SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA,
ARHITEKTURE I GEODEZIJE

UNIVERSITY OF SPLIT
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING,
ARCHITECTURE AND GEODESY

KVALIFIKACIJSKI DOKTORSKI ISPIT

Mario Žigo

Razvoj, primjena i izazovi konstrukcijskih ojačanja zidanih konstrukcija

Split, 9.5.2025.

Sadržaj

1. Uvod ... 1
2. Vlakna, matrice i kompoziti u građevinarstvu ... 2
2.1. Mehanička svojstva vlakana ... 3
2.2. Degradacija i temperaturna osjetljivost ... 3
2.3. Cijena, dostupnost i utjecaj na okolinu ... 4
2.4. Odabir kompozita ... 4
3. Eksperimentalna testiranja kompozitnih ojačanja u građevinarstvu ... 6
3.1. Standardizirane metode i dostupne norme za ispitivanja ziđa ... 6
3.2. Ispitivanje posmične otpornosti i čvrstoće prionjivosti kompozita i osnovnog materijala ... 6
3.3. Ispitivanje otpornosti na savijanje okomito na ravninu ziđa ... 8
3.4. Ispitivanja u ravnini ziđa – tlačno opterećenje i dijagonalni test ... 9
4. Zaključak ... 11
5. Zahvale ... 11
6. Reference ... 11

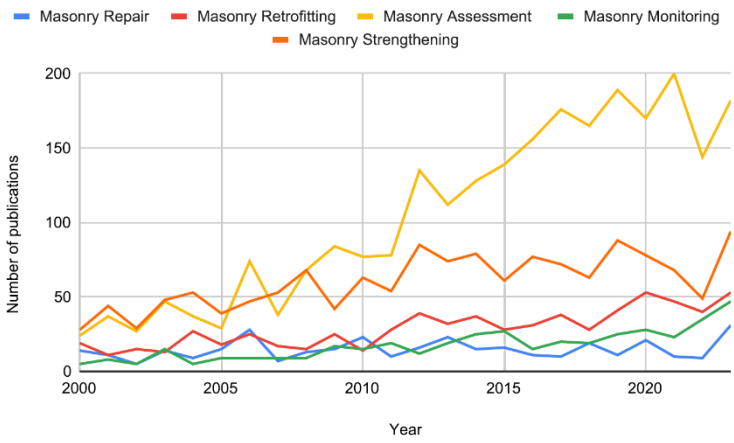
1. Uvod

Razvoj društva sa sobom donosi ekološku svijest i potrebu za održivim razvojem te primjenom načela održivosti u svim sferama ljudskog djelovanja. Principi održivosti u građevinarstvu se ogledaju u produljenju životnog vijeka konstrukcije i uporabi suvremenih materijala bilo da se radi o izgradnji novih ili o rekonstrukciji već izvedenih objekata. S obzirom na suvremene zahtjeve u rekonstrukcijama u vidu sve većih raspona i vitkih stupova uz istovremeno očuvanje izvornih vrijednosti građevina javila se potreba za razvojem novih materijala i tehnika u građevinarstvu.

Mnoga naseljena područja svijeta nalaze se u vrlo aktivnim seizmičkim zonama. Tablica 1. prikazuje evidenciju zabilježenih potresa na području Republike Hrvatske [1]. Uzimajući u obzir činjenicu da seizmička aktivnost može rezultirati katastrofalnim posljedicama za ljude i imovinu, što je vidljivo na primjeru Mianmara i Tajlanda 2025, Turske i Sirije 2023, Japana 2011, Haitija 2010, i dr., za zaključiti je da nove objekte treba graditi prema suvremenim standardima, a postojeće pregledati i po potrebi ojačanjima dovesti u adekvatno uporabno stanje. Konstrukcija povijesnih građevina često je pravilnog tlocrtnog oblika, malih raspona, masivnih stupova i zidova izloženih „povoljnom“ tlačnom gravitacijskom djelovanju međutim izgradnja od prirodnih materijala poput kamena ili opeke često bez uporabe čvrstog vezivnog sredstva čini ih čestim predmetom u rekonstrukcijama [2–7]. U posljednjih 40 godina razvijene su brojne tehnike rekonstrukcije i ojačanja uz iskorak u razvoju materijala poput mrežica, vlakana, mikro armiranih mortova i sličnih kompozitnih rješenja. S obzirom na navedeno, može se zaključiti da su konstrukcijska ojačanja aktualna tema u građevinarstvu te da i dalje postoji potreba za dodatnim istraživanjima usmjerenima na razvoj novih materijala i tehnika ojačanja konstrukcija.

Tablica 1. Značajniji potresi Hrvatskoj od 17 stoljeća do 2021. godine [1]

Date	City	Magnitude (M_L)	Intensity (°MCS)
6. travnja 1667.	Dubrovnik		IX-X
9. studenog 1880.	Zagreb		VIII
2. srpnja 1898.	Trilj		IX
8. listopada 1909.	Pokuplje	5.8	VIII
12. ožujka 1916.	Vinodol	5.8	VIII
27. ožujka 1938.	Novigrad Podravski	5.6	VIII
29. prosinca 1942.	Imotski	6.2	VIII-IX
11. siječnja 1962.	Makarska	6.1	VIII-IX
13. travnja 1964.	Dilj Gora	5.7	VIII
5. rujna 1996.	Ston-Slano	6.0	VIII
22. ožujka 2020.	Zagreb	5.5	VII
29. prosinca 2020.	Petrinja	6.2	VIII

