

# PROTIPOTRESNE UTRDITVE ZIDANIH KONSTRUKCIJ S CFRP KOMPOZITI

dr. Samo Gostič, univ.dipl.inž.grad., Gradbeni inštitut ZRMK d.o.o

Andraž Mezgec, univ.dipl.inž.grad., Gradbeni inštitut ZRMK d.o.o

izr.prof.dr. Roko Žarnić, univ.dipl.inž.grad.,

Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij

## 0.1 Uvod

Na svetu se vsako leto tla stresejo, z magnitudo večjo od 6, povprečno 152 krat. Mnogo teh potresov ne prizadene poseljenih območij, kjer bi lahko povzročili materialno škodo in zahtevali človeška življenja. Večina potresov se zgodi na območju dveh potresno najdejavnejših pasov (obtihoceanski in sredozemsko-himalajski pas). Slovenija v potresni ogroženosti ni izjema, saj je bilo v zadnjem stoletju vsaj 10 potresov, ki so povzročili gmotno škodo. Kot zadnji in hkrati tudi eden najmočnejših potresov 20. stoletja, z žariščem na ozemlju Slovenije, je bil potres v Posočju (1998).

Izkušnje, pridobljene iz zadnjih potresov (ZDA 1994, Japonska 1995, Turčija 1999), so pokazale, da je porušitev potresno neodpornih zidov eden glavnih vzrokov za nastanek materialne škode in izgube človeških življenj v potresih. Takšni zidovi so izredno krhki in predstavljajo veliko nevarnost med potresom. Pogoste so porušitve polnil v okvirjih, krhke strižne porušitve medokenskih slopov, izpad nepovezanih zidov, itd.

Tipičen primer stanovanjske zgradbe v Sloveniji je večetažna nearmirana zidana konstrukcija, zgrajena v obdobju med letoma 1920 in 1965. Takšnih naj bi bilo kar 30% celotnega stanovanjskega fonda (leta 1963 je potres v Skopju povzročil resne poškodbe in celo porušitve takšnega tipa stanovanjske zgradbe). Če k temu prištejmo še ostale zidane stavbe iz različnih obdobj, kamor spada tudi večina stavb kulturne dediščine, se omenjeni delež nearmiranih zidanih konstrukcij precej poveča. Danes se tega problema vedno bolj zavedamo in vedno več pozornosti namenjamo preverjanju potresne odpornosti starih stavb in raziskovanju metod in tehnologij potresnih utrditev. Sanacije potresno neodpornih stavb se v praksi izvajajo že kar nekaj časa, kot relativno nova pa se počasi uveljavlja sanacija s t.i. CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) kompoziti.

## 0.2 Primerjava s tradicionalnimi metodami utrditve

Tradicionalnih metod protipotresne utrditve, ki se danes uporabljajo v primeru zidanih stavb, je več. Pri sprejemanju odločitve za metodo utrditve konstrukcije moramo upoštevati več dejavnikov. V prvi vrsti moramo izbrati metodo, s katero bomo dosegli, da bo obnašanje stavbe med potresom ustrezalo predpisom in bo s tem zagotovljena varnost ljudi in lastnine. Pogosto moramo, na eni strani, upoštevati konservatorske in restavratorske zahteve po ohranitvi izgleda stavbe, kakor tudi ohranitvi prvotnega materiala. Trg pa nam, po drugi strani, postavlja zahteve po čim

cenejši metodi. S tem seveda nimamo v mislih zgolj direktnih stroškov sanacije, kot so stroški materiala, dela in opreme, ampak tudi indirektno stroške, ki so težje izmerljivi. Časovno dolgotrajna sanacija pomeni motnjo za stanovalce in njihovo dejavnost, določene metode pomenijo zmanjšanje ali spreminjanje tlorisa stavbe, spet druge metode pomenijo tako velike konstrukcijske posege, da jih je praktično nemogoče izvesti "stanovalcem prijazno". Tradicionalne metode utrditve objektov, ki se uporabljajo danes, so:

- *Zamenjava malte v fugah.* Takšna utrditev je zelo zamudna, pomeni tudi visoke stroške dela, saj je skorajda celotno delo potrebno opraviti ročno. Za stanovalce pomeni veliko motnjo.
- *Izdelava armiranobetonskega ometa nosilnih zidov.* Zaradi velike spremembe v togosti celotne stavbe in mase konstrukcije, moramo utrditi celotno konstrukcijo. Nosilnost moramo povečati vsem konstrukcijskim elementom vse do temeljev. Tako ne moremo sanirati samo dela konstrukcije, ki sanacijo zares potrebuje. Način utrditve stavbe z izdelavo AB ometov ni primeren za spomeniško zaščitene objekte, saj se izgled stavbe popolnoma spremeni. Z betonskimi oblogami tudi spremenimo klimatske razmere v stavbi.
- *Dozidava in prezidava zidov* je primerna predvsem pri kamnitih zgradbah, kjer pogosto pride do izbočitve zidov in močnih poškodb na vogalih. Določene zidove popolnoma ali deloma porušimo in nato zgradimo nove zidove. Tovrstni posegi so lahko dokaj dragi in jih zato uporabimo le kadar menimo, da so tudi ekonomsko upravičeni.
- *Zamenjava dotrajanih lesenih stropov z armiranobetonskimi ploščami* ali izvedba utrditvenega AB estriha na obstoječih lesenih stropovih. V tem primeru dosežemo dobro protipotresno povezavo zidov. Pri izvedbi utrditvenega AB estriha je potrebno preveriti nosilnost nosilnih tramov. V primeru, da so leseni stropovi poddimenzionirani ali dotrajani, moramo izvesti novo samonosilno AB ploščo.
- *Povezovanje zidov z jeklenimi vezmi* v višini stropov. S takšnimi vezmi nadomestimo togo medetažno konstrukcijo in zagotovimo, da konstrukcija med potresom deluje kot celota.

Prav zaradi navedenih slabosti tradicionalnih načinov utrditve se raziskujejo možnosti utrditve z novodobnimi kompozitnimi materiali. Najpomembnejša prednosti sanacije s FRP materiali so nižji stroški. Dela je manj, zahtevne mehanizacije ne potrebujemo. V času sanacije je mogoča uporaba stavbe, v primerih, ko se sanacija izvaja samo na eni strani zidu, je lahko uporaba celo nemotena. S pravilno izbiro FRP materiala lahko dosežemo različne odpornosti utrditve (požarno, alkalno, korozijsko,...). Običajni sistemi FRP utrditev nam tudi ne spreminjajo površine in oblike bivalnega prostora. Nezanemarljivo dejstvo pa je tudi, da se dinamične lastnosti konstrukcije skoraj ne spremenijo. Tovrstni utrditveni posegi le malo spremenijo togost, k masi celotne

konstrukcije pa ne prinesejo veliko. Ker se dinamične lastnosti konstrukcije ne spremenijo, dodatni ukrepi zaradi utrditve zidov, tako niso potrebni.

### 0.3 Kaj so kompoziti?

Kompoziti so materiali, ki so sestavljeni iz dveh ali več komponent. Lahko jih sestavljamo v različne vrste sklopov, pri katerih se lastnosti posameznih komponent optimalno izkoriščajo. Kompozit projektantu omogoča tudi načrtovanje njegovih lastnosti. To pomeni, da se lahko izdelata material, ki bo imel na različnih delih različne lastnosti (glede na predvidene obremenitve in izpostavljenost). Lastnosti kompozitnega materiala se razlikujejo od lastnosti posameznih materialov, ki ga tvorijo. Značilnost kompozitov je, da njihove lastnosti presegajo lastnosti osnovnih materialov zaradi njihovega medsebojnega vpliva v novonastalem materialu. V praksi je večina kompozitov sestavljena iz osnovnega materiala (*matrice*) in armature (*utrditveni material*), ki poveča trdnost in togost. V gradbeni praksi se kot matrica najpogosteje uporablja epoksidna smola, kot armaturna vlakna pa E-steklo in karbonska vlakna.

