

UNIVERZITET U BEOGRADU

ŠUMARSKI FAKULTET

Marko N. Veizović

**TERMO-HIDRO-MEHANIČKI TRETMAN
DRVETA TOPOLE - UTICAJ PROCESNIH
PARAMETARA NA SVOJSTVA DRVETA**

doktorska disertacija

Beograd, 2026

UNIVERSITY OF BELGRADE

FACULTY OF FORESTRY

Marko N. Veizović

**THERMO-HYDRO-MECHANICAL TREATMENT
OF POPLAR WOOD - EFFECT OF PROCESS
PARAMETERS ON WOOD PROPERTIES**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2026

TERMO-HIDRO-MEHANIČKI TRETMAN DRVETA TOPOLE -
UTICAJ PROCESNIH PARAMETARA NA SVOJSTVA DRVETA

Marko Veizović mast. inž.

MENTORI:

dr Nebojša Todorović, red. prof.
Univerzitet u Beogradu - Šumarski fakultet

dr Goran Milić, red. prof.
Univerzitet u Beogradu - Šumarski fakultet

ČLANOVI KOMISIJE:

dr Vladislav Zdravković, vanr. prof.
Univerzitet u Beogradu - Šumarski fakultet

dr Andreja Kutnar, red. prof.
Univerzitet Primorska – Fakultet za matematiku, prirodne nauke i informacione
tehnologije (FAMNIT)

dr Aleš Straže, vanr. prof.
Univerzitet u Ljubljani, Biotehnički fakultet

Datum odbrane doktorske disertacije:

Želim da izrazim iskrenu zahvalnost svima koji su na bilo koji način doprineli realizaciji ovog istraživanja i izradi doktorske disertacije.

Posebnu zahvalnost dugujem mentorima i članovima komisije na korisnim savetima, sugestijama, stručnoj pomoći i podršci tokom planiranja, realizacije i pisanja rada.

Zahvaljujem se kompanijama „MicroTri“ i „Strugara Uroš“ na obezbeđivanju sirovine i pomoći pri njenoj primarnoj obradi.

Veliku zahvalnost dugujem svim kolegama sa Katedre primarne prerade drveta Šumarskog fakulteta Univerziteta u Beogradu na podršci, pomoći i kolegijalnosti tokom izrade disertacije.

Posebno se zahvaljujem kolegama Goranu Cvjetićaninu i Marku Stojičiću na nesebičnoj pomoći tokom izvođenja eksperimentalnog dela rada.

Zahvaljujem se kolegama sa Univerziteta u Ljubljani, Biotehničkog fakulteta i instituta InnoRenew CoE iz Izole na ustupanju opreme za ispitivanje, stručnoj pomoći i podršci tokom realizacije istraživanja.

Najveću zahvalnost dugujem svojoj porodici na neizmernoj pomoći, razumevanju i podršci tokom svih godina rada i školovanja.

Posebnu zahvalnost dugujem svojoj supruzi na strpljenju i bezrezervnoj podršci tokom izrade ove disertacije.

Hrabrim studentima koji su probudili nadu.

Naslov: TERMO-HIDRO-MEHANIČKI TRETMAN DRVETA TOPOLE - UTICAJ
PROCESNIH PARAMETARA NA SVOJSTVA DRVETA

Izvod: Termo-hidro-mehanička (THM) densifikacija predstavlja efikasan postupak modifikacije drveta kojim se unapređuju njegova fizička i mehanička svojstva, posebno kod vrsta niske početne gustine. Proces se zasniva na kombinovanom delovanju temperature, vlage i mehaničkog pritiska, pri čemu dolazi do plastifikacije lignina i deformacije ćelijskog zida. Iako su efekti ovog procesa dobro dokumentovani, njegova šira primena još uvek je ograničena, pre svega zbog nedovoljnog razumevanja mehanizama deformacije i stabilizacije strukture drveta tokom i nakon obrade. U tom kontekstu, kao ključni problemi izdvajaju se elastična i viskoelastična relaksacija, deformacije koje dovode do delimičnog povratka dimenzija materijala nakon densifikacije. Cilj ovog istraživanja bio je da se ispita uticaj ultrazvučnog predtretmana (US), u kombinaciji sa termo-hidro-mehaničkom densifikacijom i termičkim posttretmanom (TM), na fizička i mehanička svojstva drveta topole, sa posebnim fokusom na dimenzionu stabilnost densifikovanog materijala. Eksperimentalni program obuhvatio je referentne uzorke i uzorke podvrgnute US, TM i kombinovanom US+TM tretmanu, pri nominalnim stepenima upresovanja od 50%, 60% i 65%. Ispitivani su parametri elastične i viskoelastične relaksacije, statička mehanička svojstva pri savijanju (savojnu čvrstoću i modul elastičnosti), dinamički modul elastičnosti, promena gustine, kao i ravnotežna vlažnost materijala. Rezultati su pokazali da povećanje stepena upresovanja dovodi do značajnog porasta gustine, pri čemu je zabeleženo povećanje u opsegu od približno 1,5 do 2,1 puta u odnosu na referentne uzorke. U skladu sa tim, vrednosti čvrstoće na savijanje (MOR) i modula elastičnosti (MOE) povećane su u rasponu od oko 40 do 100% za MOR i 30 do 130% za MOE, u zavisnosti od stepena upresovanja i primenjenog tretmana. Uticaj

stepena upresovanja na povrat deformacije nije bio jednoznačan i zavisio je od primenjenih tretmana i uslova ispitivanja. Termički posttretman se pokazao kao ključan faktor za stabilizaciju deformisanog stanja, pri čemu je viskoelastična relaksacija (*set-recovery*) smanjena za približno 30 do 80%, naročito pri povišenim relativnim vlažnostima. Ultrazvučni predtretman imao je izraženiji pozitivan efekat pri umerenom stepenu upresovanja ($CR \approx 50\%$), gde je doprinio dodatnom povećanju mehaničkih svojstava i smanjenju povrata deformacije, dok se pri višim stepenima upresovanja njegov uticaj smanjuje usled već dominantnog efekta same densifikacije. Dobijeni rezultati ukazuju da kombinacija ultrazvučnog predtretmana i THM densifikacije predstavlja perspektivan pristup za unapređenje svojstava drveta topole, pri čemu se optimalni efekti postižu pri umerenim stepenima upresovanja, uz odgovarajuću kombinaciju procesnih parametara.

Ključne reči: termo-hidro-mehanička (THM) densifikacija drveta, ultrazvučni tretman, termička modifikacija, elastična i viskoelastična relaksacija, mehanička svojstva

Title: THERMO-HYDRO-MECHANICAL TREATMENT OF POPLAR WOOD - EFFECT OF PROCESS PARAMETERS ON WOOD PROPERTIES

Abstract: Thermo-hydro-mechanical (THM) densification is an effective wood modification process that enhances the physical and mechanical properties of low-density wood. It relies on the combined action of temperature, moisture, and mechanical pressure, which enables lignin softening and deformation of the cell wall. Despite its well-documented benefits, the wider application of this process remains limited, mainly due to an incomplete understanding of the mechanisms governing deformation and its stabilization during and after treatment. A major challenge in this context is the partial recovery of deformation, caused by spring-back and set-recovery effects. The aim of this study was to evaluate the effect of ultrasonic pretreatment (US), in combination with THM densification and thermal post-treatment (TM), on the physical and mechanical properties of poplar wood, with particular emphasis on dimensional fixation. The experimental program included reference samples and samples subjected to US, TM, and combined US+TM treatments, at nominal compression ratios of 50%, 60%, and 65%. The investigated properties included spring-back and set-recovery, static bending properties (modulus of rupture – MOR and modulus of elasticity – MOE), dynamic modulus of elasticity, density changes, and equilibrium moisture content. The results showed that increasing the compression ratio significantly increased density, reaching approximately 1.5 to 2.1 times that of the reference samples. Correspondingly, MOR and MOE increased by about 40–100% and 30–130%, respectively, depending on the compression ratio and treatment. However, the effect of compression ratio on deformation recovery was not consistent and depended on the treatment combination and testing conditions. Thermal post-treatment proved to be the most effective in stabilizing the deformed structure,

reducing set-recovery by approximately 30–80%, particularly at higher relative humidity levels. Ultrasonic pretreatment showed a more pronounced positive effect at moderate compression ratios ($CR \approx 50\%$), where it contributed to improved mechanical performance and reduced set-recovery, while its influence diminished at higher compression levels. The findings indicate that the combination of ultrasonic pretreatment and THM densification is a promising approach for improving the performance of poplar wood, with optimal results achieved at moderate compression ratios and appropriate combinations of process parameters.

Keywords: thermo-hydro-mechanical (THM) densification, ultrasonic pretreatment, thermal modification, spring-back, set-recovery, mechanical properties (MOR, MOE)

KLJUČNA DOKUMENTACIONA INFORMACIJA

Redni broj (RB):
Identifikacioni broj (IB):
Tip dokumenta (TD): Monografska publikacija
Tip zapisa (TZ): Tekstualni štampani dokument
Vrsta rada (VR): Doktorska disertacija
Autor (AU): Marko Veizović
Mentor (MN): dr Nebojša Todorović, red. prof.
Univerzitet u Beogradu, Šumarski fakultet
dr Goran Milić, red. prof.
Univerzitet u Beogradu, Šumarski fakultet

Naslov rada (NR): Termo-hidro-mehanički tretman drveta topole - uticaj procesnih parametara na svojstva drveta

Jezik Publikacije: Srpski (latinica)
Jezik izvoda: Srpski/engleski
Zemlja publikovanja: Republika Srbija
Godina izdavanja: 2026.
Izdavač: Autorski reprint
Mesto i adresa: 11030 Beograd, Kneza Višeslava 1

Fizički opis rada (br. pogl./str./lit. navoda/tab./sl.)
Naučna oblast: Biotehničke nauke
Uža naučna oblast: Primarna prerada drveta
Predmetna odrednica / ključne reči: termo-hidro-mehanička (THM) densifikacija drveta, ultrazvučni tretman, termička modifikacija, elastična i viskoelastična relaksacija, mehanička svojstva

UDK:
Čuva se: Biblioteka Šumarskog fakulteta, Kneza Višeslava 1, 11030 Beograd, Srbija

Važna napomena: Nema

Datum prihvatanja teme:
Datum odbrane disertacije:
Članovi komisije: dr Nebojša Todorović, red. prof., Univerzitet u Beogradu - Šumarski fakultet
dr Goran Milić, red. prof., Univerzitet u Beogradu - Šumarski fakultet
dr Vladislav Zdravković, vanr. prof., Univerzitet u Beogradu - Šumarski fakultet
dr Andreja Kutnar, red. prof., Univerzitet Primorska – Fakultet za matematiku, prirodne nauke i informacione tehnologije (FAMNIT)
dr Aleš Straže, vanr. prof., Univerzitet u Ljubljani, Biotehnički fakultet

KEY WORD DOCUMENTATION

Accession number (ANO):
Identification number (INO):
Document type (DT): Monograph documentation
Type of record (TR): Text printed document
Contens code (CC): Doctoral dissertation
Author (AU): Marko Veizović
Mentor (MN): PhD Nebojša Todorović, full professor,
University of Belgrade, Faculty of Forestry
PhD Goran Milić, full professor,
University of Belgrade, Faculty of Forestry
Title (TI): Thermo-hydro-mechanical treatment of poplar wood -
effect of process parameters on wood properties
Language of text (LT): Serbian (Latin)
Language of abstract (LA): Serbian/english
Country of publication (CP): Republic of Serbia
Publication year (PY): 2026
Publisher (PU): Author's reprint
Publication place (PP): 11030 Belgrade, Kneza Višeslava 1
Physical description (PD):
Scientific field (SF): Biotechnical Sciences
Scientific discipline (SD): Primary wood processing
Subject / Key words (SKW): thermo-hydro-mechanical (THM) densification,
ultrasonic pretreatment, thermal modification, spring-
back, set-recovery, mechanical properties (MOR, MOE)
UC:
Holding data (HD): Library of Faculty of Forestry, Kneza Višeslava 1,
11030 Belgrade
Note (N): None
Accepted by Scientific Board on (ACB):
Defended on (DE):
Thesis Defend Board (DB):
Dr Nebojša Todorović, Full Professor,
University of Belgrade – Faculty of Forestry
Dr Goran Milić, Full Professor, University of
Belgrade – Faculty of Forestry
Dr Vladislav Zdravković, Associate Professor,
University of Belgrade – Faculty of Forestry
Dr Andreja Kutnar, Full Professor, University of
Primorska – Faculty of Mathematics, Natural Sciences
and Information Technologies (FAMNIT)
Dr Aleš Straže, Associate Professor, University
of Ljubljana – Biotechnical Faculty

Spisak korišćenih skraćenica i simbola:

ASS	- apsolutno suvo stanje;
CR	- stepen upresovanja (<i>Compression Ratio</i>);
CRr	- realizovani stepen upresovanja;
Ed	- dinamički modul elastičnosti;
Ed,F	- savojni dinamički modul elastičnosti;
Ed,L	- longitudinalni dinamički modul elastičnosti;
EMM	- procenjene marginalne sredine (<i>Estimated Marginal Means</i>);
FTIR	- infracrvena spektroskopija sa Furijeovom transformacijom (<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i>);
H1-4	- istraživačke hipoteze;
LMM	- linearni mešoviti model (<i>Linear Mixed Model</i>);
MC	- vlažnost drveta (<i>Moisture Content</i>);
MOE	- modul elastičnosti (<i>Modulus of Elasticity</i>);
MOR	- čvrstoća na savijanje (<i>Modulus of Rupture</i>);
QQ-plot	- kvantil-kvantil dijagram za proveru normalnosti reziduala;
Ref.	- referentni uzorci / referentna grupa;
RH	- relativna vlažnost vazduha (<i>Relative Humidity</i>);
SB	- elastična relaksacija (<i>spring-back</i>);
SEM	- skenirajuća elektronska mikroskopija;
SR	- viskoelastična relaksacija (<i>set-recovery</i>);
Tanδ	- prigušenje (<i>dumping</i>);
Tg	- temperatura staklastog prelaza (<i>Glass transition temperature</i>);
THM	- termo-hidro-mehanička densifikacija;
TM	- termički posttretman / termička modifikacija;
US	- ultrazvučni predtretman;
US+TM	- kombinacija ultrazvučnog predtretmana i termičkog posttretmana;
VTC	- viskoelastična termalna kompresija (<i>Viscoelastic Thermal Compression</i>);
VTT	- <i>Technical Research Centre of Finland</i>
ΔSR	- dodatni <i>set-recovery</i> , odnosno razlika između SR u dva uzastopna ciklusa;
ρ	- gustina;
ρ_0	- gustina u apsolutno suvom stanju;
ρ_u	- gustina pri uslovima ispitivanja;
$\Delta\rho$	- relativni porast / promena gustine;