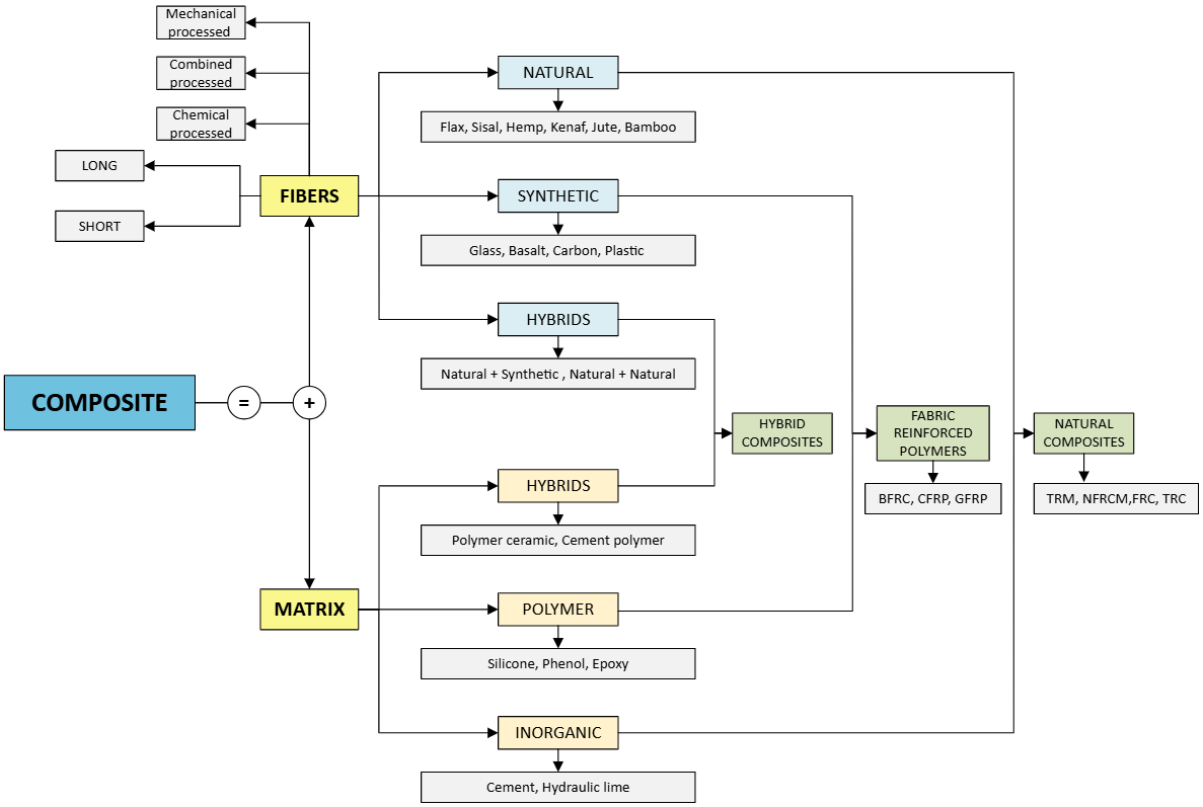


Slika 1. Prikaz zastupljenosti radova objavljenih od 2000. do 2023. koji u naslovu sadrže riječi „Obnova zida“, „Sanacija zida“, „Procjena zida“, „Praćenje stanja zida“ i „Ojačanje zida“ [8]

Budući da se trenutno sve veći naglasak stavlja na ekološku prihvatljivost i održivost u fokusu je svijest o utjecaju materijala na ljudsko zdravlje. U suvremenim obnovama kao ojačanja široko su primjenjivi sintetički materijali poput bazaltnih i staklenih vlakana, karbonskih traka i polimernih smola što ih čini čestim predmetom u istraživanjima današnjice [9–13]. Međutim, iako učinkoviti, u svom procesu proizvodnje, primjene i zbrinjavanja nakon uporabnog vijeka imaju negativan utjecaj na ljudsko zdravlje iz čega se razvila ideja o razvoju i istraživanjima usmjerenima na materijale koji imaju neutralan utjecaj na okolinu u kojoj se primjenjuju. Vlakna od lana, konoplje, agave, viskoze samo su neka od brojnih rješenja koja se danas koriste u održivim varijantama ojačanja konstrukcija [14–20]. Uz ekološke prednosti razvoj prirodnih vlakana mogao bi imati utjecaj na globalnu industriju i makroekonmiju. U [21] na primjeru Indije i njezinog potencijala u vidu razvoja industrije prirodnih vlakana pokazan je mogući utjecaj na ekonomsku scenu svijeta razvojem ojačanja na bazi ovih vlakana. U ovom radu prikazan je pregled dosadašnjih istraživanja u području kompozitnih rješenja za konstrukcijska ojačanja u građevinarstvu. Naglasak je na kompozitima od prirodnih materijala i njihovom usporedbom s ostalim kompozitima uz pregled radova koji su se bavili eksperimentalnim dokazivanjem mehaničkih svojstava ojačanih konstrukcija.

2. Vlakna, matrice i kompoziti u građevinarstvu

Vlakna su tanke niti, prirodno ili umjetno proizvedena koja se dodaju unutar matrice kako bi se poboljšala njezina mehanička svojstva. Najčešće korištena prirodna vlakna u građevinarstvu su lan, agava, viskoza, kokos, pamuk, banana, konoplja i sl. dok su im umjetni konkurenti staklena, karbonska, čelična i plastična vlakna [22,23]. S druge strane najraširenije anorganske matrice su mortovi od hidrauličnog vapna ili cementne matrice, dok su polimerne matrice najčešće epoksidne ili silikonske smole. Osnovna funkcija matrica je prijenos opterećenja na vlakna i njihovo povezivanje u cjelinu. Kompoziti su cjeline sastavljene od matrice i vlakna. Razvoj kompozita proizlazi iz činjenice da su matrice naročito one na bazi cementa ili hidrauličnog vapna vrlo krte te pri nastanku inicijalne pukotine unutar neojačane matrice ona propagira kroz cijelu matricu. Postoje različite podjele kompozita no načelno se mogu podijeliti prema Slici 2.



Slika 2. Podjela kompozita

2.1. Mehanička svojstva vlakana

Prirodna vlakna karakterizira mala masa, geometrijska nepravilnost koja rezultira i varijabilnosti mehaničkih svojstava u različitim smjerovima, visoka vodoupojnost uz degradaciju površine što negativno utječe na prionjivost sa polimernim matricama. S druge strane sintetička vlakna također imaju malu masu, ali su geometrijski pravilna i karakterizira ih jako dobra površinska prionjivost s polimernim matricama što je vidljivo iz brojnih kompozita razvijenih u kombinaciji sintetičkih vlakana i polimernih matrica. Prirodna vlakna dosežu vlačnu čvrstoću od 400 do 1700 MPa, a staklena vlakana približno 3400 MPa dok karbonska dosežu čak 4800 MPa prema podacima u [24], međutim prirodna vlakna imaju veću duktilnost u odnosu na sintetička vlakna. Nadalje, sintetička vlakna su razvijena s otpornošću na koroziju i kemikalije što ih čini povoljnima za korištenje u raznim industrijama poput građevinarstva [25], autoindustrije [26] i zrakoplovne industrije [27].

2.2. Degradacija i temperaturna osjetljivost

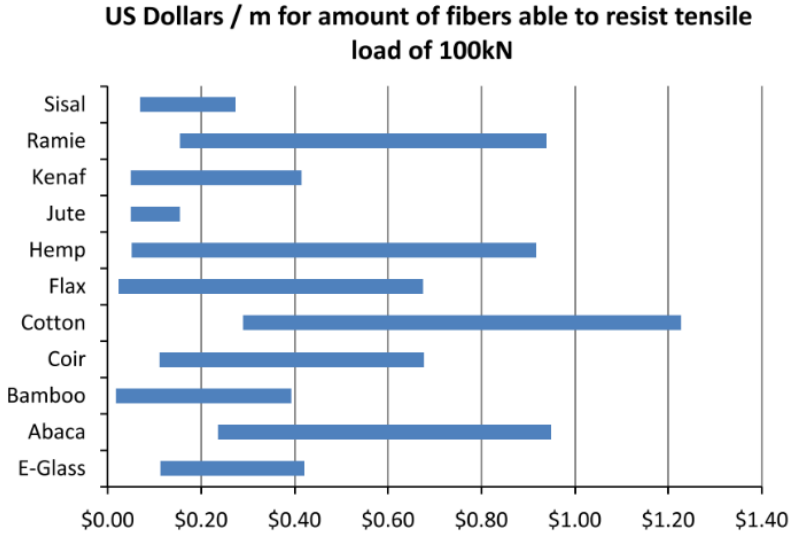
Prirodni kompoziti mogu značajno varirati u mehaničkim karakteristikama, budući da te karakteristike ovise o vrsti vlakana, što je prikazano u [28]. Dodavanje prirodnih vlakana u kompozite može poboljšati mehanička svojstva i trajnost kompozita, međutim UV zračenje i apsorpcija vode negativno utječu na svojstva prianjanja matrice i vlakana što rezultira padom mehaničkih svojstava kompozita [29]. Prilikom korištenja prirodnih vlakana u kompozitnim ojačanjima važno je uzeti u obzir njihova toplinska svojstva. Povišene temperature uzrokuju oslobađanje vode iz vlakana te degradaciju celuloznih i neceluloznih tvari, što rezultira smanjenjem njihovih mehaničkih svojstava [30]. Nadalje, prirodna vlakna su osjetljiva na biodegradaciju uslijed prirodnog nametnika, temperaturna djelovanja i UV degradaciju [31]. S druge strane temperaturni utjecaj sintetičkih kompozita opisan je u [32] gdje je zaključeno da pri nižim temperaturama ne dolazi do znatnog oštećenja kompozita, dok pri dosezanju temperature staklastog prijelaza polimerna matrica postaje gumasta što rezultira omekšavanjem i

