





Izdajatelj:

Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS), Karlovška cesta 3, 1000 Ljubljana, telefon 01 52 40 200; faks 01 52 40 199 v sodelovanju z **Matično sekcijo gradbenih inženirjev Inženirske zbornice Slovenije (MSG IZS)**, ob podpori **Javne agencije za raziskovalno dejavnost RS, Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, Fakultete za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo Univerze v Mariboru in Zavoda za gradbeništvo Slovenije**

Izdajateljski svet:

ZDGITS: **mag. Andrej Kerin**, predsednik
Dušan Jukić
prof. dr. Matjaž Mikoš
 IZS MSG: **Gorazd Humar**
Mojca Ravnikar Turk
dr. Branko Zadnik
 UL FGG: **izr. prof. dr. Sebastjan Bratina**
 UM FG: **doc. dr. Milan Kuhta**
 ZAG: **doc. dr. Matija Gams**

Glavni in odgovorni urednik:

prof. dr. Janez Duhovnik

Lektor:

Jan Grabnar

Lektorica angleških povzetkov:

Romana Hudin

Tajnica:

Eva Okorn

Oblikovalska zasnova:

Mateja Goršič

Tehnično urejanje, prelom in tisk:

Kočeovski tisk

Naklada:

500 tiskanih izvodov
3000 naročnikov elektronske verzije

Podatki o objavah v reviji so navedeni v bibliografskih bazah COBISS in ICONDA (The Int. Construction Database) ter na

<http://www.zveza-dgits.si>

Letno izide 12 števil. Letna naročnina za individualne naročnike znaša 23,16 EUR; za študente in upokoјence 9,27 EUR; za družbe, ustanove in samostojne podjetnike 171,36 EUR za en izvod revije; za naročnike iz tujine 80,00 EUR. V ceni je vštēt DDV.

Poslovni račun ZDGITS pri NLB Ljubljana:
 SI56 0201 7001 5398 955

Gradbeni vestnik • GLASILO ZVEZE DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE in MATIČNE SEKCIJE GRADBENIH INŽENIRJEV INŽENIRSKO ZBORNICE SLOVENIJE

UDK-UDC 05 : 625; ISSN 0017-2774

Ljubljana, februar 2016, letnik 65, str. 21-56

Navodila avtorjem za pripravo člankov in drugih prispevkov

1. Uredništvo sprejema v objavo znanstvene in strokovne članke s področja gradbeništva in druge prispevke, pomembne in zanimive za gradbeno stroko.
2. Znanstvene in strokovne članke pred objavo pregleda najmanj en anonimen recenzent, ki ga določi glavni in odgovorni urednik.
3. Članki (razen angleških povzetkov) in prispevki morajo biti napisani v slovenščini.
4. Besedilo mora biti zapisano z znaki velikosti 12 točk in z dvojnimi presledki med vrsticami.
5. Prispevki morajo vsebovati naslov, imena in priimke avtorjev z nazivi in naslovi ter besedilo.
6. Članki morajo obvezno vsebovati: naslov članka v slovenščini (velike črke); naslov članka v angleščini (velike črke); znanstveni naziv, imena in priimke avtorjev, strokovni naziv, navadni in elektronski naslov; oznako, ali je članek strokoven ali znanstven; naslov POVZETEK in povzetek v slovenščini; ključne besede v slovenščini; naslov SUMMARY in povzetek v angleščini; ključne besede (key words) v angleščini; naslov UVOD in besedilo uvoda; naslov naslednjega poglavja (velike črke) in besedilo poglavja; naslov razdelka in besedilo razdelka (neobvezno); ... naslov SKLEP in besedilo sklepa; naslov ZAHVALA in besedilo zahvale (neobvezno); naslov LITERATURA in seznam literature; naslov DODATEK in besedilo dodatka (neobvezno). Če je dodatkov več, so ti označeni še z A, B, C itn.
7. Poglavlja in razdelki so lahko oštevilčeni. Poglavlja se oštevilčijo brez končnih pik. Denimo: 1 UVOD; 2 GRADNJA AVTOCESTNEGA ODSEKA; 2.1 Avtocestni odsek ... 3 ...; 3.1 ... itd.
8. Slike (risbe in fotografije s primerno ločljivostjo) in preglednice morajo biti razporejene in omenjene po vrstnem redu v besedilu prispevka, oštevilčene in opremljene s podnapisi, ki pojasnjujejo njihovo vsebino.
9. Enačbe morajo biti na desnem robu označene z zaporedno številko v okroglem oklepaju.
10. Kot decimalno ločilo je treba uporabljati vejico.
11. Uporabljena in citirana dela morajo biti navedena med besedilom prispevka z oznako v obliki oglatih oklepajev: (priimek prvega avtorja ali kratica ustanove, leto objave). V istem letu objavljena dela istega avtorja ali ustanove morajo biti označena še z oznakami a, b, c itn.
12. V poglavju LITERATURA so uporabljena in citirana dela razvrščena po abecednem redu priimkov prvih avtorjev ali kraticah ustanov in opisana z naslednjimi podatki: priimek ali kratica ustanove, začetnica imena prvega avtorja ali naziv ustanove, priimki in začetnice imen drugih avtorjev, naslov dela, način objave, leto objave.
13. Način objave je opisan s podatki: knjige: založba; revije: ime revije, založba, letnik, številka, strani od do; zborniki: naziv sestanka, organizator, kraj in datum sestanka, strani od do; raziskovalna poročila: vrsta poročila, naročnik, oznaka pogodbe; za druge vrste virov: kratek opis, npr. v zasebnem pogovoru.
14. Prispevke je treba poslati v elektronski obliki v formatu MS WORD glavnemu in odgovornemu uredniku na e-naslov: janez.duhovnik@fgg.uni-lj.si. V sporočilu mora avtor napisati, kakšna je po njegovem mnenju vsebina članka (pretežno znanstvena, pretežno strokovna) oziroma za katero rubriko je po njegovem mnenju prispevek primeren.

Uredništvo

Vsebina • Contents

Članki • Papers

stran **22**

dr. Meta Kržan, univ. dipl. inž. grad.

izr. prof. dr. Vlatko Bosiljkov, univ. dipl. inž. grad.

EKSPERIMENTALNE PREISKAVE TROSLOJNIH KAMNITIH ZIDOV Z OMETI

EXPERIMENTAL TESTS OF THREE-LEAF STONE MASONRY WALLS
WITH PLASTER



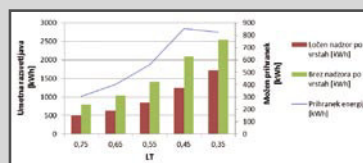
stran **41**

Jure Eržen, univ. dipl. inž. grad.

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

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



Poročila s strokovnih in znanstvenih srečanj

stran **54**

mag. Smiljan Juvan, univ. dipl. inž. grad.

26. MIŠIČEV VODARSKI DAN 2015



Novi diplomanti

stran **56**

Eva Okorn

Koledar prireditev

Eva Okorn

Slika na naslovnici: Cestni nadvoz čez železnico v Grobelnem, foto: Dušan Rožič

EKSPERIMENTALNE PREISKAVE TROSLOJNIH KAMNITIH ZIDOV Z OMETI

EXPERIMENTAL TESTS OF THREE-LEAF STONE MASONRY WALLS WITH PLASTER

dr. Meta Kržan, univ. dipl. inž. grad.

meta.krzan@fgg.uni-lj.si

izr. prof. dr. Vlatko Bosiljkov, univ. dipl. inž. grad.

vlatko.bosiljkov@fgg.uni-lj.si

Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, UL

Jamova cesta 2, Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 519.876.5:624.012.11/.12(497.4)

Povzetek | V prispevku so opisane preiskave troslojnih kamnitih zidov, namenjene študiju njihovega obnašanja pri potresnih obremenitvah. Preiskave so obsegale tlačne in strižne teste skupaj 18 zidov ter spremljajoče raziskave konstituentov (malte in kamna). Analizirani so rezultati maksimalnih nosilnosti kot tudi pomikov ter poškodovanosti zidov za karakteristična stanja obnašanja pri tlačnih in strižnih obremenitvah. Pri strižnih preiskavah je analiziran tudi vpliv morfologije zidov (sestave po prerezu), različnih nivojev predkompresije in robnih pogojev vpetja. Preizkušani tip kamnitih zidov najdemo v Sloveniji v starejših reprezentativnih objektih (na Primorskem ali tam, kjer je bil pri gradnji prisoten italijanski oziroma beneški vpliv), ti pa predstavljajo pomemben del naše kulturne dediščine. Pri takšnih objektih je poleg konstrukcije pogosto v interesu ščititi različne poslikave, mozaike itd., zato je bil na zidove nanesen tudi apneni omet, ki je služil za analizo obnašanja umetnostnih elementov zidov in določitev vrednosti mejnih zasukov zidov za nadaljnjo uporabo pri oceni potresne odpornosti obstoječih objektov tudi s stališča poškodovanosti ometov.

Ključne besede: večslojni kamniti zidovi, potresno obnašanje, strižne preiskave, mejni zasuki, poškodbe ometov

Summary | The paper presents experimental tests performed on three-leaf stone masonry walls for studying their behaviour under seismic loads. Compression and cyclic shear tests were performed on 18 walls, following tests on masonry constituents (mortar and stone). The results of maximum strength capacity as well as displacement capacity and damage at characteristic stages of the response under compression and shear loading were analysed. For shear tests the influence of wall's morphology, different levels of precompression and different boundary conditions was analysed. The type of the tested masonry can be found in Slovenia most often in old representative buildings in Primorska region (where the architectural influence of Italy can be found), and they present important cultural heritage. Since in such buildings also various artistic assets in the form of painted walls or mosaics of great importance are often present, plaster was applied to the test specimens in order to study their performance during cyclic shear loading and to determine reference drift values for various plaster damage cases in correlation with wall response. These values can be used in performance based seismic assessment of historic buildings, considering also the damage states of artistic assets attached to the walls.

Key words: Multi-leaf stone masonry walls, historic masonry, earthquake performance, shear tests, drift capacity, plaster damage

1 • UVOD

1.1 Opis problematike

Zidani kamniti objekti predstavljajo precejšen del obstoječega fonda starejših zidanih objektov, od katerih so mnogi pomembna arhitekturna kulturna dediščina. Veliko vrednost (kulturno, zgodovinsko, družbeno, ekonomsko itd.) pa imajo pogosto tudi njihovi kulturno-umetniški sestavni elementi, kot so poslikani ometi, mozaiki, štukature, kipi. Ti so najpogosteje nameščeni v

reprezentativnih zgodovinskih stavbah, kot so gradovi, dvorci, cerkve ipd. Na slikah 1 in 2 sta prikazana Mrtvaški ples, pomembna slovenska freska, in cerkev svete Trojice.

Precej kamnitih zidov historičnih objektov je po prerezu sestavljenih iz več slojev. Pri nas so od romanike naprej značilni troslojni zidovi, kjer sta zunanja sloja sestavljena iz kamna, notranja plast pa je zapolnjena z

apneno malto, pomešano z ostanki kamenja in ima več ali manj votlin. Takšni zidovi se razlikujejo glede na uporabljene materiale, način zlaganja ter obliko in obdelavo kamna (tekstura oziroma lice zidu), so pa različni tudi po sestavi prereza (morfologija zidu). V nekaterih zidovih kamniti bloki, ki potekajo čez celoten prerez, povezujejo zunanja dva sloja. Obnašanje zidov je že pri enoslojnih zidovih težko napovedati, saj nanj vpliva veliko parametrov, pri večslojnih pa je to še toliko težje. Pri različnih obremenitvah se različni sloji lahko različno obnašajo, se razslojujejo itd.



Slika 1 • Freska Mrtvaškega plesa
(http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Danse_macabre_hrastovlje.JPG)



Slika 2 • Cerkev svete Trojice, Hrastovlje, Slovenija
(<http://www.publishwall.si/lelj/photos/photo/23345>)



a)



b)



c)

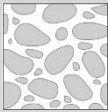
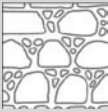

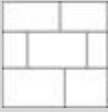
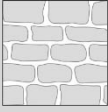

Slika 3 • Zunajravninska porušitev zidov zaradi a) slabe povezanosti konstrukcijskih elementov (http://db.nzsee.org.nz/Seminars/2014/Lagomarsino_Wellington_2014-2-20.pdf) in b) slabe povezanosti zidovine (Silva et al., 2014), L'Aquila, Abruzzo, Italija, c) porušitev stropa bazilike sv. Frančiška Asiškega v Assisiju med potresom v regiji Umbria-Marche leta 1997 (<http://projecthistoryitalia.altevista.org/26-settembre-1997-terremoto-nelle-marche-e-in-umbria/>)

V Sloveniji, v nekdanji Jugoslaviji kot tudi drugod po svetu smo se v zadnjih desetletjih spoprijeli s hudimi poškodbami in s porušitvami starejših kamnitih stavb (potresi na Kozjanskem (1974), v Posočju (1976, 1998, 2004), Skopju (1963), Banjaluki (1969), Črni gori (1979), v Italiji itd.). Poleg zunajravninskih porušitev zidov zaradi slabe povezanosti konstrukcije (slika 3 a) pride pri večslojnih zidovih zaradi slabe povezanosti zidovine tudi pri strižnih obremenitvah v ravnini do zunajravninskih porušitev zunanjih slojev zidov (slika 3 b). Znan je tudi primer nepričakovane porušitve katedrale v Notu leta 1996 (Binda, 2003a), 6 let po potresu, zaradi lezenja in tlačne preobremenjenosti večslojnih slopov in zidov. Poleg konstrukcijskih poškodb objektov so v potresih pogosto poškodovane ali uničene tudi neprecenljive umetnine. Uničenje Giottovih in Cimabuejevih fresk v baziliki sv. Frančiška Asiškega v Assisiju med potresom leta 1997 (slika 3 c) je po potresu povzročilo še dodatno, t. i. kulturno travmo (Debs, 2013).

Za analizo konstrukcijskega obnašanja stavb pri statičnih obremenitvah kot tudi pri dinamičnih (potres) ter za analizo učinkovitosti sanacije oziroma različnih utrditvenih ukrepov sta ključnega pomena ocena mehanskih karakteristik posameznih zidov in napoved njihovega obnašanja pri različnih obremenitvah. Napovedovanje obnašanja je zaradi velikega števila (pogosto neznanih) vplivnih parametrov zahtevna naloga. Na obnašanje zidanih elementov zelo vplivajo tudi parametri, ki niso neposredno vezani na lastnosti zidovine, temveč so odvisni od konstrukcije in obtežb. Na obnašanje vplivajo vpetost konstrukcijskih elementov, njihova geometrija in pripadajoče vertikalne obremenitve. Ker se tudi pri zaščiti kulturne dediščine vedno bolj uveljavlja način ocene stanja PBA oziroma projektiranja konstrukcij s kontroliranim obnašanjem PBD (angl. Performance based assessment oziroma design), nas pri analizi odziva konstrukcijskih elementov zanima nelinearni odziv sila–

pomik. Poleg mejnih sil in mejnih pomikov je za takšno analizo treba poznati stanja poškodovanosti pri različnih obremenitvah oziroma vrednosti pomikov in sil, pri katerih pride do karakterističnih stanj (npr. pomiki, kjer nastanejo prve razpoke) določenih elementov.

Mehanske karakteristike zidovine za analizo odpornosti objekta lahko določimo bodisi po priporočilih iz standardov bodisi po podatkih iz literature ali z natančnejšimi preiskavami karakterističnih zidov obravnavane konstrukcije. Pri prvih dveh možnostih se za predpostavljene vrednosti v večini primerov odločimo na podlagi vidne strani zidovine. Glede na teksturo zidu, ocenjeno vrsto in kvaliteto gradnikov (kamna oziroma opeke ter veziva) predpostavimo vrednosti tlačne, natezne in strižne trdnosti ter vrednosti elastičnega in strižnega modula. Vrednosti je treba določiti previdno, saj po navadi ne vemo, kakšna je dejanska sestava zidu po prerezu (morfologija). Pri večslojnih zidovih

	Tekstura*	Tip zidovine	f_{Mc} (MPa)	f_{Ml} (MPa)	E_M (MPa)	G_M^{**} (MPa)	γ_M (kN/m ³)
A		Nepravilna kamnita zidovina (iz prodnikov, kamenja nepravilnih oblik)	0,70–1,80	0,020–0,048	200–1050	130–350	19
B		Kamnita zidovina iz neobdelanih kamnov, z omejeno debelino zunanjih slojev in nepovezanim jedrom	2,00–3,00	0,053–0,080	1020–1440	340–480	20
C		Kamnita zidovina iz lomljenih kamnov z dobrim preklapljanjem	2,60–3,80	0,084–0,111	1500–1980	500–660	21
D		Kamnita zidovina iz mehkih kamnov (tufa, apnenca itd.)	1,40–2,40	0,042–0,063	900–1700	300–420	16
E		Klesana kamnita zidovina iz trših kamnov	4,70–8,00	0,135–0,180	740–3200	200–940	22
F		Opečna zidovina z apneno malto	2,00–4,00	0,040–0,140	240–1800	80–600	18

* Slike so simbolične (povzete po SIA 266/2 SN 505266/2 (SIA 505266/2, 2012)).
 ** Vrednosti se nanašajo na nerazpokan prerez.
 Legenda:
 f_{Mc} tlačna trdnost zidovine; f_{Ml} natezna trdnost zidovine; E_M elastični modul zidovine; G_M strižni modul zidovine; γ_M prostorninska teža zidov

Preglednica 1 • Razširjena preglednica mejnih vrednosti mehanskih parametrov, podanih v MIT 2009, za različne tipe zidovine

lahko najdemo različne debeline slojev in razmerij debelin zunanjih in notranjih slojev. Glede na debelino in karakteristike srednje plasti kot tudi zunanjih se spreminjata prevzem obremenitev in celotno obnašanje zidov pri različnih obremenitvah. Karakterizacija zidov zgolj z vidne strani tako prinaša negotovosti, ki se jim brez natančnejših preiskav ne moremo izogniti.

Poznavanje in raziskovanje obnašanja zidanih stavb in zidov pri potresih ima v Sloveniji dolgo tradicijo, saj so bili raziskovalci Zavoda za raziskavo materialov in konstrukcij z znanjem in izkušnjami, pridobljenimi od potresa leta 1963 v Skopju, že pred desetletji vodilni strokovnjaki s področja zidanih konstrukcij in popotresne obnove ne le na območju nekdanje države, temveč po svetu. Med prvimi so se ukvarjali tudi z raziskavami mehanskih karakteristik in obnašanja kamnitih zidov in stavb, pri čemer so razvijali tudi ukrepe za njihovo sanacijo in utrjevanje ((Terčelj, 1976), (Terčelj, 1982), (Turnšek, 1978), (Sheppard, 1980), (Tomažević, 1989), (Tomažević, 1993)).

Kot že rečeno, obstaja veliko različnih vrst zidovine; z njihovo klasifikacijo so se najbolj podrobno ukvarjali v Italiji, kjer imajo veliko število različnih vrst zidovine (Binda, 2003b). Glede na velik nabor in obsežne preiskave zidovine italijanski predpisi za potresno pro-

jektiranje (MIT, 2009) podajajo vrednosti mehanskih karakteristik zidovine obstoječih objektov v odvisnosti od vrste zidovine in njene teksture, hkrati pa tudi korekcijske koeficiente za primere določenih ugodno delujočih lastnosti zidovine (npr. dobra kvaliteta malte, prisotnost povezovalnih blokov). Mejne vrednosti mehanskih karakteristik, podanih v MIT 2009, razširjene z vrednostmi mehanskih karakteristik glede na relevantne študije različnih raziskovalcev in dognanj ob opravljenih in-situ preiskavah zgodovinskih objektov ((Turnšek, 1978), (Tomažević, 1982), (Tomažević, 1989), (Tomažević, 1999), (Binda, 2006a), (Magenes, 2010), (Bosiljkov, 2010a), (Bosiljkov, 2010b), (Borri, 2011), (Uranjek, 2012), (Candela, 2012), (Martins, 2014)), so podane v preglednici 1.