TABELA 1. EKSPERIMENTALNI PLAN I RASPODELA UZORAKA PO STEPENU UPRESOVANJA (CR), PRIMENI ULTRAZVUČNOG PREDTRETMANA (US) I TERMIČKOG POSTTRETMANA (TM), SA ODGOVARAJUĆIM OZNAKAMA TRETMANA I BROJEM ISPITIVANIH UZORAKA (N).....	31
TABELA 2. VREMENSKI RASPORED MERENJA MASE I DEBLJINE UZORAKA TOKOM POTAPANJA, PO CIKLUSIMA...	42
TABELA 3. ZASIĆENI RASTVORI SOLI KORIŠĆENI ZA OSTVARIVANJE KONTROLISANIH VREDNOSTI RELATIVNE VLAŽNOSTI.....	43
TABELA 4. VREMENSKI RASPORED MERENJA MASE I DEBLJINE UZORAKA TOKOM IZLAGANJA KONTROLISANIM USLOVIMA RELATIVNE VLAŽNOSTI, PO CIKLUSIMA.....	43
TABELA 5. IZABRANO RASTOJANJE OSOLONACA I BRZINA OPTEREĆIVANJA PRI ISPITIVANJU ČVRSTOĆE I MODULA ELASTIČNOSTI PRI SAVIJANJU, PREMA DEBLJINI UZORAKA NAKON PROCESA THM DENSIFIKACIJE	48
TABELA 6. OSTVARENI STEPEN UPRESOVANJA (CR _R) I ELASTIČNA RELAKSACIJA (SB) ZA RAZLIČITE STEPENE UPRESOVANJA I TRETMANE.....	54
TABELA 7. VLAŽNOST I GUSTINA DRVETA NAKON KONDICIONIRANJA U ZAVISNOSTI OD STEPENA KOMPRESIJE (CR) I TRETMANA (REF, US, TM, US+TM)	58
TABELA 8. SAVOJNA ČVRSTOĆA (MOR), VLAŽNOST I GUSTINA UZORAKA U TRENUTKU ISPITIVANJA, ZA SVE GRUPE PO STEPENU UPRESOVANJA (CR) I PRIMENJENIH TRETMANA (REF., US, TM I US+TM)	72
TABELA 9. SAVOJNA ČVRSTOĆA (MOR) UZORAKA, UZ PRIKAZ NJIHOVE VLAŽNOSTI I GUSTINE U TRENUTKU ISPITIVANJA, ZA SVE GRUPE PO STEPENU UPRESOVANJA (CR) I PRIMENJENIH TRETMANA (REF., US, TM I US+TM)	77
TABELA 10. DINAMIČKI MODUL ELASTIČNOSTI, LONGITUDINALNI E _{D,L} I SAVOJNI E _{D,F} STANDARDNA DEVIJACIJA (SD) ZA SVE EKSPERIMENTALNE GRUPE.....	82

SLIKA 1. PROCENTUALNO UČEŠĆE OSNOVNIH GRADIVNIH JEDINJENJA UNUTAR RAZLIČITIH SLOJEVA ČELIJSKOG ZIDA (SL – SREDNJA LAMELA, P – PRIMARNI ZID, S – SEKUNDARNI ZID: S1 – SPOLJAŠNJI SLOJ, S2 – SREDIŠNJI SLOJ, S3 – UNUTRAŠNJI SLOJ) (PREMA FENGEL & WEGENER, 1984).	5
SLIKA 2. TEMPERATURA PLASTIFIKACIJE (T_g - <i>GLASS TRANSITION TEMPERATURE</i>) GRADIVNIH JEDINJENJA ČELIJSKOG ZIDA, U FUNKCIJI VLAŽNOSTI (PREMA SALMÉN, 1982).	6
SLIKA 3. KLASIFIKACIJA METODA MODIFIKACIJE DRVETA PREMA VRSTI PRIMENJENOG PROCESA (PREMA, JONES & SANDBERG, 2020).	9
SLIKA 4. KLASIFIKACIJA PROCESA MEHANIČKE DENSIFIKACIJE DRVETA (PREMA, LUAN ET AL. 2022)	13
SLIKA 5. HEMIJSKE PROMENE OSNOVNIH GRADIVNIH KOMPONENTI DRVETA IZAZVANE TERMIČKIM TRETMANOM, (PREMA, ESTEVES & PEREIRA, 2009)	23
SLIKA 6. SHEMA PRIPREME I IZREZIVANJA UZORAKA	31
SLIKA 7. ULTRAZVUČNI TRETMAN U DESTILOVANOJ VODI: (A) LABORATORIJSKA ULTRAZVUČNA JEDINICA ASONIC PRO300; (B) RASPORED UZORAKA U KORPI PRE POTAPANJA; (C) POLOŽAJ I FIKSIRANJE UZORAKA TOKOM TRETMANA	33
SLIKA 8. LABORATORIJSKA PRESA PERFECT LZT UK 30 L, LANGZAUNER LAMBRECHTEN, AUSTRIJA (INSTITUT INNORENEW COE)	34
SLIKA 9. UZORCI PRE DENSIFIKACIJE (POČETNA DEBLJINA 20 MM) I NAKON UPRESOVANJA U RADIJALNOM PRAVCU NA CILJNE DEBLJINE OD 10 MM, 8 MM I 7 MM, ŠTO ODGOVARA NOMINALNIM STEPENIMA UPRESOVANJA (CR) OD 50%, 60% I 65%.	34
SLIKA 10. REŽIM TERMO-HIDRO-MEHANIČKOG (THM) TRETMANA, BRZINA ZATVARANJA PRESE: 3 MM S ⁻¹	35
SLIKA 11. UZORCI IZ GRUPE TM I US+TM, PRE TERMIČKOG TRETMANA (LEVO) I POSLE TERMIČKOG TRETMANA (DESNO)	36
SLIKA 12. SHEMATSKI PRIKAZ RAZLIČITIH FAZA PROCESA DENSIFIKACIJE I PRATEĆIH POJAVA ELASTIČNE I VISKOELASTIČNE RELAKSACIJE	38
SLIKA 13. UZORCI NAKON THM TRETMANA, GRUPISANI PO CR I PRIMENJENOM TRETMANU	39
SLIKA 14. MERENJE MASE I DIMENZIJA UZORAKA	40

SLIKA 15. UZORCI ZA EKSPERIMENT U VODI (LEVO) I UZORCI IZLOŽENI VAZDUHU RH 60%, ZA EKSPERIMENT PRI RAZLIČITIM RH (DESNO).....	42
SLIKA 16. EKSPERIMENTALNA POSTAVKA ZA ODREĐIVANJE DINAMIČKOG MODULA (E_d) ELASTIČNOSTI KOD LONGITUDINALNOG I SAVOJNOG MODA OSCILOVANJA, METODOM SLOBODNIH REZONANTNIH VIBRACIJA .	45
SLIKA 17. ISPITIVANJE SAVOJNIH SVOJSTAVA DENSIFIKOVANOG DRVETA I KONTROLNIH UZORAKA NA MAŠINAMA ZWICKROELL Z100 (LEVO) I ZWICKROELL Z005 (DESNO)	49
SLIKA 18. SHEMATSKI PRIKAZ EKSPERIMENTALNE POSTAVKE ZA ISPITIVANJE SAVOJNE ČVRSTOĆE (MOR) I MODULA ELASTIČNOSTI (MOE),.....	49
SLIKA 19. OSTVARENI STEPEN UPRESOVANJA (CRR) ZA RAZLIČITE NOMINALNE STEPENE UPRESOVANJA (CR) I TRETMANE.....	54
SLIKA 20. VREDNOSTI ELASTIČNE RELAKSACIJE (SB) NEPOSREDNO NAKON DENSIFIKACIJE ZA RAZLIČITE STEPENE UPRESOVANJA (CR) I TRETMANE.....	55
SLIKA 21. VLAŽNOST DRVETA (MC) NAKON KONDICIONIRANJA U ZAVISNOSTI OD STEPENA UPRESOVANJA (CR) I PRIMENJENOG TRETMANA (REF, US, TM, US+TM).....	57
SLIKA 22. GUSTINA DRVETA PRI USLOVIMA ISPITIVANJA (ρ_u) U ZAVISNOSTI OD STEPENA UPRESOVANJA (CR) I TRETMANA (REF, US, TM, US+TM).....	60
SLIKA 23. GUSTINA DRVETA U APSOLUTNO SUVOM STANJU (ρ_0) U ZAVISNOSTI OD STEPENA UPRESOVANJA (CR) I TRETMANA (REF, US, TM, US+TM).	60
SLIKA 24. VISKOELASTIČNA DEFORMACIJA (SR) NAKON TRI CIKLUSA POTAPANJA U VODI I SUŠENJA DO APSOLUTNO SUVOG STANJA, U ZAVISNOSTI OD CR I PRIMENJENOG TRETMANA.....	63
SLIKA 25. VISKOELASTIČNA DEFORMACIJA (SR) U FUNKCIJI RELATIVNE VLAŽNOSTI (RH = 60, 80 I 98%) ZA DENSIFIKOVANE UZORKE SA RAZLIČITIM STEPENIMA UPRESOVANJA (CR = 50%, 60% I 65%) I KOMBINACIJAMA TRETMANA (REF, US, TM I US+TM).....	66
SLIKA 26. UTICAJ RELATIVNE VLAŽNOSTI (RH), STEPENA UPRESOVANJA (CR) I TRETMANA NA DODATNI SET- RECOVERY ($\Delta SR = SR_2 - SR_1$) DENSIFIKOVANOG DRVETA TOPOLE.....	70
SLIKA 27. SAVOJNA ČVRSTOĆA (MOR), ZA SVE GRUPE PO STEPENU UPRESOVANJA (CR) I PRIMENJENIH TRETMANA (REF., US, TM I US+TM)	73

SLIKA 28. PROCENE MARGINALNIH SREDINA (EMM) ZA MOR PRI SAVIJANJU, ZA SVE GRUPE PO STEPENU UPRESOVANJA (CR) I PRIMENJENIH TRETMANA (REF., US, TM I US+TM).....	74
SLIKA 29. MOR PRI SAVIJANJU, ZA $CR \approx 50\%$ PRI RAZLIČITIM TRETMANIMA (REF., US, TM I US+TM) — SA LINEARNIM REGRESIONIM MODELIMA I ODGOVARAJUĆIM KOEFICIJENTIMA DETERMINACIJE (R^2).....	75
SLIKA 30. MODUL ELASTIČNOSTI PRI SAVIJANJU (MOE), ZA SVE GRUPE PO STEPENU UPRESOVANJA (CR) I PRIMENJENIH TRETMANA (REF., US, TM I US+TM).....	78
SLIKA 31. PROCENE MARGINALNIH SREDINA (EMM) ZA MOE PRI SAVIJANJU, ZA SVE GRUPE PO STEPENU UPRESOVANJA (CR) I PRIMENJENIH TRETMANA (REF., US, TM I US+TM).....	78
SLIKA 32. MOE PRI SAVIJANJU, ZA $CR \approx 50\%$ PRI RAZLIČITIM TRETMANIMA (REF., US, TM I US+TM) — SA LINEARNIM REGRESIONIM MODELIMA I ODGOVARAJUĆIM KOEFICIJENTIMA DETERMINACIJE (R^2).....	80
SLIKA 33. LONGITUDINALNI DINAMIČKI MODUL ELASTIČNOSTI ($E_{d,L}$) U ZAVISNOSTI OD STEPENA UPRESOVANJA (CR) I PRIMENJENOG TRETMANA (REF, US, TM, US+TM).....	81
SLIKA 34. SAVOJNI DINAMIČKI MODUL ELASTIČNOSTI ($E_{d,F}$) U ZAVISNOSTI OD STEPENA UPRESOVANJA (CR) I PRIMENJENOG TRETMANA (REF, US, TM, US+TM).....	84
SLIKA 35. RELACIJA IZMEĐU STATIČKOG MODULA ELASTIČNOSTI (MOE) I DINAMIČKOG MODULA ELASTIČNOSTI (ED) ZA LONGITUDINALNI I SAVOJNI MOD; PRIKAZ REGRESIONIH PRAVIH I KOEFICIJENATA DETERMINACIJE (R^2).....	86
SLIKA 36. PRIGUŠENJE ($TAN\Delta$) U LONGITUDINALNOM MODU OSCILOVANJA U ZAVISNOSTI OD STEPENA UPRESOVANJA (CR) I PRIMENJENOG TRETMANA (REF, US, TM, US+TM).....	87
SLIKA 37. PRIGUŠENJE ($TAN\Delta$) U SAVOJNOM MODU OSCILOVANJA U ZAVISNOSTI OD STEPENA UPRESOVANJA (CR) I PRIMENJENOG TRETMANA (REF, US, TM, US+TM).....	88

Sadržaj

1	UVOD	1
2	PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA.....	4
2.1	Modifikacije drveta	8
2.1.1	Termo-hidro-mehanička (THM) densifikacija	10
2.1.2	Termička modifikacija	21
2.1.3	Ultrazvučna modifikacija	24
3	PREDMET I CILJ RADA.....	26
4	MATERIJAL I METOD RADA.....	29
4.1	Priprema uzoraka.....	29
4.2	Postupak modifikacije drveta	32
4.2.1	Ultrazvučni predtretman.....	32
4.2.2	THM densifikacija	33
4.2.3	Termički posttretman.....	35
4.3	Određivanje svojstava THM densifikovanog drveta.....	36
4.3.1	Stepen upresovanja i elastična relaksacija	36
4.3.2	Vlažnost i gustina drveta.....	38
4.3.3	Viskoelastična relaksacija.....	40
4.3.4	Dinamički modul elastičnosti.....	45
4.3.5	Savojna čvrstoća i modul elastičnosti pri savijanju.....	48
4.4	Statistička obrada podataka	50

5	REZULTATI ISTRAŽIVANJA	53
5.1	Osnovne fizičke karakteristike THM densifikovanog drveta	53
5.1.1	Ostvareni stepen upresovanja (CR_r)	53
5.1.2	Elastična relaksacija (SB).....	55
5.1.3	Vlažnost.....	56
5.1.4	Gustina.....	59
5.2	Viskoelastična relaksacija (SR)	62
5.2.1	Viskoelastična relaksacija nakon potpunog potapanja u vodu.....	62
5.2.2	Viskoelastična relaksacija pri kontrolisanoj RH	65
5.3	Mehanička svojstva THM densifikovanog drveta.....	71
5.3.1	Savojna čvrstoća (MOR).....	71
5.3.2	Modul elastičnosti (MOE).....	76
5.3.3	Dinamički modul elastičnosti (E_d).....	80
6	DISKUSIJA REZULTATA.....	88
6.1	Ostvareni stepen upresovanja i elastična relaksacija.....	88
6.2	Vlažnost i gustina densifikovanog drveta	91
6.3	Viskoelastična relaksacija (SR)	96
6.3.1	Uticao stepena upresovanja.....	97
6.3.2	Uticao termičkog posttretmana	98
6.3.3	Uticao ultrazvučnog predtretmana	100
6.3.4	Promene tokom ciklusa vlaženje-sušenje	101

6.4	Mehanička svojstva densifikovanog drveta.....	102
6.4.1	Svojna čvrstoća i modul elastičnosti pri statičkom ispitivanju	102
6.4.2	Dinamički modul elastičnosti.....	109
7	ZAKLJUČCI.....	112
8	BUDUĆA ISTRAŽIVANJA.....	116
9	LITERATURA.....	118

1 UVOD

U uslovima globalnih klimatskih promena i rastuće potrebe za održivim razvojem, drvo se sve češće prepoznaje kao strateški materijal budućnosti, naročito u građevinskom sektoru. Ovaj sektor se danas smatra jednim od najvećih emitera gasova sa efektom staklene bašte. U poslednjih 30 godina, ugljenični otisak građevinske industrije porastao je sa 20% (1995. god.) na oko 33% (2022. god.) globalne emisije ugljen-dioksida (CO₂), pre svega zbog intenzivnije gradnje i povećane upotrebe čelika i cementa (C. Li et al., 2025). Ovo je uzrokovalo intenzivan razvoj koncepata zasnovanih na primeni obnovljivih materijala, sa smanjenim emisijama CO₂ tokom proizvodnje. U tom kontekstu, drvo se izdvaja kao posebno pogodan materijal, ne samo zbog niskog energetskeg intenziteta proizvodnje, već i zbog mogućnosti kaskadne upotrebe i reciklaže. Jedan od načina za smanjenje emisije CO₂ jeste povećanje udela drvnih proizvoda u ukupnoj potrošnji materijala, kao i produženje njihovog veka trajanja, čime se omogućava duže skladištenje ugljenika u vezanom obliku. Druga mogućnost je zamena energetski intenzivnih materijala drvetom i proizvodima na bazi drveta (Mahapatra & Gustavsson, 2008). Međutim, porast potražnje za drvnom sirovinom istovremeno stvara pritisak na postojeće šumske resurse i nameće potrebu za efikasnijim korišćenjem dostupnog drveta, uz istovremeno proširenje polja primene manje korišćenih i pretežno plantažno gajenih vrsta.

