





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

UDK-UDC 05 : 625; tiskana izdaja ISSN 0017-2774;
spletna izdaja ISSN 2536-4332.
Ljubljana, marec 2018, letnik 67, str. 37-64

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 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**
Ana Brunčič
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:

Kočevski 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 upokojene 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 všteti DDV.

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

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

Nagrajeni gradbeniki

stran **38**

AKAD. PROF. DR. PETER FAJFAR IZVOLJEN ZA ČLANA NAE

Članki • Papers

stran **39**

Vid Lešič, mag. inž. grad.

asist. Denis Imamović, univ. dipl. inž. grad.

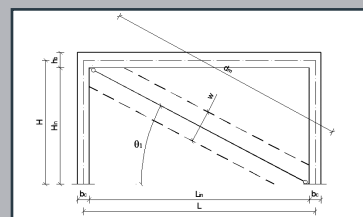
doc dr. Iztok Peruš, univ. dipl. inž. grad.

izr. prof. dr. Matjaž Skrinar, univ. dipl. inž. grad.

VPLIV MODELIRANJA OPEČNIH POLNIL V ANALIZI

POTRESNEGA OBNAŠANJA ARMIRANOBETONSKIH OKVIRJEV

THE INFLUENCE OF BRICK MASONRY INFILL WALL MODELLING
IN SEISMIC BEHAVIOUR ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE FRAMES



stran **51**

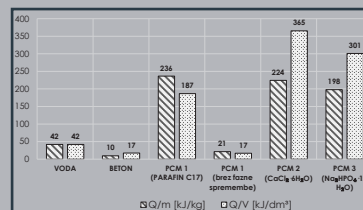
asist. Luka Pajek, mag. inž. stavb.

doc. dr. Roman Kunič, univ. dipl. inž. grad.

prof. dr. Zvonko Jagličič, univ. dipl. fiz.

FAZNO SPREMENLJIVE SNOVI (PCM) IN NJIHOVA UPORABA V STAVBAH

PHASE CHANGE MATERIALS (PCM) AND THEIR APPLICATION IN BUILDINGS



Poročila s strokovnih in znanstvenih srečanj

stran **63**

doc. dr. Primož Može, univ. dipl. inž. grad.

doc. dr. Jože Lopatič, univ. dipl. inž. grad.

39. ZBOROVANJE GRADBENIH KONSTRUKTORJEV

Vabila

stran **50**

6. POSVET O 3. RAZVOJNI OSI

stran **62**

USPOSABLJANJE ZA OPERATERJE ČISTILNIH NAPRAV

stran **64**

SEJMA MEGRA IN GREEN

Novi diplomanti

Eva Okorn

Koledar prireditev

Eva Okorn

Slika na naslovnici: Gradnja objekta Kuehne&Nagel na Sp. Brniku, izvajalec CGP, foto: Damir Klemenčič

AKAD. PROF. DR. PETER FAJFAR IZVOLJEN ZA ČLANA NAE



Član matične sekcije gradbenih inženirjev akad. prof. dr. Peter Fajfar, univ. dipl. inž. grad., je bil izvoljen med člane iz tujine Nacionalne inženirske akademije v Združenih državah Amerike (NAE, National Academy of Engineering). Izvoljen je bil, ker je imel vodilno vlogo pri razvoju nelinearnih metod za potresno analizo konstrukcij.

Izvolitev v NAE je med najvišjimi priznanji, ki jih v Združenih državah Amerike podeljujejo za izjemne dosežke pri raziskavah, v praksi, izobraževanju in publiciranju. Med člani NAE, ki je bil ustanovljen leta 1964, do zdaj še ni bilo Slovencev.

Iskrene čestitke!

VPLIV MODELIRANJA OPEČNIH POLNIL V ANALIZI POTRESNEGA OBNAŠANJA ARMIRANOBETONSKIH OKVIRJEV

THE INFLUENCE OF BRICK MASONRY INFILL WALL MODELLING IN SEISMIC BEHAVIOUR ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE FRAMES

Vid Lešič, mag. inž. grad.

vid.lesic@probit-doo.si

Probit, projektiranje gradbenih objektov in inženiring, d. o. o., Partizanska cesta 3–5, 2000 Maribor

asist. Denis Imamović, univ. dipl. inž. grad.

denis.imamovic@um.si

doc dr. Iztok Peruš, univ. dipl. inž. grad.

iztok.perus@um.si

izr. prof. dr. Matjaž Skrinar, univ. dipl. inž. grad.

matjaz.skrinar@um.si

Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo, Smetanova ulica 17, 2000 Maribor

Znanstveni članek

UDK 624.042.7:692.2-047.58

Povzetek | Prispevek obravnava vpliv modeliranja polnil v analizi potresnega obnašanja armiranobetonskih okvirjev. Študije različnih avtorjev so podale drugačne modele za računsko modeliranje polnil in med njimi je najbolj pogosto uporabljen model, kjer mehanske lastnosti zidanih polnil v računskem modelu dovolj dobro zajamemo z nadomestno tlačno diagonalo, ki ji s pomočjo empiričnih enačb določimo učinkovito širino in posledično ustrezno togost. Z leti je bilo predlaganih več nadgrajenih modelov z eno ali več nadomestnimi diagonalami z različnimi izrazi za določitev učinkovite širine diagonale. Da bi dobili boljši vpogled v možnosti, ki jih v inženirski praksi omogoča uporaba različnih modelov zidanih polnil, smo v študiji najprej za model enostavnega okvirja naredili analizo togosti brez upoštevanja zidanega polnila in z njegovim upoštevanjem. Slednjega smo modelirali z učinkovitim širinami nadomestnih diagonal različnih avtorjev. Ker je primerjava rezultatov pokazala velike razlike med modelom brez upoštevanja polnila in modelom z upoštevanjem polnila, smo opravili dodatno linearno dinamično analizo za dvoetažni okvir, kot se izvaja v potresnem inženirstvu. Rezultati so sicer jasno potrdili ugodne učinke upoštevanja polnil v analizi, a so hkrati tudi pokazali, da se rezultati, dobljeni z različnimi vrednostmi širin nadomestnih diagonal, medsebojno lahko zelo razlikujejo, kar poraja vprašanja o izbiri ustreznega izraza za izračun širine nadomestne diagonale in s tem omejuje njihovo uporabo.

Ključne besede: zidana polnila, armiranobetonski okvirji, nadomestna diagonala, potresna obremenitev

Summary | The article studies the influence of masonry infill in the analysis of the seismic behaviour of reinforced concrete frames. Various authors have proposed different models for computational modelling of the infill, the most commonly used among them being the model where the mechanical properties of masonry infill are adequately captured in the computational model by a single equivalent compressive diagonal strut. The effective width of the strut (which consequently governs the strut's rigidity) is determined

by means of empirical equations. Over the years, several upgraded models have been proposed with one or several alternative diagonals accompanied by different expressions for determining the effective diagonal width. In order to obtain a better insight into the possibilities offered by different engineering infill models, two initial analyses of a simple frame were performed: with and without taking into account the masonry infill. In the analyses where the infill was taken into the account, the corresponding effective widths of the struts were evaluated by several expressions given by different authors. The comparison of the results exposed large differences between the models. Therefore, an additional linear dynamic analysis for the two-storey frame was carried out within the scope of seismic engineering. The results clearly confirmed the favourable effects of considering the infills in the analysis, however, the comparison also showed that the results obtained with different strut widths can vary extensively. This raises questions about selecting the appropriate expression for calculating the width of the replacement strut, consequently severely limiting their practical utilisation.

Key words: brick masonry infills, RC frames, equivalent diagonal strut, seismic load

1 • UVOD

Armiranobetonske okvirne konstrukcije z zidanimi polnili, ki se sezidajo med stebri in nosilci glavne konstrukcije, so pogost način gradnje stavb, tudi na potresno ogroženih območjih. Pri samem prenašanju navpičnih obremenitev so zidana polnila običajno obravnavana kot povsem nenosilni konstrukcijski elementi, saj se sezidajo po končani gradnji armiranobetonske okvirne konstrukcije, ki služi za primarno nosilno konstrukcijo. Zidana polnila v mehanski računski analizi tako prispevajo samo k masi oz. teži, kar povzroča dodatne obremenitve na primarno konstrukcijo.

Vloga zidanih polnil se bistveno spremeni v primeru potresa, pri katerem lahko prispevajo pomemben delež pri prenašanju horizontalne obremenitve. Čeprav je splošno znano, da je učinek zidanih polnil na potresni odziv oz. potresno odpornost okvirnih konstrukcij ugoden ter sorazmerno velik, in tudi standard Evrokod 8-1 (SIST, 2005) jasno navaja, da je treba polnila, ki pomembno povečajo vodoravno togost in nosilnost stavbe, upoštevati v računu, je njihov prispevek v praksi velikokrat zanemarljiv. Njihov odziv na potresno obremenitev in posledično vpliv na primarno nosilno konstrukcijo namreč ni enostavno določljiv, saj je močno odvisen tako od geometrijsko-mehanskih lastnosti zidanega polnila kot tudi od tega, kako je zidano polnilo povezano s primarno konstrukcijo. Gre za kompleksen inženirski problem interakcije med okvirjem in polnilom, ki vsebuje veliko število parametrov, katerih vloga še ni jasno definirana, kar vodi do

tega, da je obnašanje polnila še vedno slabo razumljeno, še posebno v primerih, ko v njih nastopajo razne odprtine (okna ali vrata).

Posledica takega pomanjkljivega znanja je tudi odsotnost jasnih in splošno sprejetih inženirskih smernic za projektiranje okvirjev s polnili. V literaturi je namreč mogoče najti (pre)veliko število različnih modelov polnil ter metod za določanje parametrov njihove togosti in nosilnosti, kar ne prispeva k jasnosti izbire. Tako se v inženirski praksi zidanega polnila velikokrat upoštevajo kot nenosilni konstrukcijski elementi, ker se tak poenostavljeni pristop šteje za »pristop na varni strani«. Za okvirje, ki jih po Evrokodu 8 klasificiramo kot okvirne sisteme, standard celo navaja, da se polnila, ki so zgrajena po strditvi betona v okvirjih ali po izgradnji jeklenih okvirjev in so v stiku z okvirjem (torej brez posebnih dilatacij), vendar niso konstrukcijsko povezana z njim (z vezmi, stebrički ali mozniki), načeloma upoštevajo kot nekonstrukcijski elementi.

Pri projektiranju okvirnih konstrukcij z zidanimi polnili imamo dve skrajni možnosti, kako upoštevati obnašanje teh vrst objektov. Prva možnost je, da polnila upoštevamo in sezidamo tako, da se obnašajo kot nenosilni konstrukcijski elementi tudi pri horizontalni obremenitvi. V tem primeru moramo paziti, da polnila ustrezno ločimo od primarne nosilne konstrukcije s posebnimi detajli, da ne ovirajo gibanja primarne konstrukcije med potresom, kot je bilo predvideno pri projektiranju. Druga možnost pa je, da zidana polnila upoštevamo in tudi ustrezno uvedemo kot

sodelujoči del nosilnega konstrukcijskega sistema. V tem primeru bodo polnila prevzela del potresne obtežbe, hkrati pa bodo s svojo med potresom naraščajočo poškodovanostjo ugodno sodelovala pri sipanju energije celotne konstrukcije.

Standard Evrokod 8 tako navaja, da je treba pri konstrukcijskih sistemih (razen v primeru nizke seizmičnosti, kar po veljavni karti za Republiko Slovenijo ni zanimivo), navedenih v členu 4.3.6.1(1)P, vseh vrst duktilnosti (DCL, M ali H), s posebnimi ukrepi preprečiti krhki lom in predčasen razpad polnilnih sten (posebno v primeru zidanih polnil z odprtinami ali iz drobljivih materialov) ter tudi delen ali celoten padec vitkih zidanih polnil iz svoje ravnine. Posebno pozornost je treba nameniti zidanim panelom s količnikom vitkosti, večjim od 15. Količnik vitkosti predstavlja razmerje med dolžino ali višino (vzame se manjša od obeh v vrednosti) in debelino.

V primeru, ko želimo polnila upoštevati kot nosilni del konstrukcije, standard Evrokod 8-1 ne daje navodil za računsko modeliranje okvirnih konstrukcij z zidanimi polnili pri potresni obtežbi, ampak navaja zgolj splošna navodila in priporočila za projektiranje. Dejstvo je, da so zidana polnila izrazito heterogeni material, kar pomeni, da je razporeditev materialnih lastnosti težko napovedati. Na podlagi obsežnih eksperimentalnih raziskav, predstavljenih v strokovni literaturi, so bili razviti različni računski modeli in predlagane računske metode za upoštevovanje togosti, odpornosti in deformabilnosti armiranobetonskih okvirjev z zidanimi polnili. Metode so razdeljene v dve glavni kategoriji: mikro- in makromodeli. Z mikromodeli, ki so bolj obsežni, poskušamo simulirati odziv

armiranobetonskih okvirjev s polnili na potresno obtežbo čim bolj točno oz. s čim manj predpostavkami. Mikromodeli temeljijo na metodi končnih elementov in so sestavljeni iz matematičnega modela okvirja, polnila, malt-nih spojev in elementa, ki predstavlja povezo-vo med okvirjem in polnilom. Makromodeli pa temeljijo na modelu nadomestne ekviva-lentne diagonale, s katero se poskušajo čim bolj točno zajeti mehanske in geometrijske lastnosti polnila. Študije različnih avtorjev so pokazale, da lahko mehanske lastnosti zidanih polnil v računskih modelih dovolj dobro zajamemo z nadomestno diagonalo, ki ji s pomočjo empiričnih enačb določimo učinkovito širino in posledično ustrezno togost. Z leti se je pojavilo več predlaganih makromodelov z eno ali več nadomestnimi diagonalami. Prav tako so različni avtorji

predlagali različne izraze za določitev učinkovite širine diagonale, ki bistveno vpliva na togost le-te.

V pričujočem članku smo preučevali odziv armiranobetonskih okvirjev z zidanimi polnili na potresno obtežbo. Večina dela je posvečenega upoštevanju zidanega polnila v računskem modelu in posledično opazovanju njegovega vpliva na odziv celotne konstrukcije. Omejili smo se na osnovni makromodel polnila z eno nadomestno diagonalo in zanj primerjali več predlaganih izrazov za izračun njene učinkovite širine, ki bistveno vpliva na izračun njene togosti. Po izračunu togosti nadomestne diagonale po vseh zbranih izrazih za tipične inženirske vrednosti polnila smo izvedli izračun vodoravne togosti enostavnega okvirja, ki je pokazal velik delež polnila.

Zato smo izbrali tri različne izraze za izračun širine nadomestne diagonale ter z njimi izvedli izračun velikosti in porazdelitve potresnega vpliva dvoetažne okvirne AB-konstrukcije srednje stopnje duktilnosti (DCM) z elastično analizo v skladu s standardom Evrokod 8-1. Za konstrukcijo smo opravili tudi analizo notranjih statičnih količin na mestu vpetja stebrov spodnje etaže ter vodoravnih pomikov. Naredili smo štiri analize konstrukcije: poleg izračunov s tremi različnimi širinami nadomestne diagonale je bila za primerjavo opravljena tudi analiza čiste okvirne AB-konstrukcije.

Cilj prispevka je bil zbrati in primerjati nekatere osnovne parametre, potrebne pri izvedbi protipotresnega konstruiranja, s čimer smo želeli prispevati k razjasnitvi njihovega vpliva v tej dokaj zahtevni inženirski temi.

2 • RAČUNSKO MODELIRANJE AB-OKVIRJEV S POLNILI

2.1 Splošno o problematiki obnašanja polnil

Zidana polnila lahko bistveno vplivajo na dinamične lastnosti in odziv celotne okvirne konstrukcije. Togost okvirjev se s polnili poveča, kar povzroči krajše nihajne čase. S krajšimi nihajnimi časi pa lahko na konstrukcijo delujejo tudi večje (projektne) potresne sile. V elastičnem območju, pri majhnih nihajnih, povečane sile v celoti prevzame zidano polnilo. Če polnila niso bila projektirana, da prevzamejo vodoravne sile, se bodo poškodovale in bo vodoravna obtežba s polnil prešla na armiranobetonske okvirje. V primeru hipne celotne porušitve polnila se vsa obremenitev hipno prenese na okvirno konstrukcijo, ki ni bila nujno projektirana za prevzem tako velikih vodoravnih sil, kar lahko povzroči hude poškodbe armiranobetonskih okvirjev. V takšnih primerih lahko zidana polnila zelo neugodno delujejo na celotno konstrukcijo in povzročijo odpoved primarne nosilne konstrukcije (Tomažević, 2009).

Čeprav polnila niso vedno projektirana kot konstrukcijski elementi glavne konstrukcije, pa vseeno mnogokrat ugodno vplivajo na obnašanje okvirnih konstrukcij. Če se polnila poškodujejo, preden nastanejo velike potresne sile, delujejo kot dušilci, ki s poškodbami sipajo energijo, hkrati pa preprečujejo velike pomike glavne okvirne konstrukcije. Osnovni pogoj za ugoden vpliv polnil na konstrukcijo

je njihova simetrična porazdelitev v tlorisu stavbe in zveznost po višini. Če porazdelitev ni tlorisno simetrična, se na konstrukciji pojavijo nevarni torzijski vplivi; če pa ni izpolnjena zveznost po višini, se poškodbe v glavni okvirni konstrukciji skoncentrirajo na mestih nezveznosti (Tomažević, 2009).

Pri majhnih silah in deformacijah okvir z zidanimi polnili deluje kot monolitni konstrukcijski element. Zaradi razmerja togosti med armiranobetonskim okvirjem in zidanim polnilom je pri majhnih deformacijah prispevek okvirja k odpornosti sistema v vodoravni smeri običajno majhen. Pri povečanih vodoravnih silah in deformacijah pa se delež obtežbe, ki jo prevzame zidano polnilo, zmanjša, saj se preseže njegova nosilnost. V polnilu nastanejo razpoke, kar zmanjšuje njegovo togost. V primeru razdelitve polnil na dva ali več delov se armiranobetonski okvir deformira ločeno in konstrukcijski sistem ne deluje več kot monolitni element. Delež obtežbe, ki jo prevzame armiranobetonski okvir, pa je odvisen od deformacijske oblike in mehanizma porušitve zidanega polnila (Tomažević, 2009).

V standardu Evrokod 8-1 je za vse vrste konstrukcij zahtevano, da sta pri projektiranju konstrukcij na potresnih območjih izpolnjeni dve osnovni zahtevi: zahteva po neporušitvi in zahteva po omejitvi poškodb. Prva zahteva narekuje, da mora biti konstrukcija projektirana

na in zgrajena tako, da v predvideni življenjski dobi prenese vse projektne potresne vplive, predvidene za območje, kjer se konstrukcija gradi, ne da bi prišlo do njene porušitve. Druga zahteva pa je, da pri potresu, za katerega je velika verjetnost, da se bo zgodil v projektirani življenjski dobi konstrukcije, slednja ne utрпи tako velikih poškodb, katerih strošek sanacije bi bil večji kot cena konstrukcije same.

Standard poleg splošnih navodil za projektiranje potresno odpornih konstrukcij predpisuje še nekaj dodatnih ukrepov, ki jih moramo upoštevati pri projektiranju AB-okvirjev z zidanimi polnili, vseeno pa ne daje jasnih navodil, kako matematično modelirati zidana polnila v AB-okvirjih.

V členu 4.3.6 standarda Evrokod 8-1 so prvič omenjeni ukrepi za okvirje z zidanimi polnili. V njem so v prvem podpoglavju zajeta splošna določila, kdaj konstrukcija ustreza okvirni gradnji z zidanimi polnili. V nadaljevanju so zajete nepravilnosti konstrukcije zaradi zidanih polnil. Pri projektiranju moramo biti pazljivi na tlorisne nepravilnosti in nepravilnosti po višini. Izgibati se je treba močno nepravilnim, nesimetričnim ali neenakomernim razporeditvam polnil v tlorisu. Pri tem moramo upoštevati tudi količino odprtin v polnilih, in če ima polnilo več kot eno pomembno odprtino (vrata, okno ...), ga je treba v skladu s standardom pri modeliranju za analizo zanemariti.

Standard Evrokod 8-1 v tem poglavju omenja tudi veliko negotovost, povezano z obnašanjem polnil. Pri tem opozarja na spremembe mehanskih lastnosti polnil, njihove pritrditve

na sosednji okvir, potencialne možne spremembe geometrije v času uporabe konstrukcije in neenakomerno velikost poškodb med potresom. V skladu s standardom je treba s posebnimi ukrepi preprečiti krhki lom in predčasni razpad zidanih polnil.

2.2 Računski modeli opečnega polnila

Računsko modeliranje odziva armiranobetonskih okvirjev z zidanimi polnili je zahteven inženirski problem, saj se te konstrukcije med močnimi potresi obnašajo zelo nelinearno, kar je posledica tako interakcije med zidanimi polnili in primarno okvirno konstrukcijo kot tudi »krhkega« obnašanja polnil.

Pri modeliranju polnil potrebujemo informacijo o togosti polnila kot tudi računski model, s

katerim vpeljemo mehanske lastnosti polnila v analizo. V literaturi je mogoče najti sorodne izraze za efektivno togost enoladijskega in enonadstropnega okvirja z zidanim polnilom (Tomažević, 2009) ali samo za togost polnila (Iacobelli, 2010), ki so izpeljani na osnovi znanih izrazov iz mehanike.

