnih časovnih intervalov, na katere razdelimo zastavljeno definirano časovno obdobje uporabe prostora. Pri

tem se v vsakem kalkulacijskem intervalu izračuna osvetljenost na analizirani delovni ravnini. Tako se pridobi časovno in prostorsko distribucijo osvetljenosti prostora, na podlagi katere se opravi analiza izpolnjevanja zastavljenih kriterijev izbranih metrik za oceno osvetljenosti prostora z dnevno svetlobo. Za bolj nazorno predstavitev rezultatov smo za vsako izmed 16 vrst določili povprečne vrednosti. Na podlagi izvedenih izračunov za celotno mrežo točk v prostoru smo določili povprečne letoletne vrednosti DA in UDI. Povprečja smo uporabili za lažjo izvedbo primerjav med posameznimi izračunanimi primeri. Izsledke študije na podlagi hipotetične tipične slovenske šolske učilnice smo na koncu primerjali tudi z dvema primerljivima realnima učilnicama. Na podlagi rezultatov smo generirali porazdelitev osvetljenosti in porabo energije za osvetlitev (Q_e) v odvisnosti od globine prostora. Porabo energije za osvetlitev smo izračunali tako, da smo iz faktorja DA izračunali čas, ko je osvetlitev nižja od 500 lx (enačba 2).

$$Q_e = (1 - DA(\%)/100)^* \quad (2)$$

(letoletna zasedenost učilnice (h))

3.1 Tipična šolska učilnica in zasnova izvedenih simulacij

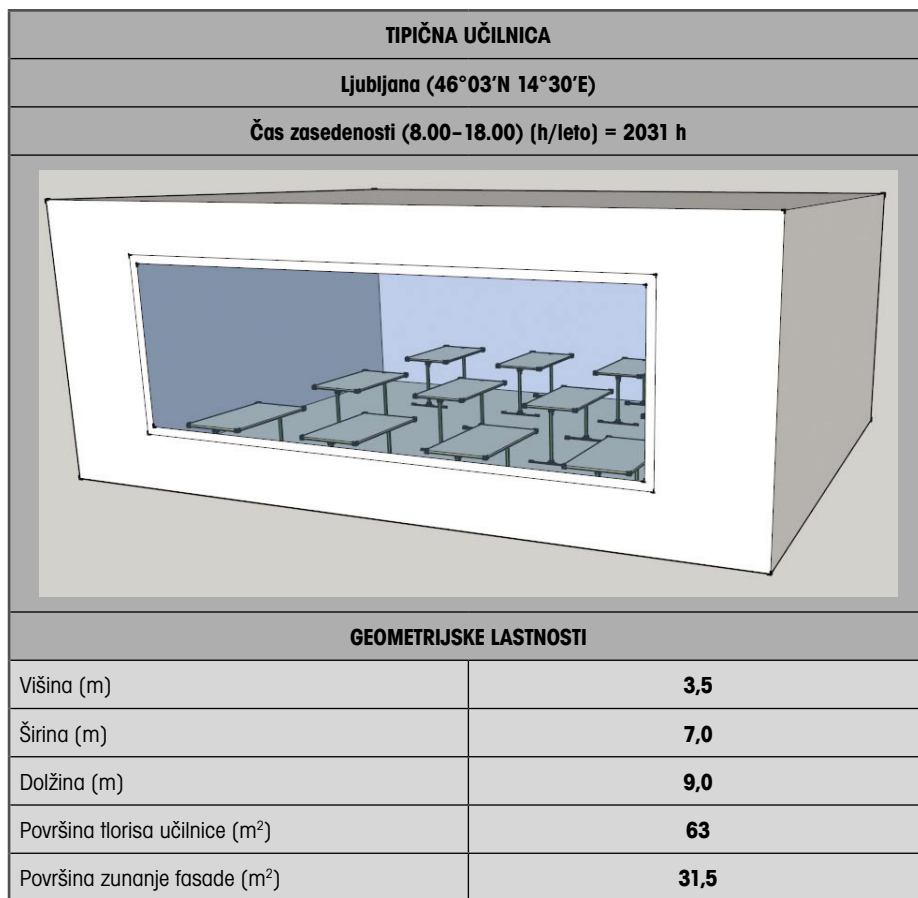
Tlorisna površina učilnic v slovenskih šolah je odvisna od vrste dejavnosti in števila otrok v učilnici. Minimalna površina učilnice za 28 otrok znaša 60 m² (NZOŠ, 2007). Predpostavljena površina tipične učilnice znaša 63 m², svetla etažna višina pa 3,5 m. Za to višino smo se odločili, ker je v Sloveniji veliko šol (predvsem starejših) s svetlo etažno višino, večjo od 3 m (Tancer, 1999). Drugi ključni podatki tipične učilnice so predstavljeni v preglednici 2. Analizirali smo 5 velikosti zasteklitve (WWR 20, 40, 60, 80, 100 %). Kratica WWR predstavlja razmerje med površino oken in fasade (ang. window to wall ratio). Površine zastek-

litve, vključene v opravljeno analizo, se gibljejo med 6,3 m² (WWR 20 %) in 31,5 m² (WWR 100 %). Preizkusili smo 5 tipov zasteklitve z različnimi vrednostmi faktorja prepustnosti za vidni del sončne svetlobe – LT-faktor (LT 0,75; 0,65; 0,55; 0,45; 0,35). Izbrane vrednosti LT-faktorja predstavljajo možen razpon realnih zasteklitve, ki se pojavljajo na slovenskem tržišču (Hajdinjak, 2009). Izbrani LT-faktorji obsegajo konvencionalne dvo- in trislojne toplotno zaščitne (LT > 0,50) kot tudi sončno zaščitne zasteklitve (LT < 0,50). Čeprav se v slovenskih klimatskih razmerah projektanti redko odločajo za uporabo sončno zaščitnih zasteklitve (uporaba takšnih zasteklitve je dodatno omejena tudi z določilom Tehnične smernice TSG-1-004:2010 (TSG4, 2010)), pri šolah njihove uporabe kljub vsemu ne moremo popolnoma izključiti. Uporaba se pojavlja zaradi želje po zmanjševanju solarnih pritokov in s tem po zmanjševanju pregrevanja brez uporabe dodatnih zunanjih senčil. Takšna strategija načrtovanja pa velikokrat nima zadovoljivih rezultatov, hkrati pa izredno negativno vpliva na notranjo osvetljenost prostorov. Čeprav so deklarirane vrednosti LT-faktorjev pri določenih komercialno dostopnih zasteklitvah tudi višje od 0,75 in segajo do okvirno 0,80; se je treba zavedati, da je v realnih okoliščinah zaradi prisotnosti umazanije in nepravokotnega vpada sončnega sevanja na zasteklitve efektivna prepustnost za sončno sevanje manjša (Krainer, 2008). V simulacijah smo uporabili lokacijo in klimatske podatke Ljubljane (USDOE, 2014). Povprečna letna dnevna vrednost globalne horizontalne osvetljenosti znaša 25166 lx, pri čemer so najvišje vrednosti dosežene v juliju (39804 lx) ter najnižje v decembru (8175 lx). Maksimalna letna zunanja osvetljenost doseže vrednost 99500 lx. V sklopu opravljene analize smo definirali urnik zasedenosti učilnice, pri čemer smo predpostavili, da je učilnica zasedena od 8. do 18. ure. Čas predvidene uporabe učilnice, ki je daljši od časa izvajanja pouka v večini šol, je bil določen na podlagi nepredvidljivosti uporabe. Z drugimi besedami, v učilnicah slovenskih šol se v času zgodnjega