U tom kontekstu, poseban značaj dobijaju brzorastuće vrste drveća, kao što su vrste iz roda topola (*Populus spp.*), vrba (*Salix spp.*), jova (*Alnus spp.*), breza (*Betula spp.*), paulovnja (*Paulownia spp.*), eukaliptusa (*Eucalyptus spp.*), monterejski bor (*Pinus radiata*) i dr. Ove vrste se odlikuju kratkim periodom ophodnje i visokim prinosom drvne

mase, što ih čini pogodnim za plantažno gajenje. Ipak, njihova osnovna mana jeste niska gustina i lošija mehanička svojstva. Ovo za posledicu ima veoma ograničeno polje primene navedenih vrsta, uglavnom na proizvode kratkog veka trajanja ili niske dodate vrednosti. Zbog toga je unapređenje svojstava drveta brzorastućih vrsta jedno od ključnih istraživačkih pitanja savremene nauke o drvetu.

Poboljšanje mehaničkih svojstava drveta može se ostvariti različitim metodama modifikacije, koje se u najširem smislu mogu podeliti na hemijske i fizičke. Hemijske metode podrazumevaju impregnaciju drveta različitim supstancama ili uvođenje dodatnih materijala koji popunjavaju lumene ćelija ili modifikuju strukturu ćelijskog zida, čime se postiže povećanje gustine i poboljšanje mehaničkih svojstava (Wu et al., 2017). Iako ovakvi postupci mogu biti efikasni, oni često uključuju upotrebu potencijalno štetnih hemikalija, zbog čega sa aspekta održivosti sve više gube na značaju. Dodatno, ovako modifikovano drvo često ima ograničene mogućnosti reciklaže, ponovne upotrebe i krajnje upotrebe kao energenta.

Suprotno tome, fizičke metode modifikacije, koje se zasnivaju na kontrolisanoj promeni anatomske strukture drveta bez dodatka hemijskih sredstava, omogućavaju unapređenje mehaničkih svojstava uz zadržavanje karaktera monomaterijala. U okviru ovih metoda, posebno mesto zauzimaju termo-mehanički i termo-hidro-mehanički (THM) tretmani, koji kombinuju delovanje pritiska, temperature i vlage u cilju plastifikacije i deformacije ćelijskog zida. Ovi postupci se zasnivaju na omekšavanju i mehaničkom sabijanju drveta (najčešće u radijalnom pravcu), što dovodi do značajnog povećanja gustine i, posledično, boljih mehaničkih svojstava drveta.

Brojna istraživanja pokazala su da THM densifikacija dovodi do povećanja savojne čvrstoće i modula elastičnosti, naročito kod drveta niske gustine (Laine et al., 2012; L. Li et al., 2013; Pertuzzatti et al., 2018; Rautkari et al., 2011). Zbog toga je ova metoda

pogodna za modifikaciju drveta topole, koja zauzima značajno mesto u šumarstvu. Globalno posmatrano, plantaže topola se prostiru na oko 31,4 miliona hektara (Rosso et al., 2023), dok je u Evropi površina pod zasadima približno 1 milion hektara (Komán et al., 2023). Površina pod zasadima topole u Srbiji iznosi približno 48000 ha, što je oko 2,1% ukupne površine pod šumama u Srbiji (Banković et al., 2009). Danas se topola uglavnom uzgaja plantažno, i to sadnjom različitih klonova poput: I-214, I-45/51, I-488, Robusta. U Srbiji se plantaže prostiru na oko 40000 ha površine (Ivetic & Vilotic, 2014). Na ovaj način se u našoj zemlji proizvede oko 350000 m³ oblog drveta topole (Keca & Keca, 2011) koje se pretežno koristi za proizvodnju ljuštenog furnira, paleta, gajbica i drugih proizvoda za relativno kratkotrajnu namenu. Sa tog stanovišta, topola predstavlja izuzetno pogodnu sirovinu za primenu savremenih metoda modifikacije drveta sa ciljem proširenja njenog polja primene.

Drvo topole (*Populus spp.*) ubraja se u grupu difuzno poroznih, brzorastućih lišćara niske gustine, sa izraženom varijabilnošću svojstava u zavisnosti od vrste, klona, uslova rasta i starosti stabala. Prema podacima iz literature, gustina apsolutno suvog drveta topole najčešće se kreće u rasponu od približno 350 do 450 kg·m⁻³ (Aydin & Aydin, 2023), dok se gustina pri standardnoj vlažnosti (≈12%) nalazi u intervalu od oko 380 do 500 kg·m⁻³ (De Boever et al., 2007). U poređenju sa autohtonim vrstama poput crne topole (*Populus nigra*), hibridne topole u proseku pokazuju ujednačeniju strukturu i nešto višu gustinu, dok osnovni red veličina mehaničkih i fizičkih svojstava ostaje sličan unutar čitavog roda *Populus* (De Boever et al., 2007; Kord et al., 2010).

Drvo topole pokazuje izraženu higroskopnost i – u odnosu na malu gustinu - relativno visoke vrednosti bubrenja i utezanja (Budakçı et al., 2021). Ukupno zapreminsko bubrenje u literaturi se najčešće navodi u opsegu od oko 7 do 13%, dok je tangencijalno bubrenje približno 1,5–2 puta veće od radijalnog (De Boever et al., 2007).

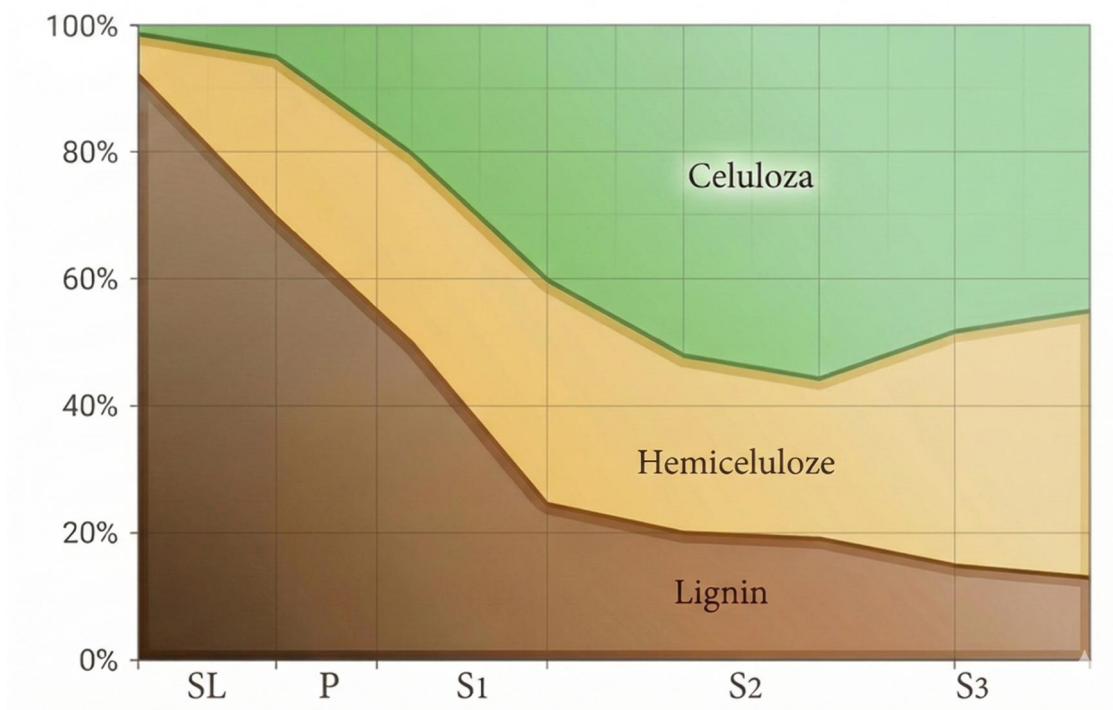
Mehanička svojstva drveta topole direktno su uslovljena niskom gustinom. Savojna čvrstoća (MOR) najčešće se navodi u rasponu od približno 60 do 80 MPa, dok se modul elastičnosti pri savijanju (MOE) kreće između oko 8 i 11 GPa (Huber et al., 2023). Ove vrednosti su značajno niže u poređenju sa drugim često korišćenim lišćarskim vrstama, što ograničava upotrebu topole u situacijama kada je drvo izloženo većim opterećenjima.

2 PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Potencijal drveta za poboljšanje svojstava kroz različite postupke modifikacije proizilazi iz njegove anatomske građe i hemijskog sastava, koji u najvećoj meri određuju reakciju materijala na specifične uslove primenjenog procesa modifikacije.

Za razliku od relativno homogenog drveta četinarara, ksilem lišćara sastoji se od jasno diferenciranih tipova ćelija: provodni sudovi (transport vode i gasova), vlakana (mehanička funkcija), i parenhimatične ćelije (skladištenje i transport hranljivih materija, aeracija). Ovakva građa dovodi do neravnomerne raspodele poroznosti, gustine i mehaničkih svojstava unutar drvnog tkiva, što je od posebnog značaja u procesima densifikacije.

Mehaničko ponašanje drveta lišćara u velikoj meri određeno je građom ćelijskog zida, koji se sastoji od: srednje lamele (SL), primarnog zida (P) i sekundarnog zida podeljenog na slojeve S1, S2 i S3 (Kerr & Bailey, 1934). Srednja lamela i primarni zid bogati su ligninom i pektinskim materijama i imaju ključnu ulogu u prenosu pritisnih naprezanja i koheziji između ćelija (Slika 1). Sekundarni zid, naročito njegov S2 sloj, čini najveći deo debljine ćelijskog zida i dominantno je izgrađen od celuloznih mikrofibrila orijentisanih pod malim uglom u odnosu na osu ćelije, čime se obezbeđuje visoka zatezna čvrstoća i krutost drveta (Fengel & Wegener, 1984).



Slika 1. Procentualno učešće osnovnih gradivnih jedinjenja unutar različitih slojeva ćelijskog zida (SL – srednja lamela, P – primarni zid, S – sekundarni zid: S1 – spoljašnji sloj, S2 – središnji sloj, S3 – unutrašnji sloj) (prema Fengel & Wegener, 1984).

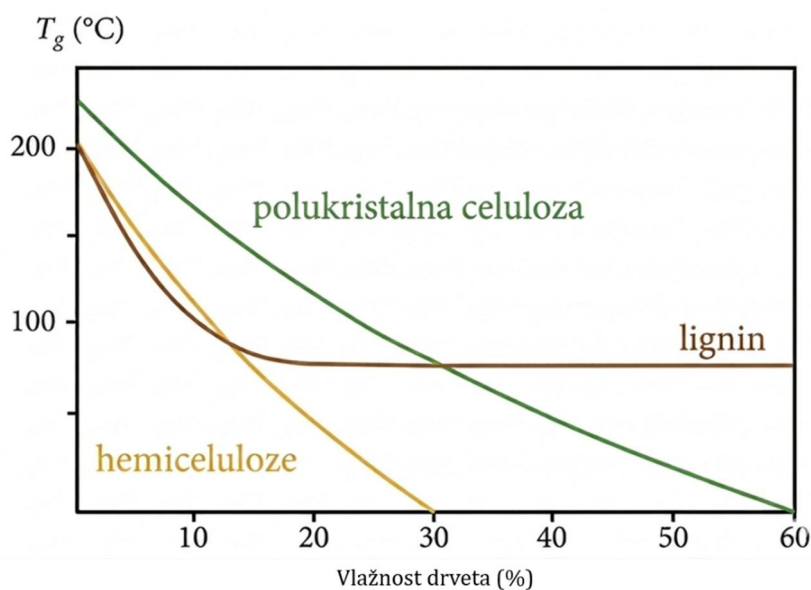
Sa hemijskog aspekta, ćelijski zid drveta lišćara predstavlja biopolimerni kompozit sastavljen pretežno od celuloze ($\approx 40\text{--}50\%$), hemiceluloza ($\approx 20\text{--}30\%$) i lignina ($\approx 18\text{--}30\%$), uz manji udeo pektina i ekstraktivnih materija ($\approx 1\text{--}5\%$) (Rowell, 1984). Celuloza, kao linearni i delimično kristaliničan polimer, formira mikrofibrilarnu armaturu ćelijskog zida i odgovorna je za visoku aksijalnu čvrstoću, ali pokazuje ograničenu sposobnost plastične deformacije. Nasuprot tome, hemiceluloze i lignin su pretežno amorfne komponente, bogate reaktivnim grupama, koje značajno doprinose higroskopnosti i viskoelastičnom ponašanju drveta.

Kod lišćara, hemiceluloze su dominantno predstavljene ksilanima, koji su visoko hidrofilični i termički osetljivi, te imaju važnu ulogu u vezivanju vode i plastifikaciji ćelijskog zida. Lignin, kao trodimenzionalno umrežen aromatični polimer, ispunjava

prostor između celulozних mikrofibrila i hemiceluloza. Smatra se vezivom gradivnih elemenata i ćelijskom zidu daje krutost i otpornost na pritisak (Ramage et al., 2017).

Drvo se generalno smatra čvrstim i elastičnim materijalom. Interakcija vode (vlažnosti) i temperature sa amorfnim polimernim komponentama ćelijskog zida rezultuje njegovim “omekšavanjem” (plastifikacija). Upravo ova karakteristika drveta, da pod određenim uslovima temperature i vlažnosti prelazi iz krutog u viskoelastično stanje predstavlja osnovu za proces termo-hidro-mehaničke densifikacije.

Temperatura pri kojoj dolazi do plastifikacije drveta (T_g - *Glass transition temperature*) zavisi od zastupljenosti i karakteristika gradivnih jedinjenja i njihovog rasporeda u ćelijskom zidu (Placet et al., 2008) kao i od vlažnosti drveta (Salmén, 1982) (Slika 2). Istraživanja generalno pokazuju da povećanje vlažnosti drveta dovodi do sniženja temperature plastifikacije. Takođe, kako bi došlo do tečenja omekšanog materijala, neophodno je da temperatura drveta bude približno 50 °C iznad temperature plastifikacije T_g (Back & Salmén, 1982).



Slika 2. Temperatura plastifikacije (T_g - *Glass transition temperature*) gradivnih jedinjenja ćelijskog zida, u funkciji vlažnosti (prema Salmén, 1982).

Posebno značajnu ulogu u ponašanju drveta pri povišenoj temperaturi i vlažnosti ima lignin, kao dominantna amorfna komponenta ćelijskog zida. U suvim uslovima, lignin se ponaša kao krut, staklast materijal, pri čemu se njegova temperatura plastifikacije najčešće navodi u rasponu od približno 130 do 170 °C (Börcsök & Pásztory, 2021). Međutim, prisustvo vezane vode u ćelijskom zidu dovodi do izraženog plastifikacionog efekta, pri čemu voda smanjuje intermolekulske sile i povećava pokretljivost polimernih lanaca lignina i hemiceluloza. Kao posledica toga, temperatura plastifikacije se značajno snižava, te u vlažnijem drvetu (>10%) prelazak amorfne komponente u viskoelastično ili gumoliko stanje može nastupiti već pri temperaturama ispod 100 °C.