Prvi eksperimentalni poskusi modeliranja odziva armiranobetonskih okvirjev z zidanimi polnili na potresno obtežbo so pokazali, da je mogoče togost zidanih polnil v računskih modelih modelirati s fiktivno nadomestno diagonalo z ustreznimi geometrijskimi in mehanskimi lastnostmi. Računske modele z nadomestno diagonalo imenujemo makromodeli. Njihov namen je, da v računskem modelu armiranobetonskega okvirja z zidanim

polnilom, slika 1, z nadomestno tlačno diagonalo simuliramo zidano polnilo, kot je prikazano na sliki 2.

Nadomestni diagonalni je treba določiti ustrežne geometrijske in mehanske parametre, s katerimi se definira njena togost. Pri tem so različni avtorji predstavili različne variacije dveh temeljnih parametrov tega osnovnega modela: položaja in širine nadomestne diagonale. Aktualno stanje modeliranja zidanih polnil z makromodeli je zbrano v delu Asterisa in sodelavcev (Asteris, 2011).

Zidano polnilo v armiranobetonskem okvirju zamenjamo z nadomestno diagonalo, kjer so: H – računška višina armiranobetonskega okvirja, merjena od tal do središčne osi nosilca, L – računška širina armiranobetonskega okvirja, merjena od središčne osi levega stebra do središčne osi desnega stebra,

H_n – višina zidanega polnila,

L_n – širina zidanega polnila,

b_c – širina armiranobetonskega stebra,

h_b – višina armiranobetonskega nosilca,

d_m – dolžina nadomestne diagonale

$$d_m = \sqrt{H_{in}^2 + L_{in}^2},$$

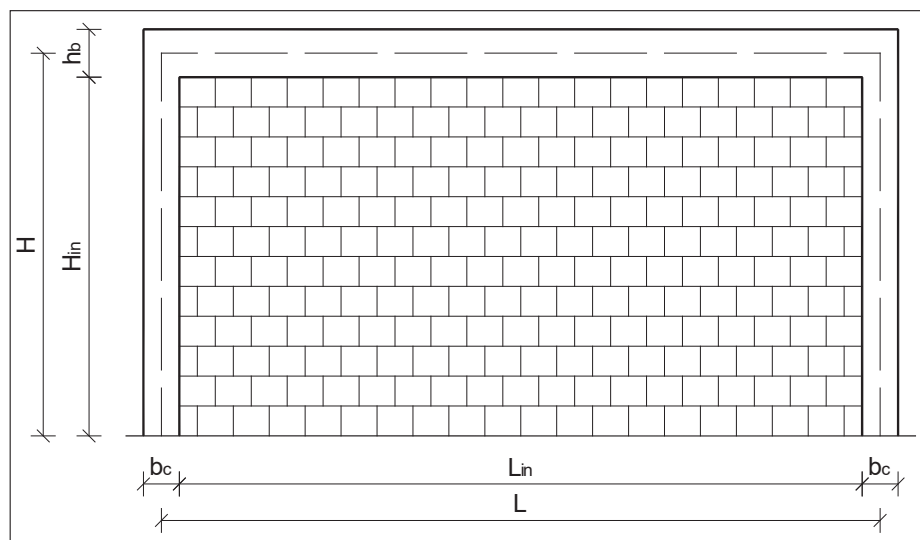
w – efektivna širina nadomestne diagonale,

θ_1 – naklon diagonale polnila

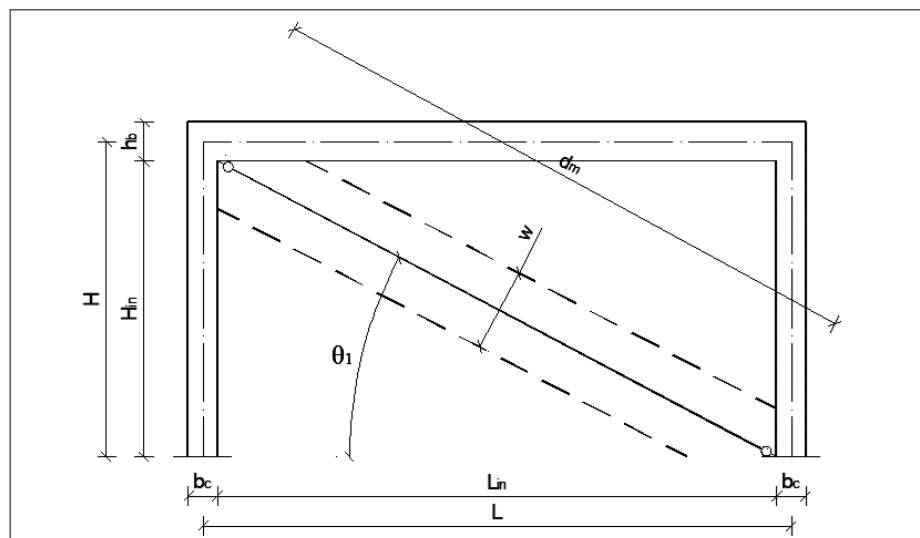
$$(\theta_1 = \tan^{-1}(\frac{H_{in}}{L_{in}})).$$

Ta računski model je v praksi tudi najpogosteje uporabljan, predvsem zaradi njegove relativne enostavnosti kot tudi zaradi dejstva, da gre za najstarejši in posledično v strokovni praksi tudi najbolj prepoznaven računski model. Čeprav ta model relativno kvalitetno opiše dejansko togost, ki je posledica zidanega polnila, je največja pomanjkljivost tega osnovnega računškega modela, ki je pomembna predvsem v potisni analizi, da ni zmožen računsko zajeti lokalnih obremenitev zidu na armiranobetonski okvir, ki se pojavijo zaradi interakcije med okvirjem in polnilom. Zato so, predvsem z namenom boljšega simuliranja interakcije med okvirjem in polnilom v potisni analizi, številni avtorji predlagali nadgradnjo tega računškega modela (Fiore, 2016).

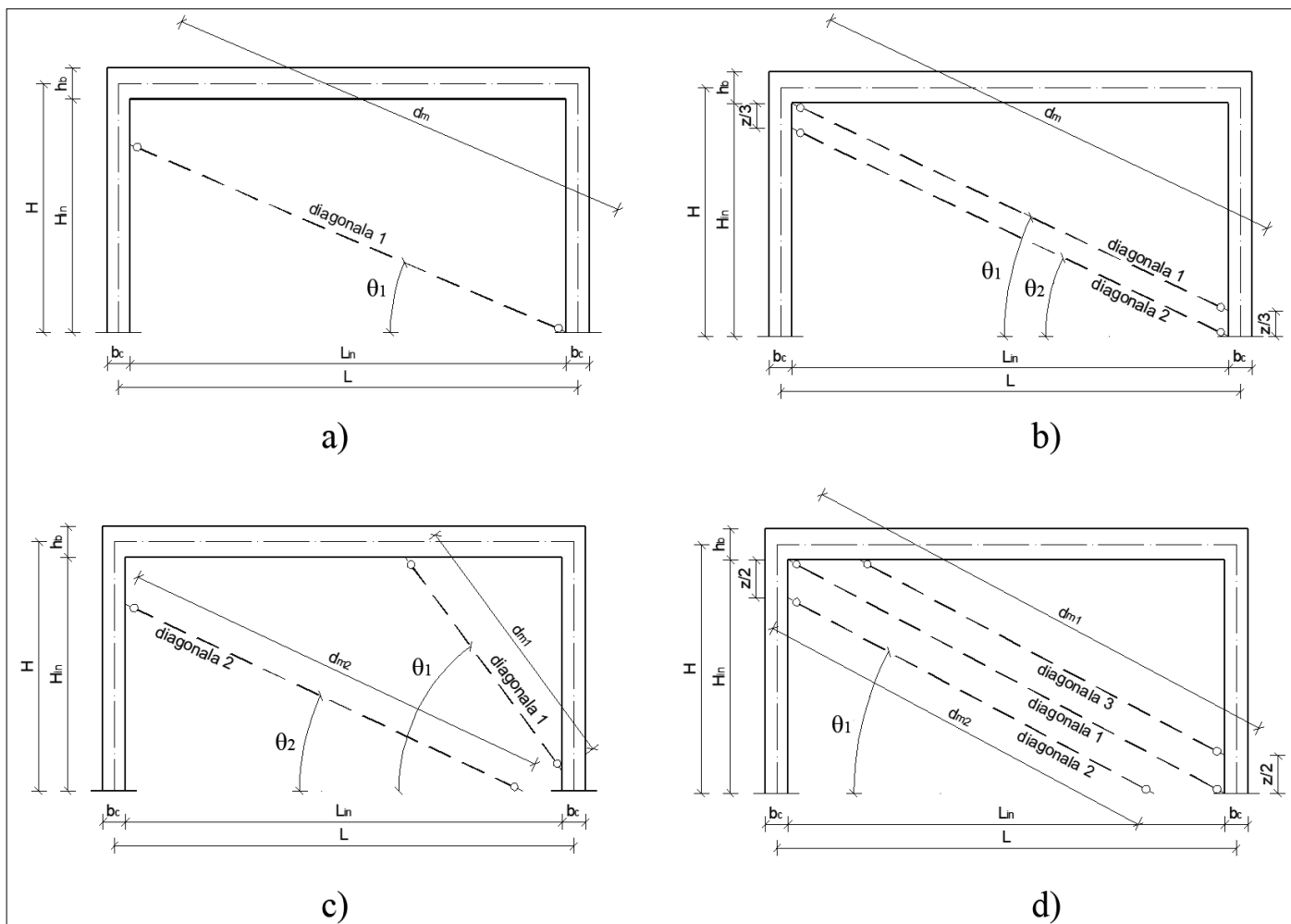
Nadgrajene različice osnovnega modela različnih avtorjev se razlikujejo tako po številu kot po položaju nadomestnih diagonal ter po načinu določitve širine nadomestne diagonale. Slika 3 prikazuje modele z nadomestnimi diagonalami, ki se razlikujejo po številu in naklonu nadomestnih diagonal ((Asteris, 2011), (Fiore, 2016), (Cavaleri, 2014)). V modelu na sliki 3.a je zidano polnilo nadomeščeno z eno diagonalo, ki ima prijemališče premaknjeno zunaj



Slika 1 • Armiranobetonski okvir z zidanim polnilom.



Slika 2 • Računski model zidanega polnila z nadomestno diagonalo.



Slika 3 • Alternativni računski modeli.

slika stebra in nosilca. Nadgradnjo osnovnega modela predstavlja tudi vpeljava dodatne diagonale: v modelu 3.b je tako dodana diagonala, pri čemer sta diagonali med seboj vzporedni; pri modelu na sliki 3.c pa sta diagonali modelirani pod različnima naklonoma. V modelu na sliki 3.d je zidano polnilo nadomeščeno s tremi vzporednimi diagonalami.

2.3 Mehanske lastnosti nadomestne diagonale

Za izračun širine nadomestne diagonale in njene togosti potrebujemo elastični modul v smeri nadomestne diagonale. Izračunamo ga po enačbi:

$$E_m = \frac{1}{\frac{1}{E_{m1}} \cos^4 \theta + \left[\frac{2\nu}{E_{m1}} + \frac{1}{G_m} \right] \cos^2 \theta \sin^2 \theta + \frac{1}{E_{m2}} \sin^4 \theta} \quad (1)$$

kjer so:

E_{m1} – modul elastičnosti zidanega polnila vzdolž vodoravnih maltnih spojev,

E_{m2} – modul elastičnosti zidanega polnila pravokotno na vodoravne maltna spoje,
 ν – Poissonov koeficient zidu vzdolž diagonale.

2.4 Geometrijske lastnosti nadomestne diagonale

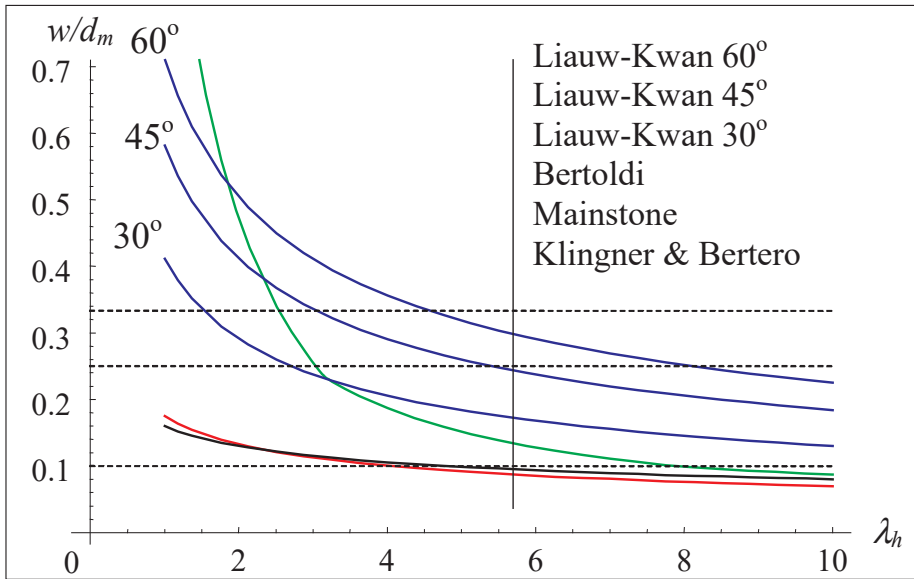
Določitev debeline in efektivne širine nadomestne diagonale w

Geometrijske lastnosti nadomestnih diagonal so njene dolžina, širina in debelina, ki pa so predmet mnogih raziskav različnih avtorjev, saj gre za fiktivne nadomestne vrednosti. Najmanj diskusije je glede izbire debeline diagonale t , saj večina avtorjev predpostavlja, da je enaka debelini zidanega polnila.

Dolžina posamezne nadomestne diagonale d_m je odvisna od mesta, kjer se diagonala stikuje z AB-okvirjem, ta pa so podana glede na predloge avtorjev posameznih modelov. Togost zidanih polnil se z večanjem horizontalne obtežbe in pomikov manjša, kar je posledica odpovedi oz. razpadanja zidanih polnil.

Zato je ni mogoče podati z enolično vrednostjo, kot je to običajno mogoče pri enostavni linearni elastični analizi. Spreminjanje togosti lahko povežemo s širimi fazami obnašanja polnila. Prva faza predstavlja začetno dominantno strižno obnašanje nerazpokanega zidanega polnila. Druga faza zajema odziv polnila po odcepitvi od okvirne konstrukcije. Tretja faza zajema upadanje nosilnosti polnila po doseženem kritičnem pomiku/obremenitvi. Zadnja definira končno preostalo nosilnost zidanega polnila.

Ena najenostavnejših možnosti upoštevanja spreminjanja togosti polnila je preko spreminjanja širine nadomestne diagonale w , ki je sicer geometrijski parameter (poleg števila in lokacij nadomestnih diagonal), vendar ima izredno velik vpliv na mehanske lastnosti (togost) modela. Teoretično se efektivna širina w med spreminjanjem obtežbe časovno spreminja in je odvisna od trenutnega stanja zidanega polnila. Efektivna širina je na začetku, ko je zidano polnilo nerazpokano, večja in



Slika 4 • Spreminjanje razmerja $\frac{w}{d_m}$ glede na koeficient λ_h

se nato z večanjem poškodovanosti zidanega polnila zmanjšuje. V računskih modelih pa togosti oziroma efektivne širine ne moremo definirati kot časovno spreminjajoče se, saj ne poznamo spreminjanja obtežbe.

Že pri določitvi začetne efektivne širine nadomestne diagonale w lahko v literaturi opazimo dva glavna pristopa. Prvi pristop definira efektivno širino w izključno kot funkcijo dolžine nadomestne diagonale d_m . Drugi pristop, ki je zagotovo realnejši in hkrati bolj kompleksen, pa efektivno širino w podaja kot funkcijo večjega števila parametrov. Tako je efektivna širina odvisna od geometrijskih in mehanskih lastnosti zidanega polnila kot tudi armiranobetonskega okvirja.

Prvi je efektivno širino nadomestne diagonale predlagal Holmes (1961) (Asteris, 2011) kot:

$$w = \frac{d_m}{3} \quad (2)$$

Paulay in Priestley (Asteris, 2011) ter Tomažević (Tomažević, 2009) navajajo izraz, s katerim se izračuna manjša vrednost efektivne širine:

$$w = \frac{d_m}{4} \quad (3)$$

Medtem pa v splošnih navodilih za projektiranje na potresnih območjih v Italiji (Fiore et al., 2016) efektivno širino računajo še z bolj konservativnim izrazom:

$$w = \frac{d_m}{10} \quad (4)$$

V vseh treh naštetih primerih je efektivna širina odvisna samo od dolžine nadomestne diagonale.

Pozneje so bili opravljeni številni eksperimentalni preizkusi, ki so omogočili kvalitetnejše ovrednotenje efektivne širine z vpeljavo dodatnih mehanskih in geometrijskih parametrov.

Tako sta Durrani in Luo (Asteris, 2011) na podlagi opazovanj rezultatov, pridobljenih z analizo z metodo končnih elementov in primerjav z drugimi modeli, predlagala naslednji izraz za efektivno širino nadomestne diagonale:

$$w = \gamma \sin(2\theta) d_m \quad (5)$$

Parametra γ in μ sta podana z naslednjima izrazoma:

$$\gamma = 0,32 \sin^{0,5}(2\theta) \left(\frac{E_m t H^4}{m E_c I_c H_{in}} \right)^{-0,1} \quad (6)$$

$$m = 6 \left(1 + \frac{6 E_b I_b H}{\pi E_c I_c L} \right) \quad (7)$$

kjer so:

$E_b E_c$ – modula elastičnosti armiranobetonskega nosilca in stebra,

$I_b I_c$ – vztrajnostna momenta nosilca in stebra.

Stafford Smith (Crisafulli, 2000) je predlagal, da je širina odvisna od geometrijskega razmerja polnila $\frac{H_{in}}{L_{in}}$ in brezdimenzijskega koeficienta λ_h , ki dodatno zajema še geometrijske in materialne karakteristike armiranobetonskega okvirja in zidanega polnila oz. upošteva, kakšno je razmerje med njunima togostma (zidanega polnila in armiranobetonskega okvirja):

$$\lambda_h = H * \sqrt[4]{\frac{E_m t \sin 2\theta}{E_c I_c H_{in}}} \quad (8)$$

Iz enačbe (8) je razvidno, da vrednost koeficienta λ_h narašča z modulom elastičnosti E_m ter naklonom diagonale polnila θ do 45°, nakar začne upadati.

V literaturi tako obstaja veliko različnih enačb, ki za določitev efektivne širine uporabljajo koeficient λ_h . Mainstone (Asteris, 2011) je

na podlagi eksperimentalnih in analitičnih raziskav predlagal empirični izraz, pri katerem je širina odvisna od koeficienta λ_h in dolžine nadomestne diagonale:

$$w = \frac{0,16}{\lambda_h^{0,3}} d_m \quad (9)$$

Podobno kot Mainstone sta tudi Liauw in Kwan (Asteris, 2011) predlagala izraz, ki temelji na eksperimentalnih in analitičnih raziskavah:

$$w = \frac{0,95 \sin 2\theta}{2 \lambda_h^{0,5}} d_m \quad (10)$$

Formula, ki sta jo na podlagi eksperimentalnih in analitičnih raziskav izpeljala Klingner in Bertero (Uva, 2012), ima obliko:

$$w = \frac{0,175}{\lambda_h^{0,4}} d_m \quad (11)$$

Izraz je ena izmed najbolj uporabljenih formul za določitev efektivne širine nadomestne diagonale, saj je vključen v standarda FEMA-274 (1997) in FEMA-306 (1998) za analizo in obnovo stavb. Bila je sprejeta tudi pri številnih raziskovalcih na področju okvirnih konstrukcij z zidanimi polnili.

Bertoldi (Uva, 2012) je svojo definicijo širine w podal v obliki:

$$w = \left(\frac{K_1}{\lambda_h} + K_2 \right) d_m \quad (12)$$

kjer sta K_1 in K_2 koeficienta, odvisna od velikosti λ_h (njune vrednosti so podane v preglednici 1). Na sliki 4 so prikazana razmerja $\frac{w}{d_m}$ različnih avtorjev kot funkcije koeficienta λ_h . Enačbe (2)–(4) so neodvisne od koeficienta

Koeficient	$\lambda_h < 3,14$	$3,14 < \lambda_h < 7,85$	$7,85 > \lambda_h$
K_1	1,3	0,707	0,47
K_2	-0,178	0,01	0,04

Preglednica 1 • Tabela za določitev koeficientov K_1 in K_2 po Bertoldiju

λ_h , zato so na sliki (zgolj zaradi celovitejših primerjav) prikazani kot konstante. Pri enačbah (9)–(12) pa lahko vidimo, da se z večanjem koeficienta λ_h razmerje $\frac{w}{d_m}$ manjša. Pri tem je smiselno pripomniti, da je izraz, ki sta ga podala Liauw in Kwan, eksplicitno odvisen še od kota θ in zato je na sliki podan za tri vrednosti kota θ (30°, 45° in 60°).

S slike 4 vidimo, da je lahko razmerje med maksimalno in minimalno vrednostjo količnika $\frac{w}{d_m}$ približno 3, kot tudi, da dajeta izraza, ki so ju podali Klingner in Bertero ter Mainstone, zelo primerljive vrednosti.

Enega izmed zadnjih izrazov za določitev efektivne širine nadomestne diagonale je objavil Papia (Fiore, 2016). Definiral je novi parame-

ter λ^* , ki hkrati zajema mehanske in dodatne geometrijske karakteristike zidanega polnila kot tudi armiranobetonskega okvirja:

$$\lambda^* = \frac{E_m}{E_c} \frac{tH}{A_c} \left(\frac{H^2}{L^2} + 0,25 \frac{A_c}{A_b} \frac{L}{H} \right) \quad (13)$$

kjer sta:

A_a, A_b – površini prereza stebra in nosilca.