puzanjem te padom čvrstoće i krutosti. Također pri dosegu visokih temperatura 300 – 500 °C oslobađa se visoka toplina, dim, čađa i otrovne hlapljive stvari. Pokazano je da je veći utjecaj pada čvrstoće kod izloženosti na tlačna naprezanja nego u savijanju i vlaku.

2.3. Cijena, dostupnost i utjecaj na okolinu

Budući prema istraživanju provedenom u [33] primjena prirodnih vlakana može smanjiti ukupnu težinu građevinskih objekata za 10% i energetsku potrošnju proizvodnje za 80%, značajno se smanjuje emisija CO_2 što ih čini visoko konkurentnima za primjenu u građevinarstvu. Cijena i dostupnost sintetičkih vlakana je prilično stabilna budući da su produkt kemijskog procesa proizvodnje što nije slučaj sa prirodnim vlaknima. Naime, prirodna vlakna su visoko ovisna o klimatskim uvjetima što može rezultirati visokim fluktuacijama u cijeni i dostupnosti na globalnom tržištu no cijena kao samostalan podatak nije reprezentativna budući da za jednake učinke različitih vlakana nije potrebna jednaka količina. U [21] prikazan je dijagram cijene pojedine vrste vlakna za postizanje vlačne otpornosti od 100 kN (Slika 3.).

Budući da su sintetički kompoziti rezultat kemijski ovisnih procesa, tijekom i nakon njihovog eksploatacijskog vijeka postoji rizik od ispuštanja plinova koji negativno utječu na ljudsko zdravlje i okoliš što ih, s tog aspekta gledano, čini nepoželjnima za široku primjenu. Kao održiva alternativa, zahvaljujući svom neutralnom utjecaju, prirodni kompoziti su sve više tema u suvremenim istraživanjima i na tržištu.



Slika 3. Usporedba cijene vlakana za jediničnu duljinu [21]

2.4. Odabir kompozita

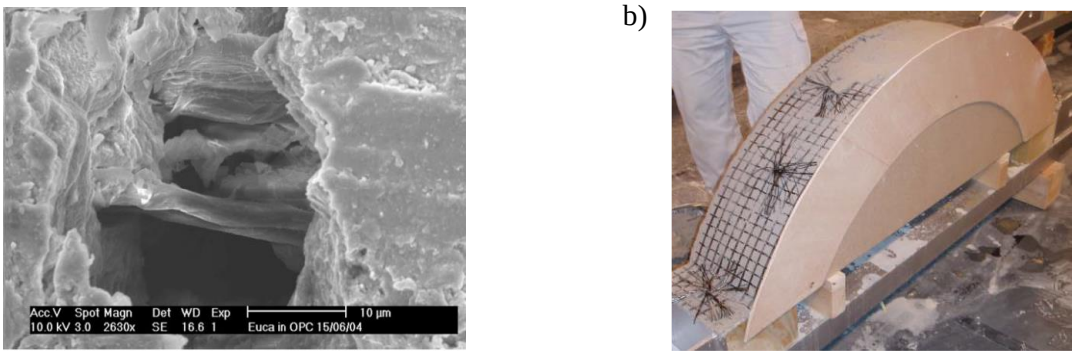
Odabir optimalne kombinacije vlakana i matrice može značajno poboljšati mehanička svojstva i trajnost kompozitnih materijala. Izazovi poput duljine vlakana, geometrije i površinske adhezije s matricom postoje i dalje te zahtijevaju dodatna istraživanja. Mehanizam sloma kompozita ovisi o vlaknima jer uslijed početnog raspucavanja zbog ograničene vlačne čvrstoće matrice, vlakna preuzimaju nosivost te uz značajno deformiranje zaustavljaju širenje pukotina putem efekta premošćivanja [34]. Volumni omjer vlakana i matrice ključan je faktor koji određuje mehanička svojstva i obradivost kompozita. U [35] se dodatkom curaua vlakana u iznosu od 1% mase povećala savojna čvrstoća morta, ali se značajno smanjila njegova obradivost. Jedan od zaključaka o kompozitima u [22] je da korištenje vlakana u matricama povećava broj površinskih pukotina, ali smanjuje njihovu prosječnu širinu. Nadalje, povećanje volumena vlakana nakon određenog nivoa može rezultirati smanjenjem tlačne čvrstoće kompozita što je objašnjeno kao povećanje volumena pora i neujednačenosti u raspodjeli

vlakana unutar matrice. U istom radu je dan zaključak da se kvalitetnom prilagodbom sadržaja vlakana može smanjiti skupljanje matrice do 70%. Modificiranje površine vlakana često podrazumijeva mehaničku, kemijsku ili kombiniranu obradu [22]. Intenzitet obrade je ključan jer prekomjerna obrada može oslabiti njihova mehanička svojstva [23], štoviše utvrđeno je da mehanički ili postupci sušenja imaju minimalan utjecaj na mehanička svojstva kompozita. Kemijska obrada vlakana najčešće podrazumijeva impregnaciju vlakana. Jedan od zaključaka u [36] je da impregnirana vlakna pokazuju bolje performanse zahvaljujući poboljšanoj adheziji i postepenijem mehanizmu loma dok je u [37] na primjeru lanenih vlakna impregniranih sa vlaknima curaua pokazano da se širina pukotina u vlačnim ispitivanjima smanjila za 20%. Površinska adhezija može se dodatno poboljšati prilagodbom geometrije ili duljine vlakana kao i odabirom kompatibilne matrice. Pull out testovi, provedeni u [38], pokazali su da trokutasti, šuplji i kružni presjeci poboljšavaju mehanička svojstva u vidu povećanja sile potrebne za izvlačenje vlakana. Nadalje, u [39] zaključeno je da performanse betona ojačanog čeličnim vlaknima (SFRC) uvelike ovise o vezi između vlakana i betonske matrice. Nedovoljna duljina vlakana može uzrokovati njihovo izvlačenje iz matrice, smanjujući učinkovitost prijenosa opterećenja. Suprotno tome, duga vlakna uzrokuju problem obradivosti dok optimalna duljina vlakana smanjuje skupljanje betona i odgađa pojavu prve pukotine [22]. Prirodna vlakna degradiraju u alkalnom okruženju cementnih matrica (C). Stoga kompoziti s matricom od prirodnog hidrauličnog vapna (NHL) pokazuju bolju otpornost, što potvrđuju eksperimentalni podaci [40]. Učinci C i NHL matrica na trajnost vlakana proučavani su u [37], pri čemu je utvrđeno da vlakna unutar cementnih matrica imaju manju trajnost od onih unutar matrica od hidrauličnog vapna, što dovodi do značajnih varijacija u eksperimentalnim rezultatima.

