

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.24>

Usporedba prirodnih kompozita sa sintetičkim kompozitnim rješenjima u suvremenoj sanaciji i numerička analiza ojačanih zidanih konstrukcija

Comparison of Natural Composites with Synthetic Composite Solutions in Modern Rehabilitation and Numerical Analysis of Reinforced Masonry Structures

Mario Žigo¹, Nikola Grgić²

(1) Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, mzigo@gradst.hr

(2) Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, ngrgic@gradst.hr

Sažetak

Kompozitni materijali imaju ključnu ulogu u suvremenim sanacijama pri čemu, zbog svoje čvrstoće i izdržljivosti, dominiraju umjetni kompoziti od stakla, karbona, čelika i plastike. Ipak, rast svijesti o utjecaju tih materijala na zdravlje i okoliš, uz rast zahtjeva održivosti, potaknuo je istraživanja prirodnih alternativa. Materijali poput lana, viskoze i konoplje pokazali su se održivim rješenjima zahvaljujući dobrim mehaničkim svojstvima, kompatibilnosti s tradicionalnim konstrukcijama i ekološkoj prihvatljivosti. Ovaj rad, kao dio šireg istraživanja [1], donosi pregled mehaničkih svojstava prirodnih i umjetnih kompozita. Nadalje, prikazana je usporedba očekivanog ponašanja i načina otkazivanja uzoraka zida ojačanih mrežicom od prirodnih i staklenih vlakana podvrgnutih izravnom posmičnom opterećenju.

Ključne riječi: Sanacija, Ojačanja, Prirodni kompoziti, Zidane konstrukcije

Abstract

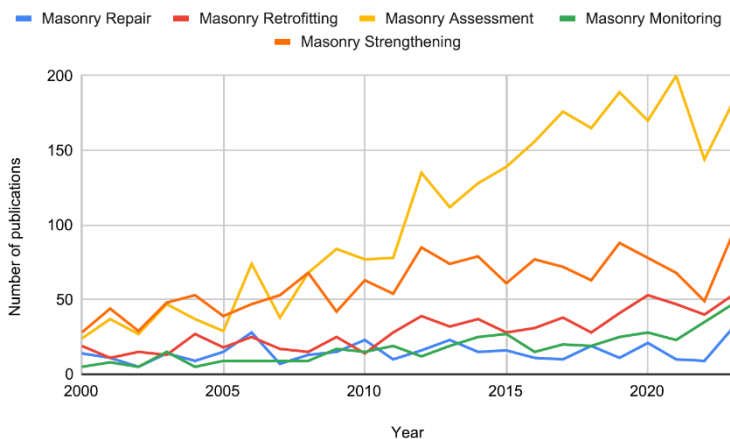
Composite materials have a crucial role in modern structural rehabilitation. Synthetic composites based on glass, carbon, steel and plastic are widely used due to their high strength and durability. However, growing awareness of the potential impact on human health and the environment, as well as increasing sustainability requirements, has led to an increase in research into natural alternatives. Materials such as flax, viscose and hemp have emerged as sustainable solutions that offer favorable mechanical properties, compatibility with traditional structures and environmental benefits. This paper is part of a broader study [1] that provides an overview of the mechanical properties of natural and synthetic composites. It also presents a comparative analysis of the expected behavior and failure modes of masonry specimens reinforced with natural and glass fiber meshes under direct shear loading.

Keywords: Retrofitting, Reinforcement, Natural composites, Masonry structures

1. Uvod

Zahtjevi suvremene gradnje temelje se na inovativnosti, održivosti i ekološkoj prihvatljivosti uz istovremene visoke zahtjeve očuvanja izvorne vrijednosti konstrukcije. Slijedom navedenog javila se potreba za istraživanjem novih tehnika i materijala u području građevinarstva.