#### 0.3.1 E-steklo

E-steklo se pridobiva iz talilne zmesi kremenčevega peska, kaolina, apnenca in kolemanita pri 1600°C. Talina se vleče skozi tenke šobe in se hkrati tudi hladi. Tako dobimo vlakna, ki jih lahko stkemo v tkanino. Vlakna ali tkanine se velikokrat impregnira z matrico še preden se začne z izdelavo natančno določenega kompozitnega izdelka. Impregirana vlakna ali tkanine imenujejo *pregreg*. Oznaka E pomeni, da so vlakna srednje alkalno odporna. Z oznako A označujemo stekla občutljiva za alkalno korozijo, z oznako C pa stekla z visoko alkalno odpornostjo. Na trgu so tudi R, S in T stekla, ki pa so zgolj komercialna imena različnih proizvajalcev, pomenijo pa stekla z višjo natezno trdnostjo in višjim modulom elastičnosti, kakor E-stekla.

#### 0.3.2 Aramid

Aramid je sintetizirani polimer iz katerega se izdelujejo vlakna z različnimi komercialnimi imeni (Twaron®, Kevlar®). Imajo *veliko specifično trdnost in odpornost proti udarnim obremenitvam*. Tlačna trdnost je podobna tlačni trdnosti E-steklenih vlaken. *Odporna so proti toplotnim obremenitvam, propadanju zaradi kemičnih in toplotnih vplivov*, manj pa so odporna proti UV žarkom. Aramidna vlakna so primerna za armiranje kompozitov, ki so izpostavljeni udarni obremenitvi. Taki kompoziti imajo sposobnost absorpcije in disipacije energije, hkrati pa imajo tudi visoko obrabno odpornost.

#### 0.3.3 Ogljik

Ogljikova vlakna se proizvajajo s kontrolirano oksidacijo, karbonizacijo in grafitizacijo organskih snovi, ki so bogate z ogljikom. Najbolj kakovostna vlakna se pridobivajo iz poliakrilonitrila (PAN), manj kakovostna pa tudi iz katranov, bitumnov in celuloze. Z variiranjem procesa grafitizacije se pridobijo vlakna visoke trdnosti ali vlakna

visokega modula elastičnosti. V primerjavi z ostalimi vrstami vlaken imajo ogljikova vlakna *visoko trdnost* in izjemno *visok modul elastičnosti*, *korozijsko odpornost*, *odpornost proti lezenju* in *utrujanju* ter razmeroma *nizko udarno trdnost*. Uporabljajo se za izdelavo kompozitov visoke trdnosti in togosti.

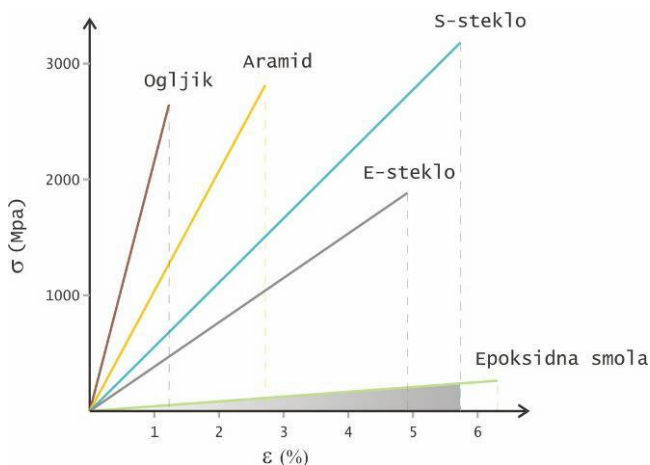
Tabela 1: Primerjava lastnosti armaturnih vlaken