Omekšavanje amorfne komponente omogućava redistribuciju unutrašnjih naprezanja i povećava sposobnost ćelijskog zida da se plastično deformiše pod dejstvom mehaničkog pritiska. Ova pojava je od posebnog značaja u procesima sabijanja drveta, jer omogućava da se deformacija ostvaruje kroz postepeno sabijanje i kolaps ćelijskih struktura, uz znatno manji rizik od pojave strukturnih oštećenja, poput loma ćelija ili formiranja pukotina. Tokom hlađenja i smanjenja vlažnosti, deo ostvarene deformacije može se „zaključati“ u strukturi drveta, što dovodi do trajnog povećanja gustine.

Međutim, plastifikacija u drvetu ne predstavlja jedinstvenu i homogenu pojavu, već se odvija u relativno širokom opsegu temperature i vlažnosti, različito u pojedinim komponentama ćelijskog zida (Kooche, 2007; Sadatnezhad et al., 2017; Zhou et al., 2019). Zbog ograničenog prenosa toplote i vlažnosti, kao i izražene anatomske heterogenosti drveta, različite zone materijala mogu se tokom procesa nalaziti u različitim viskoelastičnim stanjima. Ova prostorna i vremenska nehomogenost direktno utiče na raspodelu deformacije, pojavu unutrašnjih naprezanja i kasniji stepen elastične i viskoelastične relaksacije, koje predstavljaju jedno od osnovnih ograničenja densifikovanog drveta.

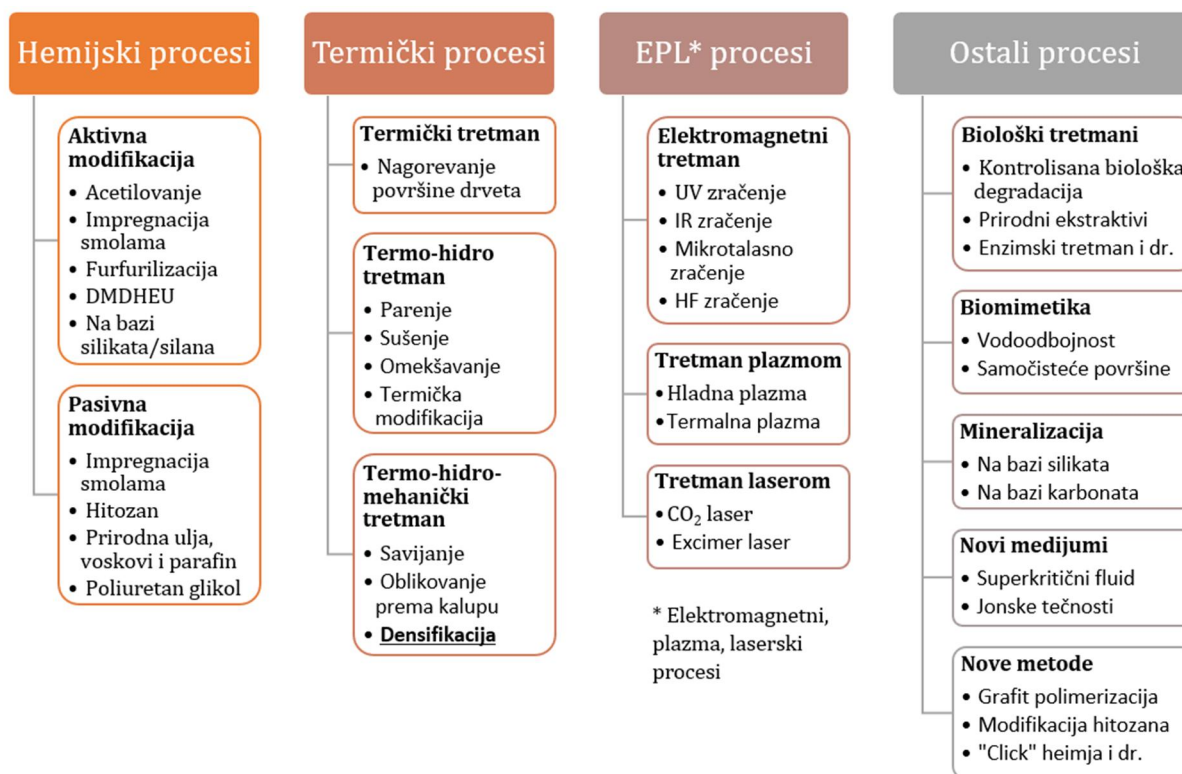
Iz navedenih razloga, uspešnost procesa densifikacije ne zavisi isključivo od dostizanja određene temperature, već od usklađene kontrole temperature, vlažnosti i trajanja procesa, kako bi se što veći deo ćelijskog zida doveo u povoljno viskoelastično stanje pre i tokom primene mehaničkog pritiska. Međutim, dostupna literatura ukazuje na neujednačene i često kontradiktorne rezultate u pogledu uticaja pojedinačnih procesnih parametara na ponašanje drveta tokom i nakon densifikacije.

Zbog toga je opravdano istraživati kombinovani uticaj različitih tretmana, pri čemu je u ovom radu analizirana primena ultrazvučnog (US) predtretmana u kombinaciji sa termo-hidro-mehaničkom (THM) densifikacijom i termičkim (TM) posttretmanom, sa ciljem smanjenja prostorne nehomogenosti plastifikacije i unapređenja stabilnosti deformisanog stanja materijala.

2.1 Modifikacije drveta

Modifikacije drveta obuhvataju skup postupaka kojima se ciljano menjaju njegova svojstva radi prilagođavanja zahtevima konkretne primene, pri čemu se promene mogu odnositi na fizička, hemijska ili mehanička svojstva materijala. U klasičnoj podeli (Slika 3), metode modifikacije drveta svrstavaju se u hemijske, termičke, fizičke i kombinovane postupke (C. A. S. Hill, 2006; Jones & Sandberg, 2020).

Hemijske metode modifikacije drveta razvijale su se intenzivno tokom druge polovine 20. veka, sa ciljem poboljšanja dimenzione stabilnosti, trajnosti i otpornosti drveta na biološke agense. Postupci poput acetilacije, furfuralizacije ili impregnacije reaktivnim smolama zasnivaju se na promeni hemijskog sastava ćelijskog zida ili popunjavanju lumena ćelija. Iako su ovi procesi pokazali visok stepen efikasnosti u pogledu stabilnosti i trajnosti, postoje i brojna ograničenja, koja se ogledaju u visokoj ceni, tehnološkoj složenosti, kao i u ekološkim i regulatornim aspektima vezanim za upotrebu hemikalija.



Slika 3. Klasifikacija metoda modifikacije drveta prema vrsti primenjenog procesa (prema, Jones & Sandberg, 2020)

Za razliku od hemijskih postupaka, fizičke i termičke metode modifikacije drveta zasnivaju se na promeni strukture i međusobnih odnosa gradivnih komponenti ćelijskog zida, bez uvođenja stranih supstanci u materijal. Takvi tretmani u proces uvode isključivo energiju i vodu (Sandberg et al., 2013), čime se obezbeđuje veća kompatibilnost sa principima reciklaže i kaskadne upotrebe materijala.

Pojam densifikacije u širem smislu označava svaki postupak kojim se povećava gustina drveta, nezavisno od toga da li se to postiže povećanjem mase ili smanjenjem zapremine. U tom kontekstu, densifikacija može biti ostvarena hemijskim putem (impregnacijom i polimerizacijom u strukturi drveta) ili fizičkim putem, sabijanjem materijala uz redukciju poroznosti. U užem, tehnološkom smislu, densifikacija se najčešće

odnosi na procese mehaničkog sabijanja drveta, pri čemu je povećanje gustine direktna posledica smanjenja zapremine.

2.1.1 Termo-hidro-mehanička (THM) densifikacija

THM densifikacija drveta predstavlja skup postupaka zasnovanih na sabijanju drveta pod dejstvom mehaničkog pritiska, uz istovremeno prisustvo povišene temperature i vlage. Kombinacija ovih procesnih parametara omogućava privremeno omekšavanje ćelijskog zida i njegovu plastičnu deformaciju, čime se postiže povećanje gustine i unapređenje mehaničkih svojstava drveta, naročito kod vrsta niske početne gustine (Luan et al., 2022; Sandberg et al., 2013).

Prema Vorreiter L. (1942) ideja o densifikaciji masivnog drveta primenom mehaničkog pritiska je patentirana još 1886. godine od strane Roberta Stöckharta. U Sjedinjenim Američkim Državama, Charles Sears je 1900. godine patentirao metod densifikacije drveta za upotrebu kao matrice za izradu štamparskih klišea. Prema Sandberg et al. (2013), tokom 1920-ih i 1930-ih godina izdat je veći broj patenata za proizvode od komprimovanog drveta, među kojima se ističu patentni Walsha i Wattsa (1923), Ollesheimera (1929, 1930), Brossmana (1931), Olsena (1934) i Esselena (1934).

THM densifikacija drveta se može klasifikovati prema pravcu delovanja deformacije u odnosu na anatomsku orijentaciju drveta. Longitudinalna densifikacija, kod koje se pritisak primenjuje u pravcu vlakana, retko se koristi u klasičnim postupcima povećanja gustine zbog izrazito velike krutosti drveta u ovom pravcu i ograničene mogućnosti trajne redukcije zapremine. Ovakav pristup prvenstveno ima za cilj modifikaciju deformacionog ponašanja, odnosno povećanje savitljivosti drveta, a ne primarno povećanje gustine i čvrstoće. Kako u svom preglednom radu navode Báder & Németh (2023), kod longitudinalnog sabijanja ne dolazi do tipičnog kolapsa lumena, već

do lokalnog izvijanja i preklapanja ćelijskih zidova (*pleating*), pri čemu se ćelijska struktura reorganizuje bez značajnog smanjenja ukupnog volumena materijala.

Kao rezultat, materijal ima za oko 30% manji MOR, pri kompresiji od 20% (Báder & Németh, 2023) i veću sposobnost savijanja uz očuvanje kontinuiteta vlakana. Longitudinalna densifikacija pronalazi industrijsku primenu u tehnologijama savijanja drveta. Najpoznatiji primer predstavlja *Compwood* tehnologija, zasnovana na kontrolisanoj longitudinalnoj kompresiji, kojom se omogućava savijanje masivnog drveta u male radijuse bez pojave lomova (Sandberg et al., 2013). U ovom procesu drvo se plastifikuje (najčešće parenjem), nakon čega se vrši uzdužna kompresija i naknadno oblikovanje, pri čemu deformisana struktura zadržava povećanu sposobnost savijanja.

Suprotno tome, poprečna densifikacija, najčešće u radijalnom, a ređe u tangencijalnom pravcu, ima za cilj povećanje gustine i unapređenje mehaničkih svojstava drveta. U ovom slučaju dolazi do kolapsa lumena i sabijanja ćelijskih zidova u pravcu normalnom na osu vlakana, što omogućava značajno povećanje gustine uz relativno umerene nivoe naprezanja (S. Yan et al., 2022). Zbog izražene anatomske anizotropije drveta, radijalna densifikacija se pokazala posebno pogodnom, jer omogućava kontrolisaniju deformaciju i povoljniji odnos između povećanja gustine i mehaničkih svojstava materijala, uz očuvanje integriteta ćelijske strukture.

Takođe, proces densifikacije može biti površinski i zapreminski. Površinska densifikacija podrazumeva lokalno povećanje gustine u ograničenoj zoni blizu površine drveta, pri čemu unutrašnja struktura ostaje uglavnom neizmenjena. Ovakav pristup se primenjuje kada je cilj poboljšanje svojstava kao što su tvrdoća, otpornost na habanje ili površinska mehanička otpornost, uz minimalne promene ukupne mase i dimenzija elementa. Nasuprot tome, zapreminska densifikacija obuhvata deformaciju čitavog poprečnog preseka elementa od drveta, čime se postiže uniformno povećanje gustine i

mehaničkih svojstava u celom zapreminskom obimu. Iako je tehnološki zahtevnija, zapreminska densifikacija omogućava značajnije unapređenje nosivosti i krutosti materijala.

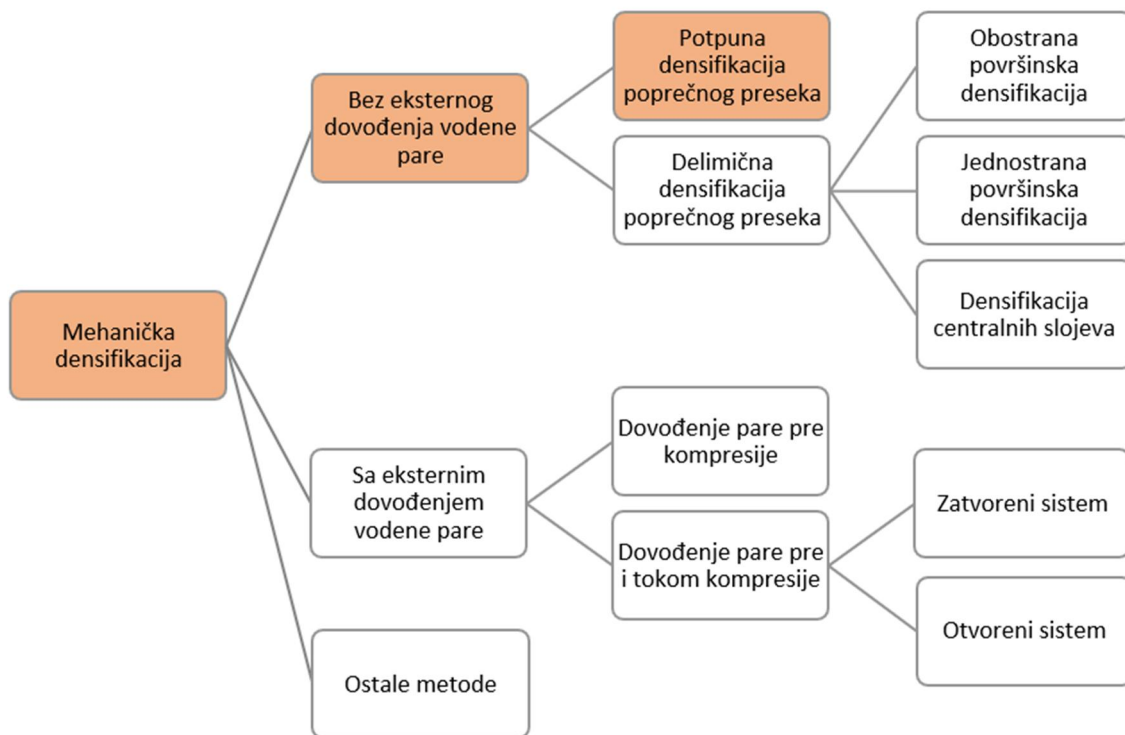
Pored klasifikacije prema pravcu deformacije, u literaturi i praksi razvijeni su i različiti tehnološki pristupi koji kombinuju mehaničku kompresiju sa dodatnim fizičko-hemijskim tretmanima u cilju stabilizacije deformacije. Među najznačajnijim komercijalnim procesima izdvajaju se *Compreg* i *Impreg* procesi, kod kojih se drvo prethodno impregnira termoreaktivnim smolama, a zatim podvrgava kompresiji i termičkom očvršćavanju.

Iako ovakvi pristupi pokazuju visok stepen efikasnosti u stabilizaciji densifikovanog drveta, njihova primena je često ograničena zbog složenosti procesa, potrebe za specifičnom opremom i upotrebe hemikalija, što dodatno naglašava značaj razvoja jednostavnijih i ekološki prihvatljivijih metoda modifikacije.