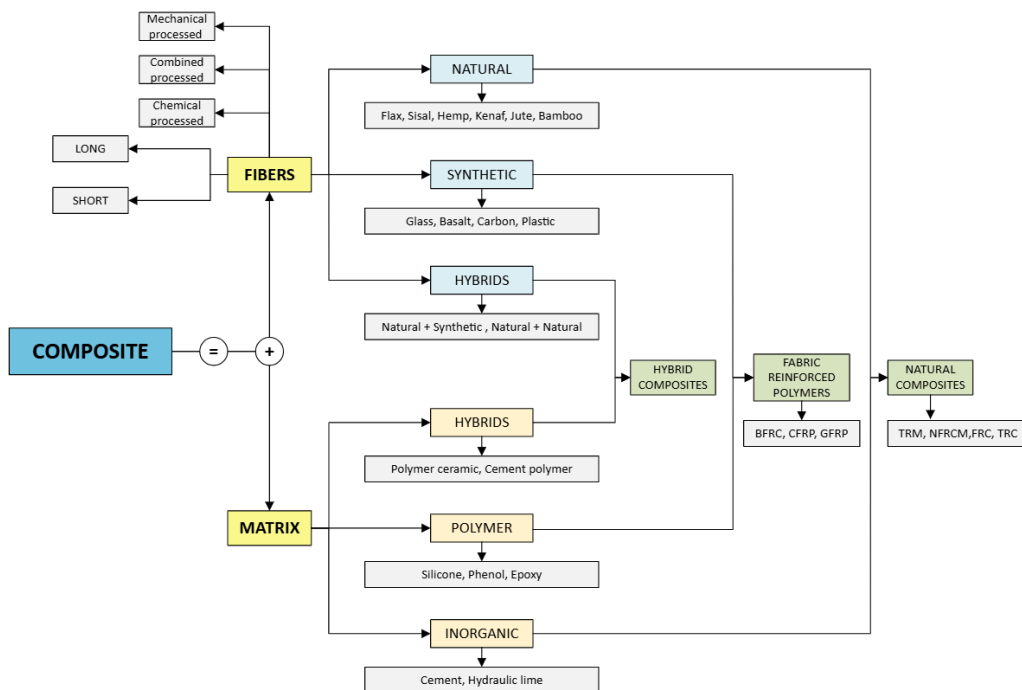
Republika Hrvatska, kao i mnoga druga područja svijeta, nalazi se na izrazito seizmički aktivnom području, stoga je od velike važnosti slijediti suvremene principe i standarde gradnje. Potreba za intenzivnim podizanjem svijesti o važnosti pregleda i ojačanja postojećih konstrukcija najviše se ogleda u posljedicama koje proizlaze uslijed izvanrednih opterećenja poput potresa. Mianmar i Tajland 2025, Turska i Sirija 2023, Japan 2011, Haiti 2010 su samo neki od brojnih zabilježenih slučajeva katastrofa proizašlih iz urušavanja građevinskih konstrukcija. Povijesne građevine su često 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. 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. Slika 13 prikazuje graf koji svjedoči porastu interesa za sanacijom i ojačanjem konstrukcija. Štoviše, 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.



Slika 13. 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“ [2]

2. Kompoziti u građevinarstvu

Kompoziti su cjeline sastavljene od matrice i vlakana. Matrice, naročito one na bazi cementa ili hidrauličnog vapna, su vrlo krte te pri nastanku inicijalne pukotine unutar neojačane matrice ona propagira kroz cijelu matricu. Kako bi se zaustavila propagacija u matricu se dodaju vlakna koja svojom visokom vlačnom čvrstoćom doprinose nastavku prijenosa opterećenja. Postoje različite podjele kompozita no načelno se mogu podijeliti prema Slika 14.



Slika 14. Podjela kompozita [1]

Prirodna vlakna odlikuje mala masa, visoka vlačna čvrstoća i vodoupojnost koja u konačnici rezultira degradacijom površine što za posljedicu ima smanjenu prionjivost s matricom [3]. Geometrijska nepravilnost iz koje proizlaze nejednolika mehanička svojstva u različitim smjerovima karakteristična je za prirodna vlakana. S druge strane, sintetička vlakna s obzirom na kontrolirani proizvodni proces dosežu visoke čvrstoće i uz pravilnu geometriju imaju vrlo dobru prionjivost s polimernim matricama što ih čini široko zastupljenim u kompozitima današnjice. Vlačna čvrstoća prirodnih vlakana varira od 400 do 1700 MPa u ovisnosti o podrijetlu vlakana, dok sintetička vlakna poput staklenih dosežu 3400 MPa, a karbonska 4800 MPa [4]. Nadalje, pad čvrstoće prirodnih vlakana može biti uzrokovan različitim faktorima poput biodegradacije uslijed prirodnog nametnika, temperaturnog djelovanja i UV degradacije. Izloženost visokim temperaturama dovodi do oslobađanja vode iz vlakana uslijed čega dolazi do degradacije celuloznih i neceluloznih tvari koja rezultira smanjenjem njihovih mehaničkih svojstava [5]. Nasuprot tome, sintetički kompoziti pri nižim

