

Primljen / Received: 29.5.2020.

Ispravljen / Corrected: 3.9.2020.

Prihvaćen / Accepted: 10.9.2020.

Dostupno online / Available online: 10.11.2020.

# Pojačanje zida na posmik pomoću FRP-a ili TRM-a

## Autori:



<sup>1</sup>Prof.dr.sc. **Tomislav Kišiček**, dipl.ing. građ.  
[tomislav.kisicek@grad.unizg.hr](mailto:tomislav.kisicek@grad.unizg.hr)



<sup>1</sup>Doc.dr.sc. **Mislav Stepinac**, dipl.ing. građ.  
[mislav.stepinac@grad.unizg.hr](mailto:mislav.stepinac@grad.unizg.hr)



<sup>1</sup>**Tvrtko Renič**, mag. ing. aedif.  
[tvrtko.renic@grad.unizg.hr](mailto:tvrtko.renic@grad.unizg.hr)  
Autor za korespondenciju



<sup>1</sup>**Ivan Hafner**, mag. ing. aedif.  
[ivan.hafner@grad.unizg.hr](mailto:ivan.hafner@grad.unizg.hr)



<sup>1</sup>**Luka Lulić**, mag. ing. aedif.  
[luka.lulic@grad.unizg.hr](mailto:luka.lulic@grad.unizg.hr)

<sup>1</sup> Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet

Pregledni rad

**Tomislav Kišiček, Mislav Stepinac, Tvrtko Renič, Ivan Hafner, Luka Lulić**

## Pojačanje zida na posmik pomoću FRP-a ili TRM-a

U novije vrijeme uz tradicionalne metode pojačanja zida na posmik, koriste se i noviji materijali i sustavi kao što su polimeri armirani vlaknima (FRP) i tekstilom armirani mortovi (TRM). Potres koji se dogodio u Zagrebu i okolici 22. ožujka 2020. pokazao je osjetljivost nearmiranih zidanih zgrada na horizontalna djelovanja, potrebu za sanacijom oštećenja na nosivom i nenosivom zidu i pojačanjem zida na posmik. Postojeći propisi ne pokrivaju proračune pojačanja s takvim sustavima. U radu su prikazani suvremeni postupci pojačanja zida FRP-om ili TRM-om, znanstvena istraživanja iz tog područja, prednosti i nedostaci te proračun takvih pojačanja.

### Ključne riječi:

potres, zide, posmik, FRP, TRM, postojeće konstrukcije, proračun

Subject review

**Tomislav Kišiček, Mislav Stepinac, Tvrtko Renič, Ivan Hafner, Luka Lulić**

## Strengthening of masonry walls with FRP or TRM

In addition to traditional methods of strengthening shear masonry walls, some newer materials and systems, such as fibre reinforced polymers (FRP) and textile reinforced mortars (TRM), have recently been introduced. The earthquake that occurred in Zagreb and its surroundings on 22 March 2020 has revealed the sensitivity of unreinforced masonry buildings to horizontal actions, while pointing to the need to repair damage to load-bearing and non-load-bearing walls and to strengthen walls against shear failure. Existing regulations do not cover design of structures with such systems. The paper presents modern procedures for strengthening masonry with FRP or TRM, scientific research in this area, advantages and disadvantages, and calculation of such reinforcements.

### Key words:

earthquake, walls, shear, FRP, TRM, existing structures, analysis

Übersichtsarbeit

**Tomislav Kišiček, Mislav Stepinac, Tvrtko Renič, Ivan Hafner, Luka Lulić**

## Schubbewehrung von Wänden mit FRP oder TRM

In jüngerer Zeit werden neben herkömmlichen Verfahren zur Schubbewehrung von Mauerwerk auch neuere Materialien und Systeme wie faserverstärkte Polymere (FRP) und textilverstärkter Mörtel (TRM) verwendet. Das Erdbeben in Zagreb und Umgebung am 22. März 2020 zeigte die Empfindlichkeit von nicht bewehrten Mauerwerksgebäuden gegenüber horizontalen Einwirkungen, die Notwendigkeit, Schäden am tragenden und nicht tragenden Mauerwerk zu reparieren und die Wände gegen Abscheren zu bewehren. Bestehende Vorschriften gelten nicht für Bewehrungsberechnungen mit solchen Systemen. Die Arbeit präsentiert moderne Verfahren zur Bewehrung von Mauerwerk mit FRP oder TRM, wissenschaftliche Forschungen auf diesem Gebiet, Vor- und Nachteile sowie die Berechnung solcher Bewehrungen.

### Schlüsselwörter:

Erdbeben, Mauerwerk, Scherung, FRP, TRM, bestehende Strukturen, Berechnung

## 1. Uvod

Potresi su prirodna pojava koja se ne može predvidjeti. Može se predvidjeti na kojem mjestu bi se mogao pojaviti potres određene jačine, ali kada, to nije moguće. Poznato je da Zagreb, a i cijela Republika Hrvatska leži na seizmički aktivnom području. Isto tako, zna se da su Zagreb i okolice u prošlosti pogađali jači potresi i da se posljednji takav, magnitude 6,3 prema Richteru, dogodio 1880. godine [1, 2].

Uvijek je bilo jasno da će se neki takav potres ponoviti, ali nije se znalo kada. Nažalost, 22. ožujka 2020. Zagreb i okolice pogodio je potres magnitude 5,5 prema Richteru, nakon kojeg je uslijedio još jedan, magnitude 5,0 te više manjih koji su se događali u danima nakon glavnog potresa. Epicentar potresa bio je sedam kilometara od središta Zagreba, oko Markuševca. Najviše je stradala stara gradska jezgra (Gornji i Donji grad) i prigradska naselja Čučerje i Markuševac.

Zgrade u gradskoj jezgri tipične su zidane konstrukcije građene krajem 19. i početkom 20. stoljeća. Zidane su punom opekam, ziđe im je neomeđeno, stropne konstrukcije su drveni grednici, a krovnište je drvena konstrukcija pokrivena crijepom. Zbog svoje starosti, odnosno prekoračenja uporabivosti građevine, gradnje prije seizmičkih propisa te lošeg ili neodgovarajućeg održavanja, takve zgrade su najviše stradale. Isto tako, i novije su zgrade, koje su projektirane na znatno manje potresno opterećenje nego što je zahtijevano modernim propisima, pretrpjele oštećenja [3]. U posljednjih pedesetak godina razvili su se propisi za gradnju objekata u seizmički aktivnim područjima. Uvođenje i razvijanje propisa bilo je potaknuto potresima koji su se događali u bližjoj okolini (Skopje, Banja Luka, Dubrovnik i Crna Gora, Ston) [4] pa se tako i razmjor oštećenja zgrada smanjuje radi li se o modernoj gradnji i korištenju sve suvremenijih propisa u projektiranju, modernijih materijala i konstrukcijskih sustava građevina [5].

Stare zidane konstrukcije, osim velike težine i krutosti te male duktilnosti, karakterizira i loša kvaliteta materijala te neodgovarajuća izvedba zbog manjka propisa i kontrole tijekom povijesti [6]. Zbog toga ponašanje zidanih konstrukcija za vrijeme potresa ima značajna ograničenja [7]. Novije zidane konstrukcije koje su armirane ili omeđene armiranobetonskim serklažima imaju određenu potresnu otpornost i duktilnost. Najugroženije

su one najstarije, nearmirane, zidane konstrukcije koje posjeduju nisku ili gotovo nikakvu razinu potresne otpornosti. Među takvima mnoge se ubrajaju i u kulturnu baštinu što je dodatan motiv za njihovo očuvanje [8]. Osim toga, neodržavanje od strane vlasnika kao i mnoge za konstrukciju nepovoljne intervencije i renovacije dodatno ugrožavaju sigurnost takvih građevina.

Za vrijeme djelovanja potresa nearmirani zidovi mogu otkazati u svojoj ravnini i izvan nje. U ravnini se razlikuju sljedeći oblici sloma: slom ziđa zbog savijanja, posmično otkazivanje klizanjem po horizontalnim sljubnicama te dijagonalni vlačni slom (ravni ili stepenasti) koji je ujedno i najprepoznatljiviji zbog učestalosti u područjima pogođenim potresom [9]. Na slici 1. prikazana su karakteristična oštećenja ziđa u potresu 22. ožujka 2020. u Zagrebu.

Izvan ravnine mogući su mnogobrojni načini otkazivanja koji su posljedica loše povezanosti međusobno okomitih zidova i spojeva zidova s međukatnom konstrukcijom. Sva takva otkazivanja su, nažalost, viđena nakon nedavnog potresa u Zagrebu koji je upozorio na osjetljivost nearmiranih zidanih konstrukcija na horizontalna djelovanja.

Nakon inicijalnih procjena stanja građevina slijedi dugogodišnji proces sanacije i pojačanja oštećenih konstrukcija. Sama sanacija nije dovoljna jer ona dovodi oštećenu konstrukciju u stanje prije potresa koje nije bilo zadovoljavajuće potresne otpornosti. Stoga je od iznimne važnosti za buduća podrhtavanja povećati potresnu otpornost postojećih građevina. Uz tradicionalne metode pojačanja poput torkretiranja ili injektiranja ziđa, zasigurno će se koristiti i noviji materijali koji imaju brojne prednosti. U novije materijale ubrajaju se polimeri armirani vlaknima (eng. *fiber reinforced polymers* - FRP). Već godinama se provode brojna istraživanja uporabe FRP-a za pojačanja raznih tipova konstrukcija od različitih materijala. Glavne su im prednosti mala vlastita težina i velika čvrstoća. Uz brojne prednosti FRP-a dolaze i određeni nedostaci. Te mane potiču razvoj modernijih i kvalitetnijih tekstilom armiranih mortova (eng. *textile reinforced mortars* - TRM). U idućim poglavljima opisani su i uspoređeni suvremeni postupci pojačanja nearmiranog ziđa FRP-om i TRM-om te prikladni proračuni kao i najnovija znanstvena istraživanja u tom području.



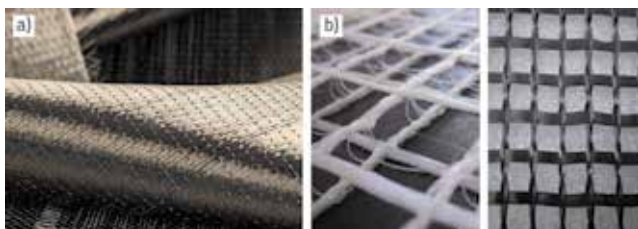
Slika 1. Primjeri oštećenja ziđa u potresu 22. ožujka 2020. u Zagrebu

## 2. Novi materijali za pojačanje zidanih konstrukcija do FRP i TRM

### 2.1. FRP

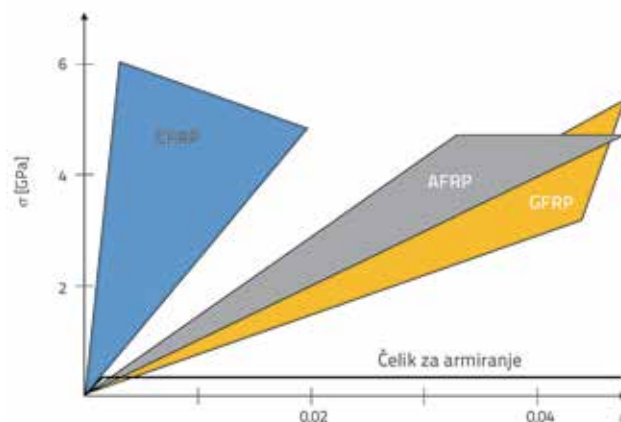
FRP ili vlaknima armirani polimer je vlaknasti kompozitni materijal gdje su određena vlakna u funkciji armature ugrađena u polimernu matricu koja omogućuje finalni oblik [10]. Prvi FRP razvijen je 1909. godine, a 1970-ih je počela masovna proizvodnja u raznim

granama industrije. Vrsta i orijentacija vlakana, sastav i količina matrice te način proizvodnje bitno utječu na karakteristike finalnog proizvoda. Proizvodni proces sastoji se od proizvodnje tekstila (tkanje, pletenje ili šivanje) koji se zatim spajaju s polimernom matricom ručno, poluautomatski ili automatski [11]. Na slici 2., slijeva nadesno, prikazana je tkanina od ugljičnih vlakana te mrežice od staklenih odnosno ugljičnih vlakana. Najčešći način proizvodnje je pultruzija (potpuno automatizirano), postupak sličan ekstruziji koji se primjenjuje u proizvodnji profila od aluminija i mekih čelika [12].