U literaturi se ne pravi uvek jasna razlika između termo-mehaničke i termo-hidro-mehaničke (THM) densifikacije, što dovodi do terminoloških i konceptualnih nejasnoća. Termo-mehaničkom densifikacijom se najčešće podrazumevaju postupci u kojima se sabijanje drveta odvija pri povišenim temperaturama, bez namernog i kontrolisanog dodavanja vlage (Sandberg et al., 2013). Međutim, u slučajevima kada je početna vlažnost drveta kontrolisana, ujednačena i predstavlja aktivni procesni parametar, ovakvi postupci se mogu posmatrati kao oblik THM densifikacije realizovan u otvorenom sistemu (*THM open system*), u kojem se vlaga ne dovodi spolja, ali sistem nije potpuno izolovan od okoline (L. Han et al., 2022). Nasuprot tome, THM densifikacija u užem smislu odnosi se na procese u kojima se vlaga ili vodena para namerno i kontrolisano uvode u sistem, najčešće u vidu zasićene ili pregrejane pare. Ovakav pristup odgovara konceptu zatvorenog sistema (*THM closed system*), gde su temperatura, pritisak pare i vreme

izlaganja precizno definisani i međusobno povezani. Luan et al. (2022) prave malo drugačiju podelu, gde razlikujemo dva osnovna procesa: a) densifikacija bez eksternog dovođenja vodene pare i b) densifikacija sa eksternim dovođenjem vodene pare (Slika 4).

Na slici je naznačeno koji proces je izveden u ovoj istraživanju.



Slika 4. Klasifikacija procesa mehaničke densifikacije drveta (prema, Luan et al. 2022)

Aktivno prisustvo pare dovodi do toga da lignin omekšava pri nižim temperaturama, materijal se brže zagreva i deformacija po preseku uzorka je homogenija (Fu et al., 2017), ali je tehnološki postupak značajno složeniji i zahteva veoma specifičnu opremu. U ovoj disertaciji odabrana je metoda termo-hidro-mehaničke (THM) densifikacije u otvorenom sistemu (THM *open system*), uz kontrolisanu inicijalnu vlažnost uzoraka. Ovakav pristup odabran je zbog mogućnosti obrade uzoraka većih dimenzija, kao i zbog procesnih uslova koji su znatno bliži praktičnoj industrijskoj primeni.

Pored navedenih postupaka densifikacije, u literaturi se navodi i viskoelastična termalna kompresija (VTC), koja se zasniva na dugotrajnom sabijanju drveta pri povišenoj temperaturi, čime se omogućava izraženije viskoelastično ponašanje drveta i postepena redistribucija unutrašnjih naprezanja tokom kompresije. Iako VTC omogućava postizanje visokog stepena upresovanja uz smanjen rizik od strukturnih oštećenja, produženo vreme tretmana i zahtevna kontrola procesa trenutno predstavljaju ograničenje za širu industrijsku primenu (Luan et al., 2022; Sandberg et al., 2013).

Uprkos značajnom potencijalu, THM densifikacija je praćena izraženim ograničenjem u pogledu stabilnosti ostvarene deformacije. Nakon rasterećenja i tokom kasnije eksploatacije, densifikovano drvo pokazuje tendenciju delimičnog povraćaja deformacije, koja se u literaturi razmatra kroz pojave elastične i viskoelastične relaksacije. Ovi fenomeni predstavljaju jedno od centralnih otvorenih pitanja u razvoju THM tehnologija i značajno utiču na pouzdanost i dugoročnu primenljivost densifikovanog drveta. Zbog toga je značajan deo savremenih istraživanja usmeren na primenu predtretmana, sa ciljem postizanja homogenijeg rasporeda vlage i efikasnijeg omekšavanja ćelijskog zida kao preduslova uspešne densifikacije.

2.1.1.1 Uticaj THM procesa na anatomsku strukturu drveta

Termo-hidro-mehanička densifikacija dovodi do promena atomske strukture drveta, koje predstavljaju neposrednu posledicu kombinovanog dejstva mehaničkog pritiska, povišene temperature i prisutne vode u drvetu. Za razliku od hemijskih, termičkih ili hidrotermičkih tretmana, kod THM procesa promene su pre svega strukturne i odnose se na deformaciju ćelijskih elemenata, redistribuciju poroznosti i promenu geometrije lumena i ćelijskih zidova.

Najizraženija anatomska promena tokom THM densifikacije jeste kolaps lumena ćelija, koji se prvenstveno odvija u pravcu primenjenog pritiska. Kod lišćara niske gustine, kao što je topola, sabijanje se dominantno manifestuje deformacijom vlakana i sudova, pri čemu dolazi do spljoštavanja lumena i približavanja suprotnih zidova ćelija. Stepenu kolapsa direktno zavisi od početne gustine drveta i stepena upresovanja (Jakob et al., 2022; S. Yan et al., 2022).

Rautkari et al. (2011) i Laine et al. (2012) ukazuju da THM densifikacija ne dovodi do uniformne promene strukture po preseku uzorka, već se formira manje ili više izražen gradijent gustine. U zavisnosti od procesnih uslova i tipa sistema (otvoreni ili zatvoreni), veći stepen densifikacije se može javiti u površinskim slojevima ili u središnjoj zoni uzorka. Ovakva nehomogenost se u literaturi objašnjava kombinacijom temperaturnih i vlažnosnih gradijenata, kao i ograničenom brzinom prenosa toplote i pare kroz drvo.

Na mikroskopskom nivou, THM densifikacija dovodi do savijanja, lokalnog izvijanja i delimičnog kolapsa ćelijskih zidova, dok se potpuni lom ćelija uglavnom izbegava ukoliko su temperaturno-vlažnosni uslovi pravilno odabrani. Istraživanja zasnovana na SEM i μ CT analizama pokazuju da se ćelijski zidovi tokom procesa često ponašaju kao viskoelastični elementi, pri čemu dolazi do njihove redistribucije bez značajnog narušavanja kontinuiteta strukture (Xu et al., 2020; S. Yan et al., 2022). Ipak, pri višim stepenima upresovanja i neadekvatnim uslovima tretmana mogu se javiti lokalna oštećenja, mikropukotine i delaminacije ćelijskih zidova (Bao et al., 2017; Cabral et al., 2022).

2.1.1.2 Uticaj THM procesa na vlažnost i gustinu drveta

Termo-hidro-mehanička densifikacija značajno menja higroskopni karakter drveta, prvenstveno kroz smanjenje ravnotežne vlažnosti u poređenju sa netretiranim drvetom (Bao et al., 2018; Skyba, 2008). Ovaj fenomen se objašnjava kombinacijom hemijskih i strukturnih promena; izlaganje temperaturama iznad 160 °C tokom procesa uzrokuje degradaciju najhigroskopnijih komponenti drveta, pre svega hemiceluloza, čime se smanjuje broj dostupnih slobodnih hidroksilnih (-OH) grupa za vezivanje molekula vode (Bao et al., 2018; Rudak et al., 2021). Pored toga, snažna kompresija ćelijskih zidova i redukcija lumena ćelija drastično smanjuju poroznost materijala, što otežava difuziju vodene pare i kretanje vezane i slobodne vode u unutrašnjost drveta (Bao et al., 2018; Shao et al., 2020).

Istraživanja pokazuju da se higroskopnost densifikovane topole dodatno smanjuje sa povećanjem temperature i trajanja tretmana. Na primer, pri relativnoj vlažnosti vazduha od 65%, prirodna topola dostiže vlažnost od oko 12,2–12,8%, dok uzorci tretirani THM postupkom na 180 °C pokazuju značajno nižu ravnotežnu vlažnost, koja se kreće u rasponu od 8,7% do 9,5% (Skyba, 2008). Ovo smanjenje higroskopnosti je ključno za dimenzionu stabilnost materijala, jer direktno utiče na smanjenje unutrašnjih naprezanja i tendenciju densifikovanog drveta da se vrati u prvobitno stanje nakon izlaganja povišenoj relativnoj vlažnosti vazduha (Fu et al., 2017; Pelit & Yorulmaz, 2023).

Princip termo-hidro-mehaničke obrade, zasniva se na modifikaciji drveta kroz tri ključne faze: omekšavanje (plastifikacija), transverzalna kompresija i fiksiranje deformisane strukture (Sandberg et al., 2013). Ključni faktor u prvoj fazi je izlaganje drveta temperaturi koja premašuje temperaturu staklastog prelaza (T_g), što zavisi od sadržaja vlage i omogućava prelazak polimera drveta u gumasto stanje (Kooche, 2007;

Zhou et al., 2019). U takvom stanju, drvo se može komprimovati do određenog stepena bez pucanja ćelijskih zidova, čime se drastično smanjuje zapremina lumena ćelija i povećava ukupna gustina materijala (L. Han et al., 2022). Ciljana gustina kod standardnih THM procesa se obično projektuje na oko $1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Sadatnezhad et al., 2017).

Maksimalna zapreminska gustina koja se može postići densifikacijom teoretski je ograničena gustinom same supstance ćelijskog zida, koja iznosi približno $1500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Bodig & Jayne, 1982). U istraživanjima sprovedenim na topoli, THM proces omogućava značajno povećanje gustine; na primer, kod uzoraka topole sa inicijalnom gustinom od oko $450 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, nakon densifikacije pod različitim pritiscima (25–125 MPa), gustina se povećava na opseg od 700 do $960 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Yu et al., 2020).

2.1.1.3 Uticaj THM densifikacije na mehanička svojstva drveta

Jedan od osnovnih ciljeva THM densifikacije drveta jeste unapređenje njegovih mehaničkih svojstava, koja su kod brzorastućih vrsta često ograničena niskom gustinom i izraženom poroznošću. U literaturi je široko prihvaćeno da povećanje gustine drveta, ostvareno sabijanjem ćelijske strukture, predstavlja primarni mehanizam koji vodi ka poboljšanju mehaničkih svojstava (Laine et al., 2012; Navi & Girardet, 2000; Navi & Heger, 2004; Rautkari et al., 2011). Brojni autori navode da je kod THM densifikovanog drveta moguće postići višestruko povećanje ovih svojstava u odnosu na netretirano drvo, naročito kod vrsta niske početne gustine. Pertuzzatti et al. (2018) su densifikovali bor (*Pinus alliotii*) primenom stepena upresovanja od 40% i ostvarili povećanje modula elastičnosti za 85%, a čvrstoća na savijanje je povećana za oko 290%. THM densifikacijom topole je u nekim istraživanjima postignuto povećanje MOR za oko 95% i MOE za 130%, pri stepenu upresovanja od 75% (Bao et al., 2017). Shao et al. (2020) u istraživanju

sprovedenom na drvetu topole (CR = 50%), navode da su vrednosti MOE i MOR uvećane za oko 3,8 i 2,6 puta u odnosu na nedensifikovano drvo.

Rautkari et al. (2011) i Laine et al. (2012) pokazuju da se savojna čvrstoća i modul elastičnosti densifikovanog drveta u velikoj meri povećavaju proporcionalno stepenu upresovanja i ostvarenom porastu gustine. Ova zavisnost se u pojedinim radovima opisuje gotovo linearnom korelacijom između gustine i mehaničkih svojstava, što je u skladu sa opštim konceptima mehanike drveta. Međutim, drugi autori upozoravaju da ovakav odnos važi samo do određenog stepena upresovanja, nakon čega dodatno sabijanje ne dovodi do proporcionalnog poboljšanja, a u pojedinim slučajevima može rezultovati čak i pogoršanjem mehaničkog ponašanja. Dok umereni stepeni THM densifikacije dovode do elasto-plastične deformacije ćelijskih zidova i efikasnijeg prenosa naprezanja kroz materijal, prekomerna kompresija može izazvati mikropukotine, lokalni lom ćelija i gubitak kontinuiteta strukture (Cabral et al., 2022; Sadatnezhad et al., 2017; S. Yan et al., 2022).

Pored savojne čvrstoće i modula elastičnosti, THM densifikacija značajno unapređuje i druga mehanička svojstva, poput površinske tvrdoće (Sadatnezhad et al., 2017; Zhou et al., 2019), pritisne čvrstoće paralelno sa vlaknima (Bao et al., 2017; Jakob et al., 2022) i otpornosti na habanje (Budakçı et al., 2021).

2.1.1.4 Elastična i viskoelastična relaksacija

Jedno od ključnih ograničenja termo-hidro-mehaničke densifikacije drveta predstavlja pojava delimičnog povraćaja deformacije nakon rasterećenja i tokom kasnije eksploatacije materijala. Ovaj povraćaj deformacije u literaturi se najčešće razmatra kroz

dva međusobno povezana, ali vremenski i mehanistički različita fenomena: elastičnu relaksaciju (*spring-back*, SB) i viskoelastičnu relaksaciju (*set-recovery*, SR).

Elastična relaksacija predstavlja gotovo trenutni povraćaj dela ostvarene deformacije neposredno nakon rasterećenja u presi. Ovaj fenomen je posledica elastične komponente deformacije ćelijskog zida, koja se, uprkos omekšavanju tokom procesa, ne može u potpunosti eliminisati. U apsolutnom iznosu, SB je najčešće relativno mali u poređenju sa ukupnim stepenom upresovanja, ali njegova pojava ukazuje na to da deo naprezanja ostaje elastično uskladišten u strukturi drveta. Veličina SB zavisi od temperature, vlažnosti i brzine rasterećenja, pri čemu viši temperaturno-vlažnosni nivoi i sporije rasterećenje mogu dovesti do smanjenja elastičnog povraćaja.

Za razliku od elastične, viskoelastična relaksacija predstavlja proces koji se odvija tokom dužeg vremenskog perioda u eksploataciji, pri promenama relativne vlažnosti i temperature okoline. Tokom THM densifikacije, glavne komponente drveta (osim celuloze) postaju plastične i deformišu se pod uticajem vlage, povišene temperature i pritiska. Polukristalna celuloza se pri tome elastično deformiše i u mikrofibrilama skladišti energiju deformacije. Privremena stabilizacija postignute deformacije ostvaruje se hlađenjem (prelaz lignina iz gumenog u staklasto stanje) i formiranjem vodoničnih veza između celuloze i hemiceluloza tokom sušenja. Pri ponovnom izlaganju povišenoj vlažnosti i temperaturi dolazi do omekšavanja lignina i raskidanja vodoničnih veza, što omogućava ćelijama drveta da se vrate ka prvobitnom obliku (Navi & Heger, 2004; Navi & Pizzi, 2015).

Brojna istraživanja ukazuju da je intenzitet viskoelastične relaksacije snažno zavisano od vrste drveta, početne gustine i stepena upresovanja. Drvo niže gustine i viši stepeni upresovanja najčešće rezultuju izraženijim SR efektom, što se objašnjava većim stepenom deformacije ćelijskog zida i većim potencijalom za povraćaj strukture (Neyses

et al., 2021; Scharf et al., 2023). Sa druge strane, postoje istraživanja u kojima su rezultati pokazali da viši stepen upresovanja daje niže vrednosti viskoelastične deformacije (Bao et al., 2017; Pelit & Yorulmaz, 2023). Ovakva neujednačenost rezultata ukazuje da uticaj stepena kompresije nije jednoznačan, već zavisi od šireg skupa međusobno povezanih faktora.

Važan faktor u pojavi viskoelastične relaksacije jeste i način na koji je THM proces realizovan. U otvorenim sistemima, gde je kontrola vlažnosti i temperaturnog režima ograničenija, često se beleži veći stepen SR u poređenju sa zatvorenim sistemima. Zatvoreni THM sistemi sa kontrolisanim dovodom pare omogućavaju ravnomernije omekšavanje ćelijskog zida i potencijalno bolju fiksaciju deformacije (Sadatnezhad et al., 2017; Shao et al., 2020), ali ni u tim uslovima nije postignuta potpuna eliminacija viskoelastične relaksacije.

