

# Svojstva ojačanih lameliranih hrastovih okvirnica

---

Lučić, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Forestry and Wood Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet šumarstva i drvne tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:108:300793>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-06**



Repository / Repozitorij:

[University of Zagreb Faculty of Forestry and Wood Technology](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE  
DIPLOMSKI STUDIJ  
DRVNOTEHNOLOŠKI PROCESI**

**LUKA LUČIĆ**

**SVOJSTVA OJAČANIH LAMELIRANIH HRASTOVIH  
OKVIRNICA**

**DIPLOMSKI RAD**

**ZAGREB, 2024**

# **SVOJSTVA OJAČANIH LAMELIRANIH HRASTOVIH OKVIRNICA**

## **DIPLOMSKI RAD**

|                       |  |
|-----------------------|--|
| Preddiplomski studij: | Drvena tehnologija                               |
| Predmet:              | Tehnologija drvnih proizvoda za<br>graditeljstvo |
| Mentor                | Izv.prof.dr.sc. Vjekoslav Živković               |
| Student:              | Luka Lučić                                       |
| JMBAG:                | 0068233951                                       |
| Datum odobrenja teme: | 29.04.2023.                                      |
| Datum predaje rada:   | 24.07.2024.                                      |
| Datum obrane rada:    | 25.09.2024.                                      |

**Zagreb, rujan 2024.**

|                      |  |
|----------------------|--|
| Naslov:              | Svojstva ojačanih lameliranih hrastovih okvirnica  |
| Autor:               | Luka Lučić   |
| Adresa autora:       | Ive Lole Ribara 82, Glamoč, 80230, BiH   |
| Mjesto izradbe:      | Fakultet šumarstva i drvne tehnologije Sveučilišta u Zagrebu   |
| Vrsta objave:        | Diplomski rad  |
| Mentor:              | izv.prof.dr.sc. Vjekoslav Živković   |
| Izradu rada pomogao: | dr.sc. Andrija Novosel   |
| Godina objave:       | 2024.  |
| Obujam:              | 26 stranica, 4 tablice, 19 slika i 8 navoda literature   |
| Ključne riječi:      | Lamelirani elementi, hrastovina, ojačanja, karbonska vlakna, staklena vlakna, poliuretansko ljepilo  |
| Sažetak:             | <p>U ovom radu cilj je bio ispitati mogućnost povećanja mehaničkih svojstava lameliranih hrastovih elemenata pomoću mreža od staklenih i karbonskih vlakana u kombinaciji s poliuretanskim ljepilom, umjesto uobičajene epoksidne smole koja je složena za industrijsku primjenu. Istraživanje je provedeno na lameliranim hrastovim gredicama dimenzija 60 x 70 x 1000 mm koje su ojačane prednapregnutim vlaknima i spojene poliuretanskim ljepilom, a njihova mehanička svojstva testirana su metodom savijanja u četiri točke uz praćenje deformacija optičkim 3D sustavom ARAMIS. Rezultati su pokazali značajna poboljšanja u mehaničkim svojstvima ojačanih uzoraka u odnosu na neojačane, s povećanjem krajnje sile loma za 29-41% i smanjenjem pomaka pri maksimalnom opterećenju za 4-15%, dok je efektivna krutost uzoraka povećana za 37-56%, ovisno o vrsti i količini ojačanja. Optimalnim se pokazalo ojačanje s jednim slojem karbonskih vlakana zbog najboljeg omjera poboljšanja svojstava i utroška materijala, a istraživanje je također pokazalo da poliuretansko ljepilo može biti učinkovita zamjena za epoksidnu smolu, pružajući zadovoljavajuću čvrstoću i adheziju bez potrebe za složenim postupcima i visokim troškovima. Ovi rezultati sugeriraju da bi se lamelirani drveni elementi ojačani karbonskim i staklenim vlaknima, uz uporabu poliuretanskog ljepila, mogli koristiti u raznim konstrukcijskim primjenama gdje su potrebna visoka mehanička svojstva i estetska kvaliteta.</p> |

## BASIC DOCUMENTATION CARD

|                        |  |
|------------------------|--|
| Title:                 | Properties of Reinforced Oak-Wood Construction Components  |
| Author:                | Luka Lučić   |
| Adress of Author:      | Ive Lole Ribara 82, Glamoč, 80230, BiH   |
| Thesis performed at:   | Faculty of Forestry and Wood Technology, University of Zagreb  |
| Publication Type:      | Undergraduate thesis   |
| Supervisor:            | Associate prof. Vjekoslav Živković PhD   |
| Preparation Assistant: | dr.sc. Andrija Novosel   |
| Publication year:      | 2024.  |
| Volume:                | 26 pages, 4 tables, 19 figures and 8 references  |
| Key words:             | Laminated elements, oak wood, reinforcements, carbon fibers, glass fibers, polyurethane adhesive.  |
| Abstract:              | <p>The aim of this study was to examine the possibility of enhancing the mechanical properties of laminated oak elements using glass and carbon fiber meshes in combination with polyurethane adhesive, instead of the commonly used epoxy resin, which is complex for industrial application. The research was conducted on laminated oak beams with dimensions of 60 x 70 x 1000 mm, reinforced with pre-stressed fibers and bonded with polyurethane adhesive. Their mechanical properties were tested using the four-point bending method while tracking deformations with the ARAMIS optical 3D system. The results showed significant improvements in the mechanical properties of the reinforced samples compared to the non-reinforced ones, with an increase in the ultimate breaking force by 29-41% and a reduction in displacement at maximum load by 4-15%. The effective stiffness of the samples increased by 37-56%, depending on the type and amount of reinforcement. The reinforcement with a single layer of carbon fiber proved optimal due to the best ratio of property improvement to material consumption. The study also demonstrated that polyurethane adhesive can be an effective substitute for epoxy resin, providing satisfactory strength and adhesion without the need for complex procedures and high costs. These results suggest that laminated wood elements reinforced with carbon and glass fibers, using polyurethane adhesive, could be used in various structural applications where high mechanical properties and aesthetic quality are required.</p> |



**IZJAVA  
O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI**

**OB ŠF 05 07**

Revizija: 1

Datum: 28.6.2017.

„Izjavljujem da je moj završni rad izvorni rezultat mojega rada te da se u izradi istoga nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni“.

U Zagreb, 25.09. 2024. godine

---

*vlastoručni potpis*

Luka Lučić

## SADRŽAJ

|   |            |
|---|------------|
| <b>POPIS SLIKA.....</b>                               | <b>I</b>   |
| <b>POPIS TABLICA.....</b>                             | <b>II</b>  |
| <b>PREDGOVOR ILI ZAHVALA .....</b>                    | <b>III</b> |
| <b>1. UVOD .....</b>                                  | <b>1</b>   |
| <b>2. CILJ ISTRAŽIVANJA.....</b>                      | <b>11</b>  |
| <b>3. MATERIJALI I METODE .....</b>                   | <b>12</b>  |
| 3.1. Drvo .....                                       | 12         |
| 3.2 Nedrvni materijali.....                           | 13         |
| 3.3 Priprema uzoraka za ispitivanje.....              | 13         |
| 3.4 Postupak ispitivanja .....                        | 15         |
| <b>4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM.....</b>     | <b>18</b>  |
| 4.1. Pomak prilikom opterećenja .....                 | 18         |
| 4.2. Efektivna krutost (EI) .....                     | 20         |
| 4.3. Usporedba deformacija pri istom opterećenju..... | 22         |
| <b>5. ZAKLJUČAK.....</b>                              | <b>25</b>  |
| <b>LITERATURA .....</b>                               | <b>26</b>  |

## POPIS SLIKA

|  |    |
|--|----|
| <i>Slika 1. Konfiguracije skupina uzoraka ojačanih hrastovih drvenih greda (poprečni presjek, epoksidna smola – žuta, karbonska vlakna – crna). (Novosel i ostali, 2021.)</i>  | 2  |
| <i>Slika 2. Prikaz opterećenja uzorka na savijanje u 4 točke (Novosel i ostali, 2023.)</i>   | 2  |
| <i>Slika 3. Prikaz opterećenja uzorka (Šedivka i ostali, 2015.)</i>  | 2  |
| <i>Slika 4. Poprečni presjek greda ojačanih CFRP (Yusof i Rahman, 2017.)</i>   | 2  |
| <i>Slika 5. Konfiguracija uzoraka: a) masivne grede; b) lamelirane grede ojačanje staklenim vlaknima; c) lamelirane grede ojačane s horizontalnim pultrudiranim lamelama i d) lamelirane grede ojačane vertikalnom pultrudiranom lamelom (Ribeiro i ostali, 2009.)</i> | 3  |
| <i>Slika 6. Prikaz ispitivanja za ojačane lamelirane grede (Nadir i ostali, 2016.)</i>   | 2  |
| <i>Slika 7. Tipičan lom uslijed savijanja lamelirane grede ojačane jednim slojem CFRP trake (Nadir i ostali, 2016.)</i>  | 3  |
| <i>Slika 8. Poprečni presjek ispitivanih uzoraka sa prikazanom pozicijom ojačanja i smjerom lameliranja</i>  | 5  |
| <i>Slika 9a. Priprema staklenih vlakana</i>  | 6  |
| <i>Slika 10. Završno lijepljenje ojačanja i elemenata</i>  | 7  |
| <i>Slika 11. Uzorci pripremljeni za ispitivanje</i>  | 8  |
| <i>Slika 12. Ispitivanje savijanja u četiri točke na uređaju za mehanička ispitivanja</i>  | 9  |
| <i>Slika 13. Ispitivanje savijanja u četiri točke snimano pomoću sustava ARAMIS</i>  | 10 |
| <i>Slika 14. Odnos sile i pomaka na sredini uzorka tijekom ispitivanja</i>   | 12 |
| <i>Slika 15. Utjecaj različitih ojačanja na pomake pri sili loma u odnosu na referentni neojačani uzorak(narančasta linija)</i>  | 12 |
| <i>Slika 16. Utjecaj različitih ojačanja na krajnju silu loma u odnosu na referentni neojačani uzorak(narančasta linija)</i>   | 13 |
| <i>Slika 17. Kretanja vrijednosti sila i efektivnih krutosti (EI) za različita ojačanja tijekom ispitivanja</i>  | 14 |
| <i>Slika 18. Relativne aksijalne deformacije referentnih ojačanih elemenata pri 22,8 kN što je krajnja sila loma neojačanog drva (oznaka H)</i>  | 16 |
| <i>Slika 19. Referentni uzorak svake od grupa ispitanih uzoraka nakon loma</i>   | 17 |



## POPIS TABLICA

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Tablica 1. Konfiguracija ispitivanih gredica.....</i>   | <i>7</i>  |
| <i>Tablica 2. Pregled srednjih vrijednosti sila loma i pomaka na sredini ispitanih uzoraka.....</i>                                      | <i>11</i> |
| <i>Tablica 3. Pregled efektivnih krutosti, njenih standardnih devijacija, koeficijenta varijacije, i odnosa sa neojačanim drvom.....</i> | <i>13</i> |
| <i>Tablica 4. Pregled pomaka ojačanih i neojačanih referentnih gredica (H) pri različitim silama.....</i>                                | <i>15</i> |

### ZAHVALA

Ovom prilikom želim izraziti duboku zahvalnost mentoru dr. sc. Vjekoslavu Živkoviću za njegovu iznimnu posvećenost, stručnost i nesebičnu podršku tijekom mog studija i u procesu izrade ovog diplomskog rada. Njegovo dragocjeno znanje, korisne smjernice i savjeti bili su ključni za uspješan završetak mog studiranja.

Također, iskreno zahvaljujem dr. sc. Andriji Novoselu na njegovoj velikodušnoj pomoći u provedbi ispitivanja, obradi podataka i samoj izradi rada. Njegov doprinos bio je od presudne važnosti za završavanje ovog rada na visokom nivou.

Pored toga, želim se zahvaliti svim djelatnicima Fakulteta šumarstva i drvne tehnologije, čije je preneseno znanje i stručnost neprocjenjivo doprinijelo mom akademskom razvoju i uspjehu.

Na kraju, srdačno zahvaljujem svojoj obitelji, prijateljima i kolegama na njihovoj stalnoj podršci, razumijevanju i pomoći tijekom cijelog studiranja. Njihova ohrabrenja i podrška bili su mi od velike važnosti i neprocjenjivi izvor motivacije.

Hvala svima na svemu što ste učinili za mene i moj akademski uspjeh.