Slika 2. a) Tkanina od ugljičnih vlakana [13]; b) Mrežice od staklenih odnosno ugljičnih vlakana [14]

Glavne prednosti FRP-a su otpornost na koroziju, mala težina (otprilike 1/4 čelika) i velika vlačna čvrstoća. Odlična otpornost na koroziju najviše se iskorištava u armiranobetonskim konstrukcijama u agresivnom okolišu primjenom armature od FRP-a [15] te za pojačavanje izloženih elemenata konstrukcija [16]. Mala težina omogućuje lakšu primjenu FRP-a u skućenim prostorima te eliminira potrebu za oplatom što dovodi do smanjenja troškova rada. Ostale povoljne karakteristike su značajan omjer čvrstoće i težine, dobro ponašanje pod dinamičkim opterećenjem, neosjetljivost na magnetizam, neprovođenje električne struje, sposobnost prigušenja vibracija, otpornost na većinu kiselina i lužina, mogućnost korištenja različitih oblika i dužina te jednostavnost i brzina primjene [17, 18]. Uz navedene prednosti dolaze i nedostaci poput linearnoelastičnog ponašanja do sloma, tj. neduktilnost, za razliku od čelika koji se ponaša elasto-plastično, odnosno ponaša se duktilno. Cijena materijala je relativno visoka, a kod epoksidnih smola dolazi do degradacije svojstava pri temperaturama (npr. za vrijeme požara) višim od temperature staklastog prijelaza (ili "staklišta") [19]. FRP smanjuje paropropusnost konstrukcije i otežava procjenu štete na njoj nakon potresa, a nekompatibilna ili vlažna podloga i niske temperature onemogućuju nanošenje FRP-a. Razlikuje se više vrsta vlakana, a time i FRP proizvoda: staklena (GFRP), ugljična (CFRP), aramidna (AFRP) te bazaltna (BFRP), a za izradu matrica koriste se epoksidne, nezasićene poliesterske, vinilesterske, bismelamidne i cijanatesterske smole. Također, razlikuju se sljedeći sustavi pojačanja s FRP-om: mokro polaganje (*Wet lay-up*), predgotovljeni sustavi i specijalni sustavi (automatsko ovijanje prednapete FRP trake i umetnute FRP trake) [20]. Na slici 3. grafički su prikazana područja u kojima se nalaze radni dijagrami pojedinih vrsta FRP-a i njihova usporedba s radnim dijagramom čelika za armiranje.



Slika 3. Radni dijagram FRP-a i čelika [19]

### 2.1.1. Vlakna

**Staklena vlakna** imaju manju čvrstoću (1800 do 3600 MPa) i modul elastičnosti (70 do 76 GPa) te veću težinu (2270 do 2600 kg/m<sup>3</sup>) u odnosu na ugljična vlakna, ali su jeftinija i stoga češće korištena. Proizvode se pri visokim temperaturama od smjese rastaljenog kamenog pijeska, kaolina, vapnenca i kolemanita. Postoje alkalna A-stakla, električna E-stakla i kemijska C-stakla. Najveći im je nedostatak osjetljivost na alkalnu koroziju i ona naglašava važnost zaštitne uloge polimerne matrice (kod FRP-a) koja onemogućuje prodor alkalijskih jona do vlakana.

**Ugljična vlakna** imaju veliku čvrstoću (2500 do 4000 MPa) i modul elastičnosti (200 do 650 GPa), otporna su na koroziju kao i na puzanje i zamor, ali posjeduju nisku udarnu čvrstoću. Iz poliakrilonitrila (PAN), katrana, bitumena i celuloze proizvode se kontroliranom oksidacijom, karbonizacijom i grafitizacijom organskih tvari. Ovisno o temperaturi grafitizacije dobivamo vlakna visoke čvrstoće (2600 °C) ili vlakna visokog modula elastičnosti (3000 °C).

**Aramidna vlakna** su sintetizirani polimer koji uz veliku čvrstoću (3500 do 4200 MPa) posjeduju i otpornost na udarna opterećenja, toplinske utjecaje i propadanje uslijed kemijskih utjecaja, ali su manje otporna na UV zračenje. Kevlar, Twaron, Technora i SVM su nazivi komercijalnih aramidnih vlakana [20].

**Bazaltna vlakna** koriste se već desetak godina pri pojačanju zida. Posjeduju znatno manju vlačnu čvrstoću (1100 MPa) u odnosu na ugljična vlakna koja se još dodatno smanjuje, kao i volumna stabilnost, u alkalnom okolišu. Radi smanjenja alkalnih utjecaja matrice (mort kod TRM-a) na vlakna, tvornički se oblažu zaštitnim premazom. Imaju osjetno višu termičku stabilnost i toplinsku otpornost u odnosu na ugljična i staklena vlakna [21].

### 2.1.2. Matrice

Polimerne matrice su bitne kao i vlakna. One povezuju i fiksiraju vlakna te im osiguravaju zaštitu od vanjskih utjecaja. Za mehanička svojstva kompozita ključna je posmična čvrstoća veze vlakana i matrice koja prenosi opterećenja na vlakna.

**Epoksidne smole** pogodne su za različite načine proizvodnje te se unaprijed lako prilagode željena mehanička svojstva ovisno o zahtjevima.

**Nezasićene poliesterske i vinilesterske smole** su zbog topljivosti estera iznimno osjetljive na prisutnost vode, što dovodi do znatnog opadanja posmične otpornosti između slojeva kompozita. Spomenute smole imaju i značajno skupljanje (8 %) pri prelasku iz tekućeg i polugelskog stanja u kruto stanje, što uzrokuje unutrašnja naprezanja koja dodatno smanjuju čvrstoću kompozita.

**Bismalamidne smole** su skupe, ali imaju odličnu kemijsku otpornost i dimenzijsku stabilnost te zadržavaju dobra mehanička svojstva i pri visokim temperaturama (do 120 °C).

**Cijanatesterske smole** također imaju visoku cijenu i odlična mehanička svojstva koja zadržavaju i pri visokim temperaturama (do 175 °C) [20].

### 2.1.3. Sustavi pojačanja

Kako bi se ostvarila kvalitetna veza između FRP-a i površine zida, iznimno su važni uvjeti na mjestu ugradnje te kvalitetna obrada površine zida. Potrebno je i paziti na kvalitetu i potpunu kompatibilnost svih komponenata kako bi se izbjeglo odvajanja FRP-a od podloge.

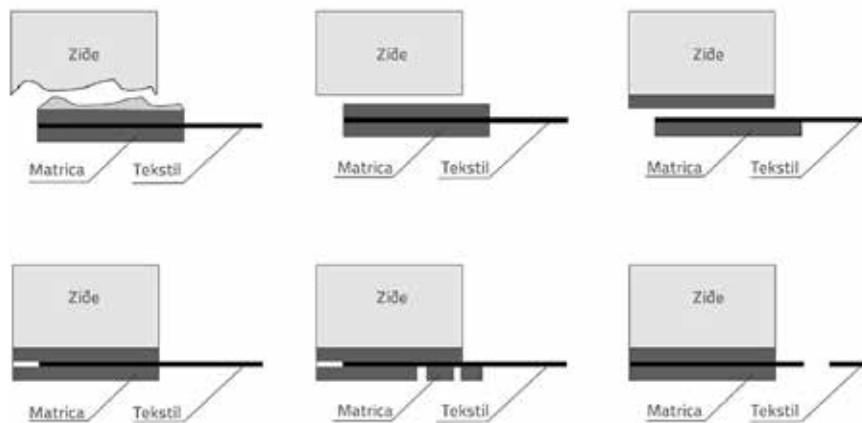
**Sustav s mokrim polaganjem** (*Wet lay-up*) najčešće se primjenjuje zbog svoje jednostavnosti, ekonomičnosti i svestranosti. Kako bi se ostvarila dobra veza između zida i FRP-a, na površinu zida se prije ljepila nanosi temeljni sloj tzv. *primer*.

**Predgotovljeni FRP sustavi** su najčešće u obliku trake ili lamele i koriste se uglavnom za pojačanje elemenata opterećenih na savijanje.

**Specijalni FRP sustavi** se koriste u situacijama kada standardni sustavi FRP pojačanja nisu mogući ili nisu ekonomični. Takvi sustavi su npr. sustavi s automatskim ovijanjem koji se uglavnom koriste za stupove, sustavi s umetnutim FRP trakama i sustavi s prednapetim FRP trakama gdje se prije lijepljenja i sidrenja FRP trake prednapinju te se tako poboljšava učinak pojačanja [20].

### 2.2. TRM

TRM ili tkaninom armirani mort noviji je kompozit nastao zamjenom organskog veziva (matrice) s anorganskim (cementni ili vapneni mort) kako bi riješio navedene nedostatke FRP-a [22]. U literaturi se za TRM koriste i termini FRCM (fabric-reinforced cementitious matrix), MBC (mineral-based composite) i TRC (textile-reinforced concrete) [23]. Ovi materijali sastoje se od mreže (tkanine) izrađene od snopova vlakana (staklenih (G), ugljičnih (C), bazaltnih (B) ili polifenilen benzobisoksazol (PBO) vlakana) u najmanje dva (najčešće ortogonalna) smjera i



Slika 4. Modovi otkazivanja [25]

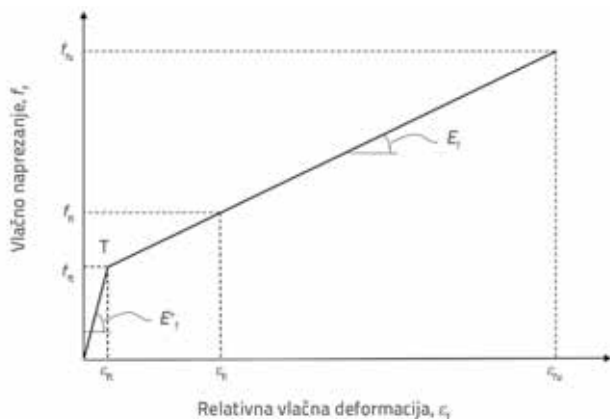
anorganske matrice, pa se tako razlikuju GTRM, CTRM, BTRM ili PBOTRM. Vlakna preuzimaju vlačna naprezanja, dok matrica štiti vlakna i prenosi naprezanja sa zida, koje se pojačava, do vlakana. Gustoća mreže, odnosno količina snopova vlakana i njihov razmak može se u svakom smjeru kontrolirati neovisno i na taj se način utječe na mehanička svojstva tekstila i stupanj prodiranja u mort preko mreže. Prianjanje između tkanine i morta je postignuto mehaničkim uklinjavanjem kao rezultatom prodiranja morta između vlakana koja čine mrežu. TRM-om se povećava otpornost zida na posmik i savijanje u ravnini, savijanje izvan ravnine te vertikalna nosivost. Također se koristi za pojačanje zidanih lukova, svodova i kupola [24]. Problem koji se javlja kod pojačavanja zidova na posmik je veza između pojačanja i zida. Kako bi se ostvario prijenos sila sa zida na TRM i ostvarilo kompozitno djelovanje, potrebna je kvalitetna veza između podloge i matrice i između matrice i tekstila. Ona se može poboljšati mehaničkim sidrenjem slojeva TRM-a za zide. Na slici 4 prikazani su modovi posmičnog otkazivanja veze između TRM-a i zida.

TRM kompoziti postavljaju se na isti način kao i FRP kompoziti, najčešće "hand lay-up" metodom. Najprije se nanosi sloj morta, zatim sloj mreže pa opet sloj morta i postupak se ponavlja ovisno o broju slojeva koji se želi postići. Važno je da se svaki sloj morta nanese dok je prethodni još svjež (slika 5).



Slika 5. Nanošenje TRM-a [26]

Ponašanje vlačno opterećenog TRM-a u idealiziranom bilinearom dijagramu, predloženog od strane AC434 ICC-ES [27], prikazano je na slici 6. gdje je  $f_{tu}$  maksimalno vlačno naprezanje TRM-a, a  $\varepsilon_{tu}$  pripadna maksimalna relativna vlačna deformacija. Veličina  $f_{ft}$  predstavlja vlačno naprezanje pri kojemu dolazi do raspucavanja TRM-a, a  $\varepsilon_{ft}$  pripadnu relativnu vlačnu deformaciju. Općenito naprezanje i pripadna relativna vlačna deformacija označene su sa  $f_{fi}$  i  $\varepsilon_{fi}$ . Modul elastičnosti prije raspucavanja označen je s  $E_f^*$ , a modul elastičnosti nakon raspucavanja s  $E_f$ .



Slika 6. Radni dijagram TRM-a

Mehanička svojstva ponašanja TRM-a su dobro poznata, ali njegova trajnost s obzirom na izloženost vanjskim utjecajima nije dovoljno istražena [28].

