**SVEUČILIŠTE U SPLITU**

**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

**Jelena Lovrić Vranković, mag.ing.aedif.**

# ISTRAŽIVANJE PRIMJENE DRVA GRABA (*Carpinus betulus* L.) IZ HRVATSKE ZA PROIZVODNJU LIJEPLJENIH LAMELIRANIH NOSAČA

**D i s e r t a c i j a**

**Split, 2025.**

Jelena Lovrić Vranković, mag.ing.aedif.

Redni broj: 061

**Ova disertacija predana je na ocjenu**
**Sveučilištu u Splitu,**
**Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije**
**u svrhu stjecanja akademskog stupnja**
**doktora tehničkih znanosti u**
**znanstvenom polju građevinarstvo**

**Mentor:** izv. prof. dr. sc. Ivana Uzelac Glavinić

**Komentor:** prof. dr. sc. Ivica Boko

**Povjerenstvo za ocjenu:**

prof. dr. sc. Alen Harapin

izv. prof. dr. sc. Nikola Grgić

izv. prof. dr. sc. Dean Čizmar

**Povjerenstvo za obranu:**

prof. dr. sc. Alen Harapin

izv. prof. dr. sc. Nikola Grgić

izv. prof. dr. sc. Dean Čizmar

Rad je obranjen dana xx. mjesec 20xx.

Tajnica:

Saša Delić, dipl. iur.

**Rad sadrži:**

124 stranice teksta

20 fotografija

9 crteža

34 grafikona

25 tablica

159 citiranih referenci

# Zahvala

UDK 624.011.1.072.2.078.43:624.041](043.3)

624.011.1.078.43:(582.632.1/.2+582.746.51)]:624.042.12](043.3)

Jelena Lovrić Vranković, mag.ing.aedif.

# Istraživanje primjene drva graba (*Carpinus betulus* L.) iz Hrvatske za proizvodnju lijepljenih lameliranih nosača

**Sažetak:**

Globalno povećanje temperatura kao posljedica klimatskih promjena i nacionalne šumske politike mijenjaju distribuciju šuma u korist bjelogoričnih vrsta (listače, engl. *hardwoods*). Određene crnogorične vrste drva (četinjače, engl. *softwoods*) dosad su prevladavale u proizvodnji nosivih konstrukcija, ali sukladno navedenim promjenama i s ciljem dugoročno održivog gospodarenja šumama, istraživanja proizvoda na bazi listača su se intenzivirala u posljednjih 15-ak godina. U Europi je tijekom tog razdoblja provedeno nekoliko projekata koji su značajno unaprijedili razumijevanje mehaničkih svojstava lijepljenih lameliranih nosača od listača ukazujući na potrebu prilagodbe dosadašnjih europskih propisa. Istraživanjima su dokazana superiorna mehanička svojstva listača što bi moglo doprinijeti optimizaciji i izradi estetski privlačnijih i vitkijih nosača te povećanju upotrebe tvrdog drva kao nosivog materijala naspram manje ekološki prihvatljivih materijala. Hrvatska ima jedan od većih udjela bjelogoričnih vrsta drva, približno 82%, ali trenutno neiskorištenih kao građevinski materijal. Za potrebe ove disertacije proizvedene su lijepljene lamelirane grede od graba (*Carpinus betulus* L.), hrasta cera (*Quercus cerris* L.) i javora (*Acer campestre* L.), a koje su eksperimentalno testirane na savijanje u 4 točke u svrhu određivanja mehaničkih svojstava. Potvrđene su više vrijednosti čvrstoća na savijanje u odnosu na karakteristične vrijednosti čvrstoća na savijanje lijepljenih lameliranih nosača od četinjača, trenutno dostupnih u europskim standardima. Na osnovu provedenih vlačnih testova lamela graba, predložena su pravila za razvrstavanje lamela graba u vlačne klase čvrstoće pri čemu su uočene više vrijednosti vlačnih čvrstoća u odnosu na lamele četinjača. U svrhu osiguranja kvalitete lijepljenog spoja, provedeni su posmični testovi lijepljenih površina segmenata lijepljenih lameliranih uzoraka, a koji su ukazali na nužnost primjene modifikacija u tehnologiji lijepljenja listača. Isto tako, provedeni testovi savijanja lijepljenih lameliranih greda od graba uslijed dugotrajnog opterećenja ukazuju na potrebu prilagodbe faktora deformacije za listače. Rezultati proizašli ovim istraživanjem doprinose poboljšanju nacionalnih i europskih normi za lijepljeno lamelirano drvo od graba, hrasta cera i javora, a time i potencijalu primjene istih u građevinskim konstrukcijama u budućnosti.

**Ključne riječi:** grab, javor, hrast cer, mehaničke karakteristike, lijepljeno lamelirano drvo

UDC 624.011.1.072.2.078.43:624.041](043.3)

624.011.1.078.43:(582.632.1/.2+582.746.51)]:624.042.12](043.3)

Jelena Lovrić Vranković, mag.ing.aedif.

# An investigation of European hornbeam (*Carpinus betulus* L.) from Croatia for the production of glued laminated timber beams

**Abstract:**

The global increase in temperatures due to climate change, along with national forest strategies, are reshaping forest ecosystems in favor of broadleaf species. Certain coniferous species have traditionally been the primary source for engineered wood products, but growing sustainability concerns and environmental changes have intensified research on broadleaf-based materials over the past 15 years. During this period, several projects in Europe have significantly improved the understanding of the mechanical properties of engineered wood products from broadleaf species, emphasizing the importance of adapting current European regulations. Experimental findings have confirmed the superior mechanical properties of broadleaf products, potentially enabling the development of optimized, slender, and aesthetically refined beams, as well as increasing the use of hardwood as a load-bearing material over less sustainable options. Croatia has one of the highest proportions of broadleaf tree species, approximately 82%. However, these species remain largely underutilized as construction material. In this dissertation, glued laminated beams were produced from European hornbeam, Turkey oak and maple, and subjected to four-point bending tests to determine their mechanical properties. The experimentally obtained bending strength values exceeded the characteristic bending strength values of glued laminated timber from coniferous species, as currently outlined in existing European standards. Based on tensile tests conducted on boards from European hornbeam, classification rules for their assignement to tensile strength classes were proposed, confirming superior tensile strength values compared to coniferous boards. To ensure the quality of glue lines, shear strength tests of glue lines were conducted on glued laminated segments, indicating the necessity for modifications in the hardwood bonding technology. Likewise, long-term loading tests on glued laminated timber beams from European hornbeam in bending suggest the need for adjusting the deformation factor for hardwoods.The findings of this study contribute to the improvement of national and European standards for glued laminated timber from European hornbeam, Turkey oak, and maple, thereby enhancing their potential application in future structural projects.

**Keywords:** European hornbeam, maple, Turkey oak, mechanical properties, glued laminated timber

# SADRŽAJ

1. UVOD ..... 1
1.1. Motivacija za izradu rada ..... 1
1.2. Općenito o drvu ..... 8
1.3. Prostorna distribucija šuma u Hrvatskoj i Europi ..... 11
1.4. Karakteristike lokalnih vrsta tvrdih drva ..... 13
1.5. Europski standardi za proizvodnju lijepljenih lameliranih nosača ..... 16
1.5.1. EN 14080 ..... 16
1.5.2. EAD 130320-00-0304 ..... 20
1.6. Hipoteza rada ..... 22
2. VLAČNI TESTOVI NA LAMELAMA GRABA ..... 24
2.1. Uvod ..... 24
2.2. Pregled dosadašnjih istraživanja u području ispitivanja lamela od listača na vlak ..... 25
2.3. Značajke ispitivanog materijala ..... 28
2.4. Nerazorne metode mjerenja parametara za određivanje mehaničkih karakteristika ..... 29
2.4.1. Vizualni parametri ..... 29
2.4.2. Gustoća ..... 30
2.4.3. Dinamički modul elastičnosti $Edyn$ ..... 32
2.5. Vlačni testovi na lamelama graba ..... 33
2.6. Analize za obradu podataka ..... 35
2.7. Rezultati vlačnih testova ..... 36
2.7.1. Modul elastičnosti paralelno s vlakancima ..... 36
2.7.2. Vlačna čvrstoća paralelno s vlakancima ..... 37
2.7.3. Modovi otkazivanja ..... 38
2.7.4. Korelacija između indikatora i ciljnih parametara ..... 40

2.7.5. Regresijski modeli za predviđanje mehaničkih karakteristika ..... 42
2.7.6. Prijedlog klasa čvrstoće lamela od graba ..... 45
3. KRATKOTRAJNO ISPITIVANJE NA SAVIJANJE LIJEPLJENIH LAMELIRANIH GREDA ..... 47
3.1. Pregled dosadašnjih istraživanja lijepljenih lameliranih nosača na savijanje ..... 47
3.2. Pregled dosadašnjih istraživanja u području osiguranja kvalitete lijepljenog spoja ..... 49
3.3. Posmični testovi na lijepljenim lameliranim uzorcima ..... 53
3.3.1. Proizvodnja lijepljenih lameliranih uzoraka ..... 53
3.3.2. Posmični testovi na lijepljenim lameliranim uzorcima ..... 56
3.3.3. Rezultati posmičnih testova na lijepljenim lameliranim uzorcima ..... 58
3.4. Testovi savijanja na lijepljenim lameliranim gredama ..... 60
3.4.1. Opis testova na savijanje ..... 60
3.4.2. Rezultati testova na savijanje ..... 63
4. DUGOTRAJNO ISPITIVANJE NA SAVIJANJE LIJEPLJENIH LAMELIRANIH GREDA 70
4.1. Uvod ..... 70
4.2. Modeliranje ponašanja drva pri dugotrajnom opterećenja ..... 74
4.3. Opis testova na dugotrajno opterećenje ..... 76
4.4. Rezultati ..... 78
4.4.1. Rezultati za prvu grupu uzoraka ..... 78
4.4.2. Rezultati za drugu grupu uzoraka ..... 81
5. DISKUSIJA O REZULTATIMA ISTRAŽIVANJA ..... 90
5.1. Opći dio ..... 90
5.2. Primjena TOPSIS metode za odabir najprikladnije vrste tvrdog drva među odabranim lokalnim vrstama za proizvodnju lijepljenih lameliranih nosača ..... 95
5.2.1. Opći dio ..... 95
5.2.2. Opis kriterija ..... 96
5.2.3. Postupak i rezultati TOPSIS metode ..... 97

6. ZAKLJUČCI I MOGUĆE SMJERNICE ZA DALJNJA ISTRAŽIVANJA ..... 101
6.1. Zaključci istraživanja ..... 101
6.2. Smjernice za daljnja istraživanja ..... 104
7. LITERATURA ..... 106
8. POPIS ILUSTRACIJA ..... 117
8.1. Popis Fotografija ..... 117
8.2. Popis Tablica ..... 119
8.3. Popis Grafikona ..... 121
8.4. Popis Crteža ..... 124

# POPIS OZNAKA

## Kratice

| | |
|---|---|
| ANOVA | Analiza varijance |
| C.. | Klasa čvrstoće za puno drvo od četinjača (savijanje)p |
| CEN | Europski odbor za normizaciju |
| CLT | Križno lamelirano drvo |
| D.. | Klasa čvrstoće za puno drvo od listača (savijanje) |
| DAB | Omjer zbroja vidljivih širina pojedinačne kvrge na plohama lamele i dvostruke širine lamele |
| DEB | Omjer zbroja vidljivih širina skupine kvrgi na plohama lamele i dvostruke širine lamele unutar duljine lamele od 150 mm |
| DIN | Njemački standard ('*Deutsches Institut für Normung*') |
| DT.. | Klasa čvrstoće za puno drvo od listača (vlak) |
| EAD | Europski dokument za ocjenjivanje |
| EC5 | Eurocode 5, EN 1995-1-1 |
| EOTA | Europska organizacija za tehnička dopuštenja |
| ETA | Europska tehnička ocjena |
| Gl..c | Klasa čvrstoće za lijepljeno lamelirano drvo s homogenim rasporedom lamela |
| Gl..h | Klasa čvrstoće za lijepljeno lamelirano drvo s kombiniranim rasporedom lamela |
| KAR | Omjer površine pojedinačne kvrge i poprečnog presjeka lamele |
| KVH | Konstruktivno cjelovito drvo |
| LAR | Metoda najmanjih apsolutnih reziduala |
| LLD | Lijepljeno lamelirano drvo |
| LS.. | Klasa određene vizualnom klasifikacijom |
| LVDT | Linearni varijabilni diferencijalni transformator |
| LVL | Lijepljeni lamelirani furnir |

| | |
|---|---|
| max | Maksimalna vrijednost |
| min | Minimalna vrijednost |
| mlm | Metoda maksimalne vjerodostojnosti (engl. '*maximum likelihood method*') |
| MOE | Modul elastičnosti |
| P | Oznaka za površinu obrade lamela - blanjanje |
| BR60 | Oznaka za površinu obrade lamela - brušenje s granulacijom 60 (grubo brušenje) |
| BR80 | Oznaka za površinu obrade lamela - brušenje s granulacijom 80 (fino brušenje) |
| T.. | Klasa čvrstoće za puno drvo od četinjača (vlak) |
| tKAR | Omjer površine skupine kvrgi i poprečnog presjeka lamele unutar duljine lamele od 150 mm |
| TZV | Točka zasićenosti vlakana |

**Velika latinična slova**

| | |
|---|---|
| $A$ | Površina |
| CoV | Koeficijent varijacije |
| $E_{\mathrm{dyn}}$ | Dinamički modul elastičnosti |
| $E_{dyn,max}$ | Maksimalna vrijednost dinamičkog modula elastičnosti |
| $E_{dyn,mean}$ | Srednja vrijednost dinamičkog modula elastičnosti |
| $E_{dyn,min}$ | Minimalna vrijednost dinamičkog modula elastičnosti |
| $E_{dyn,0.05}$ | 5. percentil dinamičkog modula elastičnosti |
| $E_{dyn,12}$ | Dinamički modul elastičnosti pri referentnoj vlažnosti od 12% |
| $E_{\mathrm{m}}$ | Modul elastičnosti pri savijanju |
| $E_{\mathrm{m,g}}$ | Globalni modul elastičnosti pri savijanju |
| $E_{\mathrm{m,g,05}}$ | 5. percentil globalnog modula elastičnosti pri savijanju |
| $E_{\mathrm{m,local}}$ | Lokalni modul elastičnosti pri savijanju |
| $E_{\mathrm{m,l,05}}$ | 5. percentil lokalnog modula elastičnosti pri savijanju |

| | |
|---|---|
| $E_{t,0}$ | Modul elastičnosti paralelno s vlakancima pri vlaku |
| $E_{t,05}$ | 5. percentil modula elastičnosti pri vlaku |
| $E_{t,0,max}$ | Maksimalna vrijednost modula elastičnosti paralelno s vlakancima pri vlaku |
| $E_{t,0,mean}$ | Srednji modul elastičnosti paralelno s vlakancima pri vlaku |
| $E_{t,0,min}$ | Minimalna vrijednost modula elastičnosti paralelno s vlakancima pri vlaku |
| $F$ | Sila |
| $F_{max}$ | Maksimalna sila (sila pri kojoj deformacije rastu bez daljnjeg povećanja sile) |
| $G$ | Modul posmika |
| $I$ | Moment tromosti |
| $R_d$ | Računska nosivost |
| $R_k$ | Karakteristična nosivost |
| $R^2$ | Koeficijent determinacije |
| $SD_{E_{m,global}}$ | Standardno odstupanje vrijednosti globalnog modula elastičnosti |
| $SD_{E_{m,local}}$ | Standardno odstupanje vrijednosti lokalnog modula elastičnosti |
| $SD_{f_{m,g}}$ | Standardno odstupanje vrijednosti čvrstoće na savijanje |
| $W$ | Moment otpora poprečnog presjeka |
| $WFP_{mean}$ | Srednja vrijednost postotka otkazivanja po drvu |
| $WFP_{10}$ | 10. percentil postotka otkazivanja po drvu |

**Mala latinična slova**

| | |
|---|---|
| $a$ | Regresijski koeficijent |
| $b$ | Širina poprečnog presjeka / regresijski koeficijent |
| $c$ | Regresijski koeficijent |
| $d$ | Regresijski koeficijent |
| $e$ | Regresijski koeficijent |

| | |
|---|---|
| $h$ | Visina poprečnog presjeka |
| $f_{m,g}$ | Čvrstoća na savijanje lijepljenog lameliranog drva |
| $f_{m,g,k}$ | Karakteristična čvrstoća na savijanje lijepljenog lameliranog drva |
| $f_{m,j,k}$ | Karakteristična čvrstoća na savijanje zupčastog spoja |
| $f_{t,0}$ | Vlačna čvrstoća paralelno s vlakancima |
| $f_{t,0,k}$ | Karakteristična vlačna čvrstoća paralelno s vlakancima |
| $f_{t,0,max}$ | Maksimalna vrijednost vlačne čvrstoće paralelno s vlakancima |
| $f_{t,0,mean}$ | Srednja vrijednost vlačne čvrstoće paralelno s vlakancima |
| $f_{t,0,min}$ | Minimalna vrijednost vlačne čvrstoće paralelno s vlakancima |
| $f_{t,05}$ | 5. percentil vlačne čvrstoće paralelno s vlakancima |
| $f_{v,b,mean}$ | Srednja posmična čvrstoća lijepljenog spoja |
| $f_{v,b,05}$ | 5. percentil posmične čvrstoće lijepljenog spoja |
| $f_{v,w,mean}$ | Srednja posmična čvrstoća drva |
| $f_{v,w,05}$ | 5. percentil posmične čvrstoće drva |
| $h_{ref}$ | Referentna visina |
| $k$ | Broj regresijskih koeficijenata |
| $k_h$ | Korekcijski faktor visine |
| $k_{mod}$ | Koeficijent modifikacije |
| $l$ | Duljina / raspon |
| $l_{kp}$ | Duljina steznih čeljusti |
| $l_1$ | Udaljenost između pozicije nanošenja opterećenja i bližeg ležaja |
| $n$ | Broj uzoraka |
| $p$ | Percentil u funkciji distribucije |
| $t$ | Debljina lamela |
| $u$ | Sadržaj vode u drvu / pomak |

| | |
|---|---|
| $u_{inst}$ | Trenutna deformacija |
| $u_{fin}$ | Konačna deformacija |
| $v$ | Brzina prolaska ultrazvučnog vala od jednog do drugog kraja lamele |
| $w$ | Širina poprečnog presjeka |

**Mala grčka slova**

| | |
|---|---|
| $\beta_{\mathrm{i}}$ | Regresijski koeficijenti |
| $\rho_k$ | Karakteristična vrijednost gustoće |
| $\rho_{mean}$ | Srednja vrijednost gustoće |
| $\rho_{max}$ | Maksimalna vrijednost gustoće |
| $\rho_{min}$ | Minimalna vrijednost gustoće |
| $\rho_{05}$ | 5. percentil gustoće |
| $\sigma$ | Standardna devijacija; Naprezanje |
| $\sigma_\varepsilon$ | Standardna devijacija pogreške |
| $\sigma_{\mathrm{m}}$ | Naprezanje uslijed savijanja |
| $\gamma_M$ | Parcijalni koeficijent sigurnosti za materijal |

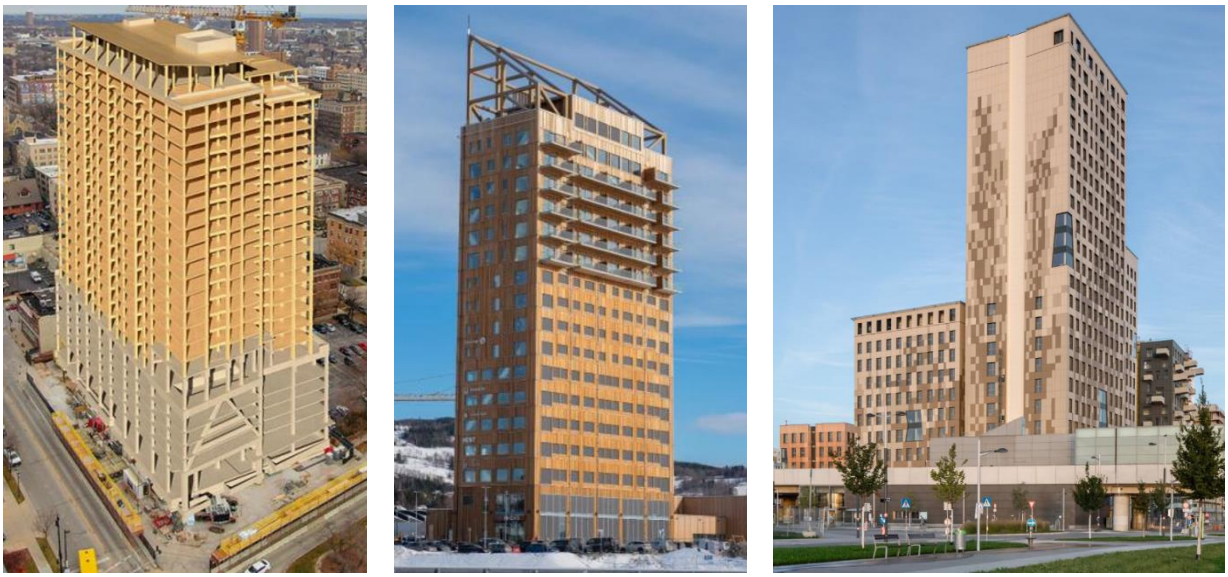
# 1. UVOD

## 1.1. Motivacija za izradu rada

Tijekom proteklih desetljeća povećana je svijest o osjetljivosti okoliša. Drvo je ekološki prihvatljiv materijal koji igra ključnu ulogu u održivoj gradnji, pridonoseći smanjenju emisija stakleničkih plinova i energetskoj učinkovitosti. Donošenjem strategije Pariškog sporazuma 2015. god. [1], Europska unija (EU) obvezala se prepoloviti emisije stakleničkih plinova do 2030. god. u odnosu na 1990. god. i postići neto nultu emisiju $CO_2$ do 2050. god. Ovaj izazov postaje još složeniji s obzirom na predviđeni porast urbanog stanovništva za 2,5 milijardi ljudi do 2050. godine [2]. Prema izvješću Ujedinjenih naroda (UN) i Međunarodne agencije za energiju, građevinski sektor generira 35% otpada proizvedenog širom svijeta i odgovoran je za 39% globalnih emisija $CO_2$, od čega 20% generiraju građevinski materijali [3]. Neka od rješenja za smanjenje emisija stakleničkih plinova usmjerena su na održivo šumarstvo, korištenje autohtonih vrsta drva i smanjenje transporta. Proizvodi na biološkoj osnovi, osim što su obnovljivi, imaju dugotrajan kapacitet skladištenja ugljika i nude mogućnost zamjene materijala s visokim emisijama ugljikovog dioksida ($CO_2$), osobito kada se koriste u građevinskim materijalima [4]. Tržišni zahtjevi za "*eco-friendly*" proizvodima eksponencijalno su porasli tijekom godina što rezultira širom primjenom ekoloških materijala i gradnji zgrada visoke energetske učinkovitosti. Kako tranzicija prema bioekonomiji EU dobiva na zamahu, očekuje se povećanje potražnje za drvom [5]. Globalni porast temperatura, sve učestaliji ekstremni vremenski fenomeni i klimatske promjene značajno utječu na raspodjelu šumskih ekosustava. Zbog složenosti čimbenika koji

oblikuju ovaj proces, dugoročne posljedice za šume još uvijek nisu u potpunosti predvidljive.

Zahvaljujući poboljšanoj učinkovitosti materijala i inovacijama u proizvodnji, drvo se danas sve više afirmira kao održiv izbor u planiranju ekološki osviještenih gradova. Značajni projekti, poput tornja *Ascent* u SAD-u visine 87 m (Fotografija 1.1.a)), zgrade *Mjøstårnet* u Norveškoj visine 85 m (Fotografija 1.1.b)), tornja *HoHo* u Austriji visine 84 m (Fotografija 1.1.c)), centra *Sara Kulturhus* u Švedskoj (75 m) i dr., uspješno su demonstrirali da drvo može biti održiva alternativa najčešće korištenim građevinskim materijalima - čeliku i betonu, pretvarajući urbane prostore iz izvora ugljika u ponore ugljika. Navedeni projekti pokazuju da je tehnologija za visoke drvene konstrukcije dostupna već godinama, ali skepticizam prema drvu i konzervativni građevinski propisi često usporavaju njegovu širu primjenu. Prefabrikacija, moderne strategije stabilizacije, ekonomičnost i ekološke prednosti dodatno osnažuju drvo kao ključni građevinski materijal za budućnost.



a) b) c)

Fotografija 1.1 Značajni projekti drvenih zgrada: a) Ascent u SAD-u [6], b) Mjøstårnet u Norveškoj [7], c) HoHo u Austriji [8]

Većina objekata od drva izrađena je od mekih drva - četinjača (crnogorica), a što se ogleda u činjenici da cca 5% proizvoda na bazi drva čine proizvodi od tvrdih drva – listača (bjelogorica) [9]. U sklopu ovog rada istražene su neke od mehaničkih karakeristika lijepljenog lameliranog drva (LLD) kao jednog od najčešće korištenih proizvoda na bazi drva za nosive konstrukcije, i to od lokalnih vrsta listača. Naime, postojeći europski standardi uključuju zahtjeve za proizvodnju lijepljenih lameliranih proizvoda od mekih drva i topole. Isto tako, procesi obrade drva nisu prilagođeni tvrdim vrstama drva zbog razlike u tvrdoći, gustoći, anatomskoj i kemijskoj građi u

odnosu na meka drva. Iako se većina istraživanja proizvoda na bazi tvrdog drva provodi posljednjih petnaestak godina, ideja primjene tvrdih drva za inženjerske proizvode nije nova [10]. Tvrdo drvo pronalazimo u povijesnim građevinama kao što su piloti u Veneciji, krovna konstrukcije crkve Notre Dame u Parizu (Fotografija 1.2.a)), Westminsterska opatije (Fotografija 1.2.b)), Brunelleschijeve kupole u Rimu, pa do modernih visokotehnoloških rješenja kao što su zgrada Tamedia u Zurichu (Fotografija 1.2.c)) i Lord's Cricket Ground u Londonu (Fotografija 1.2.d)).

a)

b)

c)

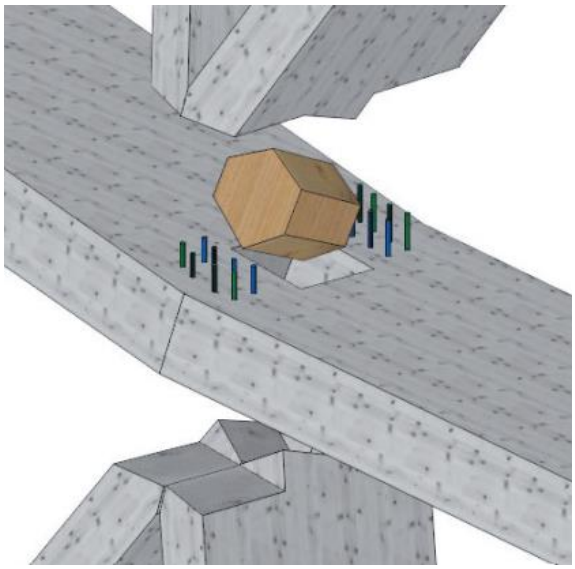
d)

Fotografija 1.2 a) Notre Dame u Parizu [11], b) opatija Westminster [12], c) zgrada Tamedia u Zurich-u, konstrukcija od LVL od bukve [13]; d) Lord's Cricket Ground u Londonu, konstrukcija od hrasta [14]

Osim Venecije, gradovi poput Amsterdama i Rotterdama izgrađeni su na pilotima od hrasta, a koji predstavlja jednu od najotpornijih vrsta drva na vlagu. Trajnost hrasta u uvjetima konstantne izloženosti vodi je do cca 800 godina. Razvoj novih tehnologija i kompozitnih elemenata na bazi drva omogućili su proizvodnju elemenata većih dimenzija i provedbu projekata višekatnih zgrada.

Vitkiji presjeci elemenata od tvrdih drva, u usporedbi s ekvivalentima od mekog drva, omogućuju stvaranje arhitektonski sofisticiranih konstrukcija (Fotografija 1.3.a) i b)).

a)



b)

Fotografija 1.3 Crkva St. Josef Parish Church, Holzkirchen; a) elementi bukve b) 3D prikaz čvora - šperploča od bukve [15]

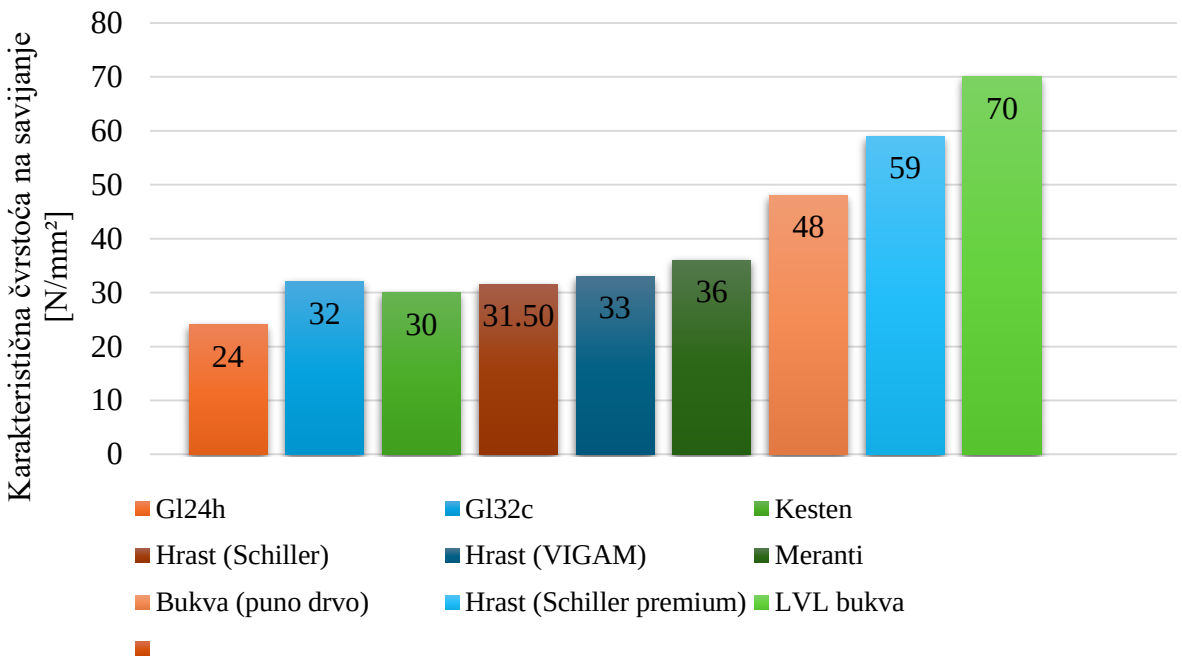
Krajem 19. stoljeća raspravljalo se o primjeni bukve u građevinarstvu, a prva znanstvena istraživanja o nosivosti LLD-a od bukve provedena su 60-tih godina prošlog stoljeća na '*Materials testing Institute*' u Sttutgartu [16]. Spomenuta istraživanja pokazala su čvrstoće na savijanje od 53 do 78 MPa i vlačne čvrstoće između 53 i 98 MPa. 1980-ih Gehri je, temeljem eksperimenata provedenih na ETH u Zurich-u, zaključio da karakteristična vlačna čvrstoća zupčastih spojeva utječe na čvrstoću na savijanje LLD-a [17]. Prema njegovim istraživanjima, karakteristična čvrstoća na savijanje lijepljenih lameliranih nosača od bukve može doseći 60 MPa, pod uvjetom da karakteristična vlačna čvrstoća zupčastih spojeva iznosi 50 MPa. Unatoč provođenju ovih eksperimenata sredinom prošlog stoljeća, intenzivnija istraživanja lijepljenih lameliranih elemenata od tvrdih drva provedena su tek u posljednjih 15 godina. Istraživanja po pitanju razvrstavanja lamela bukve i hrasta u klase čvrstoće [18] dovela su do formiranja njemačkog standarda za vizualnu klasifikaciju tvrdih drva DIN 4074-5 [19]. Opsežna istraživanja lijepljenih lameliranih nosača od bukve provedena su na Institutu za tehnologiju u Karlsruheu (KIT), a u sklopu čega su predložene klase za lijepljene lamelirane nosače od bukve i razvijen je model za procjenu karakteristične čvrstoće na savijanje lijepljenih lameliranih nosača temeljem poznavanja vlačne čvrstoće lamela i čvrstoće na savijanje zupčastih spojeva [20]. Navedeno je rezultiralo izdavanjem tehničkog odobrenja Z-9.1-679 [21] za lijepljeno lamelirano drvo od bukve i hibridno

lijepljeno lamelirano drvo od bukve i četinjača za klase čvrstoće do GL48c. Tvrtka Neue Holzbau AG iz Švicarske već dvadesetak godina proizvodi lijepljeno lamelirano drvo, oslanjajući se na vlastita istraživanja klasifikacije, zupčastih spojeva i tehnika različitih spojeva od bukve i jasena [22]. Jedan od važnijih projekata je '*European Hardwoods for the Building Sector'* (EU Hardwoods) [23] proveden u razdoblju 2014.-2016. god. u suradnji Sveučilišta u Ljubljani, MPA Stuttgart iz Njemačke, FCBA Simonin Sas iz Francuske i Holzforschung iz Austrije. Rezultati ovog projekta značajno su unaprijedili razumijevanje mehaničkih svojstava lijepljenih lameliranih nosača od listača ukazujući na potrebu prilagodbe dosadašnjih europskih propisa drugim vrstama drva. Važno je istaknuti i projekte koji doprinose ovom području, kao što su *'Glued laminated timber made from European beech wood'* [24] i *'Biaxial timber-concrete composite slabs made of beech laminated veneer lumber'* [25] na sveučilištu ETH u Zurich-u. Rezultati istraživanja [26] sugeriraju prilagodbu postojećih klasa čvrstoće za tvrda drva kako bi se uzeli u obzir različiti omjeri čvrstoće i krutosti u usporedbi s četinjačama, uz proširenje klasa vlačne čvrstoće do T50. Također, brojna eksperimentalna istraživanja pojedinih europskih institucija rezultirala su izdavanjem nekoliko tehničkih odobrenja za lijepljene lamelirane nosače od strane Europske organizacije za tehnička dopuštenja (EOTA) (Grafikon 1.1.):

- za bukvu: Z-9.1-679; Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V. [21]
- za hrast: Z-9.1-821; Holz Schiller GmbH [27] i ETA-13/0642-VIGAM [28]
- za pitomi kesten: ETA-13/0646; SIERO LAM S.A. [29]
- za LVL od bukve: ETA-14/0354 [30] i ETA 18/1018 [31]
- za tamnocrveni meranti: Z-9.1-577 [32]

Europska komisija osnovala je tehničko povjerenstvo CEN/TC124/WG3/TG1 pri Europskom odboru za normizaciju (CEN), za razvoj dokumenta analognog EN 14080 [33] uzimajući u obzir različite vrste listača i ograničenost u korištenju ljepila. 2018. god. EOTA je izdala dokument EAD 130320-00-0304 *'Glued laminated timber made of solid hardwood*' [34], a koji pokriva zahtjeve za proizvodnju lijepljenog lameliranog drva od određenih vrsta tvrdih listača. Zahvaljujući istraživanjima i tehničkim odobrenjima, druga najčešća vrsta drva u Srednjoj Europi – bukva može se koristiti u nosivim konstrukcijama, a lamelirani furnir od bukve trenutno ima mehanička svojstva s najvišim vrijednostima u usporedbi s ostalim vrstama drva [15]. Također, određene vrste listača imaju 2-3 puta veće čvrstoće i do 50% veću krutost od četinjača. Navedeno dovodi do zaključka kako bi superiorna mehanička svojstva listača mogla doprinijeti optimizaciji i izradi

estetski privlačnijih i vitkijih nosača te povećanju upotrebe drva kao nosivog materijala naspram manje ekološki prihvatljivih materijala.




Grafikon 1.1 Karakteristična čvrstoća na savijanje lijepljenih lameliranih nosača za pojedine vrste drva, prema [23]

Pri proizvodnji lijepljenih lameliranih nosača, osim anizotropije drva i različitih nepravilnosti u drvu koje imaju utjecaj na mehaničke karakteristike, potrebno je poznavati kvalitetu lijepljenog spoja. Kvaliteta i sigurnost konstrukcije ovisni su o kvaliteti drva i ljepila, kao i o pravilnom vođenju tehnologije proizvodnje [35]. Vrste ljepila i tehnologije lijepljenja koje se uobičajeno primjenjuju kod četinjača ne osiguravaju zadovoljavajuću kvalitetu lijepljenog spoja kod listača. Glavni razlozi za to su različitosti u strukturi drva, gustoći, poroznosti i apsorpciji vlage. Ove specifičnosti zahtijevaju prilagodbu postojećih normi, tehnologije lijepljenja, kriterija klasifikacije te optimizaciju parametara lijepljenja kako bi se osigurala dugotrajnost i kvaliteta spoja. To se posebno ogleda u postojanju cca 40000 vrsta listača naspram 650 četinjača [36]. Isto tako, raspon vrijednosti za gustoću tvrdih drva kreće se između 300 i 1000 kg/m$^3$, dok se za meka drva kreće između 350 i 550 kg/m$^3$. Svojstva tvrdog drva mogu znatno varirati unutar iste vrste za razliku od četinjača. Zbog navedenih razloga, dosad korištene tehnologije obrade drva ne mogu se u potpunosti primijeniti na različite vrste tvrdog drva. Potrebno je razviti nova tehnološka rješenja pri proizvodnji elemenata od tvrdog drva kako bi se što uspješnije integrirala u građevinski sektor, a što predstavlja izazov za znanost i industriju. Sukladno navedenom, potreba za dodatnim

istraživanjem i dopunjavanjem postojeće baze podataka je nužna kako bi se dobio što isplativiji materijal boljih mehaničkih svojstava.

Kao što je i prethodno istaknuto, čvrstoća i integritet između slojeva lamela predstavljaju osnovni preduvjet za ostvarivanje kompozitnog efekta sklopa. Lokalna oslabljenja mogu biti prihvatljiva za ploče od npr. križno-lameliranog drva (CLT) dok je za konstrukcijske elemente poput LLD-a potrebna visoka kvaliteta lijepljenog spoja kako bi se zadovoljila granična stanja nosivosti i uporabivosti. Od samih početaka korištenja lijepljenih konstrukcijskih proizvoda, metode ispitivanja i zahtjevi u pogledu osiguranja kvalitete lijepljenih spojeva predstavljali su jednu od glavnih zadaća u njihovom razvoju. Loše proizvedeni i vremenski oslabljeni lijepljeni spojevi kroz povijest su prouzročili ozbiljne štete, poput urušavanja krova dvorane u Bad Reichenhallu u Njemačkoj 2006. god., prilikom čega je poginulo 15 ljudi (Fotografija 1.4. a) i b)) i kolapsa dvorane Siemens Arena Ballerup u Danskoj u siječnju 2003. god. (Fotografija 1.5. a) i b)).

Do progresivnog urušavanja krova ledene dvorane u Bad Reichenhallu došlo je uslijed opterećenja snijegom koje nije prelazilo karakterističnu vrijednost uzetu u obzir prilikom projektiranja [37]. Međutim, prilikom proizvodnje lijepljenih lameliranih greda predviđeno je korištenje urea-formaldehid ljepila, a čije korištenje je tada bilo dopušteno samo u suhim klimatskim uvjetima. Utvrđeno je da u nekim nosačima nije bilo adhezijskog učinka do dubine lijepljenog spoja od 50 mm do 80 mm. Također, projektirane su grede visine 2.78 m, dok je tadašnjim tehničkim dopuštenjem propisana maksimalna visina grede od 1.2 m. Nedostatak održavanja, projektom nepredviđene promjene u relativnoj vlažnosti zraka, greške u statičkom proračunu i strukturalne nepravilnosti drva uzrokovale su slabljenje zupčastih spojeva i drugih lijepljenih površina.

a)

b)

Fotografija 1.4 a) dvorana u Bad Reichenhallu u Njemačkoj prije otkazivanja, b) nakon otkazivanja [37]

Također, prilikom projektiranja dvorane Siemens Arena Ballerup učinjeno je nekoliko propusta koji su doveli do smanjene nosivosti spoja gornjeg i donjeg pojasa glavnog nosača na osloncu za 25-30%, i to u vlačnoj zoni [38]. Istraga je pokazala kako kvaliteta lijepljenog spoja nije odgovarala specifikacijama navedenim u projektu. Računska čvrstoća drva, korištena prilikom projektiranja, bila je za oko 48% veća u odnosu na stvarnu, a reducirana visina poprečnog presjeka na krajevima nosača nije uzeta u obzir kao ni redukcija poprečnog presjeka uslijed rupa od spajala. Dva glavna nosača duljine 72 m su se urušila uslijed niske razine promjenjivog opterećenja (nekoliko milimetara snijega), nedugo nakon službenog otvaranja dvorane. Ovaj događaj ističe važnost sustavne kontrole kvalitete, osobito u projektiranju i izvedbi drvenih konstrukcija, kako bi se spriječili slični slučajevi.

a)

b)

Fotografija 1.5 a) Dvorana Siemens Arena Ballerup nakon urušavanja krovne konstrukcije [38], b) spoj donjeg i gornjeg pojasa nakon otkazivanja [39]

## 1.2. Općenito o drvu

Drvo (lat. *lignum*) je tehnički proizvod biološkog porijekla koji se prvenstveno dobiva iz debla, dok se za određene primjene koristi i drvo grana. Kao kompleksni polimer sastoji se od cca 50% ugljika, 44% kisika te 6% vodika, uz niski udio anorganskih tvari, a osnovni dijelovi kemijske strukture su celuloza, hemiceluloza i lignin te razne ekstraktivne tvari [40]. Drvo ima povoljna ekološka, energetska i estetska svojstva, a odlikuje se i svojom ekonomičnošću i mogućnošću prijenosa značajnih opterećenja. Prema botaničkoj klasifikaciji, dijeli se na drvo četinjača i drvo listača, a glavna razlika je u anatomskoj strukturi i to u udjelu lignina i hemiceluloze. U znanstvenoj literaturi četinjače se često nazivaju mekim drvom (engl. *softwoods*), dok se listače

označavaju kao tvrdo drvo (engl. *hardwoods*). Drvo četinjača (crnogorica) smatramo neporoznim drvom koje se sastoji od traheida kao provodnih elemenata s mehaničkom funkcijom (jela, smreka, bor, …), a po svojoj strukturnoj građi su jednostavnije i pravilnije u odnosu na listače. Drvo listača (bjelogorica) je porozno odnosno sadrži pore ili traheje većeg promjera koje predstavljaju glavne stanice za provođenje vode (bukva, hrast, grab, kesten, …) [41]. Vrste drva s većom poroznošću su složenije i nehomogenije građe te pretpostavljaju veće poteškoće pri mehaničkoj obradi, lijepljenju i završnoj obradi površine [42]. Jedno od bitnih pojmova je točka zasićenosti vlakana (TZV), a koja predstavlja područje sadržaja vode na prijelazu iz slobodne u vezanu vodu odnosno vlažnost pri isparenju slobodne vode, i ovisi o vrsti drva (cca 26%).

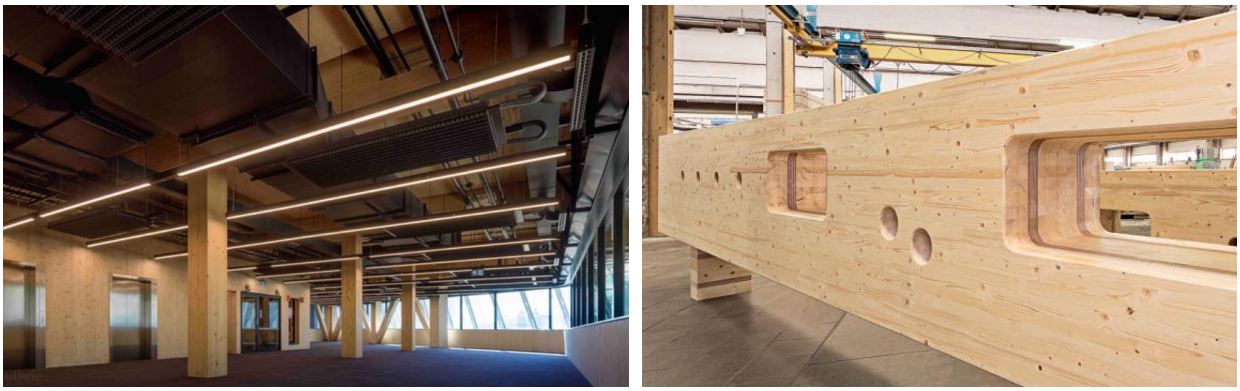
Četinjače se većinom koriste u građevinskom sektoru za proizvodnju inženjerskih proizvoda zbog lakše obradivosti uslijed manje gustoće, niže cijene sirovine i bolje iskorištenosti trupaca (cca 80%) [42]. Listače imaju više vrijednosti gustoće i mehaničkih svojstava, ali nedostaci su lošija obradivost u odnosu na četinjače, manji postotak iskorištenosti trupaca (40-50%) i slabija dimenzijska stabilnost. Osim mikrostrukturalnih razlika, šumama listača je potrebno više vremena za obnovu (cca 100 godina za hrast), dok šume četinjača imaju bržu stopu rasta i potrebno im je do cca 40 godina za obnovu. Do sada su se listače koristile većinom kao izvor energije ili za uređenje interijera. Iako su drva četinjača u pravilu lakše obradiva i ekonomičnija, listače pokazuju bolje mehaničke karakteristike koje vode do estetskih prihvatljivijih i konstruktivnih elemenata manjih poprečnih presjeka i većih raspona te bolje otpornosti na požar [15].

Drvo se može upotrebljavati u svom prirodnom obliku kao rezana građa, no zbog stalnog povećanja potreba za drvom poboljšanih svojstava i dimenzijskih zahtjeva, može se rekonstruirati u velike nosive elemente. Drvena rezana građa podrazumijeva elemente minimalne debljine od 6 mm. Inženjerski proizvodi od drva, osim punog drva, uključuju lijepljeno lamelirano drvo (LLD), konstrukcijsko drvo (KVH), križno lamelirano drvo (CLT), lameliranu furnirsku građu (LVL) i dr. Trenutno, LVL od bukve predstavlja najčešće korišten proizvod na bazi listača zbog velikih vrijednosti krutosti i čvrstoće.

U ovom radu istražena su neka mehanička svojstva LLD-a kao jednog od najčešće korištenih proizvoda na bazi drva. Pod pojmom LLD podrazumijevamo konstrukcijski element dobiven lijepljenjem lamela u kontroliranim uvjetima, a karakterizira ga velika čvrstoća, mogućnost oblikovanja, požarna otpornost i veliki rasponi. Uzimajući u obzir kontrolu proizvodnje i redukciju varijabilnosti mehaničkih karakteristika, mogu se smatrati homogenijim elementima u odnosu na puno drvo. Ehrhart [17] je vlačnim ispitivanjem lamela od bukve dobio vrijednosti vlačnih

čvrstoća u rasponu od 4.3 do 132 MPa, dok je vlačnim ispitivanjem lijepljenog lameliranog nosača od bukve dobio vrijednosti vlačnih čvrstoća između 35.9 MPa i 60.9 MPa. Isto tako, 5. percentil karakteristične vlačne čvrstoće konstrukcijskog drva proizvedenog od bukve iznosi 20 MPa, dok kod lijepljenog furnira od bukve iznosi 60 MPa [15]. Jedno od bitnih svojstava LLD-a je *'lamination effect'* na temelju kojeg se može zaključiti da su mehaničke karakteristike LLD-a bolje od mehaničkih karakteristika pojedinačne lamele s obzirom da su slabije mehaničke karakteristike lamele u nekom elementu 'nadoknađene' boljim svojstvima susjedne lamele. Isto tako, susjedne lamele sprječavaju dodatne deformacije lamele do kojih dolazi prilikom ispitivanja pojedinačnih lamela.