# 1. UVOD

Opće je poznata važnost i raširenost primjene drva kao građevinskog materijala od samih početaka čovječanstva pa sve do suvremene gradnje. Drvo uz svoja odlična mehanička, fizička i estetska svojstva posjeduje i neke nedostatke koji su direktno povezani sa prirodnim nastankom ove sirovine. Kao glavna mana u odnosu na ostale građevinske materijale (beton, čelik, itd.) javlja se dimenzijska ograničenost elemenata uvjetovana sirovinom, promjena oblika i dimenzija uslijed promjene vlažnosti te pojava prirodno nastalih grešaka u strukturi. Način na koji se ove mane već dugi niz godina u drvnjoj industriji eliminiraju je lijepljenjem drvnih elemenata.

Lijepljeno lamelirano drvo se dobiva na način da se tanji elementi uz pomoć lijepila, koje u ovome sustavu vrši ulogu adheziva te djelovanja određenog pritiska dobiju elementi većih dimenzija. Na ovaj način omogućeno je postizanje gotovo neograničene dimenzije presjeka te dužine, odličnih mehaničkih svojstva uz malu specifičnu masu, i sve to uz uporabu sirovine slabije kvalitete. Sve ta poboljšanja su dovela do širenja uporabe drva, pa tako lamelirane elemente danas upotrebljavamo u proizvodima kao što su krila prozora ali i za nosive konstruktivne elemente raznih građevina pa čak i mostova. Bitan čimbenik koji je također utjecao širenju područja primjene je i ekonomska opravdanost takvih sustava, iz čega možemo zaključiti da se radi o racionalnoj uporabi sirovine.

Za lamelirane konstrukcijske elemente se uglavnom koriste četinjače, prema navodima Knorza (2012.) jelovina i smrekovina su korištene u više od 90% izrađenih lijepljenih lameliranih nosača. Glavni razlog tomu je mala specifična masa četinjača u odnosu na mehanička svojstva. Četinjače karakterizira ujednačena struktura, dimenzijska stabilnost, i jednostavna tehnologija proizvodnje (površinska obrada i lijepljenje). U prilog četinjačama također ide i dostupnost sirovine u središnjoj Europi koja prednjači u proizvodnji lameliranog drva, kao i ustaljena uporaba drva četinjača u gradnji na europskom tlu. Uporaba nosača izrađenih od četinjača za savladavanje velikih raspona i opterećenja zahtjeva uporabu nosača enormnih presjeka što često ne zadovoljava današnje trendove u arhitekturi. Da bi ispunili estetske zahtjeve otvora izrađenih od drva, poželjno je da okvirnica bude što tanja i vitkija kako bi se naglasila otvorenost prostora koja se postiže velikim staklenim plohamama. A kako bi se postigla dovoljna čvrstoća i krutost lijepljenih elemenata, potrebno je koristiti drvo boljih mehaničkih svojstava nego li su to jelovina ili smrekovina. Tu dolazimo do uporabe drva listača za izradu lijepljenih lameliranih elemenata, čiji prednosti i potencijal nisu u potpunosti iskorišteni u konstrukcijskim primjenama. Vrsta koja se posebno nameće u odnosu na ostale je zasigurno hrastovina, koja je na prostorima Hrvatske prepoznata kao tradicionalni građevni materijal. Ljuljika (1987.) navodi u svoj radu kako se radi o drvu izvanrednih fizičkih, mehaničkih i estetskih osobina. Velika čvrstoća i tvrdoća, otpornost na habanje i visoka postojanost su razlozi zbog kojih pravilnom uporabom hrastovina može trajati i više stotina godina. Hrastovina je vrsta drva velike gustoće, obrađuje se lako, suši se teško i sporo, sklona je raspucavanju i utezanju. Radi se o izrazito cijenjenom i skupom drvu koje se upotrebljava u brodogradnji, bačvarstvu, proizvodnji namještaja, furnira, i podnih obloga. No zbog svoje porozne strukture i dimenzijske nestabilnosti je problematična vrsta za lijepljenje.

Kompleksnija strukturalna građa i kemijski sastav u odnosu na četinjače razlozi su zbog kojih je lameliranje listača nezastupljeno. Postizanje zadovoljavajuće adhezivne čvrstoće i otpornost na raslojavanje su samo neki od izazova sa kojima se susreću istraživači pri lijepljenju listača, uz to i visoka cijena sirovine kao što je hrastovina ne ide u prilog. Superiorna mehanička i estetska svojstva, kao i odlična prirodna otpornost su dovoljni razlozi za daljnja istraživanja izrade lijepljenih lameliranih elemenata od hrastovine.

Širenje područja primjene lameliranog drva dovodi do novih zahtjeva za poboljšanjima određenih svojstava. Upravo iz tih razloga znanstvenici pokušavaju unaprijediti tehnike lameliranja dodavajući različite materijale boljih mehaničkih svojstava u različite zone (tlačne i vlačne), tvoreći kompozitni materijal. Postoji nekoliko istraživanja na temu materijala za ojačavanje te tehnika poput ojačavanja na način da su prilikom lameliranja umetnuta metalna ojačanja izrađena od čelika ili aluminija u različitim oblicima (ploče, šipke, trake, itd.) ili ojačanja izrađena od raznih sintetičkih vlakana u kombinaciji sa odgovarajućim adhezivom. Mnogi od navedenih sustava su pokazali značajna poboljšanja u odnosu na neojačane elemente, no zbog svog kompleksnog procesa proizvodnje primjenu nalaze samo za specijalne, a ne komercijalne namjene. Jedan primjer takve primjene je sanacija oštećenja drvenih konstrukcija zaštićenih spomenika kulture, korištenjem sintetičkih vlakana. Razlog za takvu intervenciju je najčešće nastanak mjestimične truleži koja narušava stabilnost objekta, zbog nastojanja očuvanja izvornog oblika ti se elementi pažljivo ojačavaju implantatima od sintetičkih vlakana pomoću epoksidne smole.

Značajna poboljšanja svojstava znanstvenici bilježe koristeći upravo polimere ojačane vlaknima (FRP – eng. fiber reinforced polymers). Radi se o grupi naprednih kompozita koje čine sintetička vlakna visokih mehaničkih svojstava povezanih polimernom matricom. Vlakna su ta koja osiguravaju nosivost i krutost kompozita, dok je matrica potrebna da bi se opterećenja prenijela na sva vlakna. Vlakna mogu biti postavljena samo u jednom pravcu (podužno) ili u više pravaca (u obliku tkanine). Trake FRP koje se uglavnom koriste u svrhu ojačavanja drvenih elemenata se proizvode pultruzijom, tehnologijom u kojoj se vlakna impregniraju ljepilom i u snopovima prolaze kroz zagrijani kalup gdje se povezuju pri visokom pritisku. Na taj način se eliminiraju praznine između vlakana i dobija se materijal nalik tkanini koji se zatim sječe na potrebne dimenzije. Dva su tipa vlakana koja su najzastupljenija u izradi ojačanih polimera u industriji, to su staklena i karbonska vlakna. Staklena vlakna nastaju izlijevanjem taljenog stakla kroz otvor malog promjera, dobivene niti se zatim grupiraju u snopove. Promjena masenih udjela pojedinih oksida u sastavu stakla rezultira različitoj vrsti staklenih vlakana (E, C, R, S i T tip vlakana). Svaki tip vlakana ima različita svojstva, a samim time i područje primjene. Staklena vlakna općenito su čvrsta, negoriva, otporna na kemikalije, te odličnih izolacijskih svojstava. Nedostaci su im relativno nizak modul elastičnosti, mala otpornost na habanje i vlagu, te zamor. Karbonska vlakna sadrže najmanje 90 % ugljika u svom sastavu, proizvode se iz već oblikovanih drugih organskih vlakana, oksidacijom i karbonizacijom na visokim temperaturama. Karbonska vlakna su crne boje i kružnog presjeka, promjer im iznosi 5 do 15  $\mu\text{m}$ . Karakterizira ih velika čvrstoća i modul elastičnosti, velika krutost, otpornost na toplinu te dimenzijska stabilnost. Važno je naglasiti dobar odnos čvrstoće i težine, što je pogodno za primjenu sa drvom. Jedina negativna stvar vezana za karbonska vlakna je njegova visoka cijena,

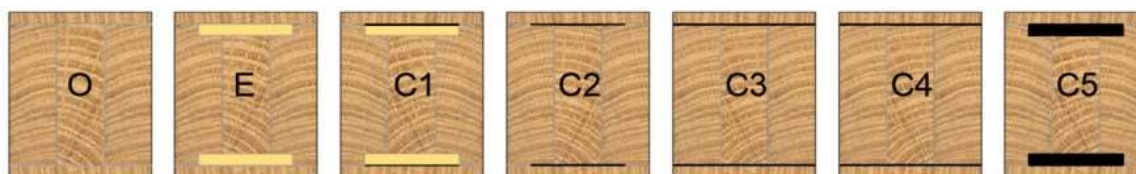
koja je nekoliko puta viša u odnosu na staklena vlakna. Zbog različitih svojstava navedenih vlakana, u radu su korištena oba tipa u dvije varijante (jedan i dva sloja FRP).

Kako bi ojačanje lameliranog drva bilo zaista efektivno potrebno je osigurati dobru adheziju između drva i kompozita. Stoga je bitno odabrati ljepilo koje je odgovarajuće za korišteni kompozit, kako ne bi došlo do delaminacije uslijed opterećenja. Epoksidna ljepila su upravo ona koja su najčešće korištena kada je u pitanju lijepljenje raznih ojačanja i drva. Uglavnom se radi o dvokomponentnim sustavima, koji otvrdnjavaju pomoću kondenzacijske polimerizacije. Ostvaruju dobru adheziju sa drvom i drugim materijalima, otvrdnjavaju pri sobnoj temperaturi uz minimalan pritisak i ograničeno skupljanje. Koriste se u konstrukcijskim primjenama, zbog svoje otpornosti na kemikalije i temperaturu. Jedna od mana epoksidnih ljepila je problematična uporaba u industrijskim okvirima, iz razloga što se radi o kompleksnom višekomponentnom sustavu koji je neuredan i štetan za zdravlje. Iz tih razloga u ovome istraživanju je ispitana mogućnost korištenja polivinil acetatnog (PVAc) i poliuretanskog ljepila (PUR). Polivinil acetatna (PVAc) ljepila pripadaju grupi ljepila za nekonstruktivne primjene, radi se o široko dostupnim ljepilima, čija je uporaba jednostavna i efikasna. Koristi se za građevnu stolariju, ploče od masivnog drva, furniranje, i slične proizvode koji služe za unutrašnju upotrebu. Proizvodi se i u klasi D4, što znači da zadovoljava normative koji predviđaju uporabu u vanjskim uvjetima. Poliuretanska ljepila (PUR) nastaju poliadicijom izocianatnih polimera i poliola (alkohola s više OH skupina). Postoje jednokomponentni i dvokomponentni PUR sustavi, u drvenoj industriji su zastupljeni 1K PUR ljepila koja se koriste za nosive drvene konstrukcije (lamelirani nosači). Služe i za spajanje međusobno različitih materijala kao što su razni metali, guma i keramika. Posjeduju dobar omjer čvrstoće i elastičnosti spoja, što ih čini jakim i otpornim adhezivnom. Brzo otvrdnjavaju pri sobnoj temperaturi, jednostavni su za rukovanje i otporni na vlagu. Zbog svih navedenih prednosti, u ovom istraživanju je korišteno PUR ljepilo kao adheziv pri spajanju ojačanja od vlakana sa drvo

Brojna su istraživanja koja su se bavila ojačanjem drvnih elemenata pomoću neke vrste ukrute, uglavnom su to profili od različitih metala i različiti tipovi vlakana. U nastavku su prikazana samo neka od istraživanja gdje se kao materijal za ojačavanje koriste staklena vlakna (GFRP- eng. Glass fiber reinforced polymer) i ugljična vlakna (CFRP- eng. carbon fiber reinforced polymer). Više je načina na koji se materijali za ojačavanje ugrađuju u drvene elemente, najčešće je to umetanjem u području sljubnice prilikom samog lameliranja. Ojačanja se također postavljaju i na vanjske plohe drvenog elementa, uglavnom sa ciljem naknadnog ojačavanja elemenata (npr. stare povijesne konstrukcije). Ovisno o željenom efektu ojačanja su postavljana u različitim zonama presjeka (u vlačnu zonu, u tlačnu zonu, simetrično ili asimetrično). Za ostvarivanje adhezivne veze između drva i FRP (eng. Fiber reinforced polymer- polimer ojačan vlaknima) do sada su uglavnom korištene različite vrste epoksidnih smola te poliuretansko ljepilo. Znanstvenici su naišli na raznovrsne rezultate pri izvođenju ovih istraživanja, u gotovo svim slučajevima dolazi do značajnog poboljšanja određenih mehaničkih svojstava, no najčešće se dovodi se u pitanje financijska opravdanost takvih sustava.