U literaturi se često naglašava da su SB i SR međusobno povezani, ali da ih nije opravdano posmatrati kao isti fenomen. Dok je SB primarno povezan sa elastičnom komponentom deformacije i procesnim uslovima tokom rasterećenja, SR odražava dugoročno viskoelastično ponašanje drveta i njegovu interakciju sa vlagom tokom eksploatacije. Zbog toga mere za smanjenje SB ne moraju nužno dovesti do proporcionalnog smanjenja SR, što dodatno komplikuje optimizaciju THM procesa (Budakçı et al., 2021; Shao et al., 2020).

Razlike u rezultatima između pojedinih istraživanja mogu se objasniti razlikama u vrsti drveta, početnoj gustini, vlažnosti, načinu realizacije THM procesa, kao i uslovima i metodologiji ispitivanja viskoelastične relaksacije, uključujući način njenog definisanja i izračunavanja. Zbog toga je otežano direktno poređenje rezultata, što ukazuje na potrebu za sistematskim istraživanjem uticaja procesnih parametara i njihovih međusobnih interakcija.

Jedan od najčešće primenjivanih pristupa za smanjenje viskoelastične relaksacije jeste primena termičkog posttretmana nakon densifikacije (Cai et al., 2012; Cao et al., 2020; Pelit et al., 2016; Wehsener et al., 2018). Termički posttretman može dovesti do delimične stabilizacije strukture kroz hemijske promene u hemicelulozama i ligninu, čime se smanjuje sposobnost ćelijskog zida da ponovo apsorbuje vodu. Ipak, brojni autori ističu da se ovim postupkom SR može značajno umanjiti, ali ne i u potpunosti eliminisati.

Na osnovu dosadašnjih istraživanja može se zaključiti da su elastična i viskoelastična relaksacija inherentne pojave THM densifikacije drveta. Njihova pojava predstavlja kompromis između ostvarenog povećanja gustine i mehaničkih svojstava, s jedne strane, i dugoročne dimenzione stabilnosti materijala, s druge. Zbog toga se u savremenoj literaturi sve više pažnje posvećuje kombinovanim pristupima, koji uključuju optimizaciju procesnih parametara, predtretmane i posttretmane, sa ciljem postizanja prihvatljive ravnoteže između mehaničkih performansi i stabilnosti densifikovanog drveta.

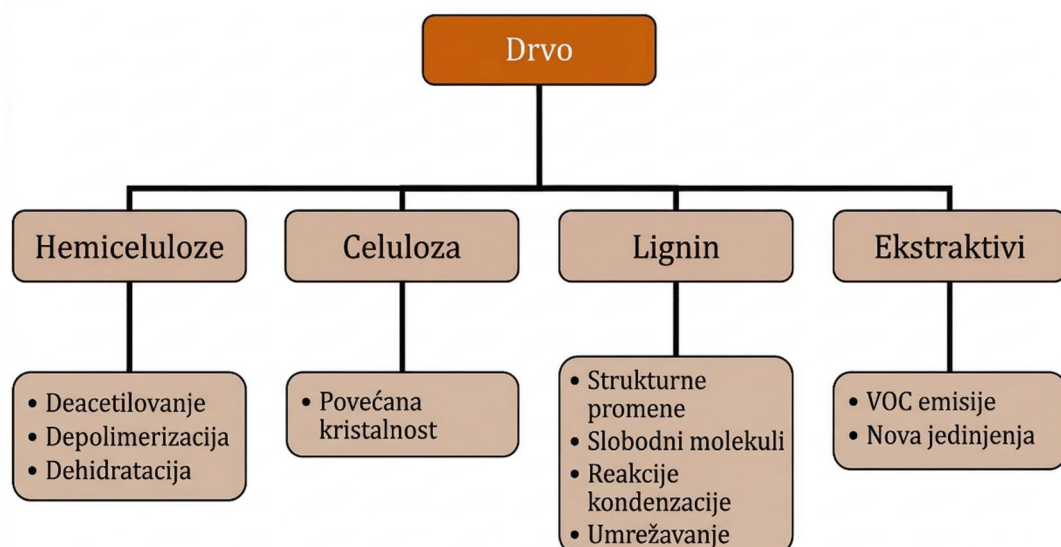
2.1.2 Termička modifikacija

Termička modifikacija drveta (TM) obuhvata skup postupaka u kojima se drvo izlaže povišenim temperaturama u kontrolisanim uslovima, bez primene hemijskih sredstava, sa osnovnim ciljem smanjenja higroskopnosti, povećanja dimenzione stabilnosti i poboljšanja otpornosti na dejstvo vlage i bioloških faktora (C. A. S. Hill, 2006).

Prvi naučno dokumentovani pokušaji modifikacije drveta primenom povišenih temperatura datiraju iz početka 20. veka, kada je Tiemann (1915) eksperimentalno pokazao da zagrevanje drveta u pregrejanoj pari (~150 °C) dovodi do smanjenja njegove higroskopnosti. Prema Zawadzki et al. (2013), tokom 1930-ih godina, istraživanja Stamm-a i Hansen-a dodatno su razvila ovaj koncept, potvrđujući potencijal termičke obrade za

unapređenje dimenzione stabilnosti i otpornosti drveta. Veće interesovanje i razvoj ove tehnologije kreće od 1980, u Evropi pre svega u Finskoj, Holandiji, Nemačkoj i francuskoj. Razvijeno je više različitih metoda, ali sve je zajednički koncept izlaganja drveta temperaturama iznad 160°C (B. M. Esteves & Pereira, 2009). Trenutno najpoznatiji industrijski proces je *Thermowood*[®], razvijen od strane VTT (*Technical Research Centre of Finland*), a kasnije i patentiran (Vitaniemi et al., 1997).

Osnovni mehanizmi termičke modifikacije zasnivaju se na hemijskim promenama glavnih komponenti ćelijskog zida drveta (Slika 5). Celuloza je najotpornija na visoke temperature i uglavnom se navode zanemarljive promene pri izlaganju visokim temperaturama, čak i do 260 °C (B. Esteves et al., 2008; Yildiz et al., 2006). Konstatuje se i povećanje udela kristalne celuloze, koje nastaje na račun degradacije amorfne celuloze (Bhuiyan & Hirai, 2005; Boonstra & Tjeerdsma, 2006; Wikberg & Maunu, 2004). Hemiceluloze su najosetljivije na povišene temperature, pri čemu dolazi do njihove parcijalne depolimerizacije i smanjenja broja hidroksilnih grupa dostupnih za vezivanje vode (Sivonen et al., 2002; Tjeerdsma et al., 1998). Kao posledica toga, drvo pokazuje smanjenu ravnotežnu vlažnost, time i manju sklonost ka bubrenju i utezanju. Kod termički modifikovanog drveta zabeleženo je veće učešće lignina u odnosu na netretirano drvo (Bourgois & Guyonnet, 1988; B. Esteves et al., 2008; Zaman et al., 2000). Ovo povećano učešće lignina zapravo posledica polikondenzacije, odnosno umrežavanja (*cross-linking*) sa ostalim komponentama ćelijskog zida u procesu termičke modifikacije (Boonstra & Tjeerdsma, 2006; Tjeerdsma & Militz, 2005), a postoje i istraživanja koja pokazuju da u početnoj fazi tretmana dolazi do blage degradacije lignina (B. Esteves et al., 2008; Windeisen et al., 2007).



Slika 5. Hemijske promene osnovnih gradivnih komponenti drveta izazvane termičkim tretmanom, (prema, Esteves & Pereira, 2009)

Temperaturni režimi koji se koriste u TM procesima variraju u zavisnosti od ciljanih svojstava i vrste drveta, ali se u većini industrijskih i eksperimentalnih postupaka kreću u opsegu od približno 160 do 220 °C. Niži temperaturni nivoi dovode do umerenog smanjenja higroskopnosti uz relativno mali uticaj na mehanička svojstva, dok viši temperaturni režimi rezultuju izraženijim poboljšanjem dimenzione stabilnosti, ali su često praćeni značajnim smanjenjem savojne čvrstoće i modula elastičnosti. Zbog toga se u literaturi TM često opisuje kao proces koji nužno uključuje kompromis između dimenzione stabilnosti i mehaničkih svojstava.

Brojna istraživanja pokazuju da termički modifikovano drvo generalno karakteriše smanjenje mehaničkih svojstava, pre svega savojne čvrstoće (J. Li et al., 2007; Mburu et al., 2008; Poncsá et al., 2006). Promena modula elastičnosti zavisi od primenjenog tretmana. Pri blažim tretmanima, gde je gubitak mase do oko 4% beleži se blago povećanje modula elastičnosti, dok oštiri tretmani rezultuju njegovim smanjenjem (B. Esteves et al., 2007). Ovi gubici mehaničkih svojstava dovode se u vezu sa degradacijom

hemiceluloza i delimičnim narušavanjem strukturalnog integriteta ćelijskog zida (B. M. Esteves et al., 2008; Winandy et al., 2001).

U kontekstu THM densifikacije, termička modifikacija najčešće se primenjuje kao posttretman (TM), sa ciljem smanjenja viskoelastične relaksacije i stabilizacije ostvarene deformacije. U tom slučaju, TM ne služi za inicijalno omekšavanje ćelijskog zida, već za trajnu promenu njegove hemijske strukture nakon sabijanja. Za sada termička modifikacija predstavlja ključan proces za unapređenje dimenzione stabilnosti i redukciju higroskopnosti drveta bez upotrebe dodatnih hemijskih sredstava (Costa et al., 2019; B. M. Esteves & Pereira, 2009).

Važno je istaći da u literaturi ne postoji potpuni konsenzus o optimalnim uslovima termičkog posttretmana nakon THM densifikacije. Različiti autori koriste različite temperature, trajanja i atmosferske uslove (vazduh, inertni gas, vodena para), što otežava direktno poređenje rezultata. Pored toga, pojedina istraživanja ukazuju da efekti TM posttretmana zavise i od prethodnog THM režima, stepena upresovanja i vrste drveta, što dodatno naglašava potrebu za integrisanim i sistematskim pristupom istraživanju ovih kombinovanih procesa.

2.1.3 Ultrazvučna modifikacija

S obzirom da je iz prethodno prikazane literature evidentno da nehomogeni profil vlažnosti po debljini drveta i neujednačeno omekšavanje ćelijskog zida predstavljaju jedan od uzroka neujednačene densifikacije i kasnije relaksacije deformacije, kao potencijalno rešenje nameće se ultrazvučni predtretman.

Ultrazvučna modifikacija drveta predstavlja fizički predtretman zasnovan na dejstvu ultrazvučnih talasa visoke frekvencije (>20 kHz), najčešće u tečnosti, pri čemu dolazi do niza mehaničkih i fizičkih i hemijskih promena u strukturi drveta. U drvnjoj

industriji ultrazvuk se uspešno primenjuje u različitim procesima, uključujući sušenje drveta (He et al., 2013), skidanje kore i čišćenje površine (Rudak et al., 2021), unapređenje efikasnosti impregnacije (Zhao et al., 2016), kao i za detekciju grešaka u sirovini (Espinosa et al., 2020) i kontrolu kvaliteta finalnih proizvoda (Bucur, 2023; Fleming et al., 2005).

Osnovni mehanizam delovanja ultrazvučnog tretmana u tečnom medijumu zasniva se na pojavi kavitacije, odnosno formiranju, rastu i imploziji mikromehurića u tečnosti usled oscilacija pritiska izazvanih ultrazvučnim talasima (Wan et al., 1992). Implozija ovih mehurića generiše lokalno pritiske preko 1000 atm (Soria & Villamiel, 2010), a oslobođena energija iznosi približno 10 do 100 kJ/mol, što odgovara energetsom nivou vodoničnih veza (Suslick, 1990; Tischer et al., 2010). Kao posledica toga dolazi do razbijanja jamičastih membrana, otvaranja blokiranih provodnih puteva i formiranja mikrokapilara, čime se značajno povećavaju permeabilnost i difuzivnost drveta (H. Liu et al., 2018; Qiu et al., 2016; Tuziuti et al., 2025).

He et al. (2014) i Tanaka et al. (2010) pokazuju da drvo nakon ultrazvučnog tretmana u vodenoj sredini brže upija vodu i postiže se ravnomerniji profil vlažnosti po preseku uzorka. Ovi efekti su od posebnog značaja u kontekstu THM densifikacije, budući da homogeni profil vlažnosti omogućava ujednačenije omekšavanje ćelijskog zida i smanjenje lokalnih napona tokom mehaničkog sabijanja.

Pored mehaničkih efekata na porozni sistem, u literaturi se sve češće razmatra i uticaj ultrazvuka na hemijsku strukturu drveta, pre svega na lignin. Pojedina istraživanja ukazuju da ultrazvučni tretman može izazvati promene u strukturi lignina, kao što su parcijalna depolimerizacija i naknadno umrežavanje, što dovodi do sniženja temperature omekšavanja i smanjenja otpora pri kompresiji (Postnikov et al., 2010; Rudak et al., 2021).

Ovakve promene potencijalno mogu olakšati plastičnu deformaciju ćelijskog zida tokom THM densifikacije i doprineti boljoj fiksaciji ostvarene deformacije.

Važno je naglasiti da se ultrazvučna modifikacija drveta u većini istraživanja ne posmatra kao samostalan postupak, već prvenstveno kao predtretman za realizaciju drugih procesa modifikacije. U tom smislu, njen značaj za THM densifikaciju, ogleda se u stvaranju povoljnijih uslova za ravnomerniji transport vlage, efikasnije omekšavanje ćelijskog zida i smanjenje otpora pri naknadnim procesima sabijanja ili termičke obrade.

3 PREDMET I CILJ RADA

Šira primena THM densifikovanog drveta ograničena je deformacijama koje su posledica elastične i viskoelastične relaksacije kompresovanog drveta. Elastična relaksacija, (SB) predstavlja trenutni elastični odgovor drveta nakon rasterećenja u presi i u apsolutnom iznosu je veoma mala. Značajno veći problem u praksi predstavlja viskoelastična relaksacija (SR). Ovaj pojam se odnosi na postepeno vraćanje drveta ka početnim dimenzijama tokom vremena, naročito pri oscilacijama vlažnosti i temperature u eksploatacionim uslovima. Dosadašnja istraživanja ukazuju da se SR može značajno smanjiti primenom termičkog posttretmana nakon densifikacije, ali ne i u potpunosti eliminisati.

U cilju dodatnog unapređenja dimenzione stabilnosti i smanjenja SB i SR, u ovoj disertaciji se uvodi ultrazvučni (US) predtretman drveta kao dodatni korak pre THM densifikacije. Poznato je da ultrazvučni tretman u vodenoj sredini poboljšava pokretljivost vode u drvetu, povećava njegovu propustljivost i difuzivnost usled razbijanja jamičastih struktura i formiranja mikropilara (He et al., 2014; Tanaka et al., 2010). Ovi

efekti potencijalno omogućavaju ravnomjerniju densifikaciju drveta, sa manjim oštećenjima ćelijske strukture i boljom fiksacijom deformacije.

Polazeći od navedenog, predmet ove doktorske disertacije jeste eksperimentalno ispitivanje uticaja ultrazvučnog predtretmana, u kombinaciji sa termo-hidro-mehaničkom densifikacijom i termičkim posttretmanom, na fizička, mehanička i dimenziona svojstva drveta domaće topole. Poseban akcenat stavljen je na ponašanje densifikovanog drveta u pogledu elastične i viskoelastične relaksacije, kao i na promene mehaničkih svojstava u savijanju. Na taj način, disertacija ima za cilj da doprinese razvoju ekološki prihvatljivih i tehnološki unapređenih postupaka modifikacije drveta, koji bi omogućili efikasnije korišćenje brzorastućih vrsta u proizvodima više dodate vrednosti i u održivoj gradnji.