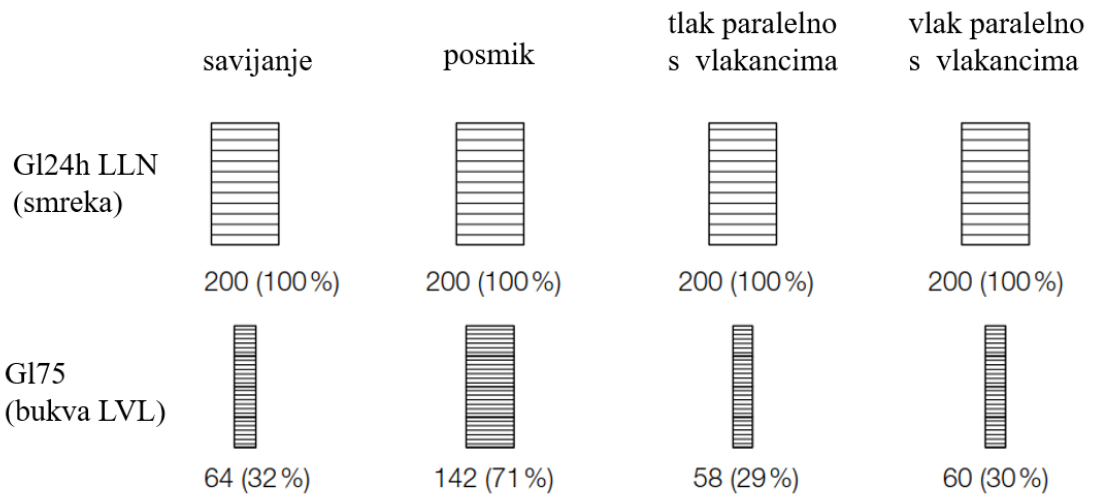
Mehaničke karakteristike proizvoda na bazi drva, poput čvrstoće i krutosti, mogu se poboljšati korištenjem tvrdog drva. Računske čvrstoće proizvoda od bukve su dva do tri puta veće u odnosu na one izrađene od smreke [15]. Korištenje bukve u inženjerskim proizvodima može povećati svojstva krutosti za čak 50 %. Također, kombinacija elemenata od četinjača i listača otvara brojne mogućnosti pri projektiranju, npr. postavljanje lamela veće čvrstoće u vanjske zone greda s većim naprezanjima (*"composite build-ups"*). Takvim kombiniranjem mogu se postići značajne financijske uštede. Prethodno je primijenjeno na gredama zgrade International House Sydney (Fotografija 1.6.a) i b)). Maksimalna visina zgrade prema urbanističkim propisima, kao i potreban broj etaža nisu se mogli ostvariti s dotad korištenim proizvodima na bazi drva. Stoga je razvijena i testirana kompozitna greda izrađena od lijepljenog lameliranog drva četinjača i LVL-a od bukve [15]. Isto tako, kompozitni stropovi drvo – beton nude veliki potencijal, a kod kojih drveni dio kompozita može biti znatno manjeg poprečnog presjeka zahvaljujući većoj vlačnoj čvrstoći tvrdog drva. Ovim se može postići veći broj etaža unutar zadane visine zgrade.



a) b)

Fotografija 1.6 International House Sydney a) unutrašnjost zgrade [43], b) kompozitna greda izrađena od lameliranog drva četinjača i LVL-a od bukve [15]

Crtež 1.1. prikazuje usporedbu lijepljenog lameliranog nosača klase Gl24h i širine poprečnog presjeka od 20 cm, s ekvivalentom u pogledu visine i izrađenog od lijepljenog lameliranog furnira od bukve klase Gl75. Mogu se uočiti manji poprečni presjeci furnira od bukve pri savijanju, posmiku, tlaku i vlaku paralelno s vlakancima. Čvrstoća na savijanje lijepljenog furnira od bukve je cca tri puta veća od lijepljenog lameliranog drva od smreke, dok je omjer krutosti 1.5 [15].



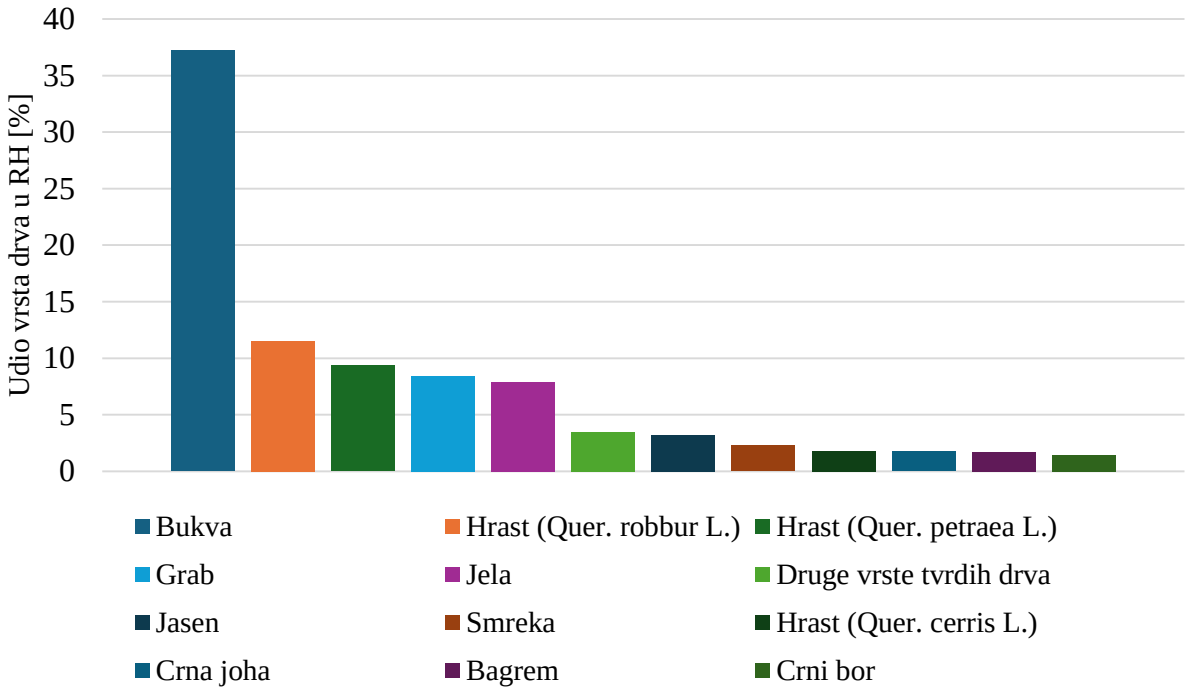

Crtež 1.1 Usporedba dimenzija poprečnih presjeka lijepljenog lameliranog nosača od smreke i LVL-a od bukve s navedenim dimenzijama poprečnog presjeka [15]

## 1.3. Prostorna distribucija šuma u Hrvatskoj i Europi

Prema izvješću '*The State of Europe's Forests 2020*' [44] šume prekrivaju 35% površine Europe, od čega 46% čine četinjače, 37% listače, dok je 17% šuma mješovito. U sjevernim dijelovima Europe dominiraju crnogorične šume koje postepeno smanjuju svoj udio prema jugu u korist bjelogoričnih šuma, a što je odraz prilagodbe specifičnim klimatskim uvjetima i karakteristikama tla. Klimatske promjene, koje dovode do kontinuiranog rasta prosječne godišnje temperature te fenomena poput oluja i toplinskih valova, potiču transformaciju šuma posebno u srednjoj Europi.

Hrvatska ima jedan od najvećih postotaka bjelogoričnih šuma, cca 82%, a uz Rumunjsku, Bosnu i Hercegovinu, Francusku, Njemačku i Italiju, spada među najveće europske proizvođače tvrdog drva [45]. Prema uređajnom zapisniku Hrvatskih šuma [46] najveći udio u ukupnoj drvnoj zalihi na šumskogospodarskom području ima obična bukva (37,22%), zatim slijede hrast lužnjak (11,55 %), hrast kitnjak (9,38 %), obični grab (8,39 %), obična jela (7,90 %), ostala tvrda drva

(3,46 %), poljski jasen (3,19 %), smreka (2,29 %), hrast cer (1,77 %), bagrem (1,74 %), crna joha (1,70 %) i crni bor (1,43 %) (Grafikon 1.2.).




Grafikon 1.2 Udio vrsta drva u drvnoj zalihi šumskogospodarskog područja [46]

Već spomenute klimatske promjene mijenjaju udio pojedinih vrsta u europskim šumama, a potrebna su istraživanja kako bi se bolje razumio utjecaj istog na gospodarstvo u različitim regijama. Predviđa se širenje bjelogoričnih šuma, osobito u srednjoj Europi, dok su nacionalne šumske politike također usmjerene na širenje bjelogoričnih šuma naspram crnogoričnih. Procjenjuje se da bi klimatske promjene mogle utjecati na smanjenje udjela crnogoričnog drva od 26% do 2095. god., potom i na količinu proizvodnje istog u sektoru šumarstva i prerade drva [47]. Prilagodba ovim klimatskim promjenama, primjerice sadnjom crnogoričnih sadnica otpornijih na sušu ili sadnjom bjelogorice umjesto neuspješnih plantaža crnogorice, može minimizirati ove negativne učinke.

Studija [48] donosi ključne uvide u značajne neravnoteže u opskrbi unutar europske bioekonomije temeljene na šumskim resursima. Istraživači sa Sveučilišta Wageningen, Zajedničkog istraživačkog centra Europske komisije i drugih institucija analizirali su podatke iz Europske baze podataka šumarske industrije (EUFID), otkrivajući nesklad između šumskih resursa i kapaciteta prerade drva diljem Europe. Regionalne analize u Njemačkoj, Norveškoj i Češkoj ukazuju na nadolazeće nestašice crnogoričnog drva, ključnog za pilane i bioenergetski sektor. Češka bilježi nedostatak crnogoričnog drva od 3,4 milijuna m³, Norveška 1,5 milijuna m³,

a Njemačka 3,8 milijuna m³. Promjene u regeneraciji šuma u Češkoj smanjile su udio smreke u korist bjelogorice (bukva i hrast) [49]. Isto tako, Njemačka ima višak bjelogoričnog drva procijenjen na 3 milijuna m³, što sugerira mogućnost širenja kapaciteta za preradu bjelogorice. Ove promjene zahtijevat će prilagodbu tehnologija obrade drva koje su trenutno fokusirane na crnogoricu. Ipak, unatoč povećanju udjela bjelogorice, nužno je održavati visoki udio crnogorice u šumama zbog stabilnosti šumskih sastojina.

Pojačana suradnja između znanstvene zajednice, politike i industrije ključna je za istraživanje potencijala listača za građevinske primjene i sprječavanje gubitka njihove ekonomske vrijednosti, kao i za omogućavanje održivije budućnosti za građevinsku industriju i okoliš. Znanstvena zajednica treba podržati industriju i javnost u razvoju ekološki održivih materijala, što uključuje razvoj novih tehnologija i optimizaciju korištenja sirovina. U Europi su trenutno aktualni projekti poput UNISTRAND [50], a kojem je cilj razvoj kompozitnih panela s unakrsnom orijentacijom vlakana uz postizanje prinosa sirovine do 75% korištenjem drvenih vlakana iz različitih vrsta crnogoričnog i bjelogoričnog drva. Pritom se nastoji stvoriti temelj za industrijsku proizvodnju resursno učinkovitih drvenih građevinskih materijala nove generacije. Najnoviji europski istraživački i inovacijski projekt TIMBERHAUS [51] pokrenut je krajem 2024. god. od strane Danskog tehnološkog instituta i 19 partnera iz privatnog sektora i znanstvene zajednice, a ima za cilj značajno smanjiti emisije $CO_2$ razvijanjem inovativnih tehnologija drvene gradnje. Pritom namjeravaju istraživati nedovoljno iskorištene vrste tvrdog drva kao i reciklirano drvo čime bi se omogućila učinkovitija upotreba šumskih resursa.

Povećanje učinkovitosti u preradi i korištenju sirovina moglo bi biti održivija opcija od povećanja sječe, koja može ugroziti okolišne i klimatske ciljeve EU-a. Optimizacija korištenja drvenih resursa se nameće kao održiva strategija za povećanje ukupne dostupnosti biomase [48]. Takva optimizacija zahtijeva detaljno razumijevanje dostupnosti i korištenja drvenih resursa na regionalnoj razini.

## 1.4. Karakteristike lokalnih vrsta tvrdih drva

Klimatske promjene, a koje pretpostavljaju porast temperatura i smanjenje oborina u dijelovima Europe, imaju negativan utjecaj na šumske ekosustave u vidu promjena u strukturi sastojina i sastavu vrsta [52], [53]. Neke od najvažnijih vrsta drva u Europi, koje se koriste u komercijalne svrhe, već su pokazale jasnu osjetljivost na dosadašnje suše [54]–[56]. Šumarska znanost i struka, kao jedno od rješenja problema prilagodbe šuma globalnim promjenama u svrhu

očuvanja stabilnih šumskih ekosustava, predlažu pošumljavanje rijetkim vrstama drveća otpornijim na sušu nauštrb trenutno dominantnih vrsta drveća [54], [57]. U sklopu ovog istraživanja, provedena su eksperimentalna ispitivanja i analize istih na uzorcima graba, hrasta cera i javora porijeklom iz hrvatskih šuma. Pritom je najveći broj ispitivanja proveden na uzorcima graba.

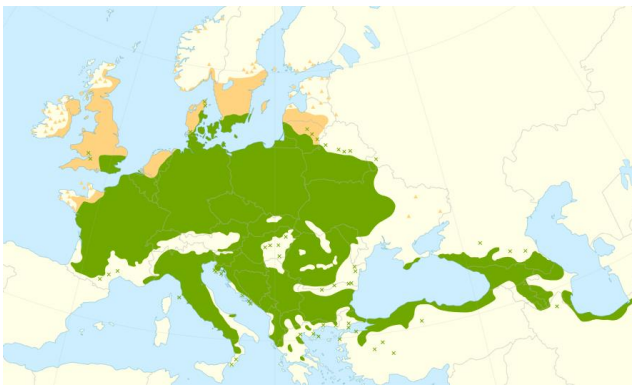
Grab (*Carpinus betulus* L.) je difuzno-porozna vrsta listopadnog drva iz porodice *Betulaceae,* visoke čvrstoće, žilavosti i tvrdoće [58]. Raste u područjima s nadmorskim visinama do 1000 mnm, najčešće s promjerom do 70 cm i visinom stabla do 25 m. Ima široku rasprostranjenost zahvaljujući dobroj prilagodljivosti različitim klimama i to na području Francuske, jugoistočne Engleske, južne Švedske, srednje i južne Europe, do obalnih područja Crnog mora (Fotografija 1.7. a)). Sukladno klimatskim promjenama, grab će se u budućnosti više pojavljivati u miješanim šumama hrasta i graba, posebno na mjestima gdje klimatske promjene dovode do smanjenja udjela bukve, smreke i jele [58]. Neki od nedostataka graba su niska dimenzijska stabilnost i prirodna trajnost, a koji ograničavaju njegovu primjenu na unutarnje prostore. Grab je jedna od rijetkih autohtonih europskih vrsta kojoj odgovaraju sjenovita područja, a najčešće raste u mješovitim sastojinama s hrastom [58]. Ima dobru otpornost na visoke temperature i prikladan je materijal za proizvodnju lameliranog furnira zbog visoke gustoće i mehaničkih svojstava [59]. Istraživanjem [60] dokazano je da grab ima tlačnu čvrstoću drva po omotaču rupe veću nego bukva. U Tablici 1.1. dana je usporedba nekih karakteristika drva graba naspram bukve i smreke prema Wagenfuhru [61].

Tablica 1.1 Vrijednosti odabranih karakteristika za smreku, bukvu i grab [61]

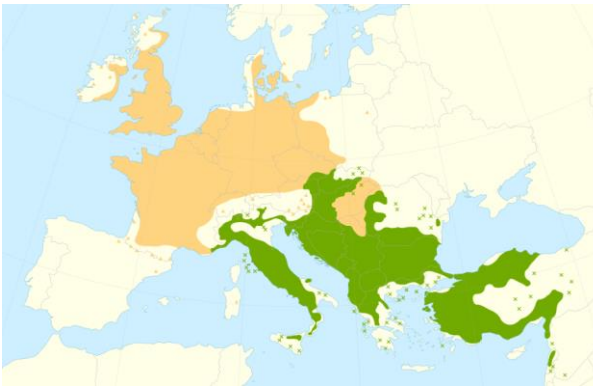
| | Smreka (*Picea abies*) | Bukva (*Fagus sylvatica*) | Grab (*Carpinus betulus* L.) |
|---|---|---|---|
| Gustoća (kg/m³) | 330 … 470 … 680 | 540 … 720 … 910 | 540 … 830 … 860 |
| Tlačna čvrstoća paralelno s vlakancima (MPa) | 33 … 50 … 79 | 41 … 62 … 99 | 54 … 82 … 99 |
| Čvrstoća na savijanje (MPa) | 49 … 78 … 136 | 74 … 123 … 210 | 58 … 160 … 200 |
| Vlačna čvrstoća paralelno s vlakancima (MPa) | 21 … 90 … 245 | 57 … 135 … 180 | 47 … 135 … 200 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Vlačna čvrstoća okomito na vlakanca (MPa) | 1.5 … 2.7 … 4 | 7 … 10.7 | 24 |
| Posmična čvrstoća (MPa) | 4 … 6.7 … 12 | 6.5 … 8 … 19 | 8.5 … 16 |
| Modul elastičnosti pri savijanju (MPa) | 7300…11000…21400 | 10000…16000…18000 | 7000…16200…17700 |

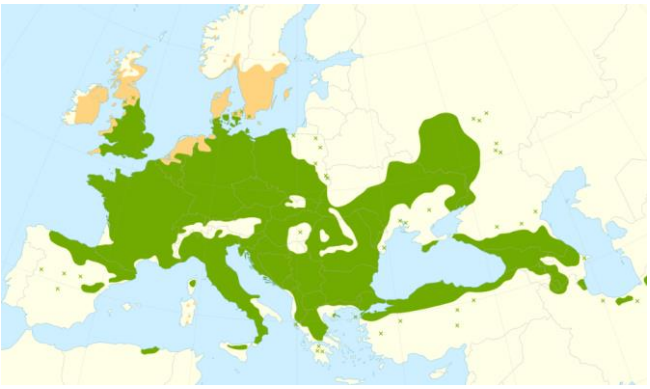
Hrast cer (*Quercus cerris* L.) je listopadno drvo porijeklom iz jugoistočne Europe i zapadne Azije i jedna je od dominantnih vrsta listopadnog drveća u mješovitim šumskim sastojinama do 2200 mnm (Fotografija 1.7. b)) [62]. Otporno je na sušu, a može narasti do 25–40 m visine. S obzirom na aktualne klimatske promjene koje će povećati učestalost i intenzitet suša u Europi, ova vrsta tvrdog drva može doprinijeti otpornosti šumskih ekosustava uz strategiju 'potpomognute migracije' [63]. Javor (*Acer campestre* L.) je listopadno drvo koje raste u mješovitim šumama u većem dijelu Europe (Fotografija 1.7. c)), promjera debla od 60–70 cm, a preferira topliju klimu [64]. Drvo javora (*Acer campestre* L.) ima najveću tvrdoću i gustoću među europskim javorima [65]. Istraživanjem Kunza i dr. [54], vrsta javora (*Acer campestre* L.) i hrasta cera (*Quercus cerris* L.) su ocijenjene jednako otpornima na sušu kao hrast lužnjak (*Quercus petraea* L.).



a)



b)



c)

Fotografija 1.7 Distribucija šuma a) graba (*Carpinus betulus* L.), b) hrasta cera (*Quercus Cerris* L.) i c) javora (*Acer campestre* L.) u Europi [66]

## 1.5. Europski standardi za proizvodnju lijepljenih lameliranih nosača

### 1.5.1. EN 14080

Europski standard EN 14080 [33] propisuje minimalne zahtjeve za proizvodnju, potvrdu sukladnosti i označavanje lijepljenih lameliranih proizvoda koji sadrže dvije ili više lamela debljine 6 do 45 mm. Vrste drva koje pokriva ovaj standard su: smreka (*Picea abies*), obična jela (*Abies alba*), crveni bor (*Pinus sylvestris*), obična američka duglazija (*Pseudotsuga menziesii*), western hemlock (*Tsuga heterophylla*), crni bor (*Pinus nigra*), sibirski ariš (*Larix decidua*), dahurski ariš (*Larix gmelinii*), primorski bor (*Pinus pinaster*), topola (*Populus x euramericana*), kalifornijski bor (*Pinus radiata*), sitkanska smreka (*Picea sitchensis*), dugolisni bor (*Pinus palustris*), tuja (*Thuja plicatra*), čempres (*Chamaecyparis nootkatensis*). Bitne mehaničke karakteristike lijepljenih lameliranih proizvoda, kao što su modul elastičnosti, čvrstoća na savijanje, tlačna, vlačna i posmična čvrstoća, mogu se odrediti na osnovu podataka o geometriji i mehaničkim karakteristikama lamela i zupčastih spojeva, proračuna koji uzimaju u obzir poprečni presjek, raspored i svojstva lamela te eksperimenata prema zahtjevima danim u Aneksu F, EN 14080 [33]. Ako se mehaničke karakteristike određuju eksperimentalno i ukoliko je debljina lamela manja od 40 mm, čvrstoću na savijanje treba pomnožiti s faktorom $k_h$ prema formuli:

$$k_h = min\begin{cases}\left(\frac{40}{t}\right)^{0.1} \\ 1.05\end{cases} \tag{1.1.}$$

gdje $t$ predstavlja debljinu lamela $[mm]$. Karakteristična čvrstoća na savijanje vrijedi za LLD referentne visine $h = 600mm$ i debljine lamela $t = 40mm$. Lamele se klasificiraju prema normi

EN 14081-1 [67], dok su glavne karakteristike konstrukcijskog drva prikazane u EN 338 [68]. Norma EN 1912 [69] grupira botaničke vrste drva koje pokazuju ista mehanička svojstva u određene klase. Tablice u prethodno spomenutoj normi EN 338 [68] prikazuju dostupne razrede čvrstoće s pripadajućim karakteristikama i to razrede dobivene na osnovi testova na savijanje za četinjače i listače, dok je 2016. god. uvedena i tablica s razredima čvrstoće dobivenim na osnovu ispitivanja na vlak za četinjače (Tablica 1.2.). Lijepljeno lamelirano drvo je kompozitni materijal čija čvrstoća na savijanje izravno ovisi o razredima čvrstoće njegovih lamela. Ključno je poznavanje razreda čvrstoće dobivenih iz ispitivanja na vlak, budući da se mehaničke karakteristike lijepljenih lameliranih nosača mogu preciznije predvidjeti kada su poznate vlačne čvrstoće lamela od kojih su izrađeni.

Tablica 1.2 Prikaz dostupnih razreda čvrstoće na osnovu testova na savijanje za četinjače i listače te na osnovu testova na vlak za četinjače [68]

| | |
|---|---|
| Razredi čvrstoće za četinjače (na osnovu testova na savijanje) | C14, C16, C18, C20, C22, C24, C27, C30, C35, C40, C45, C50 |
| Razredi čvrstoće za listače (na osnovu testova na savijanje) | D18, D24, D27, D30, D35, D40, D45, D50, D55, D60, D65, D70, D75, D80 |
| Razredi čvrstoće za četinjače (na osnovu testova na vlak) | T8, T9, T10, T11, T12, T13, T14, T14.5, T15, T16, T18, T21, T22, T24, T26, T27, T28, T30 |

Lamele klase T8 (C14) do T30 (C50) za meka drva dane su s pripadajućim čvrstoćama i krutosti, kao i klase LLD-a od Gl20h do Gl32h s pripadajućim klasama lamela i čvrstoćom zupčastih spojeva kao što je prikazano u Tablici 1.3 [33].

Tablica 1.3 Klasa lamele, karakteristična čvrstoća zupčastog spoja $f_{m,j,k}$, karakteristična čvrstoća na savijanje LLDa $f_{m,g,k}$ [MPa], srednji modul elastičnosti $E_{0,g,mean}$ [MPa] i karakteristična gustoća $\rho_k$ $[kg/m^3]$ za klase Gl28h i Gl32h [33]

| Klasa LLDa | Klasa lamele | $f_{m,j,k}$ [MPa] | $f_{m,g,k}$ [MPa] | $E_{0,g,mean}$ [MPa] | $\rho_k$ $[kg/m^3]$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Gl28h | T18 | 36 | 28 | 12600 | 425 |
| Gl32h | T26 | 38 | 32 | 14200 | 440 |

Ukoliko se lamele mogu svrstati u jednu od klasa koje su dane ovom normom, vrijednosti čvrstoće, krutosti i gustoće mogu se preuzeti iz tablice. U suprotnom, potrebno je karakteristične vrijednosti vlačne čvrstoće paralelno s vlakancima, srednji MOE i karakterističnu gustoću odrediti iz

eksperimenata prema EN 408 [70] i proračunati u skladu s EN 384 [71]. Destruktivna ispitivanja odnosno laboratorijske metode za određivanje mehaničkih svojstava konstrukcijskog drva i lijepljenog lameliranog drva definirane su normom EN 408 [70].

Mehaničke karakteristike lijepljenog lameliranog drva i to karakteristična čvrstoća na savijanje $f_{m,g,k}$, može se odrediti poznavajući karakterističnu vlačnu čvrstoću lamela $f_{t,0,k}$ i karakterističnu čvrstoću na savijanje zupčastog spoja $f_{m,j,k}$ prema formuli:

$$f_{m,g,k} = -2.2 + 2.5 f_{t,0,k}^{0.75} + 1.5\left(\frac{f_{m,j,k}}{1.4} - f_{t,0,k} + 6\right)^{0.65} \tag{1.2.}$$

Navedeni izraz vrijedi uz uvjet za čvrstoću na savijanje zupčastog spoja:

$$1.4 f_{t,0,k} \leq f_{m,j,k} \leq 1.4 f_{t,0,k} + 12 \tag{1.3.}$$

Ukoliko nije poznata čvrstoća zupčastog spoja tada vrijedi:

$$f_{m,j,k} = 1.4 f_{t,0,k} + 12 \tag{1.4.}$$

Čvrstoća lijepljenog spoja podrazumijeva čvrstoću na savijanje velikih zupčasth spojeva i čvrstoću lijepljenog spoja između komponenata LLD-a. Minimalni zahtjevi za proizvodnju, definirani u [33], moraju biti zadovoljeni kako bi se omogućila trajnost lijepljenog spoja tijekom proračunskog vijeka konstrukcije za klase uporabivosti definirane normom EN 1995-1-1 [72]:

- razred uporabe 1: sadržaj vode u materijalima odgovara temperaturi od 20 °C i relativnoj vlažnosti zraka okruženja koja tek nekoliko tjedana u godini prelazi 65 %. U razredu uporabe 1 prosječni sadržaj vode u većini mekog drva neće prelaziti 12 %,
- razred uporabe 2: sadržaj vode u materijalima odgovara temperaturi od 20 °C i relativnoj vlažnosti zraka okruženja koja tek nekoliko tjedana u godini prelazi 85 %. U razredu uporabe 2 prosječni sadržaj vode u većini mekog drva neće prelaziti 20 %,
- razred 3: uvjeti izlaganja materijala uzrokuju sadržaj vode veći nego u razredu 2.

Za LLD se koriste ljepila tipa I i II prema EN 301 [73] ili EN 15425 [74], ovisno o klasi uporabivosti. Primjenjuju se emulzijsko polimerno-izocijanatno ljepilo, jednokomponentno poliuretansko ljepilo koje očvršćuje pod djelovanjem vlage, te fenolna i aminoplastična ljepila. Debljina lamele lijepljenog lameliranog drva treba biti između 6 i 45 mm za klase uporabivosti 1 i 2, dok maksimalna vrijednost debljine lamele za klasu uporabivosti 3 iznosi 35 mm [33]. Odstupanje debljine lamele duž duljine od 1 m ne smije iznositi više od 0.2 mm. Pritisak prilikom

lijepljenja kreće se između 0.6 i 1 $N/mm^2$ ovisno o vrsti drva, poprečnom presjeku, ljepilu i načinu obrade.

Čvrstoća lijepljenog spoja mora biti potvrđena testovima delaminacije ili posmičnim testovima. Za lijepljeno lamelirano drvo, koje se namjerava koristiti u uvjetima klase uporabivosti 3, potrebno je provesti testove delaminacije A ili B u svrhu kontrole proizvodnog procesa. Posmični testovi na lijepljenim površinama provode se prema Aneksu D, EN 14080 [33]. Minimalna vrijednost posmične čvrstoće lijepljenog spoja je $6N/mm^2$ uz mogućnost prihvaćanja posmične čvrstoće lijepljenog spoja od 4 $N/mm^2$ ukoliko je postotak otkazivanja po drvu 100%. Stroj za provođenje posmičnih testova treba imati mogućnost ravnomjernog nanošenja tlačne sile paralelno sa linijom lijepljenja uzorka pri čemu preciznost mjerenja sile mora biti unutar ±3%. Linija lijepljenog spoja mora biti pozicionirana na način da udaljenost do klipa kojim se nanosi opterećenje ne prelazi 1 mm. Uzorci moraju biti izdvojeni iz lijepljenog lameliranog proizvoda s punim poprečnim presjekom. Ukoliko uzorak sadrži manje od 10 lamela, potrebno je ispitati sve linije lijepljenog spoja. Uzorci moraju biti kondicionirani u uvjetima 20/65 odnosno temperatura mora biti (20±2°), a relativna vlažnost (65±5%). Režim nanošenja opterećenja uključuje konstantnu brzinu nanošenja deformacije na način da se otkazivanje treba dogoditi unutar vremenskog perioda od 20 s. Nakon provođenja testova, potrebno je procijeniti postotak otkazivanja po drvu pri čemu rezultat treba biti zaokružen na najbliži broj djeljiv s 5. Prema [33] pojedinačne granične vrijednosti za vrste drva koje pokriva ovaj standard su:

$$WFP_i = 100\% \quad i \quad 4\ N/mm^2 \leq f_{v,b,i} \leq 6N/mm^2$$

$$WFP_i \geq 74\% \quad i \quad f_{v,b,i} = 6N/mm^2$$

$$WFP_i \geq 20\% \quad i \quad f_{v,b,i} \geq 10\ N/mm^2$$

gdje $WFP_i$ predstavlja postotak otkazivanja pojedinačne linije lijepljenog spoja, a $f_{v,b,i}$ predstavlja posmičnu čvrstoću pojedinačnog lijepljenog spoja. Ukoliko je $f_{v,b,i} \geq 6\ N/mm^2$ tada se koristi izraz $WFP_i = 153{,}3 - 13{,}3 f_{v,b,i}$. Zahtjevi za srednje vrijednosti za vrste drva koje pokriva ovaj standard su:

$$WFP_{mean} = 90\% \quad i \quad f_{v,b,mean} = 6N/mm^2$$

$$WFP_{mean} \geq 72\% \quad i \quad f_{v,b,mean} = 8N/mm^2$$

$$WFP_{mean} \geq 45\% \quad i \quad f_{v,b,mean} \geq 11\ N/mm^2$$

Minimalna srednja vrijednost postotka otkazivanja po drvu trebala bi iznositi $WFP_{mean} = 144 - 9f_{v,b,i}$.

### 1.5.2. EAD 130320-00-0304

Europska organizacija za tehnička dopuštenja donijela je dokument EAD 130320-00-0304 – '*Glued laminated timber made of solid hardwood*' u lipnju 2018. god [34]. Ovaj dokument predstavlja osnovu za izdavanje europskih tehničkih dopuštenja za lijepljeno lamelirano drvo koje se može koristiti u nosivim konstrukcijama, u uvjetima klasa uporabivosti od 1 do 3, od određenih vrsta tvrdih drva: europski hrast (*Quercus robur, Quercus petraea*), bijeli hrast (*Quercus alba*), bukva (*Fagus sylvatica*), jasen (*Fraxinus excelsior*), kesten (*Castanea sativa*), breza (*Betula spec.*), svijetlocrveni meranti (*Shorea spp.*), tamnocrveni meranti (*Shorea spp.*), keruing (*Dipterocarpus alatus Roxb.*), kempas (*Koompassia malaccensis*), kapur (*Dryobalanops spp.*), balau (*Shorea Laevis Ridl.*), eukaliptus (*Eucalyptus diversicolor, Eucalyptus marginata* i *Eucalyptus globulus*), iroko (*Milicia spp.*), pri čemu se klasifikacija lamela provodi prema EN 14081-1 [67]. Naime, EN 14080 [33] pokriva lijepljeno lamelirano drvo od mekih vrsta i topole te se ne može u potpunosti primijeniti na tvrda drva. Geometrija i raspored slojeva lijepljenog lameliranog drva od tvrdih vrsta drva te zahtjevi za zupčaste spojeve usklađeni su sa zahtjevima iz EN 14080 [33]. Isto tako, ljepila tipa *I* s oznakom *w* prema EN 301 [78] i EN 15425 [79] koriste se za lijepljenje lamela lijepljenih lameliranih nosača. EAD daje zahtjeve za maksimalne dimenzije lamela, lijepljenje lamela uzimajući u obzir preporuke proizvođača ljepila za otvoreno i zatvoreno vrijeme, pritisak ljepila i različite načine obrade površina. Karakteristične vrijednosti čvrstoće i krutosti određuju se prema normama EN 384 [71] i EN 14358 [75]. Trajnost lijepljenih spojeva za uporabnu klasu 1 određuje se posmičnim testovima lijepljenih površina u suhim uvjetima (prema Aneksu A [34]) te ispitivanjem delaminacije metodom A (prema Aneksu C [34]). Za klase uporabivosti 2 i 3, uz navedene testove, dodatno se provode i posmični testovi u vlažnim uvjetima prema Aneksu A [34]. Također, definirane su granične vrijednosti posmične čvrstoće lijepljenog spoja i postotka otkazivanja po drvu, a koje se razlikuju u odnosu na one definirane normom EN 14080 [33]. Kod četinjača indikator kvalitete lijepljenog spoja može biti posmična čvrstoća lijepljenog spoja, dok je kod tvrdih drva bolji indikator relativna posmična čvrstoća lijepljenog spoja [36]. EAD [34] definira uvjet za 5. percentil relativne posmične čvrstoće lijepljenog spoja $rel\, f_{v,b,05}$ u suhim i vlažnim uvjetima, a koji glasi $rel\, f_{v,b,05} \geq 0.9$. Relativna 5. percentil

posmične čvrstoće lijepljenog spoja definirana je kao omjer 5. percentil posmične čvrstoće lijepljenog spoja $f_{v,b,05}$ i 5. percentil posmične čvrstoće drva $f_{v,w,05}$:

$$rel\, f_{v,b,05} = \frac{f_{v,b,05}}{f_{v,w,05}} \tag{1.5.}$$

Uvjet za 10. percentil postotka otkazivanja po drvu u suhim uvjetim je $WFP_{10} \geq 0.5$, dok u vlažnim uvjetima iznosi 0.4. U svrhu kontrole proizvodnje uvjeti se iskazuju preko srednjih vrijednosti pri čemu se relativna srednja posmična čvrstoća lijepljenog spoja određuje iz omjera srednje posmične čvrstoće lijepljenog spoja $f_{v,b,mean}$ i srednje posmične čvrstoće drva $f_{v,w,mean}$ prema formuli:

$$rel\, f_{v,b,mean} = \frac{f_{v,b,mean}}{f_{v,w,mean}} \tag{1.6.}$$

Relativna srednja posmična čvrstoća lijepljenog spoja mora iznositi minimalno 0.9, dok je donja granica za srednju vrijednost postotka otkazivanja po drvu $WFP_{mean} \geq 0.8$. Isto tako, EAD [34] propisuje debljinu ljepila za fenolna, aminoplastična ljepila i jednokomponentno poliuretansko ljepilo. Dokument ne pokriva lijepljeno lamelirano drvo koje se tretira zaštitnim premazima protiv bioloških nametnika zbog mogućnosti utjecaja na čvrstoću i krutost. Isto tako, propisano je kako se karakteristike lijepljenog lameliranog drva, proizvedenog od tvrdog drva, procjenjuju u odnosu na bitne karakteristike, i to:

- čvrstoća na savijanje LLD-a s obje orijentacije lamela [70],
- vlačna čvrstoća LLD-a paralelno i okomito na vlakanca [70],
- tlačna čvrstoća LLD-a paralelno i okomito na vlakanca [70],
- posmična čvrstoća LLD-a [76],
- torzija LLD-a [77],
- modul elastičnosti LLD-a paralelno i okomito na vlakanca [70],
- modul posmika [70], [76],
- gustoća [71],
- PH vrijednost [34],
- dimenzijska stabilnost [33],
- požarna otpornost [78],
- emisija opasnih tvari [79],
- trajnost lijepljenog spoja [33], [73], [74],

- trajnost LLD-a [72]
- trajnost u pogledu utjecaja bioloških nametnika [33].

## 1.6. Hipoteza rada

Drvo, kao jedan od obnovljivih materijala, doprinosi razvoju održive gradnje. Njegova prirodna varijabilnost zahtijeva precizno određivanje mehaničkih svojstava i razreda čvrstoće kako bi se osigurala optimalna iskorištenost sirovine i sigurnost konstrukcija. Nepravilnosti u drvu kao prirodnom materijalu uzrokuju veća odstupanja mehaničkih svojstava od srednje vrijednosti, a što je potrebno minimizirati kvantifikacijom kriterija kod razvrstavanja u klase čvrstoće. Zaključci dosad provedenih istraživanja pretpostavljaju uvođenje novih klasa čvrstoće u EN 338 [68], i to klasa na osnovu ispitivanja na vlak s obzirom da vlačne čvrstoće tvrdih drva premašuju trenutno definirane vrijednosti vlačnih čvrstoća za meka drva. U sklopu ove disertacije provest će se vlačni testovi na lamelama graba iz Slavonije pri čemu se očekuju više vrijednosti u odnosu na one definirane normom EN 338 [68]. Na osnovu vizualnih i fizikalnih karakteristika te rezultata vlačnih testova, bit će dan prijedlog pravila za klasifikaciju lamela graba uz definiranje vlačnih klasa, a što predstavlja glavni preduvjet za proizvodnju lijepljenih lameliranih nosača.

EAD [34] daje smjernice za proizvodnju i kontrolu kvalitete lijepljenih lameliranih nosača od određenih vrsta tvrdih drva. Navedeno se, između ostalog, ne može u potpunosti primijeniti na vrste tvrdih drva korištene u sklopu ovog istraživanja i to grab, hrast cer i javor. Za navedene vrste nisu opisane tehnologije lijepljenja zbog čega je potrebno primijeniti posebne upute proizvođača ljepila (količina ljepila, otvoreno i zatvoreno vrijeme lijepljenja, itd.). Također, potrebno je razmotriti različite obrade površine lamela prije lijepljenja, kao što je brušenje lamela s različitim granulacijama u odnosu na isključivo blanjanje. Navedeno pretpostavlja postavljanje tehnoloških parametara za industrijskog partnera u svrhu osiguravanja kvalitete lijepljenih spojeva i zadovoljavanja uvjeta GSU i GSN.

Dosad provedenim istraživanjima utvrđene su više vrijednosti čvrstoća na savijanje lijepljenih lameliranih nosača od listača u odnosu na nosače od četinjača čime se omogućuju vitkiji presjeci, veći rasponi i manji utrošak materijala. U sklopu ovog istraživanja ispitat će se lijepljene lamelirane grede od odabranih vrsta lokalnih listača i to graba, hrasta cera i javora na savijanje, a čije su lamele obrađene brušenjem s različitim granulacijama i blanjanjem. Ovim ispitivanjem očekuju se više vrijednosti čvrstoća na savijanje u odnosu na čvrstoće na savijanje četinjača.

Ovakva istraživanja doprinijet će široj primjeni tvrdih listača u građevinskoj industriji, posebno kod greda i stupova opterećenih velikim naprezanjima.

Faktori deformacije kod proračuna graničnog stanja uporabivosti definirani su normom EN 1995-1-1 [72] ovisno o klasi uporabivosti. Pritom navedeni europski standard ne razlikuje faktore deformacije ovisno o različitim vrstama drva. Rezultati dobiveni provođenjem testova na savijanje lijepljenih lameliranih greda opterećenih dugotrajnim opterećenjem trebali bi objasniti različitosti u ponašanju pri puzanju mekih i tvrdih drva zbog razlika u gustoći i mehaničkim svojstvima.

U zadnjem poglavlju ove disertacije, dan je pregled daljnjih istraživanja u području lijepljenih lameliranih nosača od tvrdih listača.

# 2. VLAČNI TESTOVI NA LAMELAMA GRABA

## 2.1. Uvod

Definiranje zahtjeva za proizvodnju i kontrolu kvalitete lijepljenog lameliranog drva podrazumijeva poznavanje fizikalnih i mehaničkih svojstava sastavnih dijelova - lamela. Svojstva građevinskih materijala, poput betona i čelika, mogu se mijenjati optimizacijom parametara proizvodnog procesa za razliku od drva s obzirom na ograničenost ljudskog utjecaja na svojstva prirodnih materijala. Zbog varijabilnosti drva kao prirodnog materijala, poznavanje mehaničkih svojstava i primjena pouzdanih metoda klasifikacije ključni su za održivost na tržištu, sigurnost konstrukcija i učinkovitije korištenje sirovine. Svrstavanje u razrede čvrstoće zahtijeva značajan napor, uključujući homogenizaciju u standardne razrede na temelju parametara dobivenih nedestruktivnim ispitivanjima te definiranje kriterija za pojedini razred čvrstoće. Za prethodno je nužno poznavanje korelacije između indikatora i mehaničkih karakteristika. Prilikom provođenja eksperimentalnih istraživanja, potrebno je pratiti utjecaj devijacije vlakanaca i čvorova s obzirom da imaju značajan utjecaj na mehanička svojstva. Neke od metoda mjerenja čvorova su direktno mjerenje dimenzija manualno ili pomoću algoritama za obradu slika, analizom orijentacije vlakanaca na površini elementa pomoću laserskih skenera, korištenjem CT-a koji rekonstruira geometriju čvorova na temelju razlike u gustoći drva i čvora. Industrijska proizvodnja uključuje različite načine obrade, rezanja, i sušenja drvene građe, a koji mogu dodatno utjecati na mehanička svojstva drva. Konačni proizvod rezultat je višestrukih procesa koji rezultiraju velikim brojem

odstupanja u mehaničkim svojstvima, a koje je moguće minimizirati statističkim obradama i različitim metodama klasifikacije.

Ovo poglavlje daje pregled dosadašnjih istraživanja provedenih u području ispitivanja lamela graba na vlak. Isto tako, bit će dan postupak određivanja vizualnih i fizikalnih parametara u svrhu određivanja korelacije s vlačnom čvrstoćom i krutosti kao i provođenje regresijskih analiza kako bi se kvantificirao utjecaj kvrgi na MOE i čvrstoću. Također, prikazan je prijedlog klasa vlačnih čvrstoća lamela graba s predloženim pravilima za razvrstavanje.

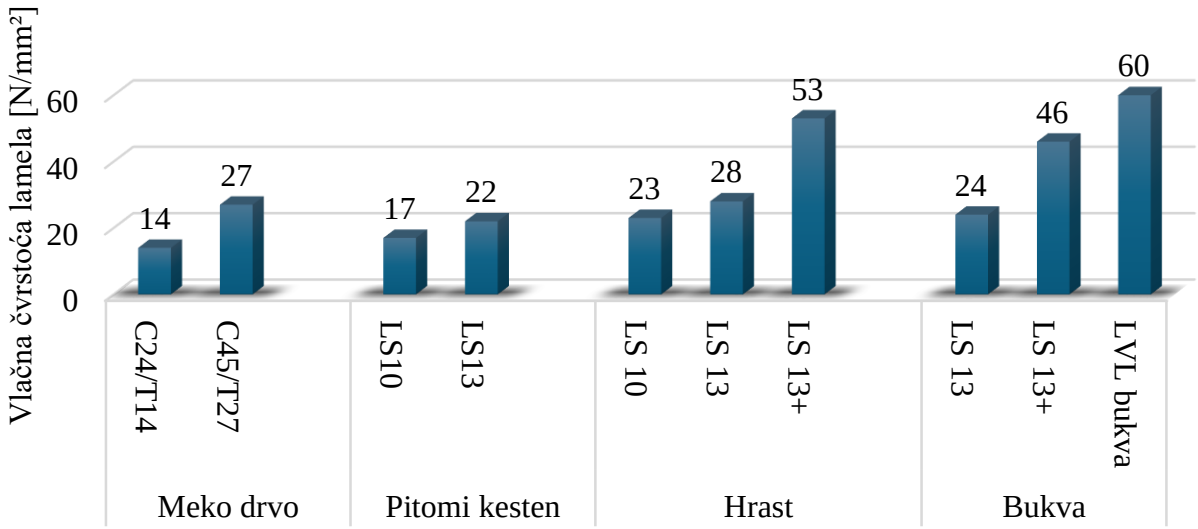
## 2.2. Pregled dosadašnjih istraživanja u području ispitivanja lamela od listača na vlak

Općenito, destruktivna ispitivanja, odnosno laboratorijske metode za određivanje mehaničkih svojstava konstrukcijskog drva i lijepljenog lameliranog drva, definirana su normom EN 408 [70]. Kao što je prethodno rečeno, EN 338 [68] daje mogućnost svrstavanja drvene građe četinjača i listača sa sličnom čvrstoćom i gustoćom u postojeće vlačne razrede čvrstoće četinjača (oznaka T). Iako se određene vrste listača kao što su kesten i topola mogu svrstati u postojeće vlačne razrede, javlja se potreba za novom tablicom u EN 338 [68] s vlačnim razredima čvrstoće za ostale listače. Sukladno navedenom, u Europi su u posljednjem desetljeću provedena brojna istraživanja na uzorcima listača (Tablica 2.1.), a iz kojih je vidljivo kako listače pokazuju veće vlačne čvrstoće nego što su prikazane u trenutnoj tablici u EN 338 [68] (Grafikon 2.1.).