## 1. UVOD

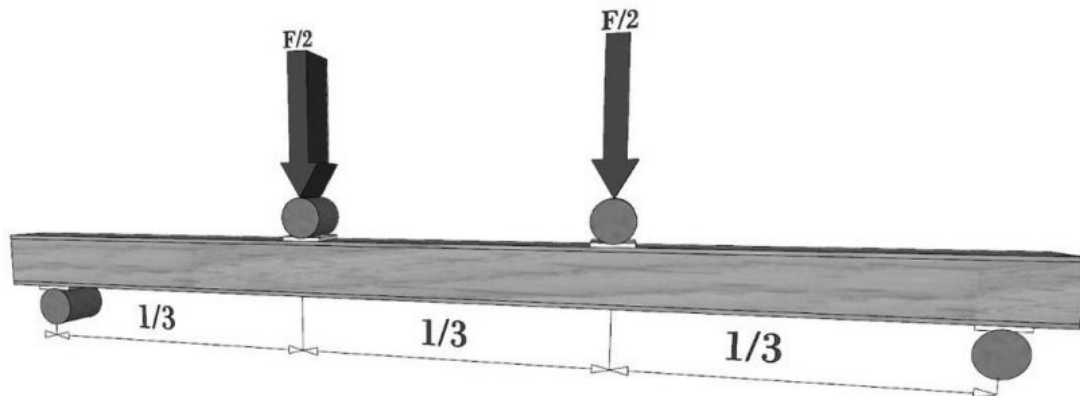
Novosel i ostali (2021.) u svome istraživanju utvrđuju utjecaj ojačanja izrađenih iz ugljičnih (karbonskih) vlakna (CFRP) na mehanička svojstva dvosmjerno lameliranih hrastovih gredica. Cilj ojačanja je poboljšanje krutosti u elastičnom području, čvrstoće na savijanje i ukupne duktilnosti. Za potrebe istraživanja korištene su gredica dimenzija 60 x 70 x 1000 mm, koje su lamelirane u dva smjera, ojačanja su postavljena na tlačnu i vlačnu stranu a zatim prekrivena lamelom debljine 5 mm (slika 1). Kao materijal za ojačanje je korišteno platno izrađeno od karbonskih vlakana i dvokomponentna epoksidna smola u količini 1,3 kg/m<sup>2</sup> (u omjeru 1:3). Ispitano je sedam varijanti gredica, od kojih je jedna serija (oznaka O) bila neojačana varijanta koja je služila kao referentna. Za serije uzorka sa oznakama E, C1 i C5 je sa obje strane izrađen utor dimenzija 40 x 5 mm, za seriju oznake C2 dimenzije utora su iznosile 40 x 0,4 mm, dok za uzorke C3 i C4 nije bilo potrebe za utorom. Kod uzoraka E utor je ispunjen samo epoksidnom smolom, uzorci C1 uz smolu sadržavali su i jedan sloj karbonskih vlakana. Za uzorke C2, C3 i C4 korištena su prednapregnuta karbonska vlakna; za C2 jedan sloj širine 40 mm; za C3 jedan sloj širine 60 mm; te za C4 dva sloja širine 60 mm. Uzorci sa oznakom C5 su izrađeni od epoksidne smole i 21 sloja karbonskih vlakana. Pripremljeni uzorci su zatim ispitani na savijanje u četiri točke prema normi HRN EN 408:2012 (slika 2). Deformacije i naprezanja su mjereni kontinuirano tijekom testiranja pomoću bezkontaktnog optičkog 3D sustava Aramis. Analiza rezultata je pokazala da sve varijante ojačanja pokazuju poboljšanje mehaničkih svojstava, ojačanja su rezultirala povećanjem vrijednosti efektivne krutosti za 4 do 96 %, dok je vrijednost krajnje točke loma povećana za 2 do 106 %. Također je primijećeno značajno smanjenje deformacije pri opterećenju.



Slika 1. Konfiguracije skupina uzoraka ojačanih hrastovih drvenih greda (poprečni presjek, epoksidna smola – žuta, karbonska vlakna – crna). (Novosel i ostali, 2021.)

Povećanje debljine implantata i broja slojeva vlakana rezultira poboljšanjem krajnje točke loma i krutosti, za čak dvostruke vrijednosti. Međutim učinci povećanja broja slojeva nisu proporcionalni povećanju željenih svojstava. Samo jedan sloj CFRP nije rezultirao značajnim učinkom, dok ojačanje sa 21 slojem nije u potpunosti iskoristilo svoja vlačna svojstva zbog smicanja kojem je uzrok snaga adhezije između drva i ljepila. Vlačno prednaprezanje ojačanja je značajno pridonijelo čvrstoći u vlačnoj zoni. To je rezultiralo proporcionalno optimalnim poboljšanjima svojstava (do 47 % veća krajnja točka loma i 60% veća efektivna krutost) u usporedbi sa drugim ojačanjima. Moguće je povećanje efektivne vrijednosti od čak 94 %, no gledajući na potrošnju materijala, najbolji rezultat od 46 % povećanja krajnje sile loma i 67 % veća efektivna krutost je uočen kod jednog ili dva sloja prednapregnutih vlakana širine 40 i 60 mm. Pomaci i deformacije su kontinuirano smanjivanje s povećanjem broja slojeva. Jedan ili dva sloja prednapregnutih vlakana postavljenih cijelom širinom u vlačnoj zoni elementa, pokazuju najbolji omjer poboljšanja mehaničkih svojstava i količine dodatnog materijala za ojačavanje. S druge strane umetanjem 21-og sloja karbonskih vlakana može se

značajno smanjiti poprečni presjek elementa.(Novosel i ostali,2021.)



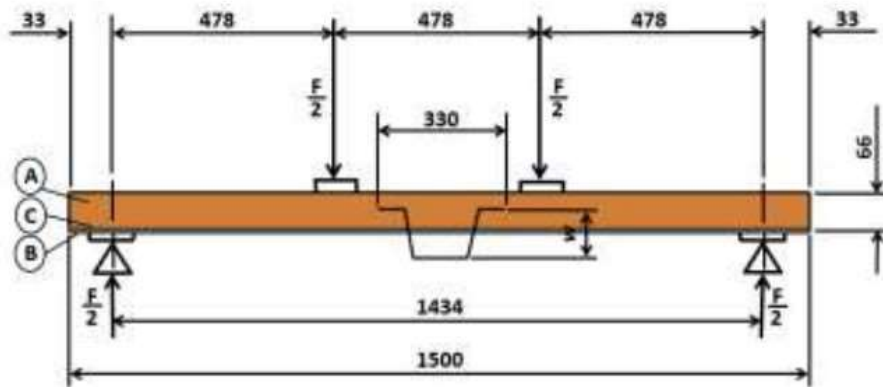
Slika 2. Prikaz opterećenja uzorka na savijanje u 4 točke (Novosel i ostali, 2023.)

Novosel i ostali (2023.) su proveli istraživanje koje je bilo svojevrsan nastavak na rad u kojem su ispitali učinak CFRP ojačanja kod dvostruko lameliranih hrastovih gredica. Iako su CFRP ojačanja rezultirala značajno povećanje mehaničkih svojstava, ekonomska opravdanost korištenja skupog materijala je upravo bilo razlog izvođenja ovog istraživanja. Kao zamjenu za CFRP koristili su polimere ojačane staklenim vlaknima (GFRP), kao i u prethodnom radu izrađeno je šest varijanti ojačanih gredica. Konfiguracije izrađenih uzoraka su bile identične onima u prethodnom radu, kao i sam postupak ispitivanja. Rezultati su pokazali kako je efektivna krutost povećana za vrijednosti od 4 do 51 %, dok povećanje krajnje čvrstoće do točke loma iznosi do 55 %. Prednaprežanje GFRP ojačanja je znatno više doprinijelo povećanju čvrstoće nego je povećanje broja slojeva. Najbolji rezultati su postignuti korištenjem dva sloja prednapregnutih staklenih vlakana, krajnja čvrstoća je povećana za 39 %, efektivna krutost za 51%, te duktilnost za 32 %. Staklena vlakna imaju manju vlačnu čvrstoću od karbonskih, iz tog razloga lamelirani elementi ojačani GFRP pokazuju manju čvrstoću na savijanje od onih sa CFRP. No uzimajući u obzir činjenicu da staklena vlakna mogu biti do 9 puta jeftinija od karbonskih vlakana, prednosti GFRP su itekako značajne.

Šedivka i ostali (2015.) ispituju svojstva greda ojačanih staklenim i karbonskim vlaknima lijepljenim pomoću dvije vrste lijepila, epoksidnim i poliuretanskim. Nosive građevinske grede sa prednapregnutim i neprednapregnutim ojačanjima su ispitne i uspoređene sa neojačanim kontrolnim gredama. Za određivanje čvrstoće greda ojačanih različitim kompozitima je korištena metoda savijanja u četiri točke prema EN 408 (1995) (slika 3). Istraživanje je uključivalo korištenje osam grupa po 12 ojačanih konstrukcijskih elemenata sa dva različita kompozita. Prvu skupinu su činili kompoziti načinjeni od smrekovina, karbonskih vlakna i epoksidne smole ( jedna grupa prednapregnuta a druga ne) , uzorci u drugoj skupini su bili od smrekovine, karbonskih vlakana i poliuretanskog ljepila. Treća skupina uzoraka bile su od smrekovine, staklenih vlakana i epoksidne smole, dok je četvrta skupina činila dvije grupe od smrekovine, staklenih vlakana i poliuretanskog ljepila. Svaka od skupina je imala grupu uzoraka kod kojih je ojačanje bilo prednapregnuto i grupu uzoraka kod kojih nije. Radi

## 1. UVOD

usporedbe rezultata, devetu skupinu su činile neojačane građevinske grede. Grede su izrađene iz smreke (*Picea abies*) nominalne gustoće  $450 \pm 50 \text{ kg/m}^3$ , sa  $12 \pm 1 \%$  sadržaja vode, kvalitete prikladne izradi lameliranih nosivih greda. Izrađene su grede konačnih dimenzija  $30 \times 66 \times 1500 \text{ mm}$ , na koje je zatim nanosila određena vrsta ljepila a potom i ojačanje. Na uzorke je djelovano silom od  $1000 \text{ N}$  do potpunog otvrdnjavanja adheziva. Uzorci su zatim kondicionirani i pripremljeni za ispitivanje savijanja kao na slici X



Slika 3. Prikaz opterećenja uzorka (Šedivka i ostali, 2015.)