Material	Natezna trdnost (MPa)	Modul elastičnosti (GPa)	Gostota (g/cm <sup>3</sup> )
Ogljik HS	3500	160 - 270	1.8
Ogljik IM	5300	270 - 325	1.8
Ogljik HM	3500	325	1.8
Ogljik UHM	2000	440 +	2
Aramid LM	3600	60	1.45
Aramid HM	3100	120	1.45
Aramid UHM	3400	180	1.47
E-Steklo	2400	69	2.5
S-Steklo	3450	86	2.5
Aluminijeve zl.	400	69	2.7
Titan	950	110	4.5
Jeklo	450	205	7.8
Jeklo (nerjaveče)	800	195	7.8
Jeklo VT	1240	197	7.8

**HS** ... High Strength, **LM** ... Low Modulus, **IM** ... Intermediate Modulus, **HM** ... High Modulus, **UHM** ... Ultra High Modulus

#### 0.3.4 Epoksidna matrica

Epoksidne smole so ene izmed najboljših matric. Med preparacijo se malo krčijo in imajo zelo dobro sprijemnost z vlakni. Njihove lastnosti se lahko načrtno prilagodijo zahtevam, tako da se dosežejo želene mehanske lastnosti, žilavost, odpornost proti agresivnosti okolja in trajnost ob dostopni ceni, kar je predvsem pomembno v gradbeništvu. Z ustrezno formulacijo se lahko uporabijo tam, kjer je potrebna odpornost proti udarcem in odpornost proti vročim in vlažnim okoljem.



Slika 1: Diagram  $\sigma$ - $\epsilon$  armaturnih vlaken in matrice v nategu

### 0.3.5 FRP kompoziti

Kompozitni material dobimo s sestavljanjem armaturnih vlaken in matrice. Končni izdelek dobimo s pomočjo nege ("curing") v katerem matrica spremeni agregatno stanje iz tekočega v trdno. Procesi nege so lahko različni. Tako lahko potekajo določeno časovno obdobje pri normalnih pogojih, lahko pa se v procesu spreminja temperaturni režim, tlak in čas trajanja. V primeru gradbenih sanacij lahko nego izvedemo predhodno - na gradbišču nalepimo že pripravljeno kompozitno lamelo, ali pa zalitje vlaken z matrico izvedemo na gradbišču samem. Za lažjo predstavitev si lahko predstavljamo analogijo z betoniranjem na gradbišču in s prefabriciranimi betonskimi elementi, ki jih na gradbišču samo sestavimo.

### 0.4 Načini utrditve s FRP kompoziti

Načinov utrditve s FRP-ji je več. V primeru utrditve zidov se lahko odločimo za enosmerne ali dvosmerne trakove, ki jih lahko na več načinov nalepimo na zid. Za diagonalno utrditev uporabljamo širše trakove. Tanjše trakove uporabljamo za vertikalno, horizontalno ali kombinirano utrditev. Lahko uporabimo tudi večje površine tkanin (predvsem pri sanacijah zidanih obokov). Potrebno pa se je zavedati, da s prekrivanjem večjih površin zmanjšujemo paropropustnost saniranega elementa. V zadnjem času pa se pojavlja tudi ideja o uporabi FRP armaturnih palic, ki se jih vgradi v spojnice. Pomembno je dodati, da se v svetu izvaja veliko raziskav, prav s področja načinov utrditev s FRP-ji. Proučujejo se različni materiali, različne količine utrditvene armature, išče se idealna razporeditev armature glede na pričakovano obremenitev,... Prav zaradi velikega števila neznank, ki spremljajo zapleteno obnašanje zidu med potresno obremenitvijo, veliko opisanih metod še ni doživelo uporabe pri utrditvi zidanih konstrukcij. V praksi se največ uporabljajo utrditve iz steklenih in ogljikovih vlaken (npr. Carboniar®, Carbodur®, ...), nekoliko manj pa tudi iz aramidnih vlaken. Predvsem so se utrditve s FRP-ji uveljavile pri sanacijah mostov in betonskih konstrukcijskih elementov v stavbah, kjer primanjkljaj natezne ali strižne armature nadomestimo z dolepljanjem lamel na zunanjo stran elementa. Predvsem so v uporabi kompozitne lamele, ki se jih zgolj nalepi na konstrukcijo. Kot dosti boljši pa so se izkazali načini utrditve s tkanino, kjer nego izvajamo na gradbišču. V tem