Širina w pa se izračuna po naslednji enačbi:

$$w = \frac{c}{z(\lambda^*)^\beta} d_m, \quad (14)$$

kjer so parametri c , β in z podani z naslednjimi izrazi:

$$c = 0,249 - 0,0116 v + 0,567 v^2 \quad (15)$$

$$\beta = 0,146 + 0,0073 v + 0,126 v^2 \quad (16)$$

$$z = \begin{cases} 1 & \text{če je } \frac{L_{in}}{H_{in}} = 1 \\ 1,125 & \text{če je } \frac{L_{in}}{H_{in}} \geq 1,5 \end{cases} \quad (17)$$

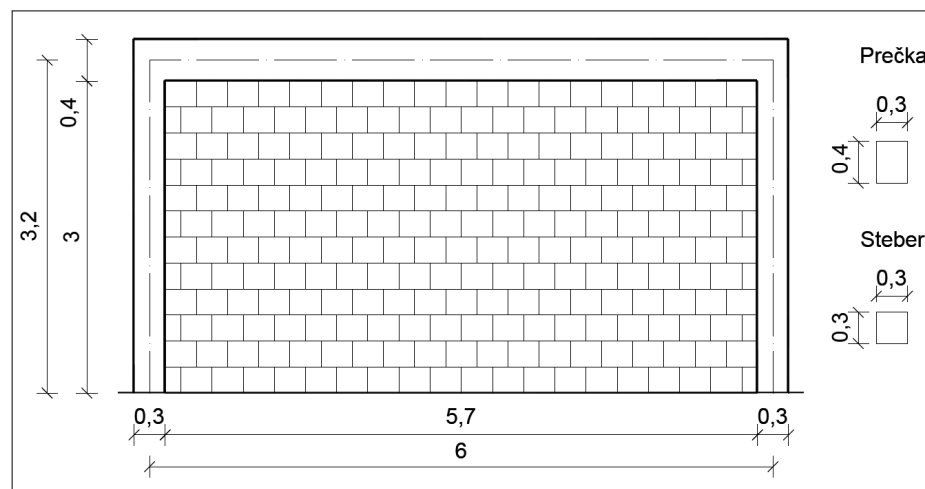
Prikazani modeli in različni načini določitve njihovih geometrijsko-mehanskih lastnosti omogočajo projektantu uporabo velikega števila različnih kombinacij za isti okvir.

2.5 Računska togost polnila, zajeta z nadomestno diagonalo

Določitev togosti ni enostavna naloga, saj je odvisna od geometrijskih in materialnih karakteristik zidanega polnila, pri čemer so parametri za geometrijske karakteristike enostavno določljivi, določitev parametrov za materialne karakteristike pa spremlja velika stopnja negotovosti.

Togost nadomestne diagonale je odvisna od elastičnega modula zidanega polnila v smeri diagonale, njenega prečnega prereza (efektivne širine in debeline polnila) ter dolžine nadomestne diagonale. Horizontalno komponento togosti polnila K_m tako izračunamo po enačbi:

$$K_m = \frac{E_m w t}{d_m} \cos^2 \theta, \quad (18)$$



Slika 5 • Analizirani armiranobetonski okvir z zidanimi polnili.

kjer je izraz za osno togost pomnožen s kvadratom kosinusa naklona nadomestne diagonale. Tako osno togost diagonale pretvorimo v horizontalno togost, ki je v analizi dejansko potrebna.

2.6 Prikaz uporabe različnega modeliranja AB-okvirja s polnilom

Za pridobitev osnovnega vpogleda v to, kako velik vpliv ima togost polnila na togost celotne konstrukcije, je bila narejena analiza togosti enostavnega AB-okvirja s polnilom običajnih geometrijskih in mehan-

L (m)	H (m)	f_k (MPa)	f_{fk} (MPa)	f_{vk} (MPa)	E_{m1} (MPa)	E_{m2} (MPa)	G_m (MPa)	ν	E_c (MPa)
6,0	3,2	4,5	0,2	0,2	5038	6401	2560,4	0,25	31000

Preglednica 2 • Geometrijske in mehanske karakteristike AB-okvirja z zidanim polnilom

skih vrednosti (Lešič, 2017). Analiza je bila narejena na tipičnem izbranem prtiličnem armiranobetonskem okvirju dolžine 6,3 m in višine 3,4 m, slika 5. Stebra okvirja imata dimenziji 30 x 30 cm, prečka pa 30 x 40 cm. Svetla dolžina zidanega polnila z debelino $t = 0,3$ m znaša $L_{in} = 5,7$ m, višina pa $H_{in} = 3,0$ m. Kot zidano polnilo je bila upoštevana glinasta opeka dimenzij 250/300/150 mm. Drugi parametri, ki se nanašajo na mehanske lastnosti zidanega polnila in armiranobetonskega okvirja, so podani v preglednici 2.

d_m (m)	t (m)	θ (°)	θ (rad)	E_m (MPa)	λ_n
6,44	0,30	27,76	0,4845	5600,55	4,90396

Preglednica 3 • Geometrijske in mehanske karakteristike nadomestne diagonale

Za uporabljene materiale so bile upoštewane tipične karakteristične vrednosti. Materialne karakteristike za beton (trdnostni razred

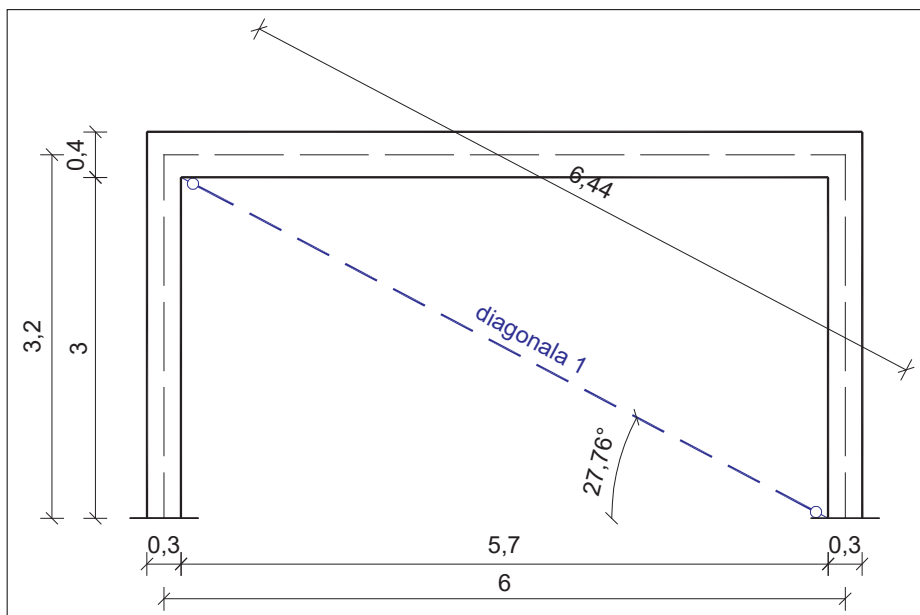
C25/30) in jeklo za armiranje (kvalitete S500) so tako bile prevzete po standardu za betonske konstrukcije. Za opečna polnila so bile tlačne, natezne in strižne trdnosti zidovja (f_k , f_{fk} in f_{vk}) prevzete po Tomaževiču (Tomaževič, 2009). Vrednosti elastičnega modula smo prevzeli po Cavaleriju in Trapaniju (Cavaleri, 2014), kjer so bile vrednosti pridobljene z opravljenimi eksperimentalnimi preizkusi, pri čemer E_{m1} predstavlja elastični modul vzdolž maltnih spojev, E_{m2} pa elastični modul pravokotno na maltne spoje. Vrednosti elastičnih

modulov E_{m1} in E_{m2} , ki imata velik vpliv na velikost togosti polnila, sta izbrani dokaj konservativno, saj Narayanan in Sirajuddin (Narayanan, 2013) navajata, da je v evropskih državah vrednost modula elastičnosti med 3500 in 34000 MPa, v Avstraliji pa med 7000 in 12000 MPa. Kaushik je s sodelavci (Kaushik, 2007) zbral rezultate 40 testov, pri katerih so bile vrednosti modula elastičnosti med 5030 MPa in 7516 MPa ter povprečna vrednost 6095 MPa, kar predstavlja vrednosti, primerljive z našimi izbranimi.

Vrednost strižnega modula G_m smo privzeli kot 0,4 E_{m2} , kot je pogosto predlagano v literaturi ((Fiore, 2016)), (Iacobelli, 2010)). Vse vrednosti so zbrane v preglednici 2.

Togosti nadomestnih diagonal smo izračunali za vsak prej predstavljeni računski model posebej. Pred določitvijo togosti smo izračunali efektivno širino nadomestne diagonale. Vsi parametri, potrebni za izračun efektivne širine in togosti, so podani na sliki 5 ter v preglednici 2.

Da smo minimizirali vpliv polnila na obnašanje nosilnega sistema, smo se odločili, da bomo obravnavali zgolj model, kjer smo zidano polnilo nadomestili z eno diagonalo, ki je potekala od stičišča levega stebra in prečke do stičišča desnega stebra s temelji, kot je prikazano na sliki 6. Širino nadomestne diagonale w za izbrani model smo izračunali po vseh prej prikazanih izrazih.



Slika 6 • Računski model obravnavanega primera z eno nadomestno diagonalo.

V preglednici 3 so prikazani parametri, ki so odvisni od lege diagonale in so potrebni za izračun njene efektivne širine in posledično togosti. Elastični modul zidanega polnila E_m je izračunan po enačbi (1) za kot θ , pod katerim je postavljena nadomestna diagonala.

V drugem stolpcu preglednice 4 so zbrane in po velikosti urejene izračunane efektivne širine diagonale različnih avtorjev. Vidimo, da se rezultati med seboj zelo razlikujejo, saj je razlika med največjo širino, ki jo dobimo z enačbo, ki jo je predlagal Holmes, in

Avtor	Efektivna širina w (m)	Togost K_m (N/m)
Klingner in Bertero	0,60	$1,2189 \cdot 10^8$
Mainstone	0,64	$1,3065 \cdot 10^8$
Italijanski predpisi (circ. 10/04/1997)	0,64	$1,3157 \cdot 10^8$
Bertoldi	0,99	$2,0284 \cdot 10^8$
Durrani in Luo	0,93	$1,9009 \cdot 10^8$
Liau Kwan	1,14	$2,3263 \cdot 10^8$
Papia	1,56	$3,1900 \cdot 10^8$
Paulay in Priestley	1,61	$3,2893 \cdot 10^8$
Holmes	2,15	$4,3857 \cdot 10^8$

Preglednica 4 • Izračunane efektivne širine in togosti nadomestnih diagonal

najmanjšo širino, ki jo dobimo po avtorjih Klingnerju in Berteru, za obravnavani primer več kot 3,58. Pri tem je treba poudariti, da prikazana razmerja med izračunanimi efektivnimi širinami niso standardna, temveč se od primera do primera razlikujejo.

Prvi razlog za tako velika razhajanja je, da enačbe Holmesa, Paulaya in Priestleyja ter italijanskih predpisov zajemajo samo geometrijske parametre zidanega polnila, medtem ko drugi avtorji s svojimi enačbami zajemajo tudi geometrijske in materialne karakteristike zidanega polnila in okvirja. Prav tako je razlog za velika razhajanja mogoče iskati v različnih pogojih, ki so bili avtorjem na voljo pri njihovih eksperimentalnih preizkusih.

Ko so bile izračunane efektivne širine diagonale po predlagani/pripadajoči enačbi za vsakega avtorja, so bile izračunane tudi pripadajoče togosti. V zadnjem stolpcu preglednice 4 so tako podane pripadajoče togosti diagonal za vsako efektivno širino, kjer so bile togosti izračunane po enačbi (18). Razmerja togosti se ujemajo z razmerji efektivnih širin w , saj so drugi parametri v izračunih togosti identični. Preglednica tako potrjuje, da ima izbira efektivne širine nadomestne diagonale odločujoč vpliv na togost polnila.

Da bi ocenili vrednost prispevka horizontalne togosti nadomestne diagonale k togosti celotne konstrukcije v horizontalni smeri, smo izračunane togosti kombinirali s togostjo čiste okvirne AB-konstrukcije.

Dobljena vrednost, izračunana z metodo končnih elementov, kjer smo upoštevali upogibno obnašanje stebrov, je znašala $1,1411617 \cdot 10^7 \frac{N}{m}$, kar je bistveno manj, kot znaša katerakoli izračunana togost zidnega polnila. Zato smo ponovili izračun togosti okvirne konstrukcije ob predpostavki, da bo, zaradi dominantnega strižnega obnašanja polnila, posledično prišlo tudi do strižnega obnašanja stebrov. S strižnim modelom izračunana togost okvirnega sistema je tako:

$$k_1 = 2 \cdot \frac{12 \cdot E_{cm} \cdot I_c}{h_i^3} = 2 \cdot \frac{12 \cdot 3,1 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2 \cdot 6,75 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4}{3,2^3 \text{ m}^3}$$

$$\frac{1 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2 \cdot 6,75 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4}{3,2^3 \text{ m}^3} = 1,53259 \cdot 10^7 \frac{N}{m}$$

V preglednici 5 so zbrane vse celotne togosti nosilnega sistema ter pripadajoči deleži togosti polnil.

Tudi iz te preglednice je razvidno, da ima togost nadomestne diagonale dominanten vpliv, saj njen delež v nobenem primeru ni manjši od 88 %.

Avtor	Togost (N/m)	delež
Klingner in Bertero	$1,3722 \cdot 10^8$	0,88831
Mainstone	$1,4596 \cdot 10^8$	0,89501
Italijanski predpisi (circ. 10/04/1997)	$1,4690 \cdot 10^8$	0,89567
Bertoldi	$2,1817 \cdot 10^8$	0,92975
Durrani in Luo	$2,0542 \cdot 10^8$	0,92539
Liau Kwan	$2,4796 \cdot 10^8$	0,93819
Papia	$3,3433 \cdot 10^8$	0,95416
Paulay in Priestley	$3,4426 \cdot 10^8$	0,95548
Holmes	$4,5390 \cdot 10^8$	0,96623

Preglednica 5 • Horizontalne togosti celotne konstrukcije za vsako efektivno širino

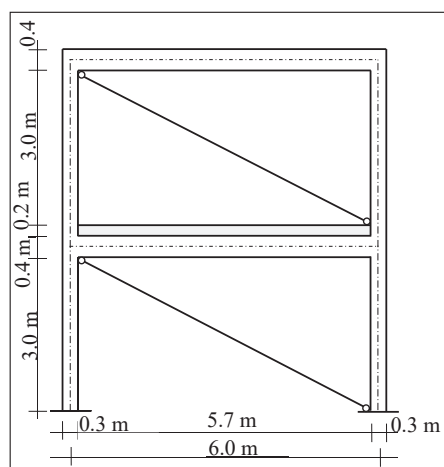
3 • DINAMIČNA ANALIZA IN POTRESNI VPLIVI DVOETAŽNEGA OKVIRA

Preliminarni primer je pokazal, da je prispevek togosti zidanega polnila k celotni horizontalni togosti velik. Da bi lahko bolje ocenili njegov vpliv na potresno obnašanje konstrukcije, smo dodatno analizirali dvoetažni okvir, za katerega smo izračun izvedli za dve stanji: s sodelovanjem zidanega polnila pri prevzemu horizontalnih sil in brez njegovega sodelovanja.

V analizah, kjer je polnilo nastopalo kot nosilni element, smo se omejili na uporabo samo treh izbranih učinkovitih širin. Enačbi avtorjev Klingnerja in Bertera ter Holmesa smo uporabili, ker smo v preliminarnem primeru zanj dobili obe ekstremni vrednosti togosti. Enačbo avtorja Papia smo uporabili zato, ker predstavlja približno srednjo vrednost znotraj vseh vrednosti preostalih avtorjev. Izbiro podkrepljuje tudi dejstvo, da se izbrane enačbe velikokrat pojavljajo v zbrani literaturi ((Fiore, 2012), (Cavaleri, 2014), (Fiore, 2016))). Da bi omejili vpliv različnih dimenzij polnila na analizo, smo uporabili identična polnila kot v osnovnem primeru. Tako smo naredili štiri analize: eno brez sodelovanja polnila pri prevzemu horizontalnih obtežb ter tri (za zgoraj omenjene avtorje) s sodelovanjem polnila pri prevzemu horizontalnih obtežb.

3.1 Predstavitev stavbe

Stavbo tvorita dva identična vzporedna ravninska okvirja, slika 7. Stebri imajo pravokotni prerez dimenzij 30/30 cm, grede pa pravokotni prerez dimenzij 30/40 cm. Zaradi minimiziranja vpliva računskega modela polnil



Slika 7 • Računski model obravnavanega primera z eno nadomestno diagonalo.

so dimenzije polnil v obeh etažah identične, pri čemer so dimenzije in mehanske lastnosti polnil identične kot v preliminarnem zgledu.

Za stavbo je bilo upoštevano, da predstavlja skladišče, in zato je kot koristna obtežba na tleh q_k upoštevana vrednost 7,5 kN/m². Pri analizi mas sta bili upoštevani vrednosti koefficientov $\psi = 0,8$ in $\varphi = 1,0$.

Obravnavan je bil le nadzemni del objekta, ki je bil upoštevan kot togo vpet v pritičju. Predpostavili smo, da so vertikalne deformacije stebrov zanemarljivo majhne in da so vse mase koncentrirane v višini prečk oz. etaž. Računski model je bil ravninski in imel dve prostostni stopnji: vodoravna pomika mas obeh etaž, oštevilčena od spodaj navzgor. Zanemarili smo tudi vpliv dušenja.

Za stavbo je bilo privzeto, da je v Mariboru (tip tal C), predvidena življenjska doba je bila 50 let, in zato smo vrednost vrhnjega pospeška tal odčitali kot 0.1 g. Izbrana stopnja duktilnosti (ki se je izražala v ustreznem faktorju obnašanja q) je bila DCM in za faktor kategorije pomembnosti γ_1 je bila upoštevana vrednost 1.

3.2 Model z upoštevanjem prispevka togosti zidanih polnil pri vodoravni togosti

Ker polnila dominantno prispevajo k skupni togosti, njihovo obnašanje pa je strižno, smo tudi za stebre upoštevali strižno obnašanje, hkrati pa smo maso polnil posamezne etaže razdelili na dva enaka dela, kot je to običaj pri stebrih. Tako je bila dobljena naslednja masna matrika konstrukcije:

$$\begin{bmatrix} 66379,87 & 0 \\ 0 & 42224,55 \end{bmatrix} \text{ kg}$$

	Klingner in Bertero	Papia	Holmes	Okvirna konstrukcija
T_1 (s)	0,1934	0,1237	0,1061	0,7526
m_1 (kg)	104149	104335	104368	89202
% m_1	95,90	96,07	96,10	87,14
F_{b1} (N)	157684	129288	122106	55716
T_2 (s)	0,0802	0,0509	0,0436	0,2944
m_2 (kg)	4456	4269	4236	13162
% m_2	4,10	3,93	3,90	12,86
F_{b2} (N)	4759	4068	3915	10312

Preglednica 6 • Nekateri dinamično potresni parametri za vse računske modele

Za ta model smo izračunali tri togostne matrike, v katerih smo uporabili različne definicije za sodelujočo širino nadomestne diagonale. Izračunane togosti AB-okvirja ter zidanih polnil smo v skladu s standardom Evrokod 8-1 reducirali na polovico. Dobljene so naslednje togostne matrike (m/N) (po Klingnerju in Bertera, Papii ter Holmesu):

$$[K_{KB}] = \begin{bmatrix} 2,6943 & -1,3222 \\ -1,3222 & 1,3222 \end{bmatrix} \cdot 10^8 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$[K_P] = \begin{bmatrix} 6,63654 & -3,2933 \\ -3,2933 & 3,2933 \end{bmatrix} \cdot 10^8 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$[K_H] = \begin{bmatrix} 9,0279 & -4,4890 \\ -4,4890 & 4,4890 \end{bmatrix} \cdot 10^8 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Primerjava togostnih matrik pokaže velike razlike med posameznimi matrikami, kjer so največje togosti pričakovano dobljene pri modelu z največjo širino nadomestne diagonale (deleži polnila k celotni togosti pritičja so različni in znašajo 88,381 %, 95,416 % ter 96,624 % togosti pritičja).

Razmerja med posameznimi členi obeh ekstremnih matrik niso enaka za vse člene, so pa medsebojno podobna in znašajo 3,351 in 3,395. Ta razmerja so nekoliko manjša, a vseeno primerljiva z razmerjem ekstremnih širin nadomestne diagonale, ki znaša 3,583.

Za vse tri modele je bila narejena modalna analiza s spektri odziva in rezultati (nihajni časi T_1 in T_2 , efektivne modalne mase m_1 in m_2 ter njihovi odstotki glede na celotno maso so zbrani v preglednici 6). Drugi, tretji in četrti stolpec preglednice, ki pripadajo modelu z upoštevanjem togosti polnila, pokažejo, da je v skladu s standardom Evrokod 8-1 za vse tri modele mogoče upoštevati samo prvo nihajno obliko, saj sta bila izpolnjena oba pogoja standarda.