Analizom rezultat je utvrđeno da grede koje su ojačane karbonskim vlaknima pokazuju veću čvrstoću, veći modul elastičnosti, i manji progib u odnosu na grede ojačane staklenim vlaknima. Kod svih uzoraka, i onih sa i bez ojačanja do pucanja je došlo u vlačnoj zoni, sve ojačane grede kod kojih su ojačanja prednapregunuta su pokazala bolju čvrstoću na savijanje, i to za 31,6 do 44,4 % u odnosu na kontrolne grede. Sve ojačane grede su pokazale statistički značajne razlike u čvrstoći u odnosu na kontrolne grede, dok statistički značajne razlike nije bilo kod izmjerenih vrijednosti čvrstoće kompozita s epoksidnim i poliuretanskim tipom ljepila. Vrijednosti progiba za grede ojačane kompozitom zalijepljenim epoksidnim ljepilom nisu pokazale statistički značajnu razliku, razlog tomu je što je epoksidno ljepilo tvrđe od poliuretanskog. Ojačavanje greda ovim vrstama kompozita smanjena je varijabilnost čvrstoće u odnosu na kontrolne neojačane grede. Razlog bi mogao biti uklanjanje nedostataka drva pomoću kompozita, što dovodi do poboljšanja mehaničkih i fizikalnih svojstava, i povećanja krutosti kompozita. (Šedivka i ostali, 2015)

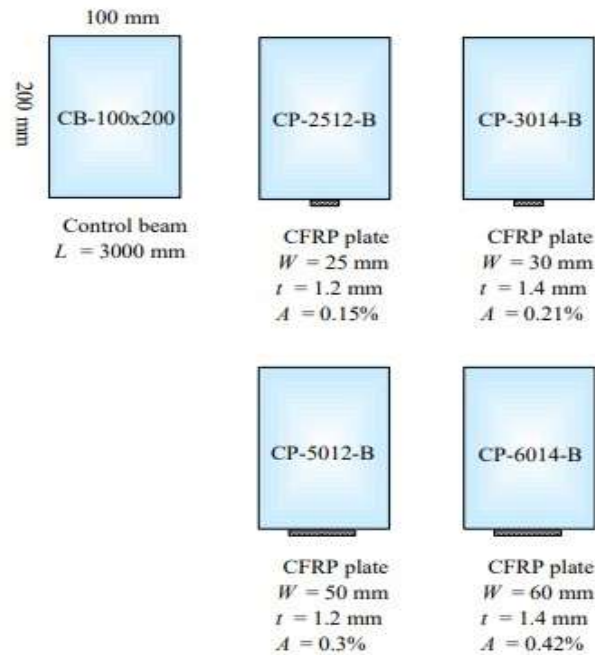
Yusof i Rahman (2017.) su također proveli istraživanje u kojem su ispitali savojnu čvrstoću drvenih greda ojačanih CFRP. Ispitivanje su proveli na 5 uzoraka, jedan je bio bez ojačanja te služio kao referentna vrijednost za analizu (slika 4). Drvo koje je korišteno je žuti meranti (*Shorea faguetiana*) volumne mase  $680 \text{ kg/m}^3$  pri 19 % sadržaja vode, koje je važno komercijalno drvo u Maleziji. Korištene su gredice dimenzija  $100 \times 200 \times 3000 \text{ mm}$ . Za ojačavanje su korištena karbonska vlakna različitih širina i debljina što je prikazano na slici X. Za lijepljenje je korišteno dvokomponentno Sikadur 30 ljepilo na bazi epoksidne smole. Rezultati savijanja u četiri točke su pokazali kako postupak ojačavanja utječe na porast vrijednosti čvrstoće savijanja. Sa povećanjem udjela vlakana rasla je i krajnja čvrstoća, čiji je porast iznosio 31,8 – 44,5 % kada je udio CFRP u presjeku iznosio 0,15 – 0,42 %. Autori tvrde



## 1. UVOD

---

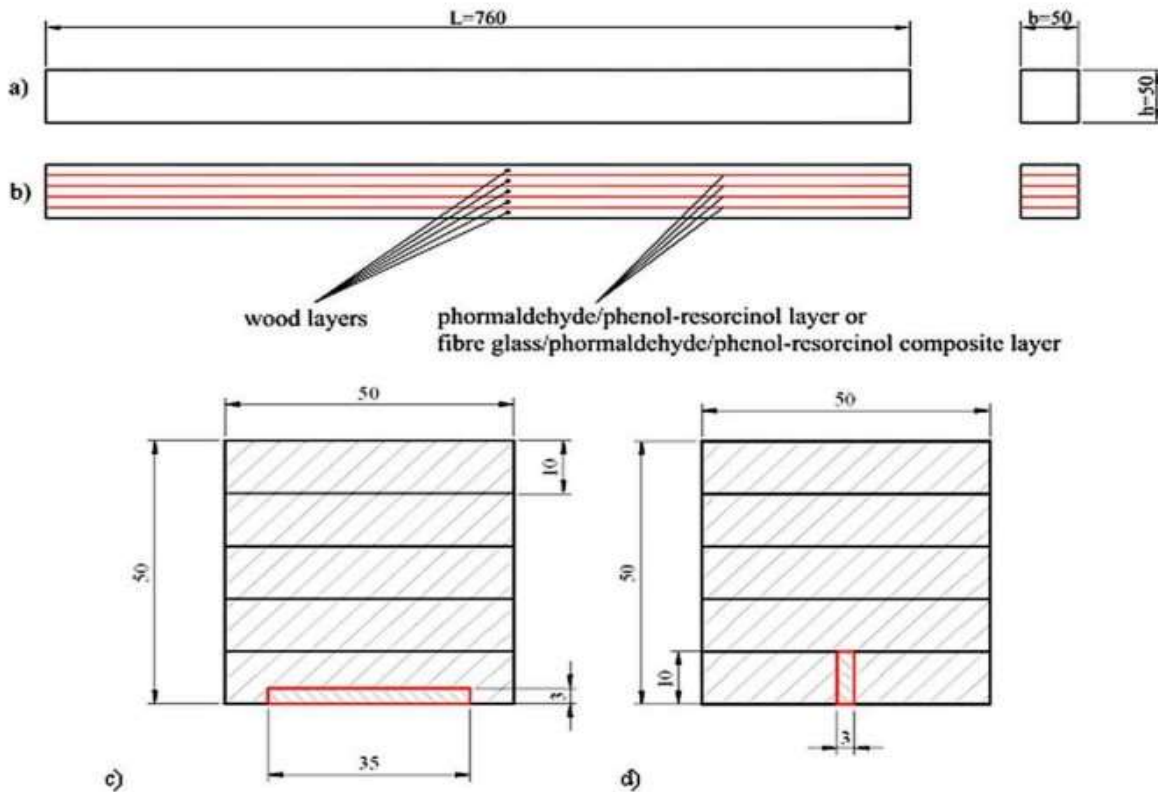
da je ojačanje uravnoteženo kada udio CFRP iznosi 0,16 %, sve iznad toga smatraju nepotrebnim prekomjernim ojačanjem.



Slika 4. Poprečni presjek greda ojačanih CFRP (Yusof i Rahman, 2017.)

Ribeiro i ostali (2009.) kao cilj svoga rada navode poboljšanje mehaničkih svojstava lijepljenih lameliranih greda izrađenih od borovine pomoću GFRP. Istraživanje je zasnovano na dva koncepta, lamelirani drveni kompozit sa staklenim vlaknima, te lamelirani element ojačan primjenom trake na bazi staklenih vlakana postavljene u vlačnoj zoni elementa. za izradu elemenata dimenzija 50 x 50 x 760 mm korištena je drvo primorskog bora (*Picea pinaster*) i fenol-resorcin ljepilo. Za ispitivanje su izrađene četiri različite serije ojačanih greda, te dvije serije neojačanih greda. Za ojačanje kod prve dvije serije korišten je jedan ili dva sloja staklenih vlakana, kod treće serije korištena je horizontalna GFRP traka, a kod četvrte vertikalno postavljena GFRP traka (slika 5). za potrebe referentni vrijednosti ispitane su i dvije serije neojačanih greda, jedna izrađena od masivnog drva i druga od lameliranog. Po deset uzoraka svih šest serija je ispitano na savijanje.

## 1. UVOD



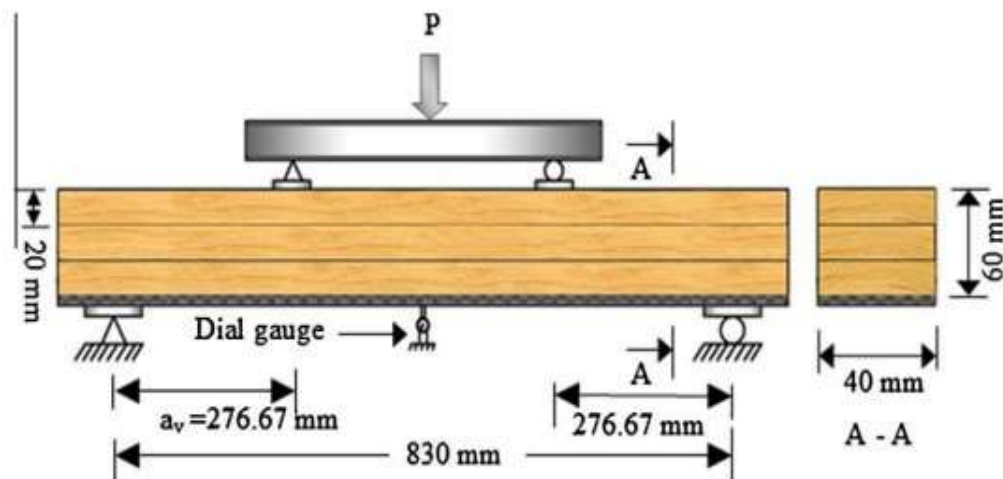
Slika 5. Konfiguracija uzoraka: a) masivne grede; b) lamelirane grede ojačanje staklenim vlaknima; c) lamelirane grede ojačane s horizontalnim pultrudiranim lamelama i d) lamelirane grede ojačane vertikalnom pultrudiranom lamelom (Ribeiro i ostali, 2009.)

Analizom ispitanih uzoraka zaključuju da je lamelirane i ojačane lamelirane grede imaju veću statičku čvrstoću od uzoraka od masivnog drva, što potvrđuje da lameliranje djeluje kao homogenizacijski proces. Isti učinak je posebno izražen kod materijala sa visokom razinom heterogenosti, što je slučaj sa primorskim borom (*Pinus pinaster*). Svi lomovi su izazvani u drvu u vlačnim zonama elemenata, nije primijećena delaminacija kod uzoraka ojačanih staklenim vlaknima. Uzorci ojačani staklenim vlaknima su pokazali bolja svojstva u odnosu na referentne uzorke, no nije primijećeno znatno poboljšanje kod uzoraka sa dva sloja u odnosu na one sa jednim slojem vlakana. Unatoč tri puta većoj količini staklenih vlakana, uzorci sa dva sloja nisu opravdali utrošak materijala za ojačavanje. Uzorci ojačani GFRP trakama pokazuju bolje rezultate u odnosu na elemente ojačane karbonskim vlaknima, pa tako nosivost im je veća za oko 20 % i krutost za 40 %. Ako napravimo usporedbu sa obzirom na orijentaciju traka, bolja svojstva pokazuju elementi ojačani horizontalnim trakama. Što je ujedno pokazatelj da bolja svojstva pokazuju elementi kod kojih je ojačanje postavljeno što bliže moguće vanjskom dijelu presjeka ojačanog elementa.

Nadir i ostali (2016.) također u svome eksperimentalnom radu koriste GFRP i CFRP kao materijale za ojačavanje lameliranih drvenih greda. Koriste plantažno uzgojeno drvo kaučuk (*Hevea brasiliensis*) koje ima prosječnu gustoću  $605 \text{ kg/m}^3$  i sadržaj vode od 10%. epoksidni temeljni premaz i epoksidno ljepilo su korišteni za lijepljenje. Za potrebe ispitivanja su izrađena dva tipa uzoraka, prvi za usporedbu lijepljivosti između drvo-FRP te drvo-drvo (slika

## 1. UVOD

6). Drugi tip uzoraka je izrađen za ispitivanje svojstava savijanja prema ASTM D198-09 čija shema je prikazana na slici 6. Radi se o gredama dimenzija 60 x 40 x 900 izrađenim od 3 lamele, na koje je sa vlačne strane zalijepljeno ojačanje. Izrađene su 4 serije uzoraka, dvije ojačane GFRP (jedan i sva sloja) i dvije ojačane CFRP (jedan i dva sloja).



Slika 6. Prikaz ispitivanja za ojačane lamelirane grede (Nadir i ostali, 2016.)

Rezultati istraživanja su pokazali da dodavanje 2,5% i 5% GFRP-a na vlačnoj stani grede uzrokuje povećanje krutosti na savijanje za 26,29% i 45,76%. Povećanje čvrstoće na savijanje za isti postotak u udjelu kompozitne grede iznosi 36,91% i 40% ako rezultate usporedimo sa neojačanim gredama. Dodavanje 1,67% i 3,33% CFRP-a uzrokuje povećanje krutosti na savijanje u iznosu od 36,19% i 64,12% u odnosu na neojačane grede, dok povećanje čvrstoće na savijanje iznosi 45,86% i 50,62%. U radu je također napravljena i analiza troškova ove vrste ojačavanja na temelju cijena drva, vlakana i ljepila na tržištu. Autori tvrde da jednoslojno ojačanje GFRP-om ima najbolji omjer dobivenih svojstava i cijene same izrade.



Slika 7. Tipičan lom uslijed savijanja lamelirane gredice ojačane jednim slojem CFRP trake (Nadir i ostali, 2016.)