primeru je postopek nekoliko zahtevnejši kot v primeru uporabe prefabriciranih lamel. V vsakem primeru je najprej potrebno poskrbeti za primerno pripravo površine. Morebitne neravnine moramo zgladiti, ostre robove zaobliti (radij zaokroženosti naj znaša vsaj 30 cm), iz opeke pa je potrebno odstraniti glazuro. Za to je najprimernejša uporaba peskanja ali brušenja (navadno kombinacija obojega). Pred nanosom impregnacije oz. lepila je potrebno s površine odstraniti prah, ki se je nabral pri pripravi površine. Tehnologija nanosov lepila in traku mora biti usklajena z ustreznim negovanjem, saj s tem zagotovimo popolno obdanost vlaken z epoksidno matrico.



(a)



(b)

Slika 2: (a),(b) Priprava površine



(a)



(b)

Slika 3: (a) Polaganje traku, (b) nanos končnega premaza

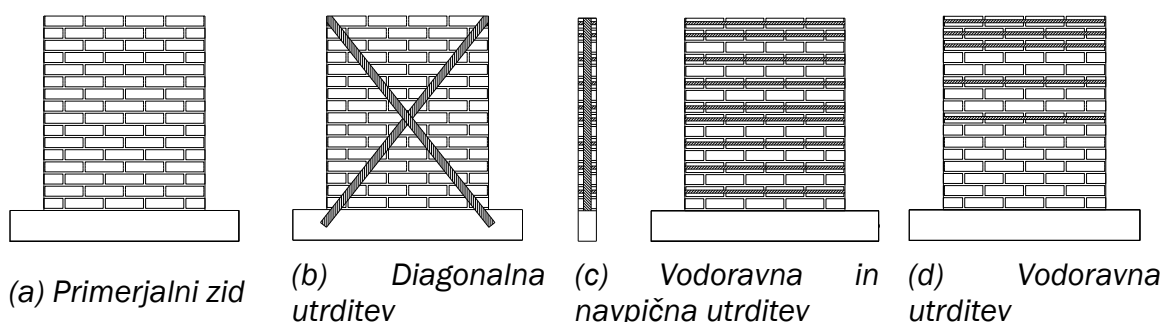
Tako sanirana površina zagotavlja boljšo sprijemnost med zidom in FRP materiali. Pri tkaninah, za razliko od lamel, do odlepljanja v območju konic napetosti ne prihaja, kar nam zagotavlja višjo duktilnost. Porušitev konstrukcijskega elementa v tem primeru ni krhka, saj se vlakna trgajo postopoma.

### 0.5 Lastne preiskave

V okviru raziskovalnega projekta, ki ga je financiralo Ministrstvo za šolstvo, znanost in šport, smo opravili študijo učinkovitosti naprednih metod za sanacijo zidanih stavb. Z eksperimentalnimi preiskavami smo uspeli določiti učinkovitost sanacijske metode z