temperaturama nisu izloženi značajnoj degradaciji, međutim pri doseg temperature staklastog prijelaza polimerna matrica postaje gumasta što uzrokuje puzanje te pad čvrstoće i krutosti [6].

Brojna kompozitna rješenja i tehnike primjene su razvijene kombinacijom različitih vrsta matrica i vlakana. Jedna od takvih podjela, na sustave ojačanja vlažnog nanošenja (wet lay-up), prefabricirane i specijalizirane sustave, dana je u [7]. 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 između FRP i TRM sustava je kontrola raspodjele i orijentacije vlakana koja je ključna jer značajno utječe na mehaničko ponašanje i obrasce loma kompozita.

Iz svega što je 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.

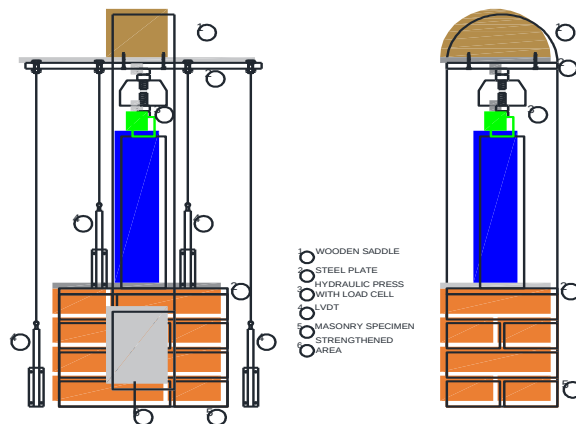
2.1. Eksperimentalna ispitivanja i numerička analiza otkazivanja kompozita

Kompozitna ojačanja mogu otkazati unutar strukture 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 standardiziranim procesima i pod različitim opterećenjima moguće je odrediti doprinos pojedinog kompozita na nosivost i stabilnost konstrukcije. U sklopu šireg ispitivanja doprinosa kompozitnih ojačanja, na Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu, bit će proveden niz ispitivanja i analiza u svrhu dokazivanja mogućnosti njihove primjene u suvremenim sanacijama.

Eksperimenti će se provoditi na zidu izgrađenog od opeke standardnog formata, a varirat će se tri vrste morta na bazi hidrauličkog vapna s nultom emisijom CO₂ kao i dvije vrste ojačanja. Mehaničke karakteristike korištenih mrežica su deklarirane u tehničkom listu proizvođača. Usporedit će se doprinos mrežice od staklenog vlakna vlačne čvrstoće 40 kN/m' i širinom oka mrežice 25 mm x 25 mm s mrežicom od prirodnih vlakna impregniranih epoxy smolom čvrstoće 22 kN/m' i širinom oka mrežice 12.7 mm x 12.7 mm. Prvi set ispitivanja će se odnositi na ispitivanje čvrstoće prionjivosti na osnovni materijal ojačanja i evidentiranje tipova otkazivanja pomoću direktnog posmičnog testa Slika 15.