Čprav so iz drugega, tretjega in četrtega stolpca preglednice razvidne opazne razlike

med nihajnimi časi (razmerje med ekstremnima nihajnima časoma znaša 1,82), so vrednosti modalnih mas kot tudi njihovi deleži znotraj posameznih modelov dokaj podobni (razmerje med obema ekstremnima prvima modalnima masama znaša 1,002, pri drugih dveh, ki pa za nadaljnjo potresno analizo nista posebej zanimivi, pa je razmerje 1,052).

3.3 Model brez upoštevanja prispevka togosti zidanih polnil k vodoravni togosti

V tem modelu smo stebre modelirali kot upogibno deformabilne. Zaradi predpostavke ločenega gibanja stebrov in polnila smo maso polnil etaže v celoti prištelili masi v prostostni stopnji, ki pripada translacijskemu pomiku spodnjega vozlišča stebra. Tako je bila dobljena naslednja masna matrika konstrukcije:

$$\begin{bmatrix} 66379,87 & 0 \\ 0 & 35984,55 \end{bmatrix} kg,$$

ki ima za 14,78 % manjšo maso v drugi prostostni stopnji kot v prvem modelu.

Za ta model smo togostno matriko izračunali po definiciji z uporabo modela končnih elementov in dobljena je bila naslednja togostna matrika konstrukcije:

$$[K_{okv}] = \begin{bmatrix} 22,79951 & -8,56459 \\ -8,56459 & 6,54473 \end{bmatrix} \cdot 10^6 \frac{N}{m},$$

kjer so (pričakovano) bile dobljene znatno manjše vrednosti. Dodatno smo (zgolj zaradi kontrole) izračun ponovili tudi s pomočjo enačb Sigalova (Fajfar, 1984), ki je vodil do nekoliko manjših, a vseeno primerljivih vrednosti (največja razlika je znašala 3,23 % in je nastopila pri izvendagonalnih členih).

Tudi za ta model je bila narejena modalna analiza s spektri odziva (zadnji stolpec preglednice 6), ki pa je pokazala, da je v skladu s standardom Evrokod 8-1 za ta model potrebno upoštevati obe nihajni obliki, saj ni bil izpolnjen nobeden izmed pogojev standarda.

Iz preglednice je očitno, da se nihajna časa tega modela bistveno razlikujeta od vrednosti, dobljenih za prve tri modele. Pri prvem nihajnem času je razmerje med maksimalnim in minimalnim nihajnim časom vseh modelov 7,09, pri drugem pa 6,75.

3.4 Izračun celotnih prečnih sil in pripadajočih sil v etažah

Pri okvirni konstrukciji smo pri izračunu upoštevali vrednost za večetažni okvir z enim poljem $\alpha_w/\alpha_1 = 1,2$ (faktor k_w za okvirne sisteme je 1,0), kar je vodilo do faktorja obnašanja $q = 3,6$.

Okvirno konstrukcijo s polnili smo klasificirali kot stenasti sistem in pri izračunu upoštevali vrednost $\alpha_w/\alpha_1 = 1,2$. Faktor k_w smo izračunali kot $(1+3/5,7)/3 = 0,5088$, kar je vodilo do faktorja obnašanja $q = 1,832$. Izračunane vrednosti celotnih prečnih sil F_{bi} (za celo konstrukcijo) so zbrane v preglednici 6.

Iz preglednice 6 je očitno, da so vse vrednosti, ki pripadajo modelom z upoštevanjem togosti polnila, približno enakega velikostnega razreda (za prvo nihajno obliko je razmerje med ekstremnima vrednostma 1,29, pri drugi nihajni obliki pa znaša 1,22).

Pri primerjavi vrednosti modelov s polnilom z vrednostma za čisti okvir je viden očitni vpliv upoštevanja polnila na velikost celotnih prečnih sil F_{bi} (baznih sil), ki pa je različen za obe nihajni obliki. Upoštevanje togosti polnila pri prvi nihajni obliki, namreč vodi do potresne sile, ki je med 119,16 % in 183,14 % večja glede na model brez upoštevanja polnila, medtem ko je celotna prečna sila za drugo nihajno obliko nižja tudi za 62,03 %.

Te sile so bile s pomočjo pripadajočih lastnih vektorjev porazdeljene po višini posameznega okvirja, vrednosti pa so podane v preglednici 7. Posledice večjih celotnih prečnih sil F_{b1} so tudi večje sile po etažah prvih treh modelov.

Z izračunanimi silami smo obremenili računske modele konstrukcij ter naredili analizo reakcij, notranjih statičnih količin in etažnih pomikov, pri čemer smo za čisti okvir izvedli kombiniranje vrednosti po pravilu SRSS, torej korena iz vsote kvadratov. V preglednici 7 so zbrani upogibni momenti M in prečne sile V v stebrih spodnje etaže na mestu vpetja, kjer so pričakovane ekstremne vrednosti. Iz preglednice je razvidno, da polnilo prevzame večino potresne prečne sile (med 88,8 in 96,6 %, pri čemer so te vrednosti identične deležem togosti polnila v celotni togosti pritličja).

Iz preglednice je dalje očitno, da so že med vrednostmi upogibnih momentov M , ki pripadajo modelom z upoštevanjem togosti polnila in za katere je razlika med vplivi, torej celotnimi prečnimi silami, manjša od 30 %, razlike za upogibne momente bistveno večje. Tako je največja vrednost za kar 327 % večja od najmanjše. Razmerje učinkov vplivov (momentov) je tako popolnoma neperimerljivo z razmerjem vplivov (potresnih prečnih sil). Enaka ugotovitev velja tudi za prečne sile V na dnu stebra, saj je največja vrednost ponovno za 327 % večja od najmanjše.

Še opaznejše razlike nastopijo pri primerjavi vrednosti z rezultati čistega okvirja, kjer je rezultirajoči upogibni moment M pri čistem okvirju večji med 275 % in 1501 % (razmerje vrednosti je med 3,75 in 16,01). Podobno velike razlike nastopajo tudi pri primerjavi prečnih sil, kjer je prečna sila V za čisti okvir večja med 222 % in 1274 % (razmerje vrednosti je med 3,22 in 13,74). Čeprav so potresni vplivi F_{bi} bistveno večji pri konstrukcijah, kjer polnilo sodeluje pri prevzemu vodoravnih obtežb, je iz preglednice jasno viden pozitiven učinek polnila, saj je vrednost upogibnega momenta M kot tudi prečne sile V kljub temu opazno manjša. Pri primerjavi rezultatov prečnih sil in upogibnih momentov se je treba zavedati, da model z eno samo nadomestno diagonalo koncentrirano vpliv polnila v vogalno točko stika vrha stebra in grede, s čimer v analizi ne nastopajo vzdolž stebra dejansko zvezno porazdeljeni lokalni učinki polnila, ki izhajajo iz medsebojne interakcije polnila in okvirja. Negativna posledica modela z eno samo nadomestno diagonalo so tako nepravilne razporeditve upogibnih momentov ter prečnih sil vzdolž stebrov ter posledično podcenjeni upogibni momenti v okvirju (prečne sile na dnu stebrov morajo biti točne zaradi zagotovitve ravnotežja sil v vodoravni smeri).

Etaža	Klingner	Papia	Holmes	Okvir 1.n.o.	Okvir 2.n.o.	SRSS
F_{21} (N)	38603	31508	29733	14902	-4596	-
F_{11} (N)	40239	33136	31320	12956	9752	-
M (Nm)	7045	2371	1649	26089	4071	26405
V (N)	4403	1482	1031	13929	2578	14166
$d_{e,2}$ (mm)	1,733	0,578	0,401	11,882	-0,561	11,896
$d_{e,1}$ (mm)	1,149	0,387	0,267	5,600	0,645	5,637
$d_{s,2}$ (mm)	3,174	1,059	0,735	42,777	-2,018	42,824
$d_{s,1}$ (mm)	2,105	0,708	0,493	20,160	2,321	20,294

Preglednica 7 • Vodoravne etažne potresne sile na posamezni okvir

Vodoravni etažni pomiki ($d_{e,ir}$, dobljeni z linearno-elastično analizo, kot $d_{s,ir}$, ki predstavljajo pomike zaradi projektnega potresnega vpliva) so zbrani v preglednici 7. Tako kot pri upogibnih momentih in prečnih silah je tudi iz primerjave pomikov očitno, da so že med prvimi tremi vrednostmi, ki pripadajo modelom z upoštevanjem polnila in za katere je razlika med celotnimi strižnimi silami manjša od 30 %, razlike bistveno večje. Za pomik na vrhu je razmerje med

največjo in najmanjšo vrednostjo kar 4,32 (oz. je največja vrednost za 332 % večja od najmanjše), pri spodnji etaži pa sta razmerji praktično enaki. Še očitnejše razlike so opazne pri upoštevanju vrednosti za čisti okvir, kjer v vrhnji etaži nastopi razmerje pomikov zaradi projektnega potresnega vpliva med 13,49 in 58,26.

Dobljeni rezultati so pokazali, da je velikemu številu študij različnih avtorjev navkljub,

obnašanje polnila še vedno povezano z veliko negotovostmi in zato veliko skrb vzbujajo morebitne negativne posledice, če do pri projektiranju upoštevanega sodelovanja nosilnih sistemov okvirja in polnila med delovanjem potresnega vpliva dejansko ne bi prišlo. Ravno ta negotovost opravičuje uporabo precej konservativnejše, a hkrati manj ekonomične analize čistega okvirja, ki pa je zato šteta za analizo na t. i. »varni strani«.

4 • ZAKLJUČEK

V prispevku smo analizirali vpliv modeliranja zidanih polnil na obnašanje AB-okvirjev z zidanimi polnili, kar je posebej zanimivo pri analizi potresnega obnašanja stavbe. Matematično modeliranje armiranobetonskih okvirjev z zidanimi polnili je zapleten inženirski problem, saj take konstrukcije pri potresih izkazujejo zelo nelinearni odziv, ki je posledica interakcije med krhkimi zidanimi polnili in duktilno primarno okvirno konstrukcijo. Eden izmed različnih makromodelov zidanih polnil je nadomestna tlačna diagonalna z ustreznimi geometrijskimi in mehanskimi lastnostmi. Med temi parametri ima veliko vlogo širina nadomestne diagonale, za katero so številni avtorji predlagali svoje izraze.

Da bi dobili jasnejši pregled o tem, kakšna je inženirska uporabnost zbranih izrazov, smo z devetimi izrazi, pridobljenimi iz strokovne oz. znanstvene literature, določili širine nadomestne diagonale, z njimi izračunali togosti polnila ter jih medsebojno primerjali na primeru enoetažnega okvirja. Ker je analiza pokazala velik vpliv prispevka polnila k horizontalni togosti, smo naredili analizo še za dvoetažno stavbo, ki smo jo analizirali s štirimi računskimi modeli. Za modeliranje okvirja z zidanimi

polnili smo uporabili tri različne učinkovite širine diagonal, zaradi boljšega razumevanja vpliva polnila pa smo dodatno naredili še analizo za čisti okvir. Za vsak model konstrukcije smo izračunali dinamične karakteristike (nihajne čase in nihajne oblike ter učinkovite modalne mase), rezultirajoče strižne sile ter njihove porazdelitve po višini, pripadajoče etažne pomike ter vrednosti upogibnih momentov in prečnih sil na dnu stebra pritičja.

Dobljeni rezultati so pokazali, da so razhajanja med togostmi nadomestne diagonale po posameznih avtorjih zelo velika, saj lahko opazimo tudi več kot 3,5-kratno razmerje med ekstremnimi vrednostma. Iz prikazanih rezultatov modelov z upoštevanjem togosti polnil je dalje očitno, da so potresni vplivi oz. celotne strižne sile $F_{b,1}$ resda večji kot pri čistem okvirju, vendar so njihovi učinki (upogibni moment in prečna sila v stebri kot tudi vodoravni pomiki, ki so ključni parametri za zagotovitev obeh temeljnih zahtev standarda Evrokod 8-1) kljub temu opazno manjši. Pri tem se je treba zavedati, da dobljenih razmerij med vrednostmi modelov z upoštevanjem polnil in brez upoštevanja ne moremo posploševati za poljubno konstrukcijo. Drugačne dimenzije polnil kot tudi prisotnost

odprt in polnilih (npr. zaradi drugačne namembnosti konstrukcije) spremeni njihovo togost in posledično njihov vpliv na celotno togost konstrukcije.

Študija je tako jasno potrdila pozitivne konstruktorske učinke upoštevanja odpornosti opečnih polnil pri prevzemu potresne obtežbe, kar je brez dvoma zelo privlačno s konstruktorskega kot tudi ekonomskega vidika. Na drugi strani pa je pokazala tudi izredno velika odstopanja izračunanih togosti po izrazih različnih avtorjev, kar je velika ovira pri kvalitetni implementaciji.

Zagotovo je smotno, da se modeliranje polnila širše uporablja v vsakdanji konstruktorski praksi, vendar bi bilo treba sprejeti vsaj inženirska priporočila oz. smernice glede uporabe računskega modela. Na osnovi inženirskega konsenza bi iz velike in praktično nepregledne množice modelov ter parametrov bilo treba izbrati referenčni računski model, ki bi ga bilo smiselno vključiti tudi v predpise, s čimer bi se projektantom v praksi poenostavila izbira ustreznega modela za izvedbo konstruiranja. Tako pa velik nabor definicij za nadomestno diagonalno neodgovornemu oz. nekritičnemu projektantu posredno ponuja (na osnovi znanstvenih prispevkov) široko »izbiro« togosti ter tako omogoča nevarno manipuliranje (oz. zlorabo procesa) z rezultati analize, kar pa je za dobro inženirsko prakso seveda popolnoma nesprejemljivo.

5 • ZAHVALA

Zadnji avtor se zahvaljuje za delno finančno podporo Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (šifra programa P2-0129 (A), Razvoj, modeliranje in optimiranje objektov in procesov v gradbeništvu in prometu).

6 • LITERATURA

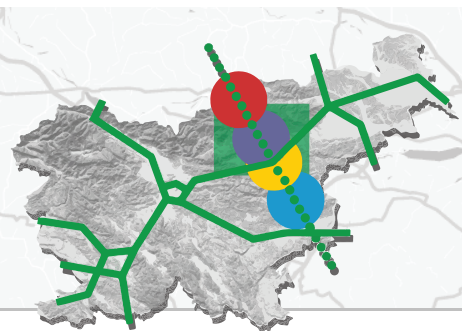
- Asteris, P. G., Antoniou, S. T., Sophianopoulos D. S., Chrysostomou, C. Z., Mathematical Macromodeling of Infilled Frames: State of the Art, American Society of Civil Engineers, 2011.
- Cavaleri, L., Trapani, F. D., Cyclic response of masonry infilled RC frames: Experimental results and simplified modeling, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014.
- Crisafulli, F. J., Carr, A. J., Park, R., Analytical modelling of infilled frame structures - A general review, Bulletin of the New Zealand society for earthquake engineering, 2000.
- Fajfar, P., Dinamika gradbenih konstrukcij, Univerza v Ljubljani, 1984.
- Fiore, A., Netti, A., Monaco, P., The influence of masonry infill on the seismic behaviour of RC frame buildings, Engineering Structures, 2012.
- Fiore, A., Spagnoletti G., Greco R., On the prediction of shear brittle collapse mechanisms due to the infill-frame interaction in RC buildings under pushover analysis, Engineering Structures, 2016.
- Iacobelli, F., Progetto e verifica delle costruzioni in muratura in zona sismica, EPC Editore, 2010.
- Kaushik, B. H., Rai, D. C., Jain, S. K., Stress-Strain Characteristics of Clay Brick Masonry under Uniaxial Compression, Journal of materials in civil engineering, 09, 2007.
- Lešič, V., Vpliv modeliranja polnil v analizi potresnega obnašanja armiranobetonskih okvirjev, Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo UM, magistrsko delo, <https://dk.um.si/IzpisGradiva.php?id=67988>, Maribor, 2017.
- Narayanan, S. P., Sirajuddin, M., Properties of Brick Masonry for FE modelling, American Journal of Engineering Research (AJER), 1, 6–11, 2013.
- SIST, Slovenski inštitut za standardizacijo, SIST EN 1998-1:2005 (sl) Evrokod 8 - Projektiranje potresno odpornih konstrukcij - 1.del: Splošna pravila, potresni vpliv in pravila za stavbe, 2005.
- Tomažević, M., Potresno odporne zidane stavbe, Ljubljana: Tehnis, d.o.o., 2009.
- Uva, G., Raffaele, D., Porco, F., Fiore, A., On the role of equivalent strut models in the seismic assessment of infilled RC buildings, Engineering Structures, 2012.

via vita
STROKOVNI POSVET DRUŠTVA ZA CESTE SEVEROVZHODNE SLOVENIJE

PETEK, 20. APRIL 2018
RAVNE NA KOROŠKEM

6. POSVET O 3. RAZVOJNI OSI ALI GRE SEDAJ KONČNO ZARES?

Načrtovanje 3. razvojne osi se je po nekaj letih mrtvila premaknilo z mrtve točke. Sprejem DPN med Šentrupertom in Velenjem, odkupi zemljišč, izdelava projektne dokumentacije na posameznih odsekih od severa do juga so priložnost za ponovni pregled trenutnega stanja vseh aktivnosti, ki jih pristojni državni organi vodijo na tem projektu.



Vpliv politike na izvajanje projekta 3. razvojne osi

mag. Gregor Ficko, Društvo za ceste SV Slovenije in Aljaž Verhovnik, Mladinska iniciativa za 3. razvojno os

Predstavitev poteka trase na odseku Šentrupert – Velenje – Slovenj Gradec

Andrej Jan, PNZ svetovanje projektiranje d.o.o.

Predstavitev variant poteka trase na odseku Slovenj Gradec – Dravograd – Holmec

mag. Dušan Ogrizek, Lineal d.o.o.

Odvijanje aktivnosti na projektu 3. razvojne osi, sever

Janez Kušnik, DARS d.d.

Odvijanje aktivnosti na projektu 3. razvojne osi jug, na odseku od avtoceste

A2 Ljubljana-Obrežje pri Novem mestu do priključka Maline
dr. Lidija Kegljavič Zagorc, DRI d.o.o.

Predstavitev variant poteka trase na odseku Maline – Metlika – Črnomelj

Tomaž Willenpart, Direkcija Republike Slovenije za infrastrukturo

Študija variant s predlogom najustreznejše variante za gradnjo državne ceste med avtocesto A1 in avtocesto A2 »tretja razvojna os – srednji del«

Rado Romih, Razvojni center Planiranje d.o.o.

Kaj pa glavna cesta G1-1 Maribor – Dravograd?

dr. Marko Renčelj, Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo UM

Čezmejna mobilnost med Koroško regijo in južno avstrijsko Koroško:

predstavitev projekta TRANS-BORDERS
mag. Peter Zajc in Uroš Rozman, RRA Koroška

MODERATOR DOGODKA: SLAVKO BOBOVNIK

www.dcm-svs.si

Kotizacija znaša 95 EUR,
za člane društva DCM 65 EUR
(DDV ni vključen).



FAZNO SPREMENLJIVE SNOVI (PCM) IN NJIHOVA UPORABA V STAVBAH

PHASE CHANGE MATERIALS (PCM) AND THEIR APPLICATION IN BUILDINGS

asist. Luka Pajek, mag. inž. stavb.

luka.pajek@fgg.uni-lj.si

doc. dr. Roman Kunič, univ. dipl. inž. grad.

roman.kunic@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za stavbe in konstrukcijske elemente, Jamova 2, 1000 Ljubljana

prof. dr. Zvonko Jagličič, univ. dipl. fiz.

zvonko.jaglicic@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za matematiko in fiziko, Jamova 2, 1000 Ljubljana, in Inštitut za matematiko, fiziko in mehaniko, Jadranska 19, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 536.63:699.866"322"

Povzetek | Vse pogosteje opažamo, da je v poletnih mesecih brez uporabe klimatskih naprav v novejših stavbah neprijetno vroče. Za to obstaja vrsta razlogov, pri čemer je eden izmed njih zagotovo nezadostna toplotna kapaciteta konstrukcijskih sklopov. Ena rešitev problema je uporaba fazno spremenljivih snovi, znanih tudi pod okrajšavo PCM (angleško Phase Change Material). Z njimi povečamo toplotno kapaciteto konstrukcijskega sklopa ob zanemarljivem povečanju njegove mase, s tem pa izboljšamo toplotno ugodje v notranjem okolju. Pregled literature je pokazal, da je v zadnjem desetletju močno naraslo število raziskav, ki obravnavajo lastnosti PCM, in število izdelkov s PCM za uporabo v stavbah. V prispevku smo z enostavnim izračunom pokazali, da lahko že s tanko plastjo PCM ustvarimo razmere, ki nam ugajajo v stavbah z večjo toplotno kapaciteto. Pri tem moramo paziti, da ima PCM tališče pri temperaturi, okoli katere se najpogosteje dnevno spreminja temperatura zraka. Predstavili smo nekaj primerov različnih vrst fazno spremenljivih snovi in primerov njihove uporabe v gradbenih proizvodih. Fazno spremenljive snovi imajo največji učinek, če jih vgradimo v sloj konstrukcije, ki je čim bližje notranjosti, saj imajo tako hiter odzivni čas, ki je kos dnevnim spremembam temperature. Pomembno je tudi, da jih ne obdamo z materiali nizke toplotne prevodnosti.