Tudi napovedovanje obnašanja zidov v smislu mejnih sil, togosti in duktilnosti oziroma mejnih pomikov in rotacij je kompleksen problem. Za analizo pri potresni obtežbi nas zanima predvsem obnašanje zidov pri dvoosnih obremenitvah, in sicer pri kombiniranih vertikalnih in horizontalnih strižnih obremenitvah. Pri zidovih lahko pri strižnih obremenitvah v ravnini zaradi njihove nehomogenosti pride do različnih porušitev (Tomažević, 1987), in sicer do diagonalne porušitve preko spojníc ali preko kamna oziroma opeke, zdrsa, upogibne ozi-

roma tlačne porušitve ter njihovih kombinacij. Pri večslojnih zidovih pa lahko nastanejo tudi večji pomiki in porušitve zunaj ravnine zidu.

Za različne tipe porušitev obstajajo različni analitični modeli za napoved strižnih nosilnosti, ki pa v točno določenih primerih zidov podajajo boljše oziroma slabše napovedi. V posameznih modelih niso vedno upoštevani vsi parametri, ki so karakteristični za obravnavani zid in znatno vplivajo na njegovo obnašanje. Treba se je tudi zavedati, da se historična kamnita zidovina obnaša drugače kot sodobna opečna. V preglednici 2 so zbrani najbolj pogosto uporabljeni modeli za določanje mejnih strižnih nosilnosti V_{Rd} zidov, navedeni pa so tudi predpisi, v katerih se posamezni modeli uporabljajo. Velja omeniti, da je bil model za diagonalno porušitev z uporabo natezne trdnosti zidov (2) razvit v Sloveniji, in sicer gre za t. i. Turnškovo enačbo (Turnšek, 1971). Enačba je bila med drugim privzeta v prvem italijanskem potresnem standardu (Legge n. 64, 1974) ter v jugoslovanskih predpisih (SRFJ, 1981). Standardi za izračun mejnih nosilnosti pri strigu modele bolj ali manj modificirajo, poleg tega pa jim dodajo tudi svoje varnostne faktorje, s čimer je raztros vseh izračunanih rezultatov še večji (Kržan, 2011).

Porušni mehanizem	Avtor	Analitični model	Predpis
Upogibni		$V_{Rd,r} = \psi \frac{\sigma_0 t_w l_w^2}{2h_0} \left(1 - \frac{\sigma_0}{f_{Mc}} \right) \quad (1)$	(MIT, 2009), (EN 1998-3: 2005, 2005), (FEMA 306, 1998)
Strižni (diagonalne razpoke)	(Turnšek, 1971)	$V_{Rd,d} = l_w t_w \frac{f_{Mt}}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{f_{Mt}}} \quad (2)$	(MIT, 2009), (FEMA 306, 1998)
Strižni (diagonalne razpoke – zidaki)	(Mann, 1982)	$V_{Rd,di} = l_w t_w \left(\frac{f_{v0}}{1 + \mu\phi} + \frac{\mu}{1 + \mu\phi} \sigma_d \right) \quad (3)^{(*)}$	(DIN 1053-1: 1996-11, 1996)
Strižni (diagonalne razpoke – spojnice)	(Mann, 1982)	$V_{Rd,dj} = l_w t_w \frac{f_{bt}}{2,3} \sqrt{1 + \frac{\sigma_d}{f_{bt}}} \quad (4)^{(*)^{(*)}}$	(DIN 1053-1: 1996-11, 1996)
Strižni (zdrs)	Mohr-Coulomb	$V_{Rd,s} = l_w t_w (f_{v0} + \mu\sigma_d) \quad (5)$	(MIT, 2009), (EN 1998-3: 2005, 2005), (FEMA 306, 1998)

(*) Kriterij za diagonalno porušitev po zidakih je v predpisih navadno podan z omejitvijo vrednosti, dobljene po kriteriju (5). Večinoma je mejna vrednost določena v odvisnosti od natezne trdnosti zidaka f_{bt} .

Legenda:
 t_w : debelina zidu; l_w : dolžina zidu; l_{wc} : dolžina tlačnega dela zidu; h_w : višina zidu; σ_0 : normalna tlačna napetost zidu; σ_d : povprečna rezultirajoča vertikalna napetost na tlačnem delu prereza; ψ : korekcijski faktor v odvisnosti od robnih pogojev vpetja, enak 1,0 za konzolne zidove in 2,0 za oboje stransko vpete; b : korekcijski faktor, ki upošteva porazdelitev napetosti po prerezu glede na geometrijsko razmerje zidu (po navadi določen kot h_w/l_w , vendar ne večji kot 1,5 in ne manjši kot 1,0); ϕ : je koeficient, ki upošteva teksturo zidovine (preklop zidakov), f_{v0} začetna strižna trdnost zidovine; μ : koeficient trenja

Preglednica 2 • Najbolj pogosti kriteriji za določitev mejne nosilnosti zidov in predpisi, v katerih se uporabljajo

Dobljeni porušni mehanizem zidov vpliva na velikost horizontalnih pomikov oziroma zasukov, ki jih zid lahko prenese pri horizontalnih obremenitvah. Za potrebe nelinearne potresne analize nekateri standardi podajajo mejne vrednosti pomikov bilinearnih krivulj prečna sila–zasuk, s katerimi se definira obnašanje zidov pri strižnih obremenitvah v ravnini. Evropski standard za potresno projektiranje obstoječih objektov EC8-3 (EN 1998-3: 2005, 2005) definira vrednosti mejnih pomikov glede na kritični porušni mehanizem ter glede na geometrijsko razmerje zidov. Definira tri stanja poškodovanosti, in sicer stanje majhne poškodovanosti – DL (angl. Damage Limitation), stanje večjih poškodb – SD (angl. Significant Damage) ter stanje blizu porušitve – NC (angl. Near Collapse). Zasuki v stanju SD so definirani kot 0,4 % za strig in 0,8 % (h_0/l_w) za upogib, pri čemer je h_0 razdalja med kritičnem prerezom in prerezom prevojnne momentne točke. Zasuki za stanje NC so definirani kot 4/3 zasukov pri stanju SD. Kriteriji so podani v preglednici 3. Podobno kot v EC8-3 so mejne vrednosti zasukov podane tudi v ameriških predpisih FEMA 306 (FEMA 306, 1998). Mejna stanja so imenovana IO (angl. Immediate Occupancy), LS (angl. Life Safety) in CP (angl. Collapse Prevention). Njihove vrednosti so prav tako podane v preglednici 3, bilinearna krivulja, povežeta po FEMA 306, pa je predstavljena na sliki 4. Ker imajo po dosegu maksimalne nosilnosti nekateri zidovi tudi rezidualno nosilnost, je v obeh predpisih dovoljeno podaljšanje bilinearne krivulje, če ne gre za primarne nosilne zidove.

Ocena mejnih sil in pomikov posameznega zidu je torej med bistvenimi predpostavkami pri potresni analizi objektov, saj se v odvisnosti od nje tudi rezultati izračunane potresne odpornosti posameznega objekta med seboj precej razlikujejo.

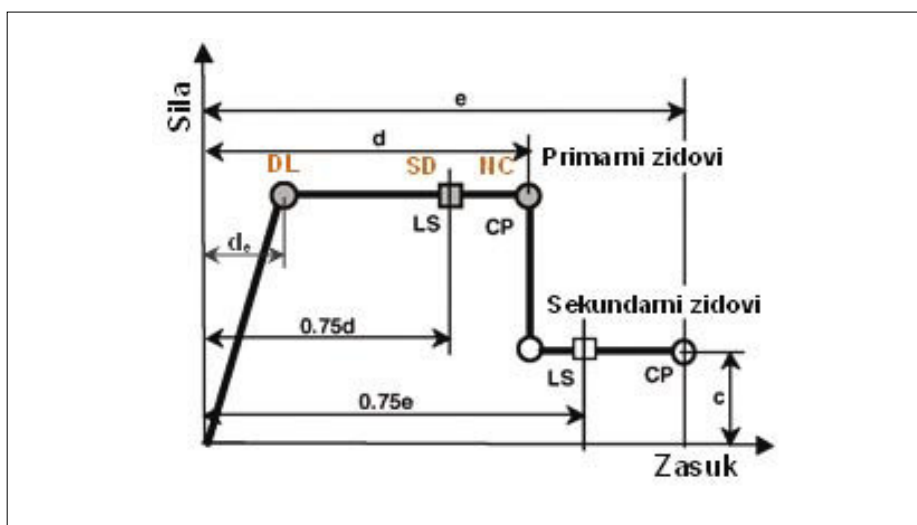
1.2 Eksperimentalne preiskave

V laboratoriju UL FGG so se v sklopu evropskega projekta PREPETUATE (PERformance – based Approach to Earthquake proTection of cUltural

Upogibno obnašanje		Strižno obnašanje	
EC8-3 (%)	FEMA 306 (%)	EC8-3 (%)	FEMA 306 (%)
"DL": d_e^*	"IO": 0,1	"DL": d_e^*	"IO": 0,1
"SD": $0,8 h_0/l_w$ ($1,2 h_0/l_w$)	"LS": $0,3 h_0/l_w$ ($0,6 h_0/l_w$)	"SD": 0,4 (0,6)	"LS": 0,3 (0,6)
"NC": $1,07 h_0/l_w$ ($1,6 h_0/l_w$)	"CP": $0,4 h_0/l_w$ ($0,8 h_0/l_w$)	"NC": 0,53 (0,8)	"CP": 0,4 (0,8)

* Pomik na meji elastičnosti d_e definirane krivulje, določen iz nosilnosti V_{Rd} in efektivne togosti K_{ef}

Preglednica 3 • **Mejne vrednosti zasukov po EC8-3 (EN 1998-3: 2005, 2005) in FEMA 306 (FEMA 306, 1998) za primarne in (sekundarne) zidove pri različnih porušnih mehanizmih za različna mejna stanja**



Slika 4 • **Bilinearna krivulja, določena po predpisu FEMA 306, z dodanimi oznakami mejnih stanj po EC8-3 (privzeto iz (Abrams, 2001))**

heriTage in European and mediterranean countries, www.perpetuate.eu) izvedle obsežne sistematične preiskave za določanje potresnega obnašanja kamnitih večslojnih zidov objektov kulturne dediščine. Izbran je bil tip zidovine, ki je prisoten predvsem v reprezentativnih objektih (slika 2). Opravljeni so bili 4 tlačni preizkusi in 15 cikličnih strižnih preizkusov zidov ter preiskave konstituentov (kamna, malte in stikov). Testi so bili poleg analize maksimalnih nosilnosti namenjeni predvsem analizi mejnih pomikov in poškodovanosti v karakterističnih stanjih pri strižnih obremenitvah v ravnini zidov za nadaljnjo uporabo v PBA-analizi.

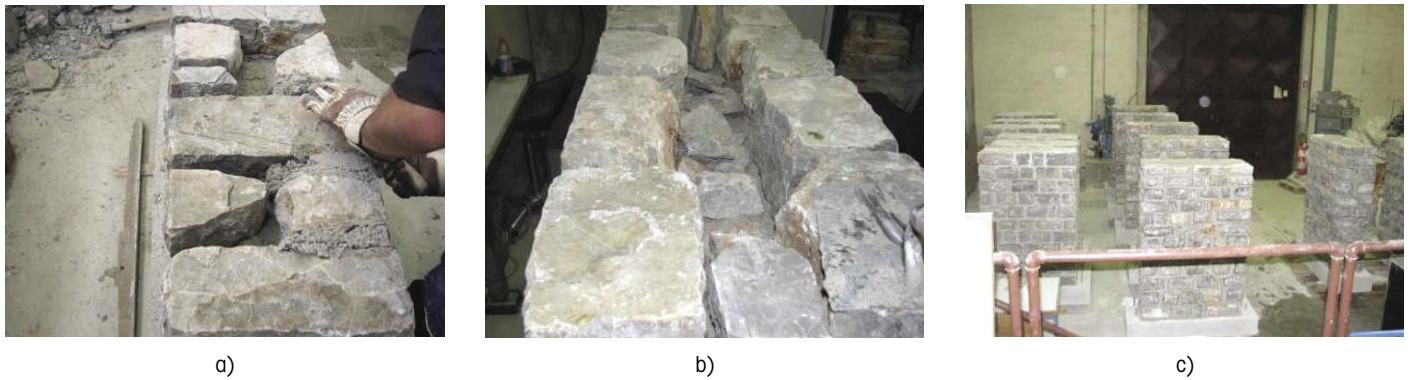
S preiskavami je bil sistematično analiziran vpliv morfologije zidov (sestave po prerezu), različnih nivojev tlačnih obremenitev ter robnih pogojev vpetja pri strižnih obremenitvah. Ker nikjer v svetovni literaturi ni zaslediti študije obnašanja historičnih ometov pri potresnih obremenitvah in kvantitativnih vrednosti mejnih zasukov, so bili na zidove nanesti ometi, s katerimi se je analiziralo poškodovanost ometov pri tlačnih in strižnih obremenitvah zidov ter tako dobilo prve referenčne vrednosti za PBA-analizo historičnih objektov, pri kateri se lahko upošteva tudi poškodovanost poslikav na zidovih.

2 • ZNAČILNOSTI PREIZKUŠANIH ZIDOV IN REZULTATI PREIZKUSOV KONSTITUENTOV

Preizkušanci so bili zgrajeni v laboratoriju za namene preiskav obnašanja starih kamnitih

večslojnih zidov, zato so jih zgradili izučeni zidarski mojstri, ki so za gradnjo uporabili

apneno malto. Zunanji sloji zidov so bili zgrajeni iz polobelanih kamnitih blokov iz apnenca, položenih v ravne pravilne vrste. Polovica zidov je bila zgrajena z vezniško zvezo, to je s povezovalnimi kamnitimi bloki, ki so po prerezu v vsaki drugi vrsti potekali čez vse tri sloje (slika 5 a, slika 6 a). Druga



Slika 5 • Gradnja zidov a) z vezniško zvezo, b) s smerniško zvezo ter c) preizkušanci pred izdelavo zgornjih betonskih blokov

polovica zidov pa je bila zgrajena s smerniško zvezo, to je brez povezovalnih blokov (slika 5 b, slika 6 b). Debelina maltnih spojin je bila v povprečju 1,5 cm. Notranji sloj je bil zapolnjen z ostanki kamenja od zidave in apneni malto, vseboval je tudi manjši delež votlin. Zaradi hitrejšega vezanja je bilo malti glede na volumen apna dodano 20 % vulkanskega pepela, za reprezentativnost historigčnih malt pa je bil cilj ne preseči 2 MPa tlačne trdnosti malte. Zidovi so bili z ene strani ometani; nanesena sta bila dva sloja ometa (po recepturi restavradorjev) – grobi in fini omet. Debelina ometa je glede na različne oblike kamna znašala med 1 in 3,5 cm. Med gradnjo zidov se je merilo konsistenco malte in pripravljalo standardne

maltno vzorce za preiskave mehanskih karakteristik strjene malte ter valjaste vzorce malte in odpadnega kamenja za simulacijo in preiskave jedra zidu.

Skupaj je bilo zgrajenih 16 zidov dimenzij 100/40/150 cm³ ter dva zidka 100/40/100 cm³. Zidovi so bili zgoraj in spodaj vpeti v armiranobetonske bloke, ki so služili za vpetje v preizkuševalne naprave, za raznos obtežbe in za transport po laboratoriju. Konstrukcija in detajli preizkušancev so opisani v (Korpič, 2012).

Malta za zidanje je imela po 120 dneh povprečno tlačno trdnost f_{mc} 1,88 MPa s koeficientom variacije (k.v.) 5,9 % ter povprečno upogibno trdnost f_{mf} 0,61 MPa (k.v. 11,5 %). Malta za grobi omet je po 365 dneh dosegla

f_{mc} 3,05 MPa in f_{mf} 1,07 MPa, trdnosti malte za fini omet pa sta po 28 dneh znašali 1,79 MPa in 0,52 MPa. Povprečna tlačna trdnost kamna f_{bc} je znašala 171,5 MPa (k.v. 24,1 %), upogibna f_{br} pa 24,2 MPa (k.v. 17,4 %).

Opravljeni so bili tudi tlačni in cepilno natezni preizkusi valjev, ki naj bi simulirali jedro zidu. Po 342 dneh sta tlačna in cepilna natezna trdnost jedra znašali 0,90 MPa (k.v. 23,6 %) in 0,16 MPa (k.v. 52,5 %). Vzorci so bili krhki in so razpadali že pri majhni obtežbi, zaradi česar ni bilo mogoče narediti preizkusov za določitev elastičnega modula. S testom Bond-wrench je bila po tlačnem preizkusu zidu določena upogibna natezna trdnost stika kamen-malta, in sicer 0,03 MPa, pri čemer je prišlo do porušitve na stiku malte in kamna.



