

Primljen / Received: 28.10.2023.

Ispravljen / Corrected: 7.6.2024.

Prihvaćen / Accepted: 19.6.2024.

Dostupno online / Available online: 10.8.2024.

Eksperimentalno istraživanje konstrukcijskog reprofiliranja sljubnica cementno polimernim mortom i polipropilenskim trakama u zidu

Autori:



¹Prof. **Sergey Churilov**
curilov@gf.ukim.edu.mk
Autor za korespondenciju



¹Prof. **Elena Dumova-Jovanoska**
dumova@gf.ukim.edu.mk



²Prof. **Veronika Shendova**.
veronika@iziis.ukim.edu.mk



²Prof. **Lidija Krstevska**
lidijakrstevska1@gmail.com



³Mr.sc. **Bojan Damchevski**
bojan@ading.com.mk



³**Dime Janchev**, dipl.ing. građ.
jancev@ading.com.mk

¹ Sveučilište Sv. Ćirila i Metoda u Skoplju
Građevinski fakultet Skoplje

² Sveučilište Sv. Ćirila i Metoda u Skoplju
Institut za potresno inženjerstvo i inženjersku
seizmologiju - IZIIS

³ ADING AD Skoplje

Prethodno priopćenje

Sergey Churilov, Elena Dumova-Jovanoska, Veronika Shendova, Lidija Krstevska, Bojan Damchevski, Dime Janchev

Eksperimentalno istraživanje konstrukcijskog reprofiliranja sljubnica cementno polimernim mortom i polipropilenskim trakama u zidu

U urbanim sredinama prevladavaju nearmirane zidane konstrukcije. Mnoge od tih konstrukcija su osjetljive na potrese, koji su glavni uzroci oštećenja i lomova. Stoga je provođenje opsežnih istraživanja za procjenu konstrukcijske nosivosti ovih zgrada ključno za razumijevanje njihovog ponašanja i izloženosti, kao i za predlaganje učinkovitih mjera pojačanja. To integrirano eksperimentalno i numeričko istraživanje bavi se učinkovitošću ponovnog fugiranja sljubnica kao održive metode za pojačavanje zidanih konstrukcija. U prvom dijelu rada dan je pregled suvremenih istraživanja različitih metoda i materijala za reprofiliranje sljubnica. Detaljno su prikazana eksperimentalna istraživanja nepojačanih i pojačanih zidanih panela upotrebom cementno polimernog morta i polipropilenskih traka u sljubnicama pod utjecajem tlačne i dijagonalne tlačne sile. Eksperimentalni rezultati pokazuju da fugiranje sljubnica značajno poboljšava nosivost i ima manji učinak na duktilnost zida, osobito kada izvorni mort ima nisku čvrstoću, kao što se i očekuje u postojećim zgradama. Dobiveni rezultati omogućuju kalibraciju nelinearnih numeričkih modela i strategija modeliranja koji služe za opsežnije proučavanje elemenata, pri tome omogućavajući parametarske studije i primjenu rezultata na postojeće zgrade.

Ključne riječi:

zide, pojačavanje, popravak sljubnica, eksperimentalno istraživanje, stabilnost konstrukcije

Research Paper

Sergey Churilov, Elena Dumova-Jovanoska, Veronika Shendova, Lidija Krstevska, Bojan Damchevski, Dime Janchev

Experimental investigation on masonry structural joint repointing with cement-polymer mortar and polypropylene strips

Unreinforced masonry structures are prevalent in urban areas. Many of these structures are vulnerable to earthquakes, which are the primary causes of damage and failure. Therefore, conducting comprehensive studies to assess the structural capacity of these buildings is crucial for understanding their behaviour and vulnerability and for proposing effective strengthening measures. This integrated experimental and numerical study explored the effectiveness of joint repointing as a viable method for strengthening masonry structures. A review of recent research on various joint repointing techniques and materials is presented in the first part of this paper. The experimental investigations of unreinforced and strengthened masonry panels, utilising cement-polymer mortar and polypropylene strips in bed joints subjected to compressive and diagonal compressive strengths, are detailed. The experimental results demonstrate that structural joint repointing significantly improves the strength and has a minor effect on the ductility of the masonry, particularly when the original mortar has low-strength properties, as expected in existing buildings. The obtained results enable the calibration of nonlinear numerical models and modelling strategies used to study the elements in a more extensive manner, allowing for parametric studies and the application of the findings to existing buildings.

Key words:

masonry, strengthening, joint repointing, experimental investigation, structural stability

1. Uvod

Zidane konstrukcije imaju široku primjenu u građevinarstvu zbog svoje trajnosti, čvrstoće i estetske privlačnosti. Međutim, osjetljive su na oštećenja uzrokovana raznim prirodnim i antropogenim opasnostima, uključujući potrese. Seizmički događaji predstavljaju značajnu prijetnju zidanim konstrukcijama i često rezultiraju razornim oštećenjima koja ugrožavaju cjelovitost konstrukcije i ljudske živote. Osim uobičajeno uočenog pucanja, drobljenja i cijepanja zidnih elemenata, odvajanja međusobno spojenih zidnih elemenata i morta, seizmičke sile mogu uzrokovati mnoge složene oblike lomova. Na primjer, torzijske i posmične sile mogu dovesti do dijagonalnog pucanja i pomaka kuteva, dok različito slijeganje između međusobno povezanih elemenata može uzrokovati deformaciju izvan ravnine i djelomično urušavanje. Nedavna istraživanja su potvrdila ozbiljna oštećenja i otkazivanja zidanih konstrukcija nakon jakih kretanja tla. Potresi magnitude 7,7 Mw i 7,6 Mw u Kahrmanmarašu iz 2023. godine imali su razorne učinke na zidane konstrukcije u pokrajini Adiyaman, gdje su vodeći uzroci štete bili nepoštivanje seizmičkih propisa projektiranja i upotreba materijala niske čvrstoće za zidove i spojeve [1]. Potres u Elaziğ-Sivrice magnitude 6,8 Mw iz 2020. doveo je do 40 izgubljenih života i mnogih urušenih ili teško oštećenih zgrada [2]. Otkazivanja zidanih konstrukcija pripisani su različitim čimbenicima, uključujući nedostatan projektiranje, ne uzimajući u obzir građevinske propise i korištenje slabih veznih materijala kao što su vapnena žbuka i opeka od blata. Kada se koriste horizontalni serklaži, oni često nisu integrirani u sami zid, što dovodi do djelomičnog urušavanja. Nedostatak krutih dijafragmi na razinama krova i podova rezultirao je neovisnim pomacima zidova i naknadnim oštećenjima, kao što su primjerice slučajevi urušavanja krova i prevrtanja zidova. Slično konstrukcijsko ponašanje, urušavanje i obrasci oštećenja zidanih zgrada zabilježeni su u potresima magnitude 6,4 Mw i 5,6 Mw u Albaniji 2019. [3], potresima u Zagrebu 2020. magnitude 5,3 Mw i Petrinji 6,4 Mw u Hrvatskoj [4-6] te potres 2017. u Tehuantepecu, Meksiko, magnitude 8,2 Mw [7].

Potresi diljem svijeta potaknuli su potrebu za projektiranjem i pojačavanjem zidanih konstrukcija kako bi izdržale seizmičke sile i spriječile značajna oštećenja ili urušavanje. Stoga se globalna važnost seizmičke otpornosti zidanih konstrukcija ne može dovoljno naglasiti. Uz seizmičku aktivnost koja se događa u različitim geografskim regijama - od seizmičkih žarišta Pacifičkog vatrenog prstena do zona unutar litosfernih ploča - prijetnje izgrađenom okolišu su univerzalne. U regijama s povijesno niskom seizmičkom aktivnošću kao što su dijelovi Europe i Afrike, iznenadna pojava potresa može zateći zajednice nespremnima, čime se onda pojačava utjecaj na zidane konstrukcije i nastaju golemi izazovi tijekom odgovora na katastrofe i napore potrebne za oporavak. Što se tiče tih izazova, istraživanje usmjereno na povećanje seizmičke otpornosti zidanih konstrukcija je ključno. Kroz razumijevanje specifičnih

mehanizama lomova i osjetljivosti svojstvenih zidanim konstrukcijama, mogu se razviti inovativne metode pojačanja i pristupi projektiranju kako bi se ublažili rizici koje predstavljaju seizmička događanja, što u konačnici čuva živote i neprocjenjivu kulturnu baštinu diljem svijeta.

1.1. Pregled metoda pojačanja kompozitima i reprofiranje sljubnica

Razvijene su različite metode za pojačanje zidanih konstrukcija. Inovativni materijali kao što su površinski vezani vlaknima armirani polimeri (eng. *fibre reinforced polymers* - FRP) i površinski ugrađene šipke korišteni su za popravak i pojačanje zidanih konstrukcija, pri čemu su dali dodatnu vlačnu čvrstoću zidu, povećali kapacitet duktilnosti i izmijenili mehanizam loma [8-11]. Nedavno su uvedeni kompoziti s cementnom matricom armirane tkaninom (eng. *fibre reinforced cementitious matrix* - FRCM) [12-16]. Primjena FRCM-a prije svega je usmjerena na poboljšanje konstrukcijskog ponašanja i čvrstoće zida, a ne na mijenjanje izgleda [17].