Ključne besede: toplotna kapaciteta, fazno spremenljive snovi, PCM

Summary | The occurrence of thermal discomfort in new buildings without air conditioning during summer is becoming a common phenomenon. There are many possible reasons for this condition, one of them definitely being insufficient thermal capacity of building elements. Such overheating of buildings can be mitigated by using phase change material (PCM). PCM is used to considerably increase the thermal capacity of the construction, by only slightly increasing its mass. In such manner, indoor thermal comfort in buildings is improved. A comprehensive literature review showed that in the last decade the number of scientific papers dealing with the application of PCMs in buildings and the number of construction products with incorporated PCM has escalated. By using an elementary calculation, we showed how even a thin layer of PCM may contribute to improved thermal comfort. However, the melting temperature of PCM must be chosen within daily temperature fluctuations. Furthermore, we presented several types of PCMs and a number of examples how PCMs can be used in buildings. Phase change materials have the greatest efficiency, when they are integrated in the innermost part of the construction. This is how they can quickly respond to temperature fluctuations. In addition, it is important that PCM is not covered by any material having low thermal conductivity.

Key words: heat capacity, phase change materials, PCM

1 • UVOD

Pomislimo na obisk srednjeveškega gradu ob vročem poletnem dnevu. Med ogledom razstave uživamo v prijetnem hladu grajskih prostorov. Ti največkrat niti niso hlajeni s klimatskimi napravami. Zakaj je tako, če pomislimo, da je ob enakih zunanjih pogojih in brez uporabe klimatskih naprav v novejših stavbah neprijetno vroče? Za takšno obnašanje obstajata dva poglobljena razloga: praviloma veliko manjši delež steklenih površin v ovoju starih kamnitih stavb in veliko večja toplotna kapaciteta sten starih objektov. V sodobnih stavbah so v slabšem položaju predvsem stavbe in konstrukcijski sklopi, ki imajo lahko nosilno konstrukcijo, npr. leseno, jekleno, tudi skeletno armiranobetonsko ipd. Če takšnim konstrukcijam želimo izboljšati toplotno kapacitivne lastnosti, lahko dodajamo sloje (priporočljivo na notranjo stran) materiala z večjo termično maso, npr. dodamo opečno polnilo v armiranobetonski skelet. Poleg tega lahko toplotno kapaciteto stavbe povečamo tudi z uporabo notranjih oblog ali drugih proizvodov

z večjo toplotno kapaciteto. V tem prispevku bomo obravnavali vpliv toplotne kapacitete konstrukcijskih sklopov, bodisi sten ali horizontalnih konstrukcij, na temperaturno ugodje v stavbah. Predvsem pa bomo opisali, kako lahko s fazno spremenljivo snovjo povečamo toplotno kapaciteto konstrukcijskih sklopov oz. prostora, ne da bi morali znatno povečati debelino slojev.

Fazno spremenljiva snov ali angleško *Phase Change Material* (v nadaljevanju bomo uporabljali okrajšavo PCM) je snov, pri kateri lahko pri prehodu toplote skozi le-to pride do spremembe agregatnega stanja. V stavbarstvu imajo praviloma tovrstne snovi tališča v območju ambientalnih temperatur (20–30 °C). Med taljenjem ali strjevanjem fazno spremenljive snovi ta shrani oz. sprosti veliko količino toplote (latentna oz. talična toplota) na račun svoje notranje energije, ne da bi se pri tem spremenila njena temperatura. Fazno spremenljive snovi spadajo med enostavne,

zanesljive in tudi trajne načine shranjevanja toplote. Zato se je njihova uporaba v zadnjem času, predvsem v gradbeništvu in strojništvu, močno povečala. Poznamo več vrst fazno spremenljivih snovi. Bolj znani so predvsem razne hidratizirane soli ($X \cdot nH_2O$) in parafini (C_nH_{2n+2}). Zaradi različnih snovnih lastnosti (npr. različne temperature tališča, različne specifične talične toplote) niso vsi izmed njih enako uporabni. Slednje je pomembno zlasti pri izbiri ustreznega tipa PCM za uporabo v stavbarstvu, kjer takšne snovi pripomorejo k uravnavanju notranjih temperatur zraka in površinskih temperatur, kar nam omogoči udobnejše notranje toplotno okolje. Zaradi velikega števila možnih snovi, ki jih lahko uporabljamo kot PCM, je namen članka raziskati, katere materiale lahko uporabljamo kot PCM v stavbah, kako se vgrajujejo in kakšne so njihove glavne lastnosti. Pri tem sta nas zanimala predvsem temperatura tališča in specifična talična toplota, posredno tudi njihova gostota in toplotna prevodnost. Želene podatke smo pridobili s pomočjo izračunov in z obširnimi pregledom relevantne znanstvene literature. Rezultati služijo kot podlaga za nadaljnje raziskave na področju uporabe PCM v stavbah.

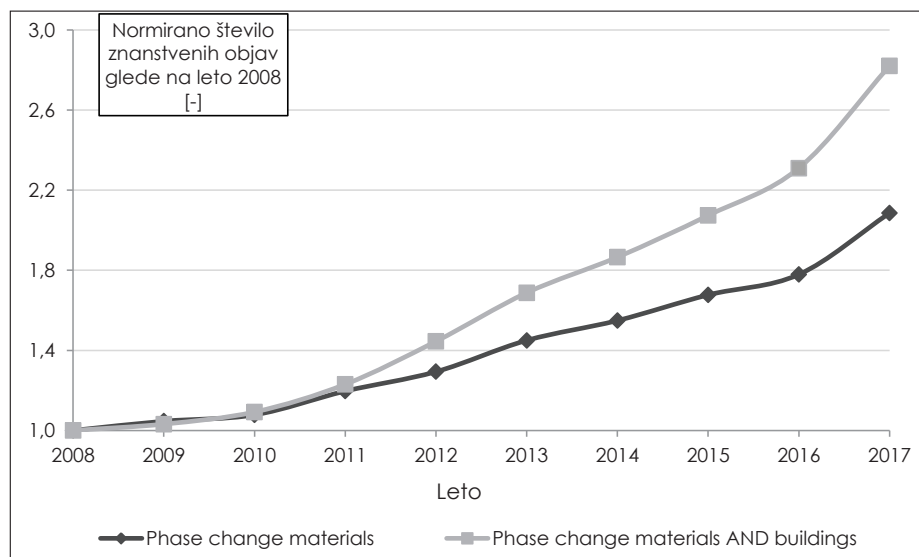
2 • RAZISKANOST PODROČJA

Za namen pričujoče raziskave smo preiskali znanstvene prispevke z vsebino o fazno spremenljivih snoveh. Še posebej smo se osredotočili na uporabo fazno spremenljivega materiala v gradbeništvu. Sistematični pregled literature smo opravili v iskalnih bibliografskih bazah podatkov, kot so *Science Direct*, *Web of Science*, *Cobiss in The Internet Public Library*. Pregledali smo relevantno literaturo, objavljeno med letoma 1987 in 2018. Ugotovili smo, da je večina literature o PCM dostopne v obliki znanstvenih publikacij, predvsem znanstvenih člankov, manj pa je monografij. Pod zadetke v obliki spletnih strani lahko uvrstimo predvsem spletne strani različnih proizvajalcev gradbenih materialov, ki ponujajo izdelke v obliki PCM, katerih ponudba je v zadnjem času v izrazitem porastu. Po pregledu slovenske zakonodaje pa smo ugotovili, da ne vsebuje neposrednih predpisov in navodil za uporabo fazno spremenljivega materiala v gradbeništvu.

S pomočjo spletne baze periodičnih publikacij *Science Direct* smo preučili popularnost PCM

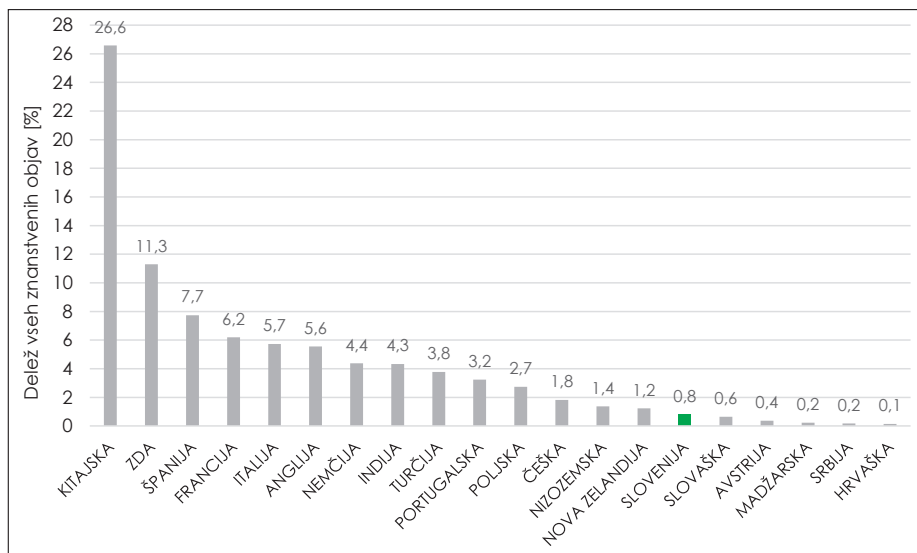
med letoma 2008 in 2017 (zadnjih 10 let), tako da smo analizirali število posameznih znanstvenih objav v tem obdobju za vsako leto posebej. Uporabili smo dva različna

iskalna niza, in sicer »Phase change materials OR PCM«, ki je podal znanstvene publikacije na splošno o fazno spremenljivih snoveh, in drugi iskalni niz »Phase change materials OR PCM AND buildings«, ki je podal rezultate o raziskavah in uporabi fazno spremenljivih snovi na področju stavb. Rezultati so prikazani na sliki 1.



Slika 1 • Normirano število znanstvenih objav na temo fazno spremenljivih snovi z različnim iskalnim nizom v bibliografski bazi podatkov *Science Direct* med letoma 2008 in 2017.

Za izbrani iskalni niz »Phase change materials OR PCM« je v bazi podatkov Science Direct zavedenih 72.164 znanstvenih publikacij z objavo v letu 2008, za iskani niz »Phase change materials OR PCM AND buildings« pa 8.966. Za leto 2017 sta ustrezni števili enaki 150.547 za prvi iskalni niz in 25.296 za drugi. Vendar če pogledamo normirano število objav, ki jih najdemo s posameznim iskalnim nizom (slika 1), vidimo, da število objav na temo uporabe fazno spremenljivih snovi v stavbah (»Phase change materials AND buildings«) v zadnjih letih narašča občutno hitreje kot število publikacij, ki tematiko obravnavajo na splošno. Lahko sklepamo, da popularnost PCM v gradbeništvu v zadnjih letih močno narašča. Razlogi za to so naraščanje števila različnih snovi, ki se lahko uporabljajo kot PCM, dostopnejša cena in velika uporabnost vgradnje takšnih snovi v stavbe. Slika 2 prikazuje geografsko porazdelitev znanstvenih objav (oz. njihovih avtorjev) na področju uporabe PCM v gradbeništvu. Opažamo, da večji delež raziskav poteka na območju Kitajske in



Slika 2 • Za izbrane države prikazana geografska porazdelitev avtorjev znanstvenih objav na področju uporabe PCM v gradbeništvu glede na število vseh znanstvenih objav na tem področju.

ZDA. Od evropskih držav prednjačijo Španija, Francija, Italija in Anglija. Slovenija ima glede na število prebivalcev relativno visok delež

znanstvenih objav na tem področju, pri čemer je tudi znanstveno uspešnejša od sosednjih držav (razen od Italije).

3 • O FAZNO SPREMENLJIVIH SNOVEH

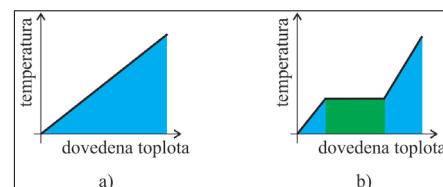
Najdlje uporabljana in človeku najbolj poznana fazno spremenljiva snov je led (voda). Ljudje ga pogosto uporabljamo za hlajenje hrane, pijač in prostorov. Prav led pa je tudi najstarejša poznana uporaba fazno spremenljivega materiala v gradbeništvu, saj so ga prebivalci arktičnih dežel že od nekdaj uporabljali pri gradnji iglujev (Košny, 2015). Led je v tem primeru kot lupina bivalnega prostora služil za nosilno konstrukcijo, toplotno izolacijsko plast (blaženje toplotnega toka zaradi prevajanja in sevanja) in za hranilnik energije, zato je imel kot gradbeni material pomembno funkcijo pri uravnavanju toplotnega okolja. Ledena lupina je zagotavljala tudi zadostno zvočno izolacijo, hkrati pa je podnevi kot prosojna površina prepuščala zadovoljiv delež svetlobe. Zanimiva je vzporednica z novimi raziskavami uporabe vode oz. ledu za ovoj stavb, namenjenih naselitvi na Marsu, Luni ali drugih planetih, kjer bi plast ledu, poleg naštetih prednosti, tudi učinkovito ščitila notranjost stavbe pred škodljivimi (kozmičnimi) sevanji (NASA Langley Research Center, 2017). V omenjenem razvojnem projektu sodeluje tudi slovensko podjetje Duol (Duol, 2016). Koncept talilne toplote in specifične toplote, povezane s segrevanjem snovi, je približno na polovici 18. stoletja podrobno raziskoval škotski znanstvenik Joseph Black

(Košny, 2015). Z razvojem znanosti, tehnologije in eksperimentalne opreme je bil v dvajsetem stoletju omogočen natančnejši vpogled v obnašanje snovi pri prehodu iz kapljevinske faze v trdno fazo in obratno. V gradbeništvu tovrstni material pogosteje uporabljamo približno od sredine 20. stoletja. Prvi primer uporabe PCM v stavbarstvu je dokumentiran v letu 1948 v stavbi v ameriški zvezni državi Massachusetts kot del zunanega zidu, ki je bil namenjen zajemu sončne energije (Frynsinger, 1987).

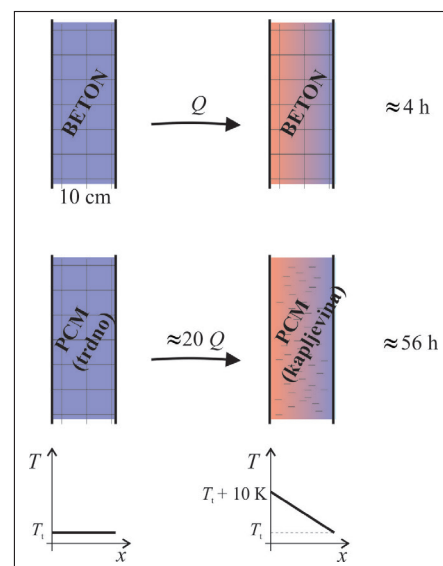
Ko snovi dovajamo toploto, sta možna dva procesa:

- Snovi narašča temperatura (slika 3a). Dovedena toplota Q je enaka $Q = m c_p \Delta T$, pri čemer je m masa snovi in c_p njena specifična toplota. Ker spremembo temperature občutimo s čutili, toploti Q pravimo tudi *senzibilna toplota*;
- Snovi se spremeni agregatno stanje, temperatura se ne spreminja (slika 3b). Dovedena toplota (*latentna toplota*) je enaka produktu mase snovi in specifične talilne toplote: $Q = m q_f$

Fazno spremenljive snovi lahko »skladiščijo« (akumulirajo) tako senzibilno kot tudi latentno toploto.



Slika 3 • Primerjava različnih načinov skladiščenja toplote v obliki notranje energije v snovi. (a) Senzibilna toplota, (b) latentna toplota.



Slika 4 • Segrevanje 10 cm debele betonske stene in enako debele plasti PCM po spremembi temperature 10 K na eni strani stene.

Ocenimo razliko med senzibilno in latentno toploto z zgledom, narisanim na sliki 4. Primerjamo obnašanje 10 cm debele plasti betona z enako debelo plastjo PCM, ki je v trdni fazi. Naj bosta obe plasti na začetku pri temperaturi tališča PCM T_f . Potem na eni strani naglo povišamo temperaturo za $\Delta T = 10$ K, medtem ko na drugi strani vzdržujemo začetno temperaturo. Počakajmo, da se znova vzpostavi stacionarno stanje.

Toplota, preračunana na površino stene, ki jo pri tej spremembi akumulira plast betona, je
$$\frac{Q_{(\text{beton})}}{S} = \frac{1}{2} d \rho_{(\text{beton})} c_{p(\text{beton})} \Delta T = \frac{1}{2} \cdot 0,1 \text{ m} \cdot 1800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 960 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 10 \text{ K} \approx 1 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2}. \quad (1)$$

S faktorjem 1/2 upoštevamo, da se v povprečju plast segreje za polovico temperaturne razlike ΔT .

PCM se mora pri enaki temperaturni spremembi najprej staliti. Šele kapljevina se potem lahko ogreje za ΔT . Akumulirano toploto izračunamo kot vsoto obeh prispevkov

$$\frac{Q_{(\text{PCM})}}{S} = d \rho_{(\text{PCM})} q_{t(\text{PCM})} + \frac{1}{2} d \rho_{(\text{PCM})} q_{t(\text{PCM})} + \frac{1}{2} d \rho_{(\text{PCM})} c_{p(\text{PCM})} \Delta T = 0,1 \text{ m} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 2 \cdot 10^5 \frac{\text{J}}{\text{kg}} + \frac{1}{2} \cdot 0,1 \text{ m} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 3000 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 10 \text{ K} = 20 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} + 1,5 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} \approx 22 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2}. \quad (2)$$

Upoštevali smo tipične vrednosti snovnih konstant za voske, ki jih uporabljajo kot PCM. Vidimo, da k akumulirani toploti prispeva največ talična toplota in da je celotna akumulirana toplota v PCM veliko večja kot v betonu.

Prav tako se z uporabo PCM znatno poveča karakteristični čas, v katerem dosežemo novo stacionarno stanje. Tega lahko pri segrevanju betona ocenimo kot (Pefernelj in Jagličić, 2014):

$$\tau_{(\text{beton})} = \frac{d^2}{\chi} = \frac{(0,1 \text{ m})^2}{0,64 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}} = 4,3 \text{ h}, \quad (3)$$

kjer je χ termična difuzivnost betona. Čas taljenja plasti PCM pa lahko v kvazistacionarnem približju (Pefernelj, 2014) ocenimo na

$$\tau_{(\text{PCM})} = \frac{\rho_{(\text{PCM})} q_{t(\text{PCM})}}{2 \lambda_{(\text{PCM})} \Delta T} d^2 = \frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 2 \cdot 10^5 \frac{\text{J}}{\text{kg}}}{2 \cdot 0,5 \frac{\text{W}}{\text{m K}} \cdot 10 \text{ K}} \cdot (0,1 \text{ m})^2 \approx 56 \text{ h}. \quad (4)$$

Vidimo, da sta tako akumulirana toplota kakor karakteristični čas v plasti PCM za red velikosti večja od istih količin v enako debeli plasti

betona. To pomeni, da lahko že s tanko plastjo PCM »ponaredimo« razmere, ki nam zaradi debelih sten ugajajo v srednjeveških zgradbah. Le paziti moramo na to, da ima PCM tališče pri temperaturi, okoli katere se (najpogosteje) spreminja dnevna temperatura. Poleg tega pa se moramo zavedati, da sprememba agregatnega stanja lahko predstavlja tehnološki izziv uporabe materiala. Sprememba agregatnega stanja PCM je običajno povezana tudi s spremembo prostornine snovi. Konstrukcija zato lahko izgubi celovitost ali pa PCM v kapljevinstem agregatnem stanju preprosto izteče. Načrtovalci in proizvajalci se s tem v glavnem spopadajo tako, da PCM zaprejo in ujamejo v neprepustne in za spremembo prostornine neobčutljive kapsule oz. v sloj, iz katerega PCM ne more iztekati.

V večini primerov v stavbah uporabljamo PCM, ki spremeni agregatno stanje iz trdnega v kapljevinsto, saj pri spremembi v plinasto stanje močno narasteta prostornina ali tlak, če plin držimo v zaprtem prostoru. Možna je tudi sprememba iz trdne faze v trdno fazo. Zaradi spremembe v razporeditvi molekul v snovi ob dovajanju toplote (Fallahi, 2017) pride do spremembe notranje energije snovi. Žal so te snovi manj ognjevarne in dražje ter se za zdaj v večji meri ne uporabljajo, čeprav imajo velik potencial za uporabo (Qian, 2015).

Glavna koristna lastnost PCM je, da zaradi zgoraj opisanih značilnosti lahko nastopajo kot napredni gradbeni material pri uravnavanju notranjega okolja v stavbah (blaženje temperaturnega nihaja). To zlasti velja pri stavbah, ki so poleti nagnjene k pregrevanju in imajo majhno maso v konstrukcijskih sklopih znotraj toplotnega stavbnega ovoja, npr. montažne, predalčne ali skeletne stavbe (Pajek, 2017). V stavbah PCM lahko uporabljamo kot del pasivnega ((Akeiber, 2016), (Pajek, 2017), (Sharifi, 2017)) ali pa aktivnega ((Stritih, 2017), (Stritih, 2011)) načina hlajenja

in ogrevanja oz. dušenja velikih temperaturnih nihanj. Torej poznamo dve tehniki, kako PCM v gradbeništvu uporabiti za izboljšanje obratovanja stavb. Pri uporabi PCM v kombinaciji z aktivno tehniko za fazno spremembo v eno smer (npr. iz kapljevinate faze v trdno fazo) uporabimo konvencionalni hladilni sistem, ki ga vključimo v času nižje cene energenta. Pri vračanju v prvotno agregatno stanje potem PCM »zastonj« uravnava notranjo temperaturo zraka oz. hitrost prehoda toplote skozi konstrukcijski sklop. Pri pasivni tehniki funkcijo aktivacije in deaktivacije fazno spremenljivih snovi načeloma opravlja le temperaturna razlika zraka med dnevom in nočjo.