Tablica 2.1 Pregled dosadašnjih istraživanja u području vlačnih testova lamela od listača

| Referenca | Vrsta drva | Duljine ispitanih lamela |
|---|---|---|
| Kovryga i dr. [26] | jasen (*Fraxinus excelsior*) | 765-1440 mm |
| Van de Kuilen i Torno [80] | jasen (*Fraxinus excelsior*) | 200 mm |
| Glos i Lederer [81] | bukva (*Fagus Sylvatica*) | 1080-1440 mm |
| Blass i dr. [82] | bukva (*Fagus Sylvatica*) | 200 mm |
| Ehrhart [17] | bukva (*Fagus Sylvatica*) | 3000 mm |
| Rais i dr. [83] | bukva (*Fagus Sylvatica*) | 2414 mm |
| Plos i dr. [84] | bukva (*Fagus Sylvatica*) | 3000 mm |

| | | |
|---|---|---|
| Tapia i Aicher [85] | hrast (*Quercus robur/Quercus petraea*) | 2500 mm |
| Kovryga i dr. [86] | Javor (*Acer spp.*) | 900 mm |
| Collins i Fink [87] | Breza (*Betula pendula* Roth) | 3500 mm |




Grafikon 2.1 Prikaz usporedbe vlačnih čvrstoća lamela od različitih vrsta drva [23]

Kovryga i dr. [26] su u svom radu analizirali karakteristike bukve, jasena i javora i to vlačnu čvrstoću, modul elastičnosti u vlaku i gustoću na oko 1300 uzoraka. Kao rezultat njihova istraživanja dan je prijedlog budućih DT klasa odnosno razreda vlačne čvrstoće za listače. Isto tako, Ehrhart [88] je proveo istraživanja na lamelama bukve prilikom čega je dao prijedloge klasa čvrstoće T22, T33, T42 i T50. U svrhu preciznijeg numeričkog modeliranja, Tapia [89] je proveo višestruke vlačne testove kako bi se dobila lokalna i globalna distribucija vlačne čvrstoće i modula elastičnosti (MOE). Na svakoj lameli zabilježena je podjela na nekoliko segmenata te je za svaki segment proveden ciklus opterećenje-rasterećenje u linearnom području. Pritom se za svaki segment mjerilo produljenje pomoću ekstenzometra na koji su spojena dva linearno varijabilna diferencijalna transformatora (LVDT-a), a koji služe za izračun lokalnog MOE (Fotografija 2.1.). Za određivanje globalne vlačne čvrstoće proveden je test do loma, potom su provedeni vlačni testovi na preostala dva dijela lamele u svrhu dobivanja lokalnih vlačnih čvrstoća. Oko 70% testova je ponovljeno drugi put na ostatku lamele, dok su treći i četvrti test izvršeni na 43% i 2% uzoraka.

Fotografija 2.1 Ekstenzometar za mjerenje deformacija segmenata lamela []

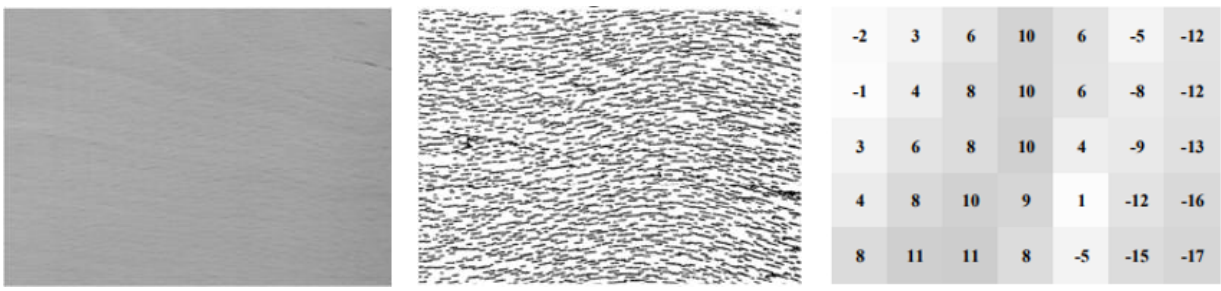
Najčešči način otkazivanja prilikom provođenja vlačnih testova na lamelama je krto otkazivanje na mjestu čvora ili sjecištu vanjskog ruba lamele i vlakanaca pod kutom. Uočena je linearna veza između vlačne sile i produljenja (pomaka klipa). Linija loma je okomita na uzdužnu os lamele (Fotografija 2.2. a)) dok u nekim slučajevima prati nagib vlakanaca (Fotografija 2.2. b)). Nije primijećen gubitak mehaničkih karakteristika preostalih dijelova lamele.

a) b)

Fotografija 2.2 a) linija loma je okomita na uzdužnu os lamele; b) linija loma prati nagib vlakanaca [17]

Prilikom provođenja eksperimentalnih istraživanja, potrebno je pratiti utjecaj devijacije vlakanaca i kvrgi s obzirom da imaju značajan utjecaj na mehanička svojstva. Kvrge često nastaju na mjestu gdje je grana povezana sa stablom uzrokujući lokalnu devijaciju vlakanaca. Mnogo je

istraživanja na temu negativnog utjecaja kvrgi na mehanička svojstva drva četinjača [90], [91] kao i drva listača [82], [92]. Jedna od metoda mjerenja kvrgi i devijacije vlakanaca uključuje algoritme za obradu slika te analizu orijentacije vlakanaca na površini elementa pomoću laserskih skenera (Fotografija 2.3) [17], [83].



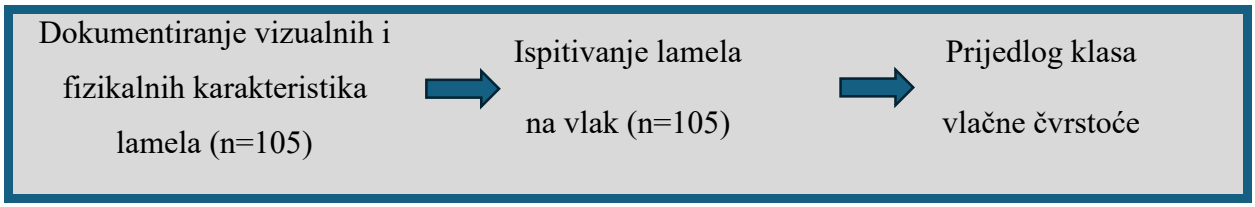

Fotografija 2.3 Beskontaktno generiranje polja vlakanaca uz pripadajući smjer vlakanaca [17]

U okviru industrijske proizvodnje nastaju dodatni izvori varijacija u drvu kao što su načini rezanja, obrade, proces sušenja što dovodi do zaključka da su konačno proizvedene lamele produkt višestrukog procesa koji rezultira velikim brojem nesigurnosti u mehaničkim svojstvima. Statističkim obradama i različitim metodama klasifikacije moguće je minimizirati ove nesigurnosti. Sukladno tome, nužno je razvrstati lamele prema krutosti i čvrstoći, pomoću nerazorno mjerljivih parametara, kako bi se koristile u nosivim konstrukcijama. Navedeno pretpostavlja korištenje nedestruktivnih metoda za određivanje mjerljivih parametara i korelacija s traženom čvrstoćom i krutosti. Iz navedenog se može zaključiti kako su potrebni dodatni eksperimenti na uzorcima izrađenim od različitih vrsta listača kako bi se formirale vlačne klase za listače.

## 2.3. Značajke ispitivanog materijala

Eksperimentalno istraživanje provedeno je na 105 lamela od drva graba (*Carpinus betulus* L.) s područja Slavonije i obrađenima u tvrtki Drvene konstrukcije d.o.o. u Voćinu. Konačne dimenzije lamela su 100x20x3200 $mm^3$, s tim da je debljina lamela od 20 mm odabrana temeljem istraživanja Fruhwald i dr. [93], a koji su ustanovili bolje ponašanje pri delaminaciji za tanje lamele. U prvoj fazi ovog dijela istraživanja dokumentirani su vizualni i fizikalni parametri na svih 105 lamela, a koje su u drugoj fazi ispitane destruktivnim vlačnim ispitivanjem u svrhu određivanja vlačne čvrstoće i krutosti prema EAD-u [34] i EN 14080 [33] (Crtež 2.1). Navedeno podrazumijeva precizno mjerenje dimenzija, određivanje gustoće, mjerenje čvorova s promjerom većim od 5 mm, određivanje dinamičkog modula elastičnosti, vlačno ispitivanje lamela i proračun

karakteristične vlačne čvrstoće i modula elastičnosti. Konačno, dan je prijedlog klasa vlačne čvrstoće za lamele graba kao i korelacije mjerenih parametara i mehaničkih svojstava. U pilani i laboratoriju nije zabilježeno odbacivanje lamela.

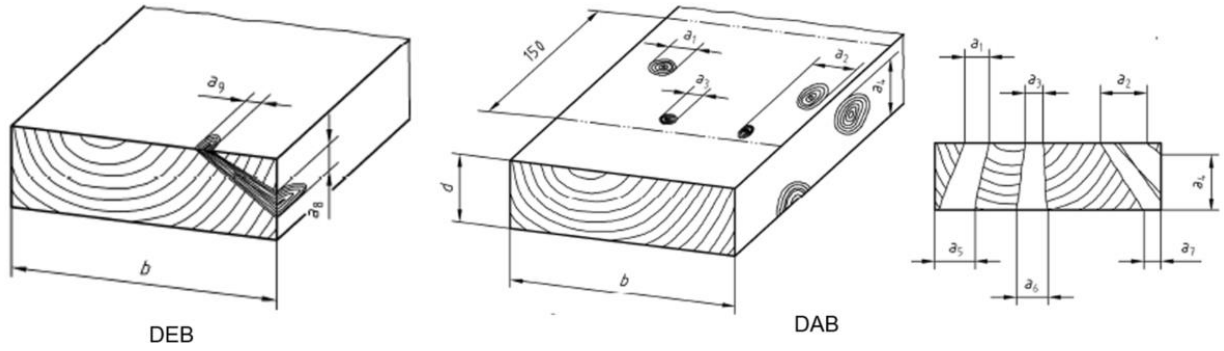



Crtež 2.1 Pregled faza istraživanja svojstava lamela graba

## 2.4. Nerazorne metode mjerenja parametara za određivanje mehaničkih karakteristika

### 2.4.1. Vizualni parametri

Pojam greške u drvu podrazumijeva nepravilnost drvene građe koja utječe na smanjenje mehaničkih karakteristika, npr. kvrge, smolne vrećice, bušotine od insekata, raspukline, usukanost, trulež, itd. Navedene nepravilnosti u drvu predstavljaju značajke drvene strukture koje zahtijevaju pažnju prilikom procesa klasifikacije lamela s obzirom da narušavaju njihovu kvalitetu. Otklon vlakanaca oko rubnih čvorova ima poseban utjecaj budući je lokalno prekinut procesom rezanja lamela formirajući oslabljenu zonu koja značajno smanjuje mehanička svojstva. Sarnaghi i Van de Kuilen [94] istaknuli su rubne kvrge kao kritične dijelove lamele zbog pojave koncentracije naprezanja. Njemački standard DIN 4074-5 [19] kvantificira pojedine nepravilnosti u svrhu vizualnog razvrstanja u pojedine klase LS7, LS10 i LS13. Parametar koji se najčešće određuje u znanstvenim istraživanja je veličina kvrgi, a DIN 4074-5 [19] ga definira kao omjer zbroja vidljivih širina pojedinačne kvrge na plohama lamele i dvostruke širine lamele - DEB (DIN *Einzelast Brett*) ili skupine kvrgi unutar duljine lamele od 150 mm - DAB (DIN *Astansammlung Brett*) (Crtež 2.2.). Pritom se preklapajući dijelovi kvrgi bilježe samo jednom. Također, u istraživanjima se koristi i parametar KAR koji predstavlja omjer projicirane površine pojedinačne kvrge i površine poprečnog presjeka lamele odnosno parametar tKAR za skupine kvrgi unutar duljine lamele od 150 mm.




Crtež 2.2 Shematski prikaz određivanja širina kvrgi kod izračuna vrijednosti DAB i DEB prema DIN 4074-5, pri čemu $a_1 - a_9$ predstavljaju izmjerene širine kvrgi na pojedinoj strani lamele [19]

105 lamela graba pregledano je vizualnom inspekcijom prije provođenja destruktivnih eksperimentalnih testova. Kvrge, uključujući žive i trule, kao i urasli dijelovi kore u deblo, s dimenzijama većim od 5 mm promjera evidentirani su ručno prema DIN 4074-5 [19]. Vizualnim pregledom utvrđena je prisutnost kvrgi različitih dimenzija i oblika na 80% lamela, pri čemu je posebna pažnja posvećena njihovom položaju unutar lamele. Dijelovi lamela s kvrgama različitih oblika i veličine i dijelovi bez kvrgi izmjenjuju se duž cijele duljine lamele, a što rezultira nehomogenošću materijala. Vrijednosti DAB/DEB bile su ispod 0.05 za oko 30% lamela, dok je kod ukupno 50% lamela ta vrijednost iznosila manje od 0.1. S obzirom da prethodnim istraživanjima [87] nisu pronađene značajne korelacije između širine godova i vlačnih svojstava kod difuzno-poroznih tvrdih drva poput bukve ili breze za razliku od prstenasto-poroznih, utjecaj širine godova na vlačnu čvrstoću i krutost europskog graba, kao difuzno-poroznog tvrdog drva, nije istražen u ovoj studiji. Pukotine, uključujući čeone i bočne raspukline, pukotine od utezanja i isušivanja, nisu uočene na nijednoj lameli. Istraživanjima je utvrđeno da crveno srce ili neprava srž (‘*redheart*’) nemaju utjecaj na mehanička svojstva tvrdih drva [93]. U svrhu potvrđivanja navedenog, prisutnost crvenog srca kod lamela graba je dokumentirana i uočena na cca 10% lamela. Uočeno je da se otklon vlakanaca kontinuirano mijenja i duž uzdužne i duž poprečne osi daske, a razlikujemo globalni i lokalni otklon vlakanaca u odnosu na os elementa. Lokalna odstupanja vlakanaca se često mogu uočiti u blizini kvrgi pri čemu utječu na smanjenje mehaničkih karakteristika. Globalna odstupanja vlakanaca su najčešće uzrokovana zakrivljenim rastom debla.

### 2.4.2. Gustoća

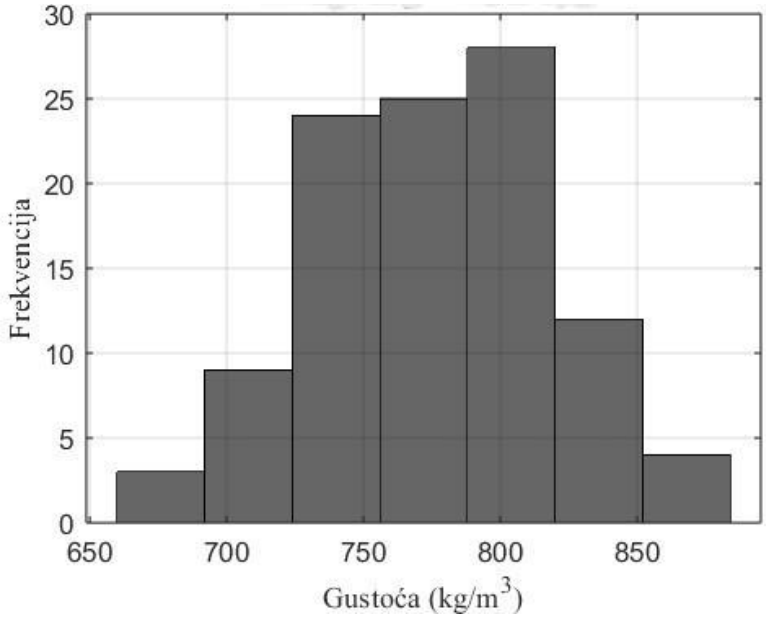
Općenito, kod mekih drva postoji pozitivna korelacija između gustoće i mehaničkih karakteristika drva. Europski standardi koji definiraju klase čvrstoće pretpostavljaju jaku korelaciju između gustoće i vlačne čvrstoće ili čvrstoće na savijanje, dok JCSS [95] sugerira

srednju korelaciju (0.6) između gustoće i vlačne čvrstoće te jaku korelaciju (0.8) u usporedbi s tlačnom čvrstoćom. Međutim, istraživanja tvrdih drva pokazala su da je ta korelacija znatno slabija. Fruhwald i Schickofer [93] su utvrdili koeficijent determinacije od 0.03 između gustoće i vlačne čvrstoće za bukvu, jasen i hrast.

Gustoća lamela graba $\rho$ (kg/m$^3$) određena je iz mase i volumena lamele pri izmjerenoj vlažnosti nakon čega je korigirana na referentnu vlažnost od 12% $\rho_{12}$ prema formuli iz EN 384 [71]:

$$\rho_{12} = \rho(1 - 0.005(u - 12)) \tag{2.1.}$$

gdje $\rho$ predstavlja omjer mase i volumena lamele, dok $u$ predstavlja vlažnost pojedine lamele. Srednja vrijednost gustoće $\rho_{mean}$ iznosi 774.82 kg/m$^3$ pri vlažnosti od 12%, a koeficijent varijacije (CoV) 0.05. Minimalna vrijednost gustoće $\rho_{min}$ iznosi 676.04 kg/m$^3$, dok maksimalna vrijednost gustoće $\rho_{max}$ iznosi 894.44 kg/m$^3$. Na Grafikonu 2.2. dan je histogram gustoće s brojem lamela u pojedinom intervalu, dok su u Tablici 2.2. dani statistički parametri za gustoću.




Grafikon 2.2 Histogram gustoće lamela graba,

Tablica 2.2 Statistički parametri za gustoću lamela

| n | $\rho_{mean}$ (kg/m$^3$) | $\rho_{min}$ (kg/m$^3$) | $\rho_{max}$ (kg/m$^3$) | $\rho_{05}$ (kg/m$^3$) | CoV |
|---|---|---|---|---|---|
| 105 | 774.82 | 676.04 | 894.44 | 709.78 | 0.05 |

### 2.4.3. Dinamički modul elastičnosti $E_{dyn}$

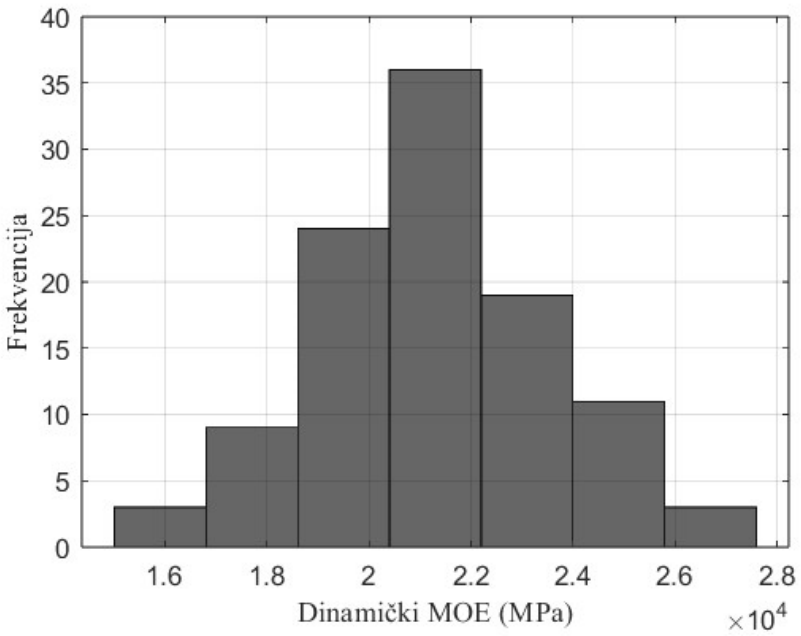
Nerazorna metoda mjerenja dinamičkog modula elastičnosti $E_{dyn}$ provedena je korištenjem ultrazvučnog uređaja 'Sylvatest'. Na oba kraja lamele, u središtu poprečnog presjeka, izbušene su rupe promjera 5 mm u koje su potom postavljene dvije ultrazvučne sonde. Pritom se mjerilo vrijeme prolaska ultrazvučnog vala između sonde odašiljača i sonde prijamnika. Dinamički MOE $E_{dyn}$ [MPa] računa se iz sljedećeg izraza:

$$E_{dyn} = \rho v^2 \tag{2.2.}$$

gdje je $\rho$ (kg/m$^3$) gustoća lamela, a $v$ (m/s) brzina prolaska ultrazvučnog vala od jednog do drugog kraja lamele dobivena iz omjera ukupne duljine lamele i vremena prolaska ultrazvučnog vala. Vrijednosti za dinamički MOE korigirane su na referentnu vlažnost od 12% $E_{dyn,12}$ (MPa) prema formuli [17]:

$$E_{dyn,12} = \frac{E_{dyn}}{1 - 0.0087(u - 12)} \tag{2.3.}$$

Srednja vrijednost dinamičkog modula elastičnosti $E_{dyn,mean}$ iznosi 21283 MPa pri vlažnosti od 12%, a koeficijent varijacije (CoV) 0.1. Minimalna vrijednost dinamičkog modula elastičnosti $E_{dyn,min}$ iznosi 15786 MPa, dok je maksimalna vrijednost dinamičkog modula elastičnosti $E_{dyn,max}$ 27484 MPa (Grafikon 2.3.). U Tablici 2.3 dani su statistički parametri za dinamički MOE.




Grafikon 2.3 Histogram dinamičkog MOE

Tablica 2.3 Statistički parametri za dinamički MOE

| n | $E_{dyn,mean}(MPa)$ | $E_{dyn,min}(MPa)$ | $E_{dyn,max}(MPa)$ | $E_{dyn,0.05}(MPa)$ | CoV |
|---|---|---|---|---|---|
| 105 | 21283 | 15786 | 27484 | 17636 | 0.1 |

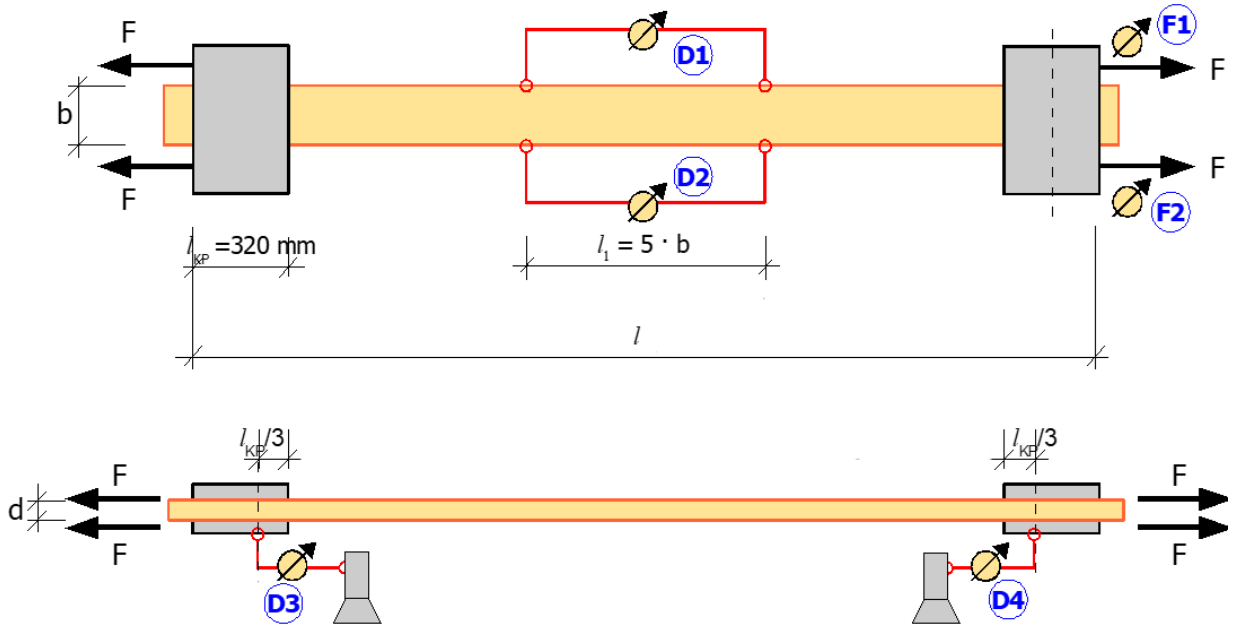
## 2.5. Vlačni testovi na lamelama graba

Vlačni testovi na lamelama graba provedeni su na Tehničkom sveučilištu u Grazu (engl. *The Institute of Timber Engineering and Wood Technology),* na horizontalnom stroju Lignum_z_850 (GEZU 850, ZUM WALD) prikazanom na Fotografiji 2.4. Horizontalni stroj omogućava provođenje vlačnih ispitivanja na uzorcima pravokutnog poprečnog presjeka do maksimalne vrijednosti opterećenja od 850 kN. Testovi su provedeni u svrhu određivanja vlačne čvrstoće paralelno s vlakancima i modula elastičnosti za svaku od 105 lamela graba [96].

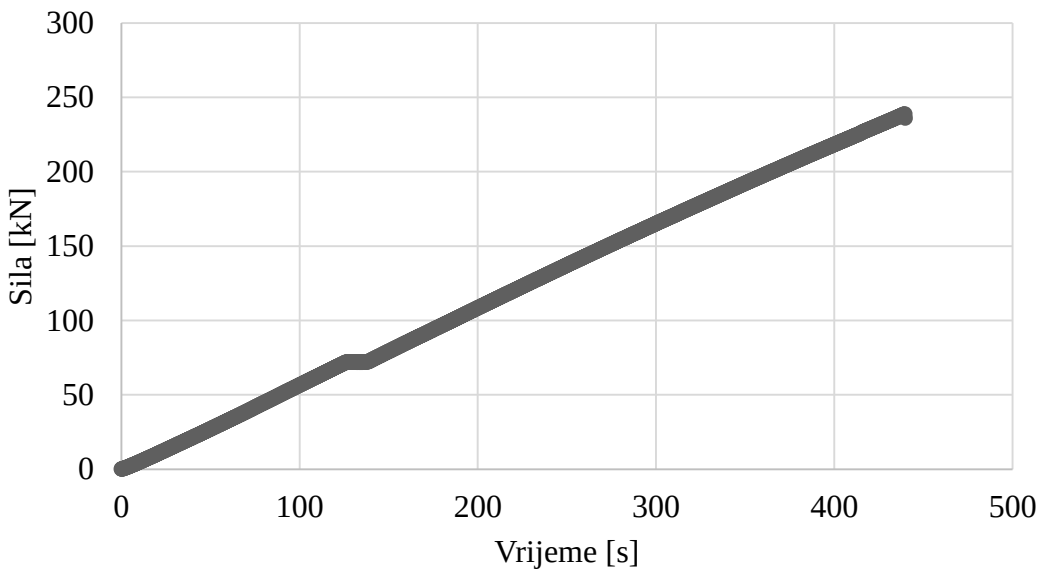
Fotografija 2.4 Horizontalni vlačni stroj GEZU 850, ZUM WALD, TU Graz

Prije razornih vlačnih testova, izmjerene su širina, debljina, duljina i masa svake lamele. Širina i debljina lamela izmjerene su na tri pozicije duž duljine lamela s vrijednostima cca 20x100 mm$^2$, dok je duljina lamele iznosila cca 3200 mm. Vlačni testovi provedeni su sukladno normi EN 408 [70] prema kojoj slobodna duljina uzorka mora biti minimalno 9 puta veća od širine poprečnog presjeka. Mjerna oprema mora omogućiti preciznost mjerenja sile od 1% ukupnog opterećenja. Maksimalna sila mora biti dosegnuta unutar intervala (300±120) sekundi. Deformacije se mjere duž duljine od *5x* širina poprečnog presjeka s dva ekstenzometra pri čemu preciznost mjerenja deformacija mora biti 1%. Sila *F* mjerena je kontinuirano i određena je sukladno tlaku u hidrauličnom sustavu i reakciji u ćeliji. Sila se prenosi preko steznih čeljusti duljine $l_{kp}$ od 330

mm dok je slobodna duljina lamele $l$ 2540 mm. Nakon što je dosegnuta sila od otprilike 35% $F_{max}$, obostrano postavljeni ekstenzometri za određivanje MOE su uklonjeni kako ne bi došlo do njihovog oštećenja (Crtež 2.3.). Režim opterećenja za uzorak lamele broj 23 dan je na Grafikonu 2.4.




Crtež 2.3 Prikaz vlačnog testa u horizontalnom vlačnom stroju (ekstenzometri D1-D4)




Grafikon 2.4 Režim opterećenja za uzorak lamele br. 23

Lokalni MOE paralelno s vlakancima $E_{t,0}$ određuje se prema formuli:

$$E_{t,0} = \frac{l}{w \cdot t} \frac{F_2 - F_1}{u_2 - u_1} \tag{2.4.}$$

gdje je $u_2 - u_1$ (mm) inkrement deformacije koji odgovara inkrementu sile $F_2 - F_1$ (N) mjeren ekstenzometrima sukladno EN 408. Vlačna čvrstoća $f_{t,0}$ (MPa) izračunata je pomoću izraza:

$$f_{t,0} = \frac{F_{max}}{w \cdot t} \tag{2.5.}$$

gdje $F_{max}$ (N) predstavlja lomnu silu, *w* (mm) je širina poprečnog presjeka, dok *t* (mm) predstavlja debljinu poprečnog presjeka. Nakon provedbe razornih vlačnih testova, zabilježeni su različiti načini otkazivanja.

Vlažnost pojedine lamele određena je neposredno nakon provedbe testova na uzorcima izdvojenim iz lamele u blizini područja loma pri čemu segmenti nisu sadržavali nepravilnosti kao što su kvrge, smolne džepove ili uraslu koru. Korištena je gravimetrijska metoda sušenja i vaganja prema normi EN 13183-1 [97] pri čemu se ispitni uzorak suši na temperaturi od 103±2 °C do apsolutno suhog stanja (konstantne mase). Razlika u masi između dva uzastopna vaganja u intervalu od dva sata ne smije biti manja od 0.1%. Vlažnost se određuje kao postotak udjela razlike u masi prije i nakon sušenja u odnosu na masu apsolutno suhog stanja i iznosila je 13.14% ± 1.68% za svih 105 uzoraka.

## 2.6. Analize za obradu podataka

Zajednički odbor za sigurnost konstrukcija (engl. '*The Probabilistic Model Code of the Joint Committee on Structural Safety*' - JCSS) [95], definira odgovarajuće funkcije raspodjele za opis fizikalnih i mehaničkih svojstava. Preporučena distribucija za gustoću je normalna distribucija, dok se lognormalna distribucija primijenjuje za čvrstoće i MOE. Procjenjitelji, srednja vrijednost i standardna devijacija, dobiveni su koristeći metodu maksimalne vjerodostojnosti i europski standard EN 14358 [75]. Općenito, EN 14358 [75] daje smjernice za parametarski i neparametarski proračun pri čemu parametarski proračun pretpostavlja normalnu ili lognormalnu distribuciju rezultata testa. Isto tako, propisuje metode za određivanje karakterističnih vrijednosti iz eksperimentalnih rezultata. Općenito, karakteristična vrijednost za parametar čvrstoće materijala ili otpornosti kao stohastička varijabla, definirana je kao *p*-percentil u funkciji distribucije pri čemu se najčešće pretpostavlja *p=5%*.

Višestruke linearne i nelinearne regresije provedene su u Matlabu [98] kako bi se dobila veza između dvije varijable (DAB/DEB i $E_{dyn}$) i eksperimentalno dobivenih mehaničkih karakteristika, vlačne čvrstoće i krutosti. Radi pojednostavljenja formiranja daljnjih izraza, u ovom radu su parametri za kvrge, DAB i DEB, objedinjenji pod zajedničkim nazivom DAB. Koeficijent determinacije ($R^2$) i standardna devijacija pogreške $\sigma_\varepsilon$ prikazani su kao osnovni pokazatelji veze između parametara. Pogreška $\varepsilon$, odnosno razlika između procijenjenih vrijednosti i stvarne vrijednosti parametra, ravna se prema normalnoj distribuciji sa srednjom vrijednosti 0 ($N \sim (0, \sigma_\varepsilon)$), dok se standardna devijacija pogreške $\sigma_\varepsilon$ može izračunati koristeći jednadžbu [17]:

$$\sigma_\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{n-k}^{n} \varepsilon_i^2}{n-k}} \tag{2.6.}$$

gdje $n$ predstavlja broj podataka, a $k$ je broj regresijskih koeficijenata. Za vlačnu čvrstoću $f_{t,0}$ korištene su slijedeće jednadžbe:

$$f_{t,0} = a + b * E_{dyn} + c * DAB + \varepsilon \tag{2.7.}$$

$$\ln(f_{t,0}) = a + b * E_{dyn} + c * e^{d*DAB} + \varepsilon \tag{2.8.}$$

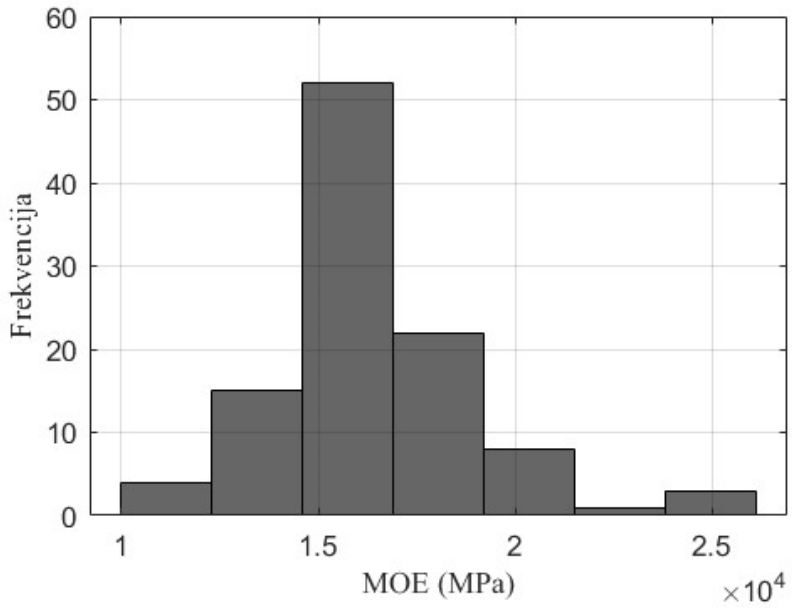
$$f_{t,0} = a + b * E_{dyn}^{c} + d * DAB^{e} + \varepsilon \tag{2.9.}$$

gdje su $a$, $b$, $c$, $d$ i $e$ parametri koji se procjenjuju regresijskom analizom i to najčešće metodom najmanjih kvadrata. Kako bi se povećala preciznost regresijskih modela, primijenjeni su različiti pristupi, uključujući metodu najmanjih apsolutnih reziduala (*'Least Absolute Residuals'*) i uklanjanje stršećih vrijednosti (*'outliers'*) kako bi se smanjio njihov utjecaj na rezultate.

## 2.7. Rezultati vlačnih testova

### 2.7.1. Modul elastičnosti paralelno s vlakancima

Distribucija modula elastičnosti paralelno s vlakancima i pripadajući statistički parametri dani su na Grafikonu 2.5. Statistički parametri za modul elastičnosti dani su u Tablici 2.4. Minimalne i maksimalne vrijednosti za MOE kreću se između 11.4 GPa i 25.46 GPa, dok srednja vrijednost iznosi 16.44 MPa. Vrijednost 5. percentil je 12.96 GPa, dok je CoV 0.15.



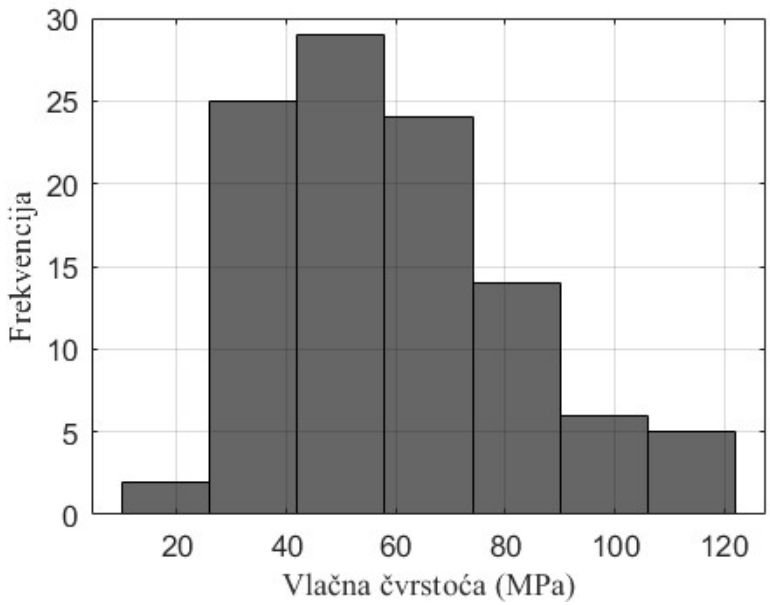

Grafikon 2.5 Vrijednosti za modul elastičnosti $E_{t,0}$

Tablica 2.4 Statistički parametri za modul elastičnosti $E_{t,0}$ (MPa)

| n | $E_{t,0,mean}(GPa)$ | $E_{t,0,min}(GPa)$ | $E_{t,0,max}(GPa)$ | $E_{t,05}(GPa)$ | CoV |
|---|---|---|---|---|---|
| 105 | 16.44 | 11.4 | 25.46 | 12.95 | 0.15 |

### 2.7.2. Vlačna čvrstoća paralelno s vlakancima

Grafikon 2.6. prikazuje rezultate vlačne čvrstoće paralelno s vlakancima. Srednja vrijednost vlačne čvrstoće paralelno s vlakancima iznosi 60.28 MPa, u rasponu od 17.81 MPa do 120.47 MPa. Vrijednost 5. percentil 30.59 MPa, dok koeficijent varijacije (CoV) od 0.37 pokazuje veliku varijabilnost rezultata. Statistički parametri za vlačnu čvrstoću dani su u Tablici 2.5. Prethodni rezultati slični su rezultatima dobivenim ispitivanjem bukve [17], uz razliku koeficijenta varijacije koji je u prethodno spomenutom istraživanju iznosio 0.65.




a)

Grafikon 2.6 Vrijednosti za vlačnu čvrstoću $f_{t,0}$

Tablica 2.5 Statistički parametri za $f_{t,0}$ (MPa)

| n | $f_{t,0,mean}(MPa)$ | $f_{t,0,min}(GPa)$ | $f_{t,0,max}(GPa)$ | $f_{t,05}(GPa)$ | CoV |
|---|---|---|---|---|---|
| 105 | 60.28 | 17.81 | 120.47 | 30.59 | 0.37 |

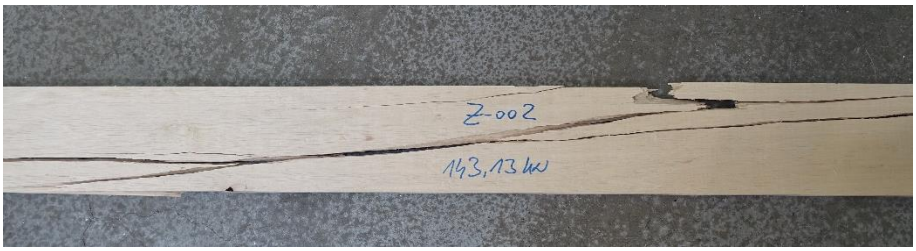
## 2.7.3. Modovi otkazivanja

Nakon destruktivnih vlačnih testova, provedena je vizualna procjena modova otkazivanja pri čemu je uočena složena veza između vlačne čvrstoće i karakteristika drva uzrokovanih prirodnim rastom. Fotografija 2.5. prikazuje 7 različitih načina otkazivanja, i to vlačni lom u u području kvrgi (Fotografija 2.5.a), $n = 25$, gdje $n$ predstavlja broj lamela), vlačni lom sa značajnim cijepanjem okomito na vlakanca '*splinter failure*' (Fotografija 2.5.b), $n = 20$), kombinirani vlačni i posmični lom zbog globalnog otklona vlakanaca (Fotografija 2.5.c), $n = 9$), posmični lom uslijed globalnog otklona vlakanaca (Fotografija 2.5.d), $n = 14$), posmični lom uslijed lokalnog otklona vlakanaca oko kvrgi (Fotografija 2.5.e), $n = 15$), kombinirani vlačni lom i otkazivanje uslijed lokalnog otklona vlakanaca (Fotografija 2.5.f), $n = 7$), lom uslijed nepravilnosti crvenog srca (Fotografija 2.5.g), $n = 11$). Također, zabilježena su 4 otkazivanja uslijed tlaka u čeljustima horizontalnog stroja. Analiza uzoraka s otkazivanjem u području čeljusti pokazuje zanemarivu razliku u cjelokupnoj statistici, neovisno o tome ubrajaju li se prethodno spomenute vrijednosti ili se u potpunosti isključuju iz analize. 38% lamela otkazalo je u području

kvrgi pri čemu navedeno podrazumijeva vlačni lom i lokalno odstupanje oko kvrge. 29% lamela otkazalo je uslijed globalnog ili lokalnog otklona vlakanaca isključujući lokalni otklon oko kvrgi. S obzirom da je srednja vrijednost vlačne čvrstoće lamela koje sadrže crvenu srž 44,01 MPa, iste nisu isključene iz analize, a što je u suprotnosti s klasifikacijom koja se provodi prema DIN 4074-5 [19]. Najviše vrijednosti vlačne čvrstoće povezuju se s '*splinter failure*' odnosno s višestrukim cijepanjem lamele okomito na vlakanca ($f_{t,0,mean} = 91MPa, f_{t,05} = 59MPa$).

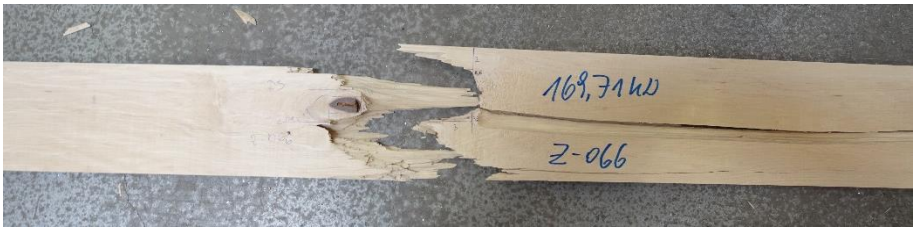
a)

b)




c)

d)




e)

f)

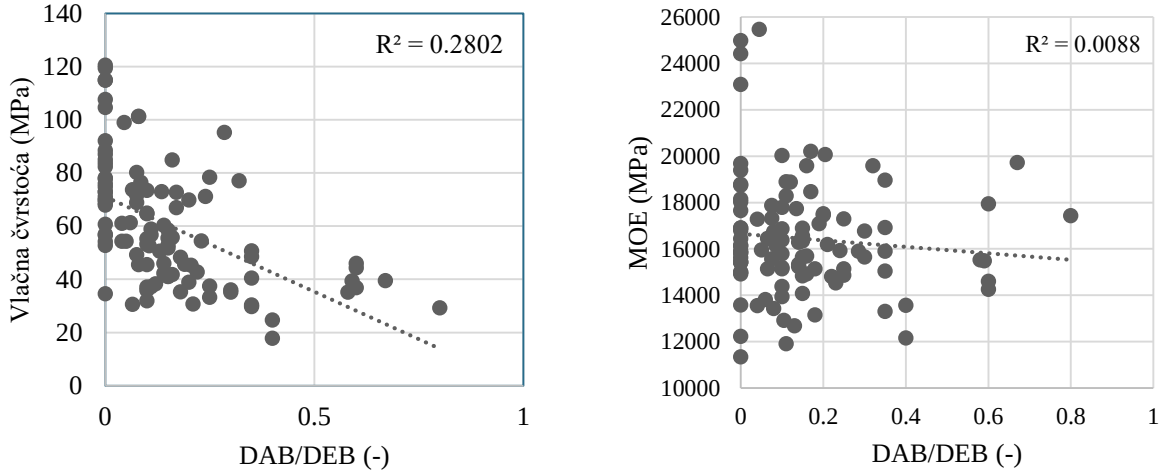
g)

Fotografija *2.5* Načini otkazivanja: a) vlačni lom u u području kvrgi, b) vlačni lom sa značajnim cijepanjem okomito na vlakanca, c) kombinirani vlačni i posmični lom zbog globalnog otklona vlakanaca, d) posmični lom uslijed globalnog otklona vlakanaca, e) posmični lom uslijed lokalnog otklona vlakanaca oko kvrgi, f) kombinirani vlačni lom i otkazivanje uslijed lokalnog otklona vlakanaca, g) lom u području crvenog srca

### 2.7.4. Korelacija između indikatora i ciljnih parametara

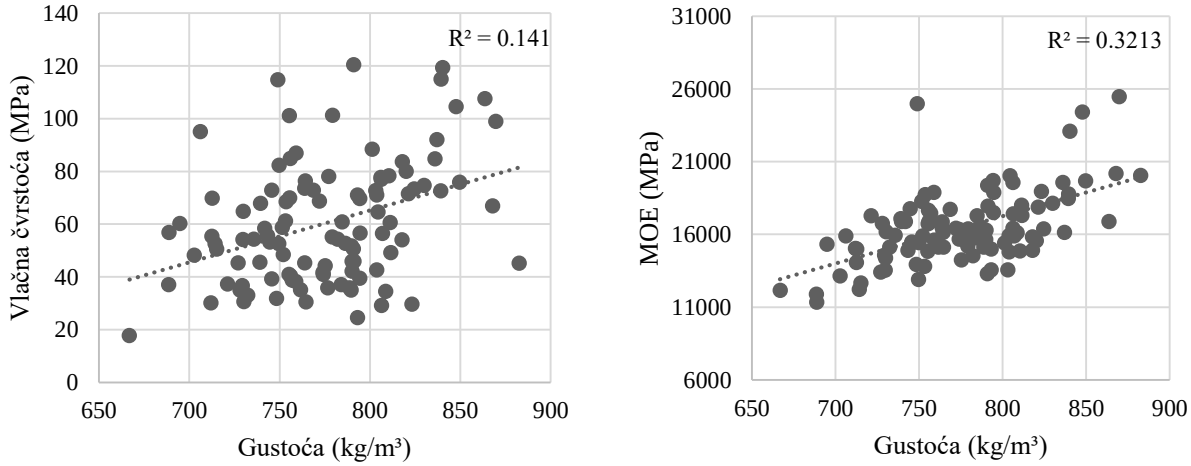
Grafikon 2.7 predstavlja korelaciju između indikatora, veličine kvrgi DAB/DEB, gustoće i dinamičkog MOE i ciljnih parametara vlačne čvrstoće i modula elastičnosti paralelno s vlakancima. Grafikon 2.7 a) i 2.7 b) ukazuje na slabu korelaciju između DAB/DEB i eksperimentalno određene vlačne čvrstoće i krutosti. Uočen je zanemariv utjecaj gustoće na vlačnu čvrstoću (Grafikon 2.8 a)) i MOE (Grafikon 2.8 b)), a što je u suglasju s istraživanjem Fruhwald i Schickhofer [93] i Ehrhart [92]. Također, gustoća pokazuje značajnu varijabilnost vrijednosti u intervalu od 667 kg/m$^3$ do 883 kg/m$^3$ što potvrđuje hipotezu prema kojoj pridruživanje jedne vrijednosti gustoće za sva tvrda drva može biti složeno. Također, zanemariv je utjecaj dinamičkog MOE na vlačnu čvrstoću (Grafikon 2.9 a)) Može se uočiti kako usporedba vrijednosti dinamičkog MOE i MOE pri vlačnom naprezanju daje najveće vrijednosti koeficijenta determinacije od 0.54 (Grafikon 2.9 b)), dok Pearsonov korelacijski koeficijent iznosi +0.733. Općenito, Pearson-ov

korelacijski koeficijent predstavlja linearnu vezu između dva seta podataka. Ovi rezultati su niži od rezultata dobivenih istraživanjem Rais i dr. [83] za europsku bukvu gdje je Pearsonov koeficijent iznosio 0.932.