popoldneva velikokrat izvajajo tudi podaljšano bivanje in različne zunajšolske dejavnosti, kot so krožki, tečaji, izobraževanja in podobno. Z upoštevanjem daljšega obdobja zasedenosti so rezultati opravljenih analiz na varni strani, saj so izračuni izvedeni v daljšem časovnem obdobju, ko zunanje razmere niso ugodne za dnevno osvetljevanje prostorov (zgodnji zimski popoldan). Skupna letna vsota ur zasedenosti učilnice tako znaša 2031 ur. Optične karakteristike netransparentnih površin, uporabljenih v simulaciji, smo določili s pomočjo študije, ki so jo opravili (Tagliabuea, 2012). Za strop smo privzeli reflektivnost 0,75, za stene 0,65 in za tla 0,45.

3.2 Vpliv faktorja LT

Prva skupina izvedenih simulacij obravnava vpliv LT-faktorja na DA- in UDI-parametre tipične učilnice. Za izhodišče smo uporabili tipično učilnico z WWR 40 % (12,6 m²). Analizirali smo vpliv LT-faktorja na parametra UDI in DA (slika 5). Analizo smo opravili za 3 orientacije (J, S in V). Največji vpliv na UDI ima zmanjševanje faktorja LT pri J-orientirani tipični učilnici. Ravno nasprotno je z vrednostjo DA, kjer ima največji vpliv sprememba LT-faktorja pri S-orientirani učilnici. Da je najvišji UDI dosežen pri S-orientaciji in najmanjši pri J-orientaciji (slika 5), je posledica bolj pogostega pojavljanja vrednosti osvetljenosti nad 2000 lx pri J- kot pri S-orientaciji. Razlog je predvsem v vplivu neposredne sončne svetlobe na notranjo osvetljenost prostora. To potrjujejo vrednosti DA, ki v nasprotju z UDI nimajo zgornje meje osvetljenosti. Vrednosti DA se zato z zmanjševanjem faktorja LT zmanjšujejo (slika 5). Nizke vrednosti UDI pri J-orientaciji in visokih vrednostih LT-faktorja kažejo na pomembnost primernega senčenja (tip in regulacija). V nasprotnem primeru dobimo v prostoru poleg visokih solarnih dobitkov tudi zelo visoke nivoje naravne osvetljenosti. Te pa z vidika vizualnega ugodja ljudi v prostoru niso zaželene. V nasprotju z UDI se za DA največje razlike pojavijo pri severni orientaciji. Pri tej orientaciji je direktne osvetljenosti zelo malo, zato imajo ukrepi, kot je zmanjševanje faktorja LT zasteklitve, na letno osvetljenost prostora v tem primeru največji vpliv. Pri učilnici s S-orientiranimi okni (LT 0,75) je naravna osvetljenost prenizka (pod 500 lx), približno 382 h, pri zasteklitvi (LT 0,35) pa 1320 h na leto. To pomeni, da lahko že z izbiro primerne zasteklitve (višji LT) močno zmanjšamo potrebo po umetni razsvetljavi (v našem primeru za 938 h). Močan vpliv faktorja LT na potrebo po umetni

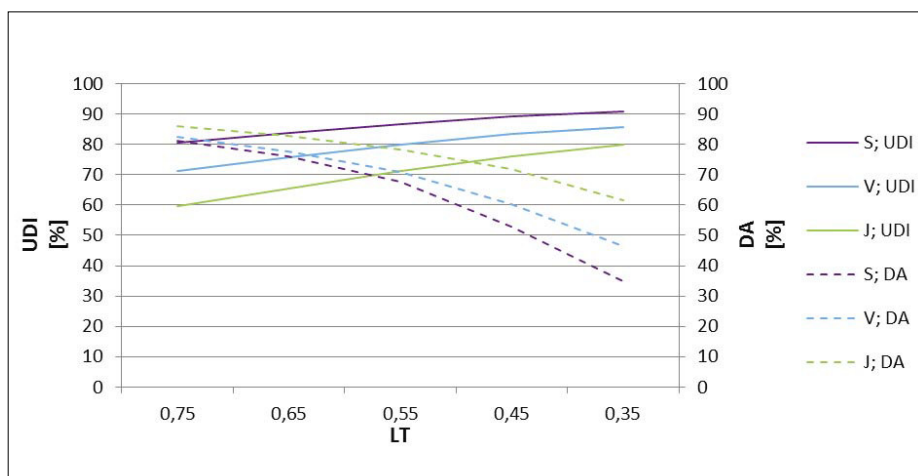


Preglednica 2 • Ključne lastnosti tipične šolske učilnice

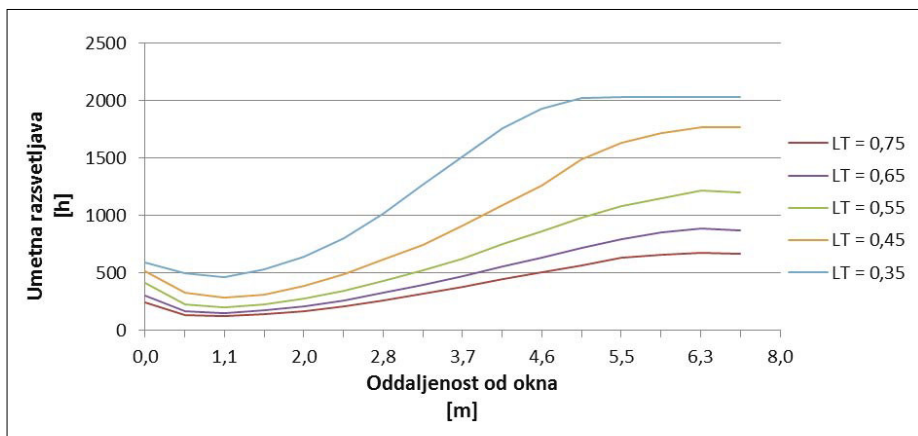
razsvetljavi pri S-orientaciji učilnice je viden pri rezultatih na sliki 6. Pri uporabi zasteklitve z nizkim LT-faktorjem (npr. LT 0,35) je v zadnji tretjini učilnice za vzdrževanje zastavljene ciljne vrednosti osvetljenosti delovne ravnine (500 lx) potrebno neprekinjeno delovanje svetilk (slika 6).