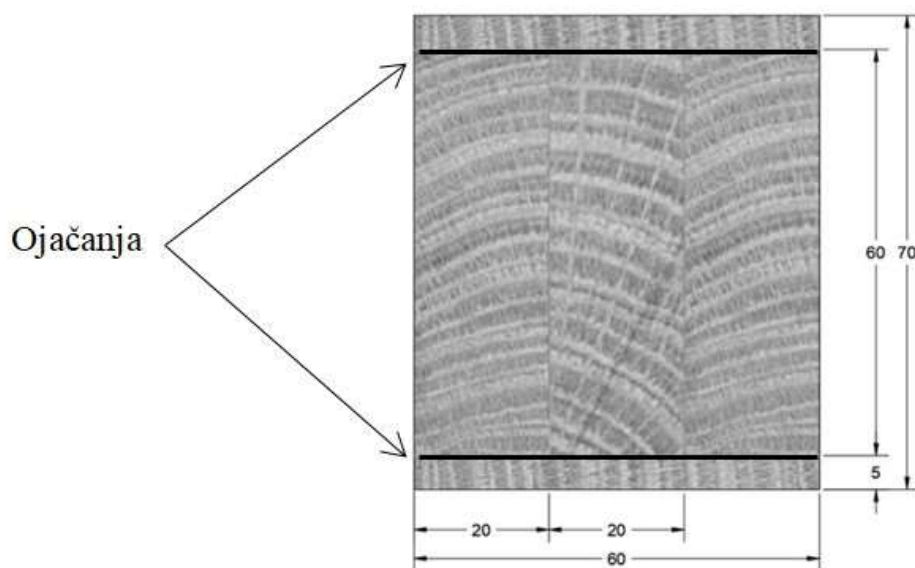
### 2. CILJ ISTRAŽIVANJA

Cilj ovog diplomskog rada je ispitati mogućnost povećanja mehaničkih svojstava lameliranih hrastovih elemenata pomoću mreža od staklenih i karbonskih vlakana u kombinaciji sa poliuretanskim ljepilom. Vrstu ljepila je upravo ono na što je stavljen naglasak pri provedbi ovog istraživanja, iz razloga što se za ovu namjenu uglavnom koristi epoksidna smola. Proizvođači vlaknastih ojačanja preporučuju upotrebu epoksidne smole kao adhezivne komponente u ovakvim sustavima. Upotreba epoksidne smole je kompleksna, a samim time i nepraktična za industrijsku primjenu. Zbog toga je u ovome ispitivanju korišteno poliuretansko ljepilo, kako bi ispitali njegovu prikladnost sa gore navedenim materijalima. Hrastove lamelirane četvrtače presjeka 60 x 60 mm sastavljene od 3 lamele su obložene pletivom od vlakana, a zatim i dodatnom lamelom debljine 5 mm kako bi se postigao efekt cjelovitog drva. Pripremljene četvrtače su ispitane na savijanje u 4 točke prema EN 408, kako bi se dobio uvid u deformacije elementa uslijed opterećenja te silu loma.

### 3. MATERIJALI I METODE

#### 3.1. Drvo

Za potrebe ispitivanja su korištene lamelirane gredice konačne dimenzija 60 x 70 x 1000 mm, izrađene od hrastovine (*Quercus Robur, L*), čija je gustoća pri 9% sadržaja vode 635 – 735 kg/m<sup>3</sup>. Za izradu elemenata su korištene lamele koje su vizualno sortirane kako bi dobili uzorke ravne žice i bez vidljivih grešaka kao šta su kvрге, pukotine, trulež, reakcijsko drvo ili druga nepoželjna obilježja drva. Na taj način se minimalizirao utjecaj prirodne heterogenosti materijala i prisutnosti nepoželjnih obilježja na učinak bilo kojeg materijala korištenog za ojačanje. Iz piljenica osušenih na 9 % sadržaja vode su izrađene lamele debljine 20 mm. Zatim se lijepljenjem takve 3 lamele u industrijskim uvjetima pomoću polivinil acetatnog ljepila D3 ljepila dobivaju gredice dimenzija 60 x 60 x 1000 mm. Na gornju i donju stranu tog elementa u kojem su lamele vertikalno orijentirane se dodaje ojačanje (pomoću poliuretanskog ljepila) te horizontalno orijentirana lamela debljine 5 mm. Na taj način dobiva se dojam cjelovitog drva koje se daljnjom obradom može oblikovati u ovisnosti o zahtjevima konačnog proizvoda.



Slika 8. Poprečni presjek ispitivanih uzoraka sa prikazanom pozicijom ojačanja i smjerom lameliranja

#### 3.2 Nedrvni materijali

Za ojačavanje su korištena platna izrađena od karbonskih i staklenih vlakana, iz kojih su izrađene trake širine 60 mm. Vlakna su prilikom lameliranja prednapregnuta uz pomoć utega koji su bili s obje strane i tako osigurali aksijalno naprezanje od 3,3 MPa. Kao adhezivna komponenta korišteno je jednokomponentno poliuretansko ljepilo proizvođača Kleiberit, komercijalnog naziva PUR 501.0 koje je klasificirano kao D4 ljepilo. Po preporuci proizvođača nanos ljepila je izvršen kistom te je iznosio 220 g/m<sup>2</sup>. Gustoća karbonskog platna iznosi 200 g/m<sup>2</sup>, debljina 200 μm i vlačna čvrstoća 3450 MPa. Vrijednosti isti tih parametara za platno od staklenih vlakana su 160 g/m<sup>2</sup>, 160 μm, i 2476 MPa.



Slika 9a. Priprema staklenih vlakana



Slika 9b. Priprema ugljičnih vlakana

#### 3.3 Priprema uzoraka za ispitivanje

Za potrebe ispitivanja izrađeno je ukupno 26 lameliranih gredica, od toga ih je 6 neojačanih čiji rezultati su predstavljali mehaničke karakteristike samog drva. Ostalih 20 je podijeljeno u 4 grupe po 5 uzoraka što je prikazano u tablici. Lijepljenje i sama priprema je izvršena u kontroliranim uvjetima u Laboratoriju za drvo u graditeljstvu na Fakultetu šumarstva i drvne tehnologije u Zagrebu. Prvo je je odrađeno brušenje unaprijed pripremljenih i kondicioniranih gredica dimenzija 60 x 60 x 1000 mm, te lamela dimenzija 60 x 5 x 1000 mm.

### 3. MATERIJALI I METODE

Prebrušene su plohe koje će se lijepiti, kako bi se dobila što bolja adhezivna svojstva. Zatim je slijedila priprema materijala za ojačavanje, iz platana su izrezivanje trake širine 60 mm (slika 9. i 10.) te su na iste pričvršćeni utezi koji su kasnije vršili ulogu prednapreznja.



Slika 10. Završno lijepljenje ojačanja i elemenata

Izmjerena količina ljepila je iznosila  $200 \text{ g}^2$ , na sljubnicu se nanosila kistom, te je slijedilo slaganje u stupac po redoslijedu: lamela; sloj ili dva prednapregnutog ojačanja; lamelirani element; ojačanje; lamela. I tako svih pet uzoraka sa istim ojačanjem, između svake gređice je stavljana folija kako ne bi došlo do sljepljivanja jedne gređice za drugu uslijed curenja viška ljepila iz sljubnice. Na tako naslagan stupac je zatim primijenjen pritisak pomoću ručnih stega do otvrdnjavanja ljepila. (slika 11.)

| <i>Oznaka</i> | <i>Opis</i>                              | <i>Broj uzoraka</i> |
|---------------|--|---------------------|
| C2            | 2 sloja CFRP širine 60 mm prednapregnuti | 5                   |
| C1            | 1 sloja CFRP širine 60 mm prednapregnuti | 5                   |
| G2            | 2 sloja GFRP širine 60 mm prednapregnuti | 5                   |
| G1            | 2 sloja GFRP širine 60 mm prednapregnuti | 5                   |
| H             | referentni uzorak hrasta                 | 6                   |

Tablica 1. Konfiguracija ispitivanih gređica



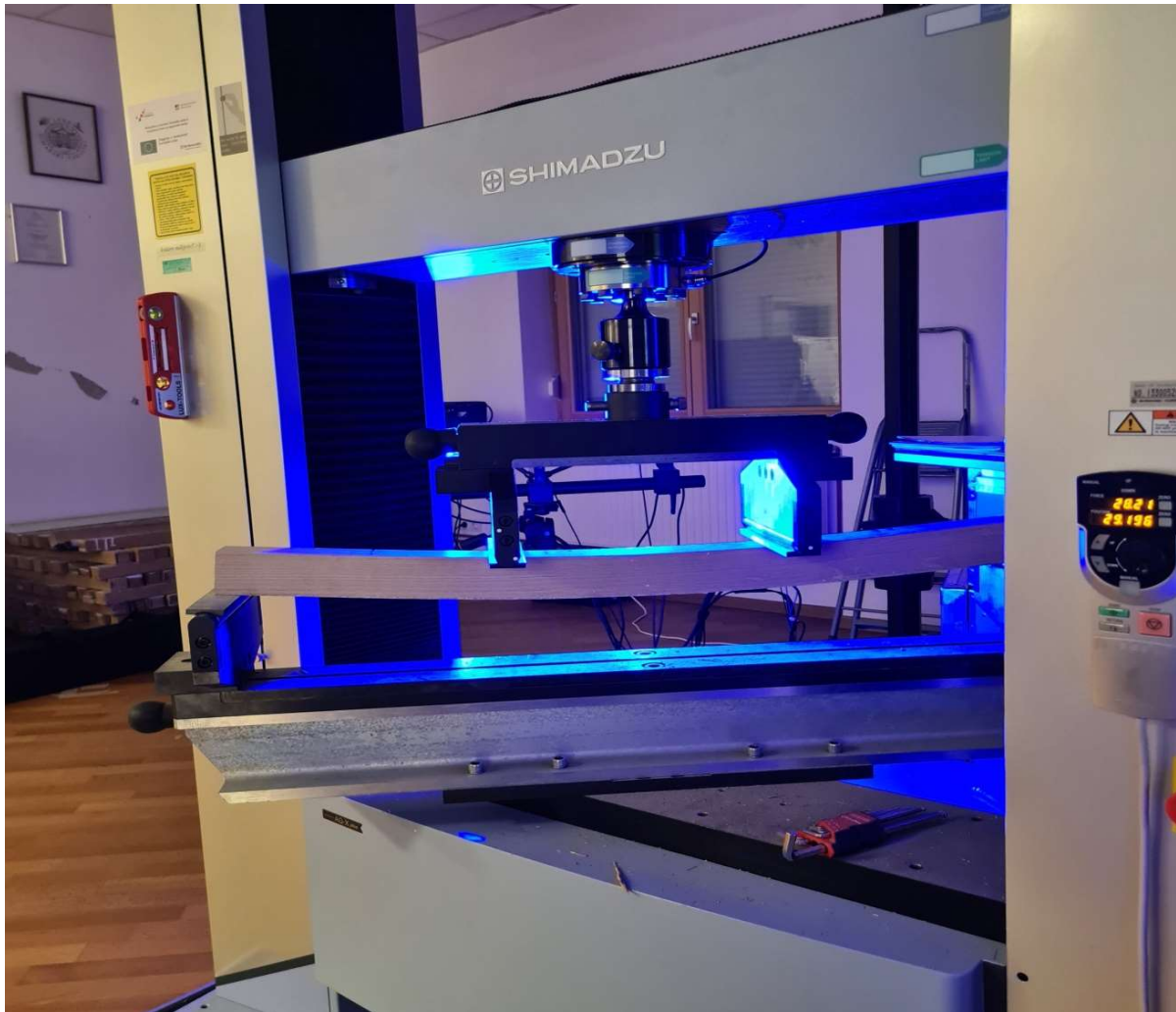


Slika 11. Uzorci pripremljeni za ispitivanje

Nakon sušenja uzorci su označeni i prebrušeni, da bi se pripravili za mehaničko ispitivanje. Prije toga je jedna strana uzoraka obojena bijelim lakom, a nakon sušenja se uz pomoć specijalnog valjka točkasto obojilo crnom bojom (slika 11). Na ovaj način postignut je jak kontrast između crnih točkica i bijele pozadine, što omogućuje praćenje deformacija prilikom savijanja u uređaju za mehanička ispitivanja u kombinaciji sa sustavom ARAMIS. Tako pripremljeni uzorci su kondicionirani 10 dana u laboratorijskim uvjetima od  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  i  $50 \pm 5\%$  relativne vlage zraka.