Kombiniranjem različitih vrsta matrica i vlakana razvijaju se varijante kompozita s različitim svojstvima i načinom primjene. Jedna od takvih podjela, na sustave ojačanja vlažnog nanošenja (wet lay-up), prefabricirane i specijalizirane sustave, dana je u [41]. Polimerni kompoziti ojačani vlaknima (FRP) dalje se dijele na polimere ojačane staklenim vlaknima (GFRP) i polimere ojačane karbonskim vlaknima (CFRP), koji su obično homogeni kompoziti s kratkim vlaknima ugrađenim u polimernu matricu. Osim toga, mortovi ojačani tekstilom (TRM) najčešće su sustavi sastavljeni od anorganske matrice (npr. cementa ili hidrauličnog vapna) ojačane pletenom mrežom od prirodnih vlakana. Moderni prirodni kompoziti uključuju tekstilom ojačani beton (TRC), mortove ojačane tekstilom (TRM), cementne matrice ojačane vlaknima (FRCM) i cementne matrice ojačane prirodnim vlaknima (NFRCM). Osnovna razlika među FRP i TRM sustavima je kontrola raspodjele i orijentacije vlakana koja je ključna jer značajno utječe na mehaničko ponašanje i obrasce loma kompozita. Krhki lom tipičan je za kompozite s manjim udjelom vlakana, dok duktilnost ovisi o količini i prostornoj raspodjeli vlakana, prikazano je u [42].

Iz svega što je prethodno navedeno za zaključiti je da učinkoviti kompozit predstavlja produkt iterativnog optimizacijskog procesa vlakana i matrice potkrijepljenog kvalitetnim istraživačkim radom u vidu eksperimentalnog dokazivanja mehaničkih svojstava.

a) b)



Slika 4. a) Efekt premošćivanja [43], b) Primjena TRM-a [44]

3. Eksperimentalna testiranja kompozitnih ojačanja u građevinarstvu

Za razumijevanje načina ojačavanja konstrukcija potrebno je poznavati moguće načine otkazivanja. Zidane građevine mogu otkazati uslijed globalne nestabilnosti poput ljuljanja cijelog zida ili unutarravninskog smicanja u konstrukcijama izloženim značajnim horizontalnim djelovanja [41] te uslijed lokalnog otkazivanja najslabijeg konstruktivnog elementa. Oblici loma karakteristični za zide prikazani su u [45], gdje je zaključeno da je dijagonalni slom zida karakterističan za umjereni iznos tlačne sile dok je stepenasti lom karakterističan za zide izloženo vlačnim naprezanjima okomito na čeone plohe i na nizu horizontalnih ploha, a do ravnog sloma dolazi zbog prekoračenja glavnih vlačnih naprezanja u konstruktivnom elementu. Otkazivanje kompozitnih ojačanja može se ostvariti unutar samog kompozita, na dodirnoj plohi ojačanja i konstrukcije koja se ojačava te pucanjem osnovnog materijala konstrukcije. Način otkazivanja ovisi o mehaničkim svojstvima kompozita i kvaliteti prionjivosti između osnovnog materijala i ojačanja. Eksperimentalnim metodama na dovoljnom broju uzoraka prema standardnim metodama i pod različitim opterećenjima moguće je odrediti doprinos pojedinog kompozita na nosivost i stabilnost konstrukcije.

3.1. Standardizirane metode i dostupne norme za ispitivanja zida

Standardizirani testovi i smjernice za provođenje testiranja dane su u normama. Testove za ispitivanje zida koji su u skladu s europskim standardima možemo pronaći na službenoj stranici Zavoda za norme RH [46]. U hrvatskim normama dostupni su parametri za ispitivanje uzoraka zida na tlak, savijanje okomito na ravninu i ispitivanje posmične otpornosti. Vlačna otpornost putem dijagonalnog testa, u dosadašnjim istraživanjima, najčešće je provođena prema normi RILEM ili ASTM [47].

Tablica 2. Važeći propisi za ispitivanje zida

NAZIV NORME	OZNAKA NORME	MINIMALAN BROJ UZORAKA
Određivanje čvrstoće prionjivosti očvrslih vanjskih i unutarnjih žbuka na podloge	(HRN EN 1015-12:2016)	3
Određivanje tlačne čvrstoće	(EN 1052-1:1998)	3
Određivanje čvrstoće pri savijanju	(EN 1052-2:2016)	5
Određivanje početne posmične čvrstoće	(EN 1052-3:2004)	9
Standardna metoda ispitivanja dijagonalne vlačne (posmične) čvrstoće zidanih elemenata	ASTM-E519-E519M-22	3

Detaljan pregled prethodnih eksperimentalnih istraživanja sa zaključcima predstavljen je u sljedećim odjeljcima.

3.2. Ispitivanje posmične otpornosti i čvrstoće prionjivosti kompozita i osnovnog materijala

Konstrukcijska ojačanja današnjice koja se primjenjuju u građevinarstvu imaju višestruko veću vlačnu čvrstoću od same konstrukcije. Neojačano zide ima vlačnu čvrstoću ispod 1.0 MPa, a mreže od karbonskih vlakana imaju vlačnu čvrstoću približno 3500 MPa dok mreže od staklenih vlakna imaju 1500 MPa, budući da se otkazivanje najčešće događa na plohi ojačanja potrebno je dokazati mogućnost iskorištenja cjelokupnog potencijala ojačanja. Za dokaz prionjivosti najčešće se primjenjuje pull off test i direktni posmični test. Brojna su ispitivanja napravljena na ovu temu [48–52], uz varijacije u matrici, vlaknima ili načinu nanošenja opterećenja. Nadalje u [37] je dokazano da zbog velike krutosti PBO (poliparafenilenski benzobisoksazol) vlakana u odnosu na podlogu dolazi do odvajanja kompozita od podloge te da se korištenjem lanenih vlakana postiže veća duktilnost tj. pokazuju se pukotine u matrici prije odvajanja od konstrukcije. U Tablici 3. prikazani su samo neki od radova, s pripadajućim

rezultatima i opažanjima, provedenih u svrhu dokazivanja čvrstoće prionjivosti kompozita na osnovni materijal putem jednostranog ili dvostranog posmičnog testa prionjivosti, a u Tablici 4. putem pull off testa. Slika 5. prikazuje moguće načine otkazivanja prilikom ove vrste ispitivanja.