Slika 6 • Morfologija a) povezanega zidu in b) nepovezanega zidu, c) zid za preizkušanje, č) zidek z ometom ter d) omet z vidnim grobim in finim slojem

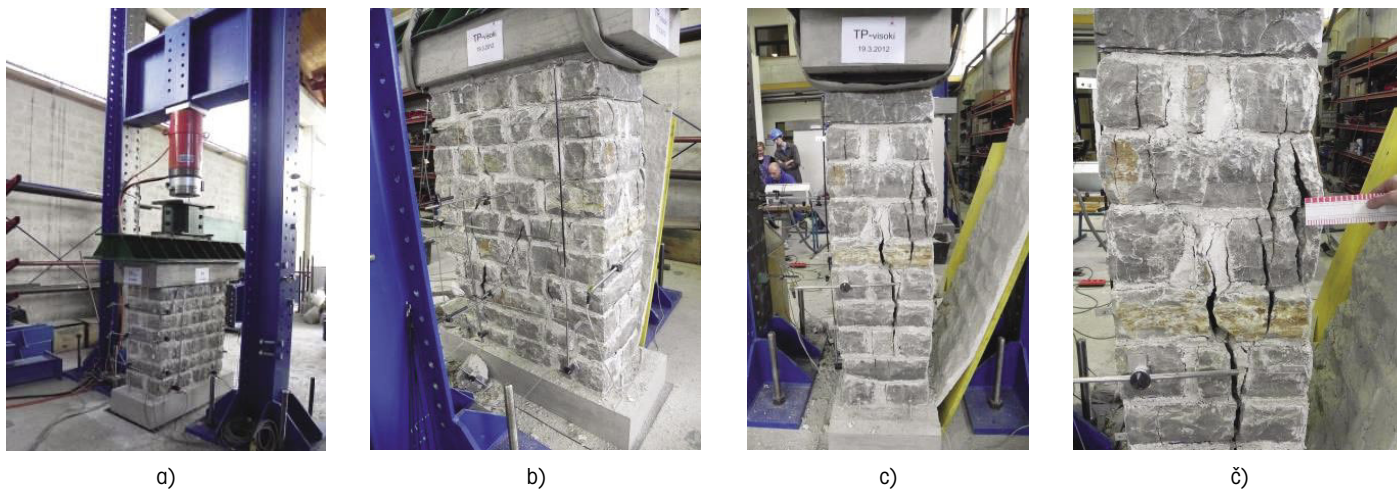
3 • TLAČNI TESTI ZIDOV

3.1 Opis in rezultati preiskav

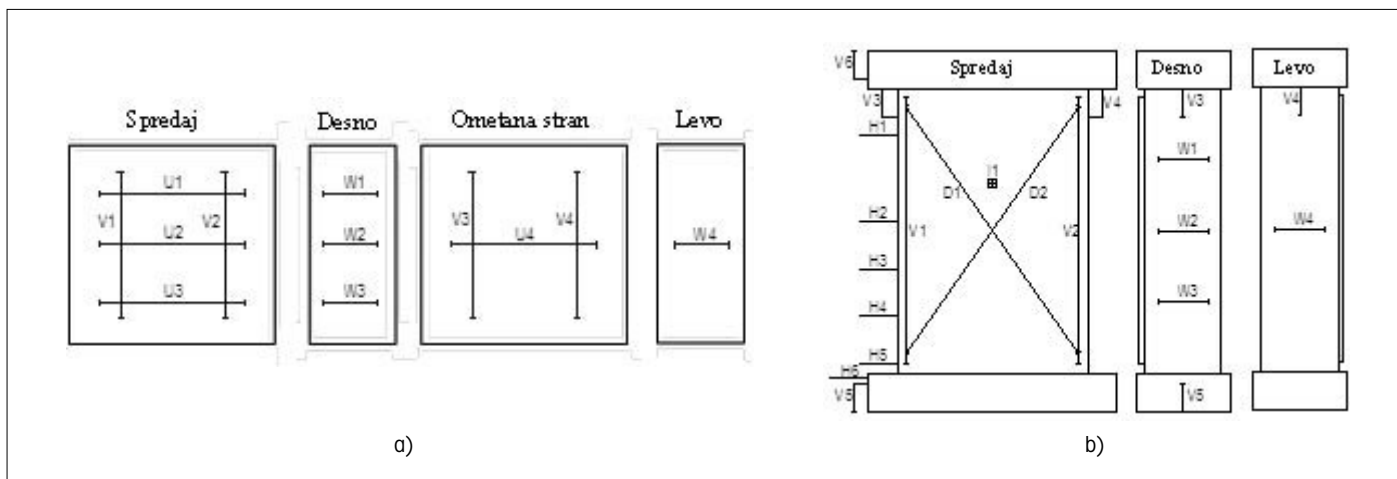
Najprej sta bila preizkušana zidka (slika 7 a), eden nepovezan in drugi povezan, ter nato

še zidova. Pri zidkih maksimalna nosilnost ni bila dosežena zaradi omejitve opreme (hidravlični bat kapacitete 2500 kN). Hitrost

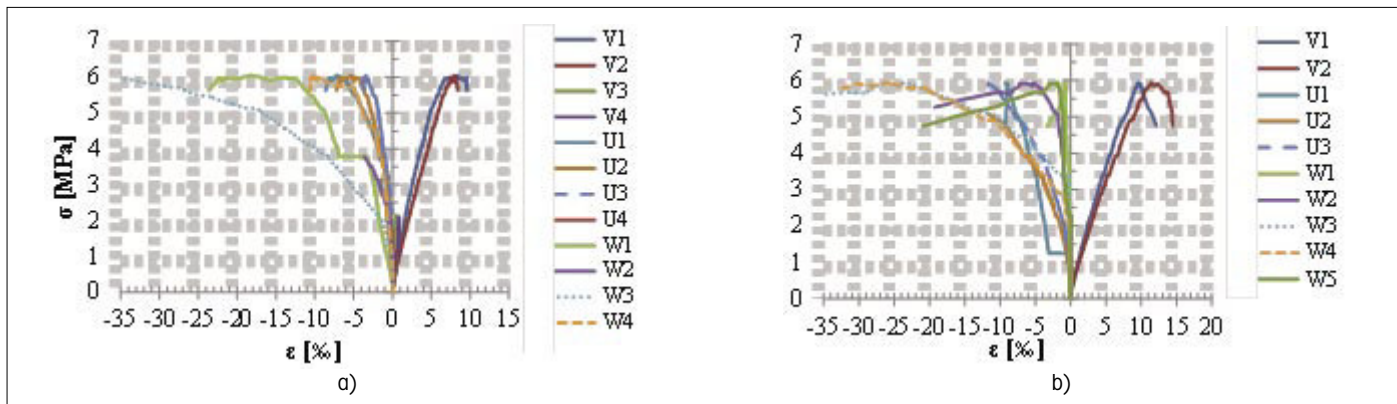
obremenjevanja je bila konstantna, in sicer med 0,25 kN/s in 1,0 kN/s za posamezne teste. Vertikalni in horizontalni pomiki zidkov in zidov so bili spremljani z induktivnimi merilci (slika 8 a).



Slika 7 • a) Postavitve tlačnega testa in b-č) poškodovanost povezanega zidu po testu



Slika 8 • Postavitve merilnih mest pri a) tlačnih preizkusih in b) strižnih preizkusih



Slika 9 • Diagram napetost-deformacija za različne induktivne merilce a) za test nepovezanega zidu in b) za test povezanega zidu

Z uporabljenim batom pri zidkih ni bilo porušitve, doseženi sta bili napetosti 7,34 MPa za nepovezani zidek in 7,28 MPa za povezani zidek. Z večjo višino preizkušancev, pri zidovih, pa je bila tlačna trdnost f_{Mc} dosežena, in sicer 6,10 MPa za povezani in 6,00 MPa za nepovezani zid. Na sliki 7 b–č so prikazane poškodbe po porušitvi povezanega zidu, na sliki 9 a, b pa diagrami napetost-deformacija induktivnih merilcev za nepovezani in povezani zid.

V nasprotju s pričakovanji ni bilo skoraj nobene razlike med mejnimi tlačnimi napetostmi povezanega in nepovezanega zidovja. Nasprotno, nepovezano je doseglo še malenkost večjo tlačno trdnost. Tudi pri horizontalnih prečnih deformacijah oziroma razpokah med sloji med obema tipoma zidu ni bilo druge večje razlike, kot da so povezovalni kamni približno do obremenitve $1/3 f_{Mc}$ omejevali horizontalne prečne deformacije. Vrednosti elastičnega modula E_M ,

izračunanega iz povprečnih vertikalnih deformacij in napetosti pri $1/3 f_{Mc}$ zidov oziroma maksimalnih napetosti zidkov, in strižnega modula G_M , ki je po teoriji elastičnosti za homogene izotropne linearno elastične materiale izračunan iz elastičnega modula in Poissonovega količnika ν_M , so višje pri povezanem zidovju, vendar pri zidovih ne zelo očitno; E_M za 29,9 % in G_M za 26,9 %. Razmerje strižnega in elastičnega modula je za rezultate vseh preiskav med 0,38 in 0,42.

Test		σ_{max} OZ. f_{Mc} (MPa)	povpr. σ_{max} (MPa)	E_M (MPa)	povpr. E_M (MPa)	ν_M	G_M (MPa)	povpr. G_M (MPa)	G_M/E_M
1	Nepovezani zidek	7,34*	7,31	1570	1052	0,187	661	438	0,42
2	Povezani zidek	7,28*		534		0,265	214		0,40
3	Nepovezani zid	6,10	6,05	1138	968	0,226	412	357	0,36
4	Povezani zid	6,00		798		0,319	302		0,38

* Vrednosti se nanašajo na napetosti pri močno poškodovanem zidu.

Preglednica 4 • Rezultati tlačnih testov zidov

3.1.1 Primerjava rezultatov z vrednostmi iz literature in z rezultati analitičnih modelov

Tlačne trdnosti f_{Mc} troslojnih zidov, dobljene s tlačnimi testi, 6,00 MPa in 6,10 MPa za povezani in nepovezani zid, se dobro ujemajo z

vrednostmi, podanimi v italijanskih predpisih MIT 2009, kjer sta za obravnavano vrsto zidovine podani minimalna in maksimalna mejna vrednost f_{Mc} 6 MPa in 8 MPa. Za analitični izračun tlačne trdnosti so bili uporabljeni EC6-model (EN 1996-1-1: 2005, 2005) ter mod-

eli za troslojno zidovino avtorjev Egermanna (Egermann, 1993), Binda s sodelavci (Binda, 2006b), Tassiosa in Chronopoulou (Tassios, 1986), (Tassios, 2004)) (za večslojno zidovino in za zidovino iz enega sloja). Rezultati so podani v preglednici 5.

f_{Mc} (MPa)								
Vrednosti iz literature				Analitični modeli				
MIT 2009 (2009) (Italija)	PIET 70 (1971) (Španija in Portugalska)	Slovenija (Bosiljkov, 2004)	Hrvaška (Aničić, 1989)	EC6	Egermann	Binda	Tassios	Tassios (enoslojni)
6,0 (min.)	4,0	1,2 (min.)	4,7 (min.)	19,9	3,44	4,73	2,66	6,51
8,0 (maks.)		1,6 (maks.)	5,5 (maks.)		4,49	6,23	1,42	6,75

Preglednica 5 • Referenčne vrednosti f_{Mc} iz literature in po različnih analitičnih modelih izračunane vrednosti f_{Mc}

Rezultati, dobljeni z različnimi modeli, se zelo razlikujejo. Model v EC6 za oceno f_{Mc} historičnih zidov, zgrajenih z malto manjših trdnosti, ni primeren. Za testirani tip zidov vsi modeli podcenjujejo f_{Mc} , kar je verjetno

posledica tega, da zaradi dobre povezanosti vseh slojev zidov ni bil dosežen najbolj tipičen mehanizem porušitve večslojnih zidov (zunajravninska porušitev). Tako je ocena f_{Mc} Tassiosa in Chronopoulou za enoslojne

zidove najbližja dejanskim vrednostim; za 7,6 % je sicer f_{Mc} precenjen za visoke zidove, vendar je ocena glede na rezultate zidkov na varni strani.

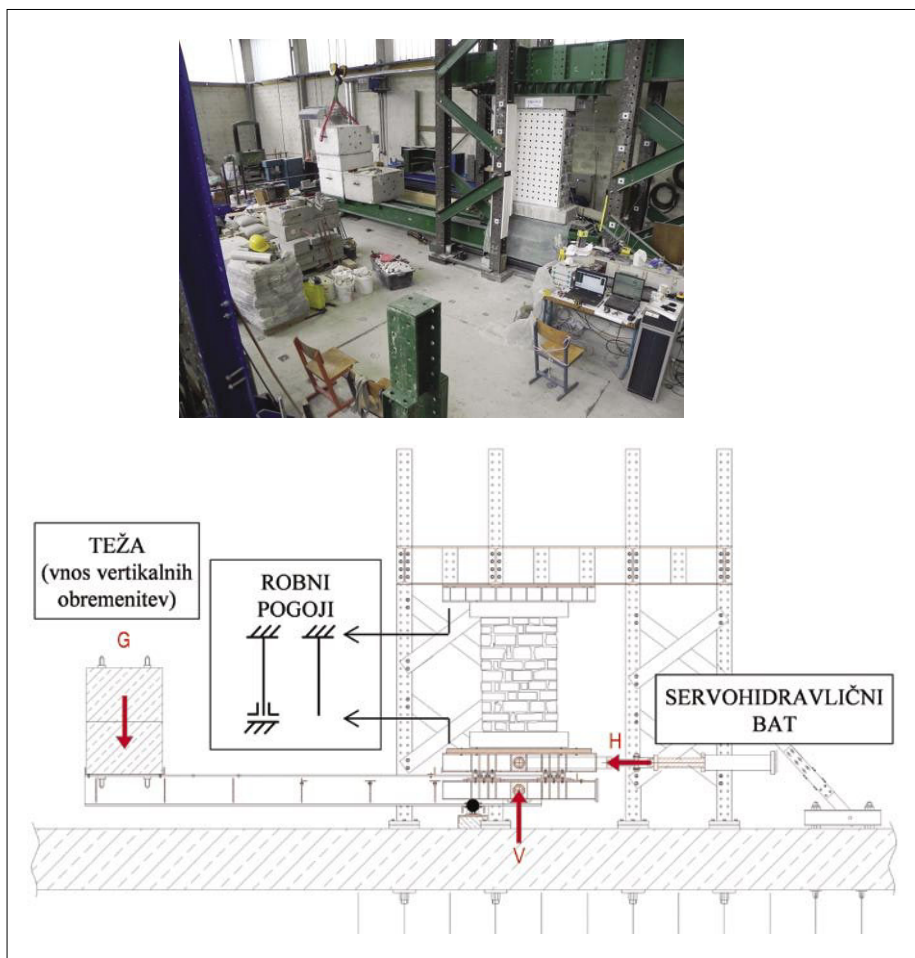
4 • STRIŽNI TESTI ZIDOV

4.1 Opis preiskav

Za analizo obnašanja zidov pri potresnih obtežbah je bilo ciklično strižno testiranih

14 zidov. Zidovi dveh različnih morfologij so bili preizkušani pri različnih nivojih tlačnih obremenitev ter z različnimi robnimi pogoji

vpetja. Zid, pripravljen za strižno preizkušanje, in skica postavitve preiskave sta predstavljena na sliki 10.



Slika 10 • Postavitev strižnega testa

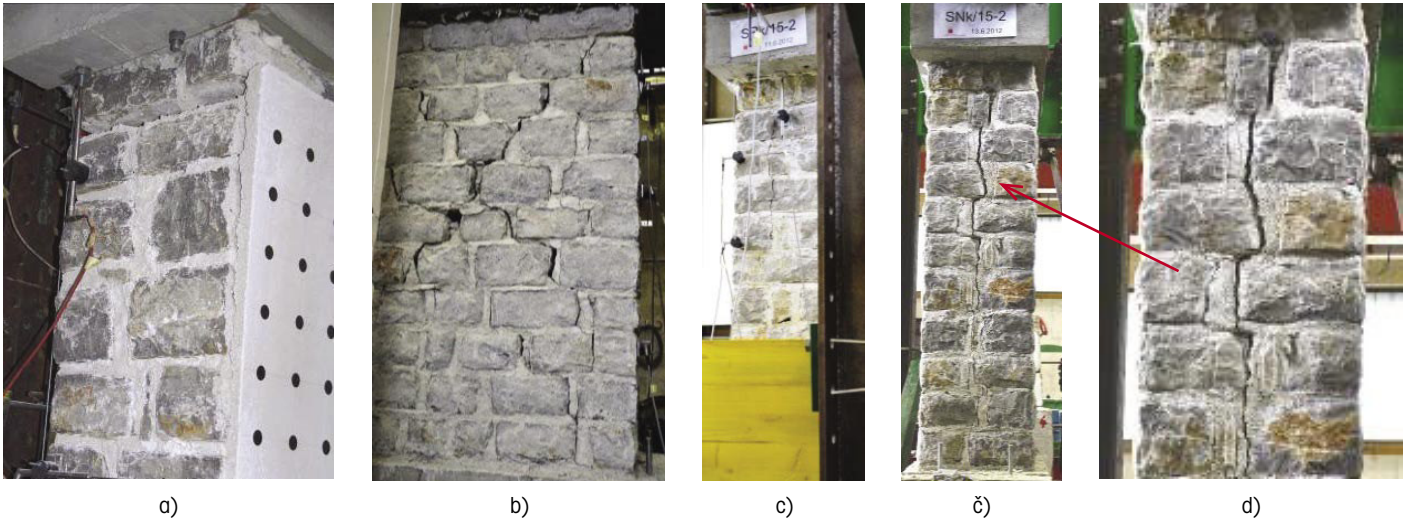
št. testa	Ime	Nivo tlačnih obremenitev (% f_{Mc})	Robni pogoji	Povezovalni kamni
1	SPk-5-1	5	konzola	DA
1, 2	SPk-5-1 (7,5)	7,5	konzola	DA
2	SNk-7,5-1	7,5	konzola	NE
3	SNv-7,5-1	7,5	vpeto	NE
4	SPv-7,5-1	7,5	vpeto	DA
5	SNv-7,5-2	7,5	vpeto	NE
6	SPv-7,5-2	7,5	vpeto	DA
7	SPv-15-1	15	vpeto	DA
8	SNv-15-1	15	vpeto	NE
9	SPv-15-2	15	vpeto	DA
10	SNv-15-2	15	vpeto	NE
11	SNk-15-1	15	konzola	NE
12	SPk-15-1	15	konzola	DA
13	SPk-15-2	15	konzola	DA
14	SNk-15-2	15	konzola	NE

Preglednica 6 • Kombinacije za strižno testiranje zidov

Vertikalna obtežba v obliki bremena je bila na preizkušane nanosena s spodnje strani preko ročice (betonske kocke na sliki 10). Postavitev je dimenzionirana na maksimalno 500 kN vertikalne obremenitve, servohidraulični bat pa je sposoben zidu vsiljevati pomike v obe smeri s kapaciteto 250 kN. Pomik je bil med testom voden z induktivnim merilcem na spodnjem robu zidu. Pomike se je vsiljevalo iz ravnovesne lege v obe smeri ciklično z naraščanjem amplitud po treh ciklih z enako amplitudo. En cikel predstavlja obremenitev do amplitudnega pomika najprej v eno smer (pozitivne histerezne zanke), vrnitev v ravnovesno lego ter nato obremenitev do amplitudnega pomika v drugo smer in nazaj (negativne histerezne zanke). Pomiki in deformacije zidu, stiki med betonskima temeljema in zidom ter betonskim temeljem in jeklenim profilom zgoraj so bili med testom merjeni z 19 induktivnimi merilci (slika 8 b). Elementi postavitve omogočajo več možnosti vpetja; tako je bil zid v nekaterih primerih vpet na zgornjem robu, medtem ko sta bila horizontalni pomik in rotacija na spodnjem robu sproščena (obrnjena konzola), v drugih primerih pa je bila dodatno preprečena še spodnja rotacija (ti robni pogoji so v nadaljevanju imenovani »vpeti«). V preglednici 6 so prikazane kombinacije morfologije, nivoja tlačnih obremenitev in robnih pogojev za posamezne strižne preizkuse. Preizkus 1,2 se nanaša na ponovno obremenjevanje prvega preizkušanca z drugačnim nivojem tlačnih obremenitev (7,5 % tlačne trdnosti zidu namesto predhodne 5%).

4.2 Tipične poškodbe, porušni mehanizmi in ločevanje slojev

Z izvedenimi kombinacijami robnih pogojev je prišlo do različnih mehanizmov obnašanja zidov (slika 11). Pri nizkih tlačnih obremenitvah in konzolnem vpetju (testi 1, 1'2 in 2) se je sprožil upogibni mehanizem, pri katerem se je »odpirala« spojnica med prvo in drugo vrsto kamnov (slika 11 a). Pri vpetih zidovih se je pri nižji tlačni obremenitvi (testi 3–6) že delno aktiviral strižni mehanizem (dobljeni odziv je v nadaljevanju imenovan »mešani«), pri višjih vertikalnih obremenitvah se je tako pri konzolnih kot tudi vpetih robnih pogojih aktiviral strižni porušni mehanizem (testi 7–14). Porušitev je večinoma potekala skozi maltne spojnice, razpokali pa so tudi kamni (slika 11 b). Pri večjih pomikih je bilo prisotno drobljenje malte in praznjenje spojníc v sredinskem delu zidov, ponekod tudi v zgornjih vogalih. Vertikalne razpoke skozi spojnice in



Slika 11 • a) Upogibni mehanizem z odpiranjem maltno spojnice med prvima vrstama kamnitih blokov pri testu 2 – SNk-7,5-1, b) diagonalne strižne poškodbe zidu po testu 13 – SPk-15-2 ter c) razpoka med slojema po istem testu, č, d) razpoka med slojema zidu po testu 14 – SNk-15-2

tudi čez kamne so tvorile (pri nekaterih testih bolj, pri drugih manj) izrazite vertikalne stebre na enem ali obeh robovih zidov.