### 2.3. Usporedba FRP-a i TRM-a

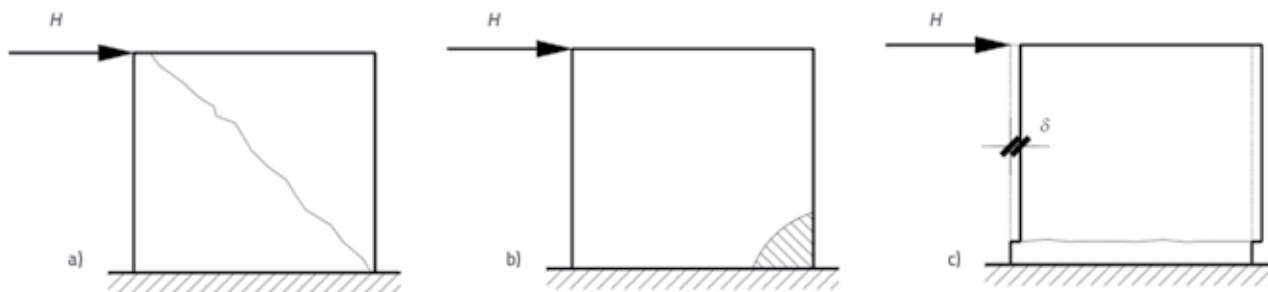
Oba sustava značajno pridonose duktilnosti, nosivosti te u manjoj mjeri krutosti zida izvan ravnine i u ravnini, ali postoje i određene razlike. FRP se duže koristi i povoljniji je za beton, no zbog potrebe unaprjeđenja nekih njegovih nedostataka razvijen je TRM. Korištenjem anorganske matrice umjesto smola, TRM je povoljniji za konstrukcijska pojačanja i obnove zidanih građevina [22]. Anorganska matrica TRM-a za razliku od FRP-a dopušta ugradnju čak i pri nepovoljnim uvjetima poput hladne i vlažne površine zida [29]. Nedostatak paropropusnosti kod FRP-a može dovesti do oštećenja osnovne konstrukcije. FRP i TRM razlikuju se i po ponašanju kod utjecaja visokih temperatura

gdje TRM-ova anorganska matrica pokazuje bolja svojstva od FRP-ove epoksidne matrice koja doživljava degradaciju svojstava. Uz to što je TRM pri izloženosti požaru nezapaljiv i netoksičan, on pridonosi i požarnoj otpornosti samog zida zbog dodatnog zaštitnog sloja. Zapaljenje FRP pojačanja niti otpuštanje dodatne topline nije uočeno za vrijeme testiranja, ali su uočene piroliza i raspadanje matrice [30]. FRP-om i TRM-om moguće je pojačati zidove jednostrano ili obostrano gdje će obostrano značajno povećati nosivost, ali i osigurati simetričnost krutosti zida. S druge strane jednostrana primjena pojačanja dovodi do različite krutosti na pojačanoj i nepojačanoj strani zida. Takva razlika u krutosti dovodi do savijanja zida izvan ravnine te mogućeg sloma izvan ravnine [31]. Oba načina pojačavanja iznimno pridonose otpornosti na savijanje i posmik zida, međutim preuranjeno odvajanje FRP ili TRM traka ili mreža s površine zida ograničavaju ove tehnike. Kako bi se riješilo ili ublažilo odvajanje, potrebno je omogućiti odgovarajuće sidrenje FRP-a ili TRM-a [32]. Prema ICOMOS (*International Council of Monuments and Sites*) smjernicama, prihvatljivije je koristiti TRM zbog niza konzervatorskih uvjeta.

### 3. Ponašanje zida izloženog posmiku

Zide opterećeno horizontalnim silama u ravnini izloženo je posmiku. Prekoračenjem posmične nosivosti dolazi do sloma. Tri osnovna oblika sloma zida opterećenog u ravnini su: dijagonalni slom, savojni slom i slom klizanjem. Oblici sloma su prikazani na slici 7.

Oblici sloma a) i c) se mogu smatrati posmičnim oblicima sloma. Koji će se oblik sloma pojaviti, ovisi o geometriji i materijalu zida, ali i o iznosu vertikalnog opterećenja. Pri vrlo malom iznosu vertikalnog opterećenja može doći do proklizavanja duž jedne horizontalne sljubnice. Prilikom djelovanja bočne sile javlja se moment savijanja i posmik. Zbog male vertikalne sile, već se pri malom momentu savijanja otvara horizontalna pukotina koja se širi kroz značajan dio presjeka, a zbog malog ili nepostojećeg tlačnog područja, poprečna sila uzrokuje "klizanje" zida po jednoj sljubnici ili dolazi do prevrtanja. Ta sljubnica može, ali i ne mora biti pri dnu elementa. Lošija izvedba, loša kvaliteta morta ili promjena materijala mogu uzrokovati slabu plohu u zidu. Iako se u svakom ciklusu postojeća horizontalna pukotina djelomično ili potpuno zatvori, materijal je raspucavanjem izgubio koheziju te je ta pukotina "trag" po kojem se jednostavnije događa



Slika 7. Oblici sloma: a) dijagonalni slom, b) savojni slom, c) slom klizanjem

sлом. Ovakav oblik sloma je u potresu 22. ožujka 2020. bio karakterističan za dimnjake koji su uglavnom otkazali duž jedne horizontalne sljubnice.

Slom klizanjem se može opisati Mohr-Coulombovim modelom ponašanja materijala, izraz (1):

$$f_v = f_{v0} + \mu \cdot \sigma_d \quad (1)$$

gdje je:

$f_v$  - posmična čvrstoća зида

$f_{v0}$  - početna posmična čvrstoća зида (komponenta neovisna o vertikalnoj sili)

$\mu$  - koeficijent trenja ( $\tan\phi$ ), gdje je  $\phi$  kut unutarnjeg trenja

$\sigma_d$  - proračunsko vertikalno tlačno naprezanje

Za postojeće зиде preporučuju se srednje vrijednosti karakteristika materijala, dok se za novo зиде koriste karakteristične vrijednosti. Za postojeće зиде to znači da je  $\mu = 0,5$ , a preporuka je u [33] koristiti  $f_{v0} = 0,1$  MPa. Za novo зиде  $\mu = 0,4$ . Prema novom prijedlogu norme EN 1998-3 [34] preporuka je  $f_{v0} = 0,16$  MPa.

Ovaj model pretpostavlja da se posmik preuzima samo tlačnim dijelom presjeka jer se u vlaku trenje ne aktivira (pretpostavka da nema kontakta materijala), a i kohezija se u vlaku smatra nepostojećom jer je element raspucao. Parcijalni koeficijent sigurnosti po sadašnjoj normi EC 1998-3 [34] umnožak je parcijalnog koeficijenta za materijal, tj. dvije trećine vrijednosti  $\gamma_M$  prema [35] i faktora povjerenja. Prema novom prijedlogu norme EC 1998-3 [34], ne korigira se materijal, nego nosivost, tj. koristi se parcijalni koeficijent sigurnosti za otpornost  $\gamma_{Rd}$  (faktor povjerenja i  $\gamma_M$  se ne koriste) čija vrijednost ovisi o razini znanja i vrsti sloma. Parcijalni koeficijent sigurnosti  $\gamma_{Rd}$  za slom klizanjem iznosi 1,65 za najnižu razinu znanja, 1,5 za srednju i 1,35 za najvišu razinu znanja. Posmična nosivost se može odrediti izrazom (2):

$$V_{p,Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot f_v \cdot L_c \cdot t_w \quad (2)$$

gdje je:

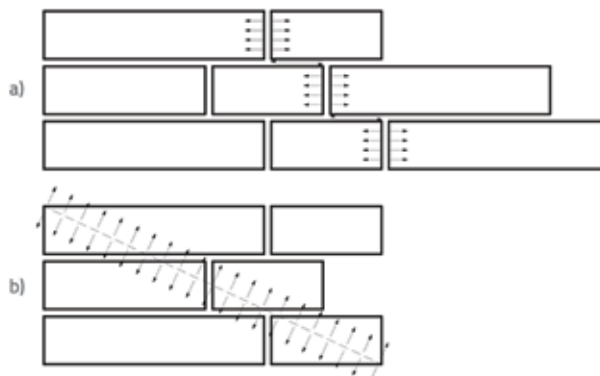
$\gamma_{Rd}$  - parcijalni koeficijent sigurnosti za otpornost

$L_c$  - duljina tlačnog područja зида

$t_w$  - debljina зида.

Dijagonalni slom je karakterističan za umjereni iznos vertikalne tlačne sile, što je vrlo čest slučaj u nižim dijelovima konstrukcije. Pukotina može prolaziti kroz opeku i mort ili samo kroz mort (stepenast oblik sloma). Stepenast oblik sloma je kombinacija vlaka okomito na čeone plohe (vlačna čvrstoća kontakta morta i zidnog elementa) i proklizavanja na nizu horizontalnih ploha. Pukotina se širi kroz opeku uglavnom u slučaju ako je opeka nekvalitetna, a mort kvalitetan, dok je stepenasti slom karakterističan u suprotnom slučaju. Također, "ravni" dijagonalni slom je čest kada su zidni elementi nepravilni. Dijagonalni oblici sloma su češći kod starijeg зида, pa sadašnja norma HRN EN

1996-1-1 [35] ne razmatra taj oblik sloma. Norma EN 1998-3 [34] također ne razmatra ovaj oblik sloma, ali su u nacrtima sljedeće generacije ove norme ti oblici sloma razmotreni kao uglavnom mjerodavni za postojeće зиде. Na slici 8.a prikazan je stepenasti slom, a na slici 8.b "ravni" dijagonalni vlačni slom.



Slika 8. Oblici dijagonalnog vlačnog sloma: a) stepenasti; b) "ravni"

Ravni dijagonalni slom se javlja zbog prekoračenja glavnih kosih vlačnih naprezanja. U skladu s teorijom elastičnosti prema radu Turnšeka i Čačovića [36], vlačna čvrstoća iznosi:

$$f_t = -\frac{\sigma_0}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{2}\right)^2 + (b \cdot \tau)^2} \quad (3)$$

gdje je:

$\sigma_0$  - prosječno vertikalno tlačno naprezanje (po cijeloj plohi зида)

$b$  - geometrijski koeficijent ( $b = h/L$ , ali između 1 i 1,5)

$h$  - visina зида

$L$  - duljina зида (ukupna)

$\tau$  - posmično naprezanje.

Koeficijent  $b$  je koeficijent raspodjele posmičnog naprezanja, a ovisi i o omjeru visine i duljine зида. Izraz (3) se može zapisati tako da se na temelju poznate vlačne čvrstoće i vertikalnog pritiska izrazi dopušteno posmično naprezanje, izraz (4):

$$\tau = \frac{f_t}{b} \cdot \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{f_t}} \quad (4)$$

Posmična nosivost se može odrediti izrazom (5):

$$V_{t1,Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot L \cdot t_w \cdot \frac{f_t}{b} \cdot \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{f_t}} \quad (5)$$

Parcijalni koeficijent sigurnosti  $\gamma_{Rd}$  za pravilno зиде pri oba načina dijagonalnog sloma iznosi 1,7 za najnižu razinu znanja, 1,55 za srednju i 1,4 za najvišu razinu znanja. U [37] su razmotrena ova dva oblika sloma, a rezultatima ispitivanja pokazano da je dijagonalni slom (i ravni i stupnjeviti) prikladnije opisati izrazom

(5). Naime, iako se čini logičnim da bi stepenasti slom mogao biti opisan sličnim izrazom kao i proklizavanje (ovaj postupak je opisan poslije), pogotovo ako se vlačna čvrstoća zanemari, otkazivanje na više razina predstavlja problem. Razmotri li se slučaj sa slike 9. jasno je da različiti presjeci po visini zida imaju različitu duljinu tlačnog područja. Moment na vrhu je nula (za konzolu), a pri dnu značajno veći, dok je tlačna sila približno konstantna. U presjecima pri vrhu je najčešće cijeli element u tlaku, a u presjecima pri dnu značajan dio presjeka može biti u vlaku. Pitanje je koju duljinu tlačnog područja koristiti u izrazu (2) kako bi se opisao stepenasti slom. Očito je da će duljina pri dnu često dati pretjerano malu nosivost, a problem se komplicira činjenicom da su rubni uvjeti realnih zidova složeniji od slučaja prikazanog na slici 9.

Prema [7], za staro se zide može pretpostaviti  $f_{tk} = 0,09$  MPa, ako nema rezultata ispitivanja, što znači da je srednja vrijednost vlačne čvrstoće (za postojeće zide) 0,11 MPa. Prema novom prijedlogu norme EN 1998-3 [34], srednja vrijednost vlačne čvrstoće za zide od pune opeke s vapnenim mortom je 0,114 MPa.

Stepenasti oblik sloma je moguće najpreciznije opisati sličnim izrazom kao i proklizavanje uz određene modifikacije. Prema [38], dan je izraz, kasnije modificiran u [39, 40] koji opisuje stepenasti oblik sloma. U [41] je dan pregled različitih oblika sloma te norme u kojima su ti oblici opisani. Važno je napomenuti da niz normi opisuje stepenasti oblik sloma izrazom (6), a među njima je i buduća verzija norme EN 1998-3 [34] namijenjena za projektiranje postojećih konstrukcija na potresna djelovanja. Posmična nosivost pri stepenastom slomu se može odrediti izrazom (6):

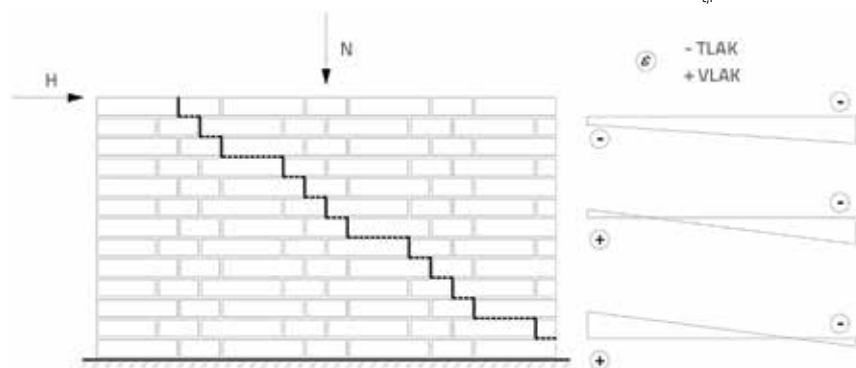
$$V_{z,Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot \frac{L \cdot t_w}{b} \cdot \left( \frac{f_{v0}}{1 + \mu_j \cdot \phi} + \frac{\mu_j}{1 + \mu_j \cdot \phi} \cdot \sigma_0 \right) \leq V_{d,lim} \quad (6)$$

gdje je:

$\mu_j$  - lokalni koeficijent trenja sljubnice, ako nema točnijih podataka, iznosi 0,6

$\phi$  - koeficijent uklještenja.