Reprofiliranje sljubnica se pokazalo kao obećavajuća i učinkovita metoda za pojačavanje zida, koja ima zanemariv učinak na estetski izgled zidanih konstrukcija [18-19, 30]. Reprofiliranje sljubnica zidanih konstrukcija uključuje uklanjanje dotrajalog ili starog morta iz spojeva i njegovu zamjenu novom mješavinom morta koja odgovara izvornoj boji, teksturi i čvrstoći. Ovom metodom poboljšana je konstrukcijska stabilnost, nosivost i seizmičko ponašanje zidanih konstrukcija [20-26]. Ključni čimbenici za uspješno ili neuspješno reprofiliranje su izbor morta u pogledu sastava, boje, teksture, profila sljubnica te alata i metoda kojima se održavaju i pojačavaju zidovi [27]. Primjena pojačanja sljubnica pomoću traka od ugljičnim vlaknima armiranog polimera (eng. *carbon-fiber-reinforced polymer* - CFRP) u zidovima od pune opeke, ugrađene u prethodno zarezane sljubnice koje su reprofilirane mortom na bazi vapna, spriječio je krti gubitak sidrenja, a mehanizam odvajanja uključivao je prijanjanje i trenje [28]. Postavljanjem FRP šipki u sljubnice zalijepljene pastom ili epoksidom, zidovi podvrgnuti opterećenju izvan ravnine pod cikličkim ili statičkim opterećenjima mogu se značajno poboljšati u smislu posmične otpornosti i otpornosti na moment savijanja [12]. Čelične armaturne šipke ugrađene u sljubnice smatraju se alternativom polimernim šipkama. Kada se primjenjuju na zidove od pune glinene opeke izložene simuliranim seizmičkim opterećenjima, seizmička otpornost može se povećati za određenu vrijednost; međutim, pojačanje može ali i ne mora povećati ukupan kapacitet pomaka. Zamjena slabog morta jačim može istovremeno dovesti do značajnog smanjenja pomaka s horizontalnim pojačanjem ili bez njega [29]. Eksperimentalno ispitivanje reprofiranja sljubnica s upletenim čeličnim šipkama pod kvazistatičkim cikličkim djelovanjem u ravnini na zidu u punoj veličini i testovi savijanja u četiri točke na zidanim elementima pokazalo je da je reprofiliranje sljubnica učinkovito smanjilo širinu i duljinu pukotine do graničnog stanja uporabivosti te povećalo duktilnost (30-40 %) i pomak (40-45 %) [30, 31].

Prisutnost pojačanja u sljubnicama također je rezultirala različitim mehanizmima loma. Pojačanje sljubnica pomoću čelične užadi visoke čvrstoće, koje je potpuno ugrađeno u sljubnice, znatno povećava otpornost izvan ravnine zidanih panela od opeke, s minimalnim utjecajem na izgled zida [32, 33]. Glatke titanijske šipke ugrađene u zidane panele od pune glinene opeke korištenjem epoksidne paste ili cementnog morta za dvostrani popravak nepojačanih zidanih panela pokazale su djelomično vraćanje posmične nosivosti izvan ravnine oštećenih zidanih panela [34]. Međutim, kod panela popravljenih cementnim mortom može doći do preuranjenog odvajanja šipki. Dubina reprofilaranja značajno utječe na učinkovitost metode. Za relativno ravne sljubnice, loš mort i neoštećene elemente preporučuje se dubina do jedne trećine debljine zida kako bi se osigurala stabilnost zida i poboljšala nosivost zida [29, 35]. Utvrđeno je da je dubina reprofilaranja od 70 do 80 mm učinkovita u povećanju posmične čvrstoće i krutosti kamenih zidova debljine od 300 do 700 mm, gdje je otpornost bila do tri puta veća od otpornosti prije pojačanja [36].

Proizvodi na bazi polipropilena (PP) uspješno su korišteni za povećanje čvrstoće u ravnini i izvan ravnine i kapaciteta pomaka zidnih materijala. Kratka PP vlakna i mreže ugrađene u anorgansku matricu mogu poboljšati lateralnu nosivost, mehanizam loma, duktilnost i sposobnost disipacije energije nepojačanih zidnih panela ispitanih pod opterećenjem u ravnini [37]. Uključivanje PP vlakana u sljubnice, PP vlakana u žbuku, i njihova kombinacija pokazala je povećanje tlačnih i savojnih svojstava zida [38]. Zbog niske cijene i jednostavnosti primjene, vanjski omotane polipropilenske trake opsežno su testirane posljednjih godina. Omatanje zidnih panela može zaustaviti razvoj pukotina, smanjiti lateralni kapacitet, promijeniti mehanizam loma i odgoditi krhki lom pod seizmičkim opterećenjem. U usporedbi s nepojačanim zidovima (eng. *unreinforced masonry walls* - URM walls), ove metode mogu povećati maksimalnu čvrstoću, čvrstoću pri najvećem pomaku, deformaciju i, u nekim slučajevima, krutost zida [39-45]. Armatura geomreže ugrađena u horizontalne i vertikalne sljubnice primijenjena je na zidane panele, što je povećalo posmičnu čvrstoću u ravnini, lateralnu čvrstoću i duktilnost [46]. U svim pregledanim istraživanjima reprofilaranje sljubnica je izvedeno vapnenim, cementnim i epoksidnim mortom. Nekoliko je istraživanja pokazalo da se za reprofilaranje sljubnica treba koristiti mort kompatibilan s izvornim [12-17, 27, 48]. To znači da bi čvrstoća morta trebala biti slična svojstvima zidnog elementa. Međutim, neka su istraživanja pokazala da zide može imati koristi od reprofilaranja cementnim mortom visoke čvrstoće [21, 29, 34, 35, 46, 47]. Eksperimentalno su ispitani učinci reprofilaranja cementnim reparaturnim mortom ojačanim polimernim vlaknima i polipropilenskim trakama, pokazujući da ova kombinacija značajno povećava dijagonalnu vlačnu čvrstoću zida, ali ima negativan učinak na tlačnu čvrstoću [47]. Također je zabilježeno da tradicionalni mortovi na bazi vapna mogu imati prednosti u odnosu na moderne mortove na bazi cementa, posebno u njihovoj fleksibilnosti i sposobnosti prilagođavanja promjenama topline i vlažnosti. Kako bi se spriječilo pucanje

zidnih elemenata, tlačna čvrstoća morta za reprofilaranje trebala bi biti niža od čvrstoće postojećih zidnih elemenata i biti slična ili niža od čvrstoće postojećeg morta u sljubnicama [48].

Područje reprofilaranja sljubnica posljednjih je godina doživjelo značajan napredak, a istražene su različite tehnike i materijali za poboljšanje učinkovitosti i trajnosti zidanih konstrukcija. Međutim, nedostaju istraživanja u primjeni mortova visoke čvrstoće i polipropilenskih traka. Cilj je ovog istraživanja riješiti taj nedostatak ispitivanjem izvedivosti i učinkovitosti ugradnje morta visoke čvrstoće, s niskim udjelom cementa i pojačanog vlaknima te polipropilenskih traka u sljubnice. Motivacija za ovo istraživanje je dvojaka. Prvo, upotreba morta visoke čvrstoće povećava ukupnu čvrstoću i nosivost sljubnica, čime se poboljšava njihova konstrukcijska cjelovitost i otpornost. Drugo, ugradnja polipropilenskih traka može osigurati dodatno pojačanje i kontrolu pukotina, smanjujući pojavu pukotina i povećavajući dugovječnost reprofilaranih sljubnica.

1.2. Motivacija i ciljevi trenutnog istraživanja

Cilj ovog istraživanja je eksperimentalno ispitati učinkovitost metode reprofilaranja sljubnica zida upotrebom cementno polimernog morta i polipropilenskih traka, nadovezujući se na prethodna istraživanja i uvide Damchevskog i sur. [47]. Prethodna istraživanja pokazala su značajno poboljšanje u seizmičkoj otpornosti zida s reprofilaranim sljubnicama u usporedbi s nepojačanim zidom (URM). Točnije, upotreba morta na bazi cementa pojačanog vlaknima visoke čvrstoće, koji ADING AD Skopje prodaje kao reparaturni mort F4, rezultirala je znatnim povećanjem od 137 % u dijagonalnoj vlačnoj čvrstoći zida s reprofilaranim sljubnicama u usporedbi s nepojačanim konstrukcijama (URM). Međutim, određeni ključni parametri, uključujući tlačnu čvrstoću, modul posmika i kapacitet duktilnosti, pokazali su lošije ponašanje u usporedbi s URM uzorcima, s tlačnom čvrstoćom i modulom posmika koji su imali približno 18 % odnosno 28 % niže vrijednosti. Naposljetku, pojačani uzorci pokazali su nešto nižu duktilnost od URM uzoraka.

Unatoč tim ograničenjima, autori su predložili da bi se optimiziranjem kompatibilnosti morta s postojećim svojstvima zida njegove čvrstoće mogle dodatno poboljšati. Stoga su ciljevi ovog istraživanja eksperimentalno ispitati novi i poboljšani polimerni cementni mort, reparaturni mort FS4, za reprofilaranje sljubnica sa sredstvima koja kompenziraju skupljanje i pojačana su polipropilenskim vlaknima. Nadalje, ovo istraživanje ima cilj procijeniti sveukupno poboljšanje seizmičke otpornosti koje se može postići ugradnjom polipropilenskih (PP) traka u horizontalne sljubnice zida kao dio procesa reprofilaranja sljubnica. Ciljevi istraživanja su također:

- isprojektirati prilagođeni materijal za reprofilaranje s posebnim doprinosom povećanju seizmičke otpornosti zida
- ocijeniti učinkovitost metode reprofilaranja sljubnica kao zahvata konstrukcijskog pojačanja zidanih konstrukcija
- procijeniti ekonomsku isplativost primjene, trajanje primjene i složenost postupka.

Predstavljena otkrića proizlaze iz istraživačkog projekta "Pojačanje zida reprofiliranjem sljubnica (STREP), zajedničkog projekta između Građevinskog fakulteta – Skoplje, Instituta za potresno inženjstvo i inženjersku seizmologiju Skoplje i ADING AD Skoplje [49].