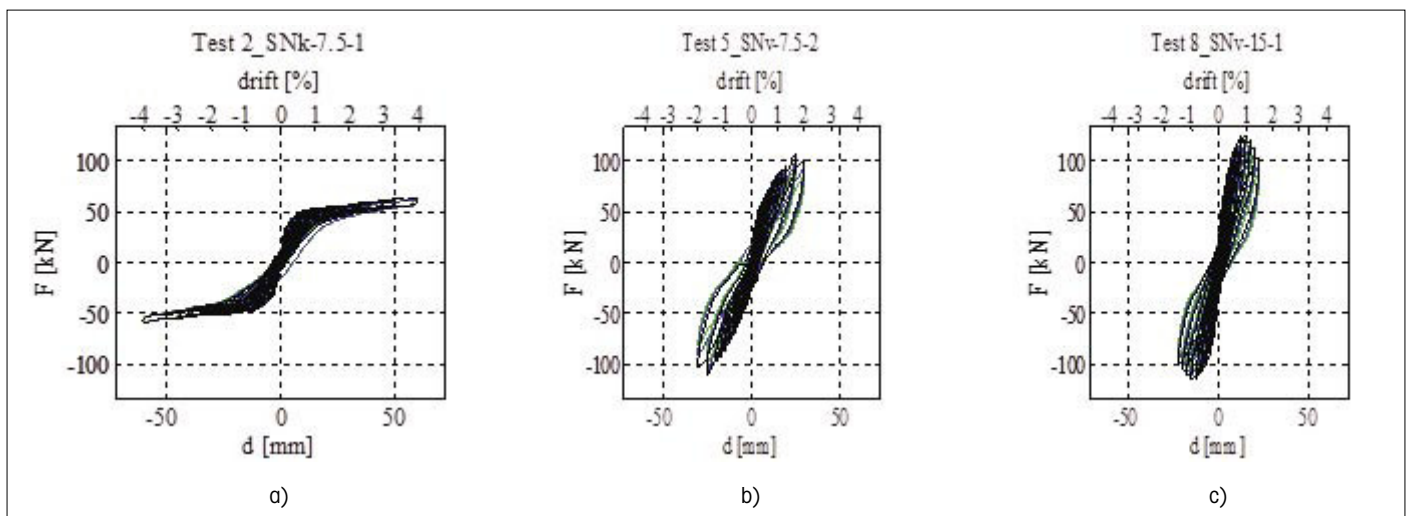
Pri testih 1, 1', 2, 4, 6 in 7 vertikalna razpoka med sloji ob strani zidov ni bila zaznana. Zunajravninski mehanizem se je opazno aktiviral le pri strižnem mehanizmu in je bil bolj izrazit pri konzolnem vpetju ne glede na prisotnost povezovalnih blokov. Večje razslojevanje se je zgodilo v fazi mehčanja zidov (po dosegu maksimalne strižne nosilnosti). Le v primeru vpetih robnih pogojev (testi 11–14) so povezovalni kamni pri povezanih zidovih v primerjavi z nepovezanimi zidovi zmanjšali ločevanje slojev zidov v fazi padanja sile po dosegu maksimalne nosilnosti (slika 11 c–d).

4.3 Histerezni odziv zidov

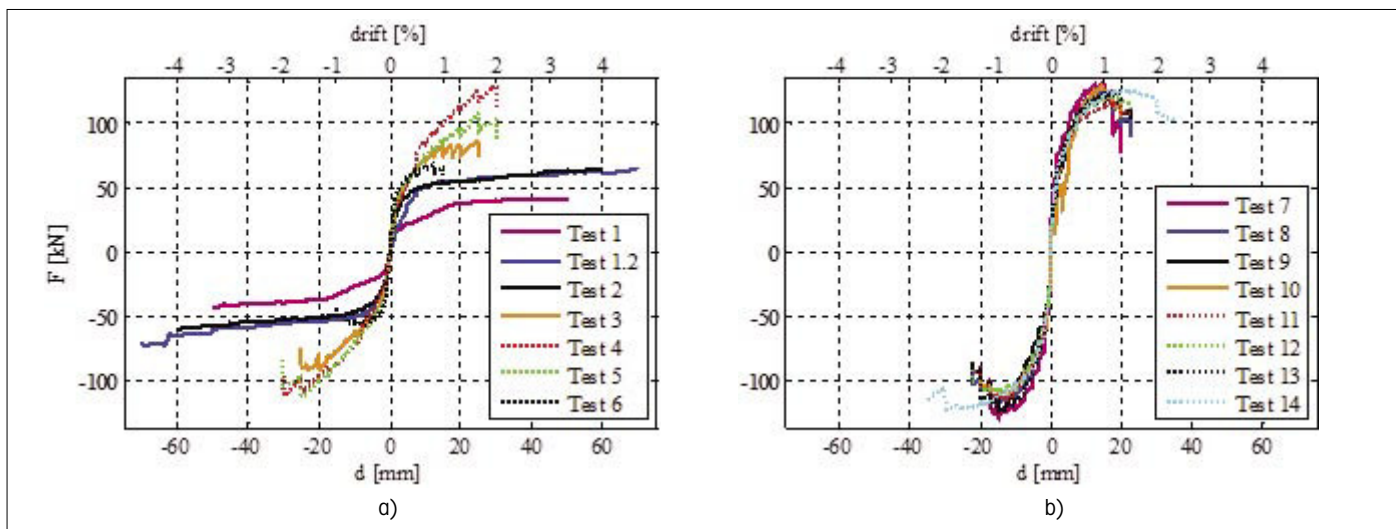
Najpomembnejše informacije o obnašanju zidov se dobijo iz analize histereznega diagrama odziva, to je iz diagrama prečne sile v odvisnosti od horizontalnih pomikov. Na sliki 12 so prikazani tipični histerezni diagrami (horizontalna sila – spodnji horizontalni pomik), ki so bili dobljeni za posamezni tip porušnega mehanizma, na sliki 13 pa so predstavljene histerezne ovojnice vseh testov. Poleg maksimalnih strižnih sil, ki jih zidovi prenesajo, in maksimalnih doseženih pomikov so bile iz rezultatov preiskav določene tudi druge značilnosti obnašanja. Med njimi so pomiki, pri katerih so dosežena določena karakteristična stanja, in sicer pomik, pri katerem nastanejo prve strižne razpoke d_{cr}

ter pripadajoča sila F_{cr} , maksimalna dosežena nosilnost F_{max} pripadajoči pomik d_{Fmax} , mejni pomiki pri porušitvi d_{max} in pripadajoča sila F_{dmax} . Njihove vrednosti (povprečja obeh smeri obremenjevanja) so za posamezne teste podane v preglednici 7.

Iz primerjave rezultatov je jasno viden vpliv nivoja tlačnih obremenitev kot tudi robnih pogojev vpetja. Glede na različne mehanizme obnašanja, ki so se razvili, so precej različni tudi strižne sile in horizontalni pomiki za posamezna karakteristična stanja. Pri upogibnem mehanizmu so bile sicer najnižje (v povprečju 57,5 kN), so bili pa maksimalni pomiki zelo veliki (v povprečju 59,8 mm), veliko večji kot pri drugih mehanizmih. Pri mešanem odzivu se je



Slika 12 • Karakteristični histerezni odziv (horizontalna sila–horizontalni pomik) za različne dobljene porušne mehanizme: a) upogibni, b) mešani in c) diagonalni strižni mehanizem



Slika 13 • Histerezne ovojnice odziva horizontalna sila–horizontalni pomik a) za teste 1–6 in b) za teste 7–14

povečala maksimalna nosilnost (105,7 kN), vendar pa so se močno zmanjšali maksimalni pomiki (28,2 mm). Pomiki so bili še vedno večji kot v primeru strižnega mehanizma

(23,0 mm), pri čemer pa je iz primerjave izvzet test št. 6, pri katerem je zid v primerjavi z drugimi zidovi zaradi debelejših horizontalnih spojnic izkazal opazno manjšo nosilnost in

mejne pomike. Dosežene maksimalne strižne nosilnosti so bile pri strižni porušitvi najvišje (120,8 kN).

Št. testa	Ime	Prva strižna razpoka		Maksimalna sila		Maksimalni pomik	
		d_{cr} (mm)	F_{cr} (kN)	d_{Fmax} (mm)	F_{max} (kN)	d_{max} (mm)	F_{dmax} (mm)
1	1-SPk-5-1	0,00	0,0	49,6	42,1	49,8	41,2
1,2	1,2-SPk-7,5-1	34,70	57,7	69,5	68,5	69,7	66,1
2	2-SNk-7,5-1	17,37	51,9	58,1	61,8	59,8	60,3
3	3-SNv-7,5-1	7,44	61,2	22,3	88,2	24,9	73,0
4	4-SPv-7,5-1	7,45	60,9	29,7	119,9	29,9	101,7
5	5-SNv-7,5-2	9,93	73,0	24,7	109,0	29,9	83,3
6	6-SPv-7,5-2	7,45	60,2	9,9	61,9	14,9	50,8
7	7-SPv-15-1	2,98	81,4	14,8	129,2	19,9	81,9
8	8-SNv-15-1	4,96	85,7	14,9	121,2	22,4	90,3
9	9-SPv-15-2	1,98	52,5	16,1	122,1	22,4	93,6
10	10-SNv-15-2	2,98	60,9	13,4	119,4	19,9	100,8
11	11-SNk-15-1	2,98	68,3	15,0	114,5	22,4	98,6
12	12-SPk-15-1	2,98	65,8	15,2	114,0	22,4	100,9
13	13-SPk-15-2	2,98	72,2	16,2	122,5	19,9	104,7
14	14-SNk-15-2	4,97	84,5	26,0	123,7	34,9	108,0

Preglednica 7 • Povprečne vrednosti horizontalnih pomikov in sil v karakterističnih točkah diagramov sila–pomik za obe smeri obremenjevanja

Presenetljivo se je izkazalo, da za preizkušani tip zidov (debelina srednjega sloja (jedra) do 25 % debeline celotnega zidu, kompaktno jedro) prisotnost povezovalnih kamnov ne prispeva konsistentno k večjim nosilnostim niti k izboljšanju maksimalnih pomikov zidov.

Primerjava povprečnih rezultatov testov z enako morfologijo je za posamezne kombinacije vertikalnih obremenitev in robnih pogojev prikazana v preglednici 8. Višja nosilnost v primeru povezovalnih kamnov je bila zaznana pri višjih tlačnih obremenitvah in vpetih robnih pogojih (za

4,4 % v primerjavi z nepovezanimi zidovi), pri nižji vertikalni obremenitvi in vpetih robnih pogojih je nosilnost povezanih zidov večja za 21,6 %. Edino v zadnje omenjenem primeru so bili v primeru povezanih zidov večji tudi maksimalni pomiki, drugače pa so bili enaki ali manjši.

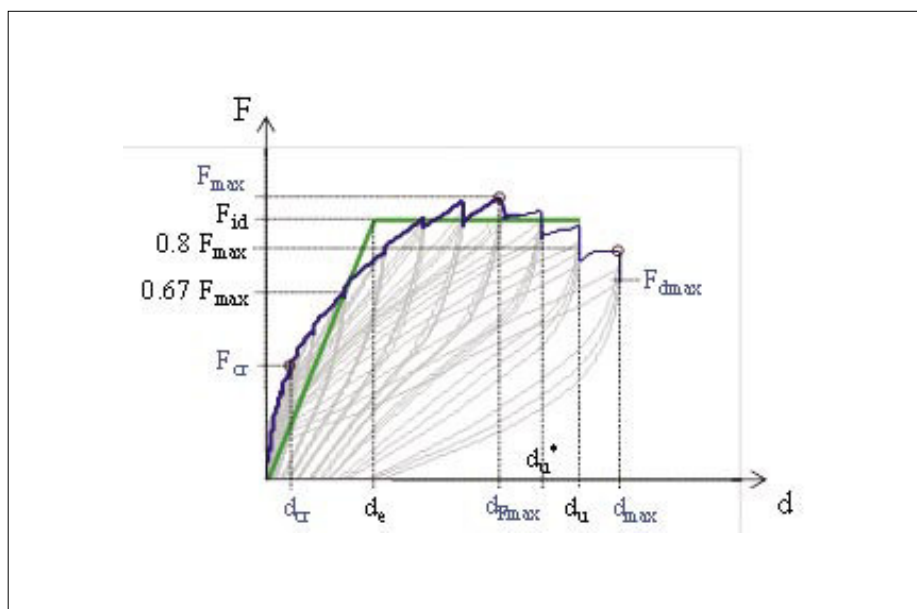
Mejno stanje	Prva strižna razpoka				Maksimalna sila				Maksimalen pomik			
	d_{cr} (mm)		F_{cr} (kN)		d_{Fmax} (mm)		F_{max} (kN)		d_{max} (mm)		F_{dmax} (kN)	
	Da	Ne	Da	Ne	Da	Ne	Da	Ne	Da	Ne	Da	Ne
7,5 % f_{Mc} , konzolno	34,7	17,4	57,7	51,9	69,5	58,1	68,5	61,8	69,7	59,8	66,1	60,3
7,5 % f_{Mc} , vpeti*	7,45	/	60,9	/	29,7	/	119,9	/	29,9	/	101,7	/
15 % f_{Mc} , vpeti	2,48	3,97	66,9	73,3	15,5	14,1	125,7	120,3	21,1	21,1	87,7	95,6
15 % f_{Mc} , konzolno	2,98	3,97	69,0	76,4	15,7	20,5	118,2	119,1	21,1	28,6	102,8	103,3

* Pri rezultatih ni upoštevan test št. 6.

Preglednica 8 • Povprečne vrednosti karakterističnih točk diagramov sila–pomik za teste z enako morfologijo, nivojem tlačnih obremenitev in robnimi pogoji

4.4 Idealizacija histereznih ovojnic in analiza rezultatov

Za primerjavo z vrednostmi v predpisih in z rezultati testov drugih raziskovalcev so bile histerezne ovojnice idealizirane. Narejena je bila bilinearna idealizacija, ki temelji na enaki količini vnesene energije (površina pod krivuljo) dejanske histerezne ovojnice in idealizacije. Pri idealizaciji rezultatov testov je bil mejni pomik d_u predpostavljen kot pomik, pri katerem sila pade na 80 % F_{max} , oziroma kot pomik d_{max} , če prejšnji kriterij ni bil dosežen, ter efektivna togost K_{ef} enaka togosti v točki, kjer je sila enaka $2/3 F_{max}$. Glede na prejšnje kriterije se je potem določilo idealizirano silo F_{id} in pomik na meji elastičnosti d_e . Primer bilinearne idealizacije je prikazan na sliki 14, povprečne vrednosti značilnih parametrov bilinearne krivulje za teste z enakim nivojem vertikalnih obremenitev in robnimi pogojev so podane v preglednici 9.



Slika 14 • Bilinearna idealizacija histerezne ovojnice po kriteriju $2/3 F_{max}$

Nivo vertikalne obremenitve, robni pogoji	F_{id} (kN)	k.v. (%)	d_e (mm)	k.v. (%)	K_{ef} (kN/mm)	k.v. (%)	d_u (mm)	k.v. (%)	μ	k.v. (%)
7,5 % f_{Mc} , konzolno	57,8	3,0	8,4	14,6	7,0	11,8	64,8	7,7	7,80	7,1
7,5 % f_{Mc} , vpeti*	100,2	11,5	13,2	15,8	7,8	7,9	28,2	8,3	2,23	11,6
15 % f_{Mc} , vpeti	113,7	2,0	5,9	21,4	21,2	22,1	21,0	5,3	3,92	18,2
15 % f_{Mc} , konzolno	112,6	4,0	5,6	9,7	20,4	7,1	24,9	23,5	4,46	14,8

* pri rezultatih ni upoštevan test št. 6

Preglednica 9 • Povprečne vrednosti karakterističnih točk bilinearne idealiziranih diagramov sila–pomik s k.v. za enak nivo tlačnih obremenitev in robne pogoje

Iz F_{id} je bila po en. 6 izračunana natezna trdnost zidov f_{Mtr} , ki izhaja iz Turnškovega in Čačovičevega modela za diagonalno porušitev zidov (Turnšek, 1971) in je določena kot kritična vrednost glavnih napetosti v sredini zidov, pri katerih nastanejo diagonalne porušitve. V enačbi τ predstavlja

povprečno strižno napetost na prerezu. Iz K_{ef} in E_M dobljenega iz tlačnih testov, se po en. 7 izračuna strižni modul zidov G_M , pri čemer je ψ koeficient, ki upošteva robne pogoje, in sicer 4,0 za konzolne in 1,0 za vpete robne pogoje. Povprečni rezultati f_{Mtr} in G_M za teste z enakimi pogoji so predstavljeni v preglednici 10.

$$f_{Mtr} = -0.5 \cdot \sigma_0 + \sqrt{(0.5 \cdot \sigma_0)^2 + (b \cdot \tau)^2}, \quad (6)$$

$$G_M = \frac{K_{ef}}{\frac{l_w \cdot h_w}{1.2 \cdot h_w} - \frac{\psi \cdot K_{ef}}{1.2 \cdot E_M} \left(\frac{h_w}{l_w} \right)^2}, \quad (7)$$

Nivo vert. obremenitve, robni pogoji	f_{M} (MPa)	k.v.	G_M (MPa)	k.v.	$K_{1,5\text{ mm}}$ (kN/mm)	k.v.	** $G_{1,5\text{ mm}}$ (MPa)	k.v.	*** $G_{1,5\text{ mm}}$ (MPa)	k.v.
7,5 % f_{Mc} , konzolno	0,087	5,1	47,2	17,7	16,1	/	277	/	122	/
7,5 % f_{Mc} , vpeti*	0,214	17,2	38,8	8,9	20,2	5,8	118	7,5	76	20,7
15 % f_{Mc} , vpeti	0,165	3,4	129,9	29,3	26,8	31,3	240	26,9	122	26,0
15 % f_{Mc} , konzolno	0,162	7,0	2094	64,6	33,4	4,0	-287	-8,1	125	19,1

* Pri rezultatih ni upoštevan test št. 6.

** Izračunan po en. 7 (z upoštevanjem efektivne togosti K_{ef} in E_M modula).

*** Izračunan po en. 8 (razmerje strižne napetosti τ in strižne deformacije γ).

Preglednica 10 • Natezne trdnosti f_M in strižni moduli G_M , izračunani po različnih metodah, za teste z enakimi nivoji tlačnih obremenitev in robnimi pogoji

Najvišje f_M so bile izračunane za nižji nivo tlačnih obremenitev in vpete robne pogoje, torej za teste, kjer je bil dobljen mešani mehanizem porušitve. Za 30,7 % presežejo vrednosti f_M , dosežene v primeru strižnega mehanizma, ki so sicer zelo blizu za oboje robne pogoje; 0,165 MPa in 0,162 MPa za vpete in konzolne.