Koeficijent uklještenja je odnos visine zidnog elementa i prosječne duljine preklopa dvaju zidnih elemenata. Drugim



Slika 9. Skica promjene duljine tlačnog područja po visini zida

riječima,  $\phi$  predstavlja prosječni nagib plohe sloma (tangens kuta pod kojim se širi stepenasti slom). Granična vrijednost nosivosti pri stepenastom slomu je:

$$V_{d,lim} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot L \cdot t_w \cdot \frac{f_{bt}}{2,3 \cdot b} \cdot \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{f_{bt}}} \quad (7)$$

gdje je:

$f_{bt}$  - vlačna čvrstoća zidnog elementa

Ako nema točnijih podataka, vlačna čvrstoća zidnog elementa se može pretpostaviti kao 10 % tlačne čvrstoće zidnog elementa. Važno je primijetiti da se u izrazu (6) razmatra cijela duljina zida, a ne samo tlačni dio kao u (2) što je logično jer se slom događa po nizu sljubnica. Međutim, koeficijent uklještenja i geometrijski koeficijent su važne promjene u odnosu na izraz (2).

#### 4. Pojačanje zida na posmik nemetalnom armaturom

Zide se može pojačati na posmik dodavanjem TRM mreža ili lijepljenjem FRP traka na zid. Za proračun nosivosti pojačane konstrukcije postoji nekoliko smjernica i normi. Prema [42], sada se za procjenu nosivosti konstrukcija pojačanih FRP-om mogu predložiti: *fib* bulletin 14 [19], CNR-DT 200/2013 [43] i ACI 440.2R-02 [44], a za procjenu nosivosti konstrukcija pojačanih TRM-om CNR-DT 215/2018 [45] i ACI 549.4R-13 [46]. Iako su norme [44] te smjernice [19] namijenjene za armiranobetonske konstrukcije, prikazat će se način proračuna pojačanja uz preinake prikladne za zidane konstrukcije. Smjernica [43] je namijenjena za pojačanje zida FRP-om pa će se na njoj temeljiti sljedeća razmatranja.

##### 4.1. Osnove proračuna

Posmična nosivost pojačanog zida (i za FRP i TRM) može se odrediti kao:

$$V_{Rd} = V_{z,Rd} + V_{t,f} \quad (8)$$

gdje je:

$V_{z,Rd}$  - nosivost nepojačanog zida na posmik

$V_{t,f}$  - posmična nosivost pojačanja.

Izraz (8) prikladan je za neoštećene zidove, a za znatno oštećene zidove može se smatrati da je nosivost nepojačanog zida  $V_{z,Rd} = 0$ . U oba slučaja se mora izbjeći slom gnječanjem kao i ostali oblici sloma (prevrtanje, otkazivanje izvan ravnine, itd.). Kod oba slučaja pojačanja sidrenje predstavlja veći problem od loma vlakana. Prilikom sidrenja, važni su uvjeti izloženosti pojačanja. Dopuštena proračunska relativna deformacija  $\varepsilon_{rd}$  se može odrediti prema izrazu (9):

$$\varepsilon_{fd} = \eta \cdot \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_m} \quad (9)$$

gdje je:

- $\eta$  - faktor koji ovisi o uvjetima izloženosti zida
- $\varepsilon_{fk}$  - karakteristična relativna deformacija pri otkazivanju
- $\gamma_m$  - parcijalni koeficijent sigurnosti.

Vrijednosti faktora izloženosti za FRP su dane u tablici 1.

Tablica 1. Faktor izloženosti (preuzeto iz [43])

Uvjeti izloženosti	Materijal vlakana	$\eta$
Unutarnji	staklo	0,75
	aramid	0,85
	ugljik	0,95
Vanjski	staklo	0,65
	aramid	0,75
	ugljik	0,85
Agresivni	staklo	0,50
	aramid	0,70
	ugljik	0,85

Vrijednosti faktora izloženosti za TRM se mogu uzeti pojednostavljeno, neovisno o materijalu vlakana. Vrijednosti su dane u tablici 2.

Tablica 2. Faktor izloženosti (preuzeto iz [45])

Uvjeti izloženosti	$\eta$
Unutarnji	0,9
Vanjski	0,8
Agresivni	0,7

Parcijalni koeficijent sigurnosti prema [43] za FRP iznosi 1,2 za granično stanje nosivosti (GSN), a za TRM prema [45] iznosi 1,5. Vrijednosti se odnose na otkazivanje gubitkom prianjanja uz materijal koji ima certifikat o svojim karakteristikama.

Karakteristična relativna deformacija pri otkazivanju je manja od vrijednosti relativne deformacije pri gubitku prianjanja  $\varepsilon_{lim,conv}$  i vrijednosti pri vlačnom slomu vlakana  $\varepsilon_{u,f}$ . Vrijednost  $\varepsilon_{u,f}$  daje proizvođač za oba načina pojačanja, a određivanje  $\varepsilon_{lim,conv}$  je različito za FRP i TRM te će biti objašnjeno kasnije.

Na temelju dopuštene proračunske relativne deformacije dopušteno se naprezanje može odrediti kao:

$$f_{fd} = \varepsilon_{fd} \cdot E_f \quad (10)$$

gdje je:

- $E_f$  - modul elastičnosti materijala vlakana (daje proizvođač).

## 4.2. Pojačanje ziđa FRP-om

Pojačanje FRP-om se ostvaruje lijepljenjem traka. Ovisno o konfiguraciji traka, povećanje nosivosti može biti veće ili manje.

Postoji niz preporuka za proračun pojačanja, a u radu [47] su detaljno analizirane različite preporuke te dani eksperimentalni podaci laboratorijskih i terenskih ispitivanja. U nastavku je dan pregled različitih preporuka.

### 4.2.1. Proračun pojačanja prema CNR-DT 200/2013 [43]

Kako je osnovni oblik sloma gubitak prianjanja FRP-a i ziđa, dopušteno naprezanje će ovisiti o duljini sidrenja. Najveća duljina na kojoj se ostvaruje sidrenje (daljnje povećanje ne povećava dopuštena naprezanja) može se prema [43] odrediti izrazom (11):

$$l_e = \max \left( \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot \tau_{bd}} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}} ; 150 \text{ mm} \right) \quad (11)$$

gdje je:

- $\gamma_{Rd}$  - koeficijent sigurnosti (ovisi o materijalu)
- $\tau_{bd}$  - čvrstoća prianjanja
- $t_f$  - debljina trake FRP-a
- $\Gamma_{Fd}$  - proračunska vrijednost specifične energije loma.

Koeficijent sigurnosti se prema [43] može pretpostaviti 1,5 za tuf i perforirani kamen, odnosno 1,25 za vapnenac i kalkarenit. Treba napomenuti da nije definiran koeficijent sigurnosti ako se radi o ziđu od glinenih zidnih elemenata, no proračun će biti na strani sigurnosti ako se uzme koeficijent 1,25. Čvrstoća prianjanja se može odrediti izrazom (12):

$$\tau_{bd} = \frac{2 \cdot \Gamma_{Fd}}{s_u} \quad (12)$$

gdje je:

- $s_u$  - proklizavanje pri slomu

Proklizavanje pri slomu se prema [43] može pretpostaviti 0,4 mm za tuf i perforiranu opeku, odnosno 0,3 mm za vapnenac i kalkarenit. Ovdje također nije definirana vrijednost  $s_u$  za glinene zidne elemente. Na strani sigurnosti je pretpostavka da je za glinene zidne elemente  $s_u = 0,3$  mm. Proračunska vrijednost specifične energije loma iznosi:

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{FC} \cdot \sqrt{f_{bm} \cdot f_{btm}} \quad (13)$$

gdje je:

- $k_b$  - geometrijski korekcijski faktor
- $k_G$  - korekcijski faktor ovisan o vrsti ziđa
- $FC$  - faktor povjerenja
- $f_{bm}$  - srednja vrijednost tlačne čvrstoće zidnog elementa
- $f_{btm}$  - srednja vrijednost vlačne čvrstoće zidnog elementa.

Korekcijski faktor ovisan o vrsti ziđa iznosi 0,031 mm za perforiranu opeku, 0,048 mm za tuf, a 0,012 mm za vapnenac i kalkarenit. Za predgotovljene sustave (npr. FRP lamele) treba se  $k_G$  smanjiti na 40 % vrijednosti. Faktor povjerenja nije objašnjen u [43], ali je opisan u NTC2018 [48], a  $FC$  može poprimiti vrijednosti



1,0, 1,2 ili 1,35, gdje najmanja vrijednost odgovara najdetaljnijem pregledu, a 1,35 najmanje detaljnom. Prema novom prijedlogu norme EN 1998-3 [34], također su dane tri razine povjerenja, ali iznosi faktora povjerenja ovise o načinu sloma zida. Niska razina povjerenja je ona kada nisu provedena nikakva ispitivanja (samo detaljan vizualni pregled), srednja razina je ako su provedena nerazorna ispitivanja, a visoka razina povjerenja je ako su uz nerazorna ispitivanja provedena i ispitivanja karakteristika materijala (djelomično razorna ili razorna ispitivanja). Srednja vrijednost vlačne čvrstoće zidnog elementa se prema [43] može procijeniti kao  $0,1 \cdot f_{bm}$ . U nedostatku eksperimentalnih podataka geometrijski korekcijski faktor se može odrediti izrazom (14):

$$k_b = \sqrt{\frac{3 \cdot l_f / b}{1 + l_f / b}} \quad (14)$$

gdje je:

$l_f$  - širina jedne trake FRP-a

$b$  - širina područja pojačanog elementa pod utjecajem FRP trake.

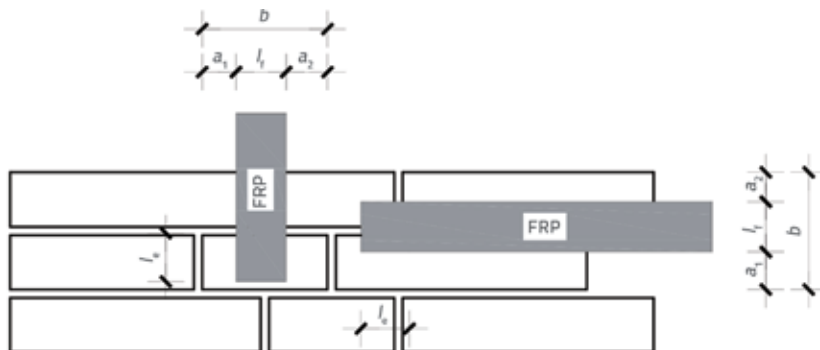
Širina  $b$  se u slučaju pravilnih elemenata može odrediti kao širina dijela zida na koje se traka oslanja izravno. Na slici 10. prikazan je način određivanja širine  $b$  za horizontalalno i vertikalno lijepljenje trake.

Dopušteno naprezanje u slučaju otkazivanja u vanjskon sloju zida se može odrediti kao:

$$f_{fd} = \frac{1}{\gamma_{fd}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}} \quad (15)$$

gdje je:

$\gamma_{fd}$  - koeficijent sigurnosti koji se za gubitak prijanjanja može uzeti 1,2 prema [43].



Slika 10. Prikaz određivanja dimenzije  $b$

Tablica 3. Koeficijent smanjenja dopuštenog naprezanja za različite odnose  $l_b / l_e$

$l_b / l_e$	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
$k$	0,99	0,96	0,91	0,84	0,75	0,64	0,51	0,36	0,19

Najveća relativna deformacija pri otkazivanju se može odrediti izrazom (10). U slučaju da je duljina sljubnice paralelna s polaganjem trake manja od optimalne duljine sidrenja određene prema izrazu (11), dopušteno naprezanje određeno izrazom (15) treba smanjiti na 85 % vrijednosti.

U slučaju da se koriste sidra ili da se FRP savija oko zida, duljinu sidrenja je potrebno odrediti eksperimentalno. Međutim, ta duljina bi trebala biti kraća od dobivene izrazom (11), pa se ona može koristiti i u tim slučajevima.

U slučaju da je ostvarena manja duljina sidrenja, potrebno je naprezanje dobiveno izrazom (15) pomnožiti koeficijentom:

$$k = \frac{l_b}{l_e} \cdot \left( 2 - \frac{l_b}{l_e} \right) \quad (16)$$

gdje je:

$l_b$  - ostvarena duljina sidrenja.

U tablici 3. prikazane su vrijednosti koeficijenta smanjenja dopuštenog naprezanja za različite odnose  $l_b / l_e$ .

Ako bi došlo do odlamanja dijela zidnog elementa, najviše 80 % duljine pojedinog elementa se smije uzeti u duljinu sidrenja. Međutim, [43] ne predlaže u kojem slučaju dolazi do odlamanja dijela opeke. Iz tablice 3 je vidljivo da ako se ne povećava duljina sidrenja zbog potencijalnog odlamanja dijela zidnog elementa, ovaj uvjet dovodi do malog smanjenja dopuštenog naprezanja (samo 4 % smanjenja za  $l_b / l_e = 0,8$ ).

Posmična nosivost zida koja se koristi u izrazu (8) jest nosivost na klizanje određena izrazom (2).