2. Eksperimentalno istraživanje

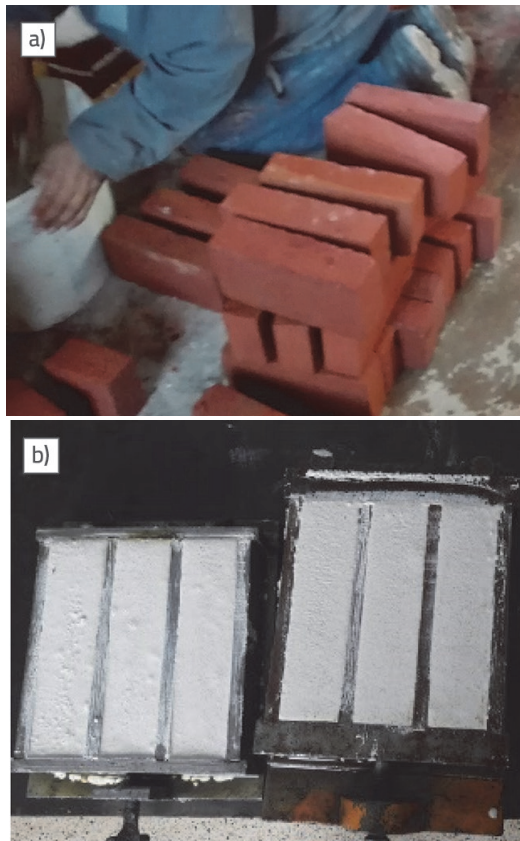
2.1. Uvod

Zbog različitih ograničenja, eksperimentalni program je strukturiran i proveden u dvije različite faze: (1) ispitivanje sastavnih materijala i (2) ispitivanje zidnih panela pod aksijalnim i dijagonalnim tlakom. Ovaj strukturirani pristup osigurao je sveobuhvatnu analizu pojedine faze. Na početku su sastavni materijali bili temeljito ispitani kako bi se utvrdile početne vrijednosti za specifičnu težinu i tlačnu i savojnu vlačnu čvrstoću opeke i morta. Zatim su zidni paneli podvrgnuti tlačnim i dijagonalnim tlačnim ispitivanjima u ravnini koja su uključivala glinene zidne elemente od pune opeke i vapneni mort kako bi se replicirale karakteristike zida u starim zgradama. Uz to, program je uključio procjenu pojačanih panela korištenjem reprofiliranja sljubnica cementno polimernim mortom i polipropilenskim trakama za procjenu učinkovitosti metode pojačanja.

2.2. Sastavni materijali

2.2.1. Opeke i vapneni mort

Za određivanje fizičkih svojstava elemenata, pune glinene opeke dimenzija $250 \times 120 \times 60$ mm ispitane su u skladu s EN 771-1:2011 [48] i MKS EN 772-1:2013 [51] normama kako bi se odredila njihova tlačna čvrstoća, kao što je prikazano na slici 1. Proveden je niz ispitivanja na zidanim komponentama i definirani su najkritičniji parametri. Kako bi se stvorili stvarni uvjeti starih zidanih zgrada, korišten je vapneni mort za povezivanje opeke. Stoga je pripravljena mješavina pijeska, vapna i vode, a ispitni uzorci prikupljeni su iz devet prizmi morta dimenzija $160 \times 40 \times 40$ mm, kao što je prikazano na slici 1.



Slika 1. Sastavni materijali za zidane uzorke: a) Puna glinena opeka; b) Prizme vapnenog morta

Mješavina morta pripravljena je kombiniranjem vapna i pijeska u omjeru volumena 1 : 3. Korišten je prirodni riječni pijesak s dvije frakcije veličine zrna od 0 do 0,5 mm i 0,8 do 1,25 mm. Udjeli obje frakcije bili su jednaki. Vapno je imalo kontrolirani sastav i kemijska svojstva deklarirana od strane proizvođača u skladu s normom EN 459 [52]. Savojna i tlačna čvrstoća vapnenog morta određena je prema MKS EN 1015-11 [53]. Pojednosti testova mogu se pronaći u Damchevski i sur. [47], a tablice 1. i 2. prikazuju rezultate dobivene za pune opeke i prizme od vapnenog morta.

Tablica 1. Prosječna svojstva materijala za punu glinenu opeku [47]

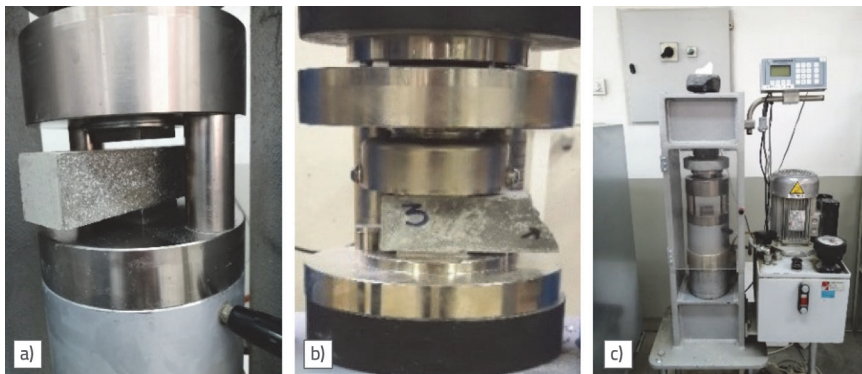
Materijal	Dimenzija opeke [mm]			Upijanje vode [%]	Gustoća [kg/m ³]	Tlačna čvrstoća [N/mm ²]	Savojna vlačna čvrstoća [N/mm ²]
	Dužina	Širina	Visina				
Puna glinena opeka	249,8	122,8	57,8	9,38	1977,0	10,64	3,04
CoV [%]	--	--	--	7,6	1,0	19,7	19,3

Tablica 2. Prosječna svojstva materijala za vapneni mort [47]

Materijal	Dimenzija ispitnog uzorka [mm]			Gustoća [kg/m ³]	Tlačna čvrstoća [N/mm ²]	Savojna vlačna čvrstoća [N/mm ²]
	Dužina	Širina	Visina			
Vapneni mort	159,4	40,0	39,8	1650,2	0,94	0,73
CoV [%]	--	--	--	1,9	5,4	9,3

Tablica 3. Prosječna svojstva materijala za reprofilirajući mort [47]

Materijal	Dimenzija ispitnog uzorka [mm]			Gustoća [kg/m ³]	Tlačna čvrstoća [N/mm ²]	Savojna vlačna čvrstoća [N/mm ²]
	Dužina	Širina	Visina			
Mort za reprofiliranje	159,6	39,9	39,8	2200,1	32,86	12,0
CoV [%]	--	--	--	2,3	4,5	7,8



Slika 2. Ispitivanje morta za reprofiliranje: a) Ispitivanje savojno vlačne čvrstoće; b) Ispitivanje tlačne čvrstoće; c) Ispitni uređaj

2.2.2. Reprofilirajući mort

Cilj ovog istraživanja bio je razviti novi mort za reprofiliranje sljubnica sa svojstvima prilagođenim svojstvima postojećih zidnih elemenata, uzimajući u obzir prethodna svojstva morta visoke čvrstoće korištenog za reprofiliranje [46], što je pridonijelo visokoj tlačnoj i vlačnoj čvrstoći ziđa. Provedeno je istraživanje kako bi se riješile prethodno otkrivene nedosljednosti.

Osim toga, mort je napravljen kao gotova mješavina, jednokomponentni sustav na bazi cementa i polimera, pojačan mikrovlaknima, koji brzo razvija visoku tlačnu i savojnu vlačnu čvrstoću. Također je otporan na vremenske uvjete, ne sadrži kloride, pojačan je polipropilenskim vlaknima duljine 3 mm, i sadrži sredstva za kompenzaciju skupljanja i mikrosiliku (silikatne pare). Nove mješavine morta sadrže relativno niske količine cementa i visoke količine polimera. Pješčani agregati pripremljeni kombinacijom raznih vrsta riječnog podrijetla i kvarcnih agregata imaju najveću veličinu zrna od 4 mm. Ispitivanja su provedena prema MKS EN 12190:2009 [54] i MKS EN 1504-3:2006 [55] na prizmama morta, sličnim onima koje se koriste za ispitivanje svojstava vapnenog morta. Omjer voda/mort bio je 0,12. Ispitivanje i lomovi prizme prikazani su na slici 2.

U tablici 3. prikazani su rezultati ispitivanja reprofilirajućeg morta. U usporedbi s izvorno korištenim reprofilirajućim mortom [47], postignuto je smanjenje tlačne čvrstoće od 44,8 % i povećanje savojne vlačne čvrstoće od 182,3 %. Gustoća morta povećana je za 7,6.

2.2.3. Smjesa za impregnaciju

Kako bi se poboljšala prionjivost reprofilirajućeg morta za zidane elemente, površine za reprofiliranje su impregnirane smjesom

za impregnaciju. Ovaj materijal sastoji se od jedne komponente i na bazi je cementa bez klorida i služi za poboljšanje prijanjanja i stabilizaciju starih i novih površina morta.

Čvrstoća prijanjanja određena je provođenjem testa izvlačenja na devet uzoraka prema MKS EN 1542:1999 [56]. Smjesa za impregnaciju pripremljena je tako da je prah pomiješan vodom u omjeru 10:3 te je nanesen na element od tri opeke u dva koraka u razmacima od 30 minuta. Naposljetku, opeke su prekrivene 10 mm debelim slojem morta za reprofiliranje, koji je izrezan metalnom krunom promjera 50

mm, kao što je prikazano na slici 3. U 90 % slučajeva, mehanizmi otkazivanja pojavili su se nakon testova izvlačenja duž pune opeke. Može se zaključiti da je spoj opeke i morta bio zadovoljavajući. Srednja čvrstoća prijanjanja je $f_{adh} = 1,5 \text{ N/mm}^2$.