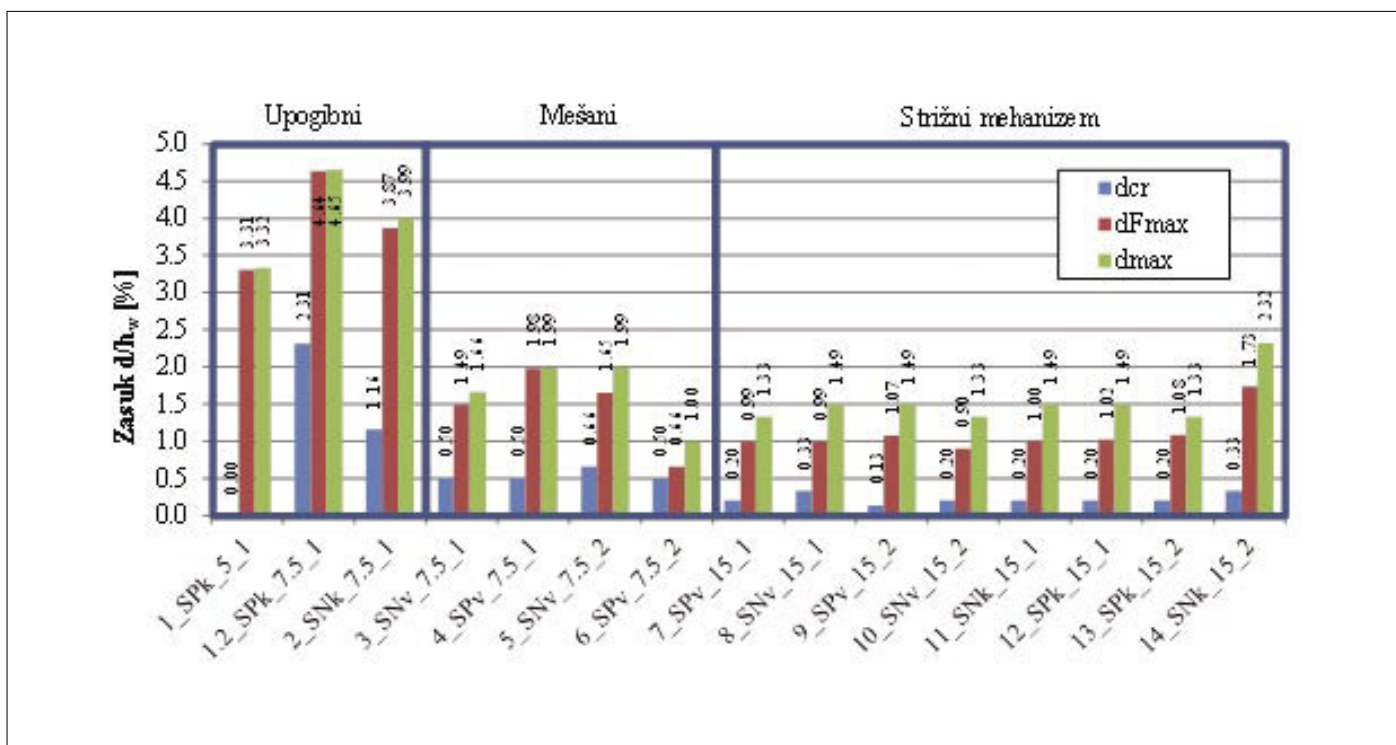
Vrednosti G_M , izračunane iz K_{ef} in E_M po en. 7, so v nekaterih primerih bile nerealne, česar razlog so nizke vrednosti E_M . To je bilo zaradi izrazito anizotropnega obnašanja zgodovinske zidovine že pri začetnih nivojih obremenjevanja potrjeno (Bosiljkov, 2005). Strižni moduli so bili zato izračunani tudi iz začetnih togosti K , dobljenih pri začetnih

pomikih testov (za $d = 1,5$ mm) po en. 8, pri čemer je F strižna sila v točki vrednotenja togosti določenega pomika, γ pa strižna deformacija. V tem primeru so bile dobljene vrednosti modulov stabilnejše (v preglednici 10 podani kot *** $G_{1,5\text{ mm}}$), a še vedno veliko manjše kot tiste iz rezultatov tlačnih testov.

$$G_M = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{F \cdot h_w}{A_w \cdot d} \quad (8)$$

Za opravljene teste so na sliki 15 prikazani zasuki v karakterističnih stanjih odziva, in sicer zasuk pri prvi strižni razpoki (pri d_{cr}), zasuk pri doseženi maksimalni sili (pri d_{Fmax}) in maksimalni zasuk (pri d_{max}).

Kot vidimo, so mejni zasuki, ki so bili dobljeni pri testih, znatno višji od tistih, dovoljenih v predpisih. V primeru upogibnega mehanizma sta vrednosti zasukov za mejno stanje NC po EC8-3 oziroma CP po priporočilih FEMA 306 1,60 % in 0,60 %; doseženi zasuki so torej za 149 % večji od tistih v EC8-3 in za 564 % od tistih v FEMA 306. Tudi dosežene povprečne vrednosti zasukov pri d_e so v primerjavi z vrednostmi 0,1 % v FEMA 306 za 630 % višje. Vrednosti za strižni mehanizem so podane v EC8-3 in znašajo 0,53 % za mejno stanje NC. Ne glede na to, ali so primerjani zasuki pri d_u ali d_u^* (le do tam, kjer dejanska sila ne pade pod F_{rd} , glej sliko 14), so vrednosti zasukov iz testov višje; za 188 % pri d_u in za 133 % pri d_u^* .



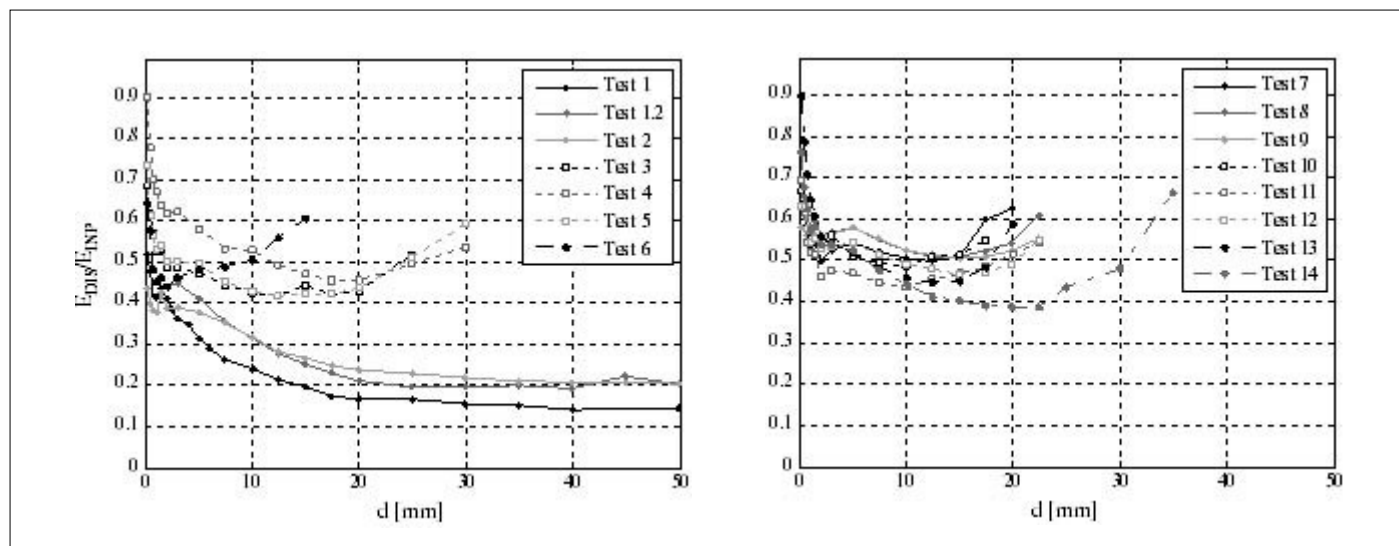
Slika 15 • Povprečni zasuki d/h_w , obeh smeri obremenjevanja za zidove v karakterističnih točkah odziva

4.5 Disipacija energije in ekvivalentno viskozno dušenje

Eden od pokazateljev različnega obnašanja zidovine pri potresnih obremenitvah je tudi disipacija energije. Disipirana energija pri

določenem ciklu obremenjevanju $E_{DIS,i}$ se določi iz histereznega diagrama sila–pomik, saj predstavlja površino znotraj posamezne histerezne zanke. Smiselno jo je primerjati z vneseno energijo $E_{INP,i}$ in sicer delom bata,

potrebni za deformiranje zidu do določenega pomika. Za posamezni cikel se $E_{INP,i}$ izračuna iz diagrama prečna sila–pomik kot površina pod delom krivulje, kjer absolutna vrednost pomika narašča.



Slika 16 • Razmerje disipirane in vnesene energije za prve cikle amplitudnih pomikov za teste 1–6 in 7–14

Primerjava razmerja med disipirano in vneseno energijo E_{DIS}/E_{INP} (slika 16, preglednica 11) je jasno pokazala razlike odziva glede na pogoje testiranja in dobljene mehanizme obnašanja. Relativna disipirana energija (glede na vneseno) je v primeru

strižnega mehanizma veliko večja kot v primeru upogibnega mehanizma. Le pri začetnih ciklih, kjer je bila disipacija energije zaradi začetnih poškodb najvišja (celo višja kot potem pri nastanku večjih poškodb po dosegu maksimalne sile), so bile vrednosti

primerljive. Po začetnih poškodbah je vrednost razmerja E_{DIS}/E_{INP} upadla, nato pa se začela zopet povečevati pri dosegu F_{max} in večji poškodovanosti zidov. Te rasti seveda ni bilo zaznati pri upogibnem mehanizmu.

Nivo vert. obremenitve, robni pogoji	d_{cr}		d_e		d_{Fmax}		d_{max}			
	E_{DIS}/E_{INP} povpr.	k.v. (%)	E_{DIS}/E_{INP} povpr.	k.v. (%)	E_{DIS}/E_{INP} povpr.	k.v. (%)	E_{DIS}/E_{INP} povpr.	k.v. (%)	$cum E_{DIS} / cum E_{INP}$ povpr.	k.v. (%)
7,5 % f_{Mc} , konzolno	0,226	11,1	0,336	5,6	0,187	2,2	0,187	2,2	0,214	4,4
7,5 % f_{Mc} , vpeti	0,476	9,7	0,451	4,6	0,521	1,9	0,566	5,6	0,497	6,0
15 % f_{Mc} , vpeti	0,549	3,9	0,549	6,3	0,509	0,5	0,585	5,7	0,534	2,3
15 % f_{Mc} , konzolno	0,519	4,9	0,514	5,1	0,482	15,1	0,587	8,2	0,490	2,5

Preglednica 11 • Povprečne vrednosti razmerij disipirane in vnesene energije za 1. cikle karakterističnih pomikov s k.v. za teste z enako tlačno obremenitvijo in robnimi pogoji

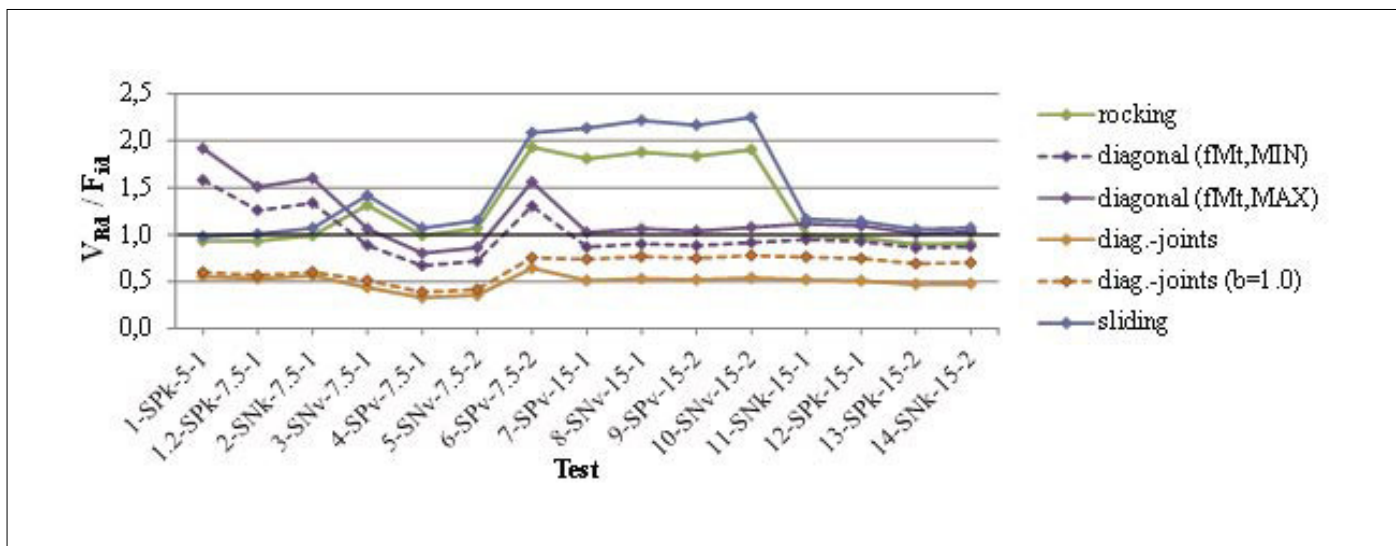
4.6 Padanje nosilnosti

Analize so pokazale, da so, čeprav strižni mehanizem v splošnem velja za krhkega, zidovi pri strižnem mehanizmu izkazali postopno zmanjšanje nosilnosti z nadaljnjim povečanjem pomikov po dosegu maksimalne sile. V povprečju je znašal d_{Fmax} za strižni mehanizem 72 % d_{max} pri čemer so bile vrednosti sile F_{dmax} v povprečju 80,8 % F_{max} .

4.7 Primerjava nosilnosti z rezultati analitičnih modelov

Narejena je bila primerjava nosilnosti idealizirane histerezne ovojnice z rezultati najbolj razširjenih modelov za oceno strižne nosilnosti. V_{rd} so bile izračunane tako z upoštevanjem celotnega prereza zidov A_w kot tudi z upoštevanjem neto prereza $A_{w,pr}$ to je samo zunanjih slojev zidu. Povprečne

vrednosti razmerja analitično izračunanih in iz testov dobljenih nosilnosti za različne modele za posamezne teste prikazane na sliki 16, povprečne vrednosti razmerij za teste z enakimi pogoji testiranja pa so podane v preglednici 12.



Slika 17 • Razmerja analitično izračunanih mejnih horizontalnih sil za različne porušne mehanizme z iz testa idealizirano maksimalno strižno silo za posamezni test

Nivo vert. obremenitve, robni pogoji	$V_{Rd,r} / F_{id}$		$V_{Rd,d}^{**} / F_{id}$		$V_{Rd,dj} / F_{id}$		$V_{Rd,du} / F_{id}$		$V_{Rd,s} / F_{id}$	
	(A_w)	($A_{w,n}$)	(A_w)	($A_{w,n}$)	(A_w)	($A_{w,n}$)	(A_w)	($A_{w,n}$)	(A_w)	($A_{w,n}$)
7,5 % f_{Mcr} konzolno	0,96	0,94	1,56	1,30	0,58	0,68	115,3	85,7	1,04	1,04
7,5 % f_{Mcr} vpeti*	1,33	1,29	1,07	0,90	0,52	0,56	78,2	58,5	1,43	1,43
Samo test št. 6	1,93	1,88	1,56	1,30	0,75	0,82	114,0	85,2	2,09	2,09
15 % f_{Mcr} konzolno	1,86	1,74	1,05	0,89	0,76	0,71	57,1	43,5	2,19	2,19
15 % f_{Mcr} vpeti	0,94	0,88	1,06	0,90	0,73	0,66	58,1	44,3	1,11	1,11

* Pri rezultatih ni upoštevan test št. 6.

** Pri izračunu upoštevana maksimalna mejna vrednost f_{Mt} po NTC08.

Preglednica 12 • Povprečne vrednosti razmerij analitično izračunanih mejnih horizontalnih sil z upoštevanjem neto in celotnega prereza za različne porušne mehanizme z maksimalnimi silami, dobljenimi po testih (idealiziranimi)

Primerjave z modelom za izračun upogibne nosilnosti $V_{Rd,r}$ z modelom za strižno diagonalno porušitev zidu $V_{Rd,d}$ (Turnšek, 1971) – za diagonalno porušitev zidu po spojnicah $V_{Rd,dj}$ ter po kamnu oziroma zidaku $V_{Rd,du}$ (Mann, 1982) ter z zdrsnim modelom za mejno nosilnost $V_{Rd,s}$ (Mohr-Coulombov kriterij) – so potrdile zadovoljivo oceno nosilnosti tako v primeru upogibnega mehanizma z uporabo modela za upogib ($V_{Rd} = 0,96 F_{id}$) kot tudi strižnega s Turnšek-Čačovičevim

modelom ($V_{Rd} = 0,89 F_{id}$ oziroma $1,05 F_{id}$), če so uporabljene vrednosti f_{Mt} primerne (za izračun je bil f_{Mt} predpostavljen kot mejni vrednosti po MIT 2009, in sicer 0,135 MPa in 0,18 MPa; rezultati modela za obe vrednosti so na sliki 16 označeni z »diagonal (fMt,MIN)« in »diagonal (fMt,MAX)«. Za zidove, kjer so sloji dobro povezani in je debelina jedra manjša oz. enaka 25 % celotne debeline zidov, se zid lahko obravnava kot monoliten in se za oceno nosilnosti uporabi celoten prerez.

Problematično pa je, da poda najbolj kritične rezultate za vse primere model za diagonalno porušitev po spojnicah ($V_{Rd,dj}$), ki očitno v primerih šibke, a duktilne malte ter ne pretirano debelih spojnic preveč konservativno oceni nosilnost. Se je pa kriterij izkazal bolje v primeru testa 6, ki je imel v nasprotju z drugimi debelejšje horizontalne spojnice, kar je povzročilo tako manjšo nosilnost kot tudi mejne pomike.

5 • OBNAŠANJE OMETOV NA ZIDOVH

Pri tlačnih in strižnih preizkusih je bil ves čas med testi natančno spremljan odziv ometov. Beležili so se pomiki, pri katerih je prišlo do

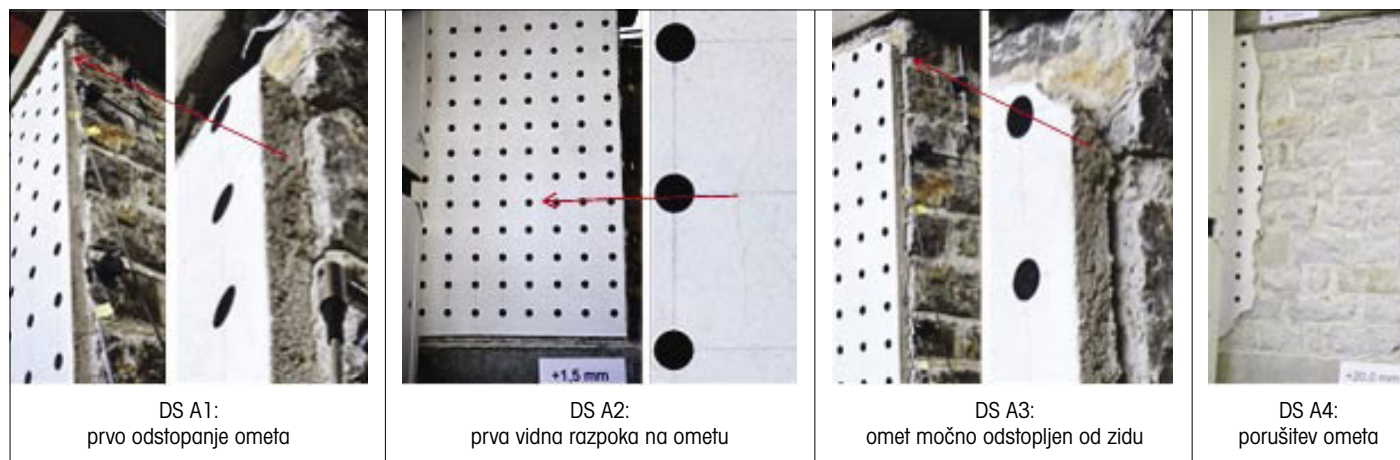
prvega odstopanja ometa od zidu (DS A1), pomiki, pri katerih so nastale posamezne razpoke na ometu (DS A2), ter njihova

pozicija, debelina razpok, pomiki, pri katerih je bil omet po celotni višini ločen od zidu (DS A3), ter pomiki, kjer se je porušil omet (DS A4). Mejna stanja ometa so prikazana na sliki 18. Pri strižnih testih je bila za pomoč pri beleženju pomikov in njihovo nadaljnjo analizo uporabljena fotogrametrija. Na omete

so bili narisani krogi v rastru 10 cm x 10 cm, ki so služili za detajlne točke in katerih pomike smo dobili kot rezultat. Za preračun pa so bile postavljene tudi točke v prostoru, katerih pozicije so bile točno izmerjene s

teodolitom. Fotogrametrične meritve so se izvajale v pozitivnih in negativnih amplitudah tretjih ciklov posameznih amplitud, pri katerih je bilo obremenjevanje ustavljeno. Vrednosti povprečnih rotacij zidov, pri katerih so nastale

zgoraj omenjene karakteristične poškodbe, ki so oštevilčene v skladu s PERPETUATE-metodologijo (Lagomarsino, 2015) od DS A1–DS A4, so za posamezne porušne mehanizme navedene v preglednici 13.