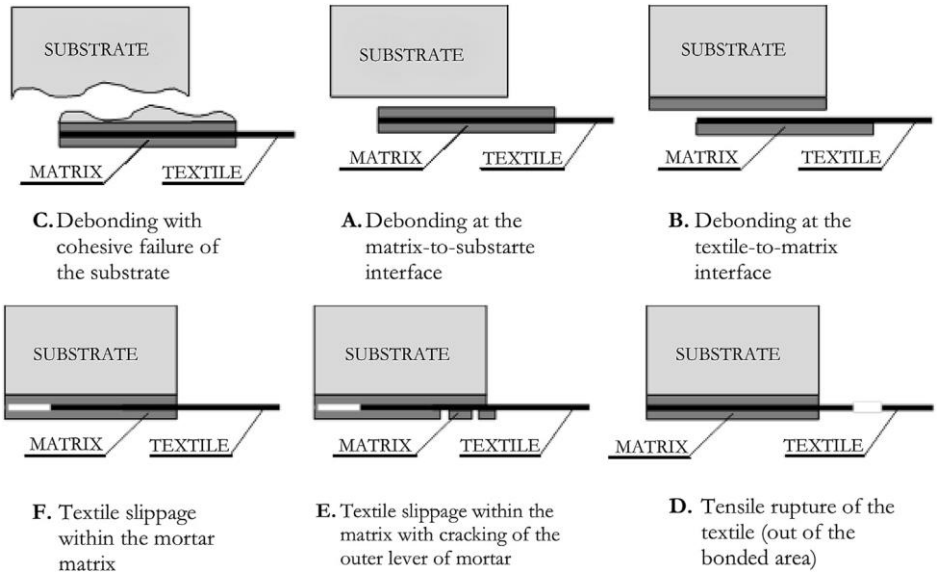
Tablica 3. Opažanja i literatura za direktni posmični test prionjivosti

Referenca	Metoda ispitivanja	Dimenzija lijepljene plohe u cm	Maks. sila u kN / Pomak pri maks. sili u mm	Način otkazivanja
[48]	Dvostrani direktni posmični test prionjivosti	10 x 10	2,63 / 4,2	Proklizavanje uz djelomično otkazivanje mrežice od staklenih vlakana u cementnom mortu
[53]	Jednostrani direktni posmični test prionjivosti	6 x 26	13,53 / 4,0	Ruptura mrežice od vlakana lana u matrici od hidrauličnog vapna
[49]	Jednostrani direktni posmični test prionjivosti	5 x 30	6,7 / *	Odvajanje matrice od hidrauličnog vapna od mrežice od čeličnih vlakana unutar ojačanja

*vrijednost nije zabilježena

Tablica 4. Opažanja i literatura za pull off test

Referenca	Metoda ispitivanja	Maksimalno naprezanje u MPa	Vrsta ojačanja	Način otkazivanja
[48]	Pull off test	1,48	Mrežica od staklenih vlakana u cementnom mortu	Odvajanje matrice od mrežice
[50]	Pull off test	1,05	Mrežica od staklenih vlakana u cementnom mortu	Odvajanje matrice od mrežice
[49]	Pull off test	0,99	Mrežica od čeličlnih vlakana u matrici od hidrauličnog vapna	Odvajanje matrice od mrežice



Slika 5. Načini otkazivanja kompozitnih ojačanja u testovima prionjivosti [54]

3.3. Ispitivanje otpornosti na savijanje okomito na ravninu zida

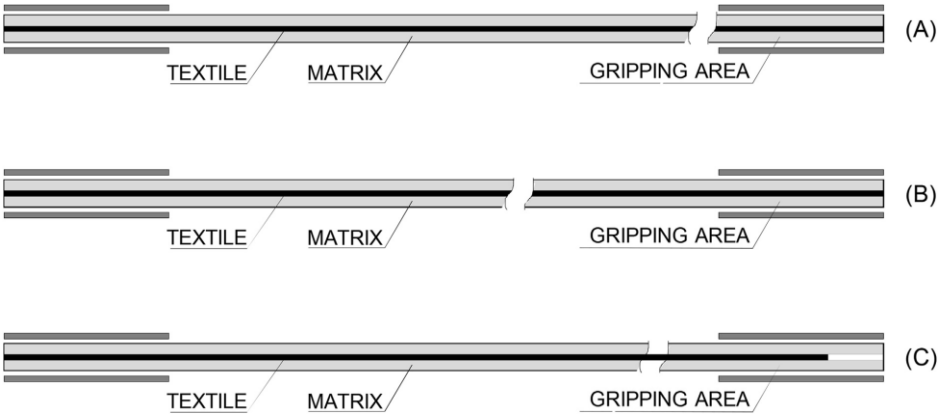
Budući da zide nema visoku vlačnu čvrstoću očekivani doprinos kompozitnog ojačanja za opterećenje van ravnine je značajan. Ispitivanja savijanja zida okomito na ravninu i usporedba doprinosa ojačanja u odnosu na neojačane uzorke, provedena su u [55–58]. U [59] je ispitano 27 uzoraka gdje je promatrano savijanje zidova izvan ravnine uz primjenu pojednostavljene procedure dok je u [60] dokazano da je upotreba FRP ojačanja povećala 2.5 puta otpornost na savijanje uz doprinos u smanjenju deformabilnosti. Istraživanja u Tablici 5. pokazuju varijacije u veličini uzoraka, načinu i vrsti ojačanja te posljedično i njegovom doprinosu u ojačavanju konstrukcija. Iz pregleda literature zaključeno je da je zanemareno ispitivanje doprinosa sidrenja ojačanja u osnovni materijal što predstavlja izazov i priliku za buduća istraživanja.

Tablica 5. Opažanja i literatura za ispitivanje savijanja okomito na ravninu zida

Referenca	Metoda ispitivanja	Dimenzija uzorka u cm	Doprinos ojačanja u odnosu na neojačani uzorak	Vrsta ojačanja
[55]	Savijanje okomito na ravninu	72 x 21 x 10,2	x 10	Jednostrano ojačanje ECC-om (engineer cement composite)
[57]	Savijanje okomito na ravninu	76,2 x 48 x 23	x 5	Jednostrano ojačanje predgotovljenim ECC-om (engineer cement composite)
[58]	Savijanje okomito na ravninu	116 x 118 x 12	x 2,18	Jednostrano ojačanje mikroarmirnanim mortom

3.4. Ispitivanja u ravnini ziđa – tlačno opterećenje i dijagonalni test

U dosadašnjim znanstveno istraživačkim radovima dijagonalni test je vrlo zastupljena metoda dokazivanja mehaničkih karakteristika ziđa. Uzorak u dijagonalnom testu može otkazati uslijed drobljenja osnovnog materijala na mjestu unosa sile ili prekoračenja posmičnih i vlačnih naprezanja u uzorku, stoga ispitivanja samog kompozita na direktni vlak najčešće prethode dijagonalnom testu. U radu [61] su istraživana ponašanja kompozita pod vlačnim opterećenjem te je na slici 7. dan prikaz opaženih načina otkazivanja.