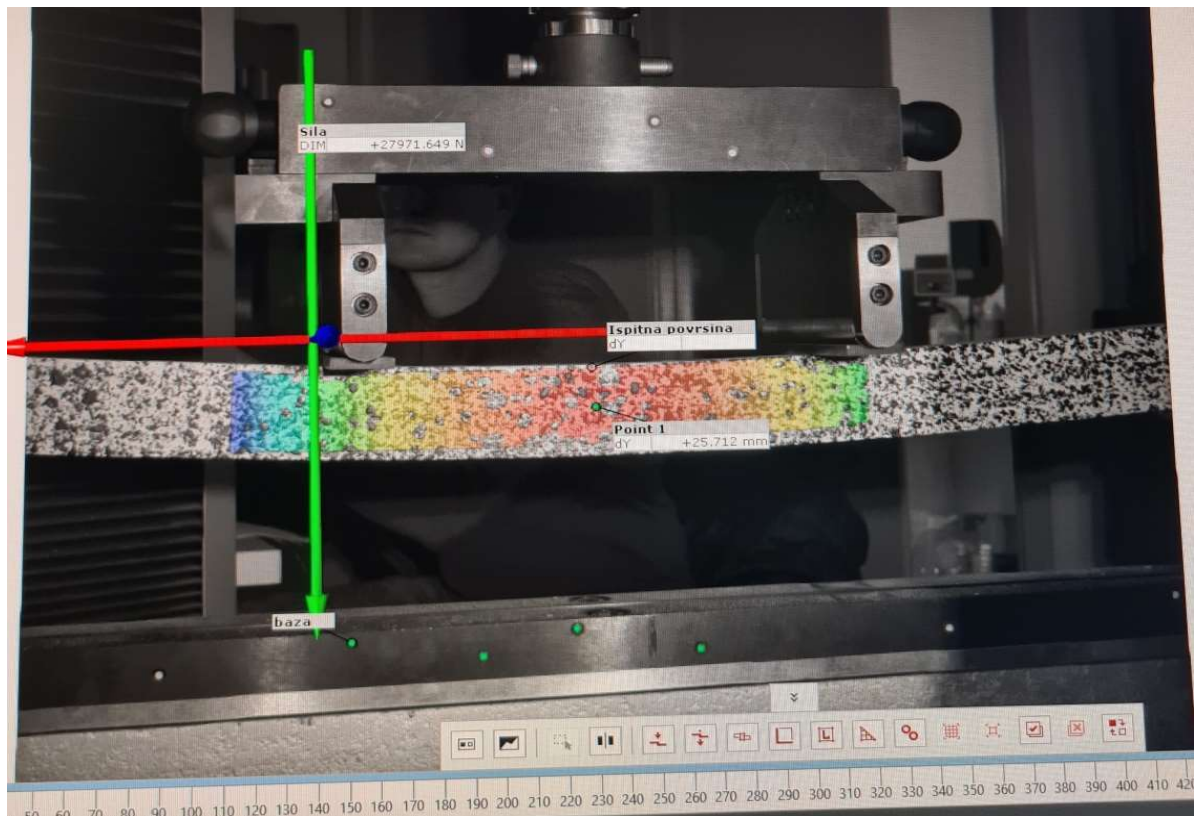
#### 3.4 Postupak ispitivanja

Izrađeni uzorci su zatim ispitivani na savijanje u četiri točke (slika 12). Savijanje je provedeno u laboratoriju na univerzalnom uređaju za mehanička ispitivanja mehaničkih svojstava proizvođača Shimadzu oznake AG-X 100 kN. Ispitivanje je izvršeno po zahtjevima norme HRN EN 408:2012. Ispitivanje se sastojalo od dvije faze, u prvoj fazi opterećenje je povećavalo do 14 kN, zatim je slijedilo otpuštanje do početne točke. U drugoj fazi je opterećenje konstantno raslo brzinom pomaka traverze 5 mm/min do konačne sile loma uzorka. Cilj takvog ciklusa je prikazati ponašanje različitih vrsta ojačanja pri različitim razinama opterećenja.



Slika 12. Ispitivanje savijanja u četiri točke na uređaju za mehanička ispitivanje

Tijekom ispitivanja savijanja u četiri točke svi uzorci su snimani sustavom za praćenje pomaka i deformacija ARAMIS, kako bi dobili podatke o pomaku i deformacijama ispitanih uzoraka. ARAMIS je beskontaktni optički 3D mjerni sustav koji analizira, izračunava i dokumentira deformacije objekata, pokrete krutog tijela i dinamičko ponašanje mjerenih objekata. Sustav koristi dvije kamere koje bilježe fotografije tijekom cijelog ciklusa ispitivanja, te određuje 3D koordinate određenih točaka tijekom određenog vremenskog razdoblja. Obradom slika, tj. pomaka i deforamcija u svakoj točki u softveru grafički su prikazana naprezanja u svim dijelovima snimanog uzorka kroz cijeli tijek ispitivanja (slika 13.)



Slika 13. Ispitivanje savijanja u četiri točke snimano pomoću sustava ARAMIS

## 4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM

### 4.1. Pomak prilikom opterećenja

Dobivene vrijednosti prikazuju da ojačanja znatno utječu na vrijednost savojne čvrstoće kod ispitanih uzoraka. Primijetit ćemo znatno veće vrijednosti čvrstoće kod gredica ojačanih vlaknima lijepljenih PUR ljepilom u odnosu na referentne neojačane uzorke. U Tablici 2. se uz silu loma također nalaze vrijednosti pomaka pri djelovanju iste te sile. Pomak je u rasponu od 29 % do 41 % u odnosu na referentne neojačane uzorke. Tri uzorka bilježe smanjenje pomaka, u vrijednostima od 4 % do 15 %, dok je kod uzorka sa 2 sloja GFRP pomak povećan za 10,71 % u odnosu na referentni uzorak.

| Oznaka | Opis       | Srednja vrijednost sile loma |            |             |                         | Srednja vrijednost pomaka      |            |             |                            |
|--------|------------|------------------------------|------------|-------------|-------------------------|--------------------------------|------------|-------------|----------------------------|
|        |            | ULF<br>(kN)                  | SD<br>(kN) | C.V.<br>(%) | U odnosu na<br>drvo (%) | Pomak pri<br>sili loma<br>(mm) | SD<br>(kN) | C.V.<br>(%) | U odnosu<br>na drvo<br>(%) |
| C2     | CFRP 60 2x | 28,46                        | 3,05       | 10,51       | +29,42                  | 25,89                          | 5,98       | 20,16       | -15,20                     |
|        | PUR        |                              |            |             |                         |                                |            |             |                            |
| C1     | CFRP 60 1x | 31,05                        | 3,46       | 11,27       | +41,20                  | 28,64                          | 5,24       | 18,32       | -6,19                      |
|        | PUR        |                              |            |             |                         |                                |            |             |                            |
| G2     | GFRP 60 2x | 29,03                        | 1,47       | 5,08        | +32,01                  | 33,8                           | 4,16       | 11,83       | 10,71                      |
|        | PUR        |                              |            |             |                         |                                |            |             |                            |
| G1     | GFRP 60 1x | 28,57                        | 1,21       | 4,21        | +29,92                  | 29,13                          | 3,25       | 10,57       | -4,59                      |
|        | PUR        |                              |            |             |                         |                                |            |             |                            |
| H      | Hrast      | 21,99                        | 1,81       | 8,23        | -                       | 30,53                          | 2,25       | 7,37        | -                          |

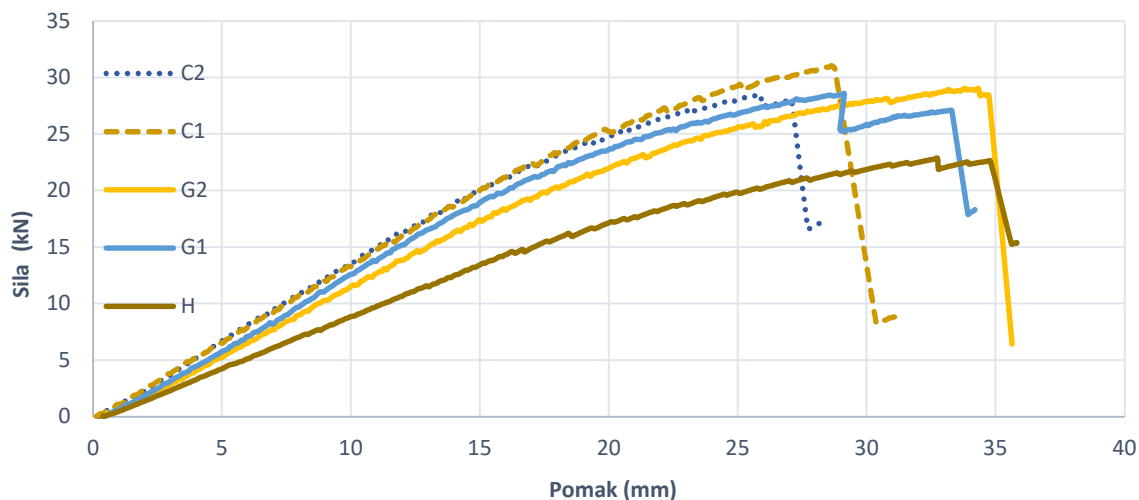
Tablica 2. Pregled srednjih vrijednosti sila loma i pomaka na sredini ispitanih uzoraka

Dobiveni rezultati su u korelaciji sa onima koje Šedivka i ostali (2015.) prikazuju u svojem radu, gdje izvještaju o povećanju čvrstoće na savijanje u rasponu od 31,6 % do 44,4 % u odnosu na neojačani uzorak. Novosel i ostali (2021.) izvještaju o povećanju maksimalne sile do loma za 42,29 % (2 x CFRP 60 mm) i 46,92 % (1 x CFRP 60 mm) u odnosu na referentni neojačani uzorak. Isti autori provode također ispitivanje gdje koriste staklena vlakna kao materijal za ojačavanje, koje rezultira povećanjem od 39,48 % (2 x GFRP 60 mm) i 32,69 % (1 x GFRP 60 mm). U oba ispitivanje kao adhezivnu komponentu koristili su dvokomponentnu epoksidnu smolu.

U tablicu 2. su prikazane vrijednosti krajnje sile loma (ULF), dok se na slici 14. nalazi grafički prikaz djelovanje sile na uzorke od početka do samog loma uzoraka. Umetanje prednapregnutih karbonskih vlakana u vlačnu i tlačnu zonu uzorka rezultira povećanjem čvrstoće na savijanje ojačanih lameliranih elemenata. Umetanjem jednog sloja karbonskih vlakana krajnja sila loma se povećala za značajnih 41,20 % u odnosu na neojačanu hrastovu okvirnicu. Dodavanjem još jednog sloja rezultira porastom vrijednosti ULF za 29,42 %, iz čega zaključujemo da se krajnja sila loma ne povećava proporcijalno sa dodavanjem

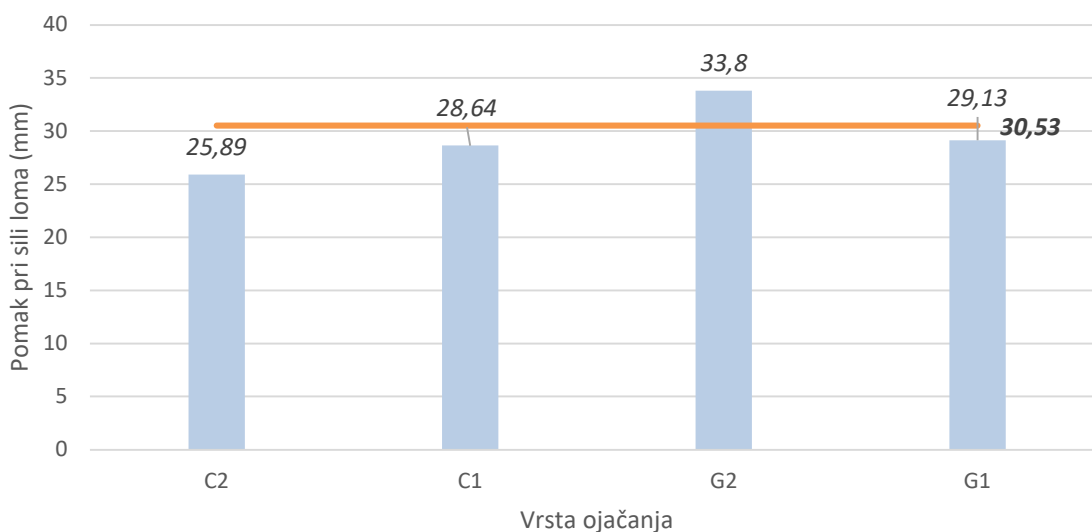
#### 4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM

prednapregnutih slojeva u ovome slučaju. Uzorci ojačani staklenim vlaknima rezultiraju nešto manje vrijednosti krajnje sile loma u usporedbi sa prethodno spomenutim uzorcima C1 i C2. Jedan sloj staklenih vlakana rezultira porastom ULF za 29,92 %, dok je to kod uzorka sa 2 sloja GFRP 32,01 % u odnosu na referentni uzorak.