Slika 18 • Karakteristične poškodbe ometa na zidu

Prevladujoči porušni mehanizem	Zasuki (%)							
	DS A1	st. dev.	DS A2	st. dev.	DS A3	st. dev.	DS A4	st. dev.
Upogibni	0,37	0,03	1,67	0,67	3,83	0,17	/	/
Mešani	0,15	0,03	0,38	0,22	0,95	0,21	1,13	0,18
Strižni	0,07	0,02	0,08	0,02	0,42	0,19	0,79	0,11

Preglednica 13 • Povprečne vrednosti zasukov zidov v karakterističnih stanjih poškodb ometa za zidove z enakim porušnim mehanizmom zidov

V primeru upogibnega mehanizma se omet ni porušil, temveč je bil ob straneh ločen od zidov, pri čemer je bilo odstopanje ponekod pri večjih obremenitvah večje od 1 cm (slika 11 a). Razpoke na ometu so se pojavile pri večjih pomikih zidov (povprečna rotacija 1,67 %). Pri mešanem in strižnem mehanizmu je prišlo do

porušitve ometa, in sicer pri mešanem kasneje (v povprečju zasuki 1,13 %) kot pri strižnem (0,79 %). Enako velja tudi za stanje pojava prvih razpok in odstopanja ometa po celi višini zidov. Upogibni mehanizem je torej deloval ugodno glede na velikosti rotacij, je pa bila potem porušitev zgodnejša glede na pojav razpok;

razmerje pomikov pri DS A2 in DS A4 je bilo za strižni mehanizem 0,10, za mešani pa 0,32. Ker je obnašanje ometa vezano na obnašanje zidov, so v preglednici 14 podana razmerja zasukov zidov mejnih stanj ometa in mejnih stanj zidov (tako histerezne ovojnice kot idealizirane bilinearne krivulje).

Prevladujoči porušni mehanizem	$d_{DS,A2}/d_{cr}$	$d_{DS,A2}/d_e$	$d_{DS,A2}/d_{DS,A4}$	$d_{DS,A4}/d_{DS,A3}$	$d_{DS,A3}/d_e$	$d_{DS,A4}/d_e$	$d_{DS,A4}/d_u$
Upogibni	0,94	2,86	/	/	7,03	/	/
Mešani	0,67	0,58	0,32	1,19	1,94 (1,19)*	2,37 (1,46)*	0,70 (0,65)*
Strižni	0,37	0,20	0,10	2,00	1,04	2,12	0,52

* Pri rezultatih ni upoštevan test št. 6.

Preglednica 14 • Povprečne vrednosti pomikov zidov za različna mejna stanja ometa in karakterističnih pomikov zidov za teste z enakim porušnim mehanizmom

Za uporabo dobljenih rezultatov v PBA-potresni analizi objekta glede na poškodovanost historičnih ometov (s poslikavami) so v preglednici 15 za mejna stanja ometov

prporočene vrednosti za strižni in upogibni mehanizem. Temeljijo na rezultatih testov (95 % interval zaupanja z minimalnim odstopanjem zaradi zaokroževanja), podane

pa so relativno na elastični pomik idealizirane krivulje odziva zidov $d_{e,r}$, ki ga lahko pri analizi analitično določimo.

Porušni mehanizem	Mejno stanje obnašanja		
	"DL" (DS A1)	"SD" (DS A2 oz DS A3)	"NC" (DS A4)
Upogibni	1,3 d_e	4 d_e	/
Strižni	0,1 d_e	0,3 d_e	1,3 d_e

Preglednica 15 • Predlog ocene pomikov zidov za določitev mejnih stanj ometov glede na predvideni upogibni ali strižni mehanizem obnašanja zidov

6 • SKLEP

Za študijo potresnega obnašanja troslojnih kamnitih zidov so bile opravljene obsežne eksperimentalne preiskave zidov in njihovih konstituentov. Za kamnite zidove iz polobdelanih kamnitih zidakov iz apnenca, pravilno zlaganih, s povezovalnimi kamni preko prereza ali brez njih, so bile določene mehanske karakteristike ter mejna stanja pomikov za različna karakteristična stanja poškodovanosti pri strižnih obremenitvah v ravnini.

Pri tlačnih testih so bile dobljene tlačne trdnosti f_{Mc} 6,00 MPa in 6,10 MPa za povezani in nepovezani zid. Ti vrednosti se dobro ujemata z vrednostmi, podanimi v italijanskih predpisih MIT 2009, kjer sta za obravnavano vrsto zidovine podani minimalna in maksimalna mejna vrednost f_{Mc} 6 MPa in 8 MPa. Analitični izračuni za določitev f_{Mc} z različnimi modeli se zelo razlikujejo. Model v EC6 za oceno f_{Mc} historičnih zidov, zgrajenih z malto manjših trdnosti, ni primeren. Za testirani tip zidov vsi analitični modeli različnih avtorjev za večslojno zidovino podcenjujejo f_{Mc} , kar je verjetno posledica tega, da zaradi dobre povezanosti vseh slojev zidov ni bil dosežen tipičen mehanizem večslojnih zidov slabše kvalitete (razslojitev v zgodnjih fazah obremenjevanja). Dobljeni vrednosti E_M in G_M sta manjši od pričakovanih in navedenih v literaturi; MIT 2009 navaja mejni vrednosti 2400 MPa in 3200 MPa za E_M ter 780 MPa in 940 MPa za G_M , medtem ko sta bili pri testih doseženi povprečni vrednosti E_M in G_M za oba tipa zidov (povezane in nepovezane) 968 MPa in 357 MPa.

Pri strižnih testih so bili v odvisnosti od različnih nivojev tlačnih obremenitev in robnih pogojev vpetja dobljeni različni porušni mehanizmi (upogibni, mešani in diagonalni strižni), pri čemer ločevanje slojev ni bilo tako izrazito, kot je bilo pričakovano, saj je

bilo pri strižnem mehanizmu problematično le po preseženi maksimalni nosilnosti F_{max} . Povezovalni kamni niso prispevali k izboljšanju obnašanja zidov, razen da so pri določenih pogojih testiranja nekoliko omejili razslojevanje zidu po dosegu maksimalne sile. Najnižja nosilnost in največji pomiki so bili dobljeni za upogibni porušni mehanizem (povprečni vrednosti rezultatov obeh tipov zidov 57,5 kN in 59,8 mm). Mešani odziv, do katerega je prišlo pri spremembi konzolnih robnih pogojev v vpete pri nižji vertikalni obremenitvi, je povečal nosilnost, a zmanjšal mejne pomike (105,7 kN in 28,2 mm). Največje nosilnosti so bile dosežene pri strižnem porušnem mehanizmu (120,8 kN pri višjem nivoju vertikalnih obremenitev ne glede na robne pogoje), so se pa maksimalni pomiki dodatno zmanjšali (v povprečju 23,0 mm).

Velja poudariti, da tudi pri strižnem porušnem mehanizmu porušitev ni bila krhka. Po dosegu maksimalnih nosilnosti so zidovi izkazali dodatne pomike, saj so bile vrednosti doseženih maksimalnih pomikov v povprečju za 40 % višje od pomikov, kjer je bila dosežena maksimalna sila ($d_{max} = 1,40 d_{Fmax}$). Na drugi strani je bila porušitev bolj zgodnja pri mešanem odzivu zidov ($d_{max} = 1,10 d_{Fmax}$). Pri strižnih porušitvah je prišlo do padcev sile po dosegu F_{max} v povprečju za 18,8 %, vendar pa so se ti močno razlikovali od robnih pogojev (v povprečju 35,2 % za vpete in 13,2 % za konzolne). Pri upogibnih mehanizmih padca sil ni bilo ali pa je bil zelo majhen.

Kar se tiče doseženih maksimalnih pomikov oziroma zasukov, so povprečne vrednosti tako za strižni (zasuki 1,53 %) kot tudi za upogibni mehanizem (zasuki 3,99 %) precej večje od tistih, predpisanih v standardih. Po EC8-3 za mejno stanje NC (blizu porušitve) v primeru upogibnega mehanizma znašajo

1,07 % h_o/l_w (4/3 vrednosti za mejno stanje SD 0,80 % h_o/l_w ; za testirane zidove 1,60 % za konzolno vpete ter 0,80 % za vpete), medtem ko po FEMA standardu 0,4 % h_o/l_w (0,60 % za konzolno vpete in 0,30 % za vpete), za strižni mehanizem pa so vrednosti po EC8-3 0,53 % (za stanje SD 0,40 %). Tudi pomiki za mejno stanje DL (omejitev poškodb) in SD (večja poškodovanost) v standardih so precej manjši od dobljenih, pa naj bodo prvi primerjani s pomiki na meji elastičnosti d_e ali s pomiki, kjer nastanejo prve strižne razpoke d_{cr} . Dobljeni rezultati kažejo na to, da so morda vrednosti zasukov v standardih za historično zidovino, katere glavna karakteristika v primerjavi s sodobno zidovino je duktilna malta, prenizke. Primerjava dobljenih nosilnosti z analitično izračunanimi po modelih za različne mehanizme porušitev je pokazala, da za testirani tip večslojnega zidu, kjer zunajravninska porušitev ni bila kritična, zadovoljivo izračunamo nosilnost z modelom za upogibno porušitev in Turnšek-Čačovičevim modelom za diagonalno porušitev. Pri debelini srednjega sloja do 25 % debeline celotnega zidu se lahko za tak tip zidov nosilnost izračuna z upoštevanjem celotne debeline zidov.

Iz opravljene analize obnašanja ometov pri strižnih obremenitvah zidov smo ugotovili, da je tudi poškodovanost ometov odvisna od mehanizma odziva zidov. Pri upogibnem mehanizmu je prišlo do velikega odstopanja ometa, vendar se omet ni porušil. Porušitev ometa se je zgodila pri strižnem mehanizmu. Glede na dobljene rezultate so podane referenčne vrednosti zasukov zidov za doseg različnih mejnih stanj ometov pri strižnem obnašanju zidov z razpokami po diagonalah ter pri upogibnem obnašanju, in sicer relativno na pomik na meji elastičnosti zidov.

7 • ZAHVALA

Preiskave so bile opravljene v okviru projekta Perpetuate, financiranega iz Evropske komisije 7. okvirnega programa (FP7/2007-2013), v okviru sporazuma o dodelitvi sredstev, št.

244229. Delo mlade raziskovalke je bilo financirano tudi od ARRS-a s pogodbo 1000-08-310070. Zaradi obsežnosti preiskav je pri posameznih sklopih priprave preizkušancev

in/ali preiskav sodelovalo več posameznikov; z delom za diplomsko nalogo Janez Korpič, Luka Kurnjek, Damjan Špeglič in Katarina Kodelja. Preiskave je vodil Franci Čepon. Fotogrametrijske meritve je opravil Vid Peterman (Modri planet, d. o. o.). Sestavo malte tako za zidanje kot tudi za omete je določila prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov.

8 • LITERATURA

- Abrams, D. P., Performance-based engineering concepts for unreinforced masonry building structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 3, 1: 48–56, 2001.
- Aničić, D., Sorić, Z., Morić, D., Macan, H., Mechanical properties of stone masonry walls, Brebbia, C. A. (ur.), *Structural repair and maintenance of historical buildings*, Basel, Computational Mechanics Publications, Birkhäuser, str. 95–102, 1989.
- Binda, L., Bosiljkov, V., Saisi, A., Zanzi, L., Guidelines for the diagnostic investigation of historic buildings, *Proceedings of the Seventh International Masonry Conference, London 2006*, (Proceedings of the British Masonry Society, ISSN 0950-9615, No. 10), Stoke-on-Trent: British Masonry Society, 2006a.
- Binda, L., Penazzi, D., Saisi, A., Historic masonry buildings: necessity of a classification of structures and masonries for the adequate choice of analytical models, 6th international symposium on computer methods in structural masonry (STRUMAS VI), Computers & Geotechnics Ltd, Roma, str. 168–173, 2003b.
- Binda, L., Pina-Henriques, J., Anzani, A., Fontana, A., Lourenço, P. B., A contribution for the understanding of load-transfer mechanisms in multi-leaf masonry walls: Testing and modelling. *Engineering Structures*, 28, 8: 1132–1148, 2006b.
- Binda, L., Saisi, A., Benedictis, R., Tringali, S., Experimental study on the damaged pillars of the Noto Cathedral, 8th Int. Conf. on Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture, str. 89–98, 2003a.
- Borri, A., Corradi, M., Speranzini, E., Shear behaviour of unreinforced and reinforced masonry panels subjected to in-situ diagonal compression tests, *Construction and Building Materials*, 25, 12: 4403–4414, 2001.
- Bosiljkov, V., Maierhofer, Ch., Koepp, Ch., Wöstmann, J., Assessment of Structure Through Non-Destructive Tests (NDT) and Minor Destructive Tests (MDT) Investigation: Case Study of The Church at Carthusian Monastery at Žiče (SLOVENIA). *International journal of architectural heritage*, 1, 4: 1–15, 2010a.
- Bosiljkov, V., Tomažević, M., Bohinc, U., Leskovar, I., On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry buildings, Deliverable D10.2 & 10.4, Report on the evaluation at pilot sites (Report for owners of historic buildings): pilot site: Pišce / Slovenia: revised report, ONSITEFORMASONRY project, Ljubljana, Zavod za gradbeništvo Slovenije, 2004.
- Bosiljkov, V., Totoev, Y. Z., Nichols, J. M., Shear modulus and stiffness of brickwork masonry: an experimental perspective, *Structural engineering and mechanics*, 20, 1: 21–43, 2005.
- Bosiljkov, V., Uranjek, M., Žarnić, R., Bokan-Bosiljkov, V., An integrated diagnostic approach for the assessment of historic masonry structures, *Journal of cultural heritage*, 11, 3: 239–249, 2010b.
- Candela, M., Caffari, S., Lagomarsino, S., Rossi, M., Fonti, R., Pagliuca, E., In-situ test for the shear strength evaluation of masonry: the case of a building hit by L'Aquila earthquake (Italy), *Proc. of 15th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE)*, 24–28 September, 2012, Lisbona, Portugalska, št. prispevka: 5460, 2012.
- Debs, M., The Suffering of Symbols: Giotto Frescoes and the Cultural Trauma of Objects, *Cultural Sociology*, 7, 4: 479–494, 2013.
- Egermann, R., Investigation on the load bearing behaviour of multiple leaf masonry, *IABSE reports*, 70, 1993.
- EN 1996-1-1: 2005, Eurocode 6: Design of masonry structures – Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures, CEN, Brussels, Belgium, 2005.
- EN 1998-3: 2005, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 3: Assessment and retrofitting of buildings. CEN, Brussels, 2005.
- FEMA 306, Evaluation of earthquake damaged concrete and masonry wall buildings, Basic procedures manual, Applied Technology Council for the Federal Emergency Management Agency, USA, 1998.
- Korpič, J., Eksperimentalne tlačne preiskave večslojnih kamnitih zidov, Diplomsko naloga, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, 2012.

- Kržan, M., Bosiljkov, V., Žarnić, R., Design of lateral resistance of URM blockwork through theoretical models and code provisions, Ingham, J. M. (ur.), Proceedings of the 9th Australasian Masonry Conference: Queenstown, New Zealand, 15-18 Februar 2011, Queenstown, New Zealand, str. 451–462, 2011.
- Lagomarsino, S., Cattari, S., PERPETUATE guidelines for seismic performance-based assessment of cultural heritage masonry structures, Bulletin of Earthquake Engineering, 13, 1: 13–47, 2015.
- Legge 2/2/1974 n. 64, Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche, G.U. del 21/04/1974.
- Magenes, G., Galasco, A., Penna, A., Da Parè, A., In-plane cyclic shear tests of undressed double leaf stone masonry panels, Proc. of 14th European Conference on Earthquake Engineering (ECEE) conference, št. prispevka: 1435, Ohrid, FYROM 30/08 – 03/09 2010.
- Mann, W., Müller, H., Failure of shear-stressed masonry - an enlarged theory, tests and application to shear walls, West, H. W. H. (ur.), Proceedings of the British Ceramic Society: Load-Bearing Brickwork, British Ceramic Society, str. 223–235, 1982.
- Martins, L., Vasconcelos, G., Lourenço, P., In-situ testing of stone masonry: a review of the state of the art, Lourenço, P.B., Haseltine, B., Vasconcelos, G. (ur.), 9th International Masonry Conference, Guimarães, 7–9 Julij 2014, International Masonry Society, 2014.
- MIT 2009, Istruzioni per l'applicazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al Decreto Ministeriale 14 Gennaio 2008, Circ. C.S.LI. Pp. No. 617 of 2/2/2009, Ministry of Infrastructures and Transportations, 2009.
- PIET 70, Obras de fábrica, Prescripciones del Instituto Eduardo Torroja, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, Spain, 1971.
- SFRJ, Ur. list SRFJ št.31: Pravilnik o tehničnih normativih za graditev objektov visoke gradnje na seizmičnih območjih, 1981.
- Sheppard, P., Terčelj, S., The effect of repair and strengthening methods for masonry walls, Proceedings of the Seventh World Conference on Earthquake Engineering, September 8–13, 1980, Istanbul, Turkey, Ankara, Turkish National Committee on Earthquake Engineering, vol. 6, str. 255–262, 1980.
- SIA 505266/2, Natursteinmauerwerk, Swiss Society of Engineers and Architects SIA, Zürich, Switzerland, 2012.
- Silva, B., Dalla Benetta, M., da Porto, F., Modena, C., Experimental assessment of in-plane behaviour of three-leaf stone masonry walls. Construction and Building Materials, 53, O: 149–161, 2014.
- Tassios, T., Chronopoulos, M., Aseismic dimensioning of interventions on low-strength masonry buildings, Middle east and mediterranean regional conference on low strength masonry in seismic areas, Middle East Technical University, Ankara, 1986.
- Tassios, T., Recupero di murature tri-strato (Rehabilitation of three-leaf masonry), Evoluzione nella sperimentazione per le costruzioni, seminario internazionale, Bolzano, Italija, 137-63, 2004.
- Terčelj, S., Nosilnostne in deformacijske karakteristike kamnitih zidov pri vertikalni in kombinirani obtežbi, Simpozijum o istraživanjima i primeni savremenih dostignuca u našem gradjevinarstvu u oblasti materijala i konstrukcija, XVII kongres, Sarajevo, 281–293, oktober 1982.
- Terčelj, S., Seizmična odpornost tipičnih kamnitih zgradb na Kozjanskem: Seizmična odpornost zidanih zgradb, Ljubljana, RSS, 1976.
- Tomažević, M., Aničić, D., Research, technology and practice in evaluating, strengthening and retrofitting masonry buildings: Some Yugoslavia experiences, Proc. Int. Seminar on Evaluating, Strengthening and Retrofitting Masonry Buildings, Arlington, USA, 1989.
- Tomažević, M., Apih, V., Ojačevanje kamnitega zidovja z zidovju prijaznim injektiranjem. Gradbeni vestnik, 42, 45–48, 1993.
- Tomažević, M., Weiss, P., Velechovsky, T., Apih, V., Študija možnosti injektiranja kamnitih zidov: poročilo Raziskovalni skupnosti Slovenije, PORS 06, Ljubljana, Zavod za raziskavo materiala in konstrukcij, 1989.
- Tomažević, M., Zidane zgradbe na potresnih območjih, Ljubljana, Fakulteta za arhitekturo, gradbenistvo in geodezijo, 1987.
- Tomažević, M., Earthquake-resistant design of masonry buildings, London, UK, Imperial College Press, 268 str., 1999.
- Turnšek, V., Čačovič, F., Some experimental results on the strength of brick masonry walls, West, H. W. H., Speed, K. H. (ur.), 2nd International Brick Masonry Conference, Stoke-on-Trent, London, England, Brick Development Association, British Ceramic Research Association, str. 149–156, 1971.
- Turnšek, V., Terčelj, S., Sheppard, P., Tomažević, M., The seismic resistance of stone-masonry walls and buildings, Proc. 6th European Conf. on Earthquake Eng., Dubrovnik, Vol.3, Prispevek 32, 255–262, 1978.
- Uranjek, M., Bosiljkov, V., Žarnić, R., Bokan-Bosiljkov, V., In situ tests and seismic assessment of a stone-masonry building, Mat. struct. 45, No. 6, str. 861–879, 2012.