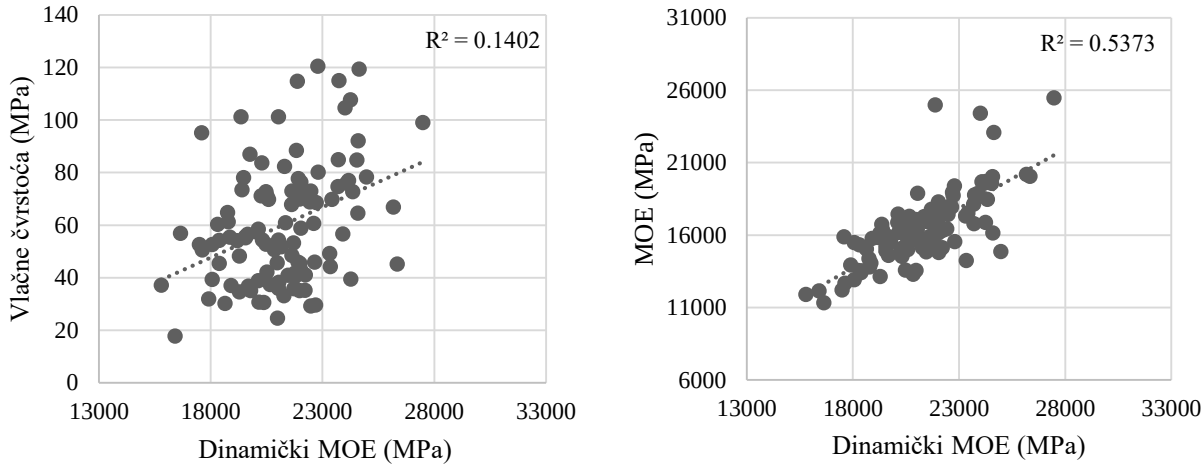

a) b)

Grafikon 2.7 a) ovisnost vlačne čvrstoće o parametrima DAB/DEB; b) ovisnost MOE o parametrima DAB/DEB




a) b)

Grafikon 2.8 a) ovisnost vlačne čvrstoće o gustoći; b) ovisnost MOE o gustoći




a) b)

Grafikon 2.9 a) ovisnost vlačne čvrstoće o dinamičkom MOE; b) ovisnost MOE o dinamičkom MOE

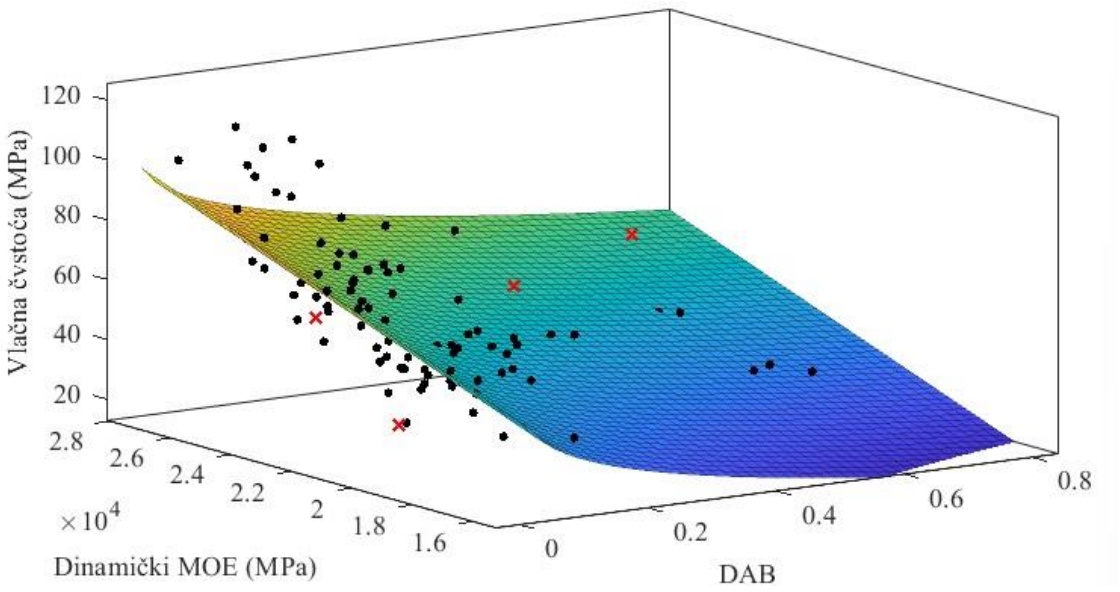
### 2.7.5. Višestruki regresijski modeli za predviđanje mehaničkih karakteristika

Tablica 2.6. predstavlja tri različita tipa višestrukih regresijskih jednadžbi za predviđanje vlačne čvrstoće korištenih u sklopu ove analize rezultata. U Tablici 2.6. su dani parametri regresije s koeficijentom determinacije $R^2$ pri čemu druga jednadžba pokazuje najvišu vrijednost koeficijenta determinacije među ostalim jednadžbama sa srednjom prilagodbom podacima.

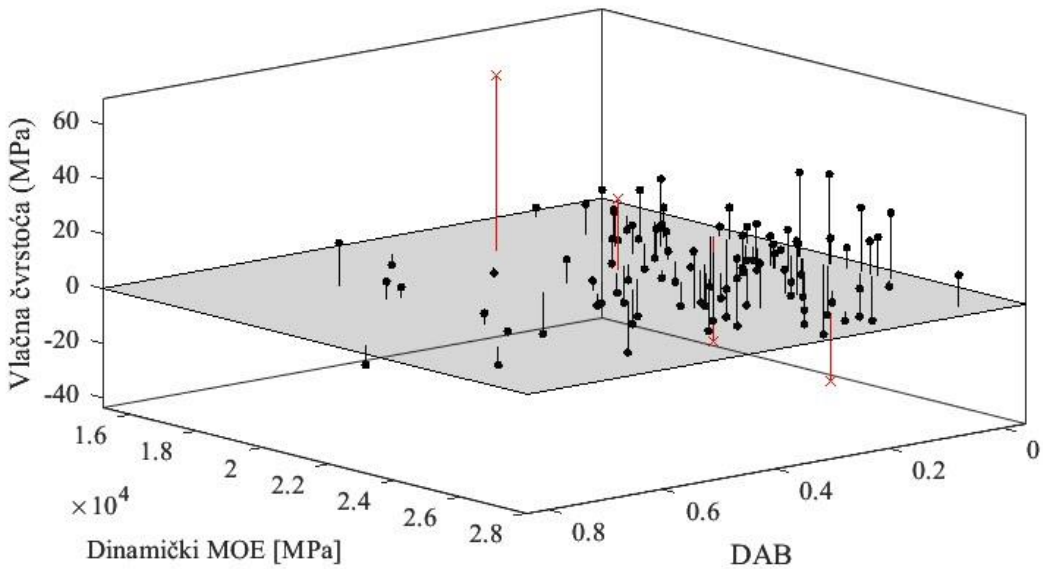
Tablica 2.6 Parametri regresijskih jednadžbi za predviđanje vlačne čvrstoće (*Y*)

| | a | b | c | d | e | $R^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $Y = a + b * E_{dyn} + c * DAB$ | -13.67 | 0.0041 | -69.81 | - | - | 0.43 |
| $\ln(Y) = a + b * E_{dyn} + c * e^{d*DAB}$ | 2.2371 | 0.0001 | 0.755 | -4.8940 | - | 0.57 |
| $Y = a + b * E_{dyn}^{c} + d * DAB^{e}$ | 0.4941 | 0.00384 | 1 | -52.83 | 0.431 | 0.49 |

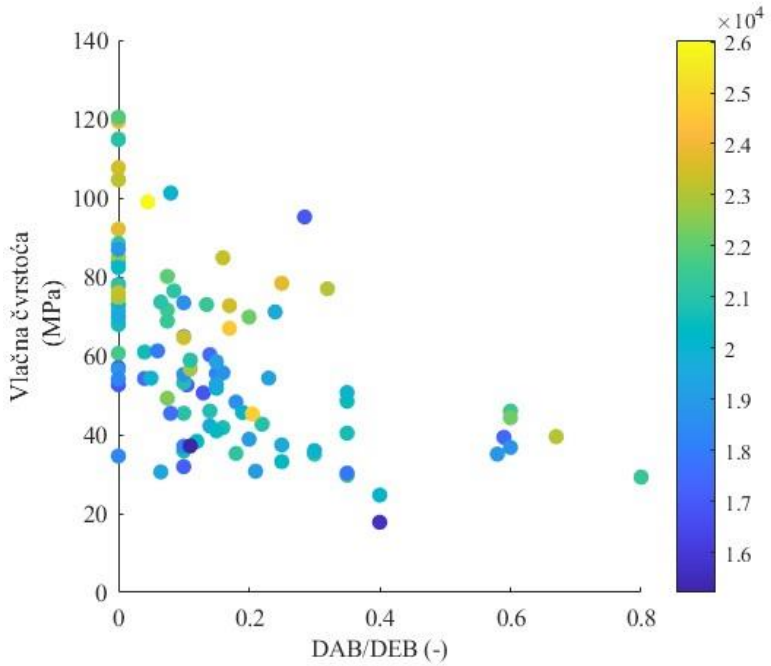
Grafikon 2.10. a) prikazuje plohu koja predstavlja odnos vlačne čvrstoće te dinamičkog MOE i parametra kvrgi DAB dobivenu analizom prilagođenog regresijskog modela korištenjem metode najmanjih kvadrata u programu Matlab [98]. Poboljšanje navedenog modela postignuto je korištenjem metode najmanjih apsolutnih reziduala LAR i uklanjanjem 4% stršećih vrijednosti čime se koeficijent determinacije povećao na 0.66. Isto tako, smanjen je korijen srednje kvadratne pogreške (engl. *Root mean square error* - RMSE).


Vlačna čvstoća (MPa)
120
100
80
60
40
20
2.8
2.6
2.4
2.2
2
1.8
1.6
×10^4
Dinamički MOE (MPa)
0
0.2
0.4
0.6
0.8
DAB

a)


Vlačna čvrstoća (MPa)
60
40
20
0
-20
-40
1.6
1.8
2
2.2
2.4
2.6
2.8
×10^4
Dinamički MOE [MPa]
0.8
0.6
0.4
0.2
0
DAB

b)




c)

Grafikon 2.10 Prikaz a) ovisnost vlačne čvrstoće paralelno s vlakancima o parametrima $E_{dyn}$ i DAB, b) stršećih vrijednosti (engl. *outliers*) prikazanih crvenom bojom, c) dijagrama raspršenosti s dinamičkim MOE (MPa) prikazanim skalom boja na desnoj strani

Tablica 2.7. prikazuje vrijednosti parametara regresijskih jednadžbi za predviđanje modula elastičnosti. Obje jednadžbe dale su slične vrijednosti koeficijenta determinacije. Provedena je analiza rezultata na način da su formirane dvije grupe uzoraka, s kvrgama i bez kvrgi, pri čemu navedeno nije rezultiralo značajnim promjenama rezultata. Međutim, ukoliko se primjenjuje metoda najmanjih apsolutnih reziduala (LAR), koeficijent determinacije se značajno poveća s 0.55 na 0.96., uz standardnu devijaciju pogreške od 476,4. Prema istraživanjima Rais i dr. [83], Collins i Fink [87] te Ehrhart [17], a koji su postigli neznatno više vrijednosti $R^2$, predviđanje čvrstoće i krutosti može se unaprijediti korištenjem različitih metoda za detekciju lokalnih i globalnih odstupanja vlakana.

Tablica *2.7* Parametri regresijskih jednadžbi za predviđanje MOE (*Y*)

| | a | b | c | d | e | $R^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $Y = a + b * E_{dyn} + c * DAB$ | -1186 | -1012 | 0.8744 | - | - | 0.54 |
| $Y = a + b * E_{dyn}^{c} + d * DAB^{e}$ | 7781 | -606.9 | 0.5357 | 0.00002 | 1.969 | 0.55 |

### 2.7.6. Prijedlog klasa čvrstoće lamela od graba

Unatoč tome što je norma za vizualnu klasifikaciju DIN 4074-5 [19] ograničena na određene vrste tvrdih drva, u sklopu ove disertacije korištena je za klasifikaciju lamela graba u nedostatku potrebne norme. Dimenzije kvrgi mjerene su ručno u laboratoriju, a u daljnoj analizi korištena je najveća vrijednost parametra kvrge. Normom DIN 4074-5 [19] definirana je granična vrijednosti od 0.5 za parametar DAB. Mjerenjem je uočeno kako 7 lamela sadrži kvrge s dimenzijama većim od graničnih. Tablica 2.8. prikazuje razvrstavanje lamela ovisno o definiranim intervalima za DAB i dinamički MOE. Najdonji red predstavlja razvrstavanje lamela isključivo po vrijednosti DAB dok desni stupac predstavlja razvrstavanje isključivo prema dinamičkom MOE. Ukoliko promatramo lamele s najstrožom vizualnom granicom za kvrge i.e. $DAB \leq 0.05$, tada 5. percentil vlačne čvrstoće iznosi 44 MPa. Za lamele s vrijednostima parametara $DAB \leq 0.05$ i $E_{dyn} \geq 21000$ MPa, 5. percentil vlačne čvrstoće iznosi 53 MPa. 25 od 105 lamela (23.8%) zadovoljava prethodno spomenute kriterije, što je značajno više u usporedbi s 8% prema Ehrhartu [88]. Vrijednost parametra DAB je ispod 0.1 za oko 50% lamela. 5. percentil vlačne čvrstoće za lamele s vrijednosti $DAB > 0.5$, iznosi 26 MPa s koeficijentom varijacije (CoV) od 0.15.

Eksperimentalno dobivene vrijednosti vlačne čvrstoće premašuju limite vlačnih čvrstoća definiranih za T klase odnosno za meko drvo prema EN 338 [68], a prema kojem maksimalna karakteristična vlačna čvrstoća za klasu T30 iznosi 30 MPa. Temeljem analize mehaničkih svojstava tvrdih drva srednje gustoće, Kovryga i dr. [26] predložili su DT klase do DT50 ($f_{t,0,k} = 50N/mm^2$, $E_{t,0,mean} = 17000N/mm^2$) kao dopunu postojećim D klasama za tvrdo drvo na osnovu savijanja u EN 338 [68]. Za najvišu klasu prema Tablici 1. ($f_{t,05} = 51N/mm^2$), srednja vrijednost za MOE paralelno sa vlakancima ($E_{t,0,mean} = 19639N/mm^2$) je nešto viša od vrijednosti dane u studiji Kovryga i dr. [26].

Tablica *2.8* Svrstavanje lamela ovisno o vrijednosti DAB i dinamičkog MOE s definiranom vrijednosti 5. percentila vlačne čvrstoće na desnoj strani tablice

| $E_{dyn}$ [MPa] | DAB | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ≤0.05 | ≤0.1 | ≤0.2 | ≤0.3 | ≤0.4 | ≤0.5 | all | |
| ≥26000 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | |
| ≥24000 | 6 | 7 | 10 | 12 | 13 | 13 | 14 | |
| ≥23000 | 9 | 10 | 16 | 18 | 19 | 19 | 21 | |
| ≥22000 | 12 | 19 | 28 | 31 | 33 | 33 | 37 | |
| ≥21000 | 21 | 32 | 46 | 52 | 56 | 56 | 60 | |
| ≥20000 | 25 | 37 | 56 | 66 | 72 | 72 | 76 | |
| ≥19000 | 30 | 45 | 66 | 82 | 82 | 82 | 88 | |
| ≥18000 | 31 | 50 | 74 | 84 | 91 | 91 | 98 | $f_{t,05} \geq 51MPa$ |
| ≥17000 | 32 | 52 | 77 | 88 | 95 | 95 | 102 | $40 \leq f_{t,05} < 51MPa$ |
| ≥15000 | 33 | 53 | 79 | 90 | 98 | 98 | 105 | $32 \leq f_{t,05} < 40MPa$ |
| all | 33 | 53 | 79 | 90 | 98 | 98 | 105 | $28 \leq f_{t,05} < 32MPa$ |

Prethodnom tablicom definirane su 4 klase vlačnih čvrstoća na osnovu vrijednosti za dinamički MOE i DAB iz kojih je vidljivo da je lamele graba moguće svrstati u visoke razrede čvrstoće. Potrebno je provesti dodatna ispitivanja na većem broju uzoraka uz korištenje naprednijih metoda za mjerenje lokalnog i globalnog nagiba vlakanaca kao bitnog parametra vizualne klasifikacije.

# 3. KRATKOTRAJNO ISPITIVANJE NA SAVIJANJE LIJEPLJENIH LAMELIRANIH GREDA

## 3.1. Pregled dosadašnjih istraživanja lijepljenih lameliranih nosača na savijanje

Lijepljeno lamelirano drvo - LLD (engl. *glulam / GLT*) jedan je od najvažnijih proizvoda drvne industrije s širokom primjenom u građevinarstvu, a koji u usporedbi s gredama od punog drva ima veći mehanički potencijal u pogledu čvrstoće i krutosti zahvaljujući efektu homogenosti. Europski standardi za definiranje klasa čvrstoće LLD-a temelje se karakterističnoj čvrstoći na savijanje i srednjem MOE paralelno s vlakancima kao ključnim mehaničkim svojstvima. Prema EN 14080 [33], klasa Gl28c ima 5. percentil čvrstoće na savijanje od 28 MPa i srednji MOE od 12500 MPa. Za lijepljeno lamelirano drvo od mekih vrsta drva i topole, EN 14080 [33] definira klase čvrstoće: Gl20, Gl22, Gl24, Gl26, Gl28, Gl30 i Gl32, uz dodatnu oznaku *c* ili *h* ovisno radi li se o kombiniranom ili homogenom redoslijedu lamela u nosaču. U posljednja dva desetljeća u Europi je proveden niz istraživanja lijepljenih lameliranih nosača od tvrdih vrsta drva uključujući bukvu (*Fagus Sylvatica* L.) [17], hrast lužnjak (*Quercus robur* L.) [99] i hrast kitnjak (*Quercus petraea* L.) [99], kesten (*Castanea sativa* L.) [29] i jasen (*Fraxinus excelsior* L.) [26], [86]. Navedenim istraživanjima su pokazane bolje mehaničke karakteristike lijepljenih lameliranih nosača od tvrdih vrsta drva u odnosu na karakteristike lijepljenih lameliranih nosača od mekih vrsta.

Koncept primjene tvrdih drva u inženjerske svrhe postoji već dugo. Još krajem 19. stoljeća se raspravljalo o primjeni bukve u građevinarstvu [100]. Prva znanstvena istraživanja o nosivosti lijepljenog lameliranog drva od bukve provedena su 60-tih godina prošlog stoljeća, a rezultirala su čvrstoćama na savijanje od 53 do 78 MPa i vlačnim čvrstoćama između 53 i 98 MPa. Opsežna istraživanja lijepljenih lameliranih nosača od bukve provedena su na Institutu za tehnologiju u Karlsruheu (KIT), a u sklopu čega su predložene klase za LLD od bukve i razvijen je model za procjenu karakteristične čvrstoće na savijanje lijepljenih lameliranih nosača temeljem poznavanja vlačne čvrstoće lamela i čvrstoće na savijanje zupčastih spojeva. Navedeno je rezultiralo izdavanjem tehničkog odobrenja TA Z-9.1-679 za lijepljeno lamelirano drvo od bukve i hibridno lijepljeno lamelirano drvo od bukve i četinjača za klase čvrstoće do GL48c [21]. Međutim, ovim tehničkim odobrenjem potencijal bukve nije bio u potpunosti iskorišten. Tvrtka Neue Holzbau AG iz Švicarske već dvadesetak godina proizvodi lijepljeno lamelirano drvo zahvaljujući vlastitom istraživanju razvrstavanja prema čvrstoći, zupčastih spojeva i tehnika različitih spojeva od bukve i jasena [22].

Istraživanja LLD-a provedena su i u okviru stohastičkog modeliranja odnosa lamela i zupčastih spojeva [89]. Na osnovu dostupnih eksperimentalnih podataka i računalnih simulacija, bilo je moguće definirati model nosivosti LLD-a pri savijanju. Navedeni modeli počeli su se istraživati 1990-tih sa svrhom pronalaska veze između 5. percentil čvrstoće na savijanje lijepljenog lameliranog nosača i 5. percentil vlačne čvrstoće lamela. Prema istraživanjima [101], [102] potrebno je razlikovati mehaničke i statističke utjecaje, kao i njihove međusobne interakcije koje proizlaze iz '*laminating effect*' odnosno efekta ojačanja dijelova lamela niže čvrstoće ili krutosti uslijed lijepljenja sa susjednim lamelama. Brandner i Schickofer [103] predstavili su model za procjenu čvrstoće na savijanje lijepljenih lameliranih nosača $f_{m,g,k}$ na osnovu poznavanja karakteristične vlačne čvrstoće lamela $f_{t,0,l,k}$ i varijabilnosti podataka $cov_{f_{m,g}}$ i $cov_{f_{t,0,l}}$ prema sljedećem izrazu:

$$f_{m,g,k} = f_{t,0,l,k}^{0.82}(1.33 - 2.18 \cdot cov_{f_{m,g}}) \cdot 1.67 \cdot e^{1.48 cov_{f_{t,0,l}}} \tag{3.1.}$$

EN 14080 [33] predlaže proračun karakteristične čvrstoće na savijanje LLD-a uz poznavanje karakteristične vlačne čvrstoće lamela $f_{t,0,l,k}$ i čvrstoće na savijanje zupčastih spojeva $f_{m,j,k}$ prema sljedećim formulama:

$$f_{m,g,k} = -2.2 + 2.5 f_{t,0,l,k}^{0.75} + 1.5\left(\frac{f_{m,j,k}}{1.4} - f_{t,0,l,k} + 6\right)^{0.65} \tag{3.2.}$$

$$1.4f_{t,0,l,k} \leq f_{m,j,k} \leq 1.4f_{t,0,l,k} + 12 \quad (3.3.)$$

Prethodni model prema EN 14080 [33] razvijen je za LLD od crnogoričnog drva s ograničenjem karakteristične vlačne čvrstoće na raspon vrijednosti od cca $10MPa \leq f_{t,0,l,k} \leq 30MPa$. Zbog navedenog ograničenja, primjena istog upitna je za karakteristične vlačne čvrstoće veće od 30 $MPa$, a što je karakteristično za bjelogorične vrste drva. Prethodno je dokazano istraživanjem [17] koji je predložio vlačne klase za bukvu T22, T33, T42 i T50, pri čemu T50 predstavlja klasu lamele s karakterističnom vlačnom čvrstoćom lamele od 50 MPa.

S obzirom da je kvaliteta lijepljenog spoja jedan od glavnih uvjeta koji osiguravaju integritet kompozitnog elementa odnosno lijepljenog lameliranog nosača, u sklopu prvog dijela ovog poglavlja dan je osvrt na dosad provedena istraživanja kvalitete lijepljenog spoja na uzorcima od različitih vrsta tvrdih drva. Isto tako, analizirani su rezultati posmičnih testova na segmentima izdvojenim iz lijepljenog lameliranog nosača u suhim uvjetima za klasu uporabivosti 1, a koji su provedeni za potrebe ove disertacije. Navedeno je provedeno na lijepljenim lameliranim uzorcima izrađenim od tri vrste lokalnih tvrdih drva i to graba (*Carpinus betulus* L.), javora (*Acer campestre* L.) i hrasta cera (*Quercus cerris* L.), a koji su obrađeni s tri različite površinske obrade lamela: blanjanje, brušenje s granulacijom 60 te brušenje s granulacijom 80. Drugi dio poglavlja čine testovi na savijanje provedeni na lijepljenim lameliranim uzorcima proizvedenim od istih vrsta drva i obrađenim s istim vrstama površinske obrade lamela. Uvođenje novih vrsta tvrdih drva na tržište zahtijeva provođenje eksperimentalnih testova koji trenutno nedostaju.

## 3.2. Pregled dosadašnjih istraživanja u području osiguranja kvalitete lijepljenog spoja

Za bilo koji kompozitni element kvaliteta lijepljenog spoja ima značajnu ulogu u nosivosti. Osiguranje kvalitete lijepljenih lameliranih nosača definirano je europskim standardom [33]. Dok su kod pločastih elemenata lokalna oslabljenja lijepljenih spojeva tolerantna u manjoj mjeri, u slučaju grednih elemenata kao što je lijepljeno lamelirano drvo, visoka kvaliteta lijepljenog spoja uvjetuje ispunjavanje uvjeta nosivosti i uporabljivosti. Postoji nekoliko primjera oštećenja lijepljenih lameliranih nosača kod kojih je loša kvaliteta lijepljenog spoja dovela do urušavanja konstrukcije sa smrtnim posljedicama kao što je krov klizališta u Bad Reichenhallu 2012. god. [37]. Dosad provedena istraživanja pokazala su da posmična čvrstoća lijepljenog spoja i postotak otkazivanja po drvu značajno ovise o vrsti drva i tehnologiji lijepljenja [36]. Također, skupljanje i

bubrenje odnosno varijacije u vlažnosti drva stvaraju dodatna naprezanja u lijepljenom spoju što smanjuje kvalitetu lijepljenog spoja [104].

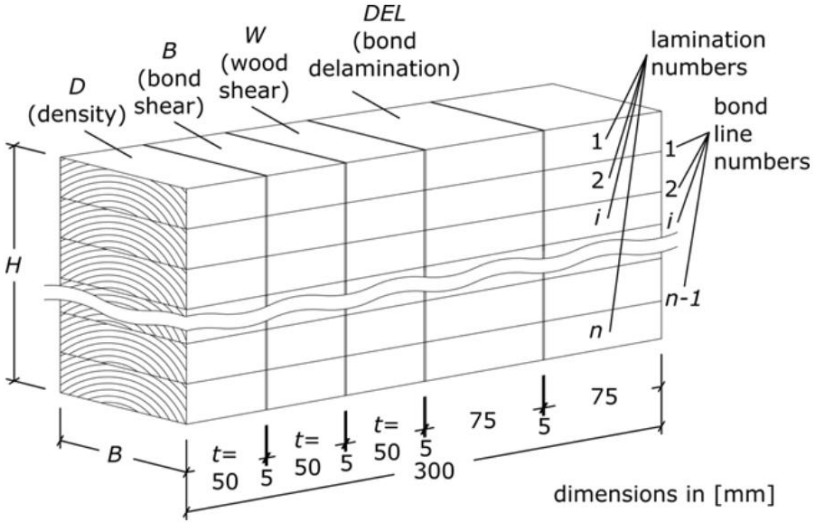
Trenutni europski standard za proizvodnju LLD-a [33] odnosi se isključivo na četinjače i topolu, dok je za određene vrste listača donesen dokument EAD [34]. Složenost formiranja standarda proizlazi iz raznolikosti tvrdog drva pretežno u smislu širokog raspona gustoće tvrdih vrsta drva, više razine tanina kao i njihove morfološke strukture, a koja se razlikuje u odnosu na meka drva. Zbog značajnih razlika u strukturi drva među vrstama listača, granične vrijednosti posmične čvrstoće lijepljene površine i postotak otkazivanja po drvu ne mogu se primijeniti jednoliko na sve vrste.

Općenito, linija lijepljenja između dva drvena elementa nije ograničeni sloj ljepila s jednako ravnim površinama na kontaktu s drvom. Ona predstavlja višeslojni kontinuum s nejasnim rubovima zbog poroznosti drva, a koja omogućava infiltraciju ljepila u stanične stijenke ovisno o vrsti ljepila i drva [105]. Za većinu ljepila je karakteristična veća čvrstoća na posmik i vlak okomito na vlakanca, a što je rezultat kompatibilnosti i precizno odabranih parametara lijepljenja [36]. Određeni tipovi ljepila za četinjače nisu prikladni za korištenje kod lijepljenja tvrdih drva, npr. fenol-rezorcinol-formaldehid i epoksidno ljepilo su pokazali jako niske vrijednosti postotka otkazivanja po drvu i posmičnih čvrstoća lijepljene površine te veliki postotak delaminacije [106]. Prilikom procesa lijepljenja elemenata od tvrdih drva potrebno je primijeniti preporuke proizvođača ljepila posebno u pogledu vremena lijepljenja. Vrijeme lijepljenja odnosi se na razdoblje između nanošenja ljepila i pritiska preše, a dijeli se na otvoreno i zatvoreno vrijeme lijepljenja. Maksimalno zatvoreno vrijeme lijepljenja navedeno je u tehničkom listu i ovisi o parametrima kao što su količina nanesenog ljepila i sadržaj učvršćivača, vrsta drva, temperatura i sadržaj vlage u drvu, kao i relativna vlažnost i cirkulacija zraka u pogonu.

Princip ispitivanja posmične čvrstoće lijepljene površine ima značajan utjecaj na rezultate. Trenutne metode primjenjuju tlačnu silu paralelno s ravninom lijepljenja. S povećanjem opterećenja dolazi do pojave sekundarnih naprezanja okomito na posmičnu površinu što dovodi do složenog stanja naprezanja koji ovise o postavkama ispitivanja. Feldborg [107] je predložio nanošenje tlačne sile pod kutem od 14° čime bi se trebalo omogućiti niže razine naprezanja okomito na posmičnu površinu, uz provođenje dodatnih kalibracijskih ispitivanja.

Europski dokument EAD [34] ograničen je na određene vrste tvrdog drva, dok je za ostale vrste nužno zatražiti tehničko odobrenje na temelju eksperimentalnih rezultata. Sukladno dokumentu EAD [34], posmični testovi na lijepljenim površinama u suhim uvjetima i testovi

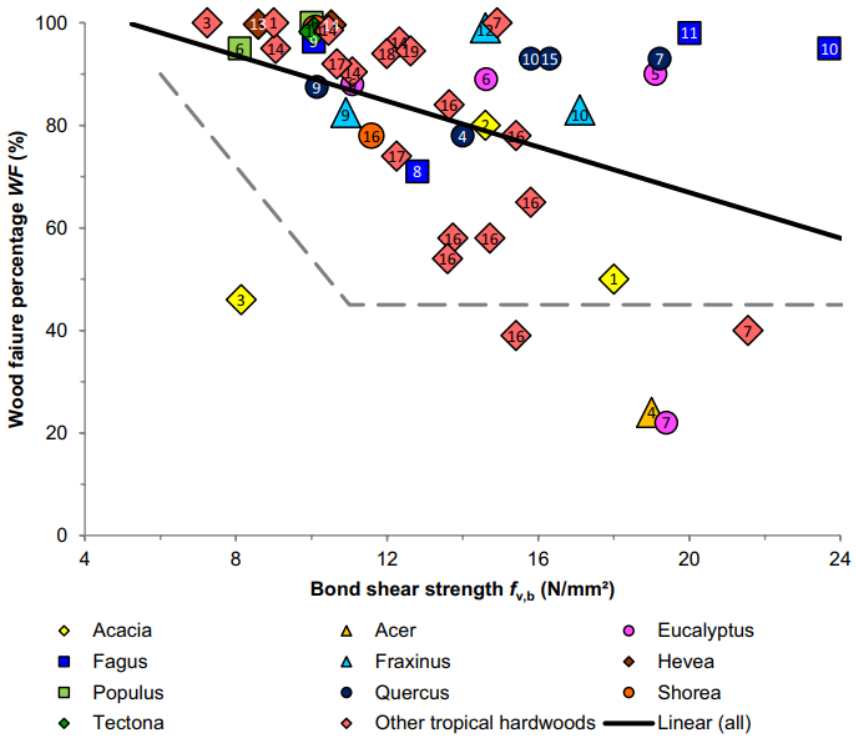
delaminacije predstavljaju metode koje osiguravaju dostatnu kvalitetu lijepljenog spoja i integritet lijepljenih lameliranih nosača (Crtež 3.1). Uzorci, smješteni između čeljusti univerzalnog stroja za ispitivanje mehaničkih svojstava, ispituju se konstantnom brzinom nanošenja opterećenja. EAD [34] definira uvjet za 5. percentil relativne posmične čvrstoće lijepljenog spoja, a koji glasi $rel\ f_{v,b,05} \geq 0.9$, dok je uvjet za 10. percentil postotka otkazivanja po drvu $WFP_{10} \geq 0.5$. Navedeno vrijedi za početno ispitivanje u svrhu procjene proizvoda, dok se u svrhu kontrole proizvodnje uvjeti se iskazuju preko srednjih vrijednosti i glase: $rel\ f_{v,b,mean} \geq 0.9$ i $WFP_{mean} \geq 0.8$.




Crtež 3.1 Skica uzoraka za provođenje testova u svrhu osiguranja kvalitete lijepljenog spoja, preuzeto iz [34]; prijevod engl.: *density* – gustoća, *bond shear* – lijepljeni lamelirani uzorak za testiranje linije lijepljenog spoja, *wood shear* - lijepljeni lamelirani uzorak za testiranje posmične čvrstoće drva, *bond delamination* - lijepljeni lamelirani uzorak za testiranje delaminacije, *lamination numbers* – broj lamela, *bond line number* – broj linije lijepljenog spoja

Grafikon 3.1. prikazuje odnos srednje vrijednosti posmične čvrstoće i srednje vrijednosti postotka otkazivanja po drvu za lijepljene lamelirane segmente izrađene od oko 40 različitih vrsti europskih i tropskih tvrdih drva (bukva, hrast, topola, tikovina, meranti, kaučukovac, itd.), a čiji su rezultati objavljeni u 19 publikacija između 1961. i 2016. Godine [36]. Dio ovih istraživanja proveden je u sklopu projekta *'EU Hardwoods'* [23]*l*. Duljine ispitivanih segmenata iznosile su između 20 i 50 mm, dok je površina posmične površine veličine 460-3025 $mm^2$. Segmenti su lijepljeni sa 7 vrsta ljepila: melamin urea formaldehid, jednokomponenti poliuretan, (fenol)-resorcinol-formaldehidi, emulzijski polimerizirani izocijanat, epoksid, polivinil acetat i kazeinsko ljepilo. Dobivene srednje vrijednosti posmične čvrstoće obuhvaćaju širok raspon od 5 do 24 $N/mm^2$, pri čemu preko 85% srednjih postotaka otkazivanja po drvu premašuju minimalnu

vrijednost od 45%. Iz navedenog se može zaključiti da zahtjev za lijepljene spojeve mekih drva nije dovoljno 'strog' za većinu spojeva tvrdih drva. Rezultati ukazuju na jako slabu korelaciju između viših vrijednosti posmične čvrstoće lijepljenog spoja i smanjenja postotka otkazivanja po drvu. Isto tako, uočena je slaba korelacija između gustoće, sa širokim rasponom između 300 i 1000 $kg/m^3$, i posmične čvrstoće lijepljenog spoja ($R^2 = 0.25$). S druge strane, usporedbom rezultata vidljiva je jaka korelacija između posmične čvrstoće lijepljenog spoja i posmične čvrstoće drva ($R^2 = 0.88$).




Grafikon 3.1 Odnos srednje vrijednosti posmične čvrstoće i srednje vrijednosti postotka otkazivanja po drvu za lijepljene lamelirane segmente, preuzeto iz [23]. Prijevod engl.: *wood failure percentage* – postotak otkazivanja po drvu, *bond shear strength* – posmična čvrstoća lijepljenog spoja.

S obzirom na izraženu ovisnost o vrsti drva u pogledu gustoće i morfoloških karakteristika tvrdog drva, jedno od mogućih rješenja za određivanje graničnih vrijednosti posmičnih čvrstoća i postotka otkazivanja po drvu bilo bi pristupiti problemu pojedinačno za svaku vrstu drva, kao u američkim propisima, ili formirati grupe s različitim vrstama tvrdog drva ovisno o gustoći kao u japanskom modelu.

## 3.3. Posmični testovi na lijepljenim lameliranim uzorcima

### 3.3.1. Proizvodnja lijepljenih lameliranih nosača

Za proizvodnju lijepljenih lameliranih nosača korištene su tri različite vrste tvrdog drva iz hrvatskih šuma, i to grab (*Carpinus betulus* L.), hrast cer (*Quercus cerris* L.) i javor (*Acer campestre* L.). Sve tri vrste drva do sada nisu bile primjenjivane u proizvodnji lijepljenih lameliranih nosača. Sirovina je pribavljena iz Virovitičko-podravske županije, pri čemu se starost drva kretala između 60 do 80 godina. Obrada drva provedena je u tvornici drvenih lameliranih konstrukcija u vlasništvu tvrtke Drvene konstrukcije d.o.o. Voćin. Sirovina je kondicionirana u proizvodnom pogonu na temperaturi 20° i relativnoj vlažnosti od cca 65%. Lamele su rezane na potrebnu duljinu pri čemu su lokalne nepravilnosti drva uklonjene. Sve lamele obrađene su na stroju za blanjanje drva (Fotografija 3.1). Primijenjene su tri različite površinske obrade lamela za sve tri vrste drva: blanjanje (P), brušenje s granulacijom 60 (BR60), brušenje s granulacijom 80 (BR80). Konačne dimenzije lamela su 100x20x1700 $cm^3$.

Prije lijepljenja, sadržaj vlage u svakoj lameli izmjeren je mjeračem vlage za drvo (Gann Hydromette). Izmjereni sadržaj vlage u lamelama bio je između 8% i 12%, pri čemu maksimalna razlika u sadržaju vlage između lamela u svakoj gredi nije prelazila 2,5%. Budući da za navedene vrste ne postoji tehničko odobrenje za ljepilo, korištena je postojeća tehnologija lijepljenja uz nekoliko modifikacija sukladno uputama proizvođača ljepila. Lamele su lijepljene melamin-urea ljepilom (Prefere 4535) i učvršćivačem (Prefere 5035) proizvođača Dynea [108], u omjeru 100:25 (Fotografija 3.2), a čije su specifikacije dane u Tablici. 3.1. Navedeno ljepilo i učvršćivač koriste se za lijepljenje smreke (*Picea abies*), bora (*Pinus sylvestris*), jele (*Abies alba*), ariša (*Larix decidua/Larix sibirica*), duglazije (*Pseudotsuga menziesii*), bukve (*Fagus sylvatica*) i breze (*Betula pendula*) i to u svrhu proizvodnje lijepljenih lameliranih nosača, križno-lameliranog drva i zupčastih spojeva. Postupak lijepljenja, proveden prema uputama navedenim u tehničkom listu, omogućava vodootporne i vremenski otporne lijepljene spojeve, u skladu s ljepilima tipa I prema europskom standardu EN 301 [73]. Ljepilo je ručno nanošeno s količinom 400 g/m² smjese pri temperaturi od 20 °C, u skladu s tehničkim uputama [108]. Zatvoreno vrijeme lijepljenja trajalo je 30 minuta, uz primjenu pritiska od 1,2 N/mm² (Fotografija 3.3). Konačno, lijepljeni lamelirani uzorci blanjani su sa svih strana kako bi se dobile tražene dimenzije od 60 × 80 × 1700 $mm^3$ (Fotografija 3.4). Sukladno ukupnoj duljini od 1700 mm, zupčasti spojevi nisu izrađeni u lijepljenim lameliranim gredama. Prosječna gustoća lijepljenih lameliranih uzoraka izrađenih od javora bila je 620 kg/m³, graba 790 kg/m³ i hrasta cera 745 kg/m³.

Fotografija 3.1 Stroj za površinsku obradu lamela

Fotografija 3.2 Jednostrani nanos ljepila na lamele

Fotografija 3.3 Primjena pritiska na lijepljene lamelirane grede

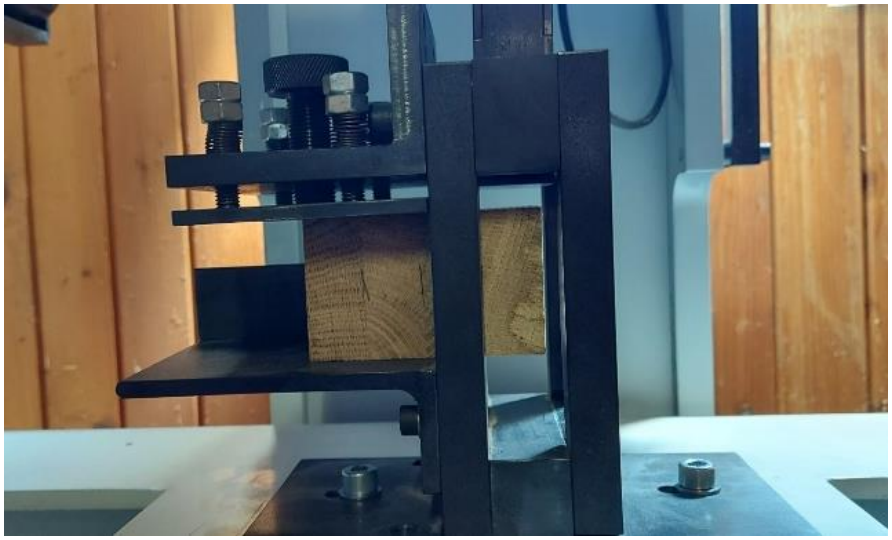
Fotografija 3.4 Lijepljene lamelirane grede dimenzija 60x80x1700 $mm^3$

Tablica *3.1* Tehničke specifikacije za ljepilo Prefere 4535 i učvršćivač Prefere 5035

| | Prefere 4535 | Prefere 5035 |
|---|---|---|
| Sadržaj suhe tvari (2h pri 120°C) | 63-65% | / |
| Viskoznost pri 25° | 3000-3500 mPa.s | cca. 3000 mPa.s |
| pH pri 25° | 9.5-10.0 | cca. 1.0 |
| Gustoća pri 25°/4° | 1.22-1.24 g/cm$^3$ | cca. 1.3 g/cm$^3$ |

### 3.3.2. Posmični testovi na lijepljenim lameliranim uzorcima

Sukladno Dodatku A iz EAD-a [34], provedeni su relativni posmični testovi u suhim uvjetima na lijepljenim lameliranim uzorcima izrađenim od graba, hrasta cera i javora, a čije lamele su obrađene s tri različite površinske obrade [109]. Segmenti dimenzija 50x50x80 mm$^3$ izdvojeni su iz lijepljenih lameliranih greda opisanih u prethodnom poglavlju 3.2.1. Posmična površina svakog uzorka iznosila je 2500 mm$^2$. Posmični testovi lijepljenih površina provedeni su na univerzalnom stroju s konstantnom brzinom nanošenja opterećenja (Fotografija 3.5). Uzorci su smješteni između čeljusti stroja na način da je linija ljepila paralelna s klipom kojim se nanosi opterećenje. Ukupno je provedeno 18 testova na segmentima od hrasta cera, 18 testova na segmentima od graba i 27 testova na segmentima izrađenim od javora, svi lijepljeni ljepilom Prefere 4535+5035.

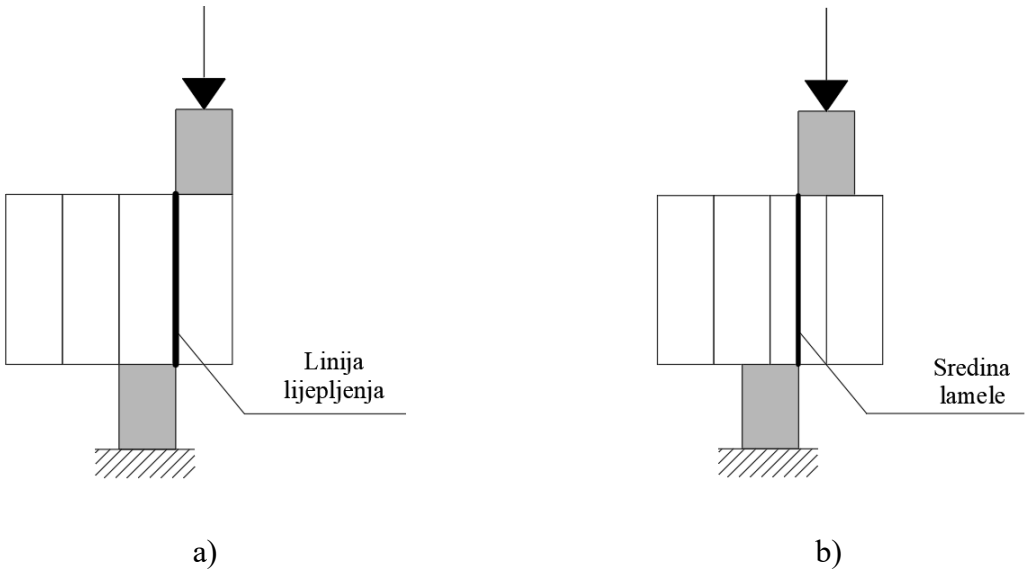


Fotografija 3.5 Univerzalni stroj za provođenje posmičnih testova lijepljenih površina

Posmična čvrstoća lijepljenog spoja $f_{v,b}$ $[N/mm^2]$ izračunata je iz sile otkazivanja $F_u$ [N] i posmične površine A $[mm^2]$ prema formuli:

$$f_{v,b} = k\frac{F_u}{A} \tag{3.3.}$$

gdje je parametar $k = 0{,}78 + 0{,}044t$, a $t$ predstavlja visinu uzorka. Postotak otkazivanja po drvu WFP (engl. '*wood failure percentage*') definiran je u odnosu na ukupnu posmičnu površinu i procijenjen je vizualno nakon testa za svaku ispitanu lijepljenu površinu. Isto tako, određena je i posmična čvrstoća drva $f_{v,w}$ na način da je svaka lamela opterećena klipom po sredini debljine lamele (Crtež 3.2).




Crtež 3.2 Posmični testovi: a) po lijepljenoj površini, b) po drvu

Relativna srednja posmična čvrstoća lijepljenog spoja određuje se iz omjera srednje posmične čvrstoće lijepljenog spoja $f_{v,b,mean}$ $[N/mm^2]$ i srednje posmične čvrstoće drva $f_{v,w,mean}$ $[N/mm^2]$ prema izrazu 1.6. iz poglavlja 1.5.2. 5. percentil relativne posmične čvrstoće lijepljenog spoja određuje se iz omjera 5. percentila posmične čvrstoće lijepljenog spoja i 5. percentila posmične čvrstoće drva prema izrazu 1.5. iz poglavlja 1.5.2. Dokument EAD [34] definira uvjet za 5. percentil relativne posmične čvrstoće lijepljenog spoja $rel\ f_{v,b,05}$ u suhim i vlažnim uvjetima, a koji glasi $rel\ f_{v,b,05} \geq 0.9$. Uvjet za 10. percentil postotka otkazivanja po drvu u suhim uvjetim je $WFP_{10} \geq 0.5$, dok u vlažnim uvjetima iznosi 0.4. U svrhu kontrole proizvodnje uvjeti se iskazuju preko srednjih vrijednosti pri čemu relativna srednja posmična čvrstoća lijepljenog spoja mora iznositi minimalno 0.9, dok je donja granica za srednju vrijednost postotka otkazivanja po drvu $WFP_{mean} \geq 0.8$.

### 3.3.3. Rezultati posmičnih testova na lijepljenim lameliranim uzorcima

Europski standard EN 14080 [33] za meko drvo i topolu zahtijeva da posmična čvrstoća svake linije lijepljenog spoja iznosi najmanje 6 N/mm², dok je minimalni zahtjev za postotak otkazivanja po drvu povezan s posmičnom čvrstoćom lijepljenog spoja. Međutim, za tvrdo drvo se pokazalo da je relativna posmična čvrstoća lijepljenog spoja mnogo bolji pokazatelj kvalitete lijepljenog spoja od same posmične čvrstoće lijepljenog spoja [36]. Tablica 3.2. prikazuje vrijednosti relativne posmične čvrstoće lijepljenog spoja i postotak otkazivanja po drvu, uzimajući u obzir različite obrade površine za javor, hrast cer i grab. Može se uočiti da za lijepljeno lamelirano drvo izrađeno od javora relativna 5. percentil posmične čvrstoće lijepljenog spoja i 10. percentila postotka otkazivanja po drvu ne zadovoljavaju zahtjeve iz EAD-a za sve tri površinske obrade, tj. $rel\ f_{v,b,05}$ je manji od propisanih 0,9, a $WFP_{10}$ je manji od 50 %. Rezultati posmičnih testova lijepljene površine za hrast cer pokazali su najviše vrijednosti za relativni 5. percentil posmične čvrstoće lijepljenog spoja i 10. percentil postotka otkazivanja po drvu, premašujući propisane vrijednosti za sve tri površinske obrade lamele. Rezultati posmičnih testova lijepljene površine za grab zadovoljili su zahtjeve za 5. percentil posmične čvrstoće spoja i 10. percentil postotka otkazivanja po drvu (tj. za početno ispitivanje), osim u slučaju grube obrade lamela s granulacijom 60 (BR60). Vrijednosti postotka otkazivanja po drvu za hrast cer su pokazale najmanje razlike u rasipanju rezultata, dok su kod javora uočene veće varijabilnosti u rezultatima. Veliko rasipanje rezultata značajno utječe na donje fraktile distribucije, a što je vidljivo kod rezultata postotka otkazivanja po drvu kod javora. Za razliku od posmične čvrstoće drva gdje se koristi 5. percentil, kod postotka otkazivanja po drvu se koristi manje osjetljiv 10. percentil. Tipični načini otkazivanja ispitanih segmenata s blanjanim lijepljenim površinama lamela za sve tri vrste ispitanih drva prikazani su na Fotografiji 3.6.