3.3 Vpliv velikosti zasteklitve

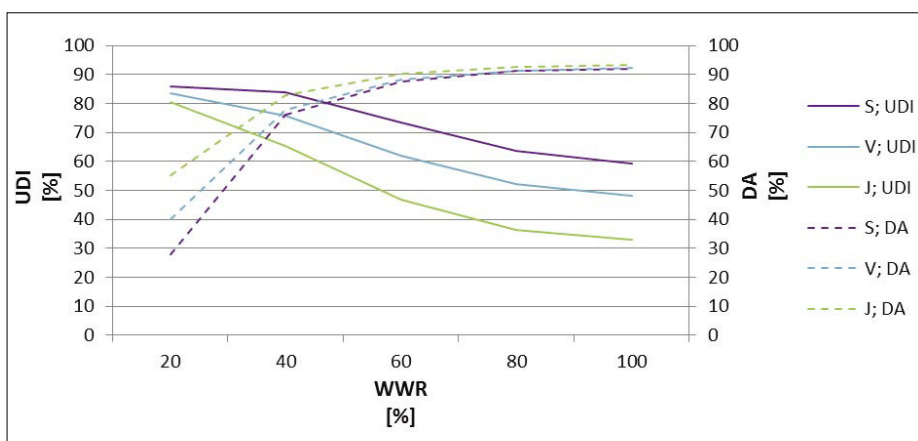
V naslednjem delu analize smo preverili vpliv velikosti zasteklitve. Rezultate analize UDI in DA za S-, V- in J-orientacijo tipične učilnice (slika 7). S povečevanjem zasteklitve se pri vseh orientacijah DA povečuje, UDI pa zmanjšuje. To pomeni, da se z večanjem površine za-



Slika 5 • UDI in DA v odvisnosti od vrednosti LT-faktorja in orientacije zasteklitve



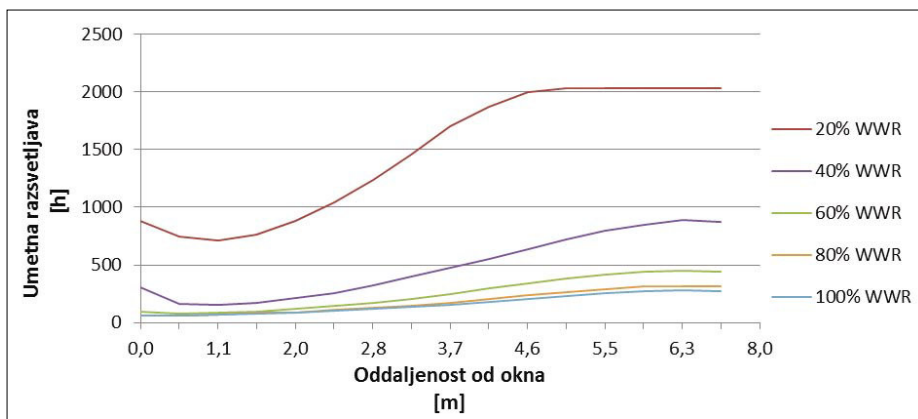
Slika 6 • Potreba po dodatni razsvetljavi v odvisnosti od faktorja LT in oddaljenosti od okna pri tipični učilnici, orientirani S, in WWR 40 %



Slika 7 • UDI in DA v odvisnosti od WWR in orientacije zasteklitve

steklenih površin čas, ko je osvetljenost nad 500 lx v času obratovanja vse leto, večja. S stališča razpoložljive naravne svetlobe se rast DA pri WWR, večjih od 40 %, močno upočasnjuje. Na podlagi tega lahko zaključimo, da pri

običajni zasteklitvi z vidika količine naravne svetlobe v prostoru, pri dani geometriji in konfiguraciji učilnice, površine zasteklitve ni smiselno povečevati nad okvirno WWR 60 %. Po drugi strani se količina uporabne naravne

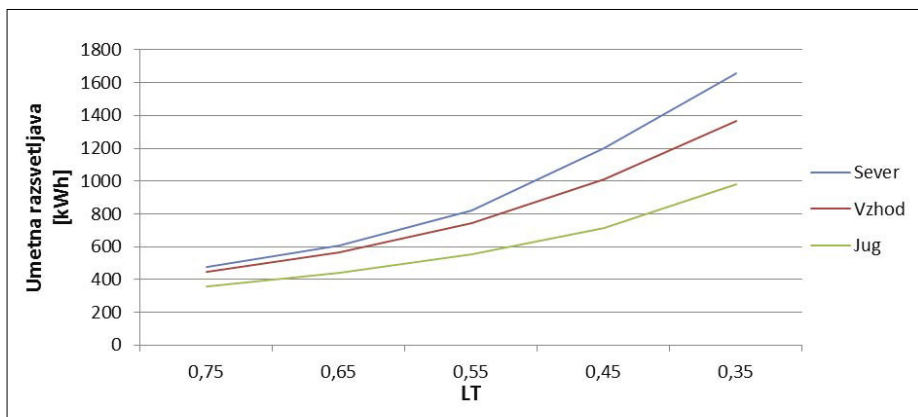


Slika 8 • Potreba po dodatni razsvetljavi v odvisnosti od WWR in oddaljenosti od okna pri tipični učilnici, orientirani proti severu in L-faktorju 0,65

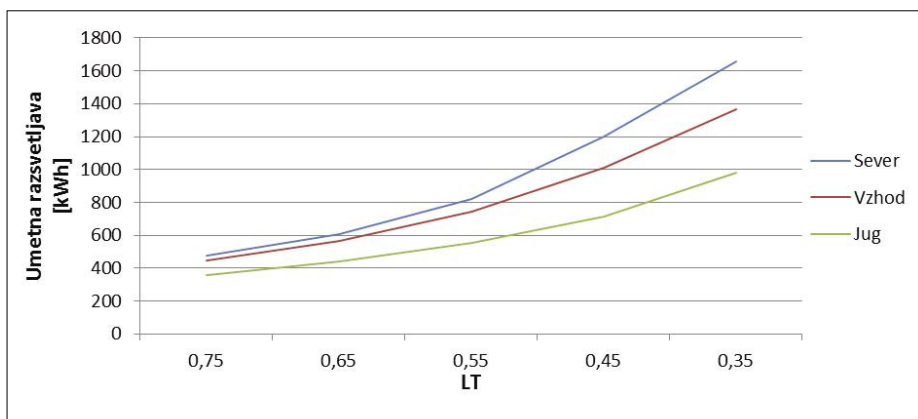
svetlobe (UDI) s povečevanjem zasteklitve zmanjšuje. Razlog za to je relativno ozek interval uporabne osvetljenosti (100–2000 lx) in pogosta previsoka osvetljenost (nad 2000 lx). Zato je treba z vidika primerne osvetljenosti nujno poskrbeti za primerno senčenje. V nasprotnem primeru se pojavi bleščanje (velike razlike med osvetljenostjo površin). Pri povečevanju površine zasteklitve največje razlike v UDI dobimo pri J-orientaciji. Tako je pri WWR 100 % osvetljenost le 30 % časa zasedenosti učilnice v za uporabnike primernem intervalu (100–2000 lx), kar je posledica vpliva neposrednega sončnega sevanja, ki je pri J-orientiranih zasteklitvah veliko večji kot recimo pri S. Največje razlike v DA dobimo pri S-orientiranih zasteklitvah. S povečevanjem zasteklitve v učilnici lahko zagotovimo, da bo umetna razsvetljava potrebna le 10 % časa, v katerem je učilnica zasedena (ca. 200 ur na leto). Na podlagi porazdelitve DA po prostoru smo določili tudi, koliko časa je v posameznih delih učilnice potrebna umetna razsvetljava (slika 8). Na podlagi teh rezultatov lahko določimo primeren nadzor prižiganja (po vrstah vzporednih oknu) ali bolj napredne oblike regulacije (uporaba dimerjev), tip in število svetilk.