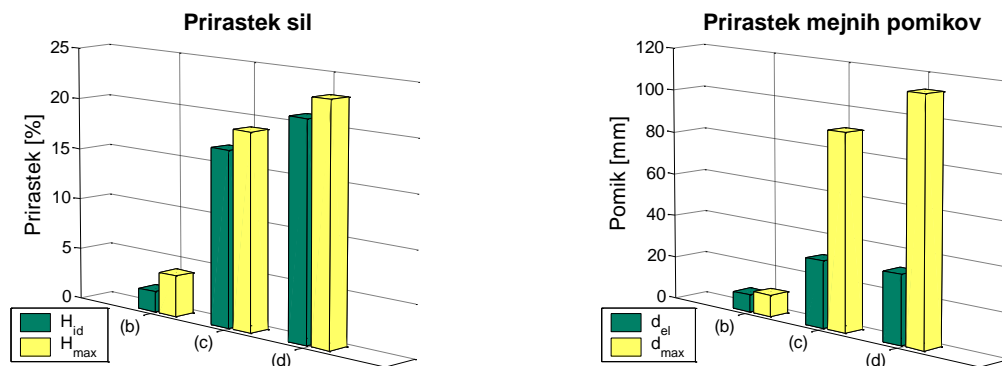
doleplanjem trakov iz ogljikovih vlaken na povečanje strižne nosilnosti medokenskih slopov. V konstrukcijskem laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani smo opravili strižne preiskave sedemnajstih zidov utrjenih z ogljikovimi vlakni. Izbrali smo tri različne razporeditve trakov. Prvi način utrditve je z diagonalno nalepljenimi trakovi Carboniar® širine 5 cm. V drugem primeru smo uporabili dve vrsti trakov. S trakovi širine 5 cm smo utrdili zidove ob straneh, s trakovi širine 1 cm pa smo zidove utrdili vodoravno. Pri tretjem sistemu utrditve smo s tankimi trakovi objeli zid v območju večjih tlačnih napetosti. Večino zidov smo preizkusili pri vertikalni obtežbi 400 kN, kar je približno 1/4 tlačne trdnosti zidu. Pri tej obtežbi smo preizkusili 12 zidov, za vsak primer utrditve po tri preizkušance. Zidove utrjene z diagonalnimi trakovi smo preizkusili še pri treh različnih obtežbah (200, 300 in 500 kN).

Zaradi velikega števila vgrajenih materialov (opečni zidaki, malta, ogljikova vlakna in epoksidna lepila) in vpliva njihovih lastnosti na nosilnost zidu, smo izvedli več spremljajočih preiskav. Rezultati standardnih preiskav materialov in nestandardnih preiskav zidov so omogočili primerjavo učinkov treh različnih načinov utrditve zidov z armiranimi plastičnimi trakovi (FRP).



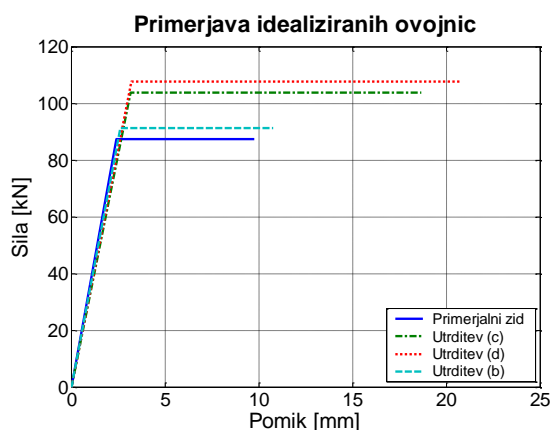
**Slika 4: Sistemi utrditev zidov**

Na diagramu št. 6 so prikazani prirastki porušne sile (glede na neutrjene zidove) dosežene med strižno preiskavo za različne načine utrditve zidov. Prikazane so maksimalna ( $H_m$ ) in idealizirana ( $H_{id}$ ) nosilnost. Na drugem diagramu pa so prikazani pomiki na meji elastičnosti ( $d_{el}$ ) in mejni pomiki ( $d_{max}$ ) doseženi med preiskavo. Vidimo lahko, da diagonalna utrditev (utrditev (b)) ni bistveno izboljšala nosilnosti. Pri utrditvi s horizontalnimi in vertikalnimi trakovi ob straneh (utrditev (c)) smo dosegli zvišanje maksimalne nosilnosti ( $H_{max}$ ) za 17%, še večje zvišanje (21%) pa smo dosegli pri utrditvi s kontinuiranimi horizontalnimi trakovi okoli zidu (primer utrditve (d)). Razlog za tako slabo učinkovitost utrditve s trakovi v diagonalni smeri lahko pripišemo dejstvu, da je prišlo do tlačne porušitve robov preizkušanca, še preden bi lahko prišlo do porušitve v sredini zidu zaradi prekoračenih nateznih napetosti. Prav takšno, strižno porušitev naj bi tovrstni diagonalni trakovi preprečili. Pri drugačni kombinaciji geometrije in materialnih lastnosti bi seveda metoda imela drugačno učinkovitost.