Tablica 3.2 Relativna posmična čvrstoća i postotak otkazivanja po drvu (P - blanjanje, BR80 - fino brušenje, BR60 – grubo brušenje)

| | Javor | | | Hrast cer | | | Grab | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | P | BR80 | BR60 | P | BR80 | BR60 | P | BR80 | BR60 |
| n | 9 | 9 | 9 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| $f_{v,b,mean}$ $[MPa]$ | 19.60 | 18.67 | 18.31 | 16.32 | 16.91 | 16.49 | 21.63 | 22.67 | 19.16 |
| $f_{v,b,mean}$ $[MPa]$ | 21.89 | 21.89 | 21.89 | 14.07 | 14.07 | 14.07 | 22.98 | 22.98 | 22.98 |
| $WFP_{mean}$ [%] | 81 | 59 | 59 | 100 | 95 | 91 | 95 | 100 | 73 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CoV (WFP) | 0.4 | 0.6 | 0.6 | 0 | 0.08 | 0.09 | 0.05 | 0 | 0.4 |
| $rel\ f_{v,b,mean}$ | 0.90 | 0.85 | 0.84 | 1.16 | 1.20 | 1.17 | 0.94 | 0.99 | 0.83 |
| $f_{v,b,05}$ $[MPa]$ | 16.15 | 14.40 | 12.99 | 12.55 | 12.18 | 12.91 | 14.55 | 17.99 | 16.35 |
| $f_{v,w,05}$ $[MPa]$ | 18.70 | 18.70 | 18.70 | 8.61 | 8.61 | 8.61 | 12.12 | 12.12 | 12.12 |
| $WFP_{10}$ [%] | 15 | 5 | 5 | 100 | 80 | 80 | 90 | 100 | 20 |
| $rel\ f_{v,b,05}$ | 0.86 | 0.77 | 0.69 | 1.46 | 1.42 | 1.50 | 1.20 | 1.48 | 1.35 |

a)

b)

c)

Fotografija 3.6 Primjeri ispitanih segmenata s blanjanim lijepljenim površinama lamela za: a) javor, b) hrast cer, i c) grab, za vrstu ljepila Prefere 4535+5035

Sukladno dobivenim rezultatima, može se zaključiti da lijepljenje lamela graba i hrasta cera melamin-urea ljepilom može osigurati zadovoljavajuću kvalitetu lijepljenog spoja. Vrijednosti postotka otkazivanja po drvu kod javora pokazali su najveće rasipanje rezultata, premašujući sve ostale vrste. Prethodno ukazuje na moguće probleme u procesu lijepljenja, a što pretpostavlja promjenu bitnih parametara prilikom lijepljenja. Bitno je napomenuti kako je potrebno izvršiti posmične testove lijepljenih površina i testove delaminacije na većem broju lijepljenih lameliranih uzoraka kako bi se potvrdili prethodni zaključci.

## 3.4. Testovi savijanja na lijepljenim lameliranim gredama

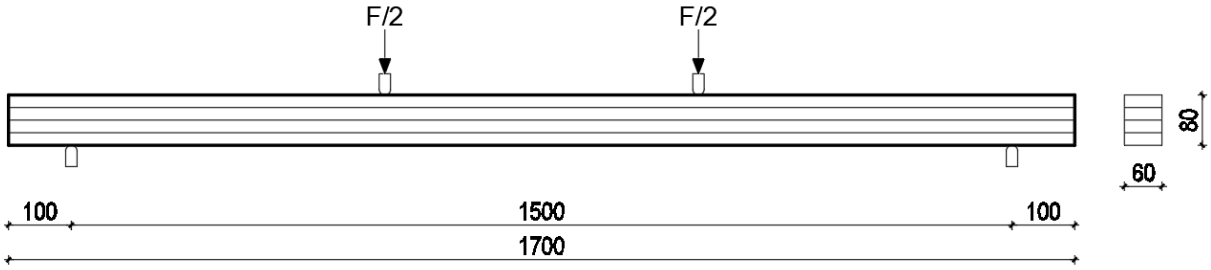
### 3.4.1. Opis testova na savijanje

Testovi savijanja provedeni su prema normi EN 408 [70] na lijepljenim lameliranim uzorcima dimenzija 60x80x1700 mm$^3$, izrađenih od tri vrste drva: grab, hrast cer i javor, te koristeći tri različite površinske obrade lamela: blanjanje, brušenje s granulacijom 60 i brušenje s granulacijom 80. U poglavlju 3.2.1. dan je opis izrade lijepljenih lameliranih uzoraka s bitnim parametrima lijepljenja. Ukupno je ispitano 18 lijepljenih lameliranih greda od javora, 19 od hrasta cera i 18 od graba.

Savijanje elemenata u 4 točke provedeno je na okviru Automax Multitest kapaciteta 350 kN (*Computerized Control Console DUPLEX*) u Laboratoriju za konstrukcije na Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu. Općenito, okvir služi za ispitivanje ponašanja greda i praćenje otvaranja i širenja pukotina. Otvor okvira u horizontalnom smjeru iznosi 900 mm, dok u vertikalnom iznosi 405 mm. Unutar okvira smješten je klip s krutom gredom max. hoda 130 mm i cilindrima za nanošenje opterećenja (30 mm x 130 mm). Brzina gibanja klipa za vrijeme postavljanja u radni položaj (prije nanošenja opterećenja) iznosi 40 mm/min. Preciznost mjerenja sile je 1% za sile od 3.5 kN do 350 kN. Ispitivanje se može provoditi u režimu kontroliranog prirasta sile ili prirasta pomaka.

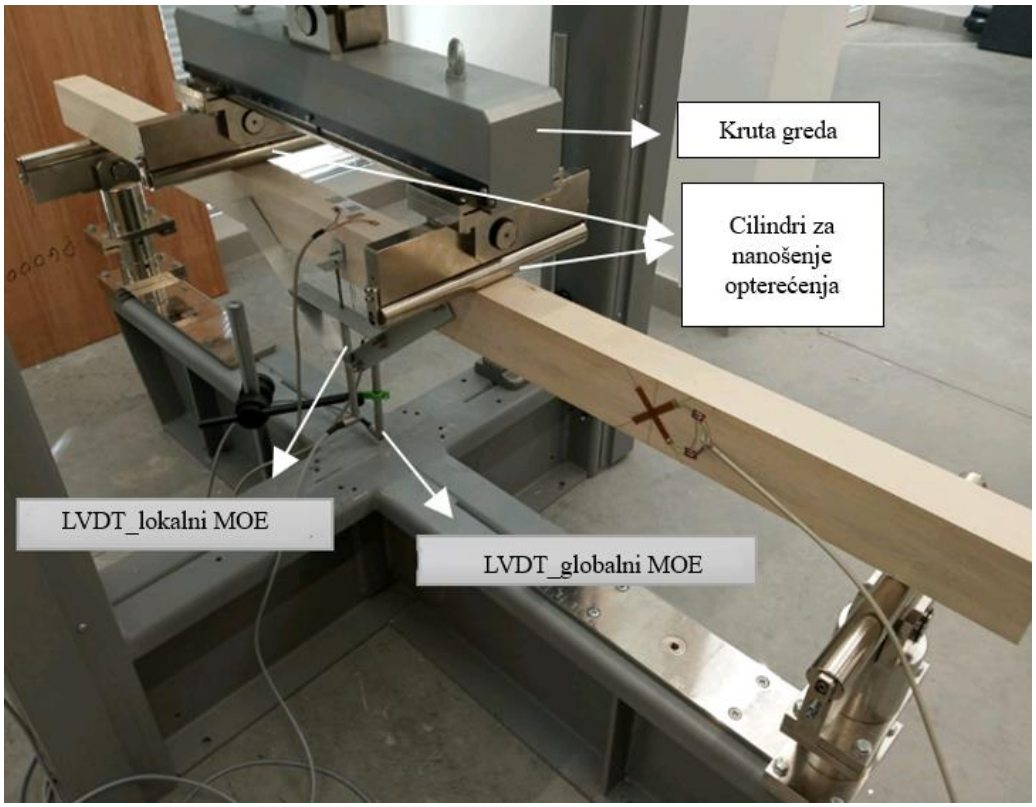
Uzorci su postavljeni na valjke za pridržanje na razmaku od 150 cm. Sukladno EN 408 [70] raspon elemenata treba biti minimalno 18*h* pri čemu je *h* visina uzorka. Prije ispitivanja izmjerena je vlažnost svakog uzorka pojedinačno i iznosila je 8±2 %. Geometrija testa na savijanje

u 4 točke prikazana je na Crtežu 3.3., dok je prikaz testa s okvirom za nanošenje opterećenja prikazan na Fotografiji 3.7.




Crtež 3.3 Prikaz testa na savijanje u 4 točke.

Prije svakog ispitivanja nanesena je inicijalna sila od 0.25 kN na uzorak. Inicijalna sila služi kao predopterećenje za pravilno nasjedanje uzorka u stroj. Nakon predopterećenja, uzorak se ispituje simetrično pomoću dva valjka na trećinama raspona kontroliranim prirastom pomaka od 8 mm/min pri čemu se mora poštovati vremenski interval od 300±120 sekundi u kojem uzorci trebaju otkazati. Progibi su mjereni kontinuirano u sredini pomoću dva linearno varijabilna diferencijalna transformatora (LVDT) povezana na sustav za akviziciju HBM QuantumX, dok su podaci prikupljeni pomoću programa Catman. Procedura nanošenja opterećenja podijeljena je u nekoliko faza koje su definirane normom EN 380 [110], a prema kojoj maksimalno opterećenje ($F_{max}$) predstavlja silu loma odnosno silu pri kojoj deformacije rastu bez daljnjeg povećanja sile ili kao maksimalno opterećenje dosegnuto pri određenoj defomaciji ili pomaku. Prvotno se opterećenje nanosilo do 10% vrijednosti lomne sile koja je određena preliminarnim ispitivanjima i održano je konstantnim 50 sekundi. Potom se opterećenje nanosilo do 40% $F_{max}$ i održano konstantnim 50 sekundi na toj razini opterećenja, a nakon čega su LVDT-ovi uklonjeni kako bi se spriječilo njihovo oštećenje. Ispitivanje je nastavljeno rasterećenjem nosača do 10% $F_{max}$ nakon čega je nosač ponovno opterećen do loma.




Fotografija 3.7 Prikaz testa ispitivanja lijepljene lamelirane grede na savijanje u 4 točke s označenim cilindarima za nanošenje opterećenja i LVDT-ovima za mjerenje deformacija

Sustavom senzora na okviru Automax Multitest zabilježene su vrijednosti sile i pomaka krute grede na koju su vezani cilindri za nanošenje opterećenja, dok su sustavom za akviziciju HBM zabilježene vrijednosti progiba nužne za proračun lokalnog i globalnog modula elastičnosti. Posebno sastavljen sklop aluminijskih elemenata, povezanih s LVDT-om i postavljenih na središnjem dijelu grede na razmaku od 5×h, služio je za proračun lokalnog modula elastičnosti. Prema EN 408 [70], lokalni modul elastičnosti $E_{m,local}$ računa se iz dijela grafa sila/progib s koeficijentom korelacije od 0,99 između 0.1 $F_{max}$ ($F_1$) i 0.4 $F_{max}$ ($F_2$) pomoću slijedećeg izraza:

$$E_{m,local} = \frac{a l_1^2 (F_2 - F_1)}{16 I (w_2 - w_1)} \tag{3.4.}$$

gdje je $(w_2 - w_1)$ inkrement progiba neutralne osi koji odgovara inkrementu opterećenja $(F_2 - F_1)$, $a$ je udaljenost između opterećenja i bližeg ležaja, $l_1$ predstavlja duljinu od 5×h dok je $I$ moment tromosti. Globalni modul elastičnosti $E_{m,global}$ određen je iz progiba $w$ mjerenog u sredini donjeg dijela uzorka prema formuli:

$$E_{m,global} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3\left(2\frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gbh}\right)} \tag{3.5.}$$

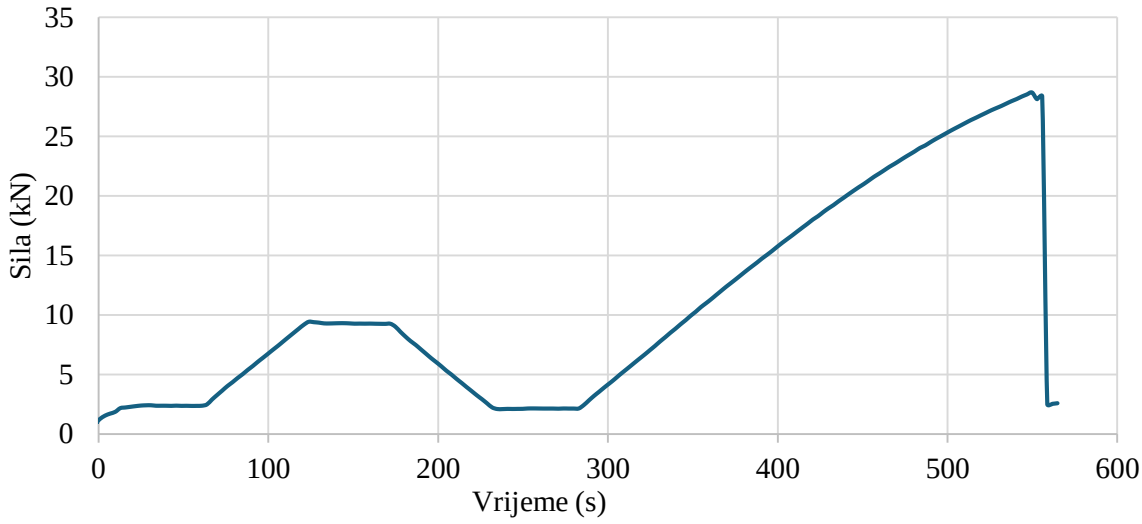
gdje je $l$ raspon uzorka, $G$ modul posmika, dok $b$ i $h$ predstavljaju širinu i visinu poporečnog presjeka uzorka. Bitno je za napomenuti kako puni izraz za globalni modul elastičnosti uključuje modul posmika dok je u ovom radu pretpostavljena beskonačna vrijednost modula posmika. Čvrstoća na savijanje $f_m$ izračunata je za svaki lijepljeni lamelirani uzorak prema izrazu:

$$f_m = \frac{aF_{max}}{2W} \tag{3.6.}$$

gdje je $W$ moment otpora poprečnog presjeka.

### 3.4.2. Rezultati testova na savijanje

Postupak nanošenja opterećenja prema EN 380 [110] za jednu od ispitanih lijepljenih lameliranih greda dan je na Grafikonu 3.2. Za svaku lijepljenu lameliranu gredu izračunate su čvrstoća na savijanje te lokalni i globalni modul elastičnosti prema izrazima iz EN 408 [70], a rezultati su dani u Tablici 3.3. U skladu s JCSS Probabilistic Model Code [95] rezultati su analizirani uz pretpostavku lognormalne distribucije za čvrstoću na savijanje i krutost. Karakteristična čvrstoća na savijanje izračunata je prema normi EN 14358 [75] uzimajući u obzir veličinu uzorka. Izraz za globalni MOE je modificiran na način da je modul posmika pretpostavljen beskonačnim, u skladu s normom EN 384 [71]. Također, proračun globalnog modula elastičnosti temelji se na vrijednostima progiba u sredini raspona. Deformacije uzrokovane posmikom i tlakom okomito na vlakanca utječu na konačnu vrijednost globalnog modul elastičnosti zbog čega se isti smatra parametrom sustava, a ne materijalnim svojstvom.



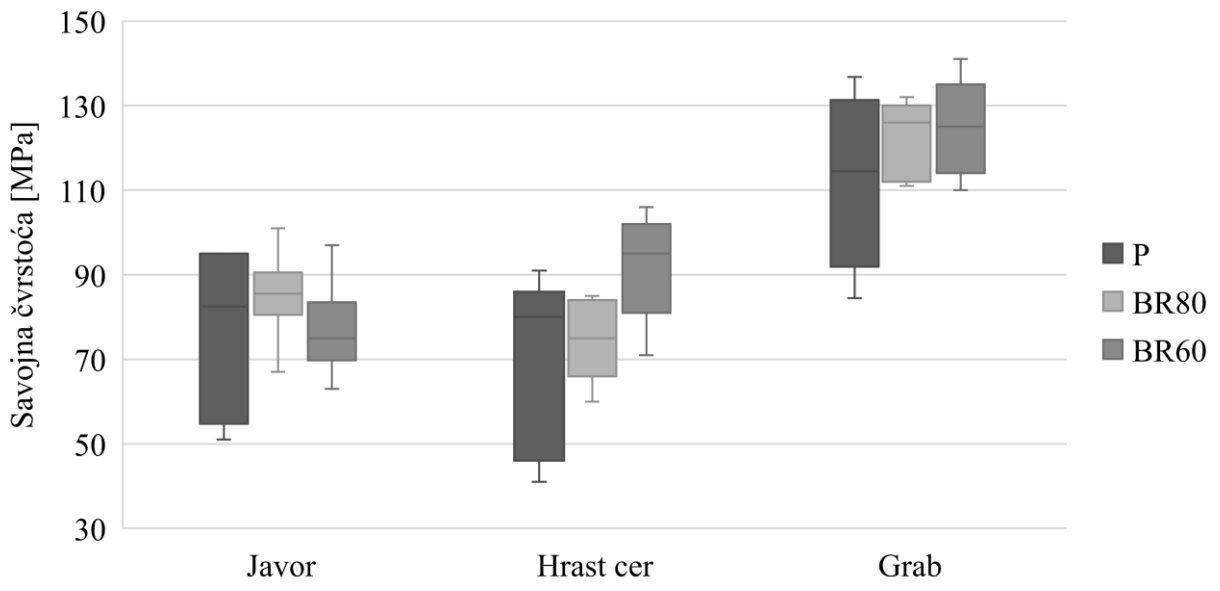

Grafikon 3.2 Ovisnost sila-vrijeme za lijepljenu lameliranu gredu od graba

Tablica *3.3* Rezultati čvrstoće na savijanje, lokalnog i globalnog modula elastičnosti za lijepljene lamelirane grede čije su lamele lijepljene ljepilom Prefere 4535+5035 ovisno o vrsti obrade (P - blanjanje, BR80 – fino brušenje, BR60 – grubo brušenje, $SD_{f_{m,g}}$- standardna devijacija za vrijednosti čvrstoće na savijanje, $SD_{E_{m,global}}$- standardna devijacija za vrijednosti globalnog MOE, $SD_{E_{m,local}}$- standardna devijacija za vrijednosti lokalnog MOE)

| | Javor | | | Hrast cer | | | Grab | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | P | BR80 | BR60 | P | BR80 | BR60 | P | BR80 | BR60 |
| n | 6 | 6 | 6 | 5 | 7 | 7 | 4 | 7 | 7 |
| $f_{m,g,mean}$ $[MPa]$ | 77 | 85.2 | 76.8 | 68.8 | 74.1 | 92.3 | 112.6 | 121.4 | 125 |
| $SD_{f_{m,g}}$ $[MPa]$ | 21.9 | 11.3 | 10.9 | 24.8 | 9.6 | 13.1 | 22.8 | 9.4 | 11.4 |
| $E_{m,global,mean}$ $[MPa]$ | 11350 | 11924 | 11121 | 11836 | 11797 | 15928 | 17580 | 17173 | 18281 |
| $SD_{E_{m,global}}$ $[MPa]$ | 1066.8 | 906.2 | 1029.1 | 1677.3 | 607.5 | 1852.1 | 1343.6 | 859.7 | 1769.3 |
| $E_{m,local,mean}$ $[MP$ | 11547 | 11628 | 11313 | 11803 | 12259 | 16868 | 18686 | 18152 | 19072 |
| $SD_{E_{m,local}}$ $[MPa]$ | 1078 | 1257.2 | 1433.8 | 1445.1 | 970 | 2116.3 | 936.9 | 1853.5 | 1830.6 |

Rezultati ukazuju na više vrijednosti čvrstoće na savijanje i MOE za lijepljene lamelirane grede izrađene od graba u usporedbi s lijepljenim lameliranim gredama od hrasta cera i javora. Ukoliko se analiziraju rezultati čvrstoća na savijanje greda s blanjanim površinama, srednja

čvrstoća na savijanje graba je 46% i 64% veća u odnosu na javor i hrast cer. Veće vrijednosti čvrstoće na savijanje graba prate i veće vrijednosti krutosti i to 55% i 49% veće u odnosu na hrast cer odnosno javor. Također, čvrstoće na savijanje prikazane su na 'box plot' dijagramu (Grafikon 3.3.) gdje horizontalne linije unutar dijagrama predstavljaju medijane dok vanjske horizontalne linije predstavljaju minimalne i maksimalne vrijednosti čvrstoće na savijanje. Mogu se uočiti veće vrijednosti čvrstoće na savijanje za lijepljene lamelirane nosače s brušenim lamelama u usporedbi s blanjanim lamelama i to redom 10 %, 11% i 34% za javor, hrast cer i grab. S obzirom na mali broj ispitanih uzoraka, potrebno je potvrditi utjecaj obrade površine na čvrstoću na savijanje na većem broju uzoraka. Rezultati krutosti u tablici 3.3. ukazuju na veće vrijednosti lokalnog MOE za hrast cer s grubom obradom lamela BR60 i to za cca 35% u odnosu na vrijednosti lokalnog MOE s blanjanim lamelama, te povećanje od 43% za globalni MOE.

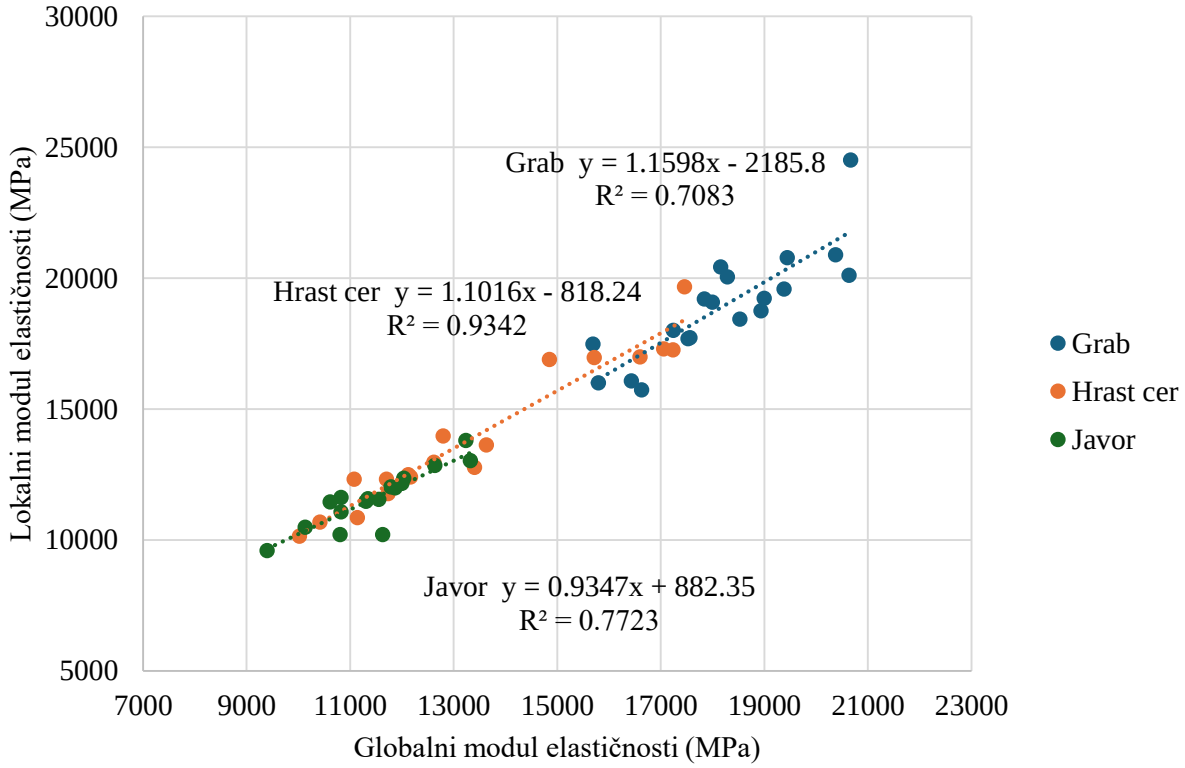



Grafikon 3.3 Box plot s prikazom rezultata čvrstoće na savijanje za sve tri vrste drva (P - blanjanje, BR60 - brušenje s granulacijom 60, BR80 – brušenje s granulacijom 80).

Na Grafikonu 3.4 prikazana je veza lokalnog i globalnog modula elastičnosti pri savijanju za lijepljene lamelirane grede od javora, hrasta cera i graba. Prema EN 384 [71], lokalni modul elastičnosti $E_{m,local}$ predstavlja modul elastičnosti paralelno s vlakancima $E_0$ dan u Tablicama klasa čvrstoće odnosno vrijedi $E_0 = E_{m,local}$. Veza između $E_0$ [MPa] i $E_{m,global}$ [MPa] za meka drva prema EN 384 [71] glasi:

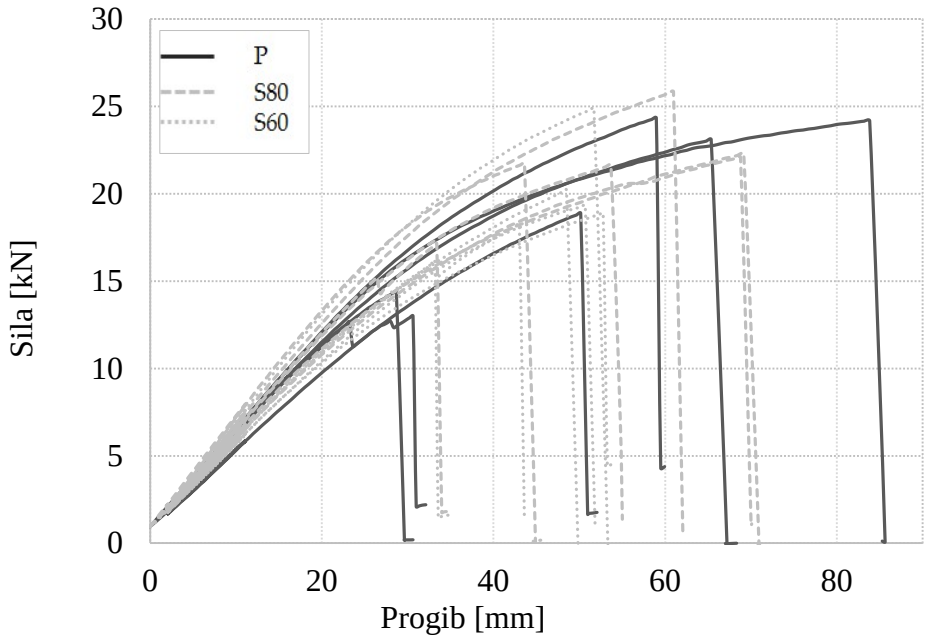
$$E_0 = 1.3 \cdot E_{m,global} - 2690 \tag{3.7.}$$

Na temelju provedenog istraživanja, Ravenshorst i Van de Kuilen [111] te Ehrhart [17] predložili su faktor 1.16 odnosno 1.17, te su zaključili da izraz naveden u EN 384 [71] rezultira puno većim vrijednostima lokalnog modula elastičnosti od stvarnih. Isto tako, ovim istraživanjem došlo se do zaključka kako izraz iz EN 384 [71] ne prikazuje stvarnu vezu između lokalnog i globalnog modula elastičnosti za hrast cer, grab i javor, a što je vidljivo iz jednadžbi danih na Grafikonu 3.4. Stoga je potrebna prilagodba odnosa iz norme EN 384 [71].

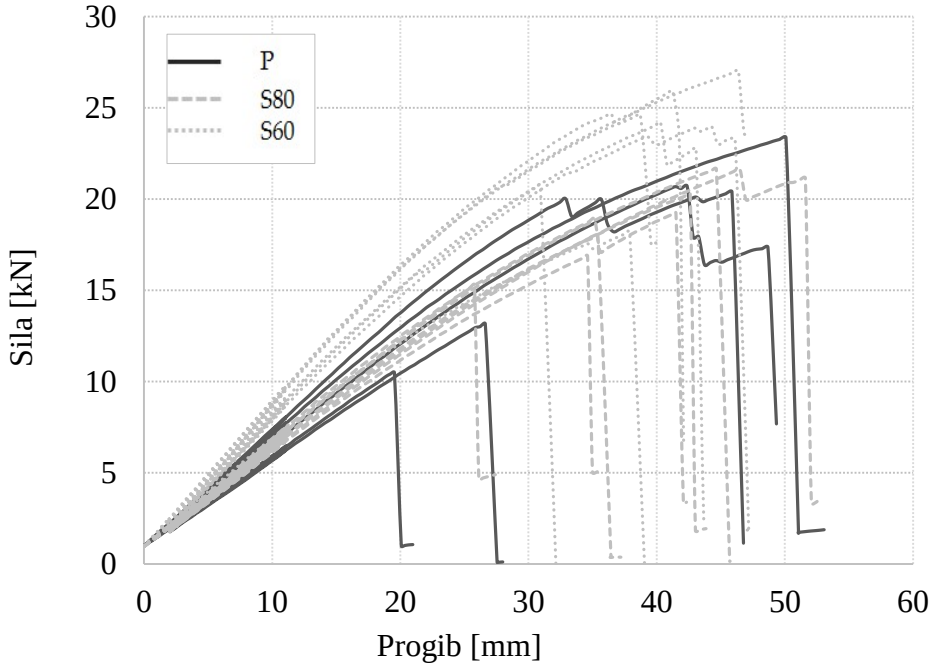



Grafikon 3.4 Prikaz veze lokalnog i globalnog MOE za LLN od javora, hrasta cera i graba s koeficijentom determinacije $R^2$

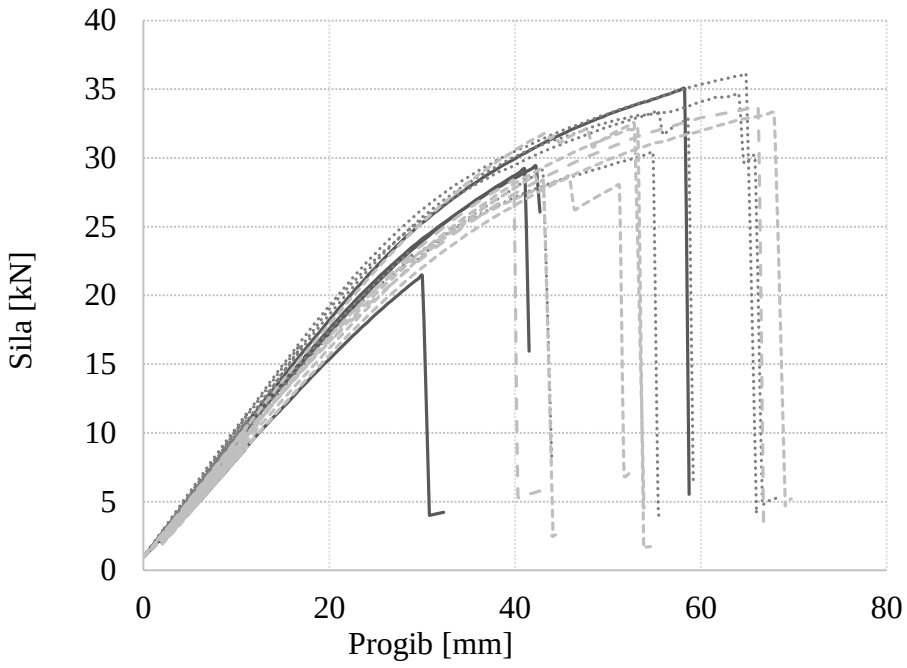
Grafovi sila-progib, dobiveni iz eksperimentalnih testova na savijanje za sve tri vrste drva čije su lamele obrađene s tri različite površinske obrade, prikazani su na Grafikonu 3.5. Najčešći način otkazivanja karakteriziran je kao vlačno otkazivanje najdonje lamele s propagacijom pukotine na susjednu lamelu. Može se uočiti slično ponašanje pri savijanju greda od javora i graba za sve tri vrste površinske obrade, dok se razmatrajući grafove sila-progib za grede od hrasta cera mogu potvrditi veće vrijednosti čvrstoće za grede čije su lamele obrađene brušenjem s granulacijom 60. Veća čvrstoća na savijanje prikazana je većim silama opterećenja kod grubog brušenja, dok je veća krutost na savijanje prikazana strmijim nagibom krivulje sila-progib.


P
S80
S60
Sila [kN]
Progib [mm]
0
5
10
15
20
25
30
0
20
40
60
80

a)


P
S80
S60
Sila [kN]
Progib [mm]
0
5
10
15
20
25
30
0
10
20
30
40
50
60

b)




c)

Grafikon 3.5 Sila – progib pri savijanju lijepljenih lameliranih greda izrađenih od a) javora, b) hrasta cera, c) graba, za sve tri površinske obrade

Analiza varijance - ANOVA (engl. *ANalysis Of VAriance*) provedena je na rezultatima čvrstoće na savijanje, globalnog i lokalnog modula elastičnosti za sve tri vrste drva i površinske obrade lamela s razinom pouzdanosti od 95% ($p \leq 0.05$) kako bi se procijenio utjecaj obrade površine lamela na mehaničke karakteristike lijepljenih lameliranih greda. Općenito, ANOVA se upotrebljava kada se želi utvrditi postoji li statistički značajna razlika između aritmetičkih vrijednosti više skupova ili grupa [112] pri čemu se navedeno provjerava *F*-testom. Postupak obuhvaća proračun zbrojeva kvadrata odstupanja *SS* (engl. *Sum of Squares*) između grupa i unutar grupe te ukupan zbroj kvadrata odstupanja. Potom se svaki zbroj kvadrata odstupanja podijeli s brojem stupnjeva slobode *df* (engl. *degrees of freedom*) kako bi se dobile sredine kvadrata *MS* (engl. *Mean Squares*) i konačno empirijski *F*-omjer. *P*-vrijednost se definira kao empirijska razina značajnosti. Rezultati analize ukazuju na to da ne postoji statistički značajna razlika između aritmetičkih sredina čvrstoće na savijanje i modula elastičnosti za lijepljene lamelirane grede od graba i javora za sve tri površinske obrade lamela. Suprotno tome, analizom ANOVA dobivene su značajne razlike između srednjih vrijednosti čvrstoće na savijanje i modula elastičnosti za hrast cer ovisno o obradi površine lamela (Tablica 3.4.).

Tablica *3.4* Rezultati analize ANOVA za čvrstoću na savijanje hrasta cera.

| Izvor varijacije | *SS* | *df* | *MS* | *F* | *P*-vrijednost | $F_{crit}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Između grupa | 1917.5 | 2 | 958.7 | 4.6 | 0.025 | 3.633 |
| Unutar grupe | 3275.1 | 16 | 204.7 | | | |
| Ukupno | 5192.6 | 18 | | | | |

S obzirom da je analizom ANOVA utvrđena statistički značajna razlika između aritmetičkih sredina čvrstoća na savijanje hrasta cera za različite površinske obrade lamela, proveden je Duncanov novi test višestrukih raspona (engl. *Duncan's Multiple Range Test* - DMRT) [113]. Navedeno se provodi kako bi se odredilo koje grupe uzoraka hrasta cera se međusobno statistički značajno razlikuju. Procedura podrazumijeva određivanje kritičnih vrijednosti nakon čega se razlike između aritmetičkih sredina uspoređuju s odgovarajućim kritičnim vrijednostima. Kao što je prikazano u Tablici 3.5., čvrstoće na savijanje greda izrađenih od hrasta cera čije su lamele obrađene brušenjem s granulacijom 60 pokazuje statistički značajne razlike u vrijednostima u odnosu na čvrstoće na savijanje greda izrađenih od hrasta cera čije su lamele obrađene finim brušenjem (BR80) i blanjanjem (P).

Tablica *3.5* Rezultati Duncan-ovog testa višestrukih raspona za čvrstoću na savijanje hrasta cera ovisno o vrsti obrade.

| Usporedba obrade površina | Razlika | Standardna pogreška | Kritična vrijednost | Pr > Dif | Značajnost |
|---|---|---|---|---|---|
| BR60 vs P | 23.486 | 2.803 | 3.144 | 0.032 | Da |
| BR60 vs BR80 | 18.143 | 2.372 | 2.998 | 0.031 | Da |
| BR80 vs P | 5.343 | 0.638 | 2.998 | 0.533 | Ne |

*BR60 grubo brušenje; P blanjanje; BR80 fino brušenje

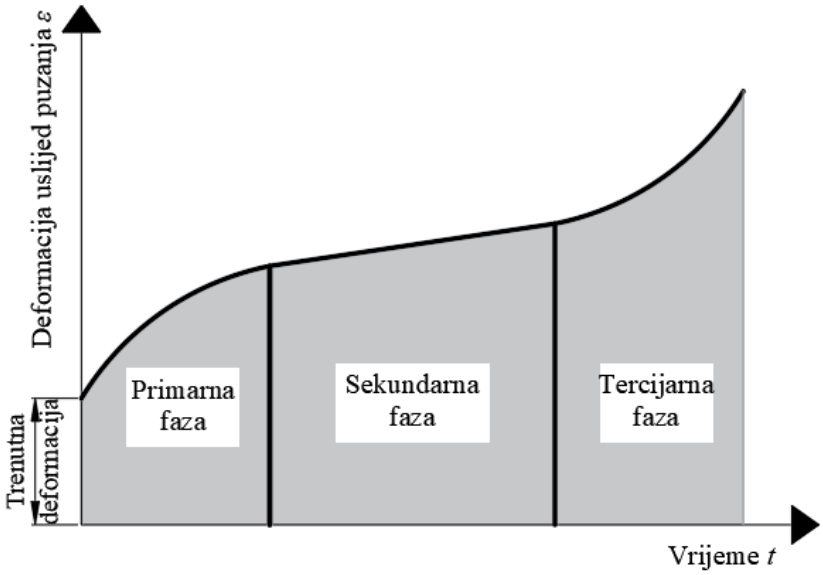
# 4. DUGOTRAJNO ISPITIVANJE NA SAVIJANJE LIJEPLJENIH LAMELIRANIH GREDA

## 4.1. Uvod

Drvo je prirodni polimer s vremenski ovisnim karakteristikama koji pri nižim razinama stalnog naprezanja pokazuje viskoelastično ponašanje [114]. Uslijed konstantnog opterećenja dolazi do kontinuiranog deformiranja drva kao rezultata puzanja. Općenito, puzanje materijala može se opisati kroz tri faze (Grafikon 4.1.), pri čemu se početni progib obično smatra trenutačnom deformacijom ovisnom o razini opterećenja. Tijekom primarne faze brzina deformacije opada, a deformacije se stabiliziraju tokom vremena. Sekundarna faza pretpostavlja konstantnu brzinu deformacije, dok u tercijarnoj fazi dolazi do povećanja brzine deformacije i progresivnog otkazivanja materijala. U drvenim konstrukcijama puzanje je od velike važnosti, primjerice zbog vremenski ovisnog povećanja progiba savijanih elemenata ili rizika od izvijanja tlačno opterećenih elemenata konstrukcije. Stoga je granično stanje uporabivosti (GSU) često odlučujući kriterij pri projektiranju pri čemu pomaci konstrukcije moraju ostati unutar graničnih vrijednosti definiranih EC 5 [72]. EC 5 [72] propisuje koeficijent modifikacije $k_{mod}$ kod graničnog stanja nosivosti (GSN) u svrhu sprječavanja pojave tercijarne faze puzanja, odnosno otkazivanja elementa prema izrazu za računsku nosivost $R_d$:

$$R_d = k_{mod} \frac{R_k}{\gamma_M} \tag{4.1.}$$

gdje $R_k$ predstavlja karakterističnu nosivost, a $\gamma_M$ parcijalni koeficijent sigurnosti za materijal.




Grafikon 4.1 Razvoj deformacije puzanja tijekom vremena

Koeficijent modifikacije pretpostavlja redukciju nosivosti, a definiran je u ovisnosti o razredu uporabe, tipu proizvoda na bazi drva i trajanju opterećenja Ako je trajanje opterećenja dulje ili su okolišni uvjeti zahtjevniji, maksimalno naprezanje u drvu mora biti niže kako bi se spriječila pojava tercijarne faze puzanja. Isto tako, definiranjem koeficijenta deformacije $k_{def}$ kod GSU moguće je dati procjenu ukupne deformacije na kraju proračunskog vijeka konstrukcije, a isti se povećava s višim razredom uporabe i ovisi o vrsti proizvoda na bazi drva. Koeficijent deformacije dan je u Tablici 4.1. pri čemu nema razlike u faktorima za lijepljeno lamelirano drvo ovisno o različitim vrstama drva. Eksperimentalna istraživanja pokazala su gotovo jednak učinak puzanja za puno drvo i drvene proizvode pod različitim uvjetima okoline [115]. Veće vrijednosti faktora deformacije pokazuju četinjače u usporedbi s listačama, no potrebna su daljnja istraživanja kako bi se isto dokazalo [116].

Tablica *4.1* Vrijednosti $k_{def}$ za cjelovito i lijepljeno lamelirano drvo [72]

| Materijal | Razred uporabe | | |
|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 |
| Cjelovito drvo | 0.6 | 0.8 | 2 |
| Lijepljeno lamelirano drvo | 0.6 | 0.8 | 2 |

Vrijednosti vremenski ovisnih deformacija dobivamo analiziranjem ponašanja drvenih elemenata pri konstantnom opterećenju. Koeficijent puzanja $k_{def}$ definiran je omjerom između prirasta progiba $u(t) - u(t_0)$ tijekom vremena $t - t_0$ i početnog progiba $u(t_0)$:

$$k_{def} = \frac{u(t) - u(t_0)}{u(t_0)} \tag{4.2.}$$

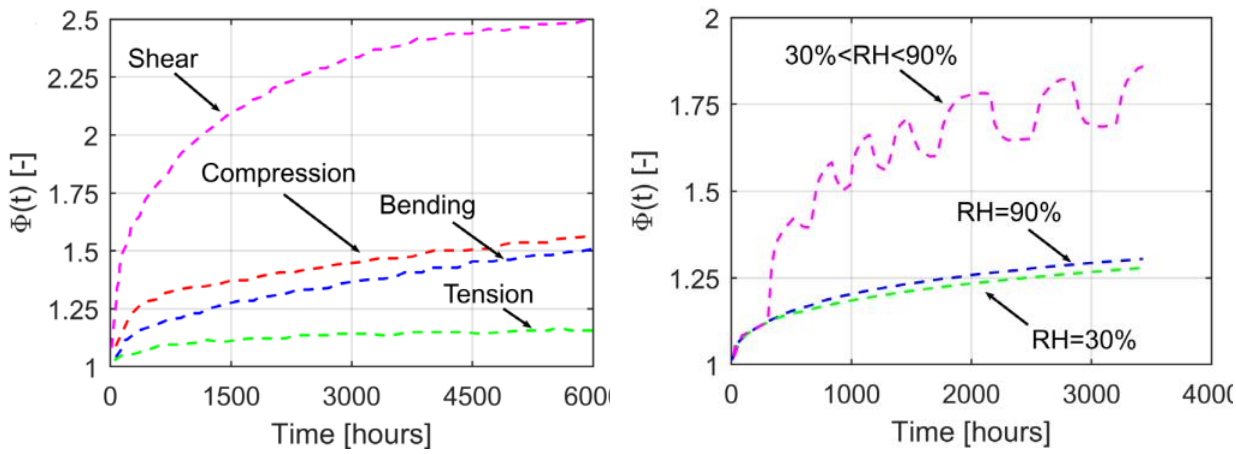
Prema EC 5 [72], veza između trenutne deformacije $u_{inst}$ i konačne deformacije $u_{fin}$ uslijed konstantnog opterećenja dana je sljedećim izrazom:

$$u_{fin} = u_{inst}(1 + k_{def}) \tag{4.3.}$$

Pritom se trenutna deformacija računa prema karakterističnoj kombinaciji koristeći srednje vrijednosti modula elastičnosti dok se konačna deformacija računa prema nazovistalnoj kombinaciji djelovanja. Ukoliko se proračun vrši s promjenjivim djelovanjima tada se u prethodni izraz 4.3. uvode faktori za nazovistalnu vrijednost promjenjivih djelovanja $\psi_{2,1}$ i $\psi_{2,i}$ te faktori za kombinacijsku vrijednost promjenjivih djelovanja $\psi_{0,i}$.

Uzimajući u obzir da je drvo prirodan i anizotropan materijal, vrlo je zahtjevno donijeti općenite zaključke o puzanju drva. Ponašanje drva pri puzanju ovisi o nekoliko parametara kao što su kut između nanošenja opterećenja i vlakanaca, greške u drvu, način opterećenja, vlažnost drva, dimenzije elemenata i razina opterećenja. Deformacije uslijed puzanja drva opterećenog okomito na vlakanca mogu biti i do 8 puta veće u usporedbi s puzanjem drva opterećenog paralelno s vlakancima [117]. Isto tako, Gressel [118] te Schniewind i Barrett [119] utvrdili su da posmična naprezanja dovode do većih deformacija puzanja u usporedbi s vlačnim naprezanjem i savijanjem (Grafikon 4.2.a)), a što je posljedica ortotropije drva. Pokusi dokazuju da se puzanje tlačno opterećenih vlakana savijanog elementa razlikuje od puzanja vlakana u donjoj vlačnoj zoni. Parametri okruženja, poput temperature i relativne vlažnosti, utječu na puzanje drva. Promjena sadržaja vlage ubrzava deformaciju puzanja – mehanosorptivno puzanje, a prvi su je primijetili

Armstrong i Kingston [120]. Brojna istraživanja [120]–[127] dovela su do zaključka kako varijacije u relativnoj vlažnosti zraka uzrokuju promjenu sadržaja vlage u drvenom elementu čime utječu na povećanje deformacije uslijed puzanja. Iz Grafikona 4.2.b) može se vidjeti da ciklička promjena relativne vlažnosti uzrokuje povećanje deformacije uslijed puzanja od približno 300% u odnosu na puzanje pri konstantnoj relativnoj vlažnosti [128]. Mehanosorptivno ponašanje posljedica je lokalnih oštećenja snopova celuloze ili mikrofibrila kao sastavnih dijelova staničnih stijenki uzrokovanih vanjskim naprezanjima uslijed neujednačenog bubrenja ili utezanja. Povećanjem poprečnog presjeka uzoraka, faktor puzanja $k_{def}$ se smanjuje, dok povoljni učinak na smanjenje mehanosorptivnog puzanja drva može se postići površinskim premazom koji je posebno učinkovit u uvjetima promjenjive vlažnosti okoliša. Eksperimentalna istraživanja pokazala su da kod drvenih elemenata, koji se koriste u zatvorenim prostorima, dolazi do minimalnih promjena sadržaja vlage, što upućuje na neznatan utjecaj mehanosorptivnog puzanja [129]. Isto tako, uočeno je kako varijacije u temperaturi okolnog prostora dovode do složenog ponašanja pri puzanju praćenog smanjenjem mehaničkih karakteristika, pri čemu konstantne temperature ispod 50° imaju zanemariv utjecaj na puzanje [130], [131].




a) b)

Grafikon 4.2 a) prikaz deformacije od puzanja za različite režime opterećenja [132], b) ovisnost deformacije od puzanja o relativnoj vlažnosti (RH) [126]. Prijevod engl. *compression* - tlak, *bending* - savijanje, *tension* - vlak, *shear* - posmik, *time* - vrijeme, *hours* – sati.