3.4 Vpliv lastnosti transparentnega stavbnega ovoja na porabo električne energije

V nadaljevanju smo s predhodno pridobljenimi rezultati ocenili vpliv stavbnega ovoja (WWR in LT-faktorja) tipične učilnice na potrebo po dodatni umetni razsvetljavi oz. porabo električne energije. Z rezultati analize DA smo določili čas, ko je za primerno osvetljenost delovne ravnine potrebna umetna razsvetljava, in to količino pomnožili z močjo vgrajenih svetilk. Tip in količino svetilk v tipični učilnici smo določili na podlagi analize obstoječega stanja povprečnih slovenskih učilnic, te imajo dokaj pogosto porazdeljene svetilke v mreži 3 x 3 (3 vrste po 3 svetilke). V starejših učilnicah so najpogosteje nameščene fluorescentne sijalke tipa T8. Taka umetna razsvetljava sicer presega maksimalno dopustno moč na enoto površine, definirano v (TSG4, 2010), vendar je v realnih učilnicah bolj pogosta. Ker je taka osvetlitev energetsko neučinkovita, se pri energetskih sanacijah stare svetilke pogosto zamenjuje s svetilkami z boljšim izkoristkom lm/W (fluorescentne sijalke T5 ali LED-sijalke). Na podlagi izračuna skupne nazivne moči standardnih fluorescentnih sijalk tipa T8 (1,2528 kW) in zasedenosti učilnic



Slika 9 • Poraba energije za razsvetljavo v odvisnosti od faktorja LT, pri S-, V- in J-orientaciji in WWR 40 %

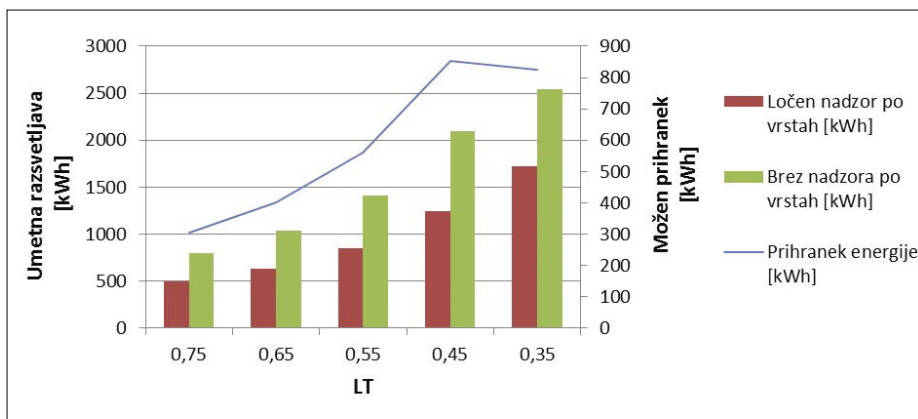


Slika 10 • Poraba energije za razsvetljavo v odvisnosti od WWR, pri S-, V- in J-orientaciji in LT-faktorju 0,65

(2031 h/leto) smo ocenili maksimalno porabo energije (2544,44 kWh).

Ker nas je v sklopu opravljene študije še posebno zanimal vpliv lastnosti stavbnega ovoja na porabo električne energije za osvet-

ljevanje pri stavbah, ki se jih bo energetske saniralo, smo se osredotočili na fluorescentne sijalke T8. Poraba električne energije v odvisnosti od faktorja LT ima ravno nasproten trend naraščanja kot razmerje med DA- in



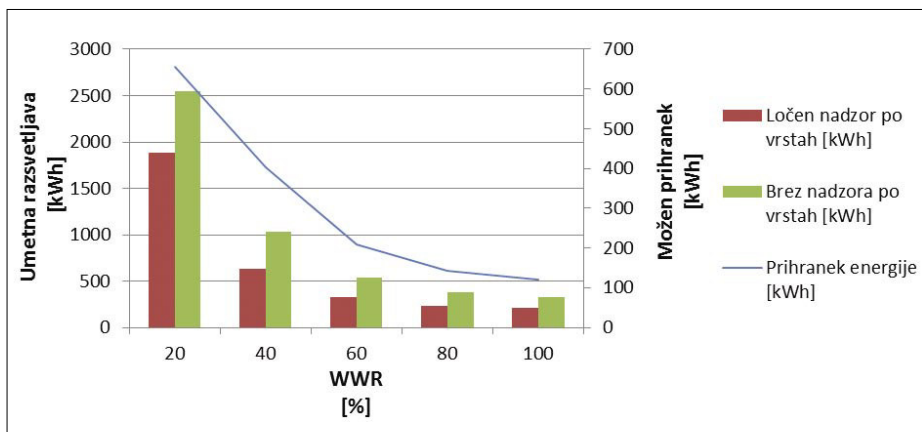
Slika 11 • Trajanje uporabe umetne razsvetljave in letni prihranek električne energije v odvisnosti od načina nadzora prižiganja svetil in LT-faktorja (WWR 40 %, J-orientacija)

LT-faktorjem (slika 9). Faktor LT ima največji vpliv na fasadah s S-orientacijo, od tod sledi, da moramo zlasti pri teh orientacijah biti pozorni, da tam ne namestimo zasteklitve s pretirano nizkim faktorjem LT. Vpliv površine transparentnih delov stavbnega ovoja na porabo električne energije za razsvetljavo je prikazan na sliki 10. Iz prikazanih rezultatov je razvidno, da se pri manjših površinah zasteklitve (WWR 20 do 40 %) poraba električne energije zelo hitro zmanjšuje, nato pa se trend zmanjševanja upočasni, saj je razlika med WWR 60 % in WWR 100 % minimalna (maksimalno 111,5 kWh).