Osnovni cilj doktorske disertacije je utvrđivanje uticaja termo-hidro-mehaničkog (THM) tretmana na fizička i mehanička svojstva drveta topole, sa posebnim osvrtom na uticaj ultrazvučnog predtretmana (US) i termičkog posttretmana (TM).

Posebni ciljevi istraživanja su:

1. ispitivanje uticaja različitih stepena upresovanja (50%, 60% i 65%) na svojstva densifikovanog drveta;
2. analiza uticaja ultrazvučnog predtretmana na stabilnost i relaksaciono ponašanje drveta;
3. ispitivanje uloge termičkog posttretmana u smanjenju elastične i viskoelastične relaksacije;
4. utvrđivanje međusobnog dejstva navedenih procesnih parametara na konačna svojstva THM densifikovanog drveta.

Posebne hipoteze:

H1 – THM modifikacija ima značajan uticaj na fizička i mehanička svojstva THM modifikovanog drveta topole – dovodi do značajnog povećanja gustine i poboljšanja mehaničkih svojstava drveta topole;

H2 – Postoji pozitivna korelacija između stepena upresovanja u procesu THM modifikacije i ostvarene gustine i mehaničkih svojstava drveta topole;

H3 – Primena ultrazvučnog predtretmana dovodi do promene mehaničkih svojstava i smanjenja intenziteta elastične i viskoelastične relaksacije;

H4 – Kombinovana primena ultrazvučnog predtretmana, termičkog posttretmana i odgovarajućeg nivoa upresovanja omogućava postizanje povoljnog odnosa između poboljšanih svojstava i dugoročne dimenzionalne stabilnosti densifikovanog materijala.

4 MATERIJAL I METOD RADA

4.1 Priprema uzoraka

Pet trupaca topole (*Populus x euramericana* cv. 'Robusta'), starosti 15–20 godina, pribavljeno je iz komercijalne plantaže u centralno-istočnoj Srbiji. Trupci su razrezani u preduzeću "Strugara Uroš", i iz svakog trupca proizvedene su po četiri tangencijalno rezane daske, što je ukupno činilo 20 dasaka. Daske su rezane tako da su prstenovi prirasta orijentisani paralelno sa širom stranom daske (Slika 6). Sve daske bile su bez vidljivih grešaka i nominalnih dimenzija $2000 \times 140 \times 28$ mm. Pre pripreme uzoraka, daske su sušene u konvencionalnoj laboratorijskoj sušari, do ciljne vlažnosti od približno 12%. Srednja gustina dasaka u apsolutno suvom stanju (ASS) iznosila je $434 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (prema standardu ISO 13061-2: 2014).

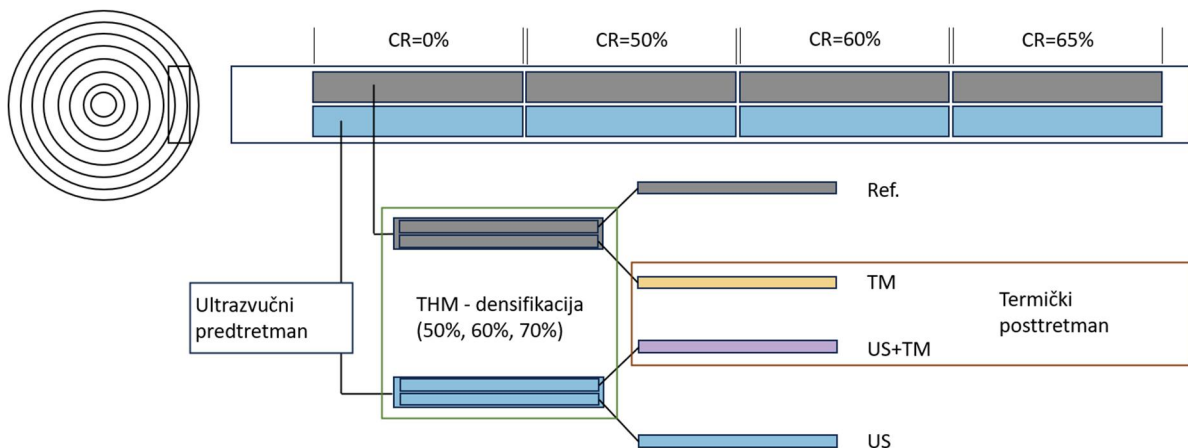
Radi smanjenja uticaja prirodne varijabilnosti drvene sirovine i obezbeđivanja pouzdanog poređenja između različitih tretmana, primenjen je upareni dizajn uzorkovanja. Uzorci namenjeni različitim stepenima densifikacije i primenjenih tretmana izrezivane su sa ekvivalentnih anatomskih pozicija unutar svake daske, čime je obezbeđeno da u svim eksperimentalnim grupama imamo jednak broj uzoraka iz svake daske. Ovakav pristup omogućio je minimizaciju uticaja heterogenosti unutar daske, kao što su gradijent gustine, širina prstenova prirasta, odnos ranog i kasnog drveta i dr. Na ovaj način omogućena je procena efekata tretmana nezavisno od varijabilnosti na nivou daske.

Iz svake daske izrezano je po 8 uzoraka početnih dimenzija $400 \times 120 \times 20$ mm (dužina \times širina \times debljina), koje su u parovima raspoređene u jednu od sledećih grupa prema stepenu upresovanja: nedensifikovana kontrolna grupa (CR = 0%) i THM-

densifikovane, sa primenjenim stepenima upresovanja od 50%, 60% i 65%. Svaki par je obuhvatao uzorak densifikovan bez primene ultrazvučnog predtretmana i drugi uzorak koji je pre densifikacije bio izložen ultrazvuku (Slika 6).

Nakon densifikacije i naknadnog kondicioniranja u trajanju od dve nedelje pri temperaturi 20 ± 2 °C i relativnoj vlažnosti vazduha $65 \pm 5\%$ (klima komora Kambič KK105CH), svaki uzorak je dodatno uzdužno razrezan na dva, konačnih dimenzija 400×20 mm (dužina \times širina). Polovina ovih uzoraka podvrgnuta je termičkom posttretmanu, dok je druga polovina direktno upućena na kondicioniranje i pripremu za laboratorijsku analizu densifikovanih (i kontrolnih) uzoraka.

Navedeni eksperimentalni dizajn rezultovao je sa četiri osnovne grupe definisane stepenom upresovanja (0% – nedensifikovano, 50%, 60% i 65%), pri čemu je svaka grupa dodatno podeljena na četiri podgrupe prema primenjenim tretmanima (Tabela 1): referentni uzorci bez pred- i posttretmana, uzorci sa ultrazvučnim predtretmanom (US), uzorci sa termičkim posttretmanom (TM) i uzorci sa kombinovanim ultrazvučnim predtretmanom i termičkim posttretmanom (US+TM). Unutar svake grupe po stepenu upresovanja, netretirani uzorci korišćeni su kao referentni uzorci (Ref.), što je omogućilo direktnu procenu pojedinačnih i kombinovanih efekata primenjenih tretmana u odnosu na samu densifikaciju. Planirani dizajn eksperimenta je bio uravnotežen, ali je konačni broj validnih uzoraka pri višim nivoima kompresije (cr 60 i 65) smanjen zbog procesnih ograničenja. Pri višim stepenima kompresije zabeležene su poteškoće u održavanju zadatih procesnih parametara, što je u pojedinim slučajevima dovelo do odstupanja od planiranog režima obrade i gubitka dela uzoraka. Ova okolnost uzeta je u obzir pri interpretaciji rezultata. Sa tehnološkog stanovišta, umereni stepen upresovanja (oko CR = 50%) ima poseban praktični značaj, jer omogućava povoljan odnos između poboljšanja svojstava i očuvanja zapremine materijala.



Slika 6. Shema pripreme i izrezivanja uzoraka

Tabela 1. Eksperimentalni plan i raspodela uzoraka po stepenu upresovanja (CR), primeni ultrazvučnog predtretmana (US) i termičkog posttretmana (TM), sa odgovarajućim oznakama tretmana i brojem ispitivanih uzoraka (N).

CR (%)	Ultrazvučni predtretman	Termički posttretman	Oznaka tretmana	N
0 (kontrolni)	-	-	Reference	20
	Da	-	US	20
	-	Da	TM	20
	Da	Da	US+TM	20
50	-	-	Reference	20
	Da	-	US	20
	-	Da	TM	20
60	Da	Da	US+TM	20
	-	-	Reference	5
	Da	-	US	5
	-	Da	TM	5
65	Da	Da	US+TM	5
	-	-	Reference	10
	Da	-	US	10
	-	Da	TM	10
	Da	Da	US+TM	10

4.2 Postupak modifikacije drveta

4.2.1 Ultrazvučni predtretman

Ultrazvučni (US, *ultrasound*) predtretman sproveden je u ultrazvučnoj kadi od nerđajućeg čelika (ASonic Pro300), nominalne frekvencije 28 kHz i izlazne snage od 600 W, što odgovara procenjenoj nominalnoj gustini snage od približno $0,40 \text{ W/cm}^2$, uz pretpostavku ravnomerne raspodele energije po površini dna kade. Uzorci su tokom tretmana bili potpuno potopljeni u destilovanu vodu u ultrazvučnoj kadi zapremine 28 L i izlagani ultrazvučnom polju u trajanju od 45 min.

Početna temperatura destilovane vode u kadi iznosila je $25 \text{ }^\circ\text{C}$ i tokom sonifikacije se povećala na približno $35 \text{ }^\circ\text{C}$ usled unosa ultrazvučne energije. Ovaj porast temperature bio je ujednačen za sve serije tretmana iako nije bio kontrolisan.

Radi obezbeđivanja ujednačene izloženosti ultrazvučnom polju, uzorci su postavljeni u posebno izrađene šablone, koji su omogućavali međusobni razmak i sprečavali njihov direktan kontakt sa zidovima kade (Slika 7). Šablon je bio opterećen kako bi tokom celog tretmana uzorci ostali potpuno potopljeni u vodu. Zbog ograničene zapremine kade, ultrazvučni tretman izvođen je u serijama od po šest uzoraka, pri čemu je za svaku seriju korišćena sveža destilovana voda, kako bi se izbegli kumulativni efekti rastvorenih ekstraktivnih materija.

Izabrani parametri ultrazvučnog tretmana — frekvencija, snaga i trajanje — određeni su tako da budu uporedivi sa uslovima koji se najčešće navode u naučnim radovima (He et al., 2016). Nakon US predtretmana, svi uzorci su kondicionirani u klima komori (Kambič KK105CH, $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, $65 \pm 5\%$), u trajanju od dva meseca, pre daljeg procesa densifikacije.

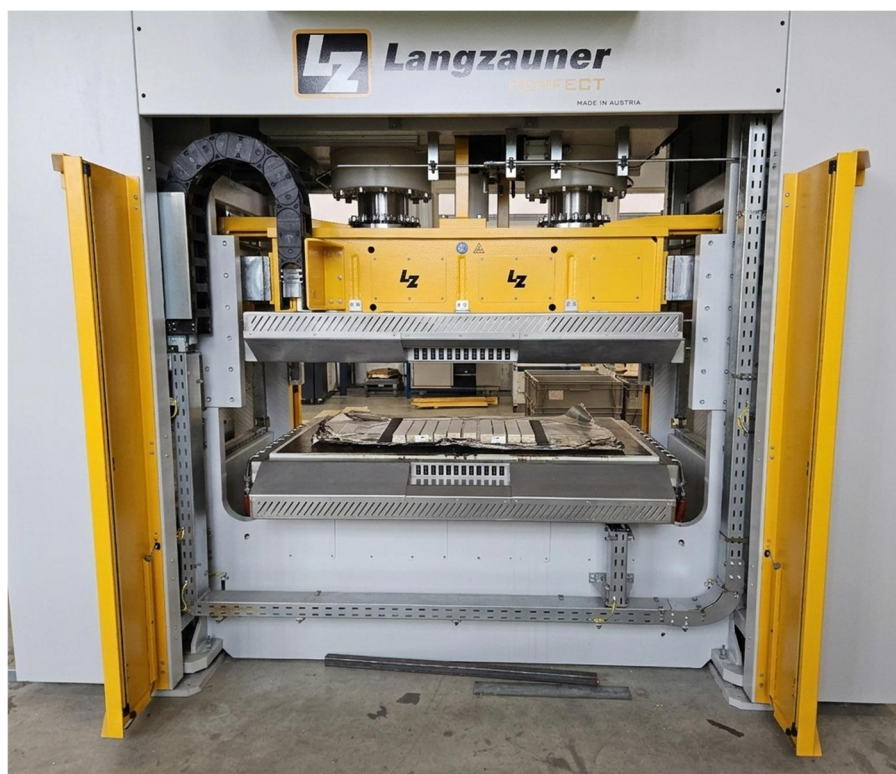


Slika 7. Ultrazvučni tretman u destilovanoj vodi: (a) laboratorijska ultrazvučna jedinica Asonic Pro300; (b) raspored uzoraka u korpi pre potapanja; (c) položaj i fiksiranje uzoraka tokom tretmana

4.2.2 THM densifikacija

Proces THM densifikacije drveta izveden je u hidrauličnoj presi (otvoreni sistem) proizvođača *Langzauner*, model „*Perfect*“ *LZT UK 30 L, Lambrecht, Austrija* (Slika 8). Specifičnost ove prese je sistem za vodeno hlađenje pritisnih ploča koji u relativno kratkom roku može smanjiti temperaturu sa preko 200 °C na ispod 100 °C. Uzorci sa ultrazvučnim (US) predtretmanom i oni bez predtretmana densifikovani su pod identičnim procesnim uslovima.

Pritisna sila u toku densifikacije delovala je u radijalnom anatomskom pravcu, pri čemu je početna debljina od 20 mm smanjivana na 10 mm, 8 mm i 7 mm, što je odgovaralo nominalnim stepenima upresovanja (CR) od 50%, 60% i 65%, respektivno (Slika 9). Krajnji položaj pritisnih ploča pri zatvaranju definisan je upotrebom metalnih graničnika (10 mm, 8 mm i 7 mm).



Slika 8. Laboratorijska presa Perfect LZT UK 30 L, Langzauner Lambrecht, Austrija (institut InnoRenew CoE)

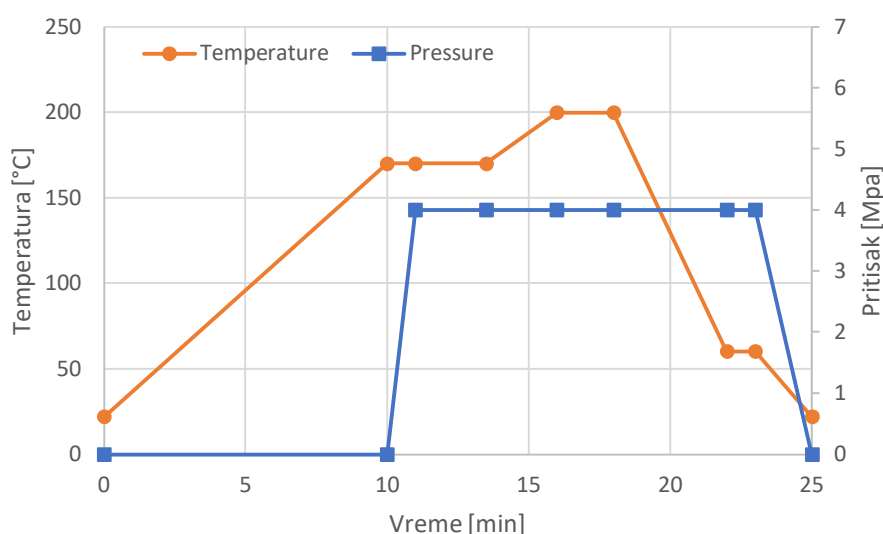


Slika 9. Uzorci pre densifikacije (početna debljina 20 mm) i nakon upresovanja u radijalnom pravcu na ciljane debljine od 10 mm, 8 mm i 7 mm, što odgovara nominalnim stepenima upresovanja (CR) od 50%, 60% i 65%.