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).

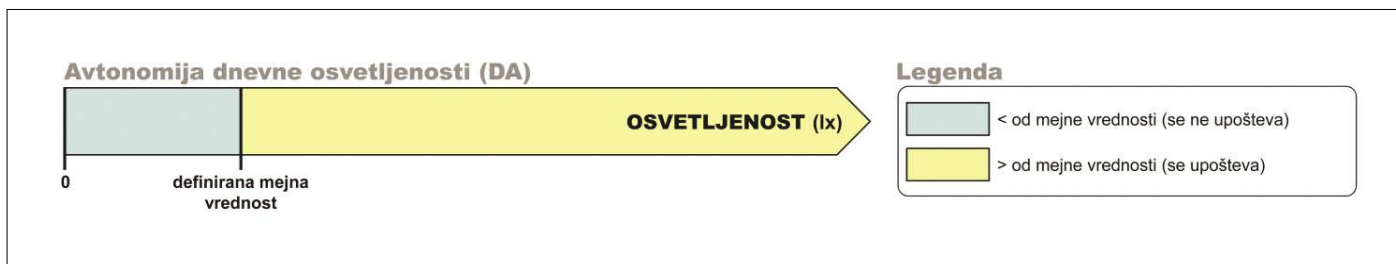
Študija, predstavljena v pričujočem članku, se ukvarja z analizo vpliva ključnih parametrov oblikovanja transparentnih površin v sklopu tipične osnovnošolske učilnice in njihovim vplivom na osvetljenost z dnevno svetlobo ter posledično na porabo električne energije za umetno razsvetljavo. Cilj analize 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 primerne 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

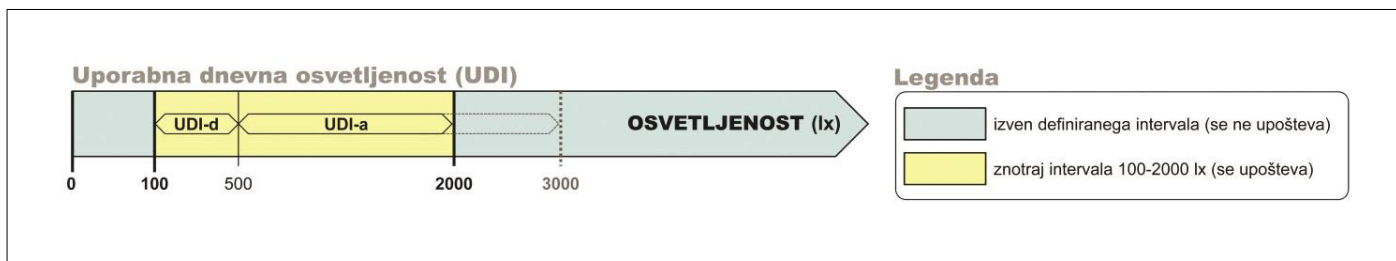
Avtonomija dnevne osvetljenosti (DA – Daylight Autonomy) je bila prva v skupini metrik, ki pristopajo k ocenjevanju osvetljenosti prostora z dnevno svetlobo s stališča dinamičnega spreminjanja zunanjih klimatskih razmer. Osnovna ideja je izračun odstotka časa v specifičnem intervalu (npr. pisarniški 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 efektivno 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 (Lindelöf, 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 pomanjkljivost 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-zasloni, ti pa so veliko bolj dojemljivi za pojav bleščanja kot današnji LCD-zasloni. 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)).

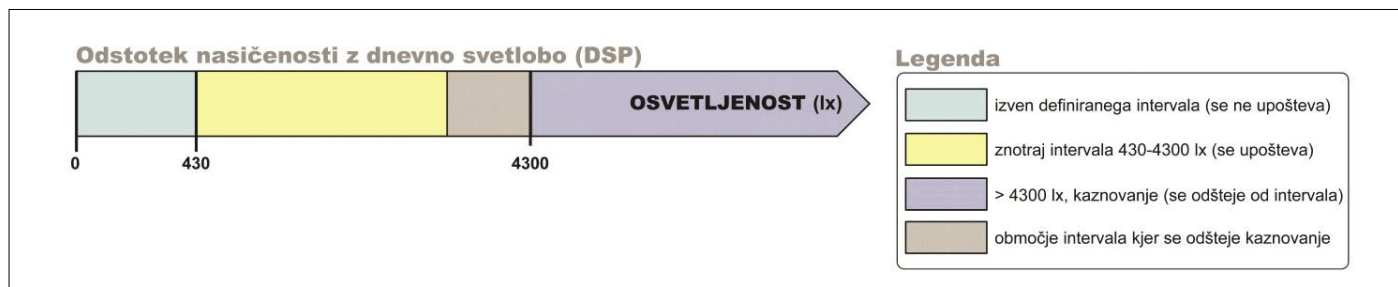
2.3 Odstotek nasičenosti z dnevno svetlobo

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): podoosvetljeno 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 učilnica 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 sovпада 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

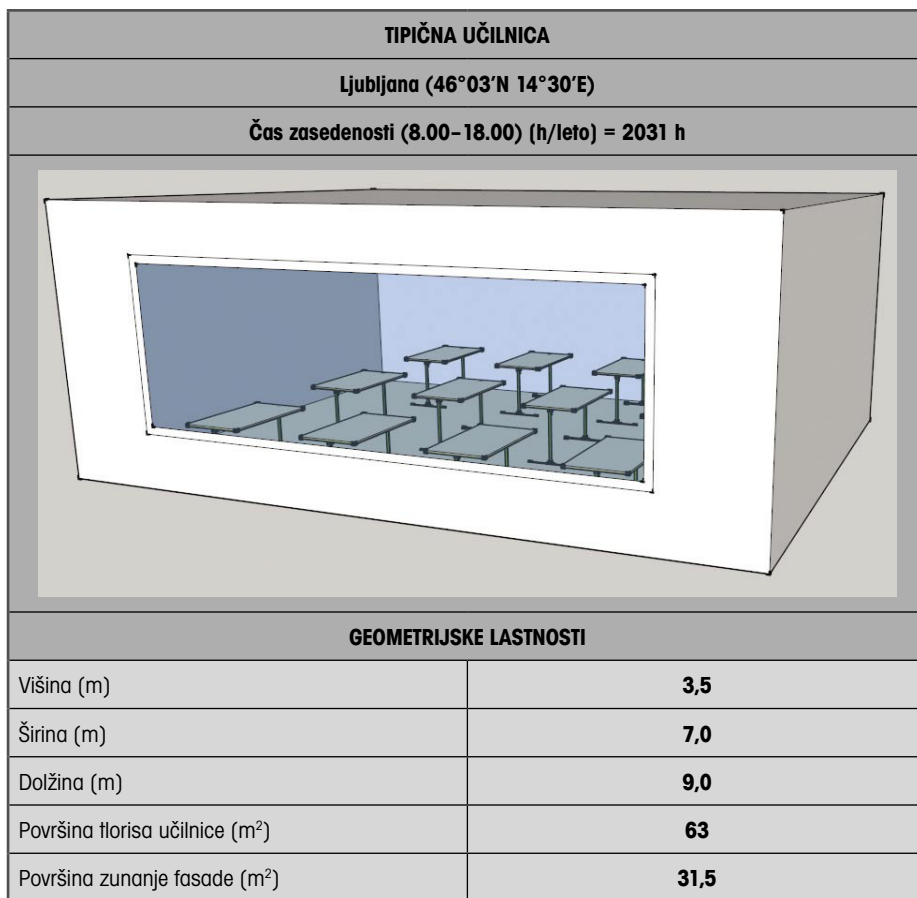
Tlorisna površina učilnic v slovenskih šolah je odvisna od vrste dejavnosti in števila otrok v učilnici. Minimalna površina učilnice za 28 otrok znaša 60 m² (NZOŠ, 2007). Predpostavljena površina tipične učilnice znaša 63 m², svetla etažna višina pa 3,5 m. Za to višino smo se odločili, ker je v Sloveniji 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

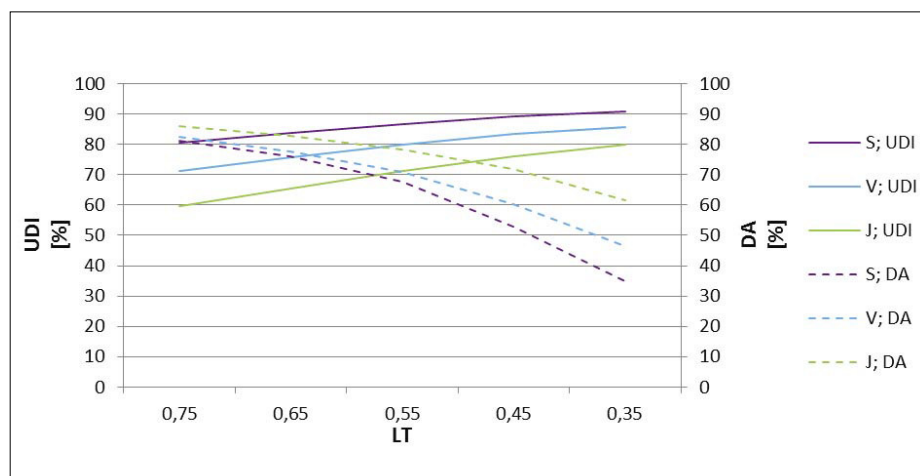


Preglednica 2 • Ključne lastnosti tipične šolske učilnice

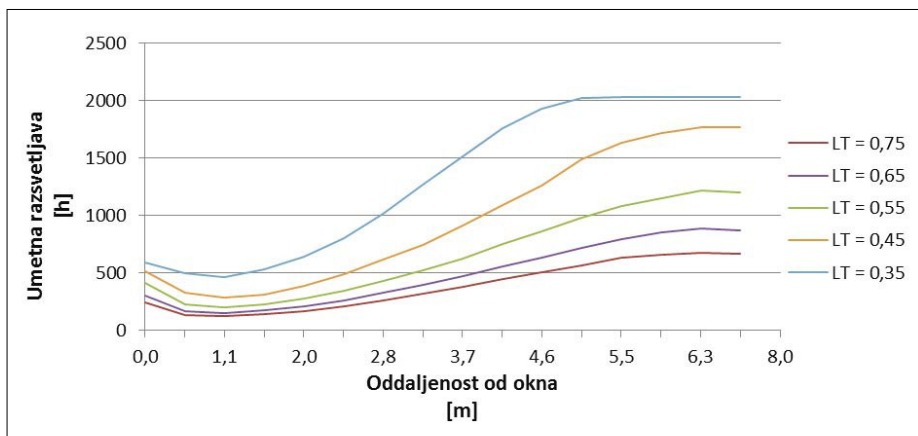
razsvetljavi pri S-orientaciji učilnice je viden pri rezultatih na sliki 6. Pri uporabi zasteklitve z nizkim LT-faktorjem (npr. LT 0,35) je v zadnji tretjini učilnice za vzdrževanje zastavljene ciljne vrednosti osvetljenosti delovne ravnine (500 lx) potrebno neprekinjeno delovanje svetilk (slika 6).

3.3 Vpliv velikosti zasteklitve

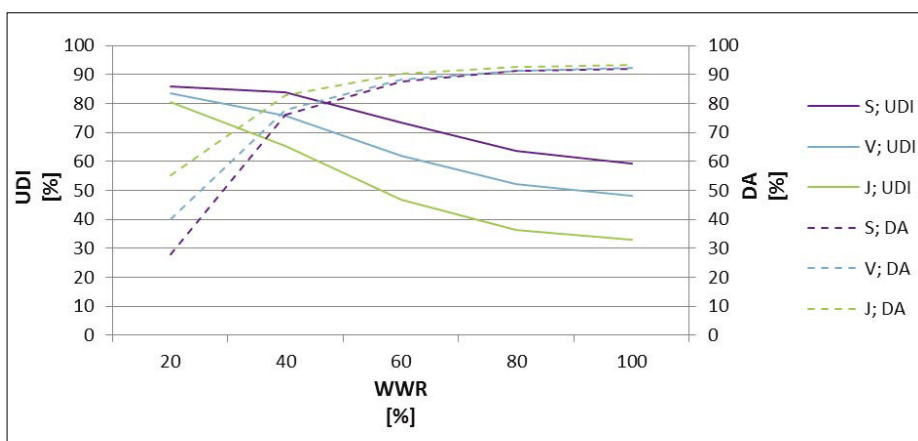
V naslednjem delu analize smo preverili vpliv velikosti zasteklitve. Rezultate analize UDI in DA za S-, V- in J-orientacijo tipične učilnice (slika 7). S povečevanjem zasteklitve se pri vseh orientacijah DA povečuje, UDI pa zmanjšuje. To pomeni, da se z večanjem površine za-



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



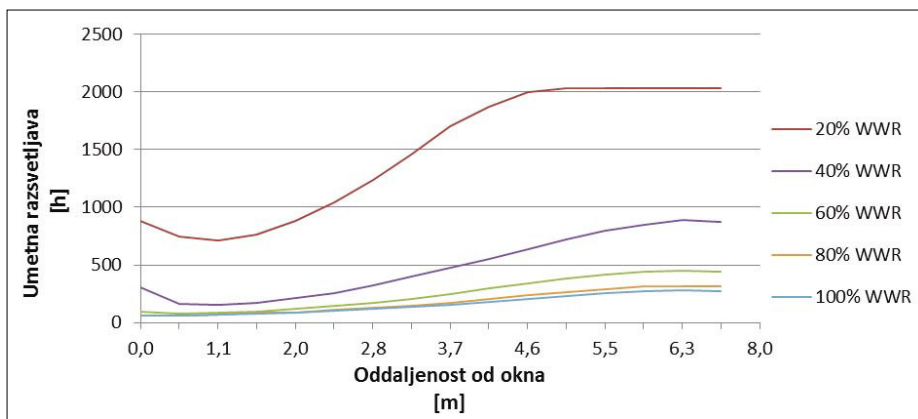
Slika 6 • Potreba po dodatni razsvetljavi v odvisnosti od faktorja LT in oddaljenosti od okna pri tipični učilnici, orientirani S, in WWR 40 %



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

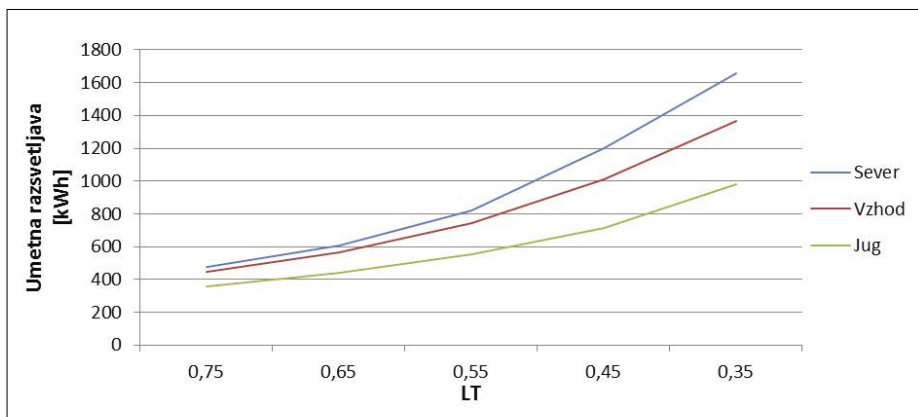


Slika 8 • Potreba po dodatni razsvetljavi v odvisnosti od WWR in oddaljenosti od okna pri tipični učilnici, orientirani proti severu in L-faktorju 0,65

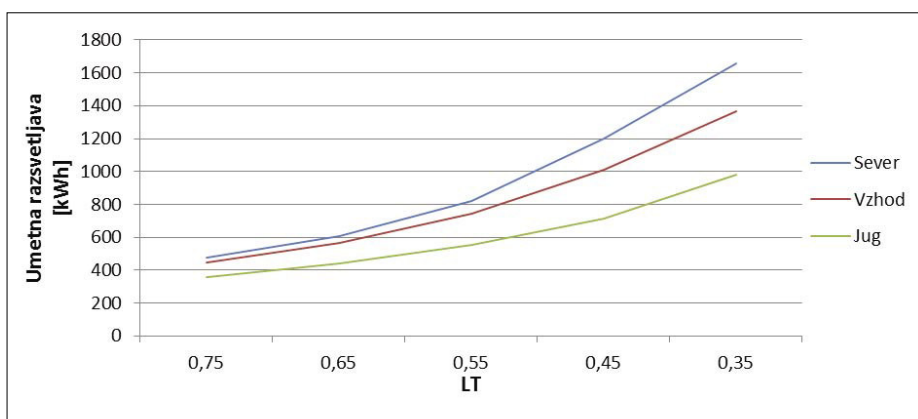
svetlobe (UDI) s povečevanjem zasteklitve zmanjšuje. Razlog za to je relativno ozek interval uporabne osvetljenosti (100–2000 lx) in pogosta previsoka osvetljenost (nad 2000 lx). Zato je treba z vidika primerne osvetljenosti nujno poskrbeti za primerno senčenje. V nasprotnem primeru se pojavi bleščanje (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 %

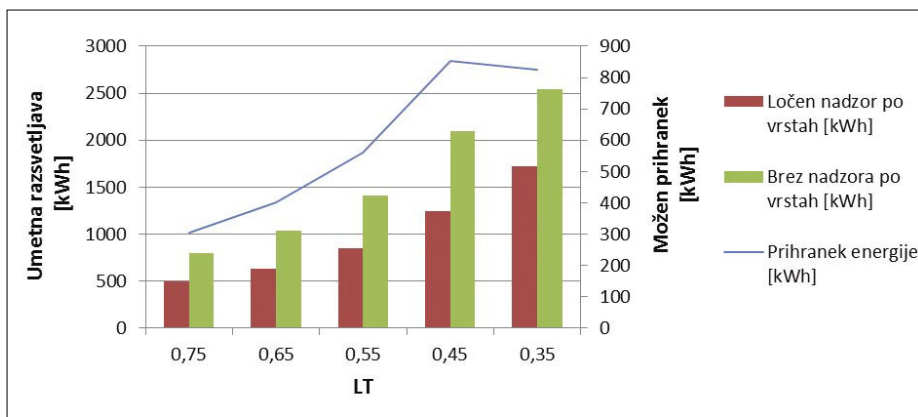


Slika 10 • Poraba energije za razsvetljavo v odvisnosti od WWR, pri S-, V- in J-orientaciji in LT-faktorju 0,65

(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 energetska 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



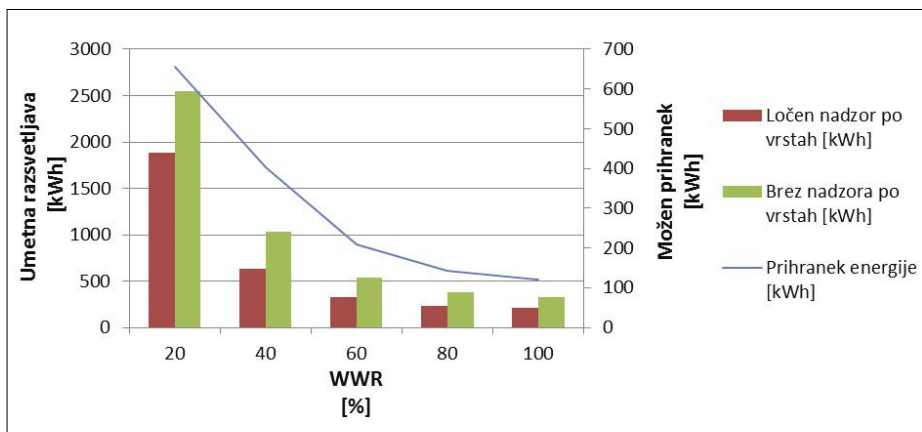
Slika 11 • Trajanje uporabe umetne razsvetljave in letni prihranek električne energije v odvisnosti od načina nadzora prižiganja svetil in LT-faktorja (WWR 40 %, J-orientacija)

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 upočasnjuje, 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.