Posmična nosivost FRP pojačanja ovisi o rasporedu FRP traka. U slučaju da su trake postavljene paralelno s poprečnom silom (horizontalno u slučaju zidova) nosivost se može odrediti izrazom (17):

$$V_{t,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot \frac{0,6 \cdot d_f \cdot 2 \cdot A_{tw} \cdot f_{fd}}{\rho_f} \quad (17)$$

gdje je:

$\gamma_{Rd}$  - parcijalni koeficijent sigurnosti, koji prema [43] iznosi 1,2

$d_f$  - udaljenost od najnapetijeg vlakanca armature u vlaknu i najnapetijeg vlakanca zida u tlaku

$A_{tw}$  - površina FRP-a;  $A_{tw} = l_f \cdot t_f$

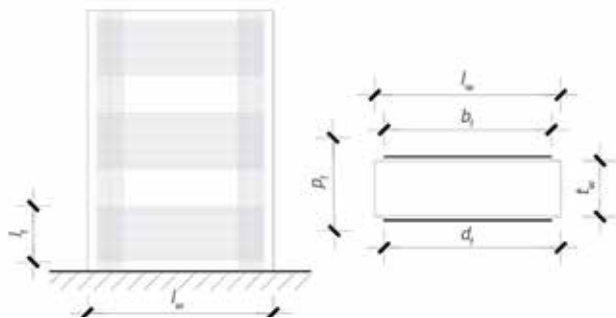
$\rho_f$  - razmak susjednih FRP traka.

Na slici 11. je prikazan primjer pojačanja horizontalnim trakama (i vertikalnim na krajevima zida).

Norma ne preporuča najveći dopušteni razmak traka. Očito je potrebno imati barem jednu traku po mogućoj dijagonalnoj pukotini. Pretpostavi li se širenje pukotine pod kutem  $45^\circ$ , to bi značilo:

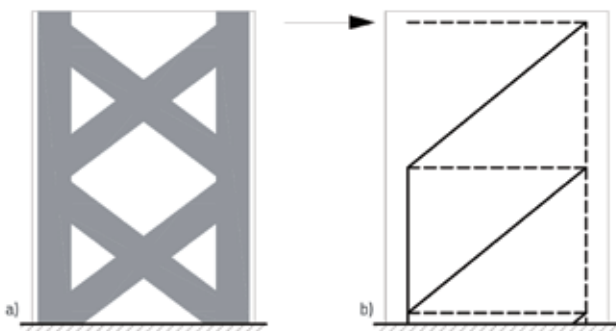
$$\rho_{f,max} = \min (0,5 \cdot h; 0,5 \cdot l_w) \quad (18)$$

Međutim, izraz (18) nije dan u normi nego je pretpostavka autora. Slična preporuka je dana u [44] za pojačanje AB elemenata gdje je najveći svjetli razmak dviju traka  $d_f / 4$ . Izraz (18) bi trebalo modificirati za zide ovisno o morfologiji, tipu zida i debljini elementa. Autori nisu upoznati s izrazom koji uzima u obzir karakteristike zida. Iako je u praktičnoj primjeni vjerojatno ovaj uvjet zadovoljen, važno je osigurati da je moguća pukotina pridržana barem jednom trakom.



Slika 11. Skica horizontalnog pojačanja s oznakama

Za drugačiji raspored pojačanja potrebno je odrediti nosivost na poprečnu silu pomoću prikladnog mehanizma. Na primjer, ako je zid pojačan kao na slici 12.a, tj. dvjema dijagonalnim trakama i dvjema vertikalnim, tada se može formirati mehanizam kao na slici 12.b. Utjecaj FRP-a u tlaku treba zanemariti. Na temelju mehanizma prikazanog na slici 12.b je potom jednostavno odrediti sile u pojedinom štapu zamjenske rešetke. Nakon toga se na temelju poznatih širina i debljina pojedinih traka može odrediti nosivost vertikalnih i dijagonalnih traka množenjem izraza (15) s površinom poprečnog presjeka trake. Na temelju toga je moguće odrediti pri kojoj razini horizontalne sile dolazi do otkazivanja i koja traka će prva otkazati. Zide pridonosi nosivosti na duljini jednako duljini horizontalnog štapa rešetke. Na slici 12.b su isprekidanim linijama prikazani elementi u kojima se javlja tlak, a punim linijama elementi u kojima se javlja vlak. Naravno, pri potresu sila djeluje u oba smjera pa je potrebno simetrično postaviti pojačanja.



Slika 12. Primjer pojačanja zida a) prikaz traka; b) statička shema

Osim provjere vlačnog otkazivanja potrebno je provjeriti da ne dolazi to tlačnog otkazivanja zida. Prema [43], do tlačnog sloma dolazi prekoračenjem sile:

$$V_{Rd,max} = 0,3 \cdot f_{d,h} \cdot t_w \cdot d_f \quad (19)$$

gdje je:

$f_{d,h}$  - proračunska horizontalna tlačna čvrstoća zida.

Horizontalna tlačna čvrstoća zida znatno je manja od one u vertikalnom smjeru. Ako ne postoje eksperimentalni podaci, prema [43], može se pretpostaviti da je  $f_{d,h} = 0,5 \cdot f_d$ .

#### 4.2.2. Proračun pojačanja prema ACI 440.2R-02 [44]

Posmična nosivost pojačanja FRP-om se može odrediti pomoću izraza:

$$V_{t,f} = \phi_v \cdot \psi \cdot \frac{2 \cdot n \cdot t_f \cdot l_f \cdot d_f}{\rho_f} \cdot \varepsilon_{rd} \cdot E_f \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha) \quad (20)$$

gdje je:

$\phi_v$  - koeficijent sigurnosti za posmik koji iznosi 0,75

$\psi$  - dodatni koeficijent sigurnosti za proklizavanje FRP-a koji iznosi 0,85

$2 \cdot n$  - ukupni broj slojeva FRP mreža.

Proračun nosivosti samog zida je drugačiji prema ACI nizu normi, ali se ovdje taj dio nosivosti neće detaljnije razrađivati, kao niti gnječenje. Proračunska relativna deformacija pri otkazivanju ovisi o rasporedu traka kao i duljini sidrenja te materijalu na koji se povezuje FRP, a može se odrediti kao:

$$\varepsilon_{rd} = \kappa \cdot \varepsilon_{u,f} \leq 0,004 \quad (21)$$

gdje je:

$\kappa$  - koeficijent smanjenja relativne deformacije zbog gubitka prijanjanja.

Koeficijent smanjenja se može odrediti pomoću izraza:

$$\kappa = \left( \frac{f_{cm}}{27} \right)^{2/3} \cdot \frac{d_f - 2 \cdot L_e}{d_f} \cdot \frac{L_e}{11900 \cdot \varepsilon_{u,f}} \quad (22)$$

gdje je:

$L_e$  - duljina sidrenja.

Duljina sidrenja može se odrediti izrazom:

$$L_e = \frac{23300}{(n \cdot t_f \cdot E_f)^{0,58}} \quad (23)$$

#### 4.2.3. Proračun pojačanja prema fib bulletin 14 [19]

Iako je ova preporuka namijenjena za proračun pojačanja armiranobetonskih konstrukcija, prikazat će se postupak proračuna uz poneku prilagodbu za zide. Nosivost pojačanja FRP-om se može odrediti kao:

$$V_{t,f} = 0,9 \cdot \varepsilon_{rd} \cdot E_f \cdot \rho_f \cdot t_w \cdot d_f \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha) \quad (24)$$

gdje je:

- $\rho_f$  - koeficijent armiranja  
 $\alpha$  - kut između osi FRP-a i osi zida.

Koeficijent armiranja iznosi  $2 \cdot t_f \cdot \sin \alpha / t_w$  u slučaju kontinuiranog lijepljenja, odnosno  $(2 \cdot t_f / t_w) \cdot (l_f / \rho_f)$  u slučaju lijepljenja u trakama.

Proračunska relativna deformacija pri otkazivanju se može odrediti izrazom (25):

$$\varepsilon_{fd} = 0,8 \cdot \min \left[ 0,65 \cdot \left( \frac{f_m^{2/3}}{E_f \cdot \rho_f} \right)^{0,56} \cdot 10^{-3} ; 0,17 \cdot \left( \frac{f_{cm}^{2/3}}{E_f \cdot \rho_f} \right)^{0,3} \cdot \varepsilon_{u,f} \right] \quad (25)$$

gdje je:

- $f_m$  - srednja tlačna čvrstoća materijala (zida).

Prvi izraz u zagradi odgovara odvajanju FRP-a, a drugi vlačnom slomu. Također, taj izraz je određen za ugljična vlakna tako da je njegova primjenjivost upitna.

U normi se također napominje da ograničenje relativne deformacije na 0,006 može biti uvedeno kako bi se osigurao mehanizam prijenosa posmika mehaničkim uklještenjem agregata, ali ako on nije presudan da takvo ograničenje nije potrebno. Kako se kod proračuna zida niti u mehanizmu proklizavanja, niti u dijagonalnom vlačnom mehanizmu ne uzima u obzir utjecaj mehaničkog uklještenja, ovo ograničenje se ne čini potrebnim. Važno je uočiti da slično ograničenje postoji u normi [44], vjerojatno iz istog razloga. Također, kao što je prije spomenuto, i u ovoj normi se razmatra doprinos nepojačanog elementa, a također je potrebno izbjeći gnječenje zida.

### 4.3. Pojačanje zida TRM-om

#### 4.3.1. Proračun pojačanja prema CNR-DT 215/2018 [45]

Posmična nosivost pojačanog zida se može odrediti pomoću izraza (8). Vidljivo je da se u konačnu nosivost razmatra dijagonalna vlačna nosivost (ravni slom) nepojačanog zida što je u skladu s prijašnjim razmatranjima. Posmična nosivost zida je nosivost na dijagonalni slom. Potrebno je uzeti manju vrijednost od  $V_{t1,Rd}$  i  $V_{t2,Rd}$ . Posmična nosivost TRM pojačanja je u [45] dana izrazom:

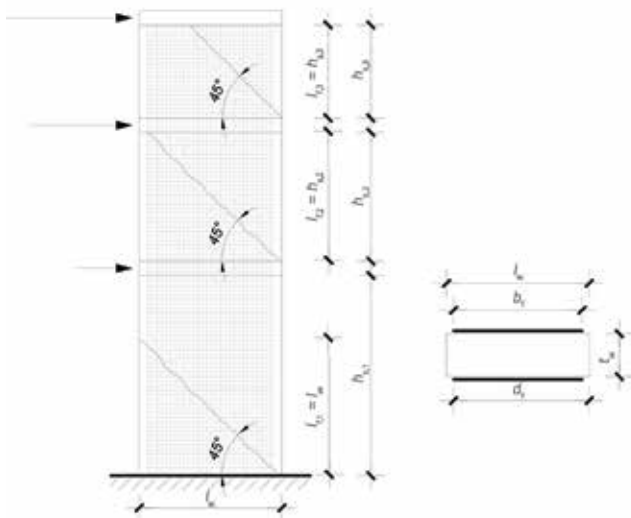
$$V_{t,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot n_f \cdot t_{vf} \cdot l_f \cdot \alpha_t \cdot \varepsilon_{fd} \cdot E_f \quad (26)$$

gdje je:

- $\gamma_{Rd}$  - parcijalni koeficijent sigurnosti, koji prema [45] iznosi 2,0  
 $n_f$  - ukupni broj slojeva pojačanja (na obje strane zida)  
 $t_{vf}$  - ekvivalentna debljina jednog sloja pojačanja u smjeru posmika  
 $l_f$  - učinkovita visina pojačanja  
 $\alpha_t$  - koeficijent smanjenja vlačne čvrstoće, koji prema [45] iznosi 0,8  
 $\varepsilon_{fd}$  - dopuštena proračunska relativna deformacija TRM-a  
 $E_f$  - modul elastičnosti TRM-a.

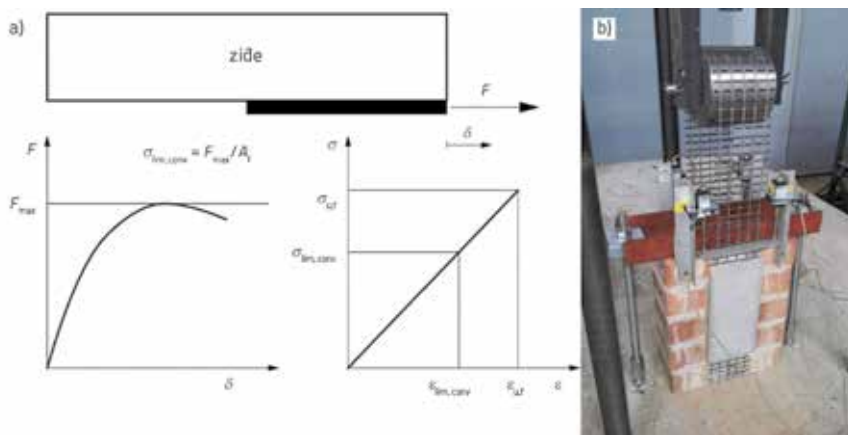
Izraz (26) je zapravo površina svih mreža ( $n_f \cdot t_{vf} \cdot l_f$ ) pomnožena s čvrstoćom ( $\alpha_t \cdot \varepsilon_{fd} \cdot E_f$ ).