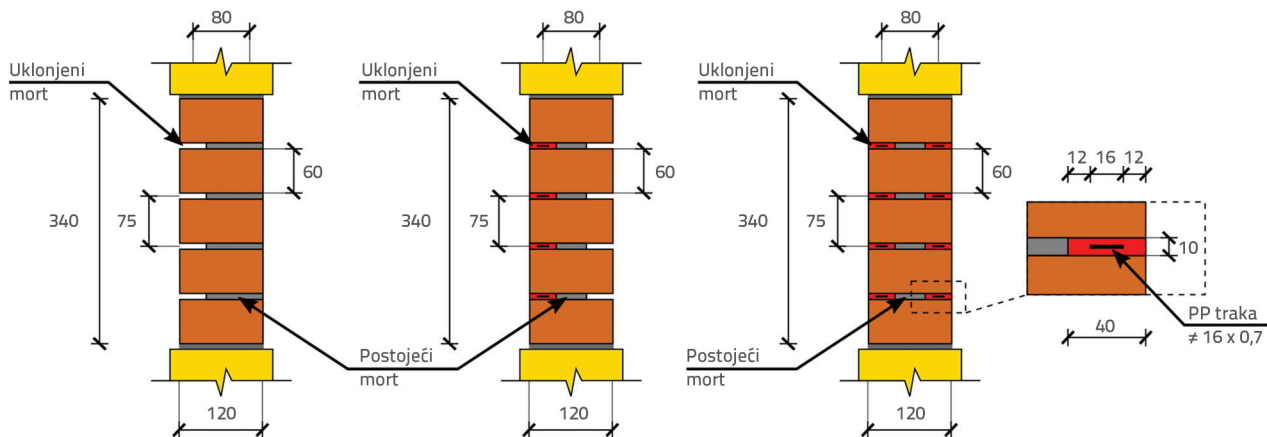
Slika 3. Ispitivanje izvlačenjem na reparaturnom mortu FS4



Slika 4. PP traka za pojačanje horizontalnih sljubnica

Tablica 4. Prosječna svojstva materijala za PP trake

Materijal	Dimenzije PP trake [mm]		Gustoća [kg/m ³]	Vlačna sila pri slomu [N]	Vlačna čvrstoća [N/mm ²]	Produljenje [%]
	Širina	Debljina				
PP traka	16,0	0,7	719,64	2,124,9	189,7	18



Slika 5. Metodologija reprofilaranja sljubnica ispitivanih zidanih panela od opeke

2.2.4. Polipropilenska (PP) traka

PP trake dodane su u reprofilirane sljubnice kako bi se poboljšala duktilnost reprofilaranog zida, povećala vlačna čvrstoća i spriječilo krto pucanje. Trake su imale grubu teksturu s obje strane, što je povećalo prljanje između trake i morta za reprofilaranje, kao što je prikazano na slici 4. Mehanička svojstva materijala PP traka nisu ispitana u ovom istraživanju; umjesto toga, preuzeta su svojstva proizvođača. U tablici 4. navedena su svojstva PP trake ispitana prema normi MKS EN ISO 9001:2015 [57].

2.3. Ispitivanje zida

Ispitivanje je provedeno za određivanje tlačne i dijagonalne vlačne čvrstoće dviju skupina panela izrađenih od pune glinene opeke i vapnenog morta: nepojačane zidane konstrukcije (URM) i pojačane zidane konstrukcije s reprofiliranim sljubnicama (SM). Ograničeni broj od tri panela po skupini je izgrađen i testiran kako bi se dobili potrebni podaci za analizu.

2.3.1. Metode pojačanja

Reprofilaranje sljubnica i pojačanje izvedeno je na prethodno brušenim i impregniranim sljubnicama do dubine od približno jedne trećine debljine zida s obje strane, prema metodologiji prikazanoj na slici 5., kako bi se osigurala stabilnost zida i spriječilo izvijanje. To se obično izvodi pomoću specijaliziranih ručnih alata, kao što su dljetja i brusilice, ili električnih alata. U ovom slučaju za uklanjanje vapnenog morta iz sljubnica korišteno je sporo oscilirajuće svrdlo. Potom su sljubnice očišćene kombinacijom komprimiranog

zraka i vode kako bi se osiguralo da u njima nema krhotina i slobodnih čestica.

Budući da je impregnacijska smjesa bila još svježija (ljepljiva na dodir), preko nje je na sljubnice nanesen reprofilirajući mort. Sljubnice su popunjene mortom u jednom sloju pomoću zidarske lopatice i lopaticom za spojeve. Kako bi se poboljšala duktilnost i disipacija energije, PP trake su ručno ugrađene u horizontalne sljubnice otprilike u sredini debljine sljubnica.

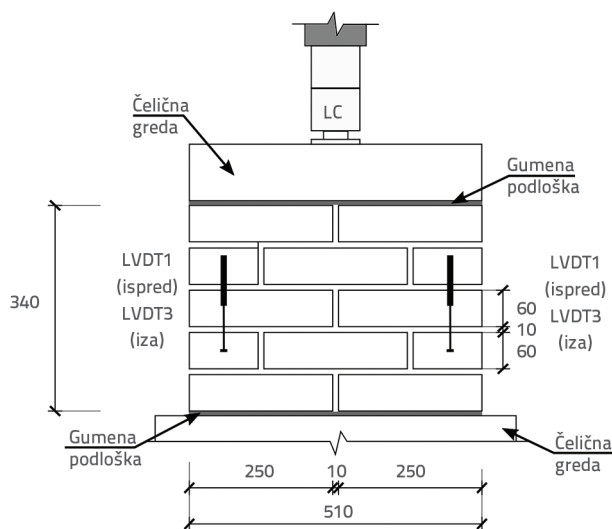
2.3.2. Tlačna ispitivanja u jednoj osi

Nepojačani (W-AP) i pojačani uzorci zida (WS-AP-RPP) napravljeni su u skladu sa standardnim odredbama s potpuno ispunjenim vertikalnim i horizontalnim sljubnicama, kao što je prikazano na slici 6.



Slika 6. Izrada uzoraka za ispitivanje

Kako bi se spriječilo da očvršćivanje utječe na rezultate [59], razdoblje njege za URM panele iznosilo je 212 dana, a za SM panele je 244 dana. Aksijalna tlačna ispitivanja provedena su prema MKS EN 1052-1:1998 [58] u laboratoriju Građevinskog fakulteta u Skoplju. Tlačna čvrstoća ziđa ispitana je na uzorcima dimenzija 510 × 340 × 120 mm, kao što je prikazano na slici 7. Ova prilagodba bila je potrebna zbog specifičnih karakteristika naših zidnih elemenata, ograničenja našeg uređaja za ispitivanje, i usklađenosti s dimenzijama korištenim u prethodnim ispitivanjima autora [47]. Unatoč ovom odstupanju, poduzeto je nekoliko mjera kako bi se osigurala pouzdanost rezultata. Opeke su prije upotrebe natopljene vodom. Kruta čelična greda postavljena je na vrh svakog uzorka (zidnog panela) kako bi se omogućila ravnomjerna raspodjela opterećenja po cijeloj površini uzorka. Vertikalni pomaci izmjereni su između dviju fiksnih točaka s obje strane uzorka. Kao sustavi za prikupljanje podataka korišteni su Kyowa digitalni linearni pretvarači promjenjivog pomaka (LVDTs), 8-kanalno HBM Spider pojačalo i odgovarajući spojni kabeli. Primjena opterećenja bila je ručna, korištenjem vertikalne hidraulične preše, i kontrolirana s malim koracima opterećenja. Iz sigurnosnih razloga sva je mjerna oprema morala biti uklonjena prije loma.

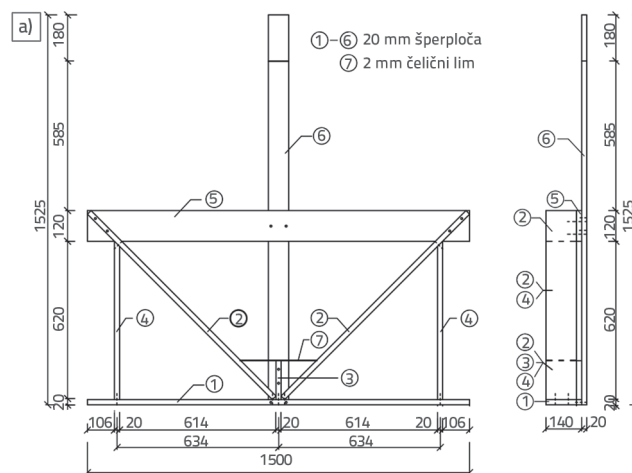


Slika 7. Ispitivanje tlačne čvrstoće

2.3.3. Dijagonalno tlačno ispitivanje

Dijagonalna vlačna (posmična) čvrstoća ziđa ispitana je na tri panela dimenzija 1040 × 1040 × 125 mm. Ispitivanja su provedena u skladu s ASTM E 519-02 [60] na Institutu za potresno inženjerstvo i Laboratoriju za inženjerska seizmološka ispitivanja. Ova je norma posebno osmišljena za dijagonalna tlačna ispitivanja zidanih sklopova. Pruža detaljnu metodologiju za procjenu posmične čvrstoće zidnih elemenata, što je kritičan parametar u našem istraživanju. Nepojačani (W-DP) i pojačani zidani paneli (WS-DP-RPP) izrađeni su od istih materijala korištenih za tlačna ispitivanja. U skladu s normom, ispitni zidani panel je zarotiran za 45 stupnjeva i opterećen

vertikalnom tlačnom silom duž dijagonale panela. Kako bi se spriječilo pucanje ili odvajanje sastavnih materijala prilikom rotacije i prijenosa panela na mjesto ispitivanja, rotirane ploče su napravljene s potpornom oplatom od šperploče, kao što je prikazano na slici 8.a.