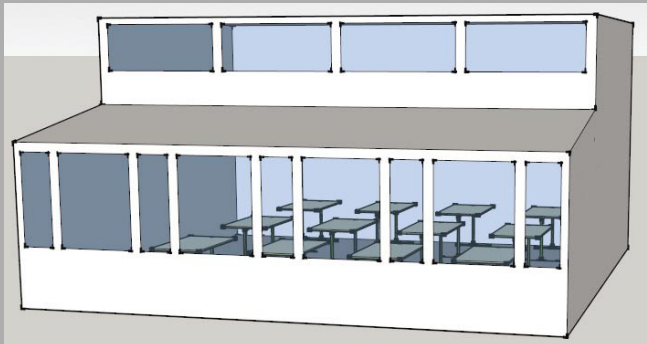
Slika 12 • Trajanje uporabe umetne razsvetljave in letni prihranek električne energije v odvisnosti od načina nadzora prižiganja svetil in WWR (LT = 0,65, J-orientacija)

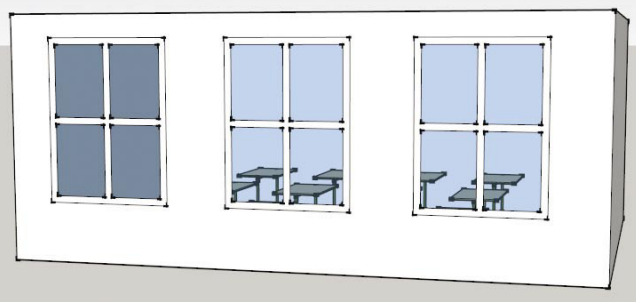
Zaradi potreb po dodatni umetni osvetlitvi (slika 13) je razvidno, da je za učilnico A značilna boljša distribucija osvetljenosti po globini prostora v primerjavi s tipično učilnico kot tudi z učilnico B. V testni učilnici B je zaradi relativno velike globine prostorov (ca. 7 m) in oken, nameščenih samo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

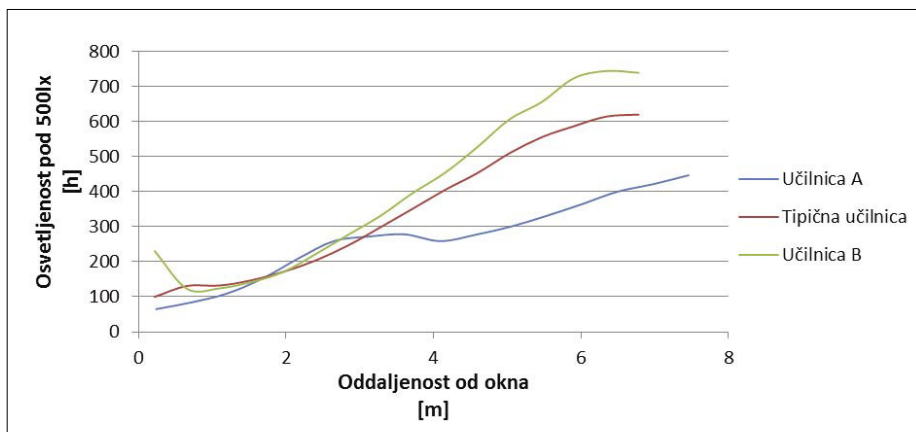
Na podlagi primerjave rezultatov tipične učilnice in primerjave z učilnicama A in B lahko zaključimo, da je pri zagotavljanju primernih vizualnih pogojev ter posledičnih prihrankih pri električni energiji za umetno razsvetljavo ključnega pomena zasnova transparentnega

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 zmanjšanju

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 uskladiitve 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.

26. MIŠIČEV VODARSKI DAN 2015

Strokovni posvet slovenskih vodarjev, Mišičev vodarski dan, je bil 9. decembra 2015 v Mariboru. Celodnevni dogodek sta organizirala Vodnogospodarski biro Maribor, d. o. o., in Drava – Vodnogospodarsko podjetje Ptuj, d. d., v sodelovanju z Ministrstvom za okolje in prostor RS ter pod pokroviteljstvom Mestne občine Maribor. Tradicionalno in največje vodarsko srečanje je namenjeno deležnikom, ki se ukvarjajo z upravljanjem, urejanjem in varovanjem voda.

Teme posveta so bile v marsičem drugačne kot pretekla leta, ko je bilo veliko prispevkov namenjenih hidrološkim ekstremom, ki smo jim bili v obliki poplav ali suš priča v posameznem letu. Glede na velike spremembe pri organiziranosti vodarstva v Sloveniji je bila temu namenjena vodilna tema posveta. Z ustanovitvijo Direkcije RS za vode, v kateri bodo združene področne strokovne službe Ministrstva za okolje in prostor RS, Agencije za okolje RS ter dela Inštituta za vode RS, bo po dolgih letih področje voda organizirano na nivoju direktorije kot organa v sestavi Ministrstva za okolje in prostor RS.

Zbrane udeležence je pozdravila ministrica za okolje in prostor gospa Irena Majcen. Ministrica je v nagovoru poudarila, da »smo na MOP v letošnjem letu pristopili k bolj aktivnemu in izvedbeno naravnemu upravljanju voda, saj smo to področje prepoznali kot eno izmed ključnih prioritete našega delovanja«. Pri tem je ministrica posebej omenila predvsem reorganizacijo celotnega sistema upravljanja voda v Sloveniji, ki je bila dolga leta predmet številnih pogovorov in bolj ali manj javnih diskusij, v praksi pa se ni zgodila konkretna realizacija.

Novo organiziranost upravljanja voda sta predstavila v. d. direktorja Direkcije RS za vode Tomaž Prohinar ter vodja Sektorja za vode Ministrstva za okolje in prostor RS mag. Luka Štravs. Ministrstvo za okolje in prostor je z vzpostavitvijo portala eVode in v okviru spletnih pregledovalnikov Atlasa voda in LIDAR-pregledovalnika naredilo tudi prvi in ključni korak k zbiranju vseh podatkov, evidenc, študij, pregledovalnikov, informacijskih sistemov in preostalega, kar je potrebno za učinkovito delo na tem področju.

Pripravljavci Načrta upravljanja voda na porečju Donave in Jadranskega morja, ki je bil zaključen v letu 2015, so predstavili številne prispevke na temo strategije upravljanja voda.



Udeleženci 26. Mišičevega vodarskega dne v dvorani Narodnega doma Maribor

Večji del srečanja je bil namenjen predstavitvi aktualnih projektov s področja upravljanja in urejanja voda, kar je stalnica Mišičevega vodarskega dne.

Vsi pisni prispevki so bili objavljeni v zborniku, dostopni so tudi na spletni strani organizatorjev posveta.

mag. Smiljan Juvan, univ. dipl. inž. grad.



Nagovor ministric Irene Majcen (Ministrstvo za okolje in prostor RS)



V. d. direktorja Tomaž Prohinar je predstavil Direkcijo RS za vode.



Predstavitev aktivnosti Sektorja za vode Ministrstva za okolje in prostor RS – mag. Luka Štravs

NOVI DIPLOMANTI

UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Adriana Keleman, Geostatična analiza gradbene jame Tobačna mesto, mentor doc. dr. Boštjan Pulko

Nino Filipin, Analiza izvedbe javnega naročila na področju gradenj od priprave razpisne dokumentacije do priprave ponudbe, mentorica izr. prof. dr. Jana Šelih

I. STOPNJA – VISOKOŠOLSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM OPERATIVNO GRADBENIŠTVO

Simon Hvala, Analiza izbranih ukrepov in potek sanacije dvorca Drnča, mentorica izr. prof. dr. Jana Šelih, somentor asist. dr. Matej Kušar

UNIVERZA V MARIBORU, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO, PROMETNO INŽENIRSTVO IN ARHITEKTURO

VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Tamara Statič, Organiziranje zimske službe na območju mestne občine Ptuj, mentor izr. prof. dr. Marko Renčelj, somentorica viš. pred. mag. Vlasta Rodošek

I. STOPNJA – VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Dejan Dobrotinšek, Projekt in izvedba manj zahtevnega stanovanjskega objekta na le delno komunalno opremljenem zemljišču, mentor viš. pred. Matjaž Nekrep Perc, somentorica asist. Blanka Grajfoner

Tadeja Godicelj, Investicijska in razpisna dokumentacija za ureditev pokopališča v Šentjurju, mentorica doc. dr. Nataša Šuman

2. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Kristina Paska, Tesnjenje in geomehanska presoja stabilnosti nasutih pregrad, mentor izr. prof. dr. Stanislav Škrabl, somentor dr. sc. Božo Soldo

Rubriko ureja • Eva Okorn, gradb.zveza@siol.net

Vsem diplomantom čestitamo!

Skladno z dogovorom med ZDGITS in FGG-UL vsi diplomanti gradbenega oddelka Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani prejemo Gradbeni vestnik (12 števil) eno leto brezplačno. Vse, ki bodo želeli po prejemu 12. številke postati redni naročniki, prosimo, naj to čimprej sporočijo uredništvu na naslov: GRADBENI VESTNIK, Karlovška cesta 3, 1000 Ljubljana; telefon: (01) 52 40 200; faks: (01) 52 40 199; e-mail: gradb.zveza@siol.net.

ZDGITS in Uredništvo Gradbenega vestnika

KOLEDAR PRIREDITEV



16.-18.3.2016

SBE 16 MALTA – Europe and the Mediterranean: Towards a Sustainable Built Environment

Valletta, Malta
www.sbe16malta.org

30.-31.3.2016

ICTE'16 – International Conference on Traffic Engineering

Praga, Češka
<http://teconference.com/>

5.-7.4.2016

EE & RES 2016 – South-East European Congress & Exhibition on Energy Efficiency and Renewable Energy

Sofija, Bolgarija
<http://viaexpo.com/en/pages/ee-re-congress>

22.-28.4.2016

WTC – World Tunnel Congress

San Francisco, ZDA
www.wtc2016.us/

8.-11.5.2016

**IABSE Conference Guangzhou 2016
Bridges and Structures Sustainability-Seeking Intelligent Solutions**

Guangzhou, Kitajska
www.iabse.org/Guangzhou2016

24.-29.5.2016

1st European and Mediterranean Structural Engineering and Construction Conference

Istanbul, Turčija
www.isec-society.org/EURO_MED_SEC_01/

25.-27.5.2016

3rd International Conference with Exhibition

“S.ARCH 2016 – Next Architecture”

Budva, Črna Gora
www.s-arch.net/

9.-10.6.2016

Drugi srpski kongres o putevima

Beograd, Srbija
www.kongresoputevima.rs

16.-18.6.2016

7. Posvetovanje slovenskih geotehnikov in 17. Šukljatovi dnevi

Podčetrtek, Slovenija
www.sloged.si

22.-24.6.2016

2. CESB16 – Central Europe towards Sustainable Building 2016

Praga, Češka
www.cesb.cz

28.6.-7.7.2016

16th International Scientific Geoconference – SGEM 2016

Albena, Bolgarija
www.sgem.org/

17.-22.7.2016

35th International Conference on Coastal Engineering

Istanbul, Turčija
<http://icce2016.com/en/>

27.-29.7.2016

3rd International Conference on Structures and Architecture

Guimaraes, Portugalska
www.icsa2016.arquitectura.uminho.pt/

22.-25.8.2016

WCTE – World Conference on Timber Engineering

Dunaj, Avstrija
<http://wcte2016.conf.tuwien.ac.at/home/>

19.-21.9.2016

International Conference on Accelerated Pavement Testing

San Jose, Kostarika
www.apf-conference.com/

21.-23.9.2016

19th IABSE Conference “Challenges in Design and Construction of an Innovative and Sustainable Built Environment”

Stockholm, Švedska,
www.iabse.org/stockholm2016

5.-6.10.2016

ICABE 2016 – International Conference on Architecture and Built Environment

Kuala Lumpur, Malezija
<https://icabe2016.wordpress.com>

16.-19.10.2016

IALCCE2016 – 5th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering

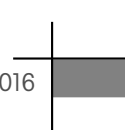
Delft, Nizozemska
www.ialcce2016.org

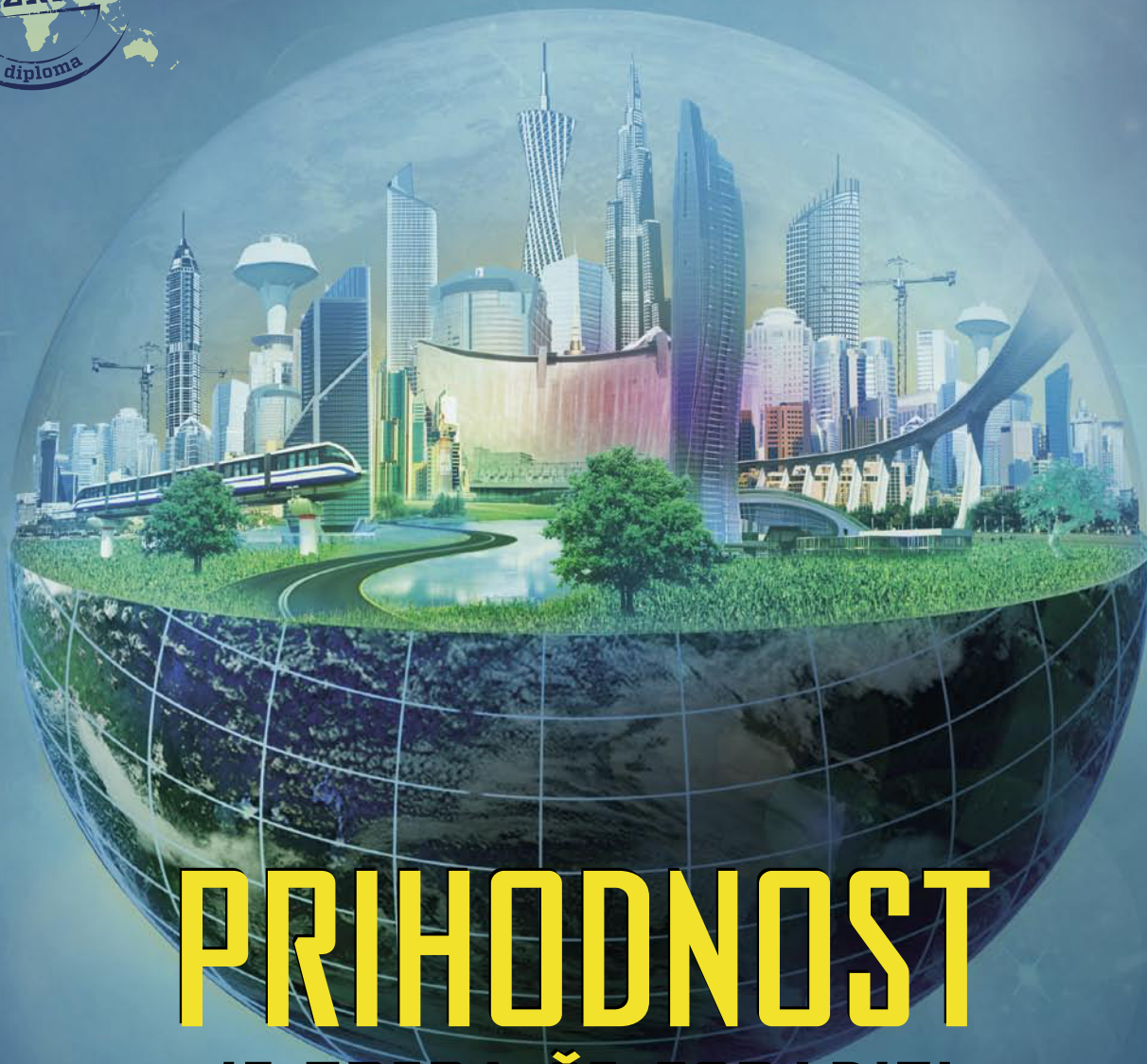
17.-19.10.2016

SBE16-Thessaloniki International Conference “Sustainable Synergies from Buildings to the Urban Scale”

Solon, Grčija
<http://sbe16-thessaloniki.gr/>

Rubriko ureja • **Eva Okorn**, ki sprejema predloge za objavo na e-naslov: gradb.zveza@siol.net





PRIHODNOST JE TREBA ŠE ZGRADITI

GRADBENIŠTVO, OKOLJSKO GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJA
SKOZI CELOTNO ZGODOVINO ČLOVEŠTVA PREMKAJO MEJE ZNANEGA.
PRIHODNOST PRINAŠA TRAJNOSTNE IZZIVE NA ZEMLJI IN NOVE V VESOLJU.

BOŠ ZRAVEN, KO SE BO GRADILA PRIHODNOST?

Vpiši se na Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo
Univerze v Ljubljani z mednarodno priznano diplomo.

Rok za vpis je 4. marec 2016!

Univerza v Ljubljani
Fakulteta *za gradbeništvo in geodezijo*