Na podlagi rezultatov analize DA, kjer smo določili potrebo po umetni razsvetljavi po globini prostora (sliki 6 in 8), smo prostor razdelili na 3 cone oz. vrste, ki so potekale vzporedno s fasado. Vsaka cona je bila široka približno 1/3 celotne širine učilnice. Zanimala nas je povprečna potreba po dodatni razsvetljavi v vsaki coni. Predpostavljena razporeditev sovpa da z že omenjeno najbolj pogosto konfiguracijo svetilk v slovenskih učilnicah. Na ta način smo preverili vpliv dveh zelo pogostih načinov nadzora prižiganja svetil. Pri prvem načinu se vse tri vrste svetilk prižgejo z enim stikalom. Skupno potrebo po razsvetljavi smo izračunali tako, da smo upoštevali, da vse svetilke delujejo toliko časa, kot je potrebno v najmanj osvetljeni coni (najbolj oddaljena od okna). V drugem primeru pa se vsaka vrsta svetilk prižiga ločeno glede na potrebo po dodatni osvetljenosti v posamezni coni. Za vsako od con smo izračunali porabo energije in nato vsoto primerjali s primerom brez nadzora po posameznih vrstah (sliki 11 in 12). Iz primerjave je razvidno, da je z vidika energetske učinkovitosti smiselno regulirati vsako vrsto svetilk posebej. Prihranek energije raste z nižanjem osvetljenosti prostora, torej z manjšanjem WWR in nižanjem LT-faktorja.

3.5 Primerjava izsledkov z realnima šolskima učilnicama

Izsledke predstavljene študije vpliva lastnosti stavbnega ovoja na osvetljenost in posledično porabo električne energije za umetno razsvetljavo tipične šolske učilnice smo primerjali z rezultati analize, opravljene za dve realni šolski učilnici na Gorenjskem (preglednica 3). Učilnica A je del osnovne šole, zgrajena leta 1971, učilnica B pa je bila zgrajena leta 1938. Zaradi primerljivosti rezultatov smo pri obeh realnih učilnicah predvideli isto območje kot pri testni učilnici, torej Ljubljano. Izračunani in spremljani so bili isti parametri kot v primeru analize tipične učilnice.



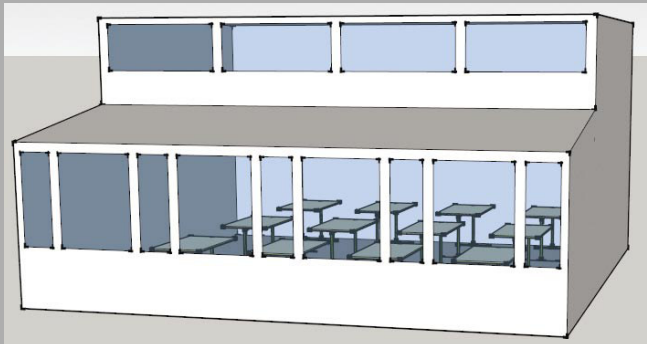
Slika 12 • Trajanje uporabe umetne razsvetljave in letni prihranek električne energije v odvisnosti od načina nadzora prižiganja svetil in WWR (LT = 0,65, J-orientacija)

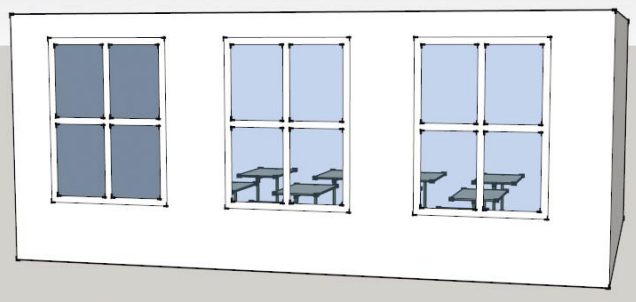
Zaradi potreb po dodatni umetni osvetlitvi (slika 13) je razvidno, da je za učilnico A značilna boljša distribucija osvetljenosti po globini prostora v primerjavi s tipično učilnico kot tudi z učilnico B. V testni učilnici B je zaradi relativno velike globine prostorov (ca. 7 m) in oken, nameščenih samo v eni ravnini, problematična nizka

osvetljenost globlje v prostoru. Pri dimenzioniranju umetne razsvetljave za primerno izbiro potrebujemo podatek o primanjkljaju naravne osvetljenosti, izračunan na podlagi DA. S pomočjo grafične ponazoritve (slika 13) vidimo, koliko časa bi za zagotovitev osvetljenosti posamezne točke delovne ravnine s 500 lx potrebovali dodat-

no umetno razsvetljavo. Rezultati primerjave dveh učilnic s tipično učilnico kažejo, da tudi arhitekturna zasnova igra pomembno vlogo pri porazdelitvi in porabi energije za osvetlitev prostorov. Povprečna potreba po dodatni osvetlitvi v J-orientirani učilnici A je zaradi boljše arhitekturne zasnove ob praktično isti površini zasteklitve kot v tipični učilnici manjša za 24 %. Učilnica A potrebuje dodatno osvetlitev povprečno 264 ur na leto, tipična učilnica pa 346 ur. Povprečna potreba po umetni osvetlitvi učilnice B znaša 404 ure na leto. Razlog za to je poleg arhitekturne zasnove tudi nekoliko manjša površina zasteklitve. Na podlagi rezultatov (sliki 11 in 12) lahko poskrbimo za primeren nadzor svetilk po vrstah. Vzpostavitev regulacije po vrstah bi prispevala največje prihranke električne energije v učilnicah B, najmanjše pa v učilnicah A.

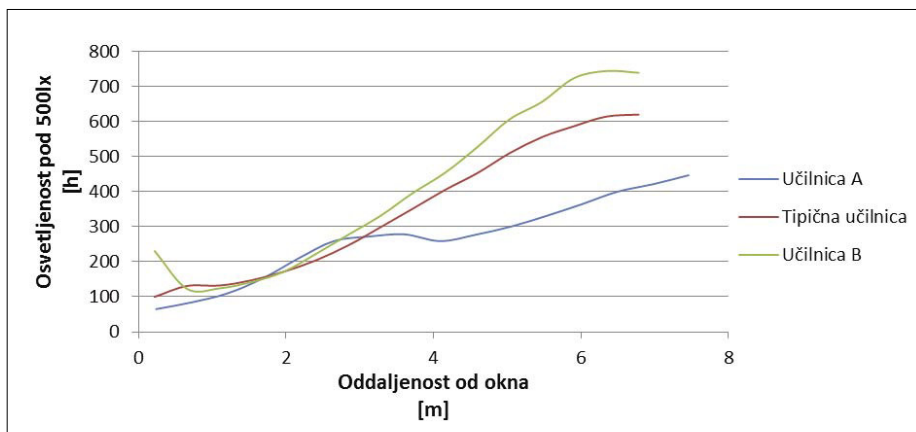
Na podlagi primerjave rezultatov tipične učilnice in primerjave z učilnicama A in B lahko zaključimo, da je pri zagotavljanju primernih vizualnih pogojev ter posledičnih prihrankih pri električni energiji za umetno razsvetljavo ključnega pomena zasnova transparentnega