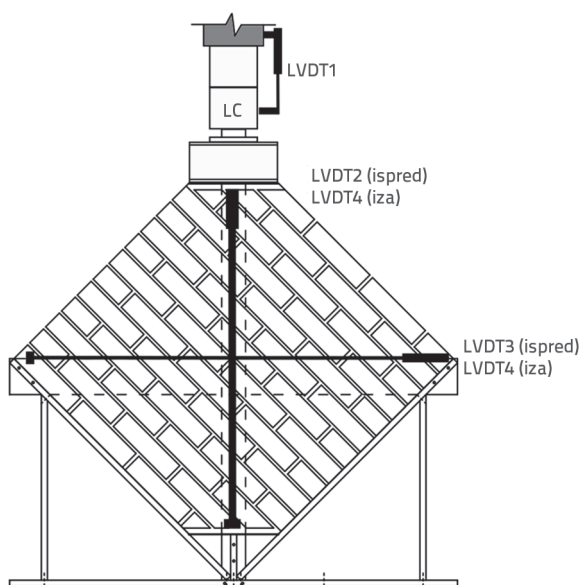
Slika 8. Izgradnja oplata od šperploče i uzorka za ispitivanje dijagonalne vlačne čvrstoće zidova: a) Crtež modela oplata od šperploče; b) Izvedba zidanih panela

URM zidani paneli su ispitani nakon njege od 202 dana, a SM paneli su ispitani nakon njege od 356 dana. Reprofiliranje horizontalnih sljubnica i ugradnja PP traka u SM zidove provedena je 100 dana nakon izgradnje. Utovarne papučice nisu korištene jer su paneli izvedeni s horizontalnim gornjim i donjim rubovima u potpunoj drvenoj oplati, kao što je prikazano na slici 8.b. Kratka kruta čelična greda postavljena je na vrh svakog uzorka kako bi se omogućila ravnomjerna raspodjela opterećenja po cijeloj površini panela, kao što je prikazano na slici 9. PP trake su ugrađene u svaku horizontalnu sljubnicu na približno polovici debljine sljubnice bez ikakvog dodatnog sustava za sidrenje. Nanošenje opterećenja bilo je automatsko, primjenom vertikalne hidraulične preše, a mali koraci opterećenja kontrolirani su do loma. Korišten je sustav za prikupljanje podataka National

Instruments i odgovarajući spojni kabeli. Sustav od pet LVDT-a postavljen je okomito i vodoravno na dijagonale zida, kao što je prikazano na slici 10. LVDT2 i LVDT4 bili su okomito orijentirani na površini prednje odnosno stražnje strane te su korišteni za mjerenje okomitog skraćivanja zida. LVDT3 i LVDT5 postavljeni su vodoravno na prednju i stražnju površinu i korišteni su za mjerenje vodoravnog produljenja stijenke zida. LVDT1 je služio kao referentni i kontrolni pretvarač između hidraulične preše i mjerne ćelije.



Slika 9. Ispitivanje dijagonalne vlačne čvrstoće



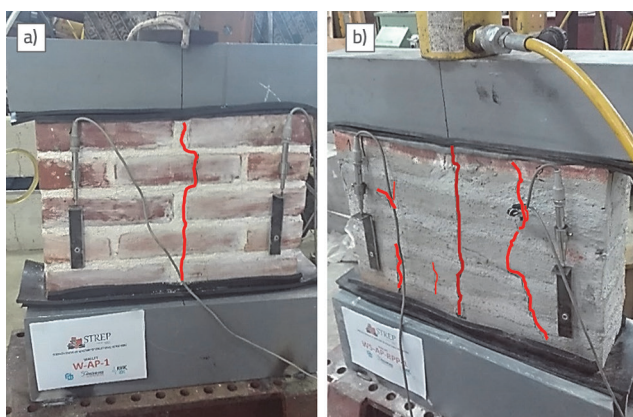
Slika 10. Instrumenti ispitnog panela s pozicijama LVDT-ova

3. Rezultati ispitivanja i rasprava

3.1. Tlačna čvrstoća

Slika 11. prikazuje tipične mehanizme loma na kraju ispitivanja tlačne čvrstoće. URM uzorci razvili su vidljive kontinuirane vertikalne pukotine u središnjem dijelu panela, kao što je prikazano na slici 11a. Pukotine su uočene u sljubnicama, spojevima morta i opeke, i opeci. Tijekom ispitivanja pojavile su se sitne pukotine sve dok nije došlo do iznenadnog krtoq loma, praćenog kratkim glasnim zvukom pucanja. Prethodna ispitivanja su izvijestila o sličnim ponašanjima [61-63]. SM uzorci razvili su uzorak krhkih pukotina sličan uzorcima URM-a, s dodatnim vertikalnim pukotinama u uzorcima, kao što je prikazano na slici 11b. Ovakav uzorak pukotina ne podupire hipotezu da ugradnja PP traka u horizontalne sljubnice može smanjiti pojavu pukotina.

U tablici 5. prikazani su rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće za oba uzorka. Prema MKS EN 1052-1:1998 [58], tlačno naprezanje računa se kao omjer nanese sile i poprečnog presjeka opterećene površine. Uzimajući u obzir srednju vrijednost deformacija koja dolazi iz oba vertikalna pretvarača, Youngov modul je izračunan kao sekantni modul na jednoj trećini vršnih vrijednosti naprezanja i odgovarajućih elastičnih deformacija. Vršna deformacija određena je na temelju vršnog naprezanja uzorka. Nakon vršnog dijela krivulje, krajnja deformacija je izračunana pri 80 % vršnog naprezanja [64]. Krivulje naprezanja-deformacije izvedene iz mjerenja opterećenja i pomaka, prikazane su na slici 12. Svi su uzorci pokazali vrlo sličan presjek u linearnom rasponu do jedne trećine maksimalne postignute čvrstoće, s prosječnom čvrstoćom od 0,85 N/mm² za URM odnosno 1,06 N/mm² za SM uzorke.

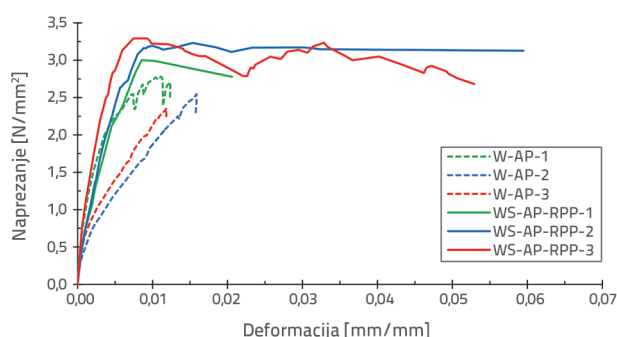


Slika 11. Tipični mehanizmi loma zidanog panela nakon ispitivanja tlačne čvrstoće: a) URM panel (W-AP); b) SM panel (WS-AP-RPP)

Prema krivuljama sa slike 12. može se vidjeti da materijal pokazuje linearno elastično ponašanje do određene razine deformacije, približno 80 do 90 % svoje čvrstoće [64]. Iza ove razine postaje nelinearan, čim se pojave prve pukotine.

Tablica 5. Rezultati tlačnih ispitivanja na URM (W-AP) i SM (WS-AP-RPP) zidanim panelima (uzorcima)

Zidani panel	Vršno opterećenje [kN]	Tlačno naprezanje, f_k [N/mm ²]	Youngov modul elastičnosti, E [N/mm ²]	Omjer E/f_k [-]	Vršna deformacija [-]	Deformacija pri slomu [-]
W-AP-1	170,15	2,78	1211,0	436	0,0111	0,0114
W-AP-2	155,81	2,55	980,0	385	0,0159	0,0157
W-AP-3	144,19	2,36	986,0	418	0,0118	0,0118
Srednja vrijednost	156,72	2,56	1059,0	413	0,0129	0,0130
CoV [%]	8,3	8,2	12,4	6,2	20,0	18,3
WS-AP-RPP-1	183,73	3,00	1217,0	405	0,0086	0,0206
WS-AP-RPP-2	197,76	3,23	924,0	286	0,0153	0,0595
WS-AP-RPP-3	201,48	3,29	1295,0	393	0,0093	0,0529
Srednja vrijednost	194,32	3,17	1145,3	362	0,0111	0,0443
CoV (%)	4,8	4,8	17,1	18,2	33,3	47,0



Slika 12. Usporedba krivulja tlačnog naprezanja-deformacije

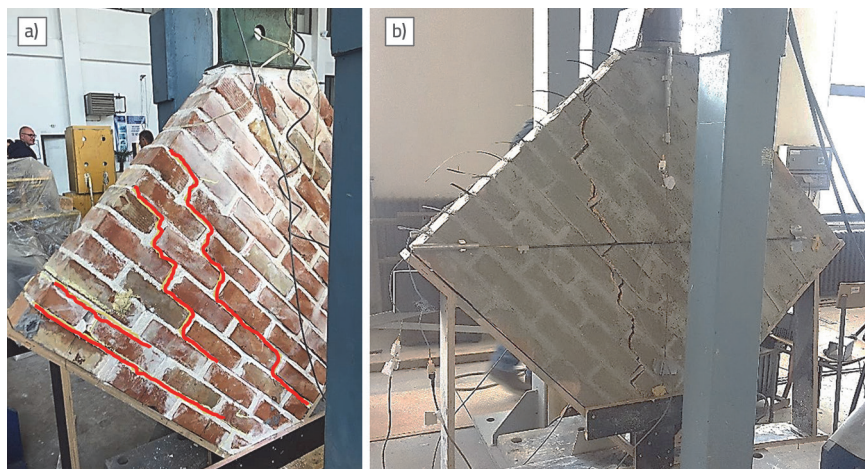
Prosječna tlačna čvrstoća, f_k , URM uzoraka bila je 2,56 N/mm², a izračunani prosječni Youngov modul elastičnosti (E), bio je 1211,0 N/mm². Prosječni omjer E prema f_k bio je 413. Dobivena vrijednost je u nižem rasponu vrijednosti koje je predložio Tomažević [35], $200 f_k \leq E \leq 2000 f_k$, ali mnogo niža od vrijednosti predložene za nove zidane konstrukcije u Eurokodu 6 [65] i talijanskim građevinskim propisima, NTC 2018. [66], koji predlažu $E = 1000 f_k$, FEMA 306 [67] predlaže $E = 550 f_k$, TMS 2016 [68] predlaže $E = 700-900 f_k$, IBC 2003 [69] i MSJC 2002 [70] predlaže $E = 700 f_k$, a kanadski zidarski propisi [71] predlažu $E = 850 f_k$.