Schaffer [133] je u svom radu ustanovio kako drvo pokazuje nelinearno ponašanje u cijelom rasponu naprezanja, dok linearno viskoelastično ponašanje predstavlja dobru aproksimaciju pri niskim razinama naprezanja i uz konstantan sadržaj vlage i konstantne uvjete okruženja [133]–[136]. Zbog ovog gotovo linearnog odgovora pri niskim razinama naprezanja koja ne uzrokuju otkazivanje greda tijekom proračunskog razdoblja, Boltzmannovo načelo

superpozicije primjenjivo je za naprezanja do cca 40% kratkotrajne nosivosti, ovisno o načinu opterećenja [137]. Prema istraživanju [138] drvo pokazuje linearno ponašanje pri opterećenjima manjim od 40% maksimalne vlačne čvrstoće. Randriambololon [139] je postavio ovu granicu između 10 i 20% kod tlačne čvrstoće te između 20 i 30% kod savijanja ili vlačne čvrstoće. Hoyle i dr. [140] utvrdili su linearnost kod obične jele na 40% čvrstoće na savijanje, dok su Foudjet i Bremond [141] za tropsko drvo ovu granicu postavili na 35%.

U proteklom stoljeću provedena su brojna istraživanja određivanja faktora puzanja pri konstantnom opterećenju te pri promjenjivim i konstantnim temperaturama i vlažnostima. Zbog složene strukture i različitih parametara koji utječu na ponašanje drva, a koji se mogu odrediti samo eksperimentalno, ne postoji standardizirana metoda za opis ponašanja drva pri puzanju. Progib uslijed konstantnog opterećenja sastoji se od elastičnog, viskoelastičnog i mehanosorptivnog. Viskoelastični progib i progib uslijed mehanosorptivnog ponašanja drva ovisni su o vlažnosti i proporcionalni su elastičnoj popustljivosti. Pojedini dijelovi puzanja drva dugo su se tretirali neovisno jedan o drugome. Hunt [128] je istraživanjem pokazao da su svi tipovi puzanja međusobno ovisni i predložio je uniformni pristup modeliranju puzanja.

Budući da statičko ispitivanje često nije dovoljno za cjelokupnu sliku ponašanja materijala u projektiranju konstrukcija, eksperimentalna istraživanja potrebna su kako bi se uspostavila veza između progiba uslijed puzanja, vremena i razine opterećenja. U sklopu istraživačkog projekta provedenog od strane tvrtke Drvene konstrukcije d.o.o. i Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu, provedena su dugotrajna ispitivanja savijanja lijepljenih lameliranih greda od graba u svrhu analize ponašanja puzanja i određivanja koeficijenta deformacije pri stalnoj razini naprezanja i uvjetima koji odgovaraju klasi uporabivosti 1. Prilikom ispitivanja primijenjene su različite razine opterećenja tijekom razdoblja od najviše 2 godine. Prikazana je veza između progiba uzrokovanog puzanjem, vremena i razine opterećenja. Prema dosadašnjim saznanjima, ovakvi podaci nisu bili dostupni u literaturi za lijepljeno lamelirano drvo izrađeno od graba, osim u radu Moosavija [142]. U tom istraživanju ispitan je utjecaj nadmorske visine na parametre puzanja tijekom savijanja uzoraka drva graba manjih dimenzija pri razini od 20% maksimalnog opterećenja za razdoblje od 14 sati.

## 4.2. Modeliranje ponašanja drva pri dugotrajnom opterećenja

Za pravilno opisivanje vremenski ovisnog ponašanja drvenih konstrukcija, a time i za izračun deformacija puzanja, potrebno je koristiti odgovarajuće numeričke metode i reološke

modele za drvo. Nekoliko matematičkih modela razvijeno je u svrhu opisivanja puzanja linearnog i nelinearnog materijala pri konstantnim i promjenjivim temperaturama i vlažnosti [143], [144]. Pritom je puzanje analizirano u vidu progiba, popustljivosti kao inverza krutosti, relativnog progiba i relativne deformacije. Općenito, model bi trebao obuhvatiti (Holzer et al., 2007) podatke o varijaciji sadržaja vlage u drvu i definiranje odnosa naprezanja i deformacije, odnosno konstitutivnog zakona ponašanja drva. Ukoliko je primijenjeno opterećenje dovoljno malo, moguće je koristiti viskoelastične konstitutivne zakone [122], [145], [146]. Toratti-jev model (verzija B) [122] predstavlja jedan od najčešće korištenih konstitutivnih zakona koji opisuje linearno viskoelastično ponašanje, a prema kojem se odnos naprezanje – deformacija, ovisan o vlažnosti drva, može prikazati u obliku integrala:

$$\begin{aligned}\varepsilon(t) &= \int_{t_0}^{t} J_0\big(u(\tau)\big)\frac{\partial\sigma(\tau)}{\partial\tau}\partial\tau + \int_{t_0}^{t}\sigma(\tau)\frac{\partial J_0\big(u(\tau)\big)}{\partial u(\tau)}\partial u(\tau) + \int_{t_0}^{t} J_c(t,\tau)\frac{\partial\sigma}{\partial\tau}\partial\tau + \\ & J^{\infty}\int_{t_0}^{t}\left(1-e^{-c\int_{\tau}^{t}|du(\tau_1)|}\right)\frac{\partial\sigma(\tau)}{\partial\tau}\partial\tau + \int_{t_0}^{t} m_{ms}\sigma(\tau)|U(\tau)|d\tau - \\ & \int_{t_0}^{t} b\epsilon(\tau)du(\tau) + \int_{t_0}^{t}\alpha_u du(\tau)\end{aligned} \tag{4.4.}$$

gdje $\varepsilon$ predstavlja ukupnu deformaciju, $J$ popustljivost pri puzanju, $\sigma$ ukupno naprezanje, $u$ vlažnost uzorka, $t_0$ početno vrijeme, $t$ konačno vrijeme i $\tau$ trenutno vrijeme. Parametri modela ovisni o materijalnim karakteristikama su $\alpha_u$, $m_{ms}$, $J^{\infty}$ i $c$. Funkcija puzanja prema [147] može se iskazati preko popustljivosti:

$$J(t,\tau,u) = J_0(u) + J_c(t,\tau) = \frac{1}{E_0(1-k_u u)} + \frac{1}{E_0\big(1-k_u u_{ref}\big)}\left(\frac{t-\tau}{t_d}\right)^m \tag{4.5.}$$

gdje $E_0$ predstavlja MOE, $u_{ref}$ je referentna vlažnost, $k_u$ parametar modela, a $t_d$ i $m$ su materijalna svojstva. Isto tako, funkcija puzanja može se iskazati preko popustljivosti i sume N Kelvinovih lanaca:

$$J(t,\tau,u) = J_0(u) + \sum_{n=1}^{N} J_n\left(1-e^{-(t-\tau)/\tau_n}\right) \tag{4.6.}$$

Različiti reološki modeli, koji se sastoje od opruga i prigušivača, mogu simulirati ponašanje viskoznog materijala, a nekoliko istraživača dalo je prijedloge reoloških modela [148]–[151]. U sklopu ove disertacije, korišten je Kelvin-ov reološki model prema [152]. Deformacija uslijed puzanja za pojedinačni član Kelvin-ovog lanca opisana je jednadžbom [147]:

$$\varepsilon(t)_{cr} = J_0(u_{ref})J_n \int_{t_0}^{t} (1 - e^{-(t-\tau)/\tau_n}) \frac{\partial\sigma(\tau)}{\partial\tau} \partial\tau \tag{4.7.}$$

Vrijeme zaostajanja (‘*retardation time*’) $\tau_n$ je ključan pojam u reologiji i teoriji viskoelastičnosti koji opisuje karakteristično vrijeme potrebno da viskoelastični materijal odgovori na primijenjeno naprezanje ili deformaciju. Ovaj parametar predstavlja brzinu kojom materijal prelazi iz trenutnog u novo ravnotežno stanje nakon promjene opterećenja. Veće vrijeme zaostajanja znači da će materijalu trebati više vremena da se prilagodi promjeni opterećenja, dok manje vrijeme zaostajanja ukazuje na brži odziv.

Isto tako, deformacija uslijed puzanja na *n*-tom elementu Kelvin-ovog lanca u trenutku $t + \Delta t$, ukoliko pretpostavimo konstantno naprezanje tijekom vremenskog intervala, može se prikazati u obliku:

$$\varepsilon_{cr,n}^{t+\Delta t} = e^{\frac{-\Delta t}{\tau_n}} \varepsilon_{cr,n}^{t} + J_0(u_{ref})J_n \left(1 - e^{\frac{-\Delta t}{\tau_n}}\right)(\sigma^t - \sigma^{t_0}) \tag{4.8.}$$

gdje je $\sigma^t - \sigma^{t_0}$ razlika naprezanja u prethodnom i početnom vremenskom koraku. Vremenskom diskretizacijom, elastična deformacija u trenutku $t + \Delta t$, koja je određena prvim dvama članovima jednadžbe 4.4, može se prikazati kao:

$$\varepsilon_{el}^{t+\Delta t} = J_0(u^{t_0})(\sigma^t - \sigma^{t_0}) + J_0(u^t - u^{t_0})\sigma^{t_0} \tag{4.9.}$$

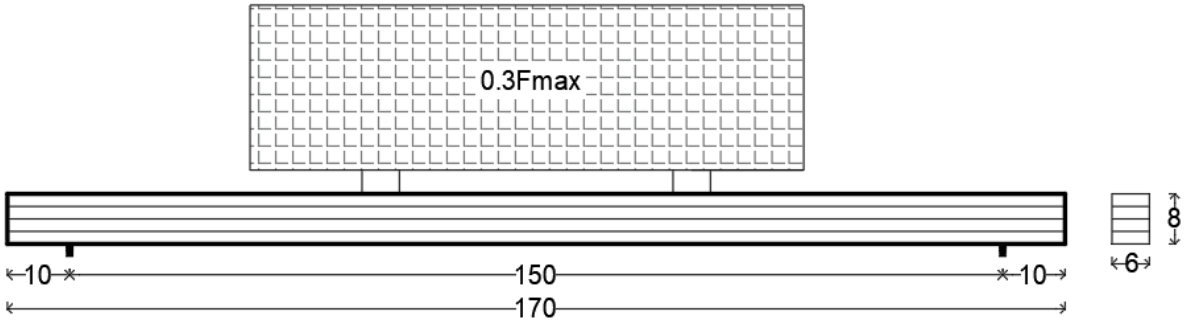
Prethodna jednadžba može se izračunati ukoliko su poznati sadržaj vlage u trenutnom i početnom vremenskom koraku, ukupno naprezanje u početnom i trenutnom vremenskom koraku te elastična popustljivost $J_0$.

## 4.3. Opis testova na dugotrajno opterećenje

Drvo graba korišteno je za proizvodnju 12 lijepljenih lameliranih greda koje su ispitane na savijanje pri dugotrajnom opterećenju u Laboratoriju za konstrukcije Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu [153]. Testovi puzanja provedeni su kako bi se definiralo vremenski ovisno ponašanje lijepljenih lameliranih greda izrađenih od graba, a za koje ne postoje definirani zahtjevi za proizvodnju i projektiranje u europskim standardima kao ni tehničko odobrenje. Ispitivanje se provodilo u razdoblju od prosinca 2022. do siječnja 2025. godine. Lijepljeni lamelirani uzorci su proizvedeni u tvrtki Drvene konstrukcije d.o.o. pri čemu su lamele obrađene s tri različite površinske obrade: blanjanje (P), brušenje s granulacijom 60 (BR60) te brušenje s granulacijom 80 (BR80). Izmjerena vlažnost pojedine lamele, konačne debljine 2 cm, iznosila je

između 8 i 13% s tim da razlika u izmjerenoj vlažnosti lamela pojedinačnog lijepljenog lameliranog elementa nije bila veća od 2%. Izračunata srednja vrijednost gustoće je iznosila 780 kg/m$^3$. Prilikom izrade lijepljenih lameliranih elemenata korišteno je ljepilo s učvršćivačem Prefere 4535+5035 kao i tehnologija lijepljena opisana u Poglavlju 3. Konačno, 12 lijepljenih lameliranih elemenata (po 4 elementa za svaku vrstu obrade) blanjane su sa svake strane kako bi se dobili elementi dimenzija 60 *mm* x 80 *mm* x 1700 *mm*, bez zupčastog spoja.

Prva grupa lijepljenih lameliranih elemenata ispitana je između prosinca 2022. god. i ožujka 2023. god., dok je druga grupa uzoraka ispitana između ožujka 2023. god. i siječnja 2025. god. Prva grupa uključivala je 4 lijepljene lamelirane grede čije su lamele obrađene brušenjem s granulacijom 80 (BR80). U nedostatku prostornog kapaciteta u Laboratoriju za konstrukcije, prethodno spomenuti uzorci su uklonjeni i postavljena je druga grupa uzoraka odnosno 8 lijepljenih lameliranih greda čije su lamele obrađene blanjanjem (P) te brušenjem s granulacijom 60 (BR60). Elementi raspona 1500 *mm* postavljeni su simetrično na dva ležaja od inox-a i opterećeni su na savijanje u 4 točke s konstantnom silom (Crtež 4.1.). Za svaki način obrade lamela po dva elementa su opterećena s 20%, a ostala dva s 30% maksimalne sile $F_{max}$ dobivene kratkotrajnim testovima opisanim u Poglavlju 3. Srednja vrijednost maksimalne sile iznosila je 28.84 kN za blanjanje, 31.99 kN za brušenje BR60 i 31.09 kN za brušenje BR80. Međutim, analiza kratkotrajnih testova pokazala je kako površinska obrada lamela nema značajnog utjecaja na čvrstoću na savijanje i krutost lijepljenih lameliranih elemenata od graba te je uzeta srednja vrijednost sile od 30.64 kN za određivanje težine tereta za pojedinu razinu opterećenja elemenata prilikom puzanja. 8 elemenata opterećeno je stalnim opterećenjem i to betonskim kockama (Fotografija 4.1), a u nedostatku betonskih kocki 4 elementa opterećena su pijeskom iste težine. Početni vertikalni progib očitan je neposredno nakon nanošenja opterećenja s mikrourom Mitutoyo, s preciznošću od 0,01 *mm*. Progibi su očitavani svaki sat tijekom dana u kojem su elementi opterećeni, zatim svaki dan tijekom razdoblja od tri mjeseca, a naknadno na tjednoj bazi s obzirom da promjene u progibima nisu bile značajne. Isto tako, temperatura i relativna vlažnost laboratorija kao i vlažnost nosača očitavani su na dnevnoj razini u početnoj fazi provođenja testa, a naknadno jedanput tjedno.




Crtež 4.1 Prikaz testa puzanja lijepljene lamelirane grede izložene konstantnom opterećenju s dimenzijama u *cm*.

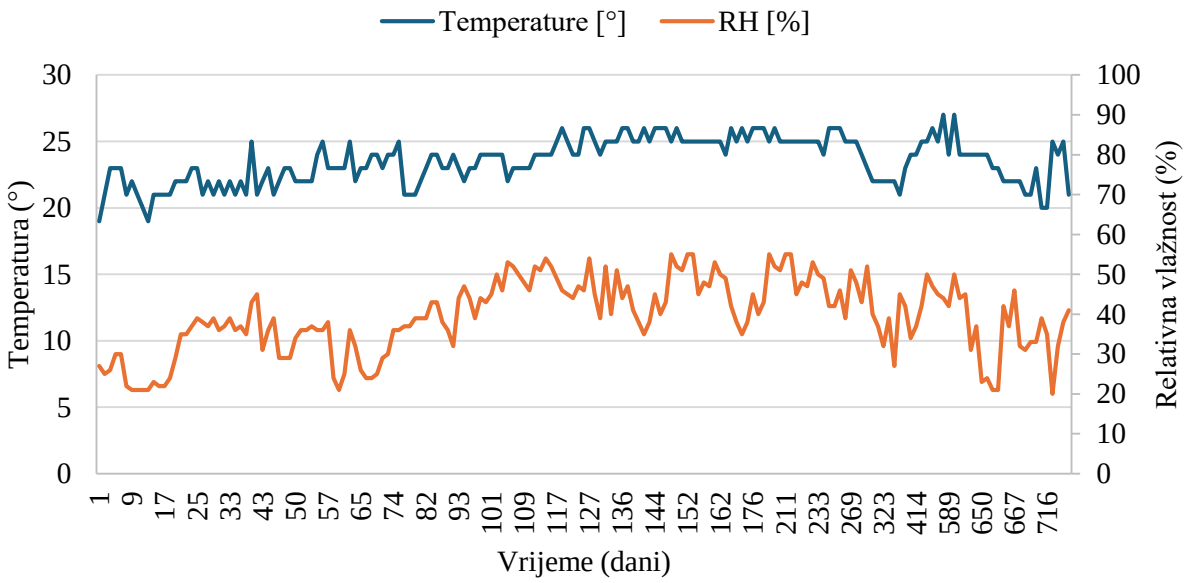
Fotografija 4.1 Lijepljene lamelirane grede opterećene stalnim opterećenjem

## 4.4. Rezultati

### 4.4.1. Rezultati za prvu grupu uzoraka

Prva grupa uzoraka odnosi se na lijepljene lamelirane uzorke čije su lamele obrađene brušenjem s granulacijom 80 te koje su izložene stalnom opterećenju tijekom 3 mjeseca. Sukladno očitanim vrijednostima temperature i relativne vlažnosti prikazanim na Grafikonu 4.3, laboratorijski uvjeti odgovaraju razredu uporabe 1 prema EC 5 [72] odnosno temperaturi od 20° i relativnoj vlažnosti koja ne prelazi 65% nekoliko tjedana u godini (stvarni uvjeti u fazi eksploatacije). Očitane vrijednosti vlažnosti lijepljenih lameliranih elemenata iznosile su 8±2%. S obzirom na razinu opterećenja od $0{,}2F_{max}$ i $0{,}3F_{max}$, a koje odgovaraju naprezanjima od 25 MPa

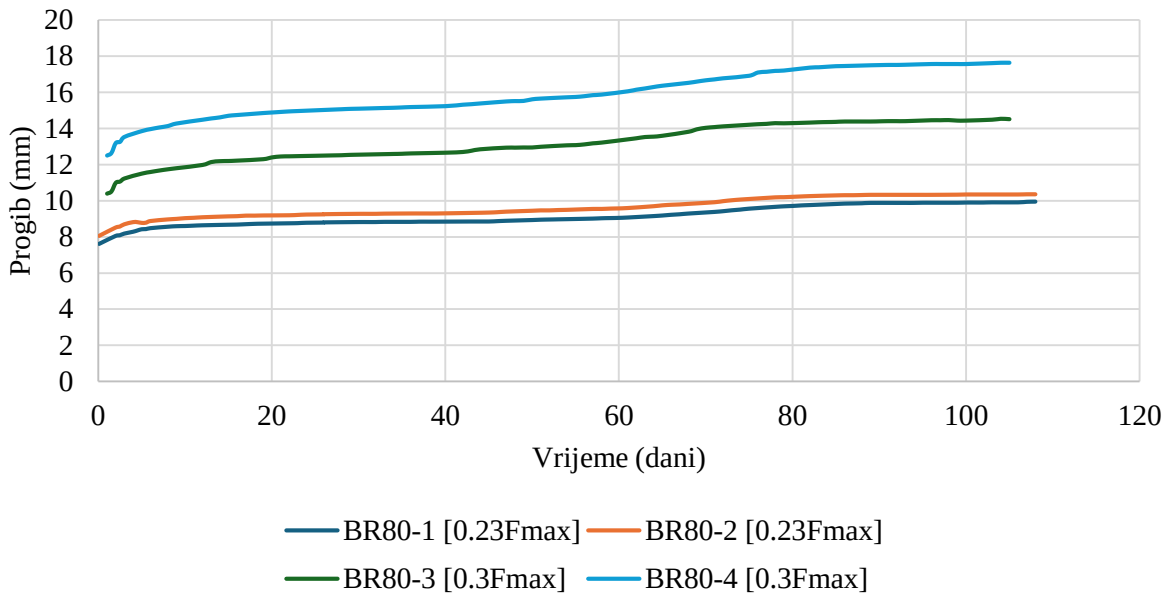
i 37 MPa, nijedna greda nije otkazala odnosno nije došlo do pojave tercijarne faze puzanja. Zbog minimalnih varijacija relativne vlažnosti i temperature u Laboratoriju, mehanosorptivni učinak nije imao značajniji utjecaj na puzanje elemenata.




Grafikon 4.3 Prikaz očitanih vrijednosti temperature i relativne vlažnosti u laboratoriju na FGAG-u u razdoblju od 30.01.2023. do 31.01.2025.

Grafovi progib-vrijeme za obe vrste opterećenja koje odgovaraju $0{,}2F_{max}$ i $0{,}3F_{max}$ prikazani su na Grafikonu 4.4. Grafovi predstavljaju glatke krivulje kroz dovoljan broj eksperimentalno izmjerenih točaka. Inicijalne vrijednosti progiba za razinu opterećenja $0{,}3F_{max}$, a koje su očitane neposredno nakon nanošenja opterećenja pokazale su veće vrijednosti nego za razinu opterećenja $0{,}2F_{max}$. Isto tako, udio progiba od puzanja u ukupnom progibu veći je za razinu opterećenja $0{,}3F_{max}$ u odnosu na $0{,}2F_{max}$.

Tijekom promatranog tromjesečnog razdoblja za prvu grupu lijepljenih lameliranih uzoraka čije su lamele obrađene brušenjem s granulacijom 80, početni se progib povećao za otprilike 30% kod lameliranih elemenata izloženih razini opterećenja od $0{,}2F_{max}$. Rezultati kratkotrajnih eksperimentalnih ispitivanja pokazali su neznatne razlike u globalnom modulu elastičnosti, uz standardne devijacije od 1343,6 MPa za blanjanje, 859,7 MPa za brušenje granulacije 60 i 1769,3 MPa za brušenje granulacije 80. Budući da vrijednosti progiba u sredini raspona lameliranih elemenata ovise o globalnom modulu elastičnosti, postoje razlike i u izmjerenim početnim progibima kao i u puzanju.




Grafikon 4.4 Eksperimentalno dobivena krivulja progib-vrijeme za 4 lijepljene lamelirane grede čije su površine lamela obrađene brušenjem s granulacijom 80 (BR80)

Grafovi, dobiveni na osnovu očitanih vrijednosti progiba u vremenu, uspoređeni su podešavanjem ("fitanjem") podataka s 'power law' funkcijom puzanja koristeći metodu najmanjih kvadrata uz pomoć Matlab Curve Fitter [98]. Odabir funkcije ovisi o potrebnoj točnosti, vremenskom periodu i odabiru istraživača. Nekoliko studija je potvrdilo kako je 'power law' najprikladnija jednadžba za modeliranje dugotrajnog ponašanja jele, smreke i bukve pri savijanju u konstantnim uvjetima okoline. Jednadžba 'power law' u vidu deformacije u vremenu [140] glasi:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + at^m \tag{4.13.}$$

gdje je $\varepsilon(t)$ ukupna deformacija u vremenu $t$, $\varepsilon_0$ je početna deformacija ovisna o razini opterećenja u trenutku $t = 0$, $a$ i $m$ su konstante dobivene eksperimentalnim ispitivanjem. Parametar $m$ je neovisan o razini opterećenja, dok su $\varepsilon_0$ i $a$ ovisni.

U Tablici 4.2. dani su parametri funkcije $a$ i $m$ kao i koeficijent determinacije $R^2$ za BR80. Visoka vrijednost koeficijenta determinacije ukazuje na dobro poklapanje regresijske krivulje s eksperimentalnim podacima te dovodi do zaključka kako je funkcija '*power law*' prikladna za opis ponašanja lijepljenih lameliranih elemenata od graba pri puzanju. Prema grafovima koji prikazuju očitane vrijednosti progiba tijekom tri mjeseca može se uočiti primarna faza puzanja kao i dio sekundarne faze.

Tablica 4.2 Prikaz vrijednosti parametara $A$ i $B$, i koeficijenta

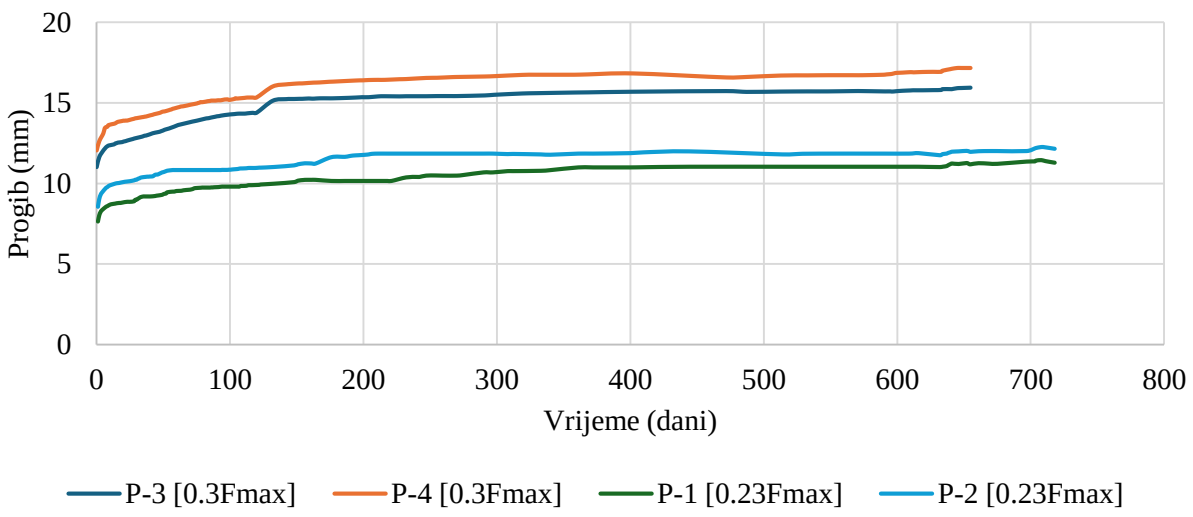
determinacije $R^2$

| Razina opterećenja | Površinska obrada lamela | Parametar $a$ | Parametar $m$ | $R^2$ |
|---|---|---|---|---|
| $0.2F_{max}$ | BR80 | 0.27 | 0.45 | 0.90 |
| $0.3F_{max}$ | BR80 | 0.40 | 0.52 | 0.96 |

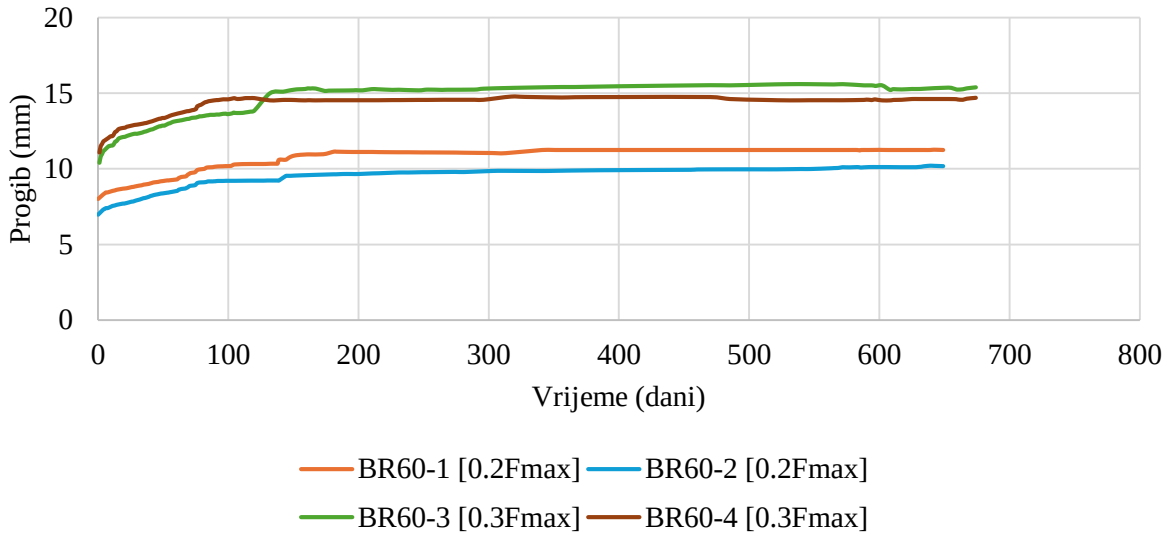
Prema EC 5 [72], vrijednost faktora deformacije tijekom proračunskog vijeka i pri stalnom opterećenju iznosi 0,6 za uporabnu klasu 1. Usporedbe radi, u ovom istraživanju povećanje početnog progiba u razdoblju od tri mjeseca iznosilo je između 1,3 i 1,4 početnog progiba lijepljenih lameliranih elemenata prilikom savijanja i pri konstantnim opterećenjima od 20% i 30% maksimalnog opterećenja utvrđenog kratkotrajnim eksperimentima. Važno je napomenuti da je razina naprezanja tijekom ispitivanja puzanja pri savijanju iznosila 25 MPa za 20% maksimalnog opterećenja i 37 MPa za 30% maksimalnog opterećenja iz kratkotrajnih eksperimenata.

### 4.4.2. Rezultati za drugu grupu uzoraka

Druga grupa uzoraka odnosi se na lijepljene lamelirane uzorke čije su lamele obrađene blanjanjem (P) i brušenjem s granulacijom 60 (BR60) te koje su izložene stalnom opterećenju tijekom 2 godine. Grafovi progib-vrijeme za obe vrste opterećenja $0{,}2F_{max}$ i $0{,}3F_{max}$ prikazani su na Grafikonima 4.5. i 4.6. Grafovi predstavljaju glatke krivulje kroz dovoljan broj eksperimentalno izmjerenih točaka. Inicijalne vrijednosti progiba za razinu opterećenja $0{,}3F_{max}$ i progib uslijed puzanja pokazuju više vrijednosti nego za razinu opterećenja $0{,}2F_{max}$.



Grafikon 4.5 Eksperimentalno dobivena krivulja progib-vrijeme za 4 lijepljene lamelirane grede čije su površine lamela obrađene blanjanjem (P)



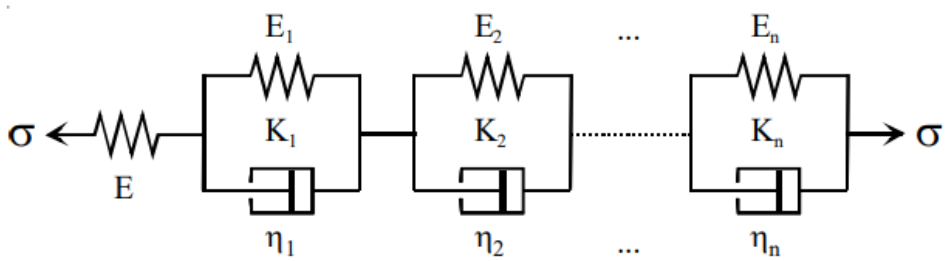

Grafikon 4.6 Eksperimentalno dobivena krivulja progib-vrijeme za 4 lijepljene lamelirane grede čije su površine lamela obrađene brušenjem s granulacijom 60 (BR60)

Na rezultate druge grupe uzoraka primijenjen je generalizirani Kelvin-ov model za opisivanje reoloških karakteristika (Crtež 4.2). Ovaj model sastoji se od serijski povezanog Hook-ovog tijela i lanca od $n$ Kelvin-ovih tijela. Deformacija $\varepsilon(t)$ dobiva se kao suma elastične deformacije $\varepsilon_e(t)$ modelirane oprugom i deformacije uslijed puzanja $\varepsilon_c(t)$ modelirane lancem Kelvin-ovih tijela

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_e(t) + \varepsilon_c(t) = \varepsilon_e(t) + \Sigma_{\mu=1}^{n}\varepsilon_\mu(t) \tag{4.14.}$$

Naprezanje u opruzi i u svim Kelvinovim tijelima $\sigma_\mu(t)$ treba biti jednako primijenjenom naprezanju sustava $\sigma(t)$ kao što je prikazano uvjetom:

$$\sigma_\mu(t) = \sigma(t) \text{ za } \mu = 1, 2, \dots, n \tag{4.15.}$$




Crtež 4.2 Generalizirani Kelvin-ov model [117]

Za vrijednosti naprezanja do 30% kratkotrajne čvrstoće drva, početnu elastičnu deformaciju drva $\varepsilon_e(t)$ definiramo Hook-ovim zakonom:

$$\varepsilon_e(t) = \frac{\sigma(t)}{E} \tag{4.16.}$$

Deformacija uslijed puzanja $\varepsilon_c(t)$ može se izračunati kao suma deformacija pojedinih *n* Kelvin-ovih tijela $\varepsilon_\mu(t)$:

$$\varepsilon_c(t) = \Sigma_{\mu=1}^{n} \varepsilon_\mu(t) \tag{4.17.}$$

Svako Kelvin-ovo tijelo sastoji se od opruge koja predstavlja elastičnu komponentu i viskoznog prigušivača što možemo prikazati idućom jednadžbom:

$$\sigma_\mu = E_\mu \varepsilon_\mu + \eta_\mu \dot{\varepsilon_\mu} \tag{4.18.}$$

gdje je $E_\mu$ modul elastičnosti za $\mu$-to Kelvin-ovo tijelo, $\dot{\varepsilon_\mu}$ je brzina promjene deformacije, a $\eta_\mu$ je koeficijent viskoznosti. Kada ovu jednadžbu diferenciramo po vremenu *t* i uvedemo vrijeme zaostajanja $\tau_\mu = \frac{\eta_\mu}{E_\mu}$, dobivamo diferencijalnu jednadžbu koja opisuje vremenski razvoj deformacije u svakom Kelvin-ovom tijelu:

$$\frac{\dot{\sigma_\mu}}{E_\mu \tau_\mu} = \frac{1}{\tau_\mu} \dot{\varepsilon_\mu} + \ddot{\varepsilon_\mu} \tag{4.19.}$$

Rješavanjem prethodne diferencijalne jednadžbe dobivamo $\dot{\varepsilon}_\mu(\tau)$ čijim dodatnim integriranjem po vremenu $(t - t_0)$, dobivamo deformaciju $\varepsilon_\mu$ u trenutku *t*:

$$\begin{aligned} \varepsilon_\mu(t) = \varepsilon_\mu(t_0) + \dot{\varepsilon_\mu}(t_0) \int_{t_0}^{t} e^{-\frac{\tau - t_0}{\tau_\mu}} d\tau \\ + \frac{1}{E_\mu \tau_\mu} \int_{t_0}^{t} \int_{t_0}^{\tau} e^{-\frac{\vartheta - t_0}{\tau_\mu}} \dot{\sigma_\mu}(\vartheta) d\vartheta d\tau \end{aligned} \tag{4.20.}$$

Eksperimentalni razvoj koeficijenta puzanja može se simulirati pomoću Dirichlet-ovog niza gdje su konstante $A_\mu$ definirane metodom najmanjih kvadrata:

$$k_{def}(t - t_0) = \sum_{\mu=1}^{n} A_\mu (1 - e^{-\frac{t - t_0}{\tau_\mu}}) \tag{4.21.}$$

Pri jediničnom naprezanju $\sigma = 1$ od trenutka $t_0$, deformaciju uzrokovanu puzanjem $\varepsilon_c(t)$ definiramo izrazom:

$$\varepsilon_c(t) = k_{def}(t) \cdot \varepsilon_e(t) = \frac{k_{def}(t)}{E} = \sum_{\mu} \frac{A_\mu}{E}(1 - e^{-\frac{t-t_0}{\tau_\mu}}) \tag{4.22.}$$

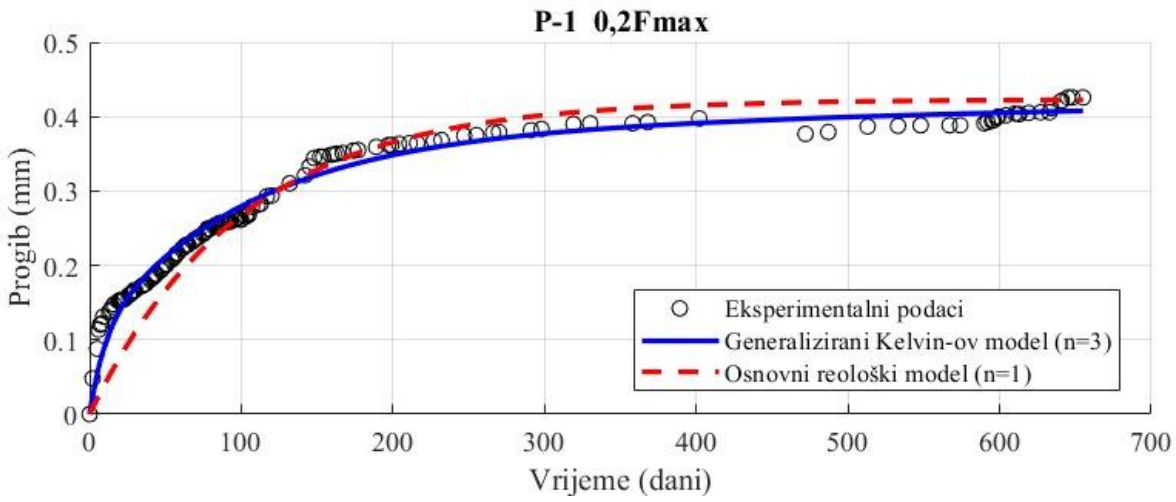
Pri proračunu prethodne jednadžbe, potrebno je uzeti u obzir iduće uvjete:

$$\varepsilon_\mu(t_0) = 0;\ \dot{\varepsilon_\mu}(t_0) = \frac{\sigma(t_0)}{\eta_\mu} = \frac{1}{\eta_\mu};\ \dot{\sigma} = 0,$$

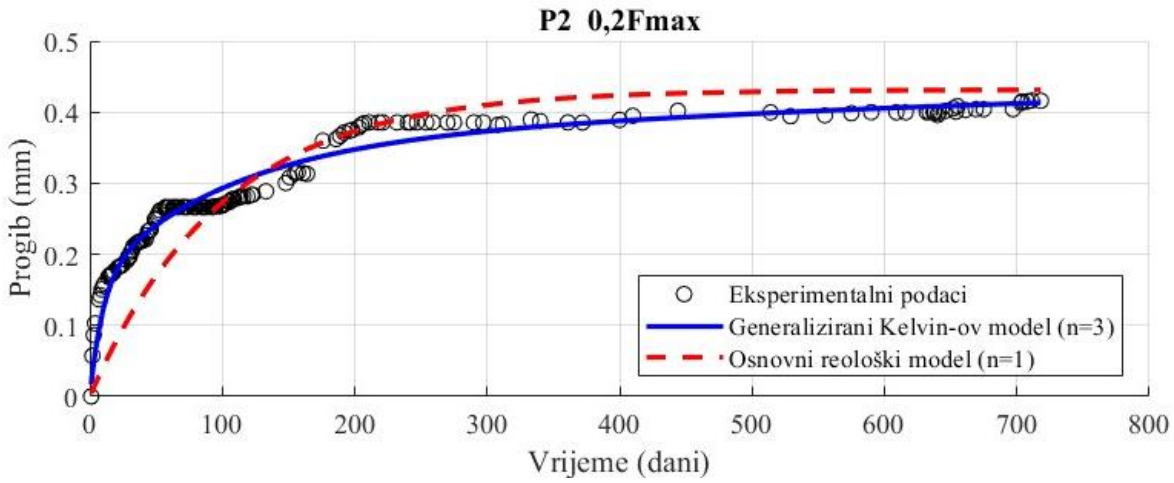
nakon čega dobivamo:

$$\varepsilon_c(t) = \sum_{\mu=1}^{n} \frac{1}{E_\mu}(1 - e^{-\frac{t-t_0}{\tau_\mu}}) \tag{4.23.}$$

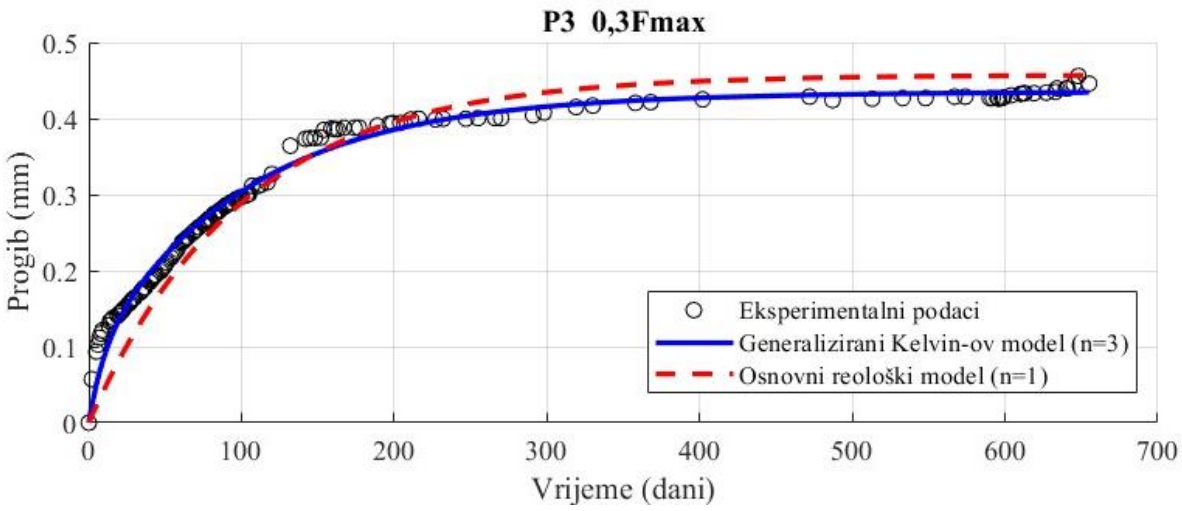
Grafikoni 4.7.-4.14. prikazuju razvoj koeficijenta deformacije aproksimiranog krivuljom koja predstavlja generalizirani Kelvinov model s nizom od tri Kelvin-ova tijela ($n = 3$) i osnovnim reološkim modelom ($n = 1$). S obzirom na vremenski period u kojem su uzorci bili izloženi konstantnom opterećenju, navedene krivulje prikazane su za 8 lijepljenih lameliranih greda čije su površine lamela blanjane (P) te blanjane i brušene s granulacijom 60 (BR60). Konstante Kelvin-ovih tijela $A_\mu$, za odabrana vremena zaostajanja od 10, 100 i 800 dana, određena su temeljem metode najmanjih kvadrata (Tablica 4.3). Isto tako, izračunati su koeficijent deformacije i koeficijent determinacije $R^2$ za svaki od navedenih rezultata. Uvidom u dobivene vrijednosti koeficijenata deformacije $k_{def}$ može se zaključiti kako isti imaju niže vrijednosti za nižu razinu opterećenja kod lijepljenih lameliranih uzoraka čije su površine blanjanje te kod uzoraka čije su površine blanjane i brušene s granulacijom 60. Raspon vrijednosti $k_{def}$ pri razini opterećenja $0.2F_{max}$ kretao se između 0.352 i 0.426 dok su za razinu opterećenja $0.3F_{max}$ izračunate vrijednosti bile u rasponu odd 0.445 do 0.499. Sukladno EC5 [72] vrijednost $k_{def}$ za lijepljeno lamelirano drvo za klasu uporabivosi 1 iznosi 0.6, a što je više od vrijednosti dobivene ovim ispitivanjem.