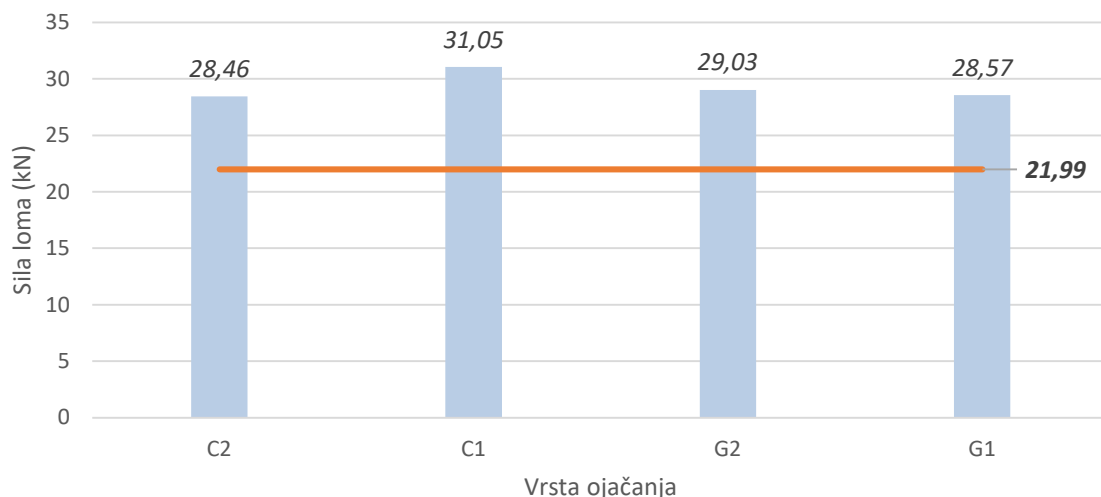
Slika 14. Odnos sile i pomaka na sredini uzorka tijekom ispitivanja

Na slici 15 se nalazi grafički prikaz pomaka pri krajnjoj sili loma koji varira između 25,89 mm i 33,8 mm, vrijednost za neojačanu hrastovu okvirnicu iznos 30,53 mm. Ojačanju su utjecala na povećanje krutosti elemenata, od četiri serije ispitanih uzorka, kod tri serije je zabilježeno smanjenje pomaka pri sili loma u odnosu na referentni uzorak. Uzimajući u obzir da su sile loma kod ojačanih elemenata bile znatno veće nego li je to krajnja sila loma neojačane okvirnice, svako smanjenje pomaka je značajan rezultat. Najmanji pomak od 25,89 mm je zabilježen kod uzorka C2, što je 15,2 % manje u odnosu na samo lamelirano drvo. Slijedi ga C1 sa smanjenjem od 6,19 %, zatim G1 sa također smanjenjem od 4,59 %, te uzorka G2 sa 2 sloja GFRP jedini rezultira rastom pomaka u odnosu na referentni uzorak u iznosu od 10,71 %.



Slika 15. Utjecaj različitih ojačanja na pomake pri sili loma u odnosu na referentni neojačani uzorak(narančasta linija)

## 4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM



Slika 16. Utjecaj različitih ojačanja na krajnju silu loma u odnosu na referentni neojačani uzorak(narančasta linija)

### 4.2. Efektivna krutost (EI)

Efektivna krutost se može definirati kao mjera sposobnosti konstrukcijskog elementa da se odupre opterećenjima s tendencijom manjih deformacija. Što znači da uspoređujući vrijednosti efektivne krutosti za dva elementa, možemo zaključiti da onaj sa većom vrijednosti ima relativno manje deformacije pri istoj razini opterećenja. Izračun efektivne krutosti (EI) za sve ispitane uzorke se bazira na sili ( $F$ ) i pomaku ( $\delta$  pri sili  $F$ ) u svakoj točki prilikom opterećenja uzoraka. Efektivna krutost (EI) je izračunata pomoću sljedeće formule:

$$EI = \frac{Fa}{24\delta} (3L^2 - 4a^2),$$

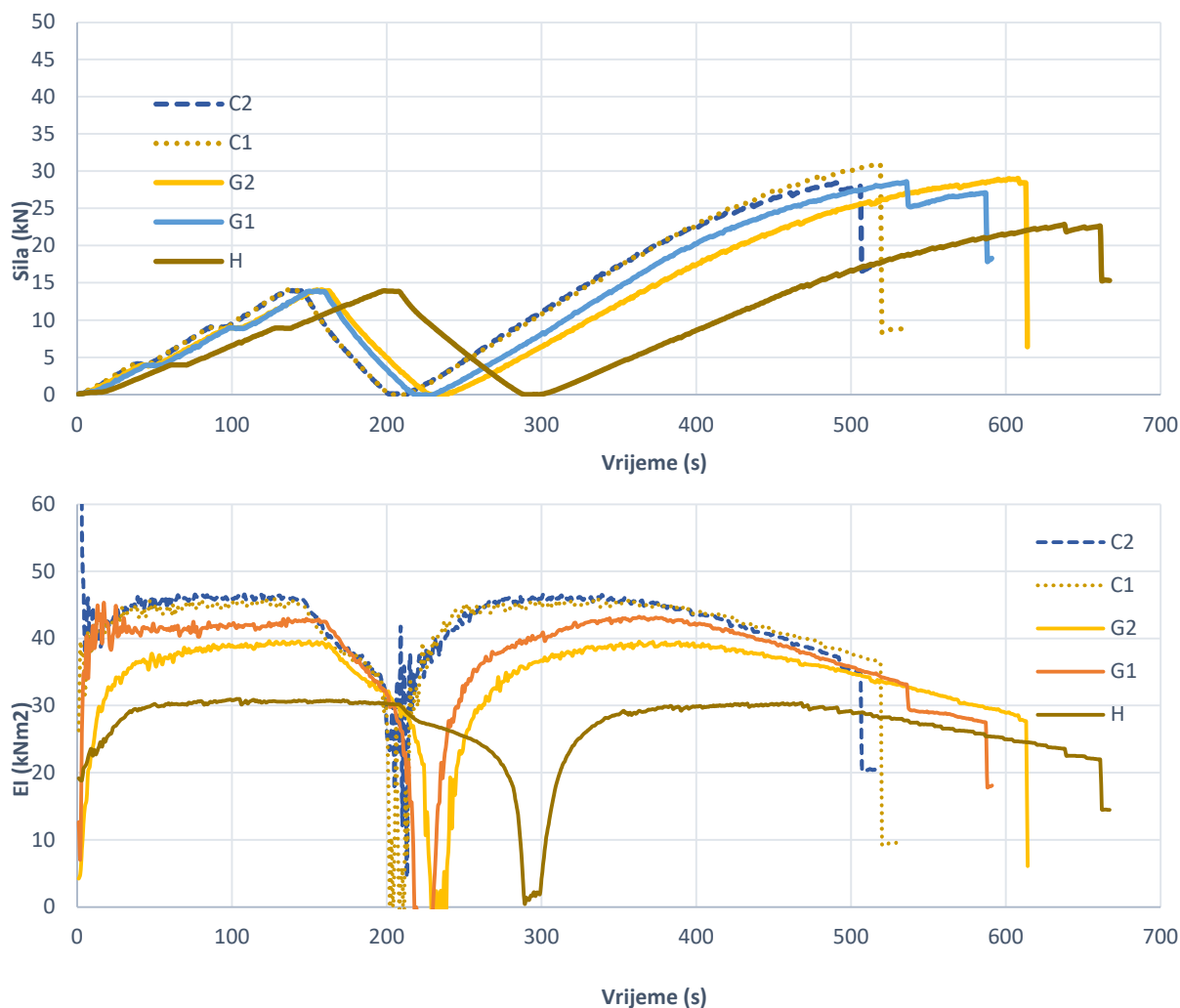
u kojoj EI označava efektivnu krutost izražen u  $\text{kNm}^2$ ,  $F$  je sila kojom je djelovano na uzorak u  $N$ ,  $a$  označava najkraću udaljenost između mjesta djelovanja sile i oslonca (mm),  $\delta$  je pomak pri sili  $F$  u mm, i  $L$  dužinu uzorka

| <i>Efektivna krutost EI</i> |                |                        |                        |         |                      |
|-----------------------------|----------------|------------------------|------------------------|---------|----------------------|
| Oznaka                      | Opis           | EI (kNm <sup>2</sup> ) | SD (kNm <sup>2</sup> ) | C.V.(%) | U odnosu na drvo (%) |
| C2                          | CFRP 60 2x PUR | 45,02                  | 2,96                   | 6,58    | 52,87                |
| C1                          | CFRP 60 1x PUR | 45,94                  | 2,74                   | 5,97    | 55,99                |
| G2                          | GFRP 60 2x PUR | 40,44                  | 2,16                   | 5,34    | 37,32                |
| G1                          | GFRP 60 1x PUR | 43                     | 1,35                   | 3,13    | 46,01                |
| H                           | Hrast          | 29,45                  | 2,64                   | 8,98    | -                    |

Tablica 3. Pregled efektivnih krutosti, njenih standardnih devijacija, koeficijenata varijacije, i odnosa sa neojačanim drvo

#### 4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM

Vrijednost efektivne krutosti  $EI$  su u rasponu od  $29 \text{ kN m}^2$  za neojačani uzorak, do  $46 \text{ kN m}^2$  za uzorak ojačan jednim slojem karbonskih vlakana (C1), što je vidljivo na slici 17. Slika 17. grafički prikazuje kako pojedino ojačanje utječe na mehaničko svojstvo čvrstoću tijekom samog ispitivanja. Kraće vrijeme potrebno za dostizanje većeg opterećenja pokazuje povećanja krutosti kod uzoraka sa nekom vrstom ukrute. Uzorci sa umetkom od karbonskih vlakana (C1 i C2) imaju nešto izraženiji utjecaj na efektivnu krutost od uzoraka sa staklenim vlaknima (G1 i G2). Razlika je primjetna na slici, gdje krivulje C1 i C2 imaju sličnu vrijednost koja je nešto viša od ostalih.



Slika 17. Kretanja vrijednosti sila i efektivnih krutosti ( $EI$ ) za različita ojačanja tijekom ispitivanja

Tablica 3. prikazuje efektivnu krutost kao prosjek dominantne vrijednosti za svaki ispitani uzorak, i može se smatrati gotovo konstantom unutar elastičnog područja.  $EI$  doseže maksimalnu vrijednost brzo nakon početka djelovanja sile u prvoj i drugoj fazi opterećivanja uzoraka. Optimalno ojačanje u ovome slučaju, uzmemo li u obzir poboljšanje svojstava i uloženog materijala, je uzorka G1 (1 sloj GFRP). Kod istog uzorka efektivna krutost iznosi  $43 \text{ kN m}^2$  (poboljšanje od 46,01% u odnosu na uzorak H) što je za nepunih 5 % lošiji rezultat od uzorka sa 2 sloja CFRP (C2).

Novosel i ostali (2021.) u svome istraživanju za uzorke G4 (2 x 60 mm GFRP+EPO) i

#### 4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM

G5 (1 x 60 mm GFRP+EPO) bilježe porast EI u odnosu na referentni uzorak za 51 % i 40 %. Uzmemo li u obzir kompleksnost uporabe dvokomponentne epoksidne smole i cijene iste, dovodi se u pitanje isplativost korištenja tako kompleksnog sustava ojačanja za ne tako znatno poboljšanje u odnosu na sustave sa PUR lijepilo.

### 4.3. Usporedba deformacija pri istom opterećenju

Da bi usporedili deformacije pri istom opterećenju u tablici 4 su prikazane vrijednosti po jednog reprezentativnog uzorka za svaku vrstu ojačanja pri tri nasumično odabrane sile. Sile iznose 25 % (5,71kN), 50 % (11,42kN), i 100 % vrijednosti sile loma referentnog uzorka (22,84 kN). Ova usporedba je napravljena jer vrijednosti pomaka pri krajnjoj sili loma prikazane u tablici nisu relevantan pokazatelj utjecaja ojačanja, iz razloga što su te iste vrijednosti dobijene pri različitim silama opterećenja . Tablica 4. jasno pokazuje kako u elastičnom području sve vrste ojačanja pokazuju znatno smanjenje deformacija nego li je to slučaj kod neojačanih elemenata. Pri iznosu sile od 22,84 kN, smanjenje deformacija varira u rasponu od 31 % do 42 % .