Ako je pojačanje postavljeno na jedno lice zida, prema [45] je potrebno  $V_{Rd,f}$  smanjiti za barem 30 %, a sidra su obavezna. Drugim riječima, ako je pojačanje s dvije mreže, npr. 100 kN, pojačanje s jednom mrežom je  $50 \cdot 0,7 = 35$  kN. Sidra u slučaju pojačanja s jedne strane zida trebaju ući u zadnji sloj zida (najudaljeniji sloj od pojačanog lica). Sidra u slučaju obostranog postavljanja mreža nisu nužna prema [45], osim u slučaju loše povezanosti slojeva zida. Razmak sidara može biti između  $3 \cdot t_w$  i 160 cm u slučaju debljine zida  $t_w < 40$  cm. Razmak sidara može biti između  $2 \cdot t_w$  i 200 cm u slučaju debljine zida  $t_w > 40$  cm. Na spoju s poprečnim zidovima sidro treba ulaziti u poprečni zid barem za  $3 \cdot t_w$ . Međutim, prema ispitivanjima provedenim u [49] je pokazano da ovako velik razmak sidara može dovesti do lokalnog izbočivanja pojačanja te je predložen razmak približno jednak debljini zida. Velikim razmakom sidara se ostvaruje predviđeno povećanje nosivosti, ali ne i značajno povećanje duktilnosti. Međutim, kako se prema [45] ne pretpostavlja povećanje duktilnosti pojačane konstrukcije, razmak sidara je prihvatljiv. Broj sidara također utječe na brzinu gradnje, a dosadašnji broj ispitivanja nije dovoljno velik da bi se mogao pouzdano utvrditi utjecaj pojačanja na duktilnost konstrukcije. Učinkovita visina pojačanja je visina koja pridonosi posmičnoj nosivosti. Na slici 13. je prikazan zid visine tri etaže pojačan TRM mrežama. Pretpostavi li se da je kut rasprostiranja pukotine  $45^\circ$  kao u [45], onda je visina koja "zadržava" jednu pukotinu jednaka vertikalnoj projekciji duljine te pukotine. Ako je zid od vrha do dna pojačan TRM mrežama, a visina etaže  $h_s > l_w$ , onda je  $l_f = l_w$ , a u suprotnom  $l_f = h_s$ , gdje je  $h_s$  visina etaže i  $l_w$  duljina zida. Za različite etaže može biti mjerodavan različit uvjet, što je vidljivo sa slike 13.



Slika 13. Prikaz zida pojačanog TRM mrežama i dijagonalnih pukotina

Vrijednosti faktora izloženosti zida prikazane su u tablici 2. Karakteristična relativna deformacija pri otkazivanju je definirana

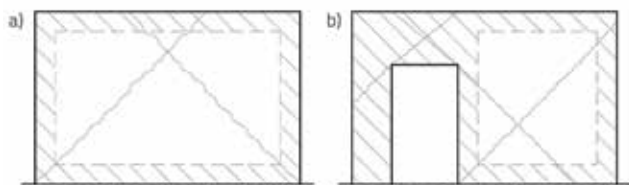


Slika 14. a) Shematski prikaz ispitivanja prijanjanja [45]; b) Ispitivanje prijanjanja uzorka [49]

proklizavanjem TRM mreža, a kako ovisi o materijalu mreže, matrice i zida, potrebno ju je odrediti na temelju ispitivanja. Prema [50], proizvođač bi trebao priložiti vrijednosti  $\epsilon_{lim,conv}$  ili  $\sigma_{lim,conv}$  ( $\sigma_{lim,conv} = E_f \cdot \epsilon_{lim,conv}$ ) na temelju ispitivanja prijanjanja uzoraka zida pojačanih TRM-om. Na slici 14.a je shematski prikazan način određivanja prijanjanja prema [45], a na slici 14.b je prikazan uzorak prilikom ispitivanja [49].

Sa slike 14.a je vidljivo da je naprezanje  $\sigma_{lim,conv}$  uglavnom niže od vlačne čvrstoće pri slomu tkanine. Utjecaj više slojeva mreža je ispitan u [25], gdje je pokazano da se za veći broj slojeva učinkovitost smanjuje. Preklapanje većeg broja slojeva uzrokuje smanjenje razmaka između vlakana TRM-a što dovodi do lošije veze mreže i morta. Za veći broj slojeva naprezanje je znatno niže od vlačne čvrstoće mreže. Također, zbog lošijeg prijanjanja prouzročenoga gušćom mrežom, slom je manje duktilan.

Kako je ispitivanjem određeno prijanjanje na mjestu sidrenja, u području dovoljno udaljenom od mjesta sidrenja može se dopuštena deformacija uvećati za 50 % prema [45] jer do odvajanja mreže može doći i na mjestima udaljenim od sidrenja (ali pri većoj deformaciji). Naravno, ako je deformacija pri odvajanju veća od one pri kojoj dolazi do vlačnog sloma vlakana  $\epsilon_{u,f}$  tada se  $\epsilon_{u,f}$  uzima kao dopuštena deformacija.



Slika 15. Prikaz područja s dopuštenim deformacijama a) primjer 1; b) primjer 2

Na slici 15.a je skiciran zid bez otvora te je koso osjenčano područje gdje je dopuštena manja deformacija (u [45] nije definirano koje je to točno područje gdje je dopuštena manja deformacija, ali je pretpostavka autora da se radi o području udaljenom < 30 cm od svih krajeva mreže jer je to duljina sidrenja prema [45]). Vidljivo je sa slike 15.a da je za ovaj specifični slučaj

velik dio mreže koji siječe pukotinu moguće aktivirati do veće deformacije (osjenčano područje je malo). Na slici 15.b je prikazan zid s otvorom u blizini ruba. Vidljivo je da je za taj specifični slučaj veća dopuštena deformacija prihvatljiva samo za dio zida desno od otvora, dok je za dio lijevo od otvora kao i nadvoj mjerodavna manja vrijednost. U skladu s time je potrebno odrediti dopuštenu deformaciju na temelju geometrije zida i očekivanog mjesta pojave pukotine. Osim navedenog, u slučaju da je sidrenje vertikalne armature osigurano, potrebno je provjeriti gnječenje zida u tlačnom području. Prema [45] može se koristiti izraz (27):

$$V_{Rd,max} = 0,25 \cdot f_d \cdot t_w \cdot d_f \tag{27}$$

gdje je:

- $f_d$  - proračunska tlačna čvrstoća zida
- $t_w$  - debljina zida
- $d_f$  - udaljenost od najnapetijeg vlakanca armature u vlaknu i najnapetijeg vlakanca zida u tlaku.

Zahtijevana duljina sidrenja ovisi o materijalima zida, matrice i armature, a u slučaju da nije poznata, može se pretpostaviti 30 cm prema [45].

### 4.3.2. Proračun pojačanja prema ACI 549.4R-13 [46]

Prema američkoj normi ACI 549.4R-13 [46], utjecaj pojačanja se može odrediti izrazom:

$$V_f = 2 \cdot n \cdot A_f \cdot L \cdot f_{fv} \tag{28}$$

gdje je:

- $2 \cdot n$  - ukupan broj slojeva TRM mreža
- $A_f$  - površina jednog sloja TRM-a u jednom metru visine zida
- $L$  - duljina zida
- $f_{fv}$  - proračunska vlačna čvrstoća TRM-a.

Konačna vrijednost nosivosti pojačanog zida može se odrediti izrazom:

$$V_{Rd} = \phi_v \cdot (V_f + V_m) \tag{29}$$

gdje je:

- $\phi_v$  - koeficijent sigurnosti za posmik koji iznosi 0,75
- $V_m$  - posmična nosivost nepojačanog zida.

Proračunska vlačna čvrstoća TRM-a se može odrediti kao  $E_f \cdot \epsilon_{fv}$  pri čemu je  $\epsilon_{fv}$  ograničen na 0,004. Razlog ograničenja je taj što se pri većim relativnim deformacijama ne može

Tablica 4. Pretpostavljene karakteristike zida u proračunskom primjeru

$f_{t0}$ [MPa]	$\sigma_d$ [MPa]	$\sigma_0$ [MPa]	$KL$	$L_c$ [cm]	$t_w$ [cm]	$h$ [cm]	$L$ [cm]	$f_t$ [MPa]	$\phi$	$f_b$ [MPa]	$f_{bt}$ [MPa]
0,16	1,33	0,5	2	75	30	300	200	0,11	1,0	15	1,5

računati na komponentu nosivosti koju pridonosi zide. Usporedbom izraza (26) i (28) je vidljivo da su vrlo slični uz nekoliko razlika. U [46] se pretpostavlja simetrično postavljanje mreža s obje strane zida (zbog toga  $2 \cdot n$ ). Površina mreže se svodi na metar visine što se množi s duljinom zida. Time se  $l_f$  iz izraza (26) svodi na  $L$ . To je prihvatljivo za vitke zidove, ali za dugačke i niske zidove moglo bi dovesti do nerealno velike nosivosti. U ovoj normi se napominje da je u slučaju ekscentričnog pojačanja potrebno razmotriti utjecaj ekscentričnosti.

## 5. Primjer proračuna

U nastavku je dan primjer proračuna nosivosti neoštećenog zida pojačanog FRP-om te TRM-om. Materijal zidnog elementa je puna opeka, a mort je vapneni. Opečni elementi su dimenzija  $v/\hat{s}/d = 6,5/15/30$  cm, a horizontalne sljubnice su prosječne debljine 1,0 cm. U ovom primjeru se nosivosti nepojačanog zida određuju jednako, bez obzira na to koja se preporuka primjenjuje za proračun pojačanja. Tako je lakše usporediti doprinos pojačanja prema pojedinoj normi. Proračunska tlačna sila je  $N_{Ed} = 300$  kN. Ekscentričnost opterećenja iznosi  $e = 75$  cm pa je moment savijanja na zid  $M_{Ed} = 225$  kNm. Pretpostavi li se da je zid statički obostrano upet, poprečna sila iznosi  $V_{Ed} = 150$  kN.

Karakteristike zida se trebaju odrediti vizualnim pregledom i ispitivanjima za svaku konstrukciju, a ovdje su pretpostavljene i njihove vrijednosti prikazane su u tablici 4. Vrijednost  $KL$  predstavlja razinu znanja, a 2 je srednja razina znanja.

Prema izrazu (1) posmična čvrstoća iznosi  $f_v = 0,16 + 0,5 \cdot 1,33 = 0,83$  MPa, ali ne smije biti veća od  $0,065 \cdot 15 = 0,98$  MPa. Prema izrazu (2) nosivost zida na klizanje iznosi  $V_{p,Rd} = 1 / 1,5 \cdot 0,83 \cdot 750 \cdot 300 = 124500$  N = 124,5 kN.

Omjer  $b = h/L$  iznosi 1,5, a prema izrazu (4) dopušteno posmično naprezanje iznosi  $\tau = 0,11 / 1,5 \cdot \sqrt{1 + 0,5 / 0,11} = 0,17$  MPa. Prema izrazu (5) nosivost zida na dijagonalni ravni slom iznosi  $V_{t1,Rd} = 1 / 1,55 \cdot 2000 \cdot 300 \cdot 0,11 / 1,5 \cdot \sqrt{1 + 0,5 / 0,11} = 66848$  N = 66,85 kN.

Prema izrazu (6) nosivost na dijagonalni stepenasti slom iznosi  $V_{t2,Rd} = 1 / 1,55 \cdot 2000 \cdot 300 / 1,5 \cdot [0,16 / (1 + 0,6 \cdot 1,0) + 0,6 \cdot 0,5 / (1 + 0,6 \cdot 1,0)] = 74194$  N = 74,19 kN. Granična vrijednost prema izrazu (7) iznosi  $V_{d,lim} = 1 / 1,55 \cdot 2000 \cdot 300 \cdot 1,5 / (2,3 \cdot 1,5) \cdot \sqrt{1 + 0,5 / 1,5} = 194340$  N = 194,34 kN.

Nosivost na klizanje nepojačanog zida iznosi  $V_{p,Rd} = 124,5$  kN, a nosivost na dijagonalni slom iznosi  $V_{t,Rd} = 66,85$  kN. Vidljivo je da nepojačani zid otkazuje dijagonalnim slomom jer je  $V_{Ed} = 150$  kN >  $V_{Rd} = 66,85$  kN. Potrebno je pojačati zid.

## 5.1. Pojačanje zida FRP-om

U nastavku je dan primjer pojačanja neoštećenog zida predgotovljenim horizontalnim i vertikalnim ugljičnim FRP trakama (lamelama) s obje strane zida kao što je vidljivo na slici 11. Promatrani zid nema otvora. Karakteristike materijala treba definirati proizvođač na temelju ispitivanja, a ovdje su pretpostavljane vrijednosti prikazane u tablici 5.

Tablica 5. Pretpostavljene karakteristike FRP-a u proračunskom primjeru

$E_f$ [MPa]	$t_f$ [cm]	$l_f$ [cm]	$d_f$ [cm]	$\epsilon_{u,f}$ [%]
170000	0,1	10	195	1,6

Osni razmak lamela  $p_f$  određuje se tako da se osigura dostatna nosivost.