UČILNICA A	
Ljubljana (46°03'N 14°30'E)	
Čas zasedenosti (8.00–18.00) (h/leto) = 2031 h	
	
GEOMETRIJSKE LASTNOSTI	
Višina (m)	4,1
Širina (m)	7,7
Dolžina (m)	7,75
Površina tlorisa učilnice (m ²)	59,7
Površina zunanje fasade (m ²)	32,16
LASTNOSTI ZASTEKLITVE	
WWR (%)	42,1
LT-faktor (-)	0,65

UČILNICA B	
Ljubljana (46°03'N 14°30'E)	
Čas zasedenosti (8.00–18.00) (h/leto) = 2031 h	
	
GEOMETRIJSKE LASTNOSTI	
Višina (m)	3,6
Širina (m)	6,8
Dolžina (m)	8,8
Površina tlorisa učilnice (m ²)	59,84
Površina zunanje fasade (m ²)	32,56
LASTNOSTI ZASTEKLITVE	
WWR (%)	32,2
LT-faktor (-)	0,65

Preglednica 3 • Osnovne značilnosti realnih učilnic A in B

stavbnega ovoja. Pri tem nista pomembna le površina (WWR) in lastnosti (LT-faktor) zasteklitve, ampak tudi geometrijska konfiguracija in orientiranost fasadnega ovoja. Iz rezultatov za učilnico A (preglednica 4) je razvidno, da ima ta v primerjavi z učilnico B in tipično učilnico okoli 100 ur letno več časa osvetljenost višjo od 500 lx ter hkrati največ časa (830 h letno) osvetljenost nad 2000 lx (UDI > 2000). Na podlagi izračunov lahko sklepamo, da je učilnica A najboljše osvetljena z dnevno svetlobo, zaradi česar ima tudi najmanjšo potrebo po umetni razsvetljavi. Vendar je hkrati tudi najdlje časa zunaj območja UDI, kar indicira na možnost pojavljanja bleščanja in zato potrebo po primernem senčenju. Omenjeni podatek seveda rezultate osvetljenosti učilnice prikaže v nekoliko drugačni luči, saj je indikator, da večja površina zasteklitve kljub manjši potrebi po električni energiji za osvetlitev ne predstavlja vedno najboljše rešitve. Velik odstotek časa, v katerem je učilnica A v območju nad 2000 lx, kaže na negativne stranske posledice načrtovanja za čim večjo osvetljenost ter na nujnost načrtovanja primerne senčenja skupaj z oblikovanjem transparentnega stavbnega ovoja.



Slika 13 • Potreba po dodatni razsvetljavi v odvisnosti od oddaljenosti od okna pri tipični učilnici in učilnicah A in B, orientiranih proti jugu in LT-faktorju 0,65

	UDI _{<100} (%)	UDI ₁₀₀₋₂₀₀₀ (%)	UDI _{>2000} (%)	DA (%)	KDS _{pov} (%)
Tipična učilnica	2,99	65,49	31,49	82,76	4,71
Učilnica A	2,48	56,99	40,51	86,98	4,85
Učilnica B	3,26	69,50	27,20	80,09	3,68

Preglednica 4 • Primerjava izračunanih rezultatov (DA, UDI in kot referenca tudi povprečna vrednost KDS) za učilnici A in B v primerjavi s tipično učilnico

4 • SKLEP

Opravljena študija vpliva transparentnega dela stavbnega ovoja na osvetljenost slovenskih osnovnošolskih učilnic predstavlja demonstracijo uporabe izbranih dinamičnih metrik (UDI in DA) za analizo osvetljenosti z dnevno svetlobo v stavbah. Analiza je pokazala močno povezavo med površino (WWR-faktor), optičnimi lastnostmi (LT-faktor) zasteklitve in notranjo osvetljenostjo ter posledično potrebo po uporabi umetne razsvetljave za doseganje primernih vrednosti horizontalne osvetljenosti na delovni ravnini. Na podlagi rezultatov, izračunanih za t.i. tipično učilnico, lahko strokovnjaki, udeleženi v procesu načrtovanja, gradnje ali energetske sanacije, bolje predvidijo vpliv izbrane zasteklitve tako na energetska bilanco stavbe kot tudi na kvaliteto notranjega vizualnega okolja v učilnicah osnovnih šol. S pravilnim izborom in načrtovanjem zastekljenih površin, umetne razsvetljave in že nadzorom prižiganja lahko močno zmanjšamo potrebo po električni energiji, hkrati pa zagotovimo primerno in spodbudno notranje okolje. Uporaba dinamičnih

metrik, ki omogočajo celovitejšo analizo osvetljenosti prostorov v stavbah, poleg ocene kvantitativnega vpliva dnevne svetlobe (osvetljenost, poraba električne energije) omogoča tudi boljše kvalitativno analizo prostorov. Tako lahko izvedemo primernejše načrtovanje notranje razsvetljave, v primerih starejših prostorov izračun vračilnih dob in s tem smiselnost investicije v zamenjavo v osnovnih šolah pogosto zastarele osvetlitve in regulacije (fluorescentne sijalke T8 ali celo T12 s samo enim stikalom) in na koncu najpomembnejše – načrtovanje ovoja stavbe (zastekljene površine, sistem senčenja). Pri tem je pomembno predvsem, da transparentnih elementov ne predimenzioniramo. To je razvidno iz UDI-analize, kjer nizke vrednosti (< 50 %) ob sočasnih visokih vrednostih DA (> 80 %) kažejo na potencialne težave z bleščanjem zaradi previsokih vrednosti notranje osvetljenosti ter tudi na potencialno pregrevanje prostorov zaradi solarnih dobitkov. V takšnih primerih (zlasti na J-orientiranih fasadah z WWR > 60 %) je ključnega po-

mena zagotavljanje učinkovitega in primerno reguliranega senčenja (Košir in sod., 2012), ki omogoča tako preprečevanje pregrevanja kot tudi regulacijo notranje osvetljenosti.