Najpogosteje PCM delimo v skupine glede na izvor, in sicer na organske, anorganske in evtektike (Anisur, 2013). V preglednici 1 je predstavljenih nekaj skupin fazno spremenljivih snovi, ki imajo potencial za uporabo, ter njihove glavne lastnosti. Pri slednjih smo se osredotočili predvsem na glavni fizikalni lastnosti, ki nas zanimata, to sta temperatura tališča in talična toplota. Poleg navedenega sta nas zanimala tudi tip materiala (organski, anorganski, evtektik) in primerjava cen. Za uporabo v gradbeništvu je pomembna predvsem temperatura tališča, saj mora ta biti znotraj temperatur, ki se običajno pojavljajo v stavbah, torej 20–30 °C (Akeiber, 2016). Vse od v preglednici 1 naštetih snovi imajo tališče znotraj omenjenih temperatur, vendar je to odvisno od različice materiala (Akeiber, 2016). Primer kovine, ki se uporablja kot PCM, je galij (Ga). Njegovo tališče je pri okrog 30 °C. Seveda poleg v preglednici 1 navedenih obstaja še več fazno spremenljivih snovi, kot so na primer glicerol, polietilen glikol, tetradodekanol in podobno, a so redkeje uporabljane.

Anorganski PCM so načeloma v primerjavi z organskim cenejši in manj vnetljivi, vendar pa je slaba stran anorganskih PCM velika masa, pomanjkanje termične obstojnosti (razpadajo

Ime skupine	Tip PCM	Temperatura tališča (°C)	Talična toplota (kJ/kg)	Cena
parafini	organski	-12 do 71	190 do 260	srednje drag
maščobne kisline	organski	7,8 do 187	130 do 250	2–3-krat dražji od parafina
hidratizirane soli	anorganski	11 do 120	100 do 200	nižja cena
kovine	anorganski	30 do 96	25 do 90	drag
evtektiki	evtektik	4 do 93	100 do 230	drag

Preglednica 1 • Pregled najpogosteje uporabljenih in najdostopnejših skupin fazno spremenljivih snovi ter njihove lastnosti ((Ascione, 2014), (Biswas, 2014), (Kuznik, 2011), (Rathod, 2013), (Sharma, 2009), (Ye, 2014), (Zhou, 2014))



Slika 5 • Parafin (levo) in hidratizirana sol (desno) pri sobni temperaturi (povzeto po (Evers, 2010)).

pri višjih temperaturah) ter možnost korozije in razpada materiala, ki je pri organskih občutno manjša. Pri kovinah je slaba lastnost predvsem nizka talilna toplota na enoto mase (preglednica 1). Akeiber in sodelavci (Akeiber, 2016) so v preglednem članku ugotovili, da se v splošnem kot PCM najpogosteje uporablja parafin (primer na sliki 5), predvsem zaradi njegovih ugodnih termičnih lastnosti (visoka talilna toplota), cene, materialne obstojnosti in odpornosti proti koroziji. Njegove slabe lastnosti so vnetljivost, velika temperaturna odvisnost prostornine ter predvsem nizka toplotna prevodnost, ki v primeru PCM lahko pomeni slabši dinamični (s časom spremenljivi) toplotni odziv. Čeprav tudi ostali PCM izkazujejo solidne lastnosti (npr. hidratizirane soli, glej sliko 5), je njihova uporaba v gradbeništvu redkejša.

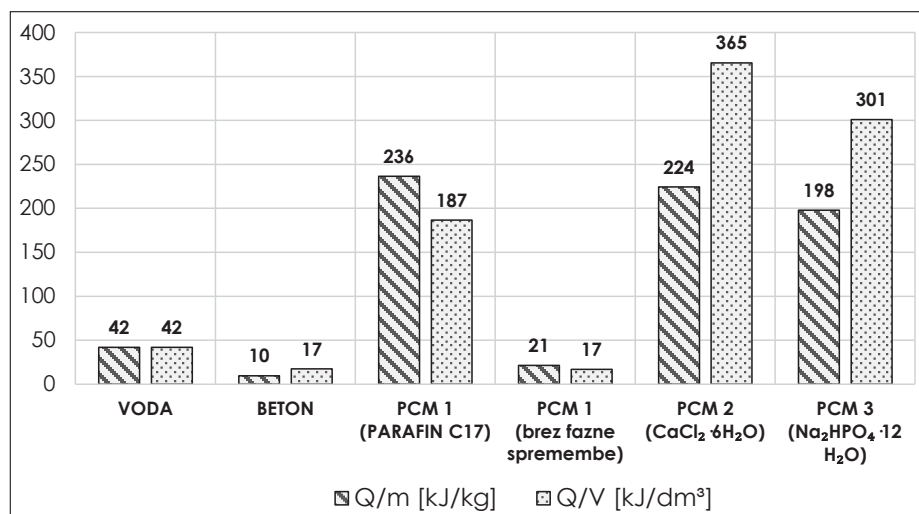
Navedene fazno sprejemljive snovi se lahko v splošnem uporabljajo v dveh različnih oblikah, bodisi kot samostojna plast v stavbnem ovojju (zunanje stene, strehe, tla) ali pa kot kapsulirani delci (PCM je shranjen v majhne kapsule) znotraj drugega materiala. Primeri uporabe obeh možnosti so prikazani v poglavju 4.

V gradbeništvu moramo pri izbiri ustreznega materiala, ki ga želimo uporabiti kot PCM, upoštevati več kriterijev, med katere spadajo predvsem ustrezne termodinamične, tehnične in kemične lastnosti, ob upoštevanju ekonomskih kriterijev (dostopna cena) (Kocjančič,

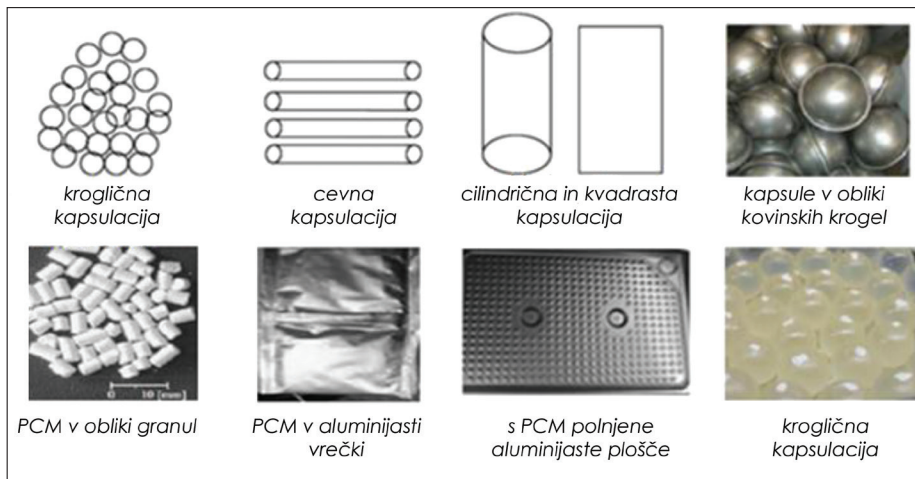
2011). Vse te lastnosti, predvsem to velja za temperaturo tališča, izberemo glede na podnebje, vremenske razmere, vrsto stavbe ipd. V glavnem pa imamo v mislih, da bi radi pri želeni temperaturi shranili oz. sprostili večjo količino toplote, kar nam ob manjši prostornini omogoča boljši in predvsem cenejši nadzor nad notranjimi temperaturami (npr. preprečevanje pregrevanja stavb).

S primerom na sliki 4 smo s pomočjo enačb (1) in (2) pokazali, da v enako debeli plasti PCM in betona v PCM shranimo približno 20-krat več toplote. V primerih večjih debe-

lin moramo biti pozorni, saj je sodelovanje celotne mase in s tem toplotne kapacitete konstrukcijskih sklopov ob hitrih temperaturnih spremembah lahko oteženo (Kunič, 2017). Na sliki 6 lahko opazujemo potrebno toploto za spremembo temperature v različnem materialu za 10 K oz. 10 °C. Izračunali smo potrebno toploto za primer vode, betona z gostoto 1800 kg/m³ in tri različne tipe fazno spremenljive snovi. PCM 1 predstavlja parafin C17, PCM 2 in 3 pa hidratizirani soli kalcijev klorid heksahidrat (CaCl₂·6H₂O) ter natrijev hidrogenfosfat dodekahidrat (Na₂HPO₄·12H₂O). Na sliki 6 lahko vidimo tudi primerjavo med PCM 1, v katerem nastopi fazna sprememba snovi, in PCM 1, v katerem se takšna sprememba ne zgodi. Slednje se odraža v velikih razlikah (praktično kar 11-krat) med potrebnimi toplotami za segrevanje snovi. Večinoma lastnosti PCM podajamo v enotah shranjene energije na enoto mase. Iz grafa na sliki 6 pa razberemo, da se razmere nekoliko spremenijo, če primerjamo vrednosti shranjene energije, normirane na enoto prostornine. Ker ima parafin manjšo gostoto od vode, je razmerje shranjene energije na enoto prostornine v parafinu s fazno spremembo in v vodi (4,5 proti 1) nekoliko manjše kakor razmerje iste količine, preračunane na enoto mase (5,6 proti 1), a še vedno izredno veliko. Parafinova nižja gostota je lahko povezana tudi z manjšo toplotno prevodnostjo, ki neugodno vpliva na učinek PCM. Obratno je moč opaziti pri preostalih dveh PCM (PCM 2 in PCM 3 na sliki 6). Pri fazno spremenljivih snoveh je zelo pomembno tudi, da je proces taljenja in strjevanja reverzibilen in ciklično stabilen. To pomeni, da mora imeti material veliko stopnjo ponovljivosti



Slika 6 • Potrebna toplota za segrevanje različnih materialov za 10 K, pri čemer se v primeru PCM-jev med segrevanjem zgodi fazna sprememba. Segrevanje poteka v območju sobnih temperatur.

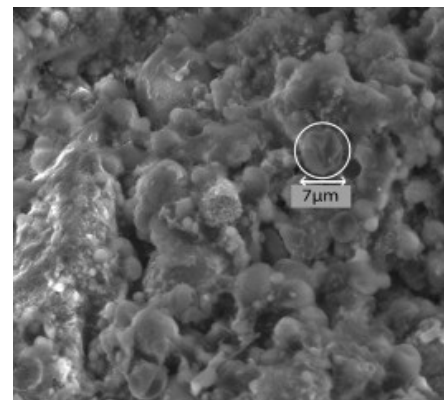


Slika 7 • Različne oblike in metode, uporabljane pri mešanju PCM z drugim materialom (povzeto po (Thambidurai, 2015)).

ciklov, brez večjih sprememb lastnosti snovi v predvideni življenjski dobi, ki je v primeru stavb več desetletij. V gradbeništvu se fazno spremenljive snovi v splošnem pojavljajo v dveh glavnih oblikah, in sicer kot samostojen material oz. sloj ali kot kapsule, primešane v drugi material, npr. apno, cement, mavec, gli-

no in podobno. Pri tem poznamo več različnih vrst kapsul in drugih načinov vgrajevanja in mešanja PCM v drugi material (slika 7).

Slika 8 prikazuje fotografijo, posneto z vrstičnim elektronskim mikroskopom (SEM), na njej pa je razvidna povečava mikrokapsul



Slika 8 • SEM-fotografija 3-odstotne masne mešanice mikrokapsul PCM in cementne malte. S krogom sta označena lokacija in premer kapsule PCM (povzeto po (Desai, 2014)).

PCM v matrici cementa. Mikrokapsule so v tem primeru velikosti okoli 7 µm in skupno predstavljajo 3 % masnega deleža v celotni mešanici. S podatki, uporabljenimi v enačbah 1 in 2, lahko izračunamo, da v takšni mešanici PCM skupno toplotno kapaciteto mešanice povečamo za okoli 25 %.

4 • PRIMERI UPORABE PCM V STAVBAH

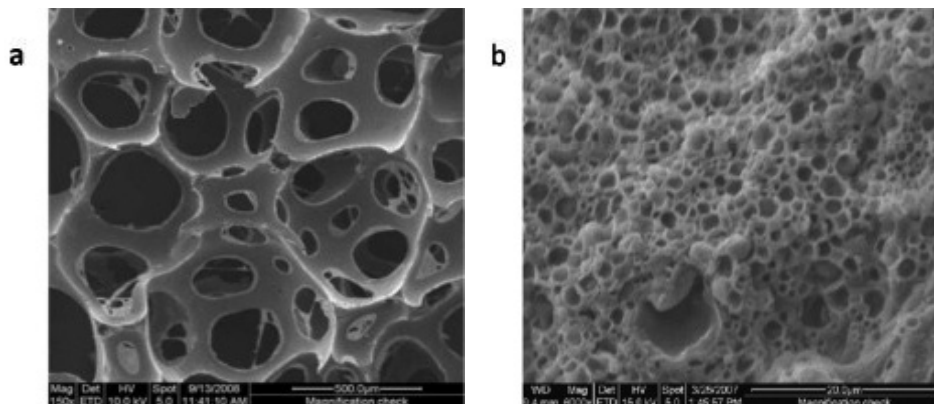
Opisali bomo nekaj primerov uporabe PCM v stavbah s poudarkom na pasivnih sistemih – torej sistemih, ki za delovanje ne potrebujejo aktivnega hlajenja ali ogrevanja (npr. hladilnikov, ogrevalnih, ohlajevalnih in klimatskih naprav).

Kot smo lahko prebrali v poglavju 3, je možno kapsule PCM primešati različnemu drugemu gradbenemu materialu. Na sliki 8 smo lahko

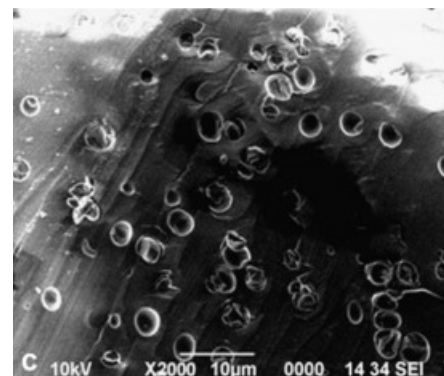
videli primer mešanja PCM s cementno malto, ki jo lahko uporabimo za notranje omete v stavbah. Podobno lahko PCM vmešamo tudi v beton (Desai, 2014). Pri tem je najpomembnejše, da s takšnimi mešanicami ne poslabšamo mehanskih lastnosti betona in da na račun PCM le dodatno povečamo specifično toplotno kapaciteto konstrukcije. Desai in sodelavci (Desai, 2014) so v tem

primeru poudarili zanimivo dejstvo, da takšne kapsule PCM betonu zmanjšajo gostoto, kar zmanjša težo in potencialno izboljša mehanske lastnosti konstrukcije, vendar so na tem področju potrebne nadaljnje raziskave.

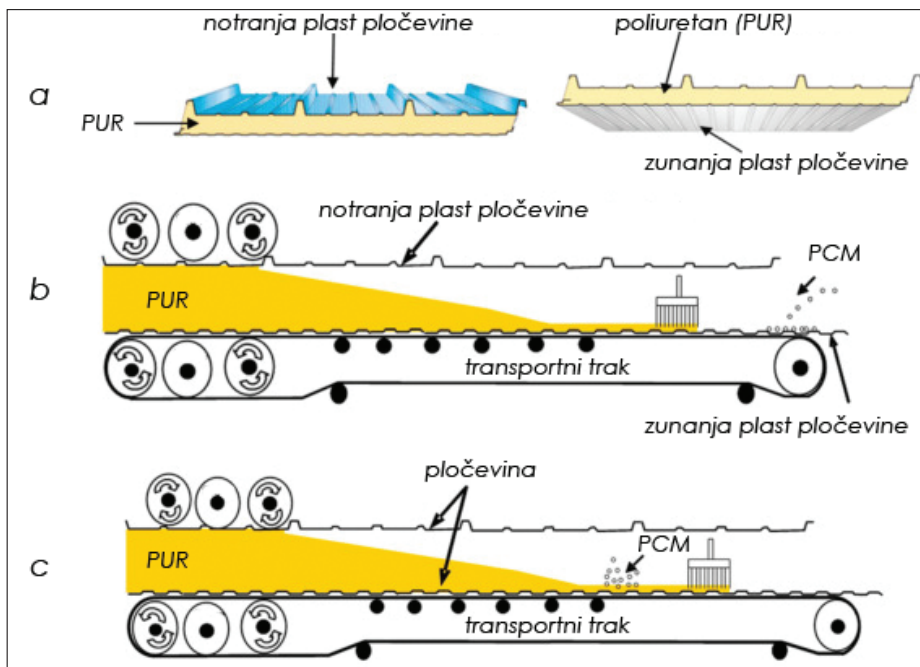
Podobno kot mešanje PCM z betoni in maltami lahko mikrokapsule primešamo tudi različnim toplotnoizolacijskim materialom. Postopek so predstavili Yang in sodelavci (Yang, 2015), ki so kapsule PCM pomešali s poliuretansko peno (slika 9). V splošnem se raziskovalci na tem področju ukvarjajo



Slika 9 • Fotografija SEM poliuretanske pene, ki vsebuje mikrokapsule PCM (n-oktadecana) z (a) St-DVB polimerom kot materialom za lupino kapsule in (b) melamin-formaldehidnimi kopolimeri kot lupino kapsule (povzeto po (Yang, 2015)).



Slika 10 • Fotografija SEM poliuretanske pene, ki vsebuje 22,6 % masne frakcije myristyl myrystata (povzeto po (Aydin in Okutan, 2013)).



Slika 11 • (a) Videz sendvič panela. (b) in (c) Izdelava sendvič panela na dva različna načina (povzeto po (Castellón, 2010)).

predvsem s postopki sinteze in izdelave takšnih materialov ter njihovo toplotno kapaciteto, manj pa z drugimi pomembnimi termičnimi lastnostmi, kot je na primer toplotna prevodnost. Ta bi lahko v primeru mešanice PCM in toplotne izolacije (npr. poliuretana) predstavljala slabost, saj nizka toplotna prevodnost toplotne izolacije upočasni prehod toplote in posledično upočasni odziv PCM. Aydin in Okutan (Aydin, 2013) sta pokazala, da se lahko tudi nekapsulirane oblike različnih PCM (estri maščobnih kislin – npr. myristyl myristate) dobro zmešajo s polimernimi materiali, kot je poliuretan. V tem primeru so se delci myristyl myristata v matrici učinkovito prepletli z zamreženimi polimeri, razporeditev pa je bila homogena (slika 10).

Castellón in sodelavci (Castellón, 2010) so v okviru industrijske linijske proizvodnje preučevali vgradnjo PCM v obliki mikrokapsul (Micronal BASF) v t. i. sendvič panele iz poliuretanske pene in pločevine, da bi s fazno spremenljivimi materiali izboljšali toplotno kapaciteto takšnih panelov (slika 11). Pri tem so za proizvodnjo panelov uporabljali tri različne metode. V prvem primeru so mikrokapsule zmešali z eno od komponent poliuretana. V drugih dveh primerih pa so kapsule dodajali ali tik pred injiciranjem poliuretana med dve plasti pločevine (slika 11b) ali pa takoj po njem (slika 11c). V prvem primeru, ko so bile kapsule PCM

primešane komponentam poliuretana, se je zaradi njihove homogene razporeditve znotraj materiala posledično nekoliko povečala toplotna prevodnost poliuretana. V drugem in tretjem primeru (sliki 11b in 11c) razporeditev PCM ni bila homogena, kar

je privedlo do večjega raztrosa rezultatov. Vendar tudi v primeru takšnih sendvič panelov PCM niso popolnoma izkoriščeni zaradi nizke toplotne prevodnosti poliuretana.

Fu in sodelavci (Fu, 2017) so preučevali kompozit PCM (kalcijev klorid heksahidrat – $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) in polistirena, vstavljenega v plošče iz porobetona, ki se uporabljajo kot zaključni/pohodni sloj pri ravnih strehah (slika 12). Namen tovrstnih plošč je tudi delno povečanje toplotne kapacitete konstrukcijskega sklopa (predvsem v primeru lahke nosilne konstrukcije). Kompozit so primerjali s produktom, ki vsebuje običajno polistirensko ploščo (slika 12c). Novi produkt, ki vsebuje PCM, se od običajnega razlikuje le v tem, da so ekspanzirani polistiren (EPS) zamenjali s kompozitom kapsuliranega kalcijevega klorid heksahidrata in ekspaniranega polistirena ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{EPS}$). Rezultati eksperimentov so pokazali, da je produkt s PCM bolj vplival na znižanje maksimalnih temperatur v notranjosti v primerjavi z običajnim produktom. S tem se je kompozit $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{EPS}$ izkazal za dober zadrževalnik toplote in tudi toplotni izolator, poleg tega pa je omenjeni kompozit tudi negorljiv.

Primer drugačne uporabe PCM, kjer je ta uporabljen direktno v kombinaciji s



Slika 12 • Uporaba betonskih plošč na strehi (a), betonski zgornji del plošče (b), običajna betonska plošča z ekspanziranim polistirenom (c) in betonska plošča s $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{EPS}$ kompozitom (d) (povzeto po (Fu, 2017)).