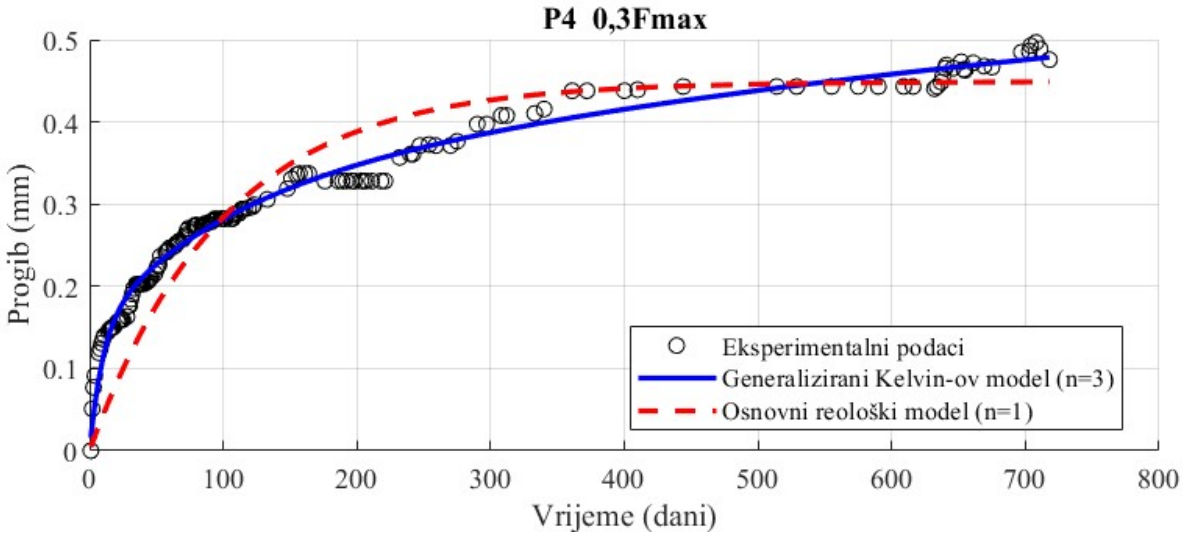

Grafikon 4.7 Usporedba eksperimentalno dobivenih podataka s generaliziranim Kelvin-ovim modelom i osnovnim reološkim modelom za lijepljenu lameliranu gredu br.1 čije su površine lamela obrađene blanjanjem (P) pri opterećenju $0.2F_{max}$



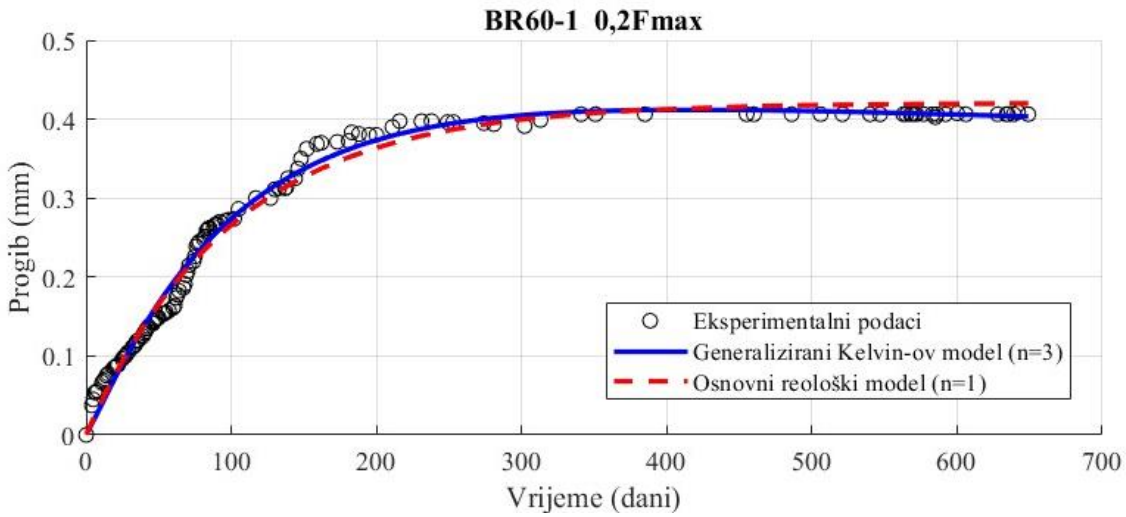

Grafikon 4.8 Usporedba eksperimentalno dobivenih podataka s generaliziranim Kelvin-ovim modelom i osnovnim reološkim modelom za lijepljenu lameliranu gredu br.2 čije su površine lamela obrađene blanjanjem (P) pri opterećenju $0.2F_{max}$



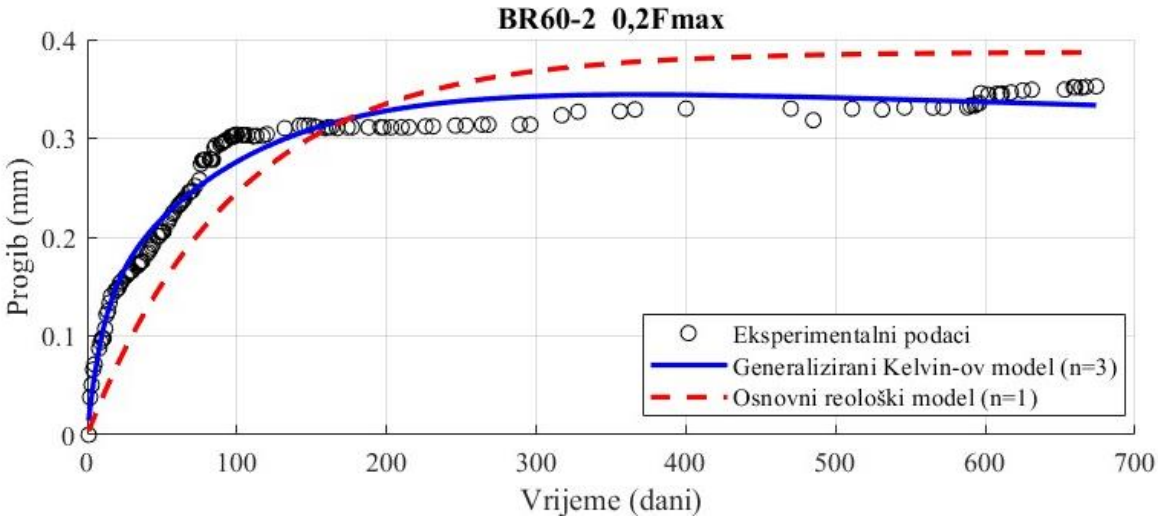

Grafikon 4.9 Usporedba eksperimentalno dobivenih podataka s generaliziranim Kelvin-ovim modelom i osnovnim reološkim modelom za lijepljenu lameliranu gredu br.3 čije su površine lamela obrađene blanjanjem (P) pri opterećenju $0.3F_{max}$



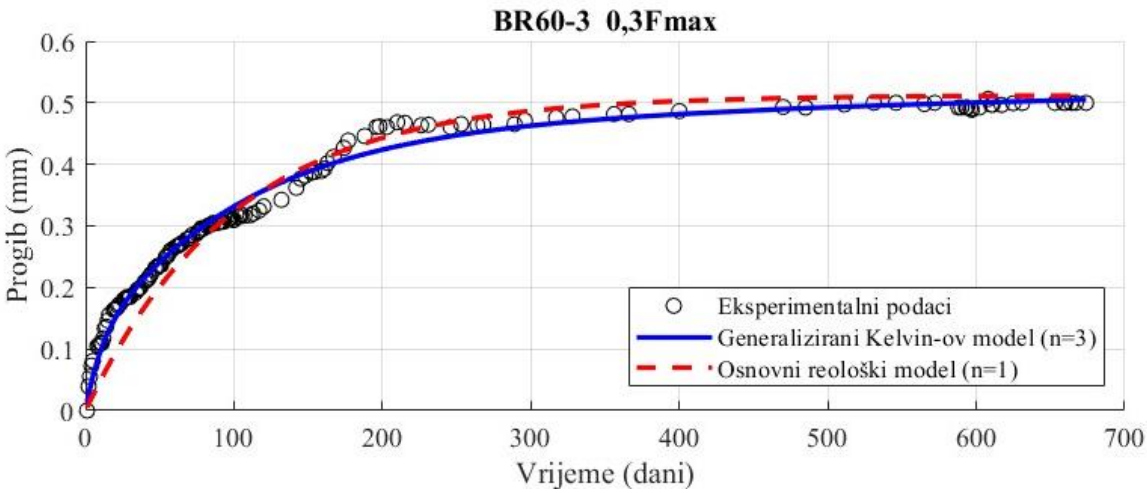

Grafikon 4.10 Usporedba eksperimentalno dobivenih podataka s generaliziranim Kelvin-ovim modelom i osnovnim reološkim modelom za lijepljenu lameliranu gredu br.4 čije su površine lamela obrađene blanjanjem (P) pri opterećenju $0.3F_{max}$



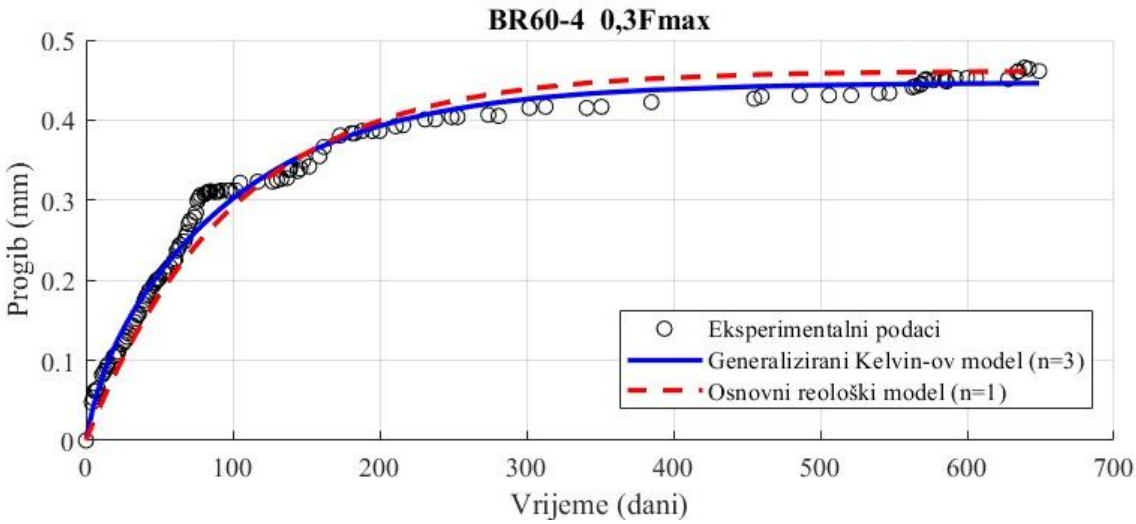

Grafikon 4.11 Usporedba eksperimentalno dobivenih podataka s generaliziranim Kelvin-ovim modelom i osnovnim reološkim modelom za lijepljenu lameliranu gredu br.1 čije su površine lamela obrađene brušenjem s granulacijom 60 (BR60) pri opterećenju $0.2F_{max}$




Grafikon 4.12 Usporedba eksperimentalno dobivenih podataka s generaliziranim Kelvin-ovim modelom i osnovnim reološkim modelom za lijepljenu lameliranu gredu br.2 čije su površine lamela obrađene brušenjem s granulacijom 60 (BR60) pri opterećenju $0.2F_{max}$




Grafikon 4.13 Usporedba eksperimentalno dobivenih podataka s generaliziranim Kelvin-ovim modelom i osnovnim reološkim modelom za lijepljenu lameliranu gredu br.3 čije su površine lamela obrađene brušenjem s granulacijom 60 (BR60) pri opterećenju $0.3F_{max}$




Grafikon 4.14 Usporedba eksperimentalno dobivenih podataka s generaliziranim Kelvin-ovim modelom i osnovnim reološkim modelom za lijepljenu lameliranu gredu br.4 čije su površine lamela obrađene brušenjem s granulacijom 60 (BR60) pri opterećenju $0.3F_{max}$

Tablica 4.3 Prikaz parametara Kelvin-ovog modela za lijepljene lamelirane grede čije su lamele obrađene brušenjem s granulacijom 60

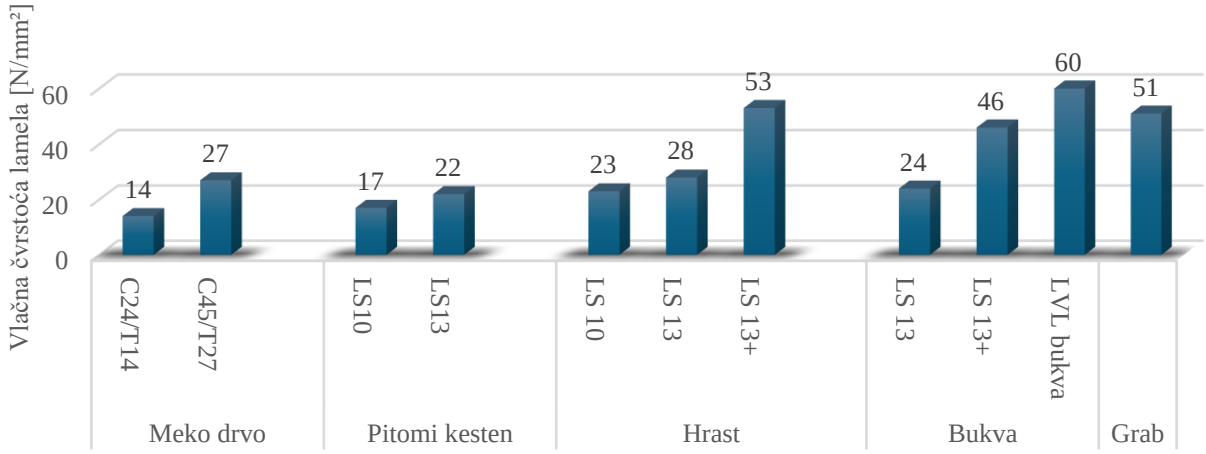
| | Konstante Kelvin-ovog modela | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ | $R^2$ | $k_{def}$ |
| P1 | 0.103 | 0.267 | 0.079 | 0.976 | 0.426 |
| P2 | 0.161 | 0.19 | 0.121 | 0.960 | 0.416 |
| P3 | 0.084 | 0.346 | 0.008 | 0.985 | 0.445 |
| P4 | 0.148 | 0.161 | 0.330 | 0.986 | 0.476 |
| BR60-1 | -0.012 | 0.469 | -0.110 | 0.989 | 0.406 |
| BR60-2 | 0.123 | 0.256 | -0.092 | 0.928 | 0.352 |
| BR60-3 | 0.096 | 0.356 | 0.107 | 0.988 | 0.499 |
| BR60-4 | 0.056 | 0.388 | 0.004 | 0.986 | 0.461 |

# 5. DISKUSIJA O REZULTATIMA ISTRAŽIVANJA

## 5.1. Opći dio

Eksperimentalna istraživanja obuhvaćaju ispitivanje vlačne čvrstoće i modula elastičnosti paralelno s vlakancima na lamelama od graba, lijepljenih lameliranih uzoraka od graba, hrasta cera i javora na savijanje, posmičnih testova lijepljenog spoja na segmentima izdvojenim iz lijepljenih lameliranih uzoraka od graba, hrasta cera i javora i dugotrajne testove lijepljenih lameliranih uzoraka od graba. Dane su dodatne spoznaje o stvarnom ponašanju odabranih lokalnih vrsta tvrdih drva kao konstrukcijskog materijala s obzirom da autor nema saznanja o postojanju navedenih istraživanja s kojima bi se mogla napraviti usporedba.

Eksperimentalno dobivene vrijednosti vlačne čvrstoće u poglavlju 2. premašuju limite vlačnih čvrstoća definiranih za T klase odnosno za meko drvo prema EN 338 [68], a prema kojem maksimalna karakteristična vlačna čvrstoća za klasu T30 iznosi 30 MPa (Grafikon 5.1.). Klase čvrstoće proizašle iz vlačnih testova na lamelama graba su T51, T40 i T32. Za najvišu klasu prema Tablici 5.1. ($f_{t,0,05} = 51N/mm^2$), srednja vrijednost za MOE paralelno sa vlakancima ($E_{t,0,mean} = 19639N/mm^2$) je nešto viša od vrijednosti dane u studiji [86].




Grafikon 5.1 Vlačne čvrstoće lamela za pripadajuće vlačne klase [23]

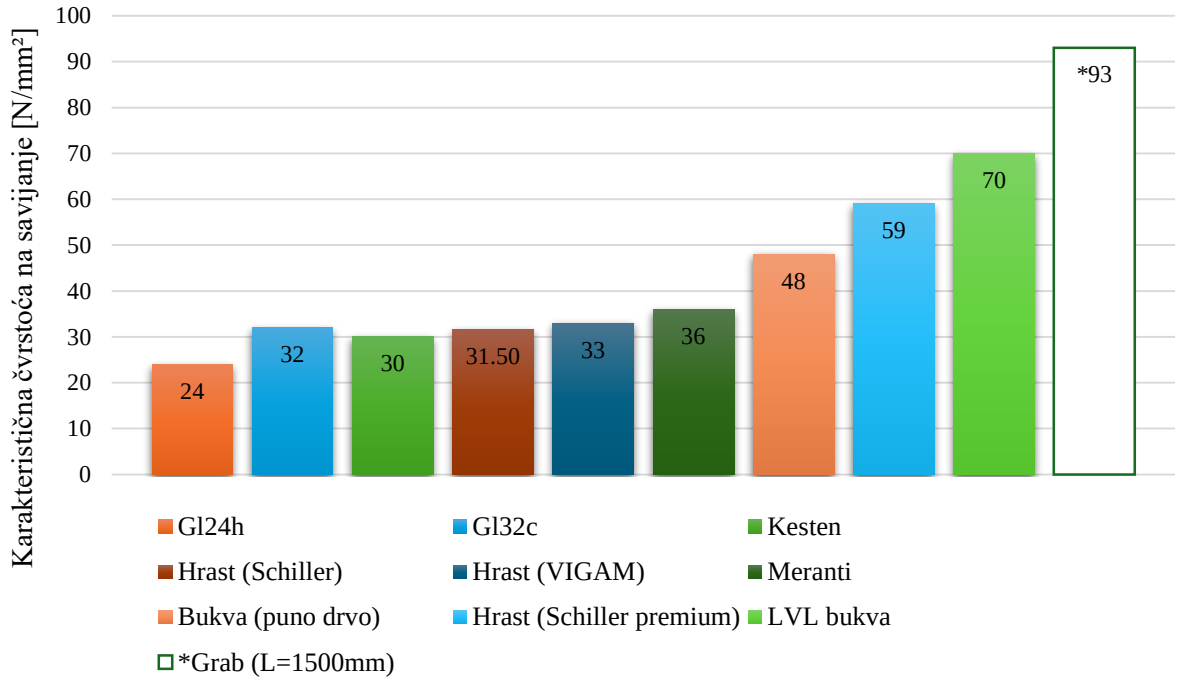
Koristeći model Brandnera i Schickofera [154], rezultate vlačnih testova iz poglavlja 2.5.6. s pripadajućim koeficijentom varijacije i uz pretpostavljeni konzervativni koeficijent varijacije za čvrstoću na savijanje ($cov_{f_{m,g}}$~0.2), moguće je postići klase LLD-a GL40c, GL48c i GL55c. Navedeno je dokazano i u istraživanju Ehrharta, provedenom na uzorcima bukve [17]. Bitno je za napomenuti kako dobiveni rezultati vrijede za vlažnost od 8±2%.

Tablica 5.1 Vlačne T-klase lamela i pripadajuće klase LLD-a

| T klase | | | |
|---|---|---|---|
| | T51 | T40 | T32 |
| $f_{t,0,l,k}$ $(MPa)$ | 51 | 40 | 32 |
| GL-klase | | | |
| | GL55c | GL48c | GL40c |
| $f_{t,0,l,k}(MPa)$ | 55.9 | 48.4 | 44.7 |
| $cov_{f_{t,0,l,k}}$ | 0.2 | 0.2 | 0.2 |

U poglavlju 3. prikazana je veza lokalnog i globalnog modula elastičnosti pri savijanju za lijepljene lamelirane grede od javora, hrasta cera i graba. Ovim istraživanjem zaključeno je kako izraz iz EN 384 [71] ne prikazuje stvarnu vezu između lokalnog i globalnog modula elastičnosti za hrast cer, grab i javor, a što je vidljivo iz jednadžbi danih na Slici 3.9. Stoga je potrebna prilagodba odnosa iz norme EN 384 [71].

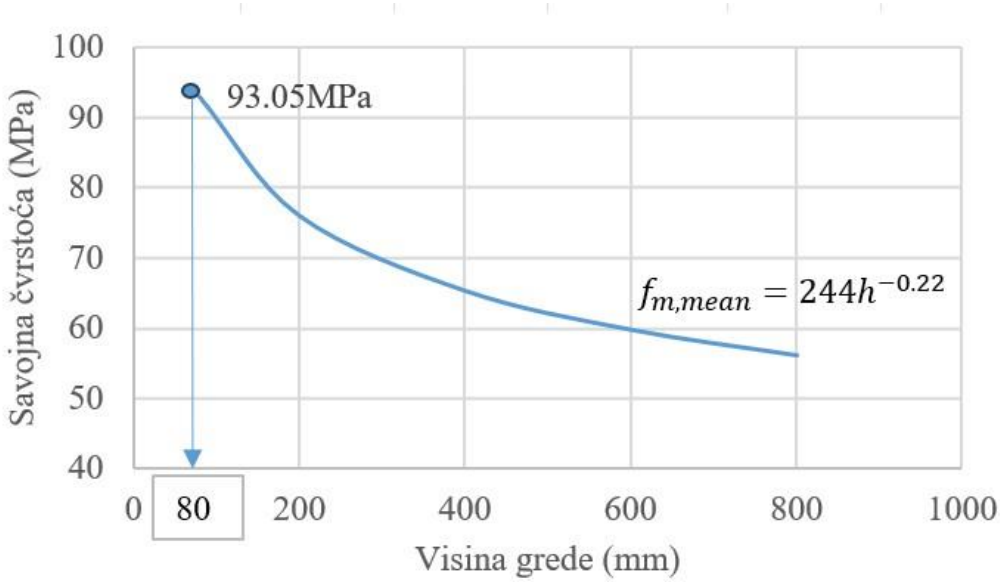
Idući Grafikon 5.2. daje prikaz dosad provedenih istraživanja u području ispitivanja punog drva i lijepljenih lameliranih nosača od četinjača i listača na savijanje u Europi [23]. Usporedba rezultata istraživanja provedenog u ovoj disertaciji s vrijednostima čvrstoća na savijanje prikazanim na Grafikonu 5.2 ukazuje na to da lokalne vrste tvrdog drva grab, hrast cer i javor imaju potencijal za primjenu u proizvodnji lijepljenih lameliranih nosača. Pritom je ispitivanjem lijepljenih lameliranih nosača od graba dobivena karakteristična vrijednost čvrstoće na savijanje od 93MPa. Međutim, bitno je napomenuti kako je visina ispitanih lijepljenih lameliranih nosača znatno manja od referentne visine dane EN 1995-1-1 [72], te je istu potrebno korigirati faktorom veličine.




Grafikon 5.2 Prikaz čvrstoća na savijanje lijepljenih lameliranih nosača na savijanje [23]

Ehrhart [17] je u svom istraživanju ispitivao lijepljene lamelirane nosača od bukve s visinama greda od 200, 400, 600 i 800 mm te je ovisnost između čvrstoće na savijanje i visine grede povezao jednadžbom $f_{m,mean} = 244h^{-0.22}$. Na Grafikonu 5.3. je prikazana navedena jednažba s označenom srednjom vrijednosti čvrstoće na savijanje za visinu grede od 80 mm od 93.05 MPa. U ovom istraživanju, eksperimentalnim ispitivanjem na savijanje lijepljenih lameliranih greda od graba visine 80 mm, dobivena je srednja čvrstoća na savijanje od 120.9 MPa za sve tri površinske obrade lamela. Srednja čvrstoća na savijanje za lijepljene lamelirane grede od hrasta cera iznosila je 79.7 MPa, dok je za grede od javora iznosila 79.4 MPa, i to za grede visine 80 mm za sve tri površinske obrade. Navedenu ovisnost čvrstoće na savijanje o visini grede

[17] je potrebno prilagoditi rezultatima za ostale vrste drva, kao i provesti dodatna ispitivanja na većem broju uzoraka.




Grafikon 5.3 Ovisnost čvrstoće na savijanje (MPa) o visini grede (mm) prema [17]

Općenito, veličina elementa izloženog naprezanju ima utjecaj na čvrstoću drva. Ukoliko se promatra čvrstoća na savijanje lijepljenih lameliranih greda, ovaj se utjecaj uzima u obzir razmatranjem visine poprečnog presjeka grede i faktora $k_h$. Kao referentna visina za lijepljeno lamelirano drvo utvrđena je visina poprečnog presjeka $h$ od 600 mm [72], što znači da mehanička svojstva zahtijevaju prilagodbu vrijednosti za visine različite od referentne. Prema EN 1995-1-1 [72], čvrstoća na savijanje i vlačna čvrstoća lijepljenog lameliranog drva s visinom poprečnog presjeka manjom od 600 mm mogu se povećati za najviše 10% pomoću korekcijskog faktora $k_h$ prema idućem izrazu:

$$k_h = min\left(\frac{600^{0.1}}{h}; 1.1\right) \tag{5.1.}$$

Tehničko odobrenje Z-9.1-679 [21] za lijepljeno lamelirano drvo od bukve propisuje korekcijski faktor za čvrstoću na savijanje za visine poprečnog presjeka manje ili veće od 600 mm prema izrazima:

$$k_h = min\left(\frac{600^{0.14}}{h}; 1.1\right) \rightarrow h < 600\ mm \tag{5.2.}$$

$$k_h = min\left(\frac{600^{0.14}}{h}; 0.9\right) \rightarrow h > 600\ mm \tag{5.3.}$$

Navedeno ukazuje na izraženiji efekt veličine kod bukve u odnosu na efekt veličine kod mekih drva. S obzirom da su eksperimenti savijanja lijepljenih lameliranih uzoraka provedeni na uzorcima visine 80 mm, a koja je manja od referentne, mehanička svojstva je potrebno korigirati faktorom veličine.

Kvaliteta lijepljenog spoja kod inženjerskih proizvoda uvjetovana je vrstom ljepila i tehnologijom lijepljenja te se ista ne može primijeniti na vrste drva s različitom strukturom. Ovo istraživanje uključivalo je suradnju s privrednim sektorom kako bi se razvila zadovoljavajuća tehnologija lijepljenja za odabrane vrste lokalnih tvrdih drva i to za klase uporabivosti 1. Preporuke i prilagodbe tehnologije lijepljenja u odnosu na meka drva uključivale su zatvoreno vrijeme lijepljenja od 30 minuta, uz primjenu pritiska od 1,2 N/mm². Postupak lijepljenja, proveden prema uputama navedenim u tehničkom listu i uz preporuke proizvođača ljepila, omogućio je zadovoljavajuće rezultate za grab i hrast cer u pogledu posmičnih čvrstoća lijepljenog spoja, dok je za javor potrebno provesti dodatna istraživanja kako bi se zadovoljili uvjeti za posmične testove. Isto tako, sukladno EAD-u [34] potrebno je provesti i testove delaminacije, metoda A prema Aneksu C [33] u suhim uvjetima, kako bi se osigurala kvaliteta lijepljenog spoja.

Opisivanje ponašanja drvenih elemenata pri puzanju složen je postupak zbog prirodne anizotropije drva, točnije pretpostavljene ortotropije za inženjerske konstrukcije te raznovrsnih parametara koji utječu na puzanje poput temperature, vlažnosti, vrste i razine opterećenja. Dodatnu poteškoću predstavlja prikupljanje podataka kroz dugotrajna razdoblja, budući da su eksperimenti koji traju nekoliko mjeseci vremenski kratki u usporedbi s očekivanim proračunskim vijekom građevine od 50 godina. S obzirom da EC5 [72] definira koeficijent deformacije pri čemu ne razlikuje različite vrste drva, provedeno je istraživanje s ciljem analize opravdanosti vrijednosti koeficijenata deformacije.

Ova studija provedena je u završnoj fazi istraživačkog projekta kako bi se analiziralo ponašanje lijepljenih lameliranih elemenata od drva graba iz hrvatskih šuma. Rezultati ovog istraživanja doprinose boljem razumijevanju svojstava puzanja tvrdog drva, čime se unapređuje postojeća baza podataka. Prilikom analize ponašanja pri puzanju potvrđen je zanemariv utjecaj obrade površine lamela na savojna svojstva lameliranih elemenata.

Rezultati pokazuju da jednadžba ‘power law’ pokazuje dobro podudaranje s eksperimentalnim podacima pri razinama opterećenja od $0{,}2F_{max}$ i $0{,}3F_{max}$. Isto tako, prilikom konstantnog opterećenja od $0{,}2F_{max}$ i $0{,}3F_{max}$, kod svih lijepljenih lameliranih elemenata uočene su primarna i dio sekundarne faze puzanja. Na temelju dobivenih eksperimentalnih rezultata, vrijednost

progiba pri puzanju uslijed savijanja manja je nego što je predviđena Eurokodom 5. Pritom je bitno napomenuti kako se većina ispitivanja puzanja provodi pri razinama naprezanja uslijed savijanja u rasponu od 5 do 15 MPa [155]. Međutim, razine naprezanja uslijed stalnog opterećenja u konstrukcijama često su niže, u rasponu od 2 do 5 MPa [124]. Dobivene vrijednosti koeficijenta deformacije za više razine naprezanja u lijepljenim lameliranim gredama, i to 25 MPa za 0,2$F_{max}$, odnosno 37 MPa za 0,3$F_{max}$, ukazuju na konzervativne vrijednosti koeficijenta deformacije definiranog u EC5 [72]. Usporedbom koeficijenta deformacije dobivenog ovim istraživanjem i koeficijenta deformacije prema istraživanju [124] za lijepljene lamelirane grede od smreke, dimenzija 90 x180x6500 $mm^3$, izložene stalnom naprezanju uslijed savijanja od 3 MPa u razdoblju od 2 godine, može se zaključiti kako je potrebno provesti istraživanja puzanja na lijepljenim lameliranim elementima graba stvarne veličine. Trebalo bi razmotriti i druge načine ispitivanja kao što su tlačno i vlačno opterećenje uz promatranje utjecaja promjene temperature i relativne vlažnosti zraka na sadržaj vlage u lijepljenim lameliranim uzorcima od drva graba.

## 5.2. Primjena TOPSIS metode za odabir najprikladnije vrste tvrdog drva među odabranim lokalnim vrstama za proizvodnju lijepljenih lameliranih nosača

### 5.2.1. Opći dio

U sklopu ove disertacije analizirana su neka mehanička i fizikalna svojstva lijepljenih lameliranih uzoraka od odabranih lokalnih vrsta tvrdih drva iz hrvatskih šuma, i to: grab (*Carpinus Betulus* L.), hrasta cer (*Quercus Cerris* L.) i javora (*Acer Campestre* L.). U svrhu pronalaska najprikladnije vrsta tvrdog drva za proizvodnju lijepljenih lameliranih nosača, provedena je višekriterijalna analiza. Postoje brojne višekriterijalne analize koje se bave problemima odabira s više kriterija i rangiranjem alternativa u različitim znanstvenim područjima. Pojam analize s više kriterija odnosi se na donošenje odluka u prisutnosti mnogih, često konfliktnih kriterija koji mogu biti od različitih važnosti za donositelja odluka. U sklopu ovog istraživanja korištena je metoda TOPSIS (*'Tehnika za redoslijed preferencija prema sličnosti s idealnim rješenjem'*), a koju su razvili Hwang i Yoon 1981. godine, kako bi se pronašla najprikladnija vrsta tvrdog drva među odabranim vrstama za proizvodnju lijepljenih lameliranih nosača [156].

Prema TOPSIS metodi, najbolja alternativa je ona koja ima najkraću geometrijsku udaljenost od idealne i najveću udaljenost od antiidealne alternative. Idealna alternativa je ona koja

ima najbolje vrijednosti po svakom kriteriju, a antiidealna alternativa sadrži najlošije vrijednosti kriterija. Udaljenosti se promatraju pomoću relativne bliskosti (*'relative closeness'* - RC), a čemu prethodi računanje Euklidske udaljenosti. Također, ova metoda pretpostavlja svaki od kriterija kao korist ili trošak i pridružuje mu kvantitativnu vrijednost u pogledu važnosti kriterija (težinski koeficijent - W). Odabrani kriteriji za provođenje TOPSIS metode su:

- gustoća,
- čvorovi i otklon vlakanaca,
- čvrstoća na savijanje LLN-a,
- globalni modul elastičnosti,
- relativna srednja posmična čvrstoća lijepljenog spoja,
- trošak materijala,
- trošak proizvodnje LLN-a.

Za određivanje težinske vrijednosti pojedinog kriterija korištena je metoda AHP – analitički hijerarhijski proces (engl. *Analytic Hierarchy Process*) pri čemu se analiziraju po dva kriterija istodobno umjesto usporedbe svih kriterija odjednom [157]. Cilj metode AHP je vrednovanje kvantitativnih i/ili kvalitativnih kriterija u relativnom odnosu koristeći Saatyjevu ljestvicu relativne važnosti, a koja se sastoji od devet stupnjeva [158]. Metoda svojstvenog vektora koristi se za izračun težina i provjeru konzistentnosti dobivenih težina. Konzistentnost rezultata provjerava se pomoću omjera konzistentnosti, a koji ne bi smio biti veći od 0,10 ili 10 % kako bi rezultati bili konzistentni. Kao rezultat postupka nastaje matrica usporedbe izražena u obliku omjera, iz koje se zatim generira matrica relativnih važnosti. U ovom radu odabire se najprikladnija vrsta tvrdog drva među odabranim lokalnim vrstama iz hrvatskih šuma za proizvodnju lijepljenih lameliranih nosača [159]. U tu svrhu provedena je višekriterijalna analiza pomoću kombinirane AHP-TOPSIS metode.

### 5.2.2. Opis kriterija

Konačne dimenzije lijepljenih lameliranih greda iznosile su 60x80x1700 mm, bez zupčastog spoja. Za lijepljenje lamela korišteno je ljepilo Prefere 4535 i učvršćivač Prefere 5035, pri čemu su za obradu lamela korištene tri različite površinske obrade: blanjanje, brušenje s granulacijom 60 (BR60), brušenje s granulacijom 80 (BR80).

Gustoća drva izračunata je neposredno prije provođenja eksperimentalnih testova lijepljenih lameliranih uzoraka na savijanje u 4 točke. Srednja gustoća javora iznosila je 620 kg/m3, graba 790 kg/m3, dok je za hrast cer 745 kg/m3.

Vizualna klasifikacija lamela provedena je prema normi DIN 4074-5 [19] na način da su lamele svrstane u jedan od tri razreda LS7, LS10 i LS13. Najveći postotak lamela graba je svrstan u najvišu klasu LS13.

Testovi na savijanje u 4 točke provedeni su na lijepljenim lameliranim gredama od graba, hrasta cera i javora u Laboratoriju za konstrukcije Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije, prema normi EN 408 [70]. Procedura je opisana u poglavlju 3. Rezultati čvrstoća na savijanje kao i globalnog modula elastičnosti prikazani su u Tablici 1.

Relativni posmični testovi lijepljenog spoja na lijepljenim lameliranim uzorcima od graba, hrasta cera i javora, u suhim uvjetima, provedeni su prema Dodatku A iz EAD-a [34] i prikazani su u istoj tablici.

Troškovi materijala i troškovi proizvodnje definirani su u suradnji s tvrtkom Drvene konstrukcije d.o.o. Veći troškovi proizvodnje utvrđeni su za lamele koje su brušene s granulacijom 60 i 80 s obzirom na dodatne korake u proizvodnji lijepljenih lameliranih nosača koji uključuju transport lamela do stroja za brušenje, procesa brušenja lamela i uklanjanja prašine nakon brušenja.

### 5.2.3. Postupak i rezultati TOPSIS metode

TOPSIS metoda provedena je koristeći Microsoft Excel, a postupak je definiran s nekoliko koraka:

(1) definiranje matrice odluke (Tablica 5.2.) gdje *W* predstavlja težinski koeficijent dok P označava proces blanjanja lamela, BR80 brušenje lamela s granulacijom 80 i BR60 brušenje lamela s granulacijom 60

Tablica 5.2 Matrica odluke

| | | Gustoća (kg/m$^3$) | Vizualna klasifikacija | Čvrstoća na savijanje (MPa) | Modul elastičnosti (MPa) | Relativna srednja posmična čvrstoća lijepljenog spoja | Trošak materijala | Trošak proizvodnje |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | W | 0.07 | 0.13 | 0.15 | 0.13 | 0.19 | 0.17 | 0.17 |
| Alternative | Oznaka | trošak | korist | korist | korist | korist | trošak | trošak |
| Grab P | A11 | 790 | 11.8 | 112.6 | 17580 | 0.94 | 1 | 1 |
| Grab BR80 | A12 | 790 | 11.8 | 121.4 | 17173 | 0.99 | 1 | 1.1 |
| Grab BR60 | A13 | 790 | 11.8 | 125 | 18281 | 0.83 | 1 | 1.1 |
| Hrast cer P | A21 | 745 | 9.7 | 68.8 | 11836 | 1.16 | 1.66 | 1 |
| Hrast cer BR80 | A22 | 745 | 9.7 | 74.1 | 11797 | 1.2 | 1.66 | 1.1 |
| Hrast cer BR60 | A23 | 745 | 9.7 | 92.3 | 15928 | 1.17 | 1.66 | 1.1 |
| Javor P | A31 | 620 | 11.5 | 77 | 11350 | 0.9 | 1.8 | 1 |
| Javor BR80 | A32 | 620 | 11.5 | 85.2 | 11924 | 0.85 | 1.8 | 1.1 |
| Javor BR60 | A33 | 620 | 11.5 | 76.8 | 11121 | 0.84 | 1.8 | 1.1 |

(2) određivanje idealne alternative A+ koja pretpostavlja maksimalne vrijednosti za kriterije koristi, a minimalne za kriterije troška, dok za antiidealnu alternativu A- vrijedi obrnuti slučaj (Tablica 5.3.)

Tablica 5.3 Prikaz idealne i antiidealne alternative ovisno o kriterijima

| Idealna/ antiidealna alternativa | Gustoća (kg/m$^3$) | Vizualna klasifikacija | Čvrstoća na savijanje (MPa) | Modul elastičnosti (MPa) | Relativna srednja posmična čvrstoća lijepljenog spoja | Trošak materijala | Trošak proizvodnje |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A+ | 620 | 11,8 | 125 | 18281 | 1,2 | 1 | 1 |
| A- | 790 | 9,7 | 68,8 | 11121 | 0,83 | 1,8 | 1,1 |

(3) vektorska transformacija matrice odluke u matricu s elementima bezdimenzionalne veličine (Tablica 5.4.),

Tablica 5.4 Transformirana matrica s kriterijima kao bezdimenzionalnim veličinama gdje P označava proces blanjanja lamela, BR80 brušenje lamela s granulacijom 80 i BR60 brušenje lamela s granulacijom 60

| | | Gustoća (kg/m$^3$) | Vizualna klasifikacija | Čvrstoća na savijanje (MPa) | Modul elastičnosti (MPa) | Relativna srednja posmična čvrstoća lijepljenog spoja | Trošak materijala | Trošak proizvodnje |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | W | 0.07 | 0.13 | 0.15 | 0.13 | 0.19 | 0.17 | 0.17 |
| Alternative | Oznaka | trošak | korist | korist | korist | korist | trošak | trošak |
| Grab P | A11 | 0,365 | 0,356 | 0,396 | 0,407 | 0,314 | 0,218 | 0,312 |
| Grab BR80 | A12 | 0,365 | 0,356 | 0,427 | 0,398 | 0,331 | 0,218 | 0,343 |
| Grab BR60 | A13 | 0,365 | 0,356 | 0,440 | 0,423 | 0,278 | 0,218 | 0,343 |
| Hrast cer P | A21 | 0,344 | 0,293 | 0,242 | 0,274 | 0,388 | 0,362 | 0,312 |
| Hrast cer BR80 | A22 | 0,344 | 0,293 | 0,261 | 0,273 | 0,401 | 0,362 | 0,343 |
| Hrast cer BR60 | A23 | 0,344 | 0,293 | 0,325 | 0,369 | 0,391 | 0,362 | 0,343 |
| Javor P | A31 | 0,286 | 0,347 | 0,271 | 0,263 | 0,301 | 0,393 | 0,312 |
| Javor BR80 | A32 | 0,286 | 0,347 | 0,300 | 0,276 | 0,284 | 0,393 | 0,343 |
| Javor BR60 | A33 | 0,286 | 0,347 | 0,270 | 0,257 | 0,281 | 0,393 | 0,343 |

(4) izračun Euklidske udaljenosti (Tablica 5.5.):

Tablica 5.5 Prikaz vrijednosti Euklidske udaljenosti

| Alternative | Oznaka | S+ | S- |
|---|---|---|---|
| Grab P | A11 | 0,359 | 0,529 |
| Grab BR80 | A12 | 0,387 | 0,558 |
| Grab BR60 | A13 | 0,387 | 0,558 |
| Cer P | A21 | 0,422 | 0,433 |
| Cer BR80 | A22 | 0,439 | 0,459 |
| Cer BR60 | A23 | 0,441 | 0,516 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Javor P | A31 | 0,416 | 0,416 |
| Javor BR80 | A32 | 0,425 | 0,437 |
| Javor BR60 | A33 | 0,426 | 0,416 |

(5) izračun relativne bliskosti RC (Tablica 5.6.)

Tablica 5.6 Rangiranje alternativa prema relativnoj bliskosti RC gdje P označava proces blanjanja lamela, BR80 brušenje lamela s granulacijom 80 i BR60 brušenje lamela s granulacijom 60

| Alternative | Oznaka | S+ | S- | RC | Rang |
|---|---|---|---|---|---|
| Grab P | A11 | 0.359 | 0.529 | 0.595 | 1 |
| Grab BR80 | A12 | 0.387 | 0.558 | 0.591 | 3 |
| Grab BR60 | A13 | 0.387 | 0.558 | 0.591 | 2 |
| Hrast cer P | A21 | 0.422 | 0.433 | 0.506 | 7 |
| Hrast cer BR80 | A22 | 0.439 | 0.459 | 0.511 | 5 |
| Hrast cer BR60 | A23 | 0.441 | 0.416 | 0.539 | 4 |
| Javor P | A31 | 0.416 | 0.416 | 0.500 | 8 |
| Javor BR80 | A32 | 0.425 | 0.437 | 0.507 | 6 |
| Javor BR60 | A33 | 0.426 | 0.416 | 0.494 | 9 |

Konačno, alternative se rangiraju prema relativnim bliskostima u odnosu na idealnu ili antiidealnu alternativu. Analizirajući rezultate, lijepljeno lamelirano drvo izrađeno od graba s blanjanim lamelama predstavlja najbolju alternativu za proizvodnju lijepljenih lameliranih nosača među odabranim vrstama tvrdih drva.

# 6. ZAKLJUČCI I SMJERNICE ZA DALJNJA ISTRAŽIVANJA

## 6.1. Zaključci istraživanja

Renesansa drva u urbanom građevinarstvu nudi ogromne potencijale za borbu protiv klimatskih promjena, ali zahtijeva sustavne promjene u načinu korištenja i prerade drva. Ponovna upotreba građevinskih komponenti u kontekstu kružnog gospodarstva nudi značajan potencijal za korištenje proizvoda na bazi drva. Razumijevanje varijabilnosti karakteristika drva i njihovih uzroka omogućuje učinkovitije upravljanje šumskim resursima. Unatoč većoj sposobnosti prilagodbe tvrdih drva (listača) klimatskim promjenama, meko drvo (četinjače) će i dalje ostati dominantniji materijal za proizvode na bazi drva, dok će se primjena tvrdog drva značajno proširiti zahvaljujući intenzivnim istraživanjima koja se trenutno provode u Europi. Iako tehnološki napredak ubrzava primjenu listača, implementacija u europske standarde i dalje zahtijeva duže vremensko razdoblje, kao i kod četinjača.

U sklopu ove disertacije prikazana su eksperimentalna istraživanja mehaničkih svojstava triju lokalnih vrsta drva: graba (*Carpinus betulus* L.), hrasta cera (*Quercus cerris* L.) i javora (*Acer campestre* L.). Navedene vrste tvrdih drva nisu uključene u europski dokument EAD 130320-00-0304 ('*Glued laminated timber made of solid hardwood*') donesen 2018. g. [34], zbog čega je bilo nužno provesti eksperimentalna ispitivanja kako bi se isti mogli koristiti za proizvodnju lijepljenih lameliranih nosača. Ova istraživanja predstavljaju prvi korak pri uvođenju nedovoljno iskorištenih vrsta tvrdih drva iz hrvatskih šuma na tržište kao materijala prikladnog za nosive konstrukcije. Provedena eksperimentalna istraživanja obuhvaćaju:

- ispitivanje vlačne čvrstoće i modula elastičnosti paralelno s vlakancima na lamelama izrađenim od graba,
- ispitivanje lijepljenih lameliranih uzoraka izrađenih od graba, hrasta cera i javora na savijanje u 4 točke,
- provođenje posmičnih testova lijepljenog spoja na segmentima izdvojenim iz lijepljenih lameliranih uzoraka izrađenih od graba, hrasta cera i javora,
- provođenje testova s dugotrajnim opterećenjem na lijepljenim lameliranim uzorcima od graba.

U sklopu vlačnih testova, kvantificirani su vizualni i fizikalni indikatori, a koji značajno utječu na vlačnu čvrstoću i krutost paralelno s vlakancima. Isto tako, dan je prijedlog pravila za svrstavanje lamela graba u klase čvrstoće T51, T40 i T32, na osnovu dimenzija kvrgi i dinamičkog modula elastičnosti te eksperimentalno dobivenih vrijednosti vlačnih čvrstoća i modula elastičnosti.

Kvaliteta lijepljenog spoja kod inženjerskih proizvoda uvjetovana je vrstom ljepila i tehnologijom lijepljenja te se ista ne može primijeniti na vrste drva s različitom strukturom. U sklopu ovog istraživanja, ostvarena je suradnja s privrednim sektorom kako bi se razvila zadovoljavajuća tehnologija lijepljenja za grab i hrast cer i to za klase uporabivosti 1 i 2. Rezultati posmičnih testova i to postotka otkazivanja po drvu za javor, ukazuju na potrebu dodatnih istraživanja kako bi se razvila zadovoljavajuća tehnologija.

Nadalje, ispitani su lijepljeni lamelirani uzorci od graba, hrasta cera i javora na savijanje u 4 točke u svrhu određivanja čvrstoće na savijanje i modula elastičnosti. Utvrđene su više vrijednosti čvrstoće na savijanje i modula elastičnosti za sve tri vrste drva obrađene s tri različite površinske obrade lamela u odnosu na vrijednosti čvrstoća na savijanje i krutosti lijepljenih lameliranih uzoraka od četinjača, dostupnih u europskim standardima. Navedeno omogućava redukciju materijala pri proizvodnji lijepljenih lameliranih nosača ukazujući na veliki potencijal primjene, a što za cilj ima stvaranje temelja i tehničkog okvira za upotrebu lijepljenih lameliranih nosača od graba, hrasta cera i javora.

Ovim istraživanjima dane su nove spoznaje o stvarnom ponašanju odabranih lokalnih vrsta listača kao potencijalnih materijala za nosive konstrukcije, s obzirom da autor nema saznanja o postojanju navedenih istraživanja s kojima bi se mogla napraviti usporedba. Uzimajući u obzir rezultate dosadašnjih istraživanja mehaničkih karakteristika tvrdih vrsta drva, očita je potreba za daljnjim nastavkom eksperimentalnih ispitivanja kako bi se stvorila baza podataka s parametrima koji utječu na pojedinu vrstu i naposlijetku formiranje cjelovitog europskog standarda za

proizvodnju lijepljenih lameliranih nosača od listača. Razumijevanje varijabilnosti karakteristika drva i njihovih uzroka omogućava bolje gospodarenje šumama.

Osnovne značajke i znanstveni doprinos:

- definiranje utjecaja različitih metoda površinske obrade (blanjanje i brušenje s različitim granulacijama) lamela drva graba (*Carpinus betulus* L.), hrasta cera (Quercus Cerris L.) i javora (Acer Campestre L.), na kapacitet nosivosti lijepljenih lameliranih elemenata dominantno opterećenih savijanjem za kratkotrajno opterećenje
- definiranje mehaničkih karakteristika elemenata drva graba, uključujući: vlačnu čvrstoću lamela, posmičnu čvrstoću lamele na uzorcima izdvojenim iz lijepljenih lameliranih elemenata, čvrstoću na savijanje i modul elastičnosti lijepljenih lameliranih elemenata, uz usporedbu dobivenih rezultata s podacima iz literature
- kvantifikacija vizualnih i fizikalnih karakteristika lamela drva graba s analizom njihovog utjecaja na vlačnu čvrstoću i modul elastičnosti paralelno sa vlakancima, te regresijski modeli koji prikazuju vezu između istih s ciljem ubrzanja procesa klasifikacije lamela
- prijedlog klasa vlačne čvrstoće lamela drva graba čime se omogućava optimalno korištenje drvene građe za proizvodnju lijepljenih lameliranih nosača i proširenje baze podataka u svrhu uvođenja novih razreda vlačne čvrstoće u EN 338 koji trenutno nisu definirani za bjelogorične vrste
- ispitivanje utjecaja različitih metoda površinske obrade (blanjanje i brušenje s različitim granulacijama) i razine opterećenja na kapacitet nosivosti lijepljenih lameliranih elemenata od drva graba dominantno opterećenih savijanjem za dugotrajno opterećenje
- definiranje vrijednosti koeficijenta deformacije $k_{def}$ na temelju ispitivanja lijepljenih lameliranih elemenata od drva graba dominantno opterećenih savijanjem za dugotrajno opterećenje, s ciljem usporedbe s vrijednostima danim u Eurocodeu 5 i literaturi
- određivanje smjernica za razvoj tehnologije lijepljenja lamela drva graba za proizvodnju lijepljenih lameliranih nosača, kao podloge za tržišnu implementaciju lijepljenog lameliranog drva proizvedenog od drva graba, uz osvrt na analizu potencijala javora i hrasta cera

## 6.2. Smjernice za daljnja istraživanja

Proizvodi na bazi tvrdih drva predstavljaju značajan potencijal u građevinskom sektoru, a posebice su primjenjivi kod elemenata gdje visoka čvrstoća i otpornost predstavljaju ključne faktore. Mehanička svojstva lijepljenih lameliranih nosača od tvrdih vrsta drva znatno su viša u usporedbi s lijepljenim lameliranim nosačima od mekih vrsta drva. Kako bi se postigla razina znanja slična onoj za lamelirano lijepljeno drvo od mekih vrsta drva, nužna su opsežna istraživanja i eksperimentalni testovi. Iako ovi materijali nude mogućnost smanjenja dimenzija konstrukcijskih elemenata i poboljšanje nosivosti, njihova široka upotreba ovisi o dostupnosti, razvoju prikladnih lijepljenih spojeva i daljnjim istraživanjima u području optimizacije proizvodnih procesa. Kako bi se osiguralo šire prihvaćanje tvrdog drva u građevinskoj industriji, potrebno je kontinuirano razvijati nove tehnološke pristupe i prilagođavati proizvodne standarde. U tom kontekstu, inovativna rješenja, poput hibridnih nosača i poboljšanih metoda povezivanja, mogu igrati ključnu ulogu u povećanju efikasnosti i dugoročne održivosti konstrukcija od tvrdog drva.