Analiza testne učilnice je pokazala, da imajo v razmerah, kjer je na voljo manj naravne dnevne svetlobe (S-orientacije), velikost in optične lastnosti zasteklitve večji vpliv na vizualne pogoje v prostoru, s tem pa tudi na porabo energije za umetno razsvetljavo. Ključna informacija, ki jo dobimo na podlagi izračuna DA, je čas, izražen v urah, ko je v učilnici potrebna umetna razsvetljava za zagotavljanje zastavljenih vizualnih pogojev. Tako v učilnici s S-orientirano zasteklitvijo in minimalno površino zasteklitve (WWR 40 %) razlika v LT-faktorju med 0,75 in 0,35 lahko predstavlja za 941 h večjo potrebo po umetni razsvetljavi. Podobno razlika v velikosti zasteklitve predstavlja kar za 1304 h večjo potrebo po umetni razsvetljavi. Seveda pa povečevanje površine zasteklitve do maksimalnih možnih dimenzij ni smiselno, saj se izkaže, da so prihranki pri porabi električne energije za umetno razsvetljavo pri WWR > 60 % in LT-faktorju 0,65 zanemarljivi. Pri zagotavljanju prihrankov je pomemben tudi nadzor prižiganja svetil, ta se izkaže za zelo pomembni dejavnik zlasti pri svetilih s slabšo

učinkovitostjo ter pri zasteklitvah z majhnimi površinami in nizkim LT-faktorjem. Primerjava testne učilnice z dvema realnima učilnicama je izpostavila dodaten, nezanemarljiv dejavnik, ki potencialno močno vpliva na dnevno osvetljenost – arhitekturna zasnova stavbnega ovoja. Primerna arhitekturna zasnova (npr.: uporaba nadsvetlob, svetlobnih polic, deljenih zasteklitev ...) lahko pri enakih WWR-faktorjih drastično izboljša osvetljenost ter s tem kvaliteto vizualnega okolja (Koti, 2009) in energetsko učinkovitost.

Spoznanja o pomembnosti primerne zasnove transparentnega dela stavbnega ovoja kot tudi izbora lastnosti zasteklitve v povezavi z notranjim okoljem in njegovimi uporabniki so ključnega pomena v času, ko oblikovanje stavb vodi predvsem želja po zmanjševanju

porabe energije za kondicioniranje stavb in posledičnega vpliva na okolje. Kot je poudaril Mardaljević (Mardaljević, 2015b), bi bilo izjemno žalostno, če bi nas želja po ohranjanju in varovanju okolja privedla v situacijo, v kateri bi prebivali in delali v stavbah, ki bi nas od tega okolja le še bolj ločevale. Za omogočanje primerne uskladitve zahtev po dnevnem osvetljevanju in varčevanju energije v stavbah pa so ključni elementi tudi primerne načrtovalske metode in orodja, ki omogočajo utemeljene in celovite odločitve. V pričujočem članku predstavljene in uporabljene dinamične metrike so ravno takšna orodja, ki s celovito obravnavo dnevne svetlobe v stavbah omogočajo boljše načrtovanje in s tem izgradnjo boljših stavb. Ker pa je področje dinamičnih metrik še v razvoju,

je trenutno težko oceniti, katera metoda bo prevladala, izjemno dobra kandidata sta UDI in sDA skupaj z DAm_{ax} (Mardaljević, 2015b). Zaradi relativne novosti področja je potreben temeljit premislek pri vpeljevanju omenjenih metod v zakonodajo in standarde, pazljivost je nujna predvsem pri predpisovanju mejnih vrednosti (Reinhart, 2015). Kljub vsemu pa lahko na podlagi novih spoznanj na področju medicine, biologije in psihologije o vplivu svetlobe na ljudi ter obujenega zanimanja za dnevno svetlobo v stavbah zaključimo, da je dnevna svetloba kot Trnuljčica, ki je predolgo časa spala. Načrtovanje osvetljenosti bi moralo pri oblikovanju stavb biti enakovredno načrtovanju energetske učinkovitosti – še bolje bi bilo, če bi se oba aspekta obravnavalo skupaj, saj sta neločljivo povezana.

5 • LITERATURA

- Andersen, P.A., Duer, K., Foldbjerg, P., Roy, N., Christoffersen, J., Asmussen, T.F., Andersen, K., Plesner, C., Rasmussen, M.H., Hansen, F., Daylight, Energy and Indoor Climate Basic Book 3rd edition, VELUX Knowledge Centre for Daylight, Energy and Indoor Climate, 2014.
- ASE, Association Suisse des Electriciens, Eclairage interieur par la lumiere du jour, Association Suisse Des Electriciens, Swiss Norm SN 418911, Zurich, 1989.
- Autodesk Ecotect Analysis 2011 – <http://www.autodesk.com/education/free-software/ecotect-analysis>, dostop 12. 12. 2014.
- Bellia, L., Pedace, A., Barbato, G., Lighting in educational environments: An example of a complete analysis of the effects of daylight and electric light on occupants, *Building and Environment*, Elsevier, l. 68, str. 50-65, 2013.
- Boubekri, M., An argument of daylighting legislation because of health, *Journal of the human environmental system*, Japanese Society of Human-Environment System, l. 7, št. 2, str. 51–56, 2004.
- Boubekri, M., Daylighting, architecture and health: Building design strategies. Elsevier/Architectural Press, Boston, 2008.
- CHPS, High Performance Schools, Best Practices Manual, Volume II, Collaborative for High Performance Schools, 2006.
- CIE S 011/E:2003 / ISO 15469:2004 (E), Spatial Distribution of Daylight - CIE Standard General Sky, 2003.
- DAYSIM, DAYSIM – advanced daylight simulation software, <http://daysim.ning.com/>, dostop 12. 11. 2015.
- EDR, Design Brief, Understanding Daylight Metrics, Energy Design Resources, https://energydesignresources.com/media/1702/EDR_DesignBriefs_daylightmetrics.pdf?traced=true, dostop 21. 11. 2015.
- Evans, G. W., McCoy, J. M., When buildings don't work: The role of architecture in human health, *Journal of Environmental Psychology*, Elsevier, l. 18, str. 85–94, 1998.
- Gherri, B., Assessment of Daylight Performance in Buildings, WIT Press, Southampton, 2015.
- Gherri, B., Daylighting Strategies: Building's Sustainability and Energy Efficiency, *Journal of Civil Engineering and Architecture*, David Publishing, l. 7, št. 7, str. 805–811, 2013.
- Hajdinjak, R., Gradimo s steklom 3. popravljena izdaja, Gornja Radgona, REFLEX d.o.o., 2009.
- Heschong, L., Windows and Classrooms: A Study of Student Performance and the Indoor Environment, Fair Oaks, Heschong Mahone Group, California Energy Commission, 2003.
- IES, Lighting Handbook 10th Edition, Illuminating Engineering Society, 2011.
- IES, LM-83-12 – Approved Method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE), Illuminating Engineering Society, 2015.
- Iversen, A., Roy, N., Hvass, M., Jørgensen, M., Christoffersen, J., Osterhaus, W., Johnsen, K., SBI 2013:26, Daylight calculations in practice: An investigation of the ability of nine daylight simulation programs to calculate the daylight factor in five typical rooms, Danish Building Research Institute, Aalborg University, 2013.
- Khezri, A. N., Comparative Analysis of PV Shading Devices for Energy Performance and Daylight, magistrsko delo, Trondheim, Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Architecture and Fine Art, 2012.