Slika 13 • Testni model s strešno betonsko ploščo z luknjami, v katerih je PCM (povzeto po (Mannivannan, 2015)).

konstrukcijskim materialom (npr. beton, opeka ipd.), sta predstavila Mannivannan in Ali (Mannivannan, 2015). Na zgornjo površino betonskih strešnih plošč sta v valjaste luknje vgradila fazno spremenljivo snov (slika 13). Za slednjo sta enako kot Fu in sodelavci (Fu, 2017) uporabila kalcijev klorid heksahidrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Zgornjo površino sta prekrila s steklom, ki je preprečeval vdor vode in vlage v luknje. Nato sta opravila meritve toplotnega odziva takšne konstrukcije na primeru testne celice in ugotovila, da v tem primeru PCM izboljša toplotni odziv konstrukcije, saj se je najvišja temperatura notranjega zraka v 24-urnem ciklu ob enakih zunanjih pogojih znižala za 4 °C.

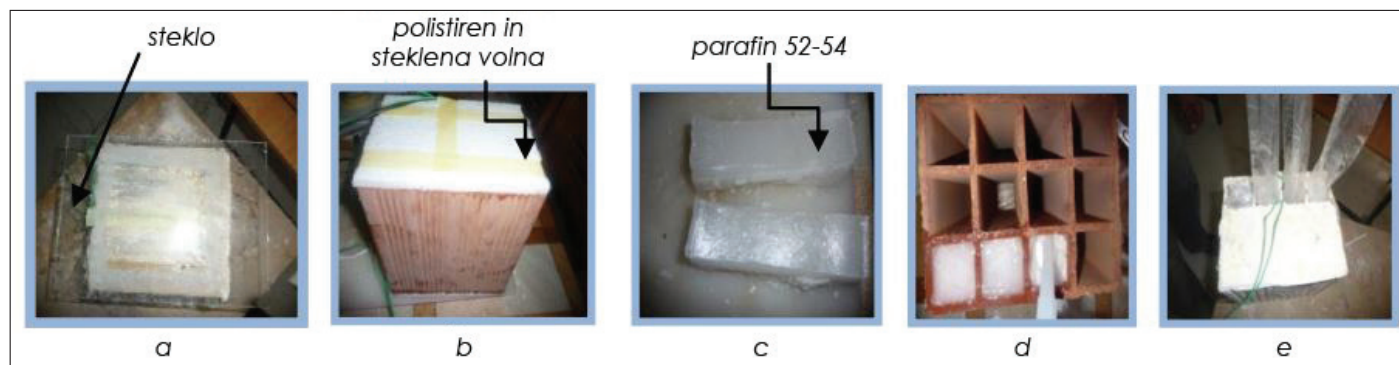
Kombinacijo uporabe PCM z opečnimi zidaki so predstavili Hichem in sodelavci (Hichem,

2013). Kot fazno spremenljivo snov so uporabili parafin 52-54, ki so ga vstavili v votline votličave opeke. Postavitev eksperimenta je predstavljena na sliki 14. Rezultati so pokazali, da lahko takšna uporaba PCM zniža površinsko temperaturo na notranji strani takšnega zidu do 3,8 °C. Pri eksperimentu so ugotovili, da bi bilo priporočljivo za nadaljnje raziskave s takšnim kompozitom uporabiti tudi opeke drugačnih geometrij. S tem bi lahko zmanjšali količino PCM, vstavljenega v votline ob hkratnem enakem učinku. Na podoben način so fazno spremenljivi material v kombinaciji z opeko uporabili Silva in sodelavci (Silva, 2012), vendar so PCM (organski parafin RT18) v opečne votline vstavili s pomočjo kovinskih kapsul (makrokapsuliranje), kot je prikazano na sliki 15. Tudi v tem primeru se je rešitev izkazala za učinkovito.

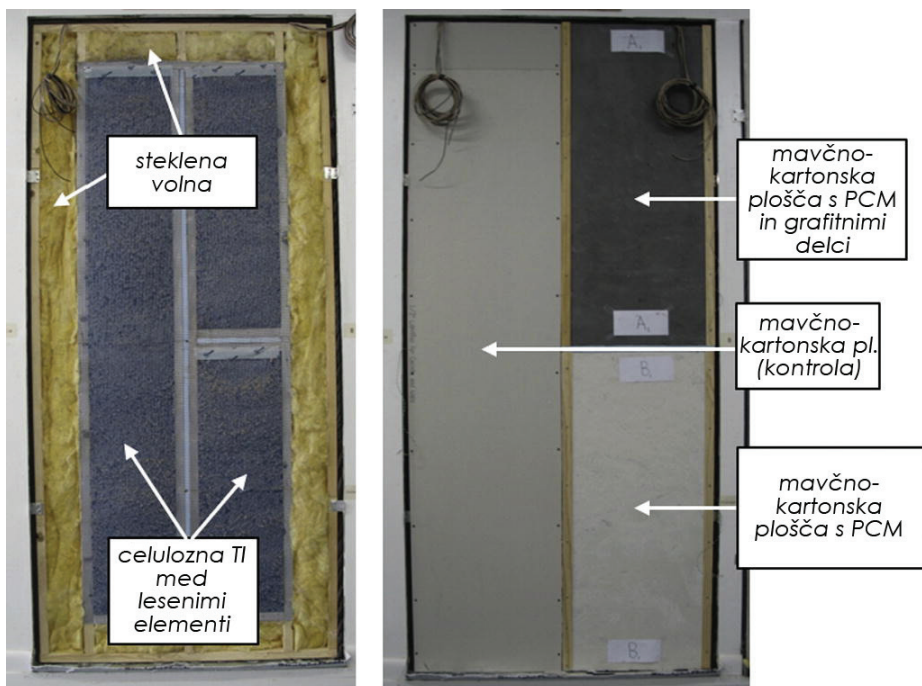


Slika 15 • Opečni zidaki z vstavljenimi makrokapsulami PCM (povzeto po (Silva, 2012)).

Eden izmed načinov uporabe fazno spremenljivih snovi v stavbah je tudi vgraditev le-teh v stenske konstrukcijske plošče za izdelavo oblog. Študijo takšnega primera so opravili Biswas in sodelavci (Biswas, 2014), kjer so PCM (kapsulirani parafin $\text{C}_{17}\text{H}_{36}$) primešali v mavčnokartonske plošče (slika 16). Pri tem so obravnavali dve različici. V prvem primeru so v mavčnokartonskih ploščah uporabili le PCM, v drugem pa so jim dodali še nanodelce ekspandiranega grafita, s čimer so zvišali toplotno prevodnost v želji po izboljšanju hitrosti prenosa toplote po plošči. V omenjenem primeru so grafitni delci v mavčnokartonske plošče dodani z namenom povečanja prenosa toplote s prevajanjem (povečanje prenosa toplote s kondukcijo). Gre za drugačen ukrep kot pri bolj znanem dodajanju grafitnih ali tudi drugih delcev (aluminijevih) v toplotne



Slika 14 • Priprava eksperimenta kombinacije votličave opeke s PCM. (a) Steklo za pomoč pri vlivanju parafina; (b) toplotnoizolacijska plast (polistiren in steklena volna); (c) parafin 52-54; (d) vlivanje parafina; (e) transparentni plastični film (povzeto po (Hichem, 2013)).



Slika 16 • Testna stena, nadgrajena z mavčnokartonskimi ploščami s PCM (povzeto po (Biswas, 2014)).

izolacije iz polistirenov (EPS in tudi XPS z refleksijskimi dodatki), kjer omenjeni dodatki zmanjšujejo prenos toplote z reflektiranjem toplotnega sevanja (zmanjševanje radiacijskega prenosa toplote). Biswas in sodelavci so nato opravili eksperimente, katerih rezultati so pokazali, da se tako nadgrajena zunanja stena najbolj obnaša pri južni orientaciji stavbe, kjer se je izkazala za dober regulator med notranjo in zunanjo temperaturo zraka (fazni zamik, dušenje).

Podobno kot Biswas in sodelavci so tudi Sharifi in sodelavci (Sharifi, 2017) preučevali upo-

ravnost PCM (kapsulirani parafin) v primeru mavčnokartonskih plošč za notranje obloge. Iz eksperimentov so se naučili, da je uporaba takšnih plošč učinkovita pri nižanju maksimalnih temperatur notranjega zraka, kar izboljša toplotno udobje v stavbah in posledično lahko vpliva na znižanje porabe energije.

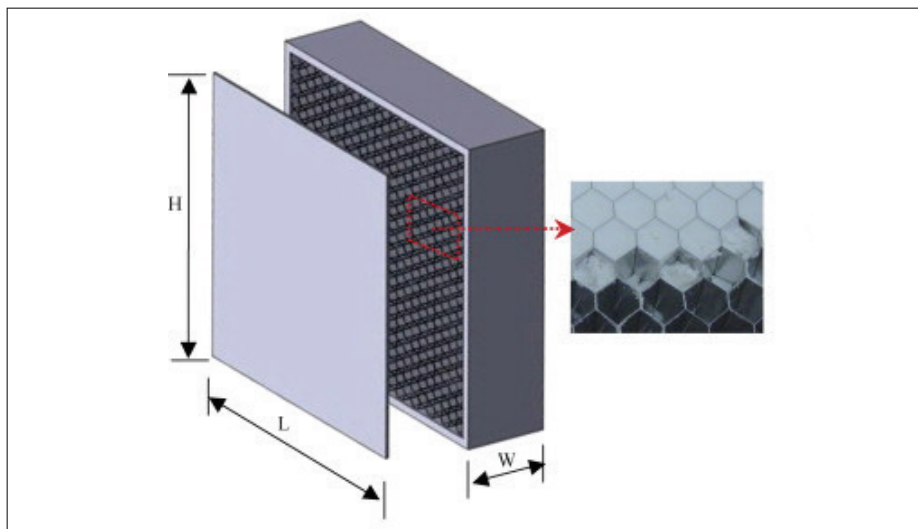
Kot zanimivost omenimo, da je prof. dr. Boris Orel s Kemijskega inštituta v Ljubljani s pomočjo sodelavke Marjete Maček in slovenskega proizvajalca toplotnih izolacij že leta 1993 razvijal, predstavil na mednarodni konferenci (Orel, 1993) in tudi prijavil patentno prijavo na

temo mavčnokartonskih plošč, ki vsebujejo PCM (maščobne kisline in parafin) ((Orel, 1993), (Maček, 1994), (Maček, 1996)). Na podoben način nekateri proizvajalci ponujajo različne komercialne proizvode, kot so mavčnokartonske plošče s kapsuliranim PCM (Rigips, 2016) in v podobni izvedbi tudi glinene plošče (Lehmore, 2012), lahko pa tudi akustične plošče (Sustainable in steel, 2017) in druge proizvode (PCM products, 2017).

Poznamo tudi način vgrajevanja PCM v zunanje stene stavb kot dodatek vpihovani (npr. celulozni) toplotni izolaciji. Ta se najpogosteje uporablja v primeru lesenih skeletnih konstrukcij, kjer prostor med elementi zapolnimo s toplotnoizolativnimi delci v razsutem stanju. V takšnem primeru lahko PCM v obliki mikroali makrokapsul primešamo celulozi ali pa ga vgradimo v prostor med linijske konstrukcijske elemente. Takšen primer vgradnje PCM so preučevali Zhang in sodelavci (Zhang, 2005) ter Evers in sodelavci (Evers, 2010), pri čemer so kot PCM uporabljali tako parafin kot hidratizirane soli. Slednje so se sicer v tem primeru izkazale slabše v primerjavi s parafinom, ki je učinkoviteje vplival na toplotni odziv takšne stene. Kljub dobri ideji za takšen način uporabe PCM sta Kenisarin in Mahkamov (Kenisarin, 2016) izpostavila manjšo uporabnost takšne rešitve, saj se PCM zaradi svoje lege globoko v toplotni izolaciji težko hitro odzove na spremembe in se ciklično ne odzove na krajše temperaturne spremembe.

Še en inovativni primer uporabe PCM sta predstavila Lai in Hokoi (Lai, 2014). Avtorja sta preučevala prototip primera, kjer sta med dve lesni plošči vstavila aluminijasto satovje, ki sta ga napolnila z mikrokapsulami fazno spremenljive snovi (parafin v polimernih kapsulah). Primer je predstavljen na sliki 17.

Po pregledu vseh možnosti in metod vgrajevanja fazno spremenljivih materialov v konstrukcijske sklope, ki so ga opravili Akeiber in sodelavci (Akeiber, 2016), so ugotovili, da je PCM v stavbah najpogosteje uporabljen na zunanjih stenah, redkeje pa na strehah in tleh. Poleg že omenjene četrstoletnje stare patentne prijave mavčnokartonskih plošč ((Maček, 1994), (Maček, 1996)) sta na Fakulteti za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo UL v tem obdobju področje fazno spremenljivih snovi na podlagi različnih vzorcev raziskovala dr. Marjana Šijanec Zavrl (Šijanec Zavrl, 1993) in mag. Miha Tomšič (Tomšič, 1994). V Sloveniji so nam znani tudi razvojni projekti z uporabo PCM za fasadne panele (Trimo, 2018) in v prometu na zrcalnih v križiščih (POS



Slika 17 • Primer v steno vstavljenega aluminijastega satovja, polnjenega s parafinskimi kapsulami (povzeto po (Lai, 2014)).

Plastika, 2018). Fazno spremenljiva snov izza zrcalne površine zmanjšuje možnosti za nastanek kondenzacije. PCM uporabljamo tudi za dušenje pregrevanja in podhlajevanja aluminijastih ogrodij prestižnega pohištva, namenjenega jahtam, hotelskim terasam in podobno (Kreal, 2018).

Povsem nov kompozitni produkt, ki vključuje PCM (parafin), so predstavili raziskovalci s Fakultete za strojništvo UL (Arkar, 2018). Produkt je sestavljen iz dveh plasti lesa, med kateri je vstavljen sloj PCM in vakuumsko-izolacijska plošča – VIP (za podrobnejšo razlago o VIP glej (Kunič, 2012)). Izdelek je namenjen predvsem uporabi v leseni gradnji in ima iz-

boljšan dinamični toplotni odziv. Dobra lastnost produkta je tudi, da ne presega debeline vrat ali okna (68 mm).

Ne nazadnje omenimo še aktivne sisteme, ki vključujejo PCM in jim nismo posvečali večje pozornosti, saj so v tem primeru PCM pretežno uporabljeni v kombinaciji s strojnimi inštalacijami. PCM lahko na takšen način uporabljamo tudi pri toplotno aktiviranih stavbnih sistemih (angleško *Thermally Activated Building Systems*, TABS). Sistem deluje nadzorovano, običajno v kombinaciji s prisiljenim prezračevanjem. Ponoči, ko v notranjost privedemo hladen zunanji zrak, PCM spremeni agregatno stanje iz kapljevi-

nastega v trdno. Podnevi, ko bi se notranji zrak sicer segrel, pa se PCM tali na račun toplote, ki jo odvaja notranjemu zraku. Na ta način vzdržuje nizko temperaturo notranjega zraka. Enak učinek lahko dosežemo tudi z različnimi hladilniki. Večinoma se takšni sistemi vgradijo za namen hlajenja. Sistem je lahko vgrajen v spuščeni strop, lahko pa tudi v zunanjo steno ali centralni prezračevalni sistem. Kombinacije PCM in aktivnih sistemov so dobro raziskane, razvoj na področju pa se nadaljuje ((Stritih, 2011), (Weinläder, 2014), (Stritih, 2017)). Vplive takšne uporabe PCM na notranje okolje in energijo za delovanje stavbe pa sta predstavila Korjenič in Dreyer (Korjenič, 2009).

5 • SKLEP

Uporaba fazno spremenljivih snovi je v porastu. Zlasti to velja za gradbeno industrijo, saj lahko z njihovo uporabo v konstrukcijskih sklopih, ki imajo nizko toplotno kapaciteto, dosežemo večje toplotno udobje v notranjem okolju, pri tem pa prihranimo energijo (predvsem pri hlajenju) (Pajek, 2017). Fazno spremenljive snovi omogočajo širok spekter uporabe. Pregled literature je pokazal, da jih lahko vgradimo tako v material za nosilno konstrukcijo kot tudi v zaščitne sloje (npr.

toplotno izolacijo ali najbolje v finalne plasti). Pri tem poznamo več različnih vrst fazno spremenljivih snovi, najpogosteje uporabljani pa so predvsem parafini in hidratizirane soli (predvsem $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Fazno spremenljive snovi imajo največji učinek, če jih vgradimo v sloj konstrukcije, ki je čim bližje notranjosti, saj imajo tako lahko hiter odzivni čas, ki je kos dnevnim spremembam temperature. Pomembno pa je tudi, da jih ne obdamo z materiali nizke toplotne prevodnosti, pri čemer

ugotavljamo, da rešitve v kombinaciji s toplotnimi izolatorji, kot sta na primer poliuretan ali polistiren, nižajo učinkovito ciklično aktivacijo PCM. Fazno spremenljive snovi bodo učinkovito uporabljene le v primerih, ko se bo ob temperaturnih nihanjih, najbolje kar vsakodnevnih, spremenila faza PCM po celotni debelini, ne samo na površini. Na področju uporabe fazno spremenljivih snovi v gradbeništvu obstaja še veliko prostora za iskanje novih tehnoloških rešitev. Relativno slabo je raziskana povezava med obnašanjem PCM in toplotnimi karakteristikami materiala, v katerega PCM vgrajujemo.

6 • LITERATURA

- Akeiber, H., Nejat, P., Majid, M. Z. A., Wahid, M. A., Jomehzadeh, F., Zeynali Famileh, I., Calautit, J. K., Hughes, B. R., Zaki, S. A., A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 60, 1470–1497, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.036>, 2016.
- Anisur, M. R., Mahfuz, M. H., Kibria, M. A., Saidur, R., Metselaar, I. H. S. C., Mahlia, T. M. I., Curbing global warming with phase change materials for energy storage, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 18, 23–30, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.014>, 2013.
- Arkar, C., Domjan, S., Medved, S., Lightweight composite timber façade wall with improved thermal response, *Sustain. Cities Soc.* 38, 325–332, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.01.011>, 2018.
- Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R. F., de' Rossi, F., Vanoli, G. P., Energy refurbishment of existing buildings through the use of phase change materials: Energy savings and indoor comfort in the cooling season, *Appl. Energy* 113, 990–1007, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.045>, 2014.
- Aydin, A. A., Okutan, H., Polyurethane rigid foam composites incorporated with fatty acid ester-based phase change material. *Energy Convers. Manag.* 68, 74–81, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.12.015>, 2013.
- Biswas, K., Lu, J., Soroushian, P., Shrestha, S., Combined experimental and numerical evaluation of a prototype nano-PCM enhanced wallboard. *Appl. Energy* 131, 517–529, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.047>, 2014.
- Castellón, C., Medrano, M., Roca, J., Cabeza, L. F., Navarro, M. E., Fernández, A. I., Lázaro, A., Zalba, B., Effect of microencapsulated phase change material in sandwich panels, *Renew. Energy* 35, 2370–2374. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.03.030>, 2010.

- Desai, D., Miller, M., Lynch, J. P., Li, V. C., Development of thermally adaptive Engineered Cementitious Composite for passive heat storage, *Constr. Build. Mater., Concrete Sustainability* 67, 366–372, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.104>, 2014.
- Duol, Dušan Olaj, Gremo delat posej v vesolje! *Dnevnik*, <https://www.dnevnik.si/1042757165>, 2016.
- Evers, A. C., Medina, M. A., Fang, Y., Evaluation of the thermal performance of frame walls enhanced with paraffin and hydrated salt phase change materials using a dynamic wall simulator, *Build. Environ.* 45, 1762–1768, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.02.002>, 2010.
- Fallahi, A., Guldentops, G., Tao, M., Granados-Focil, S., Van Dessel, S., Review on solid-solid phase change materials for thermal energy storage: Molecular structure and thermal properties, *Appl. Therm. Eng.* 127, 1427–1441, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.161>, 2017.
- Frysjinger, G. A., Sliwowski, J., Phase change material storage assisted heating system, PH-87-5, University of Delaware, USA, 1987.
- Fu, L., Wang, Q., Ye, R., Fang, X., Zhang, Z., A calcium chloride hexahydrate/expanded perlite composite with good heat storage and insulation properties for building energy conservation, *Renew. Energy* 114, 733–743, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.07.091>, 2017.
- Hichem, N., Noureddine, S., Nadia, S., Djamilia, D., Experimental and Numerical Study of a Usual Brick Filled with PCM to Improve the Thermal Inertia of Buildings, *Energy Procedia, TerraGreen 13 International Conference 2013 - Advancements in Renewable Energy and Clean Environment* 36, 766–775, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.089>, 2013.
- Kenisarin, M., Mahkamov, K., Passive thermal control in residential buildings using phase change materials, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 55, 371–398, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.128>, 2016.
- Kocjančič, U., Fazno spremenljiv material v visokoizolativnem tankoslojnjem stavbnem ovoju, diplomska naloga, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, 2011.
- Korjenič, A., Dreyer, J., Možnosti za zmanjšanje potrebe po ogrevalni energiji s povečanjem toplotne kapacitete stavbe. *Gradb. Vestn.* 58, 213–216, 2009.
- Košny, J., PCM-enhanced building components: an application of phase change materials in building envelopes and internal structures, *Engineering materials and processes*, Springer, Cham, 2015.
- Kreal, <http://www.kreal.si/si/podjetje>, 2018.
- Kunič, R., predavanja pri predmetu Napredni materiali, UL FGG, 2017.
- Kunič, R., Vacuum Insulation Panels - An Assessment of the Impact of Accelerated Ageing on Service Life, *Stroj. Vestn. – J. Mech. Eng.* 58, 598–606, <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2012.539>, 2012.
- Kuznik, F., David, D., Johannes, K., Roux, J.-J., A review on phase change materials integrated in building walls. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15, 379–391, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.08.019>, 2011.
- Lai, C., Hokoi, S., Thermal performance of an aluminum honeycomb wallboard incorporating microencapsulated PCM, *Energy Build.* 73, 37–47, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.01.017>, 2014.
- Lehmorenge, 2012. Modern, green and individual - The ecological alternative in dry construction, URL www.lehmorenge.de/home_de.php, 2012.
- Maček, M., Orel, B., Kompozitni material za skladiščenje toplote, postopek za njegovo pripravo in njegova uporaba, patent SI 9300257 (A), 1994.
- Maček, M., Orel, B., Srčič, S., Dolinar, J., Crnjak Orel, Z., Kompozit za skladiščenje toplote in postopek za njegovo izdelavo, patent SI 9500025 (A), 1996.
- Mannivannan, A., Ali, M. T. J., Simulation and experimental study of thermal performance of a building roof with a phase change material (PCM), *Sadhana* 40, 2381–2388, <https://doi.org/10.1007/s12046-014-0332-8>, 2015.
- NASA Langley Research Center, A New Home on Mars: NASA Langley's Icy Concept for Living on the Red Planet, URL <https://www.nasa.gov/feature/langley/a-new-home-on-mars-nasa-langley-s-icy-concept-for-living-on-the-red-planet>, 2017.
- Orel, B., Maček, M., Krainer, A., Advanced phase change (PCM) materials for heat storage applications in buildings, *The 3rd European conference on architecture, Commission of the European Communities, Florence, Italy*, pp. 111–114, 1993.
- Pajek, L., Hudobivnik, B., Kunič, R., Košir, M., 2017. Improving thermal response of lightweight timber building envelopes during cooling season in three European locations, *J. Clean. Prod.* 156, 939–952, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.098>, 2017.
- PCM products, <http://www.pcmproducts.net/>, 2017.
- Peternelj, J., Jagličič, Z., Osnove gradbene fizike. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 2014.
- POS Plastika, <https://www.pos-plastika.si/prometno-ogledalo-polikarbonat/>, 2018.
- Qian, T., Li, J., Min, X., Deng, Y., Guan, W., Ning, L., Diatomite: A promising natural candidate as carrier material for low, middle and high temperature phase change material, *Energy Convers. Manag.* 98, 34–45, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.03.071>, 2015.
- Rathod, M. K., Banerjee, J., Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 18, 246–258, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.022>, 2013.