Za parametre materijala iz Tablica 2 provedena je numerička analiza u svrhu odabira veličine ojačane plohe kako bi se postigli različiti načina otkazivanja. Budući da se količina vlakana mrežice, koji sudjeluju u prijenosu opterećenja, mijenja u ovisnosti o širini ojačane plohe, a nosivost na dodirnoj plohi osnovnog materijala i ojačanja ovisi o cjelokupnoj lijepljenoj površini moguća je pojava različitih vrsta otkazivanja. Odabrana širina ojačane plohe iznosi 14 cm i nije promjenjiva. U slučaju kada duljina lijepljene plohe, koja je varijabilna, iznosi 10 cm maksimalna sila koja se može pojaviti u staklenim vlaknima je 5.0 kN, a posmična otpornost morta je produkt maksimalnog posmičnog naprezanja propisanog

tehničkim listom proizvoda (0,15 MPa) i površine lijepljenja. Zaključeno je da ako je sila u vlaknima mrežice veća od posmične sile u mortu otkazivanje će se dogoditi preko morta, dok s druge strane ako se poveća duljina lijepljene plohe na 25 cm sila u mrežici će biti manja od sile u mortu te će se otkazivanje dogoditi rupturom vlakana mrežice.



Slika 15. Set-up direktni pomični test

Rezultati analize koji su prikazani za mrežicu od staklenih (Tablica 3) i prirodnih vlakana (Tablica 4) predstavljaju važan korak u planiranju budućeg eksperimentalnog dijela istraživanja.

Tablica 2. Parametri mrežica

Mrežica	Sila u mrežici kn/m'	Širina oka mrežice cm	Broj vlakana na m'	Sila u jednom vlaknu mrežice kn
Staklo	40	2,5	40	1
Lan	22	1,27	78	0,28

Tablica 3. Očekivani načini otkazivanja za mrežicu od staklenih vlakana

Uzorak	Širina [cm]	Duljina [cm]	Broj vlakana	Nosivost vlakana [kN]	Posmična sila u mortu [kN]	Način otkazivanja
1	14	10	5	5	2,21	Mort
2	14	22	5	5	4,85	Mort
3	14	25	5	5	5,51	Mrežica

Tablica 4. Očekivani načini otkazivanja za mrežicu od lanenih vlakana

Uzorak	Širina [cm]	Duljina [cm]	Broj vlakana	Nosivost vlakana [kN]	Posmična sila u mortu [kN]	Način otkazivanja
1	14	10	11	3,10	2,21	Mort
2	14	15	11	3,10	3,31	Mort
3	14	25	11	3,10	5,51	Mrežica

3. Zaključak

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, ubranu i ekološki prihvatljivu razgradivost nakon završetka uporabnog vijeka. 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 kompozita od prirodnih vlakana potrebno je dodatno istražiti prema standardiziranim testovima i smjericama u normama kako bi oni mogli postati adekvatna zamjena za kompozite od umjetnih materijala. Provedena je numerička analiza kao inicijalni korak za buduća eksperimentalna ispitivanja. Na temelju rezultata bit će izrađeno 18 uzoraka ziđa na kojima će se provesti direktni posmični test i donijeti zaključci o čvrstoći prionjivosti kompozita na osnovni materijal.

Literatura

- [1] M. Žigo, M. Nikolić, M. Smilović Zulim, and N. Grgić, "Overview Of The Development, Application And Challenges Of Natural Fiber Reinforced Cementitious Matrix (Nfrcm)." doi: DOI:10.5592/CO/3CroCEE.2025.49.
- [2] A. Keshmiry, S. Hassani, U. Dackermann, and J. Li, "Assessment, repair, and retrofitting of masonry structures: A comprehensive review," Sep. 06, 2024, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137380.
- [3] A. Gholampour and T. Ozbakkaloglu, "A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications," Jan. 01, 2020, *Springer New York LLC.* doi: 10.1007/s10853-019-03990-y.
- [4] A. Bismarck, S. Mishra, and T. Lampke, "Plant Fibers as Reinforcement for Green Composites," in *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*, CRC Press, 2005. doi: 10.1201/9780203508206.ch2.
- [5] K. Van De Velde and E. Baetens, "Thermal and Mechanical Properties of Flax Fibres as Potential Composite Reinforcement."
- [6] M. Bazli and M. Abolfazli, "Mechanical properties of fibre reinforced polymers under elevated temperatures: An overview," Nov. 01, 2020, *MDPI AG.* doi: 10.3390/polym12112600.
- [7] T. Kišiček, M. Stepinac, T. Renić, I. Hafner, and L. Lulić, "Strengthening of masonry walls with FRP or TRM," 2020, *Union of Croatian Civil Engineers and Technicians.* doi: 10.14256/JCE.2983.2020.