- Košir, M., Krainer, A., Dovjak, M., Kristl, Ž., Automatically controlled daylighting for visual and non-visual effects, *Lighting Research and Technology*, SAGE, l. 43, št. 4, str. 439–455, 2011.
- Košir, M., Krainer, A., Kristl, Ž., Integral control system of indoor environment in continuously occupied spaces, *Automation in Construction*, Elsevier, l. 21, str. 199–209, 2012.
- Koti, R., Munshi, M., Daylighting analysis of a classroom space using BIM geometry and next generation metrics, 38th ASES National Solar Conference 2009 (SOLAR 2009), Proceedings of a meeting held 11-16 May 2009, Buffalo, New York, American Solar Energy Society, str. 538–559, 2009.
- Krainer, A., Košir, M., Kristl, Ž., Dovjak, M., Pasivna hiša proti bioklimatski hiši, *Gradbeni vestnik*, l. 57, št. 3, str. 58–68, 2008.
- Kristl, Ž., Košir, M., Dovjak, M., Krainer, A., Študija dnevne osvetljenosti pisarniškega prostora glede na vizualne in biološke vplive, *Gradbeni vestnik*, l. 60, št. 3, str. 84–91, 2011.
- Lee, J. W., Jung, H. J., Park, J. Y., Lee, J. B., Yoon, Y., Optimization of building window system in Asian regions by analysing solar heat gain and daylighting elements, *Renewable Energy*, Elsevier, l. 50, št. 2, str. 522–531, 2013.
- Li, D. H. W., Lam, J. C., Evaluation of lighting performance in office buildings with daylighting controls, *Energy and Buildings*, Elsevier, l. 33, št. 8, str. 793–803, 2001.
- Li, D. H. W., Lam, T. N. T., Wong, S. L., Lighting and energy performance for an office using high frequency dimming controls, *Energy Conversion Management*, Elsevier, l. 47, št. 9–10, str. 1133–1145, 2006.
- Lindelöf, D., Morel, N., A field investigation of the intermediate light switching by users, *Energy and Buildings*, Elsevier, l. 38, št. 7, str. 790–801, 2006.
- Mardaljevic, J., <http://climate-based-daylighting.com/>, 2015a, dostop 12.11.2015
- Mardaljevic, J., Towards new metrics for better daylighting, *Daylight & Architecture magazine*, Velux group, št. 24, str. 56, 2015b.
- Mardaljevic, J., Heschong, L., Lee, E., Daylight metrics and energy savings, *Lighting Research and Technology*, SAGE, l. 41, št. 3, str. 261–283, 2009.
- Mavromatidis, E. L., Marsault, X., Lequay, H., Daylight factor estimation at an early design stage to reduce buildings' energy consumption due to artificial lighting: A numerical approach based on Doehler and Box-Behnken designs, *Energy*, Elsevier, l. 65, str. 488–502, 2014.
- Nabil, A., Mardaljevic, J., Useful Daylight Illuminance: A New Paradigm to Access Daylight in Buildings, *Lighting Research and Technology*, SAGE, l. 37, št. 1, str. 41–59, 2005.
- Nabil, A., Mardaljevic, J., Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors. *Energy and Buildings*, Elsevier, l. 38, št. 7, str. 905–913, 2006.
- NZOŠ, Navodila za graditev osnovnih šol v Republiki Sloveniji, Ministrstvo za šolstvo in šport, Republika Slovenija, 2007, http://www.mizs.gov.si/fileadmin/mizs.gov.si/pageuploads/razpisi/investicije/inv_6__navodila_OS.pdf, dostop 15.9.2015.
- Perez, R., Seals, R., Michalsky, J., All Weather Model for sky luminance distribution-preliminary configuration and validation, *Solar Energy*, Elsevier, l. 50, št. 3, str. 235–245, 1993.
- Protzman, B., Daylight autonomy welcomes back the sun, *Illumination in Focus*, PennWell Corporation, l. 2, št. 3, str. 20–22, 2013.
- PURES, Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah, Uradni list RS št. 52/2010: 7840, 2010.
- Reinhart, C. F., Mardaljevic, J., Rogers, Z., Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design, *Leukos*, Illuminating Engineering Society of North America, l. 3, št. 1, str. 7–31, 2006.
- Reinhart, C. F., Walkenhorst, O., Dynamic RADIANCE-based Daylight Simulations for a full-scale Test Office with outer Venetian Blinds, *Energy and Buildings*, Elsevier, l. 33, št. 7, str. 683–697, 2001.
- Reinhart, C. F., Wienold, J., The Daylighting Dashboard – A Simulation-Based Design Analysis for day lit spaces, *Building and Environment*, Elsevier, l. 46, str. 386–396, 2011.
- Reinhart, C., Opinion: Climate-based daylighting metrics in LEEDv4 – A fragile progress, *Lighting Research and Technology*, SAGE, l. 47, št. 4, str. 388, 2015.
- Rogers, Z., Daylighting Metric Development Using Daylight Autonomy Calculations In the Sensor Placement Optimization Tool, *Architectural Energy Corporation*, Boulder, ZDA, 2006.
- SIST EN 12464-1:2011, Svetloba in razsvetljava – Razsvetljava na delovnem mestu – 1. del: Notranji delovni prostori, 2011.
- Tagliabuea, L. C., Buzzetti, M., Arosio, B., Energy saving through the sun: Analysis of visual comfort and energy consumption in office space, *Energy Procedia*, Elsevier, l. 30, str. 693–703, 2012.
- Tancer, M., Prostori za pouk fizike v osnovni šoli, diplomska naloga, Univerza v Mariboru, Pedagoška fakulteta Maribor (samozaložba M. Tancer), 1999.
- TSG4, Tehnična smernica za graditev TSG-1-004 Učinkovita raba energije, http://www.arhiv.mop.gov.si/fileadmin/mop.gov.si/pageuploads/zakonodaja/prostor/graditev/TSG-01-004_2010.pdf, dostop 30.11.2014.
- USDOE, United States Department of Energy, EnergyPlus Weather Data, https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/SVN//SVN_Ljubljana.130140_IWEC, dostop 20.6.2015
- USGBC, LEED v4 – Leadership in energy and environmental design, version 4.0. <http://www.usgbc.org/leed#v4>, dostop 11.11.2015.
- Wulund, L., Reddy, A. B., A brief history of circadian time: The Emergence of redox oscillations as a novel component of biological rhythms, *Perspectives in Science*, Elsevier, l. xx, št. x, str. xxx–xxx, 2015, članek v tisku.
- Xu, Y., Yuehong, S., Daylight availability assessment and its potential energy saving estimation – A literature review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, št. 52, str. 494–503, 2015.