Rigips, Alba balance, Efficient room temperature management with innovative PCM solid plasterboards, ch.rigips.de/download/rigips_alba_balance_infobro_de_low.pdf, 2016.

Sharifi, N. P., Shaikh, A. A. N., Sakulich, A. R., Application of phase change materials in gypsum boards to meet building energy conservation goals, *Energy Build.* 138, 455–467, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.046>, 2017.

Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., Buddhi, D., Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13, 318–345, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>, 2009.

Šijanec Zavrl, M., Uporaba fazno spremenljivih materialov v elementih zgradbe in njihov vpliv na toplotno ugodje v pasivnih solarnih zgradbah, doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 1993.

Silva, T., Vicente, R., Soares, N., Ferreira, V., Experimental testing and numerical modelling of masonry wall solution with PCM incorporation: A passive construction solution, *Energy Build.* 49, 235–245, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.010>, 2012.

Stritih, U., Butala, V., Energy Savings in Building with a PCM Free Cooling System, *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering* 57, 2, 125–134 <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2010.066>, 2011.

Stritih, U., Charvat, P., Koželj, R., Klimes, L., Osterman, E., Ostry, M., Butala, V., PCM Thermal Energy Storage in Solar Heating of Ventilation Air—Experimental and Numerical Investigations, *Sustain. Cities Soc.*, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.10.018>, 2017.

Sustainable in steel, PCM Products, http://www.sustainablesteel.eu/p/556/pcm_products.html, 2017.

Thambidurai, M., Panchabikesan, K., N, K. M., Ramalingam, V., Review on phase change material based free cooling of buildings—The way toward sustainability, *J. Energy Storage* 4, 74–88, <https://doi.org/10.1016/j.est.2015.09.003>, 2015.

Tomšič, M., Primerjalna analiza toplotnega odziva fazno spremenljivih materialov, magistrska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 1994.

Trimo, Qubiss in drugi fasadni sistemi, <https://trimo-group.com/si/trimo/proizvodi/fasade-in-stene/>, 2018.

Weinläder, H., Körner, W., Strieder, B., A ventilated cooling ceiling with integrated latent heat storage—Monitoring results, *Energy Build.* 82, 65–72, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.013>, 2014.

Yang, C., Fischer, L., Maranda, S., Worlitschek, J., Rigid polyurethane foams incorporated with phase change materials: A state-of-the-art review and future research pathways, *Energy Build.* 87, 25–36, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.075>, 2015.

Ye, H., Long, L., Zhang, H., Zou, R., The performance evaluation of shape-stabilized phase change materials in building applications using energy saving index, *Appl. Energy* 113, 1118–1126, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.067>, 2014.

Zhang, M., Medina, M. A., King, J. B., Development of a thermally enhanced frame wall with phase-change materials for on-peak air conditioning demand reduction and energy savings in residential buildings, *Int. J. Energy Res.* 29, 795–809, <https://doi.org/10.1002/er.1082>, 2005.

Zhou, D., Shire, G. S. F., Tian, Y., Parametric analysis of influencing factors in Phase Change Material Wallboard (PCMW), *Appl. Energy* 119, 33–42, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.12.059>, 2014.

USPOSABLJANJE ZA OPERATERJE ČISTILNIH NAPRAV

**Strokovna delavnica s prof. Henrijem Spanjersom,
12. - 13. april 2018**

V JP CČN Domžale – Kamnik organizirajo zanimivo dvodnevno interaktivno strokovno delavnico o vodenju procesov čiščenja odpadne vode na čistilnih napravah, ki jo bo vodil vrhunski strokovnjak iz Nizozemske, prof. Henri Spanjers. Udeleženci se bodo seznanili z nekaterimi temeljnimi koncepti pri čiščenju odpadne vode z uporabo simulatorjev čistilnih naprav BioWin, ki delujejo pod-

obno kot simulatorji letenja. Namen praktičnega in teoretičnega usposabljanja inženirjev in upravljavcev čistilnih naprav je doseganje optimizacije in izboljšanje rezultatov čiščenja odpadnih voda, kar vključuje zmanjševanje stroškov investicijskega vzdrževanja in obratovanja, doseganje procesnih ciljev ter stabilno in ustrezno obratovanje čistilne naprave ob doseganju zahtevanega učinka čiščenja.

Izobraževanje bo potekalo v angleškem jeziku. Več informacij je na voljo na www.ccn-domzale.si.

dr. Marjeta Stražar, JP CČN Domžale-Kamnik d. o. o.

39. ZBOROVANJE GRADBENIH KONSTRUKTORJEV

Zadnji novembrski dan leta 2017 smo v Slovenskem društvu gradbenih konstruktorjev (SDGK) organizirali 39. zborovanje, ki je potekalo v hotelu Four Points by Sheraton v Ljubljani. Zborovanja, na katerem je bilo predstavljanih 17 strokovnih in 9 znanstvenih prispevkov, se je udeležilo 132 inženirsk

ložb. Po dolgem času so bolj optimistična tudi projektantska podjetja, ki na eni strani občutijo povečano povpraševanje po storitvah, na drugi strani pa se še vedno spoprijemajo s problemom prenizkih cen, kar se pogosto odraža v slabi kakovosti projektne dokumentacije, to pa preko verižnega učinka meče slabo luč na

sankcionirati projektante, ki so odgovorni za projektno dokumentacijo slabe kakovosti in s tem doseči dvig cen. Dr. Leon Hladnik, član upravnega odbora pri IZS, je pojasnil, da pri IZS potekajo aktivnosti v tej smeri. Debatu smo zaključili s sklepom, da se bo tudi SDGK angažiral za ureditev cen in kakovosti projektov. Na zborovanju je Dejan Prebil, član komisije IZS za sistemske zakone, predstavil probleme pri ureditvi področja rekonstrukcij z vidika mehanske odpornosti in stabilnosti gradbenih objektov. Seznanil nas je, da se pripravlja tehnična smernica za ureditev rekonstrukcije objektov, udeležence zborovanja pa je pozval k sodelovanju pri pripravi smernice. V znanstveno obarvanem delu zborovanja so nas kolegi z UL FGG seznanili, da je druga generacija standardov Evrokod v polni pripravi. Formirane so projektne skupine, v katere so bili na javnem mednarodnem izboru izbrani tudi kolegi z UL FGG, ki so že oziroma bodo pripravile nove različice standardov, ki jih lahko pričakujemo po letu 2020.



inženirjev, ki so jih ob odprtju nagovorili predsednik SDGK doc. dr. Jože Lopatič, prodekan Fakultete za gradbeništvo in geodezijo UL za razvojno področje prof. dr. Žiga Turk in predsednik matične sekcije gradbenih inženirjev pri IZS dr. Samo Medved. Na vabilo SDGK je gost doc. dr. José J. Oliveira Pedro iz podjetja Grid in Univerze v Lizboni predstavil večletne izkušnje pri projektiranju in razvoju sovprežnih mostov. Tudi na Portugalskem so investitorji spoznali prednosti sovprežnih mostov, ki se kažejo predvsem v kvalitetni uporabi objektov.

Letos so bile v ospredju predstavitve izvedenih projektov mostov in konstrukcij. Predstavljeni so bili tudi prispevki s področja razvoja gradbeništva, diskutirali pa smo tudi o vplivu recesije na stanje gradbeništva v Sloveniji. Težko pričakovano gospodarsko rast, ki jo že nekaj časa kažejo statistični podatki, končno občuti tudi slovensko gradbeništvo. Povečanje vrednosti gradbenih del na letni ravni je bilo v prvih sedmih mesecih kar občutno, pri tem pa je bilo precej večje pri stavbah kot pri inženirskih objektih. Mediji poročajo o povečanem povpraševanju po stanovanjih, pričakujemo pa tudi realizacijo večjih infrastrukturnih na-

celotno gradbeništvo. Izboljšanje javne podobe gradbeništva lahko dosežemo le z zadovoljnimi naročniki in uporabniki, zato je nujno treba urediti področje cen inženirskih storitev, še posebno pri javnih naročilih. Diskusijo na temo



problematike nizkih cen projektiranja je vodil mag. Marjan Čerin. V splošni diskusiji smo se strinjali, da je problem večplasten, poudarjeno pa je bilo nezadovoljstvo inženirjev z večletno pasivnostjo IZS pri urejanju tega področja. Po mnenju projektantov bi se moral IZS aktivno vključiti v problematiko z opravljanjem strokovnega nadzora nad svojimi člani in

Zahvaljujemo se recenzentom znanstvenih prispevkov za njihovo vestno in dobro opravljeno delo, avtorjem prispevkov za zanimive predstavitve, številnim sponzorjem, ki so podprli izvedbo dogodka in delovanje društva, in ne nazadnje vsem udeležencem zborovanja. Upamo, da je zborovanje izpolnilo pričakovano

ja udeležencev. Naslednjič, v letu 2018, ko bomo označili 40. organizacijo zborovanja, pa predvidevamo, da se bomo temu primerno srečali na dvodnevem dogodku na Bledu, kjer smo se doslej največkrat zbrali.

doc. dr. Primož Može, univ. dipl. inž. grad.
doc. dr. Jože Lopatič, univ. dipl. inž. grad.

TRAJNOSTNA INOVATIVNOST GRADNJE IN BIVANJA V GORNJI RADGONI OD 4. DO 7. APRILA 2018



MEDNARODNI SEJEM *Gradimo z naravo!*
**GRADBENIŠTVA, ENERGETIKE,
KOMUNALE IN OBRTI**

4. - 7. 4. 2018, Gornja Radgona



4. MEDNARODNI SEJEM *Zelena za prihodnost!*
**TRAJNOSTNIH TEHNOLOGIJ
IN ZELENEGA ŽIVLJENJSKEGA SLOGA**

4. - 7. 4. 2018, Gornja Radgona



MEGRA, Mednarodni sejem gradbeništva, energetike, komunale in obrti, bo, povezal ponudnike in uporabnike najnovejše mehanizacije, materialov, orodij in storitev. Ponudil bo nasvete za trajnostno gradnjo, energijsko in siceršnje obnovo stavb ter urejanje okolice.

Na zunanjem prostoru se bo predstavila najnovejša gradbena in komunalna mehanizacija, v halah materiali, orodja in storitve. Poudarki bodo na novih infrastrukturnih, železniških, avtocestnih in komunalnih projektih ter na obnovi in energijski prenovi stavb. Predstavljeni bodo sodobni trendi na področju komunale, urejanje okolja, okolice, čistilne naprave ter nove tehnologije za klimatizacijo. Specializirane razstave bodo opozarjale na energijsko varčno gradnjo ter uporabo lesa.

Na Obrtni ulici bodo člani območnih obrtno podjetniških zbornic ter strokovnih sekcij OZS prikazovali zaključna obrtna dela v gradbeništvu in deficitarne poklice: mizar, slikopleskar, voznik, strojnik gradbene mehanizacije, avtoserviser, dimnikar, zidar, tesar in klepar krovca. Ustanove z vseh nivojev izobraževanja bodo predstavljale z gradbeništvom povezane izobraževalne programe.

Sočasni sejem GREEN bo predstavljala inovativne trajnostne dosežke, zelen življenjski slog in efikasne poslovne modele. V strokovnem

delu dogajanja sodeluje Ministrstvo za okolje in prostor.

Pestro in tehtno bo spremljajoče dogajanje. V sredo organizira Društvo za ceste Ljubljana v sodelovanju z Društvom za ceste Severovzhodne Slovenije posvet Sadobna prometna infrastruktura, priložnost za močan gospodarski razvoj. Predstavil bo načrte za posodobitve železniške in cestne infrastrukture v SV Sloveniji do leta 2021, vplive uvajanja E-mobilnosti na potrebne dograditve infrastrukture in druge aktualne projekte. Sejem bo odprl Minister za gospodarski razvoj in tehnologijo Zdravko Počivalšek. Podeljena bodo priznanja Znak kakovosti v graditeljstvu 2018. B2B kooperacijsko srečanje MEET4BUSINESS MEGRA 2018 bo poskrbelo za nove mednarodne poslovne povezave. V organizaciji kabineta predsednika vlade in Ministrstva za okolje in prostor RS se bo odvil Nacionalni forum zelenega gospodarstva. Združenje socialne ekonomije Slovenije pripravlja posvet o odgovornem nakupovanju, Ministrstvo za okolje in prostor predstavitev projekta LIFE Krepitev zmogljivosti.

V četrtek organizira Inštitut za javne službe strokovni posvet, ki bo predstavil komunalno v dobro občanov, dobre prakse in digitalizacijo. Zveza ekoloških gibanj Slovenije ZEG bo osvetlila Energetski koncept Slovenije, krožno

gospodarstvo ter družbene spremembe vrednotenja virov.

V petek bo Ministrstvo za okolje in prostor predstavilo okoljsko oblikovanje in inovacije kot del krožnega gospodarstva za večjo konkurenčnost Slovenije ter učinkovito rabo lesa za ogrevanje. Sekcija gradbincev pri Obrtno-podjetniški zbornici Slovenije bo opozorila na najpomembnejše novosti gradbenega zakona ter na problematiko opravljanja čezmejnih storitev v letu 2018. Potekali bosta tekmovanja dijakov v polaganju keramike ter osnovnošolcev v zlaganju mozaikov. Zveza ekoloških gibanj Slovenije organizira predavanje o onesnaženosti zraka.

Sobota bo še posebej posvečena predstavilam spretnosti in interaktivnim delavnicam Obrtnikom.

Vse sejemske dni bo Ekosklad nudil energetska svetovanja ter Gradbeni inštitut ZRMK svetovanja arhitektov, gradbenih in energetskih strokovnjakov ter svetovanja za ravnanje v primeru poplav, potresov in plazenja. Center ponovne uporabe pa je pripravil delavnice in svetovanja na temo novega življenja odpadkov.

www.pomurski-sejem.si

NOVI DIPLOMANTI

UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

I. STOPNJA – VISOKOŠOLSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO

Alja Koštomaj, In-situ meritve energijskih kazalnikov in kazalnikov kakovosti notranjega okolja na primeru pasivne hiše, mentorica doc. dr. Mateja Dovjak, somentor asist. dr. David Antolinc; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=99969>

I. STOPNJA – UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO

Petra Tihole, Prometna ureditev območja med Hermanovo in Kvedrovo cesto v Sevnici, mentor doc. dr. Peter Lipar; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=99779>

Miha Božič, Prenova vzgojnovarstvene ustanove z vidika kakovosti notranjega okolja in rabe energije, mentorica doc. dr. Mateja Dovjak; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=99776>

Polona Ivančič, Projektiranje jeklenih nosilcev z odprtinami, mentor doc. dr. Primož Može; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=99778>

Matic Gošte, Zagotavljanja mobilnosti s kolesom in vlakom, mentor izr. prof. dr. Marijan Žura, somentorica asist. dr. Darja Šemrov; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=99970>

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO

Maja Klenovšek, Ureditev odvodnje padavinskih voda s površin FGG na Hajdrihovi ulici, mentor doc. dr. Mario Krzyk; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=100045>

Karin Tomažič, Uporaba naprednih računskih metod za dopolnitev metode efektivnega prečnega prereza v naravnih požarih, mentor prof. dr. Igor Planinc, somentor izr. prof. dr. Tomaž Hozjan; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=99950>

Tina Muhič, Analiza sistemov socialnih stanovanj v evropskih državah, mentorica izr. prof. dr. Maruška Šubic-Kovač, somentor mag. Matija Polajnar; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=100091&lang=slv>

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM STAVBARSTVO

Timotej Čížek, Problematika izbire metodologije izračuna rabe energije na določitev korekturnih faktorjev v večstanovanjskih stavbah, mentor doc. dr. Mitja Košir; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=99923>

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

I. STOPNJA – VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Alen Ferhatović, Projektiranje dvoetažne lesene montažne hiše z enokapno streho, mentor pred. dr. Boštjan Ber, somentorica asist. Mateja Držečnik; <https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=69621&lang=eng>

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVA

Zdenko Bilič, Statična in dinamična analiza jeklenih skladiščnih regalov, mentor red. prof. dr. Stojan Kravanja, somentor doc. dr. Bojan Čas; <https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=69396>

Rok Frangež, Parametrična študija leseno-steklenih strižnih sten za uporabo v lahkih lesenih konstrukcijah, mentor red. prof. dr. Miroslav Premrov, somentorja izr. prof. dr. Andrej Ivanič in pred. dr. Boštjan Ber; <https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=69578&lang=slv>

Anja Selinšek, Analiza vpliva življenjskega cikla proizvodnje aluminijevih drogov na okolje, mentorica doc. dr. Branka Trček, somentorja izr. prof. dr. Bojana Dolinar in doc. dr. Marko Homšak; <https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=69369>

Klara Vurzer, Projektiranje stolpa na Ptujskem jezeru, mentor doc. dr. Milan Kuhta, somentor dr. Viktor Markelj; <https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=69474>

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

KOLEDAR PRIREDITEV

4.-7.4.2018

Mednarodni sejem Megra

Gornja Radgona, Slovenija

www.pomurski-sejem.si/index.php/sl/

8.-10.4.2018

CSEE – 3rd World Congress on Civil, Structural and Environmental Engineering

Budimpešta, Madžarska

<https://cseecongress.com/>

20.4.2018

6. posvet o 3. razvojni osi: "Ali gre sedaj končno zares?"

Ravne na Koroškem, Slovenija

www.dcm-svs.si/dogodki.html

6.-10.5.2018

2018 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Conference

Nashville, Texas, Združene države Amerike

www.cementconference.org/

15.-17.5.2018

Structural Faults & Repair 2018 and European Bridge Conference 2018

Edinburgh, Škotska

www.structuralfaultsandrepair.com/

22.-24.5.2018

S.ARCH 2018 – The 5th International Conference on Architecture and Built Environment with AWARDS

Benetke, Italija

<http://s-arch.net/>

6.-8.6.2018

3rd International Conference on Protection against Overtopping

Grange-over-Sands, Velika Britanija

<http://protections2018.org/Protections2018/homepage>

7.-9.6.2018

XVI Danube-European Conference on Geotechnical Engineering

Skopje, Makedonija

www.decge2018.mk/index.php

21.-22.6.2018

International Conference on Civil & Structural Engineering

Pariz, Francija

<https://civilengineering.enggconferences.com/>

1.-4.10.2018

Pacific Rim International Symposium INTERPRAEVENT 2018

Toyama, Japonska

<http://interpraevent2018.jp/>

3.-5.10.2018

EEBPVIII - 8th International Conference on Environmental Effects on Buildings and People:

Actions, Influences, Interactions, Discomfort

Krakov, Poljska

<http://psiw.org.pl/eebp8/>

18.-19.10.2018

24. simpozij "Vodni dnevi"

Portorož, Slovenija

<https://sdzv-drustvo.si/vodni-dnevi/>

28.-31.10.2018

IALCCE 2018 – The 6th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering

Gent, Belgija

www.ialcce2018.org/#/home

11.-14.5.2020

14th Congress INTERPRAEVENT 2020

Bergen, Norveška

www.interpraevent.at/?lng=4

2.-6.11.2020

5th World Landslide Forum

Kjoto, Japonska

<http://wlf5.iplhq.org/>

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