Prosječna tlačna čvrstoća SM uzoraka bila je 3,17 N/mm², a izračunani prosječni Youngov modul elastičnosti iznosio je 1145,3 N/mm². Prosječni omjer E prema f_k iznosio je 362, što je nešto manje od vrijednosti izračunane za URM uzorke. Iako je ispitan samo mali broj uzoraka, ovo istraživanje pokazuje da se odnos između tlačne čvrstoće i modula elastičnosti uzoraka URM i SM može smatrati sličnim. To pokazuje da dodavanje materijala za pojačanje ne mijenja značajno odnos između

tlačne čvrstoće i modula elastičnosti. Međutim, potrebna su daljnja istraživanja kako bi se u potpunosti razumjeli učinci pojačavajućih materijala na zidane konstrukcije i potvrdila ova hipoteza.

SM uzorci povećali su prosječnu tlačnu čvrstoću zida za približno 24 %. Za razliku od toga, prosječni Youngov modul SM uzoraka povećao se za samo 8 %. To znači da je metoda pojačanja povećala tlačnu čvrstoću i krutost zida zbog poboljšanih svojstava morta. Iako ponašanje PP traka nije mjereno, vjeruje se da je njihov doprinos ovim ispitivanjima relativno mali, uglavnom zbog nedostatka sidrenja na krajevima uzoraka. Vrijednosti horizontalne deformacije na kraju prvog linearnog dijela potvrdile su da su reparaturni mort i armatura od PP trake u početku poboljšali ponašanje zida. Koeffcijent varijacije Youngovog modula elastičnosti za oba uzorka pokazuje da se iz malog broja ispitanih uzoraka ne može izvući pouzdan zaključak. Na temelju vršnih i krajnjih vrijednosti deformacije, vidi se da su SM uzorci pokazali veći kapacitet deformacije od URM uzoraka. To sugerira da primijenjena metoda nije samo povećala čvrstoću, već je i poboljšala sposobnost materijala da apsorbira energiju, što je ključno za konstrukcije koje moraju izdržati sile bez pucanja ili otkazivanja. Na povećanu sposobnost deformacije možda je utjecala učinkovitija preraspodjela opterećenja unutar zidova, pri čemu je dopustila da raspodjela naprezanja postane ujednačenija i smanjila koncentracije deformacije i lokalizirana otkazivanja.

Važno je napomenuti da je URM uzorak W-AP-1 pokazao bolja svojstva krutosti od druga dva uzorka. Ova se razlika može objasniti mogućim varijacijama u materijalima opeke i morta ili njihovom međusobnom vezom. Iako su isti zidari konstruirali sve ispitne uzorke, određene varijacije poput poravnanja zidanih elemenata ili zbijanja tijekom gradnje mogle su doprinijeti varijacijama u krutosti.



Slika 13. Tipični mehanizmi loma zida od opeke nakon ispitivanja dijagonalne vlačne čvrstoće: a) URM zidani panel (W-DP); b) SM zidani panel (WS-DP-RPP)

3.2. Dijagonalna vlačna čvrstoća

Slika 13. prikazuje tipične mehanizme loma zidanih panela na kraju ispitivanja dijagonalne vlačne čvrstoće. Pri krajnjem opterećenju, kod URM panela došlo je do dijagonalnog otkazivanja i posmičnog otkazivanja klizanjem. Mehanizmi loma karakterizirani su vidljivim dijagonalnim stepenastim pucanjem u donjim dijelovima panela, koje je premašilo vlačnu čvrstoću zida, kao što je prikazano na slici 13a. Dodatno, dva najniža reda horizontalnih sljubnica imala su pukotine duž spojeva, upućujući na tipično posmično klizanje u ravnini duž sljubnica. Pukotine su također uočene u sljubnicama, tj. na spoju morta i opeke. Kod SM panela su se razvile dijagonalne pukotine u ravnini, što je rezultiralo lomom zidnih elementa.

Glavna pukotina je okomita i nalazi se na otprilike jednoj trećini glavne dijagonale, kao što je prikazano na slici 13b. Lom svih

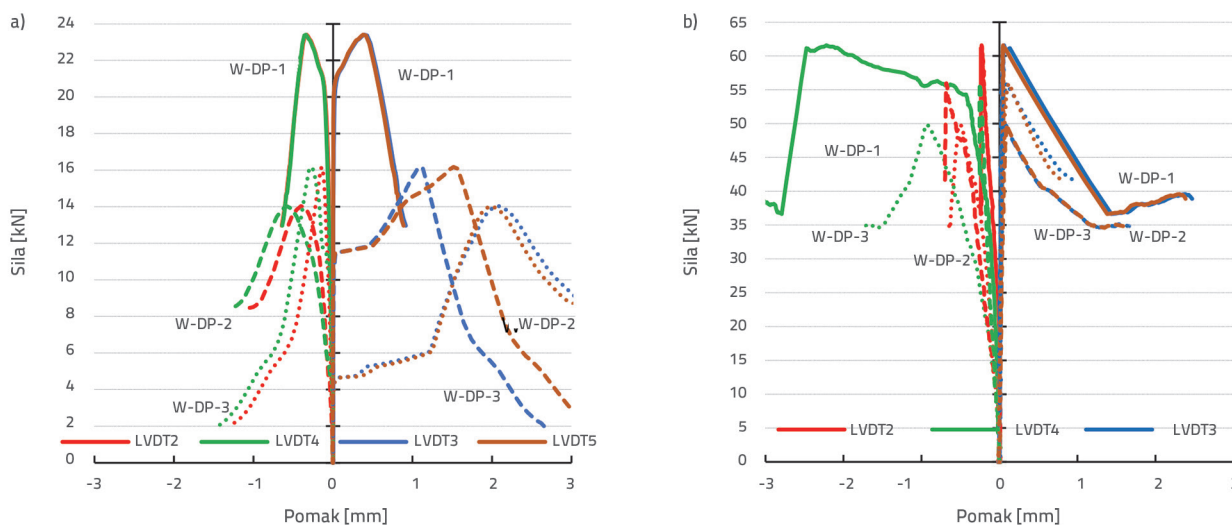
panela bio je iznenađan, popraćen kratkim, glasnim zvukom, koji upućuje na krhko ponašanje. Slika 14 prikazuje dijagrame opterećenja i pomaka za sve ispitane panele. Produljenje se smatra pozitivnim, a skraćanje negativnim. Mehanička svojstva izračunana su prema ASTM E 519-02 [60]. Ponašanje zida pri dijagonalnom posmičku ne prikazuje tipičnu točku popuštanja; stoga se modul krutosti može odrediti korištenjem nagiba sekante na dijagramu posmičnog naprezanja i posmične deformacije.

Za izračun sekantnog modula krutosti korištene su tri razine posmičnog naprezanja s konstantnim posmičnim deformacijama: 0,05 S_s , 0,3 S_s i 0,7 S_s , koje odgovaraju 5 % (granično stanje

pukotine i oštećenja), 30 % (očigledne promjene u krutosti), odnosno 70 % (ozbiljna degradacija otpornosti) maksimalnog posmičnog naprezanja S_s [29, 37]. URM paneli otkazali su u prosjeku na 18,24 kN, što odgovara prosječnom posmičnom naprezanju od 0,1012 N/mm² i konačnom pomaku od 0,308 %, što upućuje na duktilno ponašanje.

Iz tablice 6. je vidljivo da su SM zidani paneli otkazali u prosjeku na 55,75 kN, što odgovara prosječnom posmičnom naprezanju od 0,316 N/mm² i konačnom pomaku od 0,252 %.

Slika 15. prikazuje usporedbu dijagrama dijagonalnih vlačnih naprezanja-deformacija URM i SM zidanih panela. Uočeno je očito povećanje dijagonalne posmične čvrstoće SM panela u usporedbi s onom URM panela. Izračunano prosječno povećanje posmične čvrstoće iznosilo je 3,12 puta. Međutim, došlo je do malog smanjenja prosječne duktilnosti SM panela u usporedbi s onom URM panela. Dijagrami za URM i SM panele pokazuju

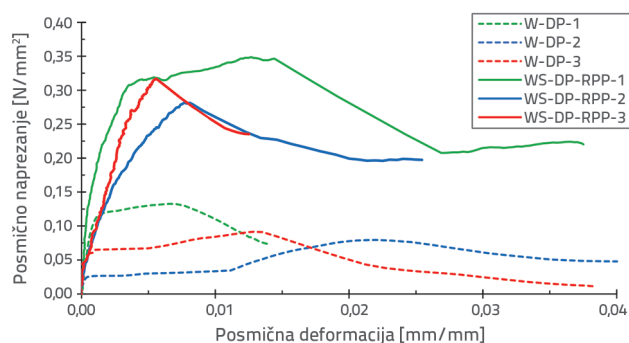


Slika 14. Dijagrami sila-pomak iz ispitivanja dijagonalne vlačne čvrstoće (LVDT2 i LVDT4-vertikalni pomak, LVDT3 i LVDT5-horizontalni pomak): a) URM panel (W-DP); b) SM panel (WS-DP-RPP)

Tablica 6. Rezultati ispitivanja dijagonalne vlačne čvrstoće URM (W-DP) i SM (WS-DP-RPP) zidnim panelima (uzorcima)

Zidani panel	Maksimalno opterećenje [kN]	Posmično naprezanje $\tau_0 (S_s)$ [N/mm ²]	Modul krutosti, G na 0,05 τ_0 [N/mm ²]	Modul krutosti, G na 0,3 τ_0 [N/mm ²]	Modul krutosti, G na 0,7 τ_0 [N/mm ²]
W-DP-1	23,71	0,1326	1319,48	1717,54	1310,18
W-DP-2	14,47	0,0795	1306,79	1604,95	234,20
W-DP-3	16,53	0,0916	4345,69	1888,18	660,57
Srednja vrijednost	18,24	0,101	2323,99	1736,89	734,98
CoV [%]	26,6	27,5	75,3	8,2	73,7
WS-DP-RPP-1	61,57	0,3488	3268,48	2813,66	1160,45
WS-DP-RPP-2	49,72	0,2817	3594,73	874,55	534,56
WS-DP-RPP-3	55,95	0,3170	8464,24	908,99	771,94
Srednja vrijednost	55,75	0,316	5109,15	1532,40	822,32
CoV (%)	10,6	10,6	57,0	72,4	38,4

početno linearno elastično ponašanje do prve vršne vrijednosti i različita ponašanja nakon vršne vrijednosti. Većina URM panela pokazala je eksponencijalno omekšavanje, dok su gotovo svi SM paneli pokazali brzi pad naprezanja i linearno omekšavanje nakon postizanja posmične granice naprezanja pri popuštanju. Dva URM i jedan SM panel pokazali su otvrdnjavanje nakon vršne vrijednosti, praćeno naknadnim smanjenjem posmičnog naprezanja do konačnog pomaka kada su se pukotine potpuno razvile. Kao što se i očekivalo, grane omekšavanja upućuju na postupno smanjenje mehaničke otpornosti pod kontinuiranim povećanjem deformacije.