Slika 6. . Načini otkazivanja kompozita koji su izloženi ispitivanju na direktni vlak. A – otkazivanje kidanjem blizu plohe hvatišta uzorka, B – otkazivanje u sredini uzorka ulijed prekoračenja vlačne čvrstoće, C – klizanjem tekstila u području plohe hvatišta bez otkazivanja u vlaku [61]

Zbog mogućih načina otkazivanja u ovom eksperimentu, u literaturi se mogu pronaći različiti nazivi poput „diagonal shear test“ ili „diagonal tensile test“ dok naziv „diagonal compressive test“ proizlazi iz načina opterećivanja uzoraka unutar testa. Nadalje, na temelju ovog testa dane su brojne usporedbe i zaključci o doprinosu kompozitnih ojačanja u građevinskim konstrukcijama. Iz rezultata ispitivanja u [62] slijedi da način otkazivanja uzorka ovisi o tipu osnovnog elementa (puna opeka standardnog formata ili šuplji blokovi), čvrstoći morta kao i načinu ojačanja (jednostrano ili dvostrano). U [63] napravljena je analitička analiza prema RILEMU i određenim talijanskim preporukama uz eksperimentalna ispitivanja. Nakon provedenog ispitivanja putem dijagonalnog testa rezultati su pokazali da je udvostručena nosivost uzoraka ojačanih mrežicom od prirodnog materijala u odnosu na neojačane uzorke dok nema značajne razlike u nosivosti uzoraka ojačanih s jednim ili dva sloja ojačanja. Na dijagramima je pokazano da nakon ojačanja, prilikom otkazivanja elementa ne nastupa potpuno otkazivanje što je dokaz da su opterećenje preuzela vlakna iz kompozitnog ojačanja. Iz ispitivanja provedenih na nepečenoj opeki, putem dijagonalnog testa, zaključeno je da popustljivost ziđa uglavnom ovisi o vlačnoj čvrstoći elemenata u centralnom dijelu zida [64]. Također istraživanje provedeno na ojačanim uzorcima ziđa s lanenom tkaninom i mortom na bazi hidrauličnog vapna je pokazalo da u svim varijacijama uzoraka se taj kompozit u post vršnoj fazi ponaša duktilno [53].

Ispitivanje uzoraka putem tlačnog testa, uz dijagonalni test, je najčešća metoda unutarravninskog ispitivanja ziđa. Tlačna opterećenja su uvijek prisutna u konstrukcijama, bilo od vlastite težine ili dodatnog tereta, stoga je važno kontrolirati naprezanja uslijed tih djelovanja. Kod ojačanih konstrukcija do otkazivanja pod tlačnim djelovanjem u ravnini će doći uslijed prekoračenja vlačnih naprezanja vlakana u kompozitu koji sprječava propagaciju pukotina unutar konstrukcije [65]. Potpuna iskorištenost TRM vlakana doseže se tek kada se dogodi lom preko njih, zaključeno je u [66]. U [67] provedena su ispitivanja na tlačno opterećenje paralelno i okomito na sljubnice nad ojačanim i neojačanim uzorcima od opeke te je zaključeno da opterećenje paralelno sa sljubnicama rezultira krtim lomom zbog čega je zabilježen samo jedan rezultat tlačne čvrstoće u tom smjeru dok je u okomitom smjeru dokazan relativno linearan odnos uzdužne deformacije i tlačnog naprezanja do približno 50% maksimalnog opterećenja.

U tablicama 6. i 7. prikazani su rezultati provedenih eksperimentalnih testova pri čemu je zaključeno da uzorci s kompozitnim ojačanjima imaju značajan doprinos u povećanju nosivosti u odnosu na neojačane uzorke.

Tablica 6. Opažanja i literatura za dijagonalni test

Referenca	Metoda ispitivanja	Dimenzija uzorka u cm	Doprinos ojačanja u posmičnoj čvrstoći u odnosu na neojačani uzorak	Vrsta ojačanja
[62]	Dijagonalni test	130 x 130 x 12	x 4,4	Jednostrano ojačanje hibridnom mrežicom od staklo-polipropilenske mrežice
[63]	Dijagonalni test	103 x 103 x 12	x 2,15	Jednostrano ojačanje mrežicom od lana
[64]	Dijagonalni test	123 x 123 x 41	x 1,25	Obostrano ojačanje nepečene opeke sa mrežicom od konoplje
[53]	Dijagonalni test	100 x 100 x 12	x 2,18	Jednostrano ojačanje mrežicom od lana

Tablica 7. Opažanja i literatura za tlačni test u ravnini zida

Referenca	Metoda ispitivanja	Dimenzija uzorka u cm	Doprinos ojačanja u tlačnoj čvrstoći u odnosu na neojačani uzorak	Napomena
[67]	Tlak u ravnini	58 x 61 x 13	x 2,53	Obostrano ojačanje cijele plohe karbonskim platnom
[68]	Tlak u ravnini	59 x 41 x 20	x 1,17	Obostrano ojačanje cijele plohe karbonskim platnom

4. Zaključak

Uz sintetička vlakna od čelika, stakla, karbona, bazalta, plastike i dr. koja se svakodnevno razvijaju, u znanstveno istraživačkim radovima sve više su zastupljena i vlakna prirodnog podrijetla poput lana, jute, sisala, viskoze, pamuka i dr. Analizom dosadašnjih spoznaja može se zaključiti da kompoziti sastavljeni od prirodnih vlakana imaju potencijal za upotrebu u građevinarstvu s obzirom na njihove visoke mehaničke karakteristike, ubrzanu i ekološki prihvatljivu razgradivost nakon završetka uporabnog vijeka. Pažljiv odabir vrste vlakana, njihove obrade te kombinacije s odgovarajućim tipom matrice ključan je za povećanje otpornosti i trajnosti kompozita, čineći ih pogodnim za ojačavanje konstrukcija. Najveći prostor za unapređenje kompozita s prirodnim vlaknima se može pronaći u poboljšanju interakcije matrice i vlakna, otpornosti na vatru i atmosferilije kao i razvoj sustava sa sidrenjem u osnovni materijal. Mehanička svojstva testiranih uzoraka od prirodnih vlakana potrebno je dodatno istražiti prema standardiziranim testovima i smjernicama u normama kako bi oni mogli postati adekvatna zamjena za kompozite od umjetnih materijala. Korištenje vlakana prirodnog podrijetla doprinosi i industrijskom razvoju regija proizvođača koji trenutno možda nisu uključeni u globalnu razmjenu dobara na svjetskoj razini što direktno utječe na poboljšanje kvalitete života i podizanje ekonomskog standarda tih regija. Nadalje, razvoj kompozita koji sadrže umjetna vlakna nema pozitivan utjecaj na ljudsko zdravlje i okoliš te je potrebno je uložiti određeno vrijeme i sredstva za njihovu zamjenu s materijalima koji će imati neutralan utjecaj. Slijedom navedenog u skoroj budućnosti se planiraju provesti opširna eksperimentalna ispitivanja kompozita izrađenih od prirodnih vlakana kako bi se donijeli pouzdaniji zaključci na temu ojačavanja zidanih konstrukcija s kompozitima od prirodnih materijala koja će služiti znanstvenicima u daljnjim promišljanjima i razvoju.

5. Zahvale

Ovaj rad je podržan kroz projekt „Razvoj nove tehnologije ojačanja zidanih konstrukcija s certificiranjem kvalitete gradnje“ [IP.1.1.03.0109], projekt sufinanciran od strane Vlade RH i Europske unije kroz Europski fond za regionalni razvoj – Operativni program konkurentnost i kohezija.

6. Reference

[1] PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET n.d. https://www.pmf.unizg.hr/geof/seizmoloska_sluzba/seizmicnost_hrvatske (accessed December 16, 2024).

[2] Radnić J, Grgić N, Buzov A, Banović I, Zulim MS, Baloević G, et al. Mw 6.4 Petrinja earthquake in Croatia: Main earthquake parameters, impact on buildings and recommendation for their structural strengthening. Gradjevinar 2021;73:1109–28. https://doi.org/10.14256/JCE.3243.2021.

[3] Cakir F, Uckan E, Shen J, Seker BS, Akbas B. Seismic damage evaluation of historical structures during Van earthquake, October 23, 2011. Eng Fail Anal 2015;58:249–66. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.08.030.