Također se pretpostavlja da je srednja vrijednost vertikalne tlačne čvrstoće zida 3,4 MPa. Prema smjernici [43] se može pretpostaviti da je horizontalna tlačna čvrstoća zida  $f_{d,h} = 0,5 \cdot 3,4 = 1,7$  MPa. Maksimalna dopuštena sila (koja uzrokuje gnječenje zida) prema izrazu (19) iznosi  $V_{Rd,max} = 0,3 \cdot 0,17 \cdot 30 \cdot 195 = 298,35$  kN.

### 5.1.1. Proračun pojačanja prema CNR-DT 200/2013 [43]

Pretpostavlja se korekcijski faktor  $k_G = 0,031$  mm, što odgovara perforiranoj opeci. Kako je u primjeru korištena puna opeka, energija loma trebala bi biti nešto veća, ali smjernica [43] ne daje vrijednosti korekcijskog faktora. Također, ta vrijednost se smanjuje na 40 % zbog toga što su korišteni predgotovljeni FRP elementi (lamele), tj.  $k_G = 0,031 \cdot 0,4 = 0,012$  mm. Pretpostavlja se da je obavljen samo detaljan vizualni pregled pa je faktor povjerenja  $FC = 1,35$ . Horizontalne lamele je u ovom primjeru moguće naljepiti tako da su u kontaktu s dvije ili tri opeke. Veći broj opeka znači manju energiju loma i manje dopušteno naprezanje. Radi sigurnosti se pretpostavlja da su lamele u kontaktu s tri opeke po visini. U skladu sa slikom 10,  $b = 3 \cdot 6,5 + 2 \cdot 1,0 = 21,5$  cm, a korekcijski faktor prema izrazu (14) iznosi  $k_b = \sqrt{[(3 \cdot 10 / 21,5) / (1 + 10 / 21,5)]} = 0,98$ . Prema izrazu (13) energija loma iznosi  $\Gamma_{Fk}^- = 0,012 \cdot 0,98 / 1,35 \cdot \sqrt{(15 \cdot 1,5)} = 0,041$  N / mm.

Prema izrazu (15) dopušteno naprezanje iznosi  $f_{fd} = 1 / 1,2 \cdot \sqrt{(2 \cdot 170000 \cdot 0,041 / 1,0)} = 98,39$  MPa.

Pretpostavlja se da je proklizavanje pri slomu 0,3 mm, što bi trebalo biti konzervativno. Dopušteno posmično naprezanje

prema izrazu (12) iznosi  $\tau_{bd} = 2 \cdot 0,041 / 0,3 = 0,27$  MPa. Duljina sidrenja prema izrazu (11) iznosi  $l_e = \max[1 / (1,25 \cdot 0,27) \cdot \sqrt{(\pi^2 \cdot 170000 \cdot 1,0 \cdot 0,041 / 2)}; 150 \text{ mm}] = \max[550; 150] = 550$  mm. Kako je zahtijevana duljina sidrenja kraća od duljine tlačnog područja u kritičnom presjeku (presjek u kojem je duljina tlačnog područja najkraća), smatra se da je osigurana puna duljina sidrenja za sve trake.

Nosivost nepojačanog zida iznosi 124,5 kN, a treba biti 150 kN. To znači da je pojačanjem potrebno ostvariti  $V_{tf} = 150 - 124,5 = 25,5$  kN.

Prema izrazu (17) posmična nosivost FRP pojačanja iznosi  $V_{tf} = 0,6 \cdot 1950 \cdot 2 \cdot 100 \cdot 1,0 \cdot 98,39 / (1,2 \cdot p_f) \geq 25500$  N. Iz toga slijedi da je razmak  $p_f \leq 0,6 \cdot 1950 \cdot 2 \cdot 100 \cdot 1,0 \cdot 98,39 / (1,2 \cdot 25500) = 752$  mm. Odabran je razmak  $p_f = 75$  cm.

Nosivost pojačanja s odabranim razmakom iznosi  $V_{tf} = 0,6 \cdot 1950 \cdot 2 \cdot 100 \cdot 1,0 \cdot 98,39 / (1,2 \cdot 75) = 25581$  N = 25,58 kN.

Konačna nosivost pojačanog zida je  $V_{Rd,CNR} = 124,5 + 25,58 = 150,08$  kN. Povećanje nosivosti zbog pojačanja je u ovom slučaju 21 %.

### 5.1.2. Proračun pojačanja prema ACI 440.2R-02 [44]

Duljina sidrenja jedne trake prema izrazu (23) iznosi  $l_e = 23300 / (2 \cdot 1,0 \cdot 17000)^{0,58} = 54,84$  cm. Koeficijent smanjenja prema izrazu (22) iznosi  $\kappa = (0,5 / 27)^{2/3} \cdot (195 \text{ do } 2 \cdot 54,84) / 195 \cdot 54,84 / (11900 \cdot 0,016) = 0,00882$ . Proračunska relativna deformacija pri otkazivanju prema izrazu (21) iznosi  $\varepsilon_{td} = 0,00882 \cdot 0,016 = 0,000141 < 0,004$ .

Odabere li se jednak razmak traka kao i u primjeru prema [43], posmična nosivost FRP pojačanja prema izrazu (20) iznosi  $V_{tf} = 0,75 \cdot 0,85 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 0,1 \cdot 10 \cdot 195 \cdot 0,000141 \cdot 17000 \cdot (\sin(90^\circ) + \cos(90^\circ)) / 75 = 15,89$  kN.

Konačna nosivost pojačanog zida je  $V_{Rd,ACI} = 124,5 + 15,89 = 140,39$  kN. Povećanje nosivosti zbog pojačanja je u ovom slučaju 13 %.

Kako bi se osigurala zahtijevana nosivost prema [44], potrebno je osigurati razmak  $p_f \leq 0,75 \cdot 0,85 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 0,1 \cdot 10 \cdot 195 \cdot 0,000141 \cdot 17000 \cdot (\sin(90^\circ) + \cos(90^\circ)) / 25,5 = 46,74$  cm. Odabere li se razmak  $p_f = 45,0$  cm, nosivost pojačanja iznosi  $V_{tf} = 26,2$  kN, odnosno ukupna nosivost iznosi  $V_{Rd,ACI} = 124,5 + 26,2 = 150,7$  kN. Povećanje nosivosti zbog pojačanja je u ovom slučaju 21 %.

### 5.1.3. Proračun pojačanja prema fib bulletin 14 [19]

Koeficijent armiranja FRP-om iznosi  $\rho_f = 2 \cdot 1,0 / 30 \cdot 10 / 75 = 0,0089$ . Prema izrazu (25) dopuštena relativna deformacija iznosi  $\varepsilon_{td} = 0,8 \cdot \min[0,65 \cdot (3,4^{2/3} / (170000 \cdot 0,0089))^{0,56} \cdot 10^{-3}; 0,17 \cdot (3,4^{2/3} / (170000 \cdot 0,0089))^{0,3} \cdot 0,016] = 0,8 \cdot \min[0,000017; 0,000386] = 0,8 \cdot 0,000017 = 0,0000136$ . Prema izrazu (24) posmična nosivost FRP pojačanja iznosi  $V_{tf} = 0,9 \cdot 0,0000136 \cdot 170000 \cdot 0,0089 \cdot 300 \cdot 1950 \cdot (\sin(90^\circ) + \cos(90^\circ)) = 10834$  N = 10,83 kN.

Konačna nosivost pojačanog zida je  $V_{Rd,FIB} = 124,5 + 10,83 = 135,33$  kN. Povećanje nosivosti zbog pojačanja je u ovom slučaju 9 %.

Najmanji mogući osni razmak lamela je 10 cm, za koji prema [19] ukupna nosivost iznosi  $V_{Rd,FIB} = 157,48$  kN što je veće od 150 kN.

### 5.1.4. Usporedba rezultata proračuna

Usporedbom rezultata proračuna prema pojedinim smjernicama vidljivo je da je najveći doprinos pojačanja dobiven smjernicom CNR-DT 200/2013 [43], a najmanji prema fib bulletinu 14 [19]. Međutim, smjernice [19] i ACI 440.2R-02 [44] su primarno namijenjene za proračun pojačanja betonskih konstrukcija. Također, smjernica [43] je najdetaljnija, a proračun prema njoj je nešto kompliciraniji. Stoga je očekivano da ta smjernica daje najveće povećanje nosivosti, dok su preostale smjernice konzervativnije.

## 5.2. Pojačanje zida TRM-om

U nastavku je dan primjer pojačanja neoštećenog zida TRM-om postavljenim po cijeloj visini s obje strane zida kao što je vidljivo na slici 13. U primjeru su korištene ugljične mreže, a pretpostavlja se da je zid vanjski (uvjeti okoliša nisu agresivni). Promatrani zid nema otvora. Karakteristike materijala treba definirati proizvođač na temelju ispitivanja, a ovdje su pretpostavljane vrijednosti prikazane u tablici 6.

Tablica 6. Pretpostavljene karakteristike TRM-a u proračunskom primjeru

$E_f$ [MPa]	$t_f$ [cm]	$d_f$ [cm]	$\varepsilon_{fk}$ [%]
170000	0,0048	195	0,65

Ukupni broj mreža  $n_f$  odredit će se tako da se osigura dostatna nosivost.

Maksimalna dopuštena sila (koja uzrokuje gnječenje zida) prema izrazu (27) iznosi  $V_{Rd,max} = 0,25 \cdot 0,34 \cdot 30 \cdot 195 = 497,25$  kN.

### 5.2.1. Proračun pojačanja prema CNR-DT 215/2018 [45]

Faktor izloženosti za ugljična vlakna iznosi 0,95 za unutarnji i 0,85 za vanjski sloj. U proračun se uzima srednja vrijednost 0,9. Dopuštena proračunska relativna deformacija  $\varepsilon_{td}$  prema izrazu (9) iznosi  $\varepsilon_d = 0,9 \cdot 0,0065 / 1,5 = 0,0039$ . Kako je  $L < h$ , onda je  $l_f = L = 200$  cm.

Za jednu mrežu na svakom licu zida prema izrazu (26) posmična nosivost TRM pojačanja iznosi  $V_{tf} = 1 / 2 \cdot 2 \cdot 0,048 \cdot 2000 \cdot 0,8 \cdot 0,0039 \cdot 170000 = 50918$  N = 50,92 kN.

Konačna nosivost pojačanog zida je  $V_{Rd,CNR} = 66,85 + 50,92 = 117,77$  kN. Povećanje nosivosti zbog pojačanja je u ovom slučaju 76 %.

Za dva sloja mreže na svakom licu zida prema izrazu (26) posmična nosivost TRM pojačanja iznosi  $V_{tf} = 1 / 2 \cdot 4 \cdot 0,048 \cdot 2000 \cdot 0,8 \cdot 0,0039 \cdot 170000 = 101837$  N = 101,84 kN.

Konačna nosivost pojačanog zida je  $V_{Rd,CNR} = 66,85 + 101,84 = 168,69$  kN. Povećanje nosivosti zbog pojačanja je u ovom slučaju 152 %.

Međutim, prema [25] učinak dvaju ili više slojeva se značajno smanjuje pa je upitno koliko je dvostruko povećanje nosivosti opravdano.

Iz tog razloga se u ovom primjeru čini prikladnije odabrati pojačanje FRP-om.

### 5.2.2. Proračun pojačanja prema ACI 549.4R-13 [46]

Kako je dopuštena relativna deformacija veća od 0,4 %, u proračun se uzima vrijednost  $\varepsilon_{fd} = 0,004$ . Za jednu mrežu na svakom licu zida prema izrazu (28) posmična nosivost TRM pojačanja iznosi  $V_{tf} = 2 \cdot 1 \cdot 0,048 \cdot 2000 \cdot 0,004 \cdot 170000 = 130560$  N = 130,56 kN.

Konačna nosivost pojačanog zida je  $V_{Rd,CNR} = 0,75 \cdot (66,85 + 130,56) = 148,06$  kN. Povećanje nosivosti zbog pojačanja je u ovom slučaju 121 %. Prema ovoj normi, nosivost na posmik također nije zadovoljena postavljanjem jednog sloja TRM-a na svakom licu zida pa je potrebno postaviti dva sloja.

### 5.2.3. Usporedba rezultata proračuna

Usporedbom rezultata proračuna vidljivo je da je veći doprinos pojačanja dobiven normom ACI 549.4R-13 [46]. Osnovna razlika u proračunu prema pojedinoj smjernici je način proračuna dopuštene relativne deformacije. U slučaju da je ona značajno veća od 0,4 %, smjernica CNR-DT 215/2018 [45] bi davala veće vrijednosti nosivosti od norme [46]. U smjernici [45] je predviđeno više parcijalnih koeficijenata sigurnosti, dok norma [46] predviđa globalni koeficijent koji dodatno smanjenje nepojačane komponente nosivosti zida. Zbog toga se smjernica [45] čini prikladnijom za korištenje u kombinaciji s normom EN 1998-3 [34].