Slika 15. Usporedba dijagrama dijagonalnih vlačnih naprezanja i deformacija

Konačno, vrijednosti modula krutosti u početnoj elastičnoj fazi SM panela bile su gotovo dvostruko veće od onih za URM panele. Međutim, za razine posmičnog naprezanja od 30 % i 70 % od maksimalnog posmičnog naprezanja, vrijednosti modula krutosti za oba panela bile su relativno slične, s postotnim razlikama u rasponu od 12,5 % do 20,4 %. Može se zaključiti da reprofilaranje horizontalnih sljubnica učinkovito povećava

dijagonalni vlačni kapacitet za faktor do tri. No, sposobnost deformacije se ne povećava; umjesto toga, s vremenom se smanjuje.

Iako reprofilaranje horizontalnih sljubnica poboljšava vlačnu čvrstoću slojeva morta, ono također dovodi do krućeg i manje deformabilnog sustava. Reparturni mort pokazao je veću krutost od izvornog morta. Ta krutost ograničava ukupnu sposobnost deformacije zidanih panela, što rezultira smanjenom deformacijom. Reprofiliranje sljubnica smanjuje nastanak i širenje pukotina tijekom opterećenja, što doprinosi povećanom dijagonalnom vlačnom kapacitetu. Međutim, to također može ograničiti ukupnu sposobnost deformacije jer pukotine imaju tendenciju disipacije energije i dopuštaju veće deformacije. Zaključci bi se trebali pažljivo donositi zbog ograničenja ovog istraživanja, budući da je ispitano samo nekoliko panela. Ipak, postojao je jasan trend prema povećanju dijagonalnog posmičnog kapaciteta primjenom odabrane metode pojačanja.

4. Zaključak

U ovom radu ispituje se reprofilaranje sljubnica kao metoda pojačanja zidanih konstrukcija. Ekperimentalno istraživanje provedeno je korištenjem novorazvijenog reparturnog morta na bazi cementa zajedno s polipropilenskim trakama pojačanim vlaknima visoke čvrstoće ugrađenim u sljubnice. Rezultati su pokazali da reprofilaranje sljubnica pomoću morta visoke čvrstoće i PP traka može značajno poboljšati čvrstoću i sposobnost deformacije nepojačanog zida kao konstrukcijskog materijala. Usporedba eksperimentalnih rezultata za nepojačano i pojačano zide pod tlačnim opterećenjem pokazala je da su paneli kojima su reprofilarane sljubnice pokazali povećanje tlačne čvrstoće za 20 %. Kod ispitanih uzoraka uočeno je da je primijenjena metoda pojačanja također pozitivno utjecala na duktilnost. Uočeno

je prosječno povećanje od približno 75 %. Usporedbom ponašanja nepojačanog i pojačanog zida pod dijagonalnim vlačnim opterećenjem, prosječno povećanje dijagonalne vlačne čvrstoće iznosilo je približno 65 %. Što se tiče duktilnosti, primijenjena metoda pojačanja nije imala značajan učinak, što je uočeno za tri pojačana panela. Pri nižim razinama posmičnog naprezanja pukotine su se razvijale postupno. Međutim, nakon određene razine proizvedenog naprezanja pukotine su se iznenada otvorile. U uvjetima stvarnog potresa očekivalo se da će oštećenje biti duktilnije s obzirom na to da je tijekom ispitivanja uzeta u obzir samo vlastita težina zida.

LITERATURA

- [1] Işık, E., Avcil, F., Büyüksaraç, A., İzol, R., Arslan, M.H., Aksoyulu, S., Harirchian, E., Eysisüren, O., Arkan, E., Güngür, M.Ş., Günay, M., Ulutaş, H.: Structural damages in masonry buildings in Adiyaman during the Kahramanmaraş (Türkiye) earthquakes (Mw 7.7 and Mw 7.6) on 06 February 2023, *Engineering Failure Analysis*, 151 (2023).
- [2] Caglar, N., Vural, I., Kireti, O., Saribiyik, A., Sumer, Y.: Structural damages observed in buildings after the January 24, 2020. Elazığ-Sivrice earthquake in Türkiye, *Case Studies in Construction Materials*, 18 (2023).
- [3] Marinković, M., Brzev, S., Baballėku, M., Isufi, B., Blagojević, N., Milićević, I., Žugić, Ž., Bursać, P.: Out-of-plane behaviour of loadbearing and non-structural masonry walls during recent earthquakes, *Proceedings of 1st Croatian Conference on Earthquake Engineering*, Zagreb, Croatia, 2021.
- [4] Markušić, S., Stanko, D., Penava, D., Ivančić I., Bjelotomić Oršulić, O., Korbar, T., Sarhosis, V.: Destructive M6.2 Petrinja Earthquake (Croatia) in 2020 - Preliminary Multidisciplinary Research, *Remote Sensing*, 13 (2021) 6, p. 1095
- [5] Radnić, J., Grgić, N., Buzov, A., Banović, I., Smilović Zulim, M., Baloević, G., Sunara, M.: Mw 6.4 Petrinja earthquake in Croatia: Main earthquake parameters, impact on buildings and recommendation for their structural strengthening, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 11, pp. 1109-1128, <https://doi.org/10.14256/JCE.3243.2021>.
- [6] Uroš, M., Šavor Novak, M., Atalić, J., Sigmund, Z., Baniček, M., Demšić, M., Hak, S.: Post-earthquake damage assessment of buildings – procedure for conducting building inspections, *GRAĐEVINAR*, 72 (2020) 12, pp. 1089-1115, <https://doi.org/10.14256/JCE.2969.2020>.
- [7] Pozos-Estrada, A., Chávez, M.M., Jaimes, M.A., Arnau, O., Guerrero, H.: Damages observed in locations of Oaxaca due to the Tehuantepec Mw8.2 earthquake, Mexico, *Natural Hazards*, 97 (2019) 2, pp. 623–641
- [8] Rashadul, I.: Inventory of FRP strengthening methods in masonry structures, Master thesis, Technical University of Catalonia, Barcelona, 2008.
- [9] Valluzzi, M.R., Tinazzi, D., Modena, C.: Shear behavior of masonry panels strengthened by FRP laminates, *Construction and Building Materials*, 16 (2002) 7, pp. 409–416
- [10] Foraboschi, P.: Effectiveness of novel methods to increase the FRP-masonry bond capacity Composites, Part B: Engineering, 107 (2016), pp. 214–232
- [11] Vaculik, J., Visintin, P., Burton, N.G., Griffith, M.C., Seracino, R.: State-of-the-art review and future research directions for FRP-to-masonry bond research: test methods and techniques for extraction of bond-slip behavior, *Construction and Building Materials*, 183 (2018), pp. 325–345
- [12] Babatunde, S.A.: Review of strengthening techniques for masonry using fiber reinforced polymers, *Composite Structures*, 161 (2017), pp. 246-255
- [13] Di Tommaso, A., Focacci, F., Micelli, F.: Strengthening Historical Masonry with FRP or FRCM: Trends in Design Approach, *Key Engineering Materials*, 747 (2017), pp. 166–173
- [14] Incerti, A., Ferretti, F., Mazzoti, C.: FRCM strengthening systems efficiency on the shear behavior of pre-damaged masonry panels: An experimental study, *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 4 (2019).
- [15] Angiolilli, M., Gregori, A., Pathirage, M., Cusatis, G.: Fiber Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) for strengthening historical stone masonry structures: Experiments and computations, *Engineering Structures*, 224 (2020), p. 111102
- [16] Ferretti, F., Khatiwada, S., Incerti, A., Giacomini, G., Tomaro, F., De Martino, V., Mazzotti, C.: Structural strengthening of masonry elements by reinforced repointing combined with FRCM and CRM, *Procedia Structural Integrity*, 44 (2023), pp. 2254-2261
- [17] Cassacci, S., Gentilini, C., Di Tommaso, A., Oliveira, D.V.: Shear strengthening of masonry wallets resorting to structural repointing and FRCM composites, *Construction and Building Materials*, 206 (2019), pp. 19-34
- [18] Valluzzi, M.R., Tinazzi, D., Modena, C.: Strengthening of masonry structures under compressive loads by FRP strips: Local-Global Mechanical Behaviour, *Science and Engineering of Composite Materials*, 12 (2005) 3, pp. 203-218
- [19] Cruz, A.I., Perez, O., Gavilan, J.J.: Seismic performance of confined masonry walls with joint reinforcement and aspect ratio: An experimental study, *Engineering Structures*, 242 (2021), p. 112484
- [20] Sandoval, C., Serpell, R., Araya-Letelier, G., Calderón S.: Shear behavior of single- and triple-thickness masonry panels strengthened by bed-joint structural repointing, *Construction and Building Materials*, 286 (2021), p. 122925
- [21] Zhao, W., Zhou, Q., Min, Q., Yang, L., Sun, B., Song, G.: Experimental study on the seismic performance of masonry wall reinforced by cement mortar and polypropylene band, *Earthquake engineering and engineering vibration*, 22 (2023), pp. 469–479

Zahvala

Ovo istraživanje temelji se na rezultatima projekta Pojačanje zida reprofiliiranjem sljubnica (STREP). Projekt je realiziran u suradnji triju partnerskih institucija: Građevinskog fakulteta, Skopje, Katedre za teoriju konstrukcija i računalnu analizu, i Instituta za potresno inženjerstvo i inženjersku seizmologiju, oba dijela Sveučilišta Ćirila i Metoda u Skopju koje je provelo eksperimentalna ispitivanja i numeričke simulacije. Za proizvodnju posebno modificiranog materijala za reprofiliiranje sljubnica i njegovu primjenu u testnim modelima zaslužna je tvrtka ADING A.D. iz Skopja. Zahvaljujemo osoblju laboratorija na tehničkoj pomoći tijekom ovog projekta.