[4] Latifi R, Rouhi R. Seismic assessment and retrofitting of existing RC structures: Seismostruct and seismobuild implementation. Civil Engineering and Architecture 2020;8:84–93. https://doi.org/10.13189/cea.2020.080206.

[5] Latifi R, Hadzima-Nyarko M, Radu D, Rouhi R. A Brief Overview on Crack Patterns, Repair and Strengthening of Historical Masonry Structures. Materials 2023;16. https://doi.org/10.3390/ma16051882.

[6] Heyman J. THE SAFETY OF MASONRY ARCHES. vol. 11. Pergamon Press; 1969.

[7] Di Tommaso A, Focacci F, Micelli F. Strengthening historical masonry with FRP or FRCM: Trends in design approach. Key Eng Mater, vol. 747 KEM, Trans Tech Publications Ltd; 2017, p. 166–73. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.747.166.

[8] Keshmiry A, Hassani S, Dackermann U, Li J. Assessment, repair, and retrofitting of masonry structures: A comprehensive review. Constr Build Mater 2024;442. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137380.

[9] Al-Rousan ET, Khalid HR, Rahman MK. Fresh, mechanical, and durability properties of basalt fiber-reinforced concrete (BFRC): A review. Developments in the Built Environment 2023;14. https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100155.

[10] Sayyad AS, Sayyad RA. A review of research on fiber reinforced concrete. vol. 10. 2023.

[11] Al-Kharabsheh BN, Arbili MM, Majdi A, Alogla SM, Hakamy A, Ahmad J, et al. Basalt Fiber Reinforced Concrete: A Compressive Review on Durability Aspects. Materials 2023;16. https://doi.org/10.3390/ma16010429.

[12] Elkafrawy M, Gowrishankar P, Aswad NG, Alashkar A, Khalil A, AlHamaydeh M, et al. GFRP-Reinforced Concrete Columns: State-of-the-Art, Behavior, and Research Needs. Buildings 2024;14. https://doi.org/10.3390/buildings14103131.

[13] Douadi A, Babba R, Hebbache K, Boutlikht M, Khitas NEH, Messai A, et al. Evaluation of CFRP confinement performance and predictive accuracy of design codes and stress-strain models for concrete. Research on Engineering Structures and Materials 2024. https://doi.org/10.17515/resm2024.435me0906rs.

[14] Monaco A, Baldassari M, D'Anna J, Cornetti P. Effectiveness of Flax-TRM composites under traction. Procedia Structural Integrity, vol. 44, Elsevier B.V.; 2023, p. 2278–85. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.01.291.

[15] Abbass A, Lourenço PB, Oliveira D V. The use of natural fibers in repairing and strengthening of cultural heritage buildings. Mater Today Proc, vol. 31, Elsevier Ltd; 2019, p. S321–8. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.206.

[16] Illampas R, Oliveira D V., Lourenço PB. Design of Strain-Hardening Natural TRM Composites: Current Challenges and Future Research Paths. Materials 2023;16. https://doi.org/10.3390/ma16134558.

[17] Kamarudin SH, Mohd Basri MS, Rayung M, Abu F, Ahmad S, Norizan MN, et al. A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composites (NFRPC) for Sustainable Industrial Applications. Polymers (Basel) 2022;14. https://doi.org/10.3390/polym14173698.

[18] Maciel LP, Leão Júnior PSB, Pereira Filho MJM, El Banna WR, Fujiyama RT, Ferreira MP, et al. Experimental Analysis of Shear-Strengthened RC Beams with Jute and Jute–Glass Hybrid FRPs Using the EBR Technique. Buildings 2024;14. https://doi.org/10.3390/buildings14092893.

[19] Attia MM, Olwan MM, Amoush E, Aamer SRRH, Eita MA. Behavior of hybrid natural fiber reinforced polymers bars under uniaxial tensile strength and pull-out loads with UHPC. Case Studies in Construction Materials 2024;21. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03442.

[20] Chandramohan D, Murali B, Vasantha-Srinivasan P, Dinesh Kumar S. Mechanical, Moisture Absorption, and Abrasion Resistance Properties of Bamboo–Jute–Glass Fiber Composites. J Bio Tribocorros 2019;5. https://doi.org/10.1007/s40735-019-0259-z.

[21] Dittenber DB, Gangarao HVS. Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. Compos Part A Appl Sci Manuf 2012;43:1419–29. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.11.019.

[22] Gamage N, Patrisia Y, Gunasekara C, Law DW, Houshyar S, Setunge S. Shrinkage induced crack control of concrete integrating synthetic textile and natural cellulosic fibres: Comparative

review analysis. Constr Build Mater 2024;427. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136275.

[23] Ardanuy M, Claramunt J, Toledo Filho RD. Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. Constr Build Mater 2015;79:115–28. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.035.

[24] Bismarck A, Mishra S, Lampke T. Plant Fibers as Reinforcement for Green Composites. Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites, CRC Press; 2005. https://doi.org/10.1201/9780203508206.ch2.

[25] Böhm R, Thieme M, Wohlfahrt D, Wolz DS, Richter B, Jäger H. Reinforcement systems for carbon concrete composites based on low-cost carbon fibers. Fibers 2018;6. https://doi.org/10.3390/fib6030056.

[26] Ahmad H, Markina AA, Porotnikov M V., Ahmad F. A review of carbon fiber materials in automotive industry. IOP Conf Ser Mater Sci Eng, vol. 971, IOP Publishing Ltd; 2020. https://doi.org/10.1088/1757-899X/971/3/032011.

[27] Soutis C. Carbon fiber reinforced plastics in aircraft construction. Materials Science and Engineering: A 2005;412:171–6. https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.08.064.

[28] Codispoti R, Oliveira D V., Olivito RS, Lourenço PB, Fangueiro R. Mechanical performance of natural fiber-reinforced composites for the strengthening of masonry. Compos B Eng 2015;77:74–83. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.021.

[29] Machado JS, Knapic S. Short term and long-term properties of natural fibre composites. Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction, Elsevier Inc.; 2017, p. 447–58. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100411-1.00017-0.

[30] Van De Velde K, Baetens E. Thermal and Mechanical Properties of Flax Fibres as Potential Composite Reinforcement. n.d.

[31] Addis LB, Sendekie ZB, Satheesh N. Degradation Kinetics and Durability Enhancement Strategies of Cellulosic Fiber-Reinforced Geopolymers and Cement Composites. Advances in Materials Science and Engineering 2022;2022. https://doi.org/10.1155/2022/1981755.

[32] Bazli M, Abolfazli M. Mechanical properties of fibre reinforced polymers under elevated temperatures: An overview. Polymers (Basel) 2020;12:1–31. https://doi.org/10.3390/polym12112600.

[33] Arpitha GR, Yogesha B. An Overview on Mechanical Property Evaluation of Natural Fiber Reinforced Polymers. Mater Today Proc, vol. 4, Elsevier Ltd; 2017, p. 2755–60. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.153.

[34] Wang X, Ghiassi B, Oliveira D V., Lam CC. Modelling the nonlinear behaviour of masonry walls strengthened with textile reinforced mortars. Eng Struct 2017;134:11–24. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.12.029.

[35] Ferrara G, Pepe M, Filho RDT, Martinelli E. Mechanical response and analysis of cracking process in hybrid TRM composites with flax textile and Curauá fibres. Polymers (Basel) 2021;13:1–14. https://doi.org/10.3390/polym13050715.