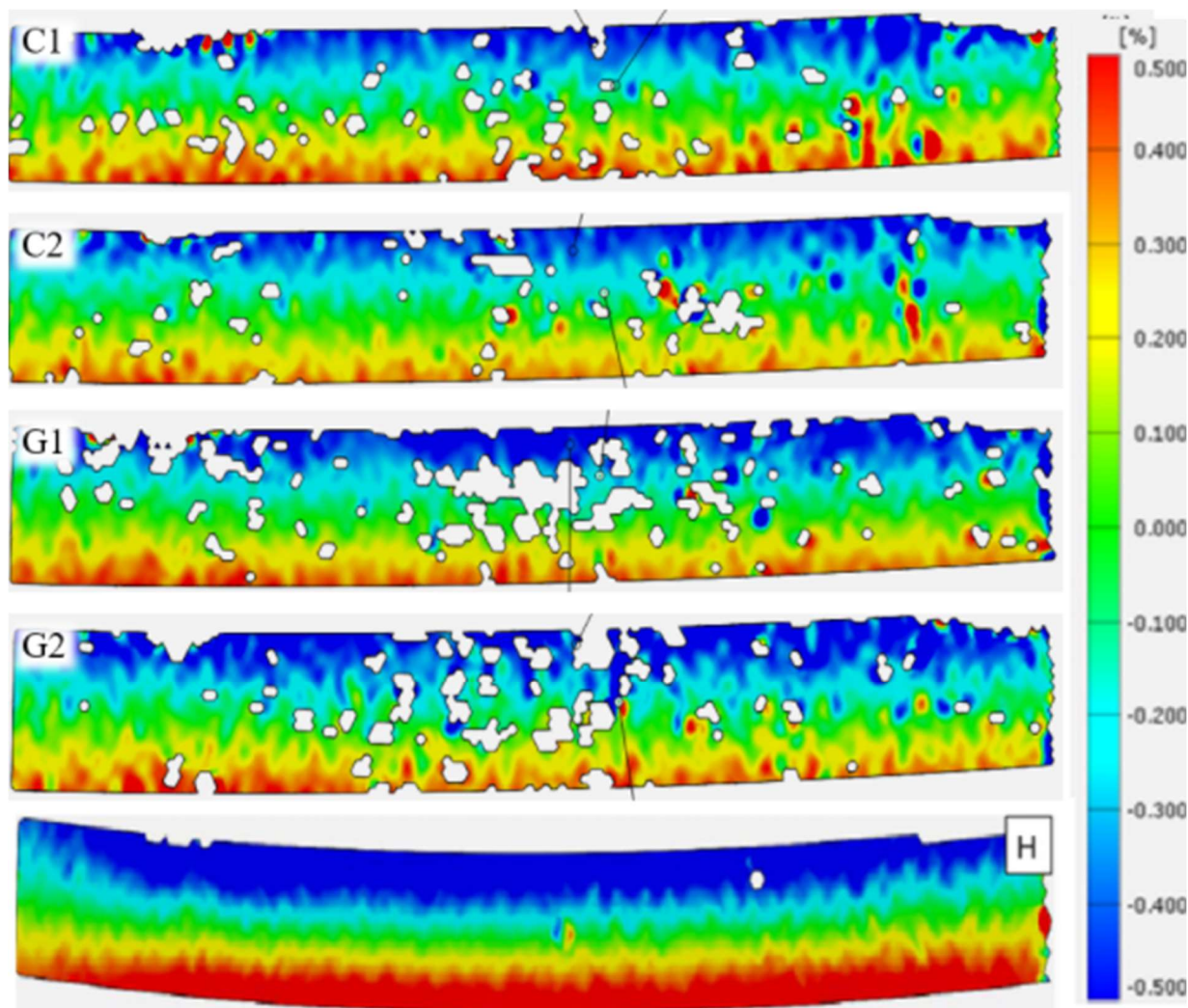
*Pomak (mm) pri različitim silama (kN)*

| Oznaka    | Sila 5,71<br>kN | U odnosu na<br>drvo (25% $F_{max}$<br>hrast), % | Sila 11,42<br>kN | U odnosu na<br>drvo (50% $F_{max}$<br>hrast), % | Sila 22,84<br>kN | U odnosu na<br>drvo (100%<br>$F_{max}$ hrast), % |
|-----------|-----------------|---|------------------|---|------------------|--|
| <i>C2</i> | 4,3988          | -45,2882  | 8,3651           | -37,9901  | 17,6821          | -42,0258   |
| <i>C1</i> | 4,3757          | -45,5762  | 8,5501           | -36,6190  | 17,5379          | -42,4988   |
| <i>G2</i> | 5,3776          | -33,1142  | 9,9093           | -26,5430  | 20,8641          | -31,5932   |
| <i>G1</i> | 4,9236          | -38,7606  | 9,1817           | -31,9371  | 18,9144          | -37,9857   |
| <i>H</i>  | 8,04            | -   | 13,49            | -   | 30,5             | -  |

Tablica 4. Pregled pomaka ojačanih i neojačanih referentnih gredica (H) pri različitim silama

Bitno je napomenuti da kao i kod prethodno komentiranih rezultata, broj slojeva nije proporcionalan krutosti uzorka. Pa tako G1 bilježi manje deformacije u odnosu na G2. Uzorci sa karbonskim ukрутama C1 i C2 bilježe gotovo identične vrijednosti kod sve tri sile. Karbonska vlakna smanjuju deformacije u odnosu na H za 36 % do 42 %, ovisno o opterećenju. Vrijednost smanjenja deformacija za uzorke sa staklenim vlaknima je u rasponu od 26 % do 38 %. Iz podataka je jasno vidljivo da karbonska vlakna imaju bolji učinak na poboljšanje čvrstoće i krutosti lameliranih elemenata. No efekt staklenih vlakana nije znatno lošiji, posebno ako uzmemo u obzir da u ovome slučaju jedan sloj GFRP ima bolje rezultate. Usporedimo li cijenu ta dva materijala, staklena vlakna se zasigurno nameću kao materijal čije korištenje je opravdano u raznim primjenama.





Slika 18. Relativne aksijalne deformacije referentnih ojačanih elemenata pri 22,8 kN što je krajnja sila loma neojačanog drva (oznaka H)

Slika 18. jasno pokazuje da umetanje ukruta u lamelirane elemente rezultira značajno smanjenje naprezanja u elementima, samim time elementi sa ojačanjima se primjetno manje deformiraju pri istom opterećenju. Na grafičkom prikazu crvenom bojom su prikazane distribucije vlačnih deformacija, dok plava boja označava tlačne deformacije. Uzorak sa oznakom C2 pokazuje najveće smanjene naprezanja u tlačnoj i vlačnoj zoni pri opterećenju koje je jednako krajnjoj sili loma referentnog uzorka. Između preostala tri uzorka nisu vidljive značajne razlike u distribuciji deformacija.

#### 4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM

---



Slika 19. Referentni uzorak svake od grupa ispitanih uzoraka nakon loma

### 5. ZAKLJUČAK

Rezultati istraživanja jasno pokazuju značajan utjecaj ojačanja od staklenih i karbonskih vlakana na mehanička svojstva lameliranih hrastovih elemenata. Korištenje poliuretanskog ljepila u kombinaciji s vlaknima pokazalo je potencijal u poboljšanju čvrstoće i krutosti elemenata u odnosu na standardne neojačane uzorke.

Dodavanje karbonskih vlakana rezultiralo je povećanjem čvrstoće na savijanje do 41,20% za uzorak s jednim slojem CFRP (C1) i 29,42% za uzorak s dva sloja CFRP (C2) u odnosu na neojačane uzorke. U slučaju staklenih vlakana, poboljšanje čvrstoće bilo je 29,92% za uzorak s jednim slojem GFRP (G1) i 32,01% za uzorak s dva sloja GFRP (G2). Iako je dodatak drugog sloja vlakana doveo do određenog povećanja čvrstoće, rezultati pokazuju da povećanje broja slojeva ne donosi proporcionalno poboljšanje u čvrstoći.

Slično, u pogledu smanjenja deformacija pri krajnjoj sili loma, uzorci s karbonskim vlaknima pokazali su smanjenje deformacija između 36% i 42% u odnosu na neojačane uzorke, dok su uzorci s staklenim vlaknima smanjili deformacije između 26% i 38%.

Efektivna krutost uzoraka s karbonskim vlaknima kretala se između 45,02 kNm<sup>2</sup> za uzorak s dva sloja CFRP (C2) i 45,94 kNm<sup>2</sup> za uzorak s jednim slojem CFRP (C1), što je poboljšanje od gotovo 56% odnosno 53% u odnosu na neojačani uzorak (29,45 kNm<sup>2</sup>). Uzorci sa staklenim vlaknima imali su efektivnu krutost u rasponu od 40,44 kNm<sup>2</sup> za uzorak s dva sloja GFRP (G2) i 43,00 kNm<sup>2</sup> za uzorak s jednim slojem GFRP (G1), s poboljšanjem od 37,32% i 46,01% u odnosu na neojačani uzorak. Iz rezultata zaključujemo da dodatni drugi sloj ne pridonosi daljnjem povećanju krutosti elementa.

Važno je naglasiti da usporedbom sa dosadašnjim istraživanjima poliuretansko ljepilo, iako manje kompleksno od epoksidnih smola, pokazuje uspješnu primjenu i donosi rezultate vrlo bliske onima postignutim s epoksidnom smolom, uz zanemarive razlike u performansama. To dokazuje i vrijednost efektivne krutosti uzorka ojačanog sa jednim slojem GFRP i epoksidnom smolom, koja iznosi 41,25 kNm<sup>2</sup>, dok kod uzorka sa poliuretanskim ljepilom iznosi 43,00 kNm<sup>2</sup>.

Ojačanje lameliranih elemenata staklenim i karbonskim vlaknima, uz korištenje poliuretanskog ljepila predstavlja pogodno rješenje za poboljšanje mehaničkih svojstava drvenih građevnih elemenata. Staklena vlakna, zbog svoje povoljnije cijene i dobrih performansi, se nameću kao isplativo rješenje, dok karbonska vlakna pružaju vrhunske rezultate, iako zbog većih troškova su pogodnija za specijalne primjene. Poliuretansko ljepilo, s obzirom na svoju jednostavnost primjene i ekonomičnost, nudi značajnu prednost u industrijskoj primjeni, čime se otvara put za daljnja ispitivanja i optimizaciju kompozitnih materijala u kontekstu održivosti i ekonomske isplativosti.

**LITERATURA**

1. Knorz, M.: *Verklebung von Buche und Esche für tragende Holzbauteile*, 18 Internationales Holzbau-Forum, GarmischPartenkirchen, 2012.
2. Ljuljka, B. i Turkulin, H. (1987). *Tradicionalna primjena hrastovine*. Glasnik za šumske pokuse, posebno izdanje: Annales pro experimentis foresticis editio peculiaris, 3., 415-437. <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:108:963038>
3. Nadir Y., Nagarajan P., Ameen M., Arif M., (2016). Flexural stiffness and strength enhancement of horizontally glued laminated wood beams with GFRP and CFRP composite sheets, *Construction and Building Materials*, Volume 112, Pages 547-555, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.133>.
4. Novosel, A., Sedlar T., Čizmar D., Turkulin H., Živković V. (2021) *Structural reinforcement of bi-directional oak-wood lamination by carbon fibre implants*, *Construction and Building Materials*, Volume 287, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123073>.
5. Novosel, A., Sedlar, T., Čizmar, D., Turkulin, H., Živković, V., (2023) Improvement of mechanical properties of oak-wood by bi-directional laminations - Efficacy of standard and prestressed glass fibre implants. *Composite Structures*, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116465>
6. Ribeiro S.A., Jesus A.M.P., Lima A.M., Lousada J.L.C., (2009) Study of strengthening solutions for glued-laminated wood beams of maritime pine wood, *Construction and Building Materials*, Volume 23, Issue 8, Pages 2738-2745, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.042>.
7. Šedivka, P., Bomba, J.G., Böhm, M., & Zeidler, A. (2015). Determination of Strength Characteristics of Construction Timber Strengthened with Carbon and Glass Fibre Composite Using a Destructive Method. *Bioresources*, 10, 4674-4685.
8. Yusof, A. & Saleh, A.L.. (2010). Flexural Strengthening of Timber Beams Using Glass Fibre Reinforced Polymer. *Electronic Journal of Structural Engineering*. 10. 45-56. 10.56748/ejse.10124.