- [22] De Santis, S., Alshawa, O., de Felice, G., Gobbin, F., Roselli, I., Sangirardi, M., Sorrentino, L., Liberatore, D.: Low-impact techniques for seismic strengthening fair faced masonry walls, *Construction and Building Materials*, 307 (2021) 1, p.124962
- [23] Parisi, F., Menna, C., Prota, A.: 10 - Fabric-reinforced cementitious matrix (FRCM) composites: Mechanical behavior and application to masonry walls, *Failure Analysis in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, 2019., pp. 199-227
- [24] Umair, S.M., Numada, M. Amin, M.N., Meguro, K.: Fiber reinforced polymer and polypropylene composite retrofitting technique for masonry structures, *Polymers*, 7 (2015) 5, pp. 963-984
- [25] Viswanathan, K.E., Ramasamy, J.V.: Flexural strengthening of brick masonry walls using fiber and polypropylene grid, *Proceedings of the National Symposium for Post-Graduate Students in Civil Engineering*, 2011.
- [26] Jarc Simonič, M., Gostič, S., Bosiljkov, V., Žarnič, R.: Testing and analysis of walls strengthened with FRP, *GRAĐEVINAR*, 66 (2014) 6, pp. 533-548, <https://doi.org/10.14256/JCE.960.2013>.
- [27] Jeffs, P.: Repointing Masonry Walls - Matching the Techniques for Success or Failure, *PJ Materials Consultants Limited*, www.guelph.ca, [19.3.2023].
- [28] Valluzzi, M.R., Binda, L., Modena, C.: Mechanical behaviour of historic masonry structures strengthened by bed joints structural repointing, *Construction and Building Materials*, 19 (2005), pp. 63-73
- [29] Gams, M., Tomažević, M., Kwicien, A.: Strengthening brick masonry by repointing – An experimental study, *Key Engineering Materials*, 624 (2014), pp. 444-452
- [30] Drougkas, A., Licciardello, L., Rots, J. G., Esposito, R.: Experimental and numerical study of historic masonry with bed joint reinforced repointing, *Proceedings of the EURO DYN 2020 XI International conference on structural dynamics*, Athens, Greece, 2 (2020), pp. 4212-4225
- [31] Licciardello, L., Rots, J.G., Esposito, R.: Experimental tests on masonry strengthened with bed joint reinforced repointing, *Heron Journal*, 66 (2021) 1.
- [32] Corradi, M., Speranzini, E., Bisciotti, G.: Out-of-plane reinforcement of masonry walls using joint-embedded steel cables, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18 (2020), pp. 4755-4782
- [33] Corradi, M., Speranzini, E., Borri, A., Bisciotti, G., Agnetti, S.: A new method for out-of-plane reinforcement of masonry walls using high strength steel strand, *Proceedings of the 17th International Brick and Block Masonry Conference - IB2MaC 2020*, Krakow, Poland, 2020., pp. 89-99
- [34] Corradi, M., Castori, G., Borri, A.: Repairing brickwork panels using titanium rods embedded in the mortar joints, *Engineering Structures*, 221 (2020).
- [35] Tomažević, M.: *Earthquake-resistant design of masonry buildings*, Imperial College press, 1999.
- [36] Corradi, M., Tedeschi, C., Binda, L., Borri, A.: Experimental evaluation of shear and compression strength of masonry wall before and after reinforcement: Deep repointing, *Construction and Building Materials*, 22 (2008) 4, pp. 463-472
- [37] Mustafaraj, E., Yardim, Y., Corradi, M., Borri, A.: Polypropylene as a retrofitting material for shear walls, *Materials*, 13 (2020) 11, p. 2503
- [38] Melinda, A.P., Juliafad, E.: Experimental study of masonry wall strengthened by polypropylene fiber mortar, *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 12 (2022) 3.
- [39] Ebrahimzadeh, S., Nasrollahzadeh, K.: Experimental study on performance of repaired and strengthened unreinforced masonry walls using polypropylene bands, *Scientia Iranica*, (2022).
- [40] Nasrollahzadeh, K., Zare, M.: Experimental investigation on axially loaded adobe masonry columns confined by polymeric straps, *Construction and Building Materials*, 262 (2020), p. 119895
- [41] Luccioni, B., Rougier, V.: In-plane retrofitting of masonry panels with fibre reinforced composite materials, *Construction and Building Materials*, 25 (2011), pp. 1772-1788
- [42] Sathiparan, N., Meguro, K.: Shear and flexural bending strength of masonry wall retrofitted using PP-Band mesh, *CONSTRUCTII Journal*, 14 (2013) 1, pp.3-12
- [43] Heydariha, J.Z., Ghaednia, H., Nayak, S., Das, S., Bhattacharya, S., Dutta, S.C.: Experimental and field performance of PP band-retrofitted masonry: Evaluation of seismic behavior, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 33 (2019) 1.
- [44] Elmalyh, S., Bouyahyaoui, A., Cherradi, T., Rotaru, A., Mihai, P.: In-Plane shear behavior of unreinforced masonry walls strengthened with fiber reinforced polymer composites, *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 5 (2020), pp. 360-367
- [45] Sathiparan, N.: State of art review on PP-band retrofitting for masonry structures, *Innovative Infrastructure Solutions*, 5 (2020), p. 62
- [46] Behera, B., Nanda, R.P.: In-plane shear strengthening of brick masonry panel with geogrid reinforcement embedded in bed and bed-head joints mortar, *Engineering Structures*, 227 (2021).
- [47] Damchevski, B., Churilov, S., Dumova-Jovanoska, E.: Mechanical characterisation of polymer fibre-reinforced cement-based mortar for masonry joint repointing, *Proceedings of the 16th European Conference on Earthquake Engineering*, Thessaloniki, Greece, 2018.
- [48] Maurenbrecher, A.H.P., Trischuk, K., Rousseau, M.Z., Subercaseaux, M.I.: Repointing mortars for older masonry buildings: Design considerations, *Construction Technology Update*, 67 (2008).
- [49] Dumova-Jovanoska, E., Churilov, S., Shendova, V., Kristevska, L.: Report from the research project "Masonry strengthening by joint repointing - STREP", Ss. Cyril and Methodius University in Skopje, Faculty of Civil Engineering – Skopje, Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology and ADING AD, Skopje, 2021.
- [50] MKC EN 771-1: Specification for masonry units: Clay masonry units, ISRSM, 2011.
- [51] MKC EN 772-1: Methods of test for masonry units - Part 1: Determination of compressive strength, ISRSM, 2013.
- [52] MKS EN 459-1: Building lime - Part 1: Definitions, specifications and conformity criteria, ISRSM, 2015.
- [53] MKS EN 1015-11: Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar, ISRSM, 2009.
- [54] MKC EN 12190: Products and systems for the protection and repair of concrete structures: Test methods - Determination of compressive strength of repair mortar, ISRSM, 2009.
- [55] MKC EN 1504-3: Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity - Part 3: Structural and non-structural repair, ISRSM, 2006.
- [56] MKC EN 1542: Products and systems for the protection and repair of concrete structures: Test methods - Measurement of bond strength by pull-off, ISRSM, 2009.

- [57] MKS EN ISO 9001: Quality management systems – Requirements, ISRSM, 2015.
- [58] MKS EN 1052-1: Methods of test for masonry - Part 1: Determination of compressive strength, ISRSM, 1998.
- [59] Moropoulou, A., Bakolas, A., Moundoulas, P., Aggelakopoulou, E., Anagnostopoulou, S.: Strength development and lime reaction in mortars for repairing historic masonries, *Cement & Concrete Composites*, 27 (2005), pp. 289–294
- [60] ASTM E 519-02: Standard Test Method for diagonal tension (shear) in masonry assemblages, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA, 2002.
- [61] Drougkas, A., Roca, P., Molins, C.: Compressive strength and elasticity of pure lime mortar masonry, *Materials and Structures*, 49 (2016), pp. 983–999
- [62] Segura, J., Pela, L., Roca, P.: Monotonic and cyclic testing of clay brick and lime mortar masonry in compression, *Construction and Building Materials*, 193 (2018), pp. 453–466
- [63] Thamboo, J.A., Dhanasekar, M.: Assessment of the characteristics of lime mortar bonded brickwork wallettes under monotonic and cyclic compression, *Construction and Building Materials*, 261 (2020), p. 120003
- [64] Thamboo, J.A., Navaratnam, S., Poologanathan, K., Corradi, M.: Characteristics of CFRP strengthened masonry wallettes under concentric and eccentric compression, *Case Studies in Construction Materials*, 14 (2021).
- [65] EN 1996-1-1: Eurocode 6- Design of masonry structures: Part 1- 1 - General Rules for Reinforced and Unreinforced Masonry Structures, CEN, 2005.
- [66] NTC: Italian Building Code for Constructions, Ministry of Infrastructure and Transport of Republic of Italy, 2018.
- [67] FEMA 306: Evaluation of earthquake damaged concrete and masonry wall buildings, Basic Procedures Manual, Applied Technology Council Redwood City, CA, USA, 1999.
- [68] TMS: Building code requirements and specification for masonry structures, (TMS 402/602- 16), The Masonry Society, Longmont, 2016.
- [69] International Code Consortium: International Building Code, IBC, Falls Church, VA, USA, 2003.
- [70] Masonry Standards Joint Committee: Building code requirements for masonry structures - ACI 530-02/ ASCE 5-02/TMS 402-02, American Concrete Institute, Structural Engineering Institute of the American Society of Civil Engineers, The Masonry Society, Detroit, MI, USA, 2002.
- [71] Canadian Standards Association: Design of masonry structures - S304.1, Mississauga, ON, Canada, 2004.