[36] de Carvalho Bello CB, Boem I, Cecchi A, Gattesco N, Oliveira D V. Experimental tests for the characterization of sisal fiber reinforced cementitious matrix for strengthening masonry structures. Constr Build Mater 2019;219:44–55. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.168.

[37] Cevallos OA, Olivito RS, Codispoti R, Ombres L. Flax and polyparaphenylene benzobisoxazole cementitious composites for the strengthening of masonry elements subjected to eccentric loading. Compos B Eng 2015;71:82–95. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.10.055.

[38] Behdouj Z, Jamshidi M, Latifi M, Halvaei M. Effect of cross sectional shape of polypropylene fibers on flexural toughness of composites and fiber-to-cement matrix adhesion. Adv Mat Res, vol. 687, 2013, p. 485–9. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.687.485.

[39] Khabaz A. Monitoring of impact of hooked ends on mechanical behavior of steel fiber in concrete. Constr Build Mater 2016;113:857–63. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.142.

[40] Cevallos OA, Olivito R, Codispoti R. Experimental analysis of repaired masonry elements with flax-FRCM and PBO-FRCM composites subjected to axial bending loads. Fibers 2015;3:491–503. https://doi.org/10.3390/fib3040491.

[41] Kišiček T, Stepinac M, Renić T, Hafner I, Lulić L. Strengthening of masonry walls with FRP or TRM. Gradjevinar 2020;72:937–53. https://doi.org/10.14256/JCE.2983.2020.

[42] Wang X, Lam CC, Iu VP. Comparison of different types of TRM composites for strengthening masonry panels. Constr Build Mater 2019;219:184–94. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.179.

[43] Savastano H, Santos SF, Radonjic M, Soboyejo WO. Fracture and fatigue of natural fiber-reinforced cementitious composites. Cem Concr Compos 2009;31:232–43. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.02.006.

[44] Garmendia L, Larrinaga P, García D, Marcos I. Textile-reinforced mortar as strengthening material for masonry arches. International Journal of Architectural Heritage 2014;8:627–48. https://doi.org/10.1080/15583058.2012.704480.

[45] Angelillo M, Lourenço PB, Milani G. Masonry behaviour and modelling. CISM International Centre for Mechanical Sciences, Courses and Lectures, vol. 551, Springer International Publishing; 2014, p. 1–26. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-1774-3_1.

[46] Hrvatski zavod za norme n.d. https://www.hzn.hr/ (accessed October 31, 2024).

[47] Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages 2022. https://doi.org/10.1520/E0519_E0519M-22.

[48] Carozzi FG, Poggi C. Mechanical properties and debonding strength of Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) systems for masonry strengthening. Compos B Eng 2015;70:215–30. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.10.056.

[49] Gentilini C, Yuan Y, Carloni C, Franzoni E. Adhesion between SRP and masonry: Laboratory simulations of the field moisture and salt conditions. Constr Build Mater 2020;264. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120697.

[50] Tamburini S, Natali M, Garbin E, Panizza M, Favaro M, Valluzzi MR. Geopolymer matrix for fibre reinforced composites aimed at strengthening masonry structures. Constr Build Mater 2017;141:542–52. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.017.

[51] Tedeschi C, Kwiecień A, Valluzzi MR, Zając B, Garbin E, Binda L. Effect of thermal ageing and salt decay on bond between FRP and masonry. Materials and Structures/Materiaux et Constructions 2014;47:2051–65. https://doi.org/10.1617/s11527-014-0448-7.

[52] Gentilini C, Carloni C, Santoro R, Franzoni E. CHARACTERIZATION OF FRCM-AND FRP-MASONRY BOND BEHAVIOR. n.d.

[53] Ferrara G, Caggegi C, Gabor A, Martinelli E. Mechanical behaviour of masonry panels strengthened by flax TRM systems. Key Eng Mater, vol. 817 KEM, Trans Tech Publications Ltd; 2019, p. 427–34. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.817.427.

[54] Leone M, Aiello MA, Balsamo A, Carozzi FG, Ceroni F, Corradi M, et al. Glass fabric reinforced cementitious matrix: Tensile properties and bond performance on masonry substrate. Compos B Eng 2017;127:196–214. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.06.028.

[55] Pourfalah S, Suryanto B, Cotsovos DM. Enhancing the out-of-plane performance of masonry walls using engineered cementitious composite. Compos B Eng 2018;140:108–22. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.12.030.

[56] Gattesco N, Boem I. Characterization tests of GFRM coating as a strengthening technique for masonry buildings. Compos Struct 2017;165:209–22. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.01.043.

[57] Munjal P, Singh SB. Out-of-plane response of ECC-strengthened masonry walls. Journal of Structural Integrity and Maintenance 2020;5:18–30. https://doi.org/10.1080/24705314.2019.1692165.

[58] Del Zoppo M, Di Ludovico M, Balsamo A, Prota A. Fibre reinforced mortars for the out-of-plane strengthening of masonry walls. Procedia Structural Integrity, vol. 44, Elsevier B.V.; 2022, p. 2158–65. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.01.276.

[59] Valluzzi MR, da Porto F, Garbin E, Panizza M. Out-of-plane behaviour of infill masonry panels strengthened with composite materials. Materials and Structures/Materiaux et Constructions 2014;47:2131–45. https://doi.org/10.1617/s11527-014-0384-6.

[60] Hamed E, Rabinovitch O. Lateral Out-of-Plane Strengthening of Masonry Walls with Composite Materials n.d. https://doi.org/10.1061/ASCECC.1943-5614.0000093.

[61] De Santis S, Ceroni F, de Felice G, Fagone M, Ghiassi B, Kwiecień A, et al. Round Robin Test on tensile and bond behaviour of Steel Reinforced Grout systems. Compos B Eng 2017;127:100–20. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.03.052.

[62] Giaretton M, Dizhur D, Garbin E, Ingham JM, da Porto F. In-Plane Strengthening of Clay Brick and Block Masonry Walls Using Textile-Reinforced Mortar. Journal of Composites for Construction 2018;22. https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000866.

[63] Ferrara G, Caggegi C, Martinelli E, Gabor A. Shear capacity of masonry walls externally strengthened using Flax-TRM composite systems: experimental tests and comparative assessment. Constr Build Mater 2020;261. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120490.

[64] Cassese P, Balestrieri C, Fenu L, Asprone D, Parisi F. In-plane shear behaviour of adobe masonry wallets strengthened with textile reinforced mortar. Constr Build Mater 2021;306. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124832.

[65] Ismail N, Ingham JM. In-plane and out-of-plane testing of unreinforced masonry walls strengthened using polymer textile reinforced mortar. Eng Struct 2016;118:167–77. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.03.041.

[66] Koutas LN, Tetta Z, Bournas DA, Triantafillou TC. Strengthening of Concrete Structures with Textile Reinforced Mortars: State-of-the-Art Review. Journal of Composites for Construction 2019;23. https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000882.

[67] Luccioni B, Rougier VC. In-plane retrofitting of masonry panels with fibre reinforced composite materials. Constr Build Mater 2011;25:1772–88. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.088.

[68] Thamboo J, Navaratnam S, Poologanathan K, Corradi M. Characteristics of CFRP strengthened masonry wallettes under concentric and eccentric compression. Case Studies in Construction Materials 2021;14. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00472.