Prilikom provođenja vlačnih testova provedene su regresijske analize u svrhu utvrđivanja korelacije između vizualnih i fizikalnih parametara te mehaničkih karakteristika, vlačne čvrstoće i krutosti. Preciznije procjene vlačne čvrstoće i krutosti lamela graba, uz veći koeficijent determinacije, moguće su uz poznavanje dodatnih indikatora kao što su globalna i lokalna devijacija vlakanaca, a što nije bio dio ovih istraživanja. Navedeno je moguće odrediti korištenjem laserskih skenera i algoritama za obradu podataka te strojnim učenjem.

S obzirom da su u ovoj disertaciji ispitana samo neka mehanička svojstva lokalnih tvrdih drva graba, hrasta cera i javora, potrebno je ispitati ostala mehanička svojstva kao što su npr. posmična čvrstoća te tlačna čvrstoća paralelno i okomito na vlakanca. Navedeno je potrebno u svrhu formiranja sveobuhvatnog profila mehaničkih svojstava za lijepljeno lamelirano drvo od odabranih lokalnih vrsta tvrdih drva. Isto tako, nužno je provesti tlačna ispitivanja lijepljenih lameliranih stupova u svrhu određivanja krivulja izvijanja i pripadajućih koeficijenata izvijanja. Također, čvrstoća na savijanje i modul elastičnosti određeni su na uzorcima koji nisu uvriježene veličine te je potrebno provesti *'full-scale'* testove koristeći iste vrste drva, kao i veći broj uzoraka. Ovi testovi omogućili bi bolje razumijevanje utjecaja faktora veličine na mehaničke karakteristike tvrdog drva. Isto tako, sukladno EAD-u nužno je provesti testove delaminacije za klasu uporabivosti 1 kako bi se osigurala kvaliteta lijepljenog spoja.

Eksperimetalni testovi na dugotrajno opterećenje provedeni su u laboratorijskim uvjetima koji odgovaraju klasi uporabivosti 1. Iste bi trebalo provesti u uvjetima s cikličkim promjenama vlažnosti kao i s drugim režimima opterećenja (vlak, tlak).

Eksperimentalna istraživanja spojeva nužno je provesti u svrhu određivanja pravila za projektiranje spojeva s tvrdim drvom, kao i inovativnih rješenja. Istraživanja pokazuju da primjena tvrdog drva omogućuje prijenos većih sila unutar elemenata manjih poprečnih presjeka. Zaključci doneseni ovim istraživanjem kao i buduća istraživanja tvrdih drva doprinijet će široj primjeni tvrdog drva i proizvoda na bazi tvrdih drva u građevinarstvu.

# 7. LITERATURA


[1] J. Delbeke, A. Runge-Metzger, Y. Slingenberg, and J. Werksman, "The paris agreement," *Towar. a Clim. Eur. Curbing Trend*, pp. 24–45, 2019.

[2] *https://www.un.org/uk/desa/68-world-population-projected-live-urban-areas-2050-says-un (accessed on 24.02.2025.).* .

[3] International Energy Agency, *Global Status Report for Buildings and Construction Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector*. 2019.

[4] G. Churkina *et al.*, "Buildings as a global carbon sink," *Nat. Sustain.*, vol. 3, no. 4, pp. 269–276, 2020.

[5] J. Bell *et al.*, "EU ambition to build the world's leading bioeconomy—Uncertain times demand innovative and sustainable solutions," *N. Biotechnol.*, vol. 40, pp. 25–30, 2018.

[6] *https://www.thorntontomasetti.com/project/ascent (accessed on 24.02.2025.).* .

[7] *https://no.wikipedia.org/wiki/Mj%C3%B8st%C3%A5rnet (accessed on 24.02.2025.).* .

[8] *https://www.siga.swiss/global_en/projects/hoho-wien (accessed on 24.02.2025.).* .

[9] *https://eos-oes.eu/facts-figures/ (accessed on 24.02.2025.).* .

[10] I. . Uzelac Glavinić, I. . Boko, N. . Torić, and J. Lovrić Vranković, "Primjena tvrdih listača za izradu lameliranih nosača u Europi," vol. 72, pp. 607–616, 2020.

[11] *https://communications.catholic.edu/news/2021/05/notre-dame-truss.html (accessed on 24.02.2025.).* .

[12] *https://premierconstructionnews.com/2023/12/11/westminster-hall-roof-and-lantern/*

*(accessed on 24.02.2025.).* .

[13] *https://www.world-architects.com/ca/shigeru-ban-architects-tokyo/project/tamedia-office-building (accessed on 24.02.2025.).* .

[14] *https://www.hess-timber.com/en/references/detail/lords-cricket-ground-warner-stand/ (accessed on 24.02.2025.).* .

[15] K. Merz, A. Niemann, and S. Torno, *Building with Hardwood*. 2021.

[16] H. Kolb, "Biegeversuche und Prüfung des Brandverhaltens an Trägern aus verleimten Buchenschälfurnieren," *Holz als Roh- und Werkst. Eur. J. Wood Wood Ind.*, vol. 26, no. 8, pp. 277–283, 1968.

[17] T. Ehrhart, "European beech glued laminated timber," no. 26173, p. 188, 2019.

[18] B. Glos, P; Lederer, *Sortierung von Buchen- und Eichenschnittholz nach der Tragfähigkeit und Bestimmung der zugehörigen Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte : Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben*, DGfH-Nr. F. München : Inst. für Holzforschung, 2000.

[19] DIN Deutsches Institut für Normung e.V, *DIN 4074-5 Strength grading of wood – Part 5: Sawn hard wood*, Alleinverk. 2008.

[20] M. Frese, "Die Biegefestigkeit von Brettschichtholz aus Buche. Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Laminierungseffekt," 2006.

[21] Deutsches Institut fur Bautechnik, "Z-9.1-679 BS-Holz aus Buche und BS-Holz Buche-Hybridträger," 2024.

[22] "neue Holzbau AG Lungern." [Online]. Available: https://neueholzbau.ch/.

[23] P. Linsenmann, "European Hardwoods for the Building Sector Reality of today - possibilities for tomorrow," 2016.

[24] "Glued laminated timber made from European beech wood." [Online]. Available: https://frangi.ibk.ethz.ch/research/reliability-of-glued-laminated-timber/AbgeschlosseneProjekte/glued-laminated-timber-made-from-european-beech-wood.html.

[25] "Biaxial timber-concrete composite slabs made of beech laminated veneer lumber." [Online]. Available: https://frangi.ibk.ethz.ch/research/innovative-timber-structures/timber_concrete-composite-slabs-made-of-beech-laminated-veneer-l.html.

[26] A. Kovryga, P. Stapel, and J. W. G. van de Kuilen, "Mechanical properties and their interrelationships for medium-density European hardwoods, focusing on ash and beech," *Wood Mater. Sci. Eng.*, vol. 15, no. 5, pp. 289–302, Sep. 2020.

[27] "Z-9.1-821, Holz Schiller Eiche-Pfosten-Riegel-Brettschichtholz, Deutsches Institut fur

Bautechnik, 2018.”

[28] S. A. Elaborados y Fabricados Gámiz, “ETA 13/0642, VIGAM ¬ Glued laminated timber of oak,” 2018.

[29] E. O. for T. Assessment, “ETA 13/0646, SIEROLAM ¬ Glued laminated timber of chestnut,” 2018.

[30] E. O. for T. Assessment, “ETA-14/0354 Glued laminated timber made of hardwood – Structural laminated veneer lumber made of beech.”

[31] E. O. for T. Assessment, “ETA 18/1018 Glued laminated timber made of hardwood – Structural laminated veneer lumber made of beech.”

[32] D. I. fur Bautechnik, “Z-9.1-577, Brettschichtholz aus Dark Red Meranti,” 2016.

[33] E. commitee for Standardization, “EN 14080; Timber Structures—Glued Laminated Timber and Glued Solid Timber—Requirements.,” 2013.

[34] EOTA, “EAD 130320-00-0304 Glued Laminated Timber Made of Solid Hardwood,” no. June 2018, p. 30, 2021.

[35] S. E. Omer, “Neka iskustva u ispitivanju lameliranih lijepljenih nosača,” *Drv. ind.*, vol. 33 (11–12), pp. 257–266, 1982.

[36] S. Aicher, Z. Ahmad, and M. Hirsch, “Bondline shear strength and wood failure of European and tropical hardwood glulams,” *Eur. J. Wood Wood Prod.*, vol. 0, no. 0, p. 0, 2018.

[37] S. Winter and H. Kreuzinger, “The Bad Reichenhall ice-arena collapse and the necessary consequences for wide span timber structures,” *10th World Conf. Timber Eng. 2008*, vol. 4, no. November, pp. 1978–1985, 2008.

[38] M. Hansson and H. J. Larsen, “Recent failures in glulam structures and their causes,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 12, no. 5 SPEC. ISS., pp. 808–818, 2005.

[39] J. Munch-andersen, “Robustness considerations from failures in two large-span timber roof structures,” *... COST Actions TU0601 E*, no. October 2014, pp. 1–8, 2009.

[40] *Šumarska enciklopedija*. Jugolsavenski leksikografski zavod, 1980.

[41] A. Antonović, V. Jambreković, S. Pervan, J. Ištvanic, M. Moro, and J. Zule, “Utjecaj lokaliteta uzorkovanja na grupni kemijski sastav bijeli bukovine (Fagus sylvatica L.),” *Drv. Ind.*, vol. 58, no. 3, pp. 119–125, 2007.

[42] V. Krackler and P. Niemz, “Schwierigkeiten und Chancen in der Laubholzverarbeitung: Teil 1: Bestandssituation, Eigenschaften und Verarbeitung von Laubholz am Beispiel der Schweiz,” *Holztechnologie*, vol. 2, no. 52, pp. 5–11, 2011.

[43] *International House Sydney, https://www.archdaily.com/871807/international-house-tzannes (accessed on 24.02.2025.).* .

[44] Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe - FOREST EUROPE, "State of Forests," *State Eur. For.*, p. 394, 2020.

[45] "EOS/ETTF MARKET SURVEY 2024," *10th International Hardwood Conference, Vienna 2024*. p. 45, 2024.

[46] Hrvatske šume d.o.o., "Šumskogospodarska osnova, Uredajni Zapisnik, Šumskogospodarsko Područje Republike Hrvatske," 2020.

[47] V. Lantz, G. McMonagle, C. Hennigar, C. Sharma, P. Withey, and T. Ochuodho, "Forest succession, management and the economy under a changing climate: Coupling economic and forest management models to assess impacts and adaptation options," *For. Policy Econ.*, vol. 142, no. February, p. 102781, 2022.

[48] N. Bozzolan *et al.*, "Preliminary evidence of softwood shortage and hardwood availability in EU regions: A spatial analysis using the European Forest Industry Database," *Austrian J. For. Sci.*, vol. 169, no. October, pp. 375–394, 2021.

[49] D. S. Stands and C. R. Seite, "Restoration of Declining Spruce Stands in the Czech Republic Seite 375 138.," pp. 375–394, 2021.

[50] *UNISTRAND, https://boku.ac.at/en/docservice/doctoral-studies/doktoratsschulen/build-like-nature-resilient-buildings-materials-and-society-buildnature/research/projects/material-modeling-and-structural-design-of-a-strand-based-material-for-the-use-in-mass-.* .

[51] "TIMBERHAUS." [Online]. Available: https://timberhaus.eu/.

[52] N. Breda, R. Huc, A. Granier, and E. Dreyer, "Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences," *Ann. For. Sci.*, vol. 63, no. September, pp. 625–644, 2006.

[53] P. Ciais *et al.*, "Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003," *Nature*, vol. 437, no. 7058, pp. 529–533, 2005.

[54] J. Kunz, G. Löffler, and J. Bauhus, "Minor European broadleaved tree species are more drought-tolerant than Fagus sylvatica but not more tolerant than Quercus petraea," *For. Ecol. Manage.*, vol. 414, no. July 2017, pp. 15–27, 2018.

[55] M. Hanewinkel, D. A. Cullmann, M. J. Schelhaas, G. J. Nabuurs, and N. E. Zimmermann, "Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest land," *Nat. Clim. Chang.*, vol. 3, no. 3, pp. 203–207, 2013.

[56] H. Pretzsch, G. Schütze, and E. Uhl, "Resistance of European tree species to drought stress in mixed versus pure forests: Evidence of stress release by inter-specific facilitation," *Plant Biol.*, vol. 15, no. 3, pp. 483–495, 2013.

[57] P. Brang *et al.*, "Suitability of close-to-nature silviculture for adapting temperate European forests to climate change," *Forestry*, vol. 87, no. 4, pp. 492–503, 2014.

[58] R. Sikkema, G. Caudullo, and D. De Rigo, "Carpinus betulus in Europe: distribution, habitat, usage and threats," 2016.

[59] K. M. F. Hasan *et al.*, "Laminated strand lumber (LSL) potential of Hungarian and Central European hardwoods: a review," *Eur. J. Wood Wood Prod.*, vol. 82, no. 2, pp. 245–264, 2024.

[60] M. A. Taj, S. Kazemi Najafi, and G. Ebrahimi, "Tragverhalten von Holzschrauben in Buchen-, Hainbuchen- und Pappelholz bei Scherbeanspruchung und auf Herausziehen," *Eur. J. Wood Wood Prod.*, vol. 67, no. 2, pp. 135–140, 2009.

[61] R. Wagenführ, *Rudi Wagenführ - Holzatlas (2000, Fachbuchverlag Leipzig) - libgen.li.pdf*. 2000.

[62] "Quercus cerris." [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Quercus_cerris.

[63] B. B. Lados *et al.*, "What we know about Turkey oak (Quercus cerris L.) — from evolutionary history to species ecology," *Forestry*, vol. 97, no. 4, pp. 497–511, 2024.

[64] G. Caudullo, E. Commission, and D. De Rigo, "Acer campestre," no. March 2016, 2022.

[65] L. Nagy and F. Ducci, "EUFORGEN Technical Guidelines for genetic conservation and use for field maple (Acer campestre)," p. 6, 2004.

[66] "EUFORGEN." [Online]. Available: https://www.euforgen.org/species.

[67] E. commitee for Standardization, "EN 14081-1:2016+A1:2019 Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 1: General requirements," 2019.

[68] E. commitee for Standardization, "EN 338:2016 Structural timber - Strength classes," 2016.

[69] E. commitee for Standardization, "EN 1912:2024 Structural Timber - Strength classes - Assignment of visual grades and species," 2024.

[70] E. commitee for Standardization, "EN 408:2010+A1:2012 Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties," 2012.

[71] E. commitee for Standardization, "EN 384:2016+A2:2022 Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density," 2022.

[72] E. commitee for Standardization, “Eurocode 5: Design of timber structures -- Part 1-1: General -- Common rules and rules for buildings (EN 1995-1-1:2004/A2:2014).” 2014.

[73] E. commitee for Standardization, “EN 301:2023 Adhesives, phenolic and aminoplastic, for load-bearing timber structures - Classification and performance requirements,” 2023.

[74] E. commitee for Standardization, “EN 15425:2023 Adhesives - One component polyurethane (PUR) for load-bearing timber structures - Classification and performance requirements,” 2023.

[75] E. commitee for Standardization, “EN 14358:2016 Timber structures - Calculation and verification of characteristic values,” 2016.

[76] D. I. Spectrometers, M. Performance, and L. O. Tests, “Standard Practice for iTeh Standards iTeh Standards Document Preview,” *ASTM website*, vol. 98, no. Reapproved, pp. 1–7, 2021.

[77] E. commitee for Standardization, “EN 16351:2021 Timber structures - Cross laminated timber - Requirements,” 2021.

[78] E. commitee for Standardization, “EN 13501-1:2018 Fire classification of construction products and building elements -- Part 1: Classification using data from reaction to fire tests,” 2018.

[79] E. commitee for Standardization, “EN 16516:2017+A1:2020 Construction products: Assessment of release of dangerous substances - Determination of emissions into indoor air,” 2020.

[80] J. W. G. van de Kuilen and S. Torno, “Materialkennwerte von Eschenholz für den Einsatz in Brettschichtholz. . München: Holzforschung München, Technische Universität München, report: 11508,” 2014.

[81] P. Glos and B. Lederer, “Sortierung von Buchen- und Eichenschnittholz nach der Tragfähigkeit und Bestimmung der zugehörigen Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte. München: Holzforschung München, Technische Universität München, Bericht Nr. 98508,” 2000.

[82] H. J. Blass, J. K. Denzler, M. Frese, P. Glos, and P. Linsenmann, “Materialkennwerte von Eschenholz für den Einsatz in Brettschichtholz (Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe,” 2005.

[83] A. Rais, A. Kovryga, H. Pretzsch, and J. W. G. van de Kuilen, “Timber tensile strength in mixed stands of European beech,” *Wood Sci. Technol.*, vol. 56(4), no. 0123456789, pp. 1–21, 2022.

[84] M. Plos, B. Fortuna, T. Šuligoj, and G. Turk, “From Visual Grading and Dynamic Modulus

of European Beech ( Fagus sylvatica ) Logs to Tensile Strength of Boards," vol. 13(1), 77, 2022.

[85] C. Tapia and S. Aicher, "Survival Analysis of Tensile Strength Variation and Simulated Length – Size Effect along Oak Boards," *J. Eng. Mech.*, vol. 148, no. 1, pp. 1–16, 2022.

[86] A. Kovryga, P. Schlotzhauer, P. Stapel, H. Militz, and J. W. G. van de Kuilen, "Visual and machine strength grading of European ash and maple for glulam application," *Holzforschung*, vol. 73(8), 2019.

[87] S. Collins and G. Fink, "Modeling the tensile mechanical properties of silver birch timber boards," *Constr. Build. Mater.*, vol. 344, no. November 2021, p. 128147, 2022.

[88] T. Ehrhart, "Strength grading of European beech lamellas for the production of GLT & CLT," no. August, 2016.

[89] C. Tapia Camú, *Variation of mechanical properties in oak boards and its effect on glued laminated timber: application to a stochastic finite element glulam strength model*. 2022.

[90] F. Lam, H. Yee, and J. D. Barrett, "Shear strength of Canadian softwood structural lumber," *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 24, no. 3, pp. 419–430, 1997.

[91] G. Fink, "Influence of varying material properties on the load-bearing capacity of glued laminated timber," 2014.

[92] Ehrhart Thomas, "EUROPEAN BEECH GLUED LAMINATED TIMBER."

[93] K. Fruhwald and G. Schickhofer, "Strength grading of hardwoods," in *14th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Hannover, Germany*, 2005, pp. 198–208.

[94] A. Khaloian Sarnaghi and J. W. G. van de Kuilen, "Strength prediction of timber boards using 3D FE-analysis," *Constr. Build. Mater.*, vol. 202, pp. 563–573, 2019.

[95] "JCSS Probabilistic Model Code Part 3: Resistance Models," 2006.

[96] I. Uzelac Glavinić, I. Boko, J. Lovrić Vranković, N. Torić, and M. Abramović, "An Experimental Investigation of Hardwoods Harvested in Croatian Forests for the Production of Glued Laminated Timber," *Materials (Basel).*, vol. 16, no. 5, 2023.

[97] E. commitee for Standardization, "EN 13183-1:2002 Moisture content of a piece of sawn timber - Part 1: Determination by oven dry method," 2002.

[98] I. The MathWorks, "MATLAB R2022b." .

[99] S. Aicher and G. Stapf, "Glulam from European White Oak: Finger Joint Influence on Bending Size Effect," *RILEM Bookseries*, vol. 9, pp. 641–656, 2014.

[100] O. Sarrazin and K. Schafer, "Die Verwendung des Buchenholzes zu Bauzwecken. Centralblatt der Bauverwaltung," vol. 4(47), pp. 483–484, 1884.

[101] F. Colling, “Tragfähigkeit von Biegeträgern aus Brettschichtholz in Abhängigkeit von den festigkeitsrelevanten Einflußgrößen,” Univ. of Karlsruhe, Germany.

[102] F. Colling and R. H. Falk, “Laminating effects in glued-laminated timber beams,” *J. Struct. Eng.*, vol. 1863, 1995.

[103] R. Brandner and G. Schickhofer, “Glued laminated timber in bending: Thoughts, experiments, models and verification,” *11th World Conf. Timber Eng. 2010, WCTE 2010*, vol. 1, no. January 2010, pp. 786–796, 2010.

[104] A. Hänsel, J. Tröger, M. Rößler, N. Brachhold, and P. Niemz, “Influence of surface treatment on the bonding quality of wood for load-bearing purposes,” *Wood Mater. Sci. Eng.*, vol. 18, no. 6, pp. 2128–2139, 2023.

[105] C. R. Frihart, “Adhesive groups and how they relate to the durability of bonded wood,” *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. 23, no. 4, pp. 601–617, 2009.

[106] G. Stapf, S. Aicher, and C. Gehlen, “Verklebte Vollholzprodukte aus Eiche im. Aussenbereich. Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart. Stuttgart.,” 2007.

[107] T. Feldborg, “Determination of some mechanical properties of timber in structural sizes.,” in *Proc Int Timber Eng*, 1991, pp. 2189–2199.

[108] Prefere, “Prefere 4535 Technical Data Sheet,” pp. 1–9, 2019.

[109] I. Boko, I. U. Glavinić, N. Torić, T. Hržić, J. L. Vranković, and M. Abramović, “Potential of Hardwoods Harvested in Croatian Forests for the Production of Glued Laminated Timber,” *Int. J. Struct. Civ. Eng. Res.*, vol. 12, no. 4, pp. 131–134, 2023.

[110] E. commitee for Standardization, “EN 380:1993 Timber structures - Test methods - General principles for static load testing,” 1993.

[111] G. Ravenshorst and J.-W. G. Van de Kuilen, “Relationships between local, global and dynamic modulus of elasticity for soft- and hardwoods; Paper 42-10-1. In CIB W18 - Meeting Forty Two, Dubendorf, Switzerland,” 2010.

[112] J. Arnerić and K. Protrka, “Modeli analize varijance (ANOVA),” *Mat. fizički List. 70(277),* vol. 1, pp. 25–32, 2019.

[113] D. B. Duncan, “Multiple Range and Multiple F Tests,” *Int. Biometric Soc.*, vol. 11, pp. 1–42, 1955.

[114] W. N. Findley, J. S. Lai, K. Onaran, and R. M. Christensen, *Creep and Relaxation of Nonlinear Viscoelastic Materials With an Introduction to Linear Viscoelasticity*, vol. 44, no. 2. 1977.

[115] S. Nakajima *et al.*, “Creep and duration of load characteristics of cross laminated timber.,”

in *World conference on timber engineering, Quebec City, Canada*, 2014.

[116] D. Tong, S. A. Brown, D. Corr, and G. Cusatis, "Wood creep data collection and unbiased parameter identification of compliance functions," *Holzforschung*, vol. 74, no. 11, pp. 1011–1020, 2020.

[117] P. Morlier, *Creep in Timber Structures*. CRC Press, 2004.

[118] P. Gressel, "Prediction of long-term deformation-behavior from short-term creep experiments.," *Holz Roh Werkst.*, vol. 42, pp. 293–301, 1984.

[119] A. P. Schniewind and J. D. Barrett, "Wood as a linear orthotropic viscoelastic material," *Wood Sci. Technol.*, vol. 6, no. 1, pp. 43–57, 1972.

[120] L. D. Armstrong and R. S. T. Kingston, "Effect of moisture changes on creep in Wood," *Nature*, vol. 185, pp. 862–863, 1960.

[121] P. Hoffmeyer and R. W. Davidson, "Mechano-sorptive creep mechanism of wood in compression and bending," *Wood Sci. Technol.*, vol. 23, no. 3, pp. 215–227, 1989.

[122] T. Toratti, "MODELLING THE CREEP OF TIMBER BEAMS," vol. 2, no. 1, pp. 12–35, 1992.

[123] A. Ranta-Maunus, "Effects of climate and climate variations on strength," *Timber Eng.*, no. March, pp. 1–16, 2001.

[124] C. Gowda, M. Kortesmaa, and A. Ranta-maunus, "Long term creep tests on timber beams in heated and non-heated environments," VTT Technical Research Centre of Finland, 1996.

[125] S. Florisson, L. Muszynski, and J. Vessby, "Analysis of hygro-mechanical behavior of wood in bending.," *Wood Fiber Sci.*, vol. 53, pp. 27–47, 2021.

[126] A. Hanhijärvi, "Advances in the knowledge of the influence of moisture changes on the long-term mechanical performance of timber structures," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 33, no. 1, pp. 43–49, 2000.

[127] J. Park, Y. Song, and S. Hong, "Bending creep of glulam and bolted glulam under changing relative humidity," *J. Korean Wood Sci. Technol.*, vol. 48, no. 5, pp. 676–684, 2020.

[128] D. G. Hunt, "Creep trajectories for beech during moisture changes under load," *J. Mater. Sci.*, vol. 19, no. 5, pp. 1456–1467, 1984.

[129] S. M. Holzer, J. R. Loferski, and D. A. Dillard, "A review of creep in wood: concepts relevant to develop long-term behavior predictions for wood structures," *Wood Fiber Sci.*, vol. 21, no. 4, pp. 376–392, 1989.

[130] R. W. Davidson, "The influence of temperature on creep in wood," *For. Prod. J.*, vol. 12, pp. 377–381, 1962.

[131] J. H. Jouve and C. Sales, “Influence de traitements physico-chimiques sur le fluage du materiau bois,” *Semin. G.S. Rheol. du Bois*, 1986.

[132] P. Gressel, “Zur Vorhersage des langfristigen Form inderungsverhaltens aus Kurz-Kriechversuchen,” vol. 42, pp. 293–301, 1984.

[133] E. Schaffer, “Modeling the creep of wood in a changing moisture environment.,” *Wood Fiber Sci.*, vol. 3, pp. 232–235, 1972.

[134] L. Bach, “Nonlinear Mechanical Behavior of Wood in Longitudinal Tension.,” *For. Prod. J.*, vol. 18, no. 3, pp. 60–66, 1968.

[135] Z. P. Bazant and S. Baweja, “Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures: Model 83,” *Am. Concr. Institute, ACI Spec. Publ.*, vol. SP-194, pp. 1–83, 2000.

[136] F. M. Massaro and K. A. Malo, “Long-term behaviour of Norway spruce glulam loaded perpendicular to grain,” *Eur. J. Wood Wood Prod.*, vol. 77, no. 5, pp. 821–832, 2019.

[137] L. Boltzmann, “Zur Theorieder elastichen Nachwirkung,” *Ann. Phys.*, vol. 241, pp. 430–432, 1878.

[138] J. Mukudai and S. Yata, “Further modeling and simulation of viscoelastic behavior (bending deflection) of wood under moisture change.,” *Wood. Sci. Technol.*, vol. 21, pp. 49–63, 1987.

[139] H. Randriambololona, “Modélisation du comportement différe du bois en environnement variable,” *Université de Limoges, Thèse doctorale*. p. 143, 2003.

[140] R. J. Hoyle, M. C. Griffith, and R. Y. Itani, “Primary creep in Douglas-fir beams of commercial size and quality.,” *Wood Fiber Sci.*, vol. 17, pp. 300–314, 1985.

[141] A. Foudjet and C. Bremond, “Creep of four tropical hardwoods from Cameroon,” *Wood Sci. Technol.*, vol. 23, no. 4, pp. 335–341, 1989.

[142] V. Moosavi, H. K. Eslam, B. Bazyar, A. Najafi, and M. Talaeepoor, “Puzanje drva graba pri savijanju,” *Drv. Ind.*, vol. 67, no. 4, pp. 341–350, 2016.

[143] R. E. Pentoney and R. W. Davidson, “Rheology and the study of wood.,” *For. Prod. J.*, vol. 12, pp. 243–248, 1962.

[144] A. P. Schniewind, “Recent progress in the study of the rheology of wood.,” *Wood Sci. Technol.*, vol. 2, pp. 188–206, 1968.

[145] A. Mårtensson, “Mechanical Behaviour of Wood Exposed to Humidity Variations.,” 1992.

[146] A. Hanhijärvi, “Modelling of creep deformation mechanisms in wood.,” 1995.

[147] T. Toratti, “Creep of timber beams in a variable environment.,” University of Technology, Helsinki., 1992.

[148] F. Dubois and H. Randriambololona, "Creep in wood under variable climate conditions: numerical modeling and experimental validation.," *Mech. Time-Dependent Mater.*, vol. 9(2), pp. 173– 202, 2005.

[149] H. L. Frandsen, L. Damkilde, and S. Svensson, "A revised multi-fickian moisture transport model to describe non-fickian effects in wood.," *Holzforschung*, vol. 61(5), pp. 563–572, 2007.

[150] E. Vidal-Sallé and P. Chassagne, "Constitutive equations for orthotropic non-linear viscoelastic behaviour using a generalized maxwell model application to wood material.," *Mech. Time- Depend. Mater.*, vol. 11(2), pp. 127–142.

[151] S. Fortino, F. Mirianon, and T. Toratti, "A 3d moisture-stress fem analysis for time dependent problems in timber structures.," *Mech. Time- Depend. Mater.*, vol. 13(4), pp. 333–356, 2009.

[152] J. Lopatič, D. Saje, and F. Saje, "Creep of timber structures," *Int. J. Eng. Model.*, vol. 18, no. 1–2, pp. 1–10, 2005.

[153] J. Lovrić, I. Boko, I. U. Glavinić, N. Torić, and M. Abramović, "The Time-Dependent Behavior of Glulam Beams from European Hornbeam," *Buildings*, vol. 13, 1864, 2023.

[154] R. Brandner and G. Schickhofer, "Glued laminated timber in bending: New aspects concerning modelling," *Wood Sci. Technol.*, vol. 42, no. 5, pp. 401–425, 2008.

[155] A. Ranta-Maunus and M. Kortesmaa, "Creep of Timber during Eight Years in Natural Environments," in *WCTE2000 World Conference on Timber Engineering*, 2000, no. 90x270x9400 mm, p. 6.

[156] C. L. Hwang and K. Yoon, *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Springer-Verlag, New York, 1981.

[157] T. L. SAATY and K. P. KEARNS, *The Analytic Hierarchy Process*, no. July. 1985.

[158] T. L. Saaty, "Decision making with the Analytic Hierarchy Process," *Sci. Iran.*, vol. 9, no. 3, pp. 215–229, 2002.

[159] J. Lovrić Vranković, I. Boko, I. Uzelac Glavinić, N. Torić, and M. Abramović, "Suitability of selected hardwood species for the production of glued laminated timber.," *Mater. Sci. Eng. Technol. (materialwiss. und Werkstofftechnik)*, vol. 5, pp. 635–640, 2024.

# 8. POPIS ILUSTRACIJA

## 8.1. Popis fotografija

Fotografija 1.1 Značajni projekti drvenih zgrada: a) Ascent u SAD-u [6], b) Mjøstårnet u Norveškoj [7], c) HoHo u Austriji [8] ..... 2

Fotografija 1.2 a) Notre Dame u Parizu [11], b) opatija Westminster [12], c) zgrada Tamedia u Zurich-u, konstrukcija od LVL od bukve [13]; d) Lord's Cricket Ground u Londonu, konstrukcija od hrasta [14] ..... 3

Fotografija 1.3 Crkva St. Josef Parish Church, Holzkirchen; a) elementi bukve b) 3D prikaz čvora - šperploča od bukve [15] ..... 4

Fotografija 1.4 a) dvorana u Bad Reichenhallu u Njemačkoj prije otkazivanja, b) nakon otkazivanja [37] ..... 8

Fotografija 1.5 a) Dvorana Siemens Arena Ballerup nakon urušavanja krovne konstrukcije [38], b) spoj donjeg i gornjeg pojasa nakon otkazivanja [39] ..... 8

Fotografija 1.6 International House Sydney a) unutrašnjost zgrade [43], b) kompozitna greda izrađena od lameliranog drva četinjača i LVL-a od bukve [15] ..... 10

Fotografija 1.7 Distribucija šuma a) graba (*Carpinus betulus* L.), b) hrasta cera (*Quercus Cerris* L.) i c) javora (*Acer campestre* L.) u Europi [66] ..... 16

Fotografija 2.1 Ekstenzometar za mjerenje deformacija segmenata lamela [] ..... 27

Fotografija 2.2 a) linija loma je okomita na uzdužnu os lamele; b) linija loma prati nagib vlakanaca [17] ..... 27

Fotografija 2.3 Beskontaktno generiranje polja vlakanaca uz pripadajući smjer vlakanaca [17] . 28

Fotografija 2.4 Horizontalni vlačni stroj GEZU 850, ZUM WALD, TU Graz ..... 33

Fotografija *2.5* Načini otkazivanja: a) vlačni lom u u području kvrgi, b) vlačni lom sa značajnim cijepanjem okomito na vlakanca, c) kombinirani vlačni i posmični lom zbog globalnog otklona vlakanaca, d) posmični lom uslijed globalnog otklona vlakanaca, e) posmični lom uslijed lokalnog otklona vlakanaca oko kvrgi, f) kombinirani vlačni lom i otkazivanje uslijed lokalnog otklona vlakanaca, g) lom u području crvenog srca ..... 40

Fotografija 3.1 Stroj za površinsku obradu lamela ..... 54

Fotografija 3.2 Jednostrani nanos ljepila na lamele ..... 54

Fotografija 3.3 Primjena pritiska na lijepljene lamelirane grede ..... 55

Fotografija 3.4 Lijepljene lamelirane grede dimenzija 60x80x1700 $mm^3$ ..... 55

Fotografija 3.5 Univerzalni stroj za provođenje posmičnih testova lijepljenih površina ..... 56

Fotografija 3.6 Primjeri ispitanih segmenata s blanjanim lijepljenim površinama lamela za: a) javor, b) hrast cer, i c) grab, za vrstu ljepila Prefere 4535+5035 ..... 60

Fotografija 3.7 Prikaz testa ispitivanja lijepljene lamelirane grede na savijanje u 4 točke s označenim cilindarima za nanošenje opterećenja i LVDT-ovima za mjerenje deformacija ..... 62

Fotografija 4.1 Lijepljene lamelirane grede opterećene stalnim opterećenjem ..... 78

## 8.2. Popis tablica

Tablica 1.1 Vrijednosti odabranih karakteristika za smreku, bukvu i grab [61] ..... 14

Tablica 1.2 Prikaz dostupnih razreda čvrstoće na osnovu testova na savijanje za četinjače i listače te na osnovu testova na vlak za četinjače [68] ..... 17

Tablica 1.3 Klasa lamele, karakteristična čvrstoća zupčastog spoja $fm,j,k$, karakteristična čvrstoća na savijanje LLDa $fm,g,k$ [MPa], srednji modul elastičnosti $E0,g,mean$ [MPa] i karakteristična gustoća $\rho k$ $[kg/m3]$ za klase Gl28h i Gl32h [33] ..... 17

Tablica 2.1 Pregled dosadašnjih istraživanja u području vlačnih testova lamela od listača ..... 25

Tablica 2.2 Statistički parametri za gustoću lamela ..... 31

Tablica 2.3 Statistički parametri za dinamički MOE ..... 33

Tablica 2.4 Statistički parametri za modul elastičnosti $Et,0$ (MPa) ..... 37

Tablica 2.5 Statistički parametri za $ft,0$ (MPa) ..... 38

Tablica 2.6 Parametri regresijskih jednadžbi za predviđanje vlačne čvrstoće (*Y*) ..... 42

Tablica *2.7* Parametri regresijskih jednadžbi za predviđanje MOE (*Y*) ..... 44

Tablica *2.8* Svrstavanje lamela ovisno o vrijednosti DAB i dinamičkog MOE s definiranom vrijednosti 5. percentila vlačne čvrstoće na desnoj strani tablice ..... 46

Tablica *3.1* Tehničke specifikacije za ljepilo Prefere 4535 i učvršćivač Prefere 5035 ..... 56

Tablica 3.2 Relativna posmična čvrstoća i postotak otkazivanja po drvu (P - blanjanje, BR80 - fino brušenje, BR60 – grubo brušenje) ..... 58

Tablica *3.3* Rezultati čvrstoće na savijanje, lokalnog i globalnog modula elastičnosti za lijepljene lamelirane grede čije su lamele lijepljene ljepilom Prefere 4535+5035 ovisno o vrsti obrade (P - blanjanje, BR80 – fino brušenje, BR60 – grubo brušenje, $SDfm,g$- standardna devijacija za vrijednosti čvrstoće na savijanje, $SDEm,global$- standardna devijacija za vrijednosti globalnog MOE, $SDEm,local$- standardna devijacija za vrijednosti lokalnog MOE) ..... 64

Tablica *3.4* Rezultati analize ANOVA za čvrstoću na savijanje hrasta cera. ..... 69

Tablica *3.5* Rezultati Duncan-ovog testa višestrukih raspona za čvrstoću na savijanje hrasta cera ovisno o vrsti obrade. ..... 69

Tablica *4.1* Vrijednosti $kdef$ za cjelovito i lijepljeno lamelirano drvo [72] ..... 72

Tablica 4.2 Prikaz vrijednosti parametara *A* i *B*, i koeficijenta ..... 80

Tablica 4.3 Prikaz parametara Kelvin-ovog modela za lijepljene lamelirane grede čije su lamele obrađene brušenjem s granulacijom 60 ..... 89

Tablica 5.1 Vlačne T-klase lamela i pripadajuće klase LLD-a ..... 91

Tablica 5.2 Matrica odluke ..... 98

Tablica 5.3 Prikaz idealne i antiidealne alternative ovisno o kriterijima ..... 98

Tablica 5.4 Transformirana matrica s kriterijima kao bezdimenzionalnim veličinama gdje P označava proces blanjanja lamela, BR80 brušenje lamela s granulacijom 80 i BR60 brušenje lamela s granulacijom 60 ..... 99

Tablica 5.5 Prikaz vrijednosti Euklidske udaljenosti ..... 99

Tablica 5.6 Rangiranje alternativa prema relativnoj bliskosti RC gdje P označava proces blanjanja lamela, BR80 brušenje lamela s granulacijom 80 i BR60 brušenje lamela s granulacijom 60 ... 100

## 8.3. Popis grafikona

Grafikon 1.1 Karakteristična čvrstoća na savijanje lijepljenih lameliranih nosača za pojedine vrste drva, prema [23] ..... 6

Grafikon 1.2 Udio vrsta drva u drvnoj zalihi šumskogospodarskog područja [46] ..... 12

Grafikon 2.1 Prikaz usporedbe vlačnih čvrstoća lamela od različitih vrsta drva [23] ..... 26

Grafikon 2.2 Histogram gustoće lamela graba, ..... 31

Grafikon 2.3 Histogram dinamičkog MOE ..... 32

Grafikon 2.4 Režim opterećenja za uzorak lamele br. 23 ..... 34

Grafikon 2.5 Vrijednosti za modul elastičnosti $Et, 0$ ..... 37

Grafikon 2.6 Vrijednosti za vlačnu čvrstoću $ft, 0$ ..... 38

Grafikon 2.7 a) ovisnost vlačne čvrstoće o parametrima DAB/DEB; b) ovisnost MOE o parametrima DAB/DEB ..... 41

Grafikon 2.8 a) ovisnost vlačne čvrstoće o gustoći; b) ovisnost MOE o gustoći ..... 41

Grafikon 2.9 a) ovisnost vlačne čvrstoće o dinamičkom MOE; b) ovisnost MOE o dinamičkom MOE ..... 42

Grafikon 2.10 Prikaz plohe a) vlačna čvrstoća paralelno s vlakancima vs. $Edyn$ i DAB, b) stršeće vrijednosti (engl. *outliers*) prikazane crvenom bojom, c) dijagram raspršenosti s dinamičkim MOE prikazanim skalom boja na desnoj strani ..... 44

Grafikon 3.1 Odnos srednje vrijednosti posmične čvrstoće i srednje vrijednosti postotka otkazivanja po drvu za lijepljene lamelirane segmente, preuzeto iz [23]. Prijevod engl.: *wood failure percentage* – postotak otkazivanja po drvu, *bond shear strength* – posmična čvrstoća lijepljenog spoja. ..... 52

Grafikon 3.2 Ovisnost sila-vrijeme za lijepljenu lameliranu gredu od graba ..... 64

Grafikon 3.3 Box plot s prikazom rezultata čvrstoće na savijanje za sve tri vrste drva (P - blanjanje, BR60 - brušenje s granulacijom 60, BR80 – brušenje s granulacijom 80). ..... 65

Grafikon 3.4 Prikaz veze lokalnog i globalnog MOE za LLN od javora, hrasta cera i graba s koeficijentom determinacije $R2$ ..... 66

Grafikon 3.5 Sila – progib pri savijanju lijepljenih lameliranih greda izrađenih od a) javora, b) hrasta cera, c) graba, za sve tri površinske obrade ..... 68

Grafikon 4.1 Razvoj deformacije puzanja tijekom vremena ..... 71

Grafikon 4.2 a) prikaz deformacije od puzanja za različite režime opterećenja [132], b) ovisnost deformacije od puzanja o relativnoj vlažnosti (RH) [126]. Prijevod engl. *compression* - tlak, *bending* - savijanje, *tension* - vlak, *shear* - posmik, *time* - vrijeme, *hours* – sati ..... 73

Grafikon 4.3 Prikaz očitanih vrijednosti temperature i relativne vlažnosti u laboratoriju na FGAG-u u razdoblju od 30.01.2023. do 31.01.2025. ..... 79

Grafikon 4.4 Eksperimentalno dobivena krivulja progib-vrijeme za 4 lijepljene lamelirane grede čije su površine lamela obrađene brušenjem s granulacijom 80 (BR80) ..... 80

Grafikon 4.5 Eksperimentalno dobivena krivulja progib-vrijeme za 4 lijepljene lamelirane grede čije su površine lamela obrađene blanjanjem (P) ..... 82

Grafikon 4.6 Eksperimentalno dobivena krivulja progib-vrijeme za 4 lijepljene lamelirane grede čije su površine lamela obrađene brušenjem s granulacijom 60 (BR60) ..... 82

Grafikon 4.7 Usporedba eksperimentalno dobivenih podataka s generaliziranim Kelvin-ovim modelom i osnovnim reološkim modelom za lijepljenu lameliranu gredu br.1 čije su površine lamela obrađene blanjanjem (P) pri opterećenju $0.2Fmax$ ..... 85

Grafikon 4.8 Usporedba eksperimentalno dobivenih podataka s generaliziranim Kelvin-ovim modelom i osnovnim reološkim modelom za lijepljenu lameliranu gredu br.2 čije su površine lamela obrađene blanjanjem (P) pri opterećenju $0.2Fmax$ ..... 85

Grafikon 4.9 Usporedba eksperimentalno dobivenih podataka s generaliziranim Kelvin-ovim modelom i osnovnim reološkim modelom za lijepljenu lameliranu gredu br.3 čije su površine lamela obrađene blanjanjem (P) pri opterećenju $0.3Fmax$ ..... 86

Grafikon 4.10 Usporedba eksperimentalno dobivenih podataka s generaliziranim Kelvin-ovim modelom i osnovnim reološkim modelom za lijepljenu lameliranu gredu br.4 čije su površine lamela obrađene blanjanjem (P) pri opterećenju $0.3Fmax$ ..... 86

Grafikon 4.11 Usporedba eksperimentalno dobivenih podataka s generaliziranim Kelvin-ovim modelom i osnovnim reološkim modelom za lijepljenu lameliranu gredu br.1 čije su površine lamela obrađene brušenjem s granulacijom 60 (BR60) pri opterećenju $0.2Fmax$ ..... 87

Grafikon 4.12 Usporedba eksperimentalno dobivenih podataka s generaliziranim Kelvin-ovim modelom i osnovnim reološkim modelom za lijepljenu lameliranu gredu br.2 čije su površine lamela obrađene brušenjem s granulacijom 60 (BR60) pri opterećenju $0.2Fmax$ ..... 87

Grafikon 4.13 Usporedba eksperimentalno dobivenih podataka s generaliziranim Kelvin-ovim modelom i osnovnim reološkim modelom za lijepljenu lameliranu gredu br.3 čije su površine lamela obrađene brušenjem s granulacijom 60 (BR60) pri opterećenju $0.3Fmax$ ..... 88

Grafikon 4.14 Usporedba eksperimentalno dobivenih podataka s generaliziranim Kelvin-ovim modelom i osnovnim reološkim modelom za lijepljenu lameliranu gredu br.4 čije su površine lamela obrađene brušenjem s granulacijom 60 (BR60) pri opterećenju $0.3Fmax$ ..... 88

Grafikon 5.1 Vlačne čvrstoće lamela za pripadajuće vlačne klase [23] ..... 91

Grafikon 5.2 Prikaz čvrstoća na savijanje lijepljenih lameliranih nosača na savijanje [23] ..... 92

Grafikon 5.3 Ovisnost čvrstoće na savijanje (MPa) o visini grede (mm) prema [17] ..... 93

## 8.4. Popis crteža

Crtež 1.1 Usporedba dimenzija poprečnih presjeka lijepljenog lameliranog nosača od smreke i LVL-a od bukve s navedenim dimenzijama poprečnog presjeka [15] ..... 11

Crtež 2.1 Pregled faza istraživanja svojstava lamela graba ..... 29

Crtež 2.2 Shematski prikaz određivanja širina kvrgi kod izračuna vrijednosti DAB i DEB prema DIN 4074-5, pri čemu $a1 - a9$ predstavljaju izmjerene širine kvrgi na pojedinoj strani lamele [19] ..... 30

Crtež 2.3 Prikaz vlačnog testa u horizontalnom vlačnom stroju (ekstenzometri D1-D4) ..... 34

Crtež 3.1 Skica uzoraka za provođenje testova u svrhu osiguranja kvalitete lijepljenog spoja, preuzeto iz [34]; prijevod engl.: *density* – gustoća, *bond shear* – lijepljeni lamelirani uzorak za testiranje linije lijepljenog spoja, *wood shear* - lijepljeni lamelirani uzorak za testiranje posmične čvrstoće drva, *bond delamination* - lijepljeni lamelirani uzorak za testiranje delaminacije, *lamination numbers* – broj lamela, *bond line number* – broj linije lijepljenog spoja ..... 51

Crtež 3.2 Posmični testovi: a) po lijepljenoj površini, b) po drvu ..... 57

Crtež 3.3 Prikaz testa na savijanje u 4 točke. ..... 61

Crtež 4.1 Prikaz testa puzanja lijepljene lamelirane grede izložene konstantnom opterećenju s dimenzijama u *cm* ..... 78

Crtež 4.2 Generalizirani Kelvin-ov model [117] ..... 82