## 6. Zaključak

Nearmirano neomeđeno zide je vrlo osjetljivo na bočna djelovanja. Osnovni oblici sloma su uzrokovani savijanjem ili

češće posmikom. Tri su osnovna načina sloma posmikom: klizanje, prekoračenje dijagonalnih vlačnih naprezanja ili stepenasti dijagonalni slom, a koji će prevladati ovisi o veličini vertikalnog pritiska, tipologiji zida te kvaliteti materijala. Kako bi se povećala nosivost na posmik, moguće je pojačati zide metalnom ili nemetalnom armaturom. Oba načina imaju određene prednosti, ali i nedostatke. Prije pojačanja je važno prepoznati moguće oblike sloma te ovisno o geometriji zida i lokalnim uvjetima građevine odrediti raspored pojačanja. Nemetalna armatura se može sa zidom povezati epoksidnim ljepilom (FRP) ili mortom (TRM). U radu su prikazane zasada raspoložive smjernice i pravilnici za određivanje posmične nosivosti u ravnini zida prije i nakon pojačanja. Za obje vrste pojačanja (i FRP i TRM) gubitak je prijanjanja primarni oblik sloma, a vrijednosti relativne deformacije pri otkazivanju bi trebao dati proizvođač na temelju ispitivanja. Izrazi za proračun nosivosti ovisе o rasporedu pojačanja, a sastoje se od komponente nosivosti zida i komponente pojačanja. Komponenta nosivosti zida ovisi o stanju zida prije pojačanja te se za oštećeno zide ne bi trebala uzeti s punom vrijednosti, ali norme ne daju točne smjernice. Iako se za jednostrano pojačanje TRM-om zahtijevaju sidra, za ostale oblike pojačanja nema preporuke o razmaku sidara. Preporučeni razmak sidara međutim ne osigurava stabilnost pojačanja pa smjernice ne daju uputu o eventualnoj promjeni duktilnosti sustava. Pretpostavlja se da je samo povećana nosivost elemenata, a duktilnost i krutost ostaju nepromijenjene. Prikazanim smjernicama se na relativno jednostavan način može odrediti nosivost pojačanog zida FRP-om ili TRM-om, što je prikazano primjerom u radu. Od prikazanih smjernica i normi najprikladnijima za korištenje u Hrvatskoj se čine smjernice CNR (i za FRP i za TRM) zbog detaljnosti, dobre kompatibilnosti s normom EN 1998-3 te zbog slične tipologije zida u Hrvatskoj i Italiji.

## Zahvala

Dio ovog istraživanja financiran je sredstvima Hrvatske zaklade za znanost, projekt ARES: Procjena stanja i obnova postojećih građevina - Razvoj suvremenih metoda za zidane i drvene konstrukcije (UIP-2019-04-3749). Autori zahvaljuju na potpori.

## LITERATURA

- [1] Simović, V.: Potresi na zagrebačkom području, Građevinar, 52 (2000) 11, pp. 637–645.
- [2] Kuk, V., Prelogovi, E., Sovi, I., Kuk, K., Šariri, K.: Seizmološke i seizmotektonske značajke šireg zagrebačkog područja, Građevinar, 52 (2000) 11, pp. 647–653.
- [3] Stepinac, M., Kišiček, T., Renić, T., Hafner, I., Bedon, C.: Methods for the assessment of critical properties in existing masonry structures under seismic loads-the ARES project, Applied Sciences (Switzerland), 10 (2020) 5.
- [4] Atalić, J., Šavor Novak, M., Uroš, M.: Rizik od potresa za Hrvatsku: pregled istraživanja i postojećih procjena sa smjernicama za budućnost, Građevinar, 71 (2019) 10, pp. 923–947.
- [5] Stepinac, M., Rajčić, V., Žarnić, R.: Timber-structural glass composite systems in earthquake environment, Gradjevinar 68 (2016) 3, pp. 211–219.
- [6] Beeson, S., Kubin, J., Unav, A.I.: Potresna osjetljivost povijesnih zidanih konstrukcija nepravilne geometrije, Gradjevinar 67 (2015) 2, pp. 151–158.

- [7] Sorić, Z.: Zidane konstrukcije, Zagreb, 2016.
- [8] Tomažević, M.: Protupotresna obnova postojećih zidanih građevina, *Građevinar*, 52 (2000) 11, pp. 683–693.
- [9] Bhattacharya, S., Nayak, S., Dutta, S.C.: A critical review of retrofitting methods for unreinforced masonry structures, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 7 (2014), pp. 51–67.
- [10] Sorić, Z., Kišiček, T., Galić, J.: "Deflections Of Concrete Beams Reinforced With FRP Bars", *Materials and Structures* (2010) 43:73–90, Springer Netherlands, DOI 10.1617/s11527-010-9600-1.
- [11] Zoghi, M. (ur.): *The International Handbook of FRP Composites in Civil Engineering*, CRC Press, Boca Raton, 2013.
- [12] Bakis, C.E., Bank, L.C., Brown, V.L., Cosenza, E., Davalos, J.F., Lesko, J.J., Machida, A., Rizkalla, S.H., Triantafillou, T.C.: *Fiber-reinforced polymer composites for construction - State-of-the-art review*, *Journal of Composites for Construction*, 6 (2002) 2, pp. 73–87.
- [13] Sika Group, [www.sika.com/en/construction/structural-strengthening/fiber-reinforced-polymer-fabrics.html](http://www.sika.com/en/construction/structural-strengthening/fiber-reinforced-polymer-fabrics.html), 25.05.2020.
- [14] Calabrese, A.S., D'Antino, T., Poggi, C., Colombi, P., Fava, G., Pisani, M.A.: *Application of Externally Bonded Inorganic-Matrix Composites to Existing Masonry Structures*, Springer International Publishing, pp. 283–292, 2020.
- [15] Benmokrane, B., Ali, A.H.: *Durability and Long-Term Performance of Fiber-Reinforced Polymer as a New Civil Engineering Material*, *International Congress on Polymers in Concrete (ICPIC 2018)*, New Mexico, pp. 49–59, 2018.
- [16] Yu, F., Li, Z., Yuan, F., Zhu, D., Kong, Z.: Mehanička svojstva spoja betonskog stupa oviženog PVC-CFRP-om i AB grede pri osnom opterećenju, *Građevinar*, 72 (2020) 2, pp. 151–164.
- [17] Carić, M., Kišiček, T.: Pojačanja nearmiranog ziđa tkaninom armiranim mortovima (TRM) na posmik, *Simpozij doktorskog studija Građevinarstva 2017*, Zagreb, pp. 49–59, 2017.
- [18] Risan, H.K., Harba, I.S.I., Abdulridha, A.J.: Numerička analiza ab zida s otvorom ojačanim CFRP-om podvrgnutim ekscentričnim opterećenjima, *Gradjevinar*, 69 (2017) 7, pp. 573–580.
- [19] fib bulletin 14 – Externally bonded FRP reinforcement for strengthening RC structures, fib: Lausanne, Switzerland, 2004.
- [20] Sorić, Z., Kišiček, T.: BETONSKE KONSTRUKCIJE 3. Projektiranje betonskih konstrukcija prema europskim normama EN. Skripta Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu
- [21] Caggegi, C., Lanoye, E., Djama, K., Bassil, A., Gabor, A.: Tensile behaviour of a basalt TRM strengthening system: Influence of mortar and reinforcing textile ratios, *Composites Part B: Engineering*, 130 (2017), pp. 90–102.
- [22] Misseri, G., Rovero, L., Stipo, G., Barducci, S., Alecci, V., De Stefano, M.: Experimental and analytical investigations on sustainable and innovative strengthening systems for masonry arches, *Composite Structures*, 210 (2019), pp. 526–537.
- [23] Kišiček, T., Carić, M.: Pojačanja armiranobetonskih konstrukcija pomoću tkaninom armiranih mortova, 1<sup>st</sup> International Conference on Construction Materials for Sustainable Future, Zagreb, pp. 754–761, 2017.
- [24] Kouris, L.A.S., Triantafillou, T.C.: State-of-the-art on strengthening of masonry structures with textile reinforced mortar (TRM), *Construction and Building Materials*, 188 (2018), pp. 1221–1233.
- [25] Ferrara, G., Caggegi, C., Gabor, A., Martinelli, E.: Experimental Study on the Adhesion of Basalt Textile Reinforced Mortars (TRM) to Clay Brick Masonry: The Influence of Textile Density, *Fibers*, 7 (2019) 12, pp. 103.
- [26] De Felice, G., De Santis, S., Roscini, F.: *Seismic Retrofitting of Cultural Heritage with Textile Reinforced Mortar*, *State of the Art, COST Action TU1207 Next Generation Design Guidelines for Composites in Construction*, 2017.
- [27] AC 434 – Acceptance Criteria for Masonry and Concrete Strengthening Using Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composite Systems, ICC-ES: California, USA, 2011.
- [28] Al-Lami, K., D'Antino, T., Colombi, P.: Durability of fabric-reinforced cementitious matrix (FRCM) composites: A review, *Applied Sciences (Switzerland)*, 10 (2020) 5.
- [29] Gopinath, S., Madheswaran, C.K., Prabhakar, J., Thivya Devi, K.G., Lakshmi Anuhya, C.: Strengthening of Unreinforced Brick Masonry Panel Using Cast-in-Place and Precast Textile-Reinforced Concrete, *Journal of Earthquake Engineering*, (2020), pp. 1–19.
- [30] Bisby, P.L., Stratford, T., Hart, C., Farren, S.: Fire performance of well-anchored TRM, FRCM and FRP flexural strengthening systems, *Advanced Composites in Construction (ACIC 2013) - Conference Proceedings*, Belfast, pp. 98–109, 2013.
- [31] Türkmen, S., De Vries, B.T., Wijte, S.N.M., Vermeltfoort, A.T.: Türkmen, S., De Vries, B.T., Wijte, S.N.M., Vermeltfoort, A.T.: In-plane behaviour of clay brick masonry wallettes retrofitted with single-sided fabric-reinforced cementitious matrix and deep mounted carbon fibre strips, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18 (2020) 2, pp. 725–765.
- [32] Lušo, R., Kišiček, T.: Sidrenje tkaninom armiranih mortova (TRM) i vlaknima armiranih polimera (FRP) pri pojačavanju armiranobetonskih i zidanih elemenata konstrukcija, *Simpozij doktorskog studija Građevinarstva 2018*, Zagreb, pp. 149–159, 2018.
- [33] Ghiassi, B., Milani, G. (Ur.): *Numerical modeling of masonry and historical structures from theory to application*, Woodhead Publishing Limited, Duxford, UK, 2019.
- [34] EN 1998-3-Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance-Part 3: Assessment and Retrofitting of Buildings; CEN: Brussels, Belgium, 2004.
- [35] HRN EN 1996-1-1:2012-Eurokod 6: Projektiranje zidanih konstrukcija-Dio 1-1: Opća pravila za zgrade. Pravila za armirane i nearmirane zidane konstrukcije (EN 1996-1-1:2005); CEN: Brussels, Belgija, 2005.
- [36] Turnšek, V., Čačovič, F.: Some experimental results on the strength of brickmasonry walls, *Proc 2<sup>nd</sup> Int Brick & Block Masonry Conference*, Stoke-on-Trent; pp. 149–56, 1971.
- [37] Tomažević, M.: Shear resistance of masonry walls and Eurocode 6: Shear versus tensile strength of masonry, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 42 (2009) 7, pp. 889–907.
- [38] Mann, W., Müller, H.: Failure of shear-stressed masonry - an enlarged theory, tests and application to shear walls, *Proc. int. symposium on load-bearing brickwork*, 1980, pp. 1–13.
- [39] Magenes, G., Calvi, G.M.: In-Plane Seismic Response of Brick Masonry Walls, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26 (1997), pp. 1091–1112.
- [40] Lagomarsino, S., Penna, A., Galasco, A., Cattari, S.: TREMURI program: An equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings, *Engineering Structures*, 56 (2013), pp. 1787–1799.



- [41] Kržan, M., Gostič, S., Cattari, S., Bosiljkov, V.: Acquiring reference parameters of masonry for the structural performance analysis of historical buildings, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13 (2015) 1, pp. 203–236.
- [42] Bonati, A., Franco, A., Coppola, O., De Luca, G.: Strengthening of Masonry Structures: Current National and International Approaches for Qualification and Design, *Key Engineering Materials*, 817 (2019), pp. 501–506.
- [43] CNR-DT 200 R1/2013 – Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for strengthening Existing Structures, CNR.: Rome, Italy, 2013.
- [44] ACI 440.2R-02 – Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, ACI: USA, 2002.
- [45] CNR-DT 215/2018 – Guide for the Design and Construction of Externally Bonded Fibre Reinforced Inorganic Matrix Systems for strengthening Existing Structures, CNR.: Rome, Italy, 2018.
- [46] ACI 549.4R-13 – Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Systems for Repair and Strengthening Concrete and Masonry Structures, ACI: MI, USA, 2013.
- [47] Simonič, M.J., Bosiljkov, V., Žarnić, R.: Ispitivanje i analiza nosivosti na posmik zidova ojačanih s FRP-om, *Građevinar*, 66 (2014) 6, pp. 533–548.
- [48] NTC08 – Supplemento ordinario alla “Gazzetta Ufficiale” n. 35 del 11 febbraio 2019 - Serie generale n. 7 C.S.LL.PP., Ministero delle infrastrutture e dei trasporti, Rome, Italy, 2019.
- [49] Gams, M., Tomažević, M., Berset, T.: Seismic strengthening of brick masonry by composite coatings: an experimental study, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15 (2017), pp. 4269–4298.
- [50] Ascione, L., Carozzi, F.G., D’Antino, T., Poggi, C.: New Italian guidelines for design of externally bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) systems for repair and strengthening of masonry and concrete structures, *Procedia Structural Integrity*, 11 (2018), pp. 202–209.