Slika 5: Primerjava glavnih karakteristik zidov

S strižnimi preiskavami smo ugotovili največji prirastek duktilnosti v primeru vodoravne utrditve. Takšen sistem sanacije zidu je povečal duktilnost za skoraj 60%. Ob upoštevanju povečanja mejnih pomikov za več kot 100% in nosilnosti za približno 20 % lahko trdimo, da takšna utrditev bistveno izboljša seizmično odpornost zidu. V primeru diagonalne utrditve smo ugotovili, da je učinek utrditve omejen s tlačno trdnostjo samega zidu, ki se zaradi upogibnega obnašanja najprej izčrpa v vogalih zidu ob temelju.



Slika 6: Primerjava idealiziranih ovojnic

## 0.6 Zaključek

Napredne metode sanacije s FRP-ji, ki so se uveljavile predvsem pri sanacijah betonskih konstrukcij, se počasi uveljavljajo tudi v primerih zidanih konstrukcij. Danes se večinoma uporabljajo tradicionalne metode utrditve, ki pa imajo veliko slabosti. Na področju naprednih metod utrditve zidanih konstrukcij je malo znanega. Zato tudi množičnejša uporaba v praksi zaostaja. Prav zaradi tega dejstva na Gradbenem inštitutu ZRMK raziskujemo učinkovitost naprednih metod za sanacijo zidanih stavb. S študijo in eksperimentalnimi preiskavami želimo podrobneje



spoznati obnašanje utrjenih slopov, ki med potresom največkrat utrpijo resne strižne poškodbe. Z rezultati preiskav želimo dokazati ustreznost uporabe FRP materialov za utrditve zidanih stavb, kakor tudi doprinesi k širši uporabi teh materialov v praksi.

---

## 0.7 Literatura

- [1] Agencija RS za okolje  
[http://www.arso.gov.si/podrocja/potresi/zanimivosti/najmocnejši\\_potresi.html](http://www.arso.gov.si/podrocja/potresi/zanimivosti/najmocnejši_potresi.html)
- [2] U.S. Geological Survey Earthquake Hazards Program,  
<http://earthquake.usgs.gov/>
- [3] Guide to Composites, <http://www.netcomposites.com/education.asp> , 2002
- [4] Žarnič, R., "Osnovne lastnosti polimernih kompozitov", strokovni članek, Gradbeni vestnik, junij, 2002
- [5] Žarnič, R., "Utrditev konstrukcij z armiranimi plastičnimi masami", znanstveni članek, Gradbeni vestnik, oktober, 2002
- [6] Močnik, G., Vidrih, R., Močnejši potresi po svetu v letu 1999, Ujma, Uprava RS za zaščito in reševanje, 14, str. 130-136, 2000
- [7] Mezgec, A., "Analiza strižnega obnašanja kompozitnega "sandwich" panela, Diplomaska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2003
- [8] Tomažević, M., Lutman, M., Petković, L, Seismic Behavior of Masonry Walls: Experimental Simulation, Journal of Structural Engineering, ASCE, 122 (9), str. 1040-1047, 1996
- [9] Triantafillou, Thanasis C., Strengthening of masonry structures using epoxy-bonded FRP laminates, Journal of Composites for Construction, ASCE, 2(2), str. 96-104, 1998
- [10] Gostič, S., Mezgec, A., "Študija učinkovitosti naprednih metod za sanacijo zidanih stavb" (DN 2000329), Ljubljana, GI ZRMK, 2004
- [11] Lutman, M. Tomažević M., World Housing Encyclopedia report - Unreinforced brickmasonry apartment building, World Housing encyclopedia report No. 73, 2002