THM ciklus sastojao se od sledećih faza: (a) zagrevanje gornje i donje grejne ploče prese na temperaturu od 170 °C; (b) postavljanje uzoraka i zatvaranje prese konstantnom brzinom pomeranja ploča od $3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ do metalnih graničnika, pri čemu je ostvarivan nominalni pritisak od približno 4 MPa u radijalnom pravcu; (c) faza zadržavanja u trajanju od 3 min pri konstantnoj kompresiji; (d) visokotemperaturna faza, tokom koje je

temperatura grejnih ploča povećavana na 200 °C i održavana u trajanju od 2 min; i (e) hlađenje uzoraka pod opterećenjem, do temperature od 60 °C i naknadno rasterećenje (Slika 10), u skladu sa procedurom opisanom u literaturi (L. Han et al., 2022).

Jedinstven režim THM densifikacije primenjen je na sve uzorke kako bi se omogućila analiza izolovanog uticaja stepena upresovanja i primenjenih pred- i posttretmana, bez prilagođavanja ili optimizacije procesa za pojedinačne grupe.



Slika 10. Režim termo-hidro-mehaničkog (THM) tretmana, brzina zatvaranja prese: 3 mm s-1

4.2.3 Termički posttretman

Nakon THM densifikacije, svi uzorci su kondicionirane u trajanju od dve nedelje pri temperaturi 20 ± 2 °C i relativnoj vlažnosti vazduha $65 \pm 5\%$, a zatim su uzorci iz predviđenih grupa termički tretirane.

TM posttretman izveden je u laboratorijskoj komori Kambič VS-258 ML (Slika 11) pri normalnom atmosferskom pritisku, na ciljnoj temperaturi od 210 °C. Temperatura je povećavana od ambijentalnih uslova prosečnom brzinom zagrevanja od približno 13,5

°C/h. Ukupno trajanje tretmana iznosilo je 22 h, pri čemu su uzorci na maksimalnoj temperaturi zadržani u trajanju od 7 h. Ukupno vreme tretmana bilo je duže od inicijalno planiranog usled tehničkih problema i sporijeg dostizanja ciljne temperature; međutim, primenjena kombinacija vremena i temperature ostala je u okviru opsega koji se u literaturi najčešće navodi za industrijsku termičku modifikaciju tvrdih lišćarskih vrsta (Candelier et al., 2015; Milić et al., 2023).



Slika 11. Uzorci iz grupa TM i US+TM, pre termičkog tretmana (levo) i posle termičkog tretmana (desno)

4.3 Određivanje svojstava THM densifikovanog drveta

4.3.1 Stepen upresovanja i elastična relaksacija

Odmah po završetku THM ciklusa presovanja određen je stvarni stepen upresovanja (CR_r), izračunat na osnovu merenja debljine uzoraka pre i neposredno nakon procesa THM densifikacije. Početna debljina (h_{init}) merena je pre unošenja uzoraka u presu, dok je debljina nakon densifikacije (h_{dens}) izmerena odmah po otvaranju prese i rasterećenju uzoraka, kako bi se odredio efekat trenutne elastične relaksacije materijala.

Merenja su vršena digitalnim kljunastim merilom sa tačnošću od $\pm 0,03$ mm. Debljina je određivana na tri mesta duž uzorka (na približno 1/4, 1/2 i 3/4 dužine), a za dalju analizu korišćena je srednja vrednost. Stvarni stepen upresovanja (CR_r) izračunat je prema jednačini (1):

$$CR_r = \left(\frac{h_{init} - h_{dens}}{h_{init}} \right) \times 100 [\%] \quad (1)$$

Gde je:

h_{init} - početna debljina uzorka pre upresovanja (mm),

h_{dens} - debljina uzorka neposredno nakon densifikacije (mm);

Pored realizovanog stepena upresovanja, određena je i elastična relaksacija (SB), koja predstavlja trenutni povrat dela deformacije nakon rasterećenja prese. SB je izračunat prema jednačini (2):

$$SB = \left(\frac{h_{dens} - h_{targ}}{h_{init} - h_{targ}} \right) \times 100 [\%] \quad (2)$$

Gde je:

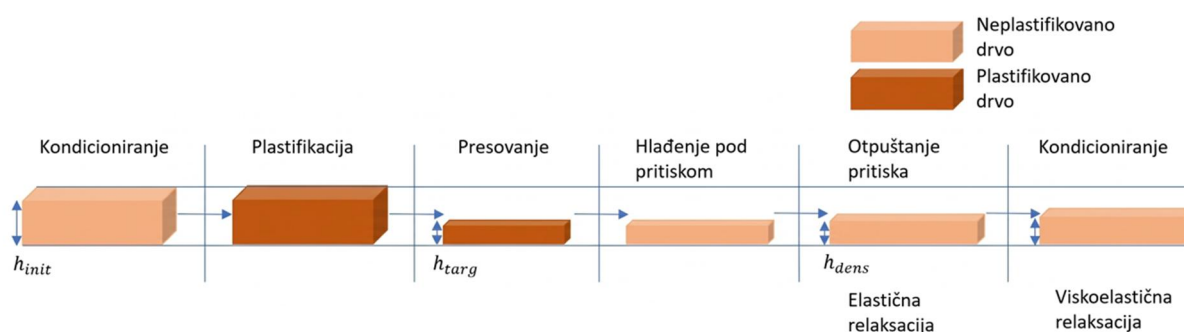
h_{dens} - debljina uzorka neposredno nakon densifikacije (mm),

h_{targ} - ciljane (teorijske) debljine definisane položajem metalnih graničnika prese (mm),

h_{init} - početna debljina uzorka pre upresovanja (mm);

Vrednost SB izražava procenat elastične deformacije u odnosu na ukupnu planiranu kompresiju, odnosno razliku između početne i ciljane debljine (Slika 12). Niže vrednosti SB ukazuju na efikasnije „zaključavanje“ deformacije tokom procesa

densifikacije, dok više vrednosti SB ukazuju na izraženiju elastičnu komponentu deformacije. Važno je naglasiti da se ovako definisana elastična relaksacija odnosi isključivo na trenutni oporavak neposredno nakon rasterećenja. Dugoročna dimenziona stabilnost densifikovanog drveta, odnosno trajni povrat deformacije (SR) usled promene vlažnosti ili tokom naknadnog kondicioniranja, analizirana je u posebnom poglavlju.



Slika 12. Shematski prikaz različitih faza procesa densifikacije i pratećih pojava elastične i viskoelastične relaksacije

4.3.2 Vlažnost i gustina drveta

Pre ispitivanja fizičkih i mehaničkih svojstava THM densifikovanog drveta topole, svi pripremljeni uzorci (Slika 13) su kondicionirani u trajanju od dva meseca pri temperaturi 20 ± 2 °C i relativnoj vlažnosti vazduha $65 \pm 5\%$ (klima komora Kambič KK105CH). Ovaj period kondicioniranja izabran je kako bi se obezbedilo postizanje ravnotežne vlažnosti uzoraka pod identičnim klimatskim uslovima, čime je omogućeno smisljeno poređenje između različitih stepena upresovanja i tretmanskih grupa.



Slika 13. Uzorci nakon THM tretmana, grupisani po CR i primenjenom tretmanu

Iz svakog uzorka je izrezan manji uzorak, dužine 2 cm, namenjen određivanju vlažnosti drveta i gustine u uslovima ispitivanja, kao i gustine u apsolutno suvom stanju. Vlažnost drveta određivana je gravimetrijskom metodom u skladu sa standardom (EN 13183-1: 2002). Gustina pri uslovima ispitivanja i gustina u apsolutno suvom stanju određivane su prema standardu (ISO 13061-2: 2014), na osnovu izmerene mase i dimenzija uzoraka pri odgovarajućem stanju vlažnosti. Za merenje mase korišćena je vaga Ohaus AV812CM, tačnosti $\pm 0,01$ g, dok su dimenzije merene kljunastim merilom Insize 1108-200, tačnosti $\pm 0,03$ mm (Slika 14).

Relativni porast gustine ($\Delta\rho$) izračunat je radi kvantifikacije efekta densifikacije nezavisno od početne gustine materijala. Parametar $\Delta\rho$ definisan je kao odnos prosečne gustine densifikovanih uzoraka pri određenom stepenu upresovanja i prosečne gustine odgovarajuće grupe pri CR = 0 (za isti tretman), prema izrazu (3):

$$\Delta\rho_{tr} = \frac{\rho_{CR,tr}}{\rho_{CR(0),tr}} \quad (3)$$

gde je:

$\Delta\rho_{tr}$ - relativni porast gustine za dati tretman (Ref, US, TM, US+TM)

$\rho_{CR,tr}$ - prosečna gustina za dati CR i tretman

$\rho_{CR(0),tr}$ - prosečna gustina za isti tretman pri CR = 0



Slika 14. Merenje mase i dimenzija uzoraka

4.3.3 Viskoelastična relaksacija

Viskoelastična relaksacija (SR) densifikovanog drveta određivana je primenom dva eksperimentalna pristupa: (i) potapanjem uzoraka u vodu, i (ii) izlaganjem uzoraka kontrolisanim uslovima relativne vlažnosti vazduha (RH). S obzirom na to da SR predstavlja jedno od najvažnijih svojstava densifikovanog drveta, oba pristupa su primenjena kako bi se obuhvatilo ponašanje materijala pri direktnom vlaženju vodom, kao i pri promenama sadržaja vlage usled sorpcije vodene pare iz vazduha.

(i) Eksperiment cikličnog potapanja u vodu i sušenja densifikovanog drveta

Za ispitivanje viskoelastične relaksacije i sorpcionog ponašanja u vodi, korišćeno je po pet uzoraka za svaku tretmansku grupu (Ref., US, TM i US+TM) u okviru tri nivoa upresovanja, uključujući i kontrolnu, nedensifikovanu grupu – ukupno 80 uzoraka. Dimenzije u radijalnom i tangencijalnom pravcu su bile približno 20×20 mm, dok je radijalna dimenzija odgovarala debljini uzorka i ostvarenom stepenu densifikacije.

Pre početka prvog ciklusa, svi uzorci su osušeni do apsolutno suvog stanja, nakon čega su određene njihova masa i debljina (dimenzija u radijalnom pravcu). Merenje je vršeno digitalnim kljunastim merilom sa tačnošću od $\pm 0,03$ mm. Početna debljina nedensifikovanog uzorka u apsolutno suvom stanju ($h_{init,0}$) nije određivana pojedinačno pre procesa densifikacije. Eksperimentalna postavka to nije dozvoljavala, jer je densifikacija izvođena na uzorcima većih dimenzija, koji su tek nakon završetka procesa razrezivani na po dva manja uzorka za dalja ispitivanja. Takođe, uzorci namenjeni densifikaciji nisu sušeni do apsolutno suvog stanja pre procesa, kako bi se očuvali odgovarajući uslovi vlažnosti potrebni za plastifikaciju drveta tokom THM tretmana.

Zbog toga je početna debljina u apsolutno suvom stanju procenjivana na osnovu odgovarajućih kontrolnih uzoraka iz iste daske i istog anatomskog položaja. Kontrolni uzorci nisu bili podvrgnuti densifikaciji, već su naknadno sušeni do apsolutno suvog stanja, a njihove dimenzije korišćene su kao referentne vrednosti za određivanje početne debljine uparenih densifikovanih uzoraka, u skladu sa uparenim dizajnom uzorkovanja.



Slika 15. Uzorci za eksperiment u vodi (levo) i uzorci izloženi vazduhu RH 60%, za eksperiment pri različitim RH (desno)

Uzorci su zatim potpuno potopljeni u destilovanu vodu temperature 20 °C (Slika 15). Masa i radijalna debljina određivane su u definisanim vremenskim intervalima tokom potapanja (Tabela 2). Nakon sedmog dana uzorci su sušeni do ASS i ponovo mereni. Ukupno su sprovedena tri ciklusa potapanja i sušenja, pri čemu je prvi trajao 7 dana, a drugi i treći ciklus su trajali po 15 dana.

Tabela 2. Vremenski raspored merenja mase i debljine uzoraka tokom potapanja, po ciklusima

Ciklus	Merenja – prvi dan (h)	Merenja – naredni dani (dani)
I	0,5; 2; 6; 24	3; 5; 7
II	0,5; 2; 6; 24	3; 5; 7; 11; 15
III	0,5; 2; 6; 24	3; 5; 7; 11; 15

- (ii) Eksperiment cikličnog izlaganja uslovima kontrolisane relativne vlažnosti vazduha (RH) i sušenja densifikovanog drveta

Za ispitivanje u kontrolisanim uslovima RH korišćeni su uzorci istih dimenzija, približno 20 × 20 mm, pri čemu je radijalna dimenzija odgovarala ostvarenom stepenu densifikacije. Za svaku kombinaciju tretmana i nivoa upresovanja korišćeno je po pet

uzoraka za svaki RH nivo (30%, 60%, 80% i 98%), ukupno 320 komada. Uzorci su raspoređeni u četiri odvojena seta, tako da je svaki set bio izložen samo jednom nivou relativne vlažnosti (Slika 15), ostvaren pomoću zasićenih rastvora soli u zatvorenim posudama (Tabela 3), pri temperaturi od približno 20 °C (18–21 °C).

Tabela 3. Zasićeni rastvori soli korišćeni za ostvarivanje kontrolisanih vrednosti relativne vlažnosti

Korišćena so (hemijska formula)	Relativna vlažnost RH (%)	Temperatura (°C)
Magnezijum-hlorid - $MgCl_2$	≈ 30	18–21
Natrijum-bromid - NaBr	≈ 60	18–21
Amonijum-sulfat - $(NH_4)_2SO_4$	≈ 80	18–21
Kalijum-sulfat - K_2SO_4	≈ 98	18–21

Kontrolisani uslovi RH ostvareni su pomoću zasićenih rastvora soli u zatvorenim desikatorima pri konstantnoj temperaturi od 20 °C. Tokom jednog ciklusa uzorci su kontinuirano izlagani odgovarajućem RH nivou u trajanju od 15 dana. Ukupno su sprovedena dva ciklusa vlaženja i sušenja.

Pre početka svakog ciklusa uzorci su sušeni do apsolutno suvog stanja (103 °C, 24 h), nakon čega su određene masa i radijalna debljina. Masa i radijalna debljina određivane su u definisanim vremenskim intervalima tokom dva ciklusa izlaganja kontrolisanim uslovima relativne vlažnosti (Tabela 4).

Tabela 4. Vremenski raspored merenja mase i debljine uzoraka tokom izlaganja kontrolisanim uslovima relativne vlažnosti, po ciklusima

Ciklus	Merenja – prvi dan (h)	Merenja – naredni dani (dani)
I	6; 24	2; 4; 6; 9; 12; 15
II	6; 24	2; 4; 6; 9; 12; 15

Viskoelastična relaksacija predstavlja meru trajnog povraćaja deformacije nakon ciklusa adsorpcije/desorpcije, nezavisno od toga da li je vlaženje ostvareno potapanjem u vodi ili izlaganjem kontrolisanom RH. SR nakon i-tog ciklusa izračunat je prema jednačini (4):

$$SR_i = \left(\frac{h_{dens,0i} - h_{dens,0}}{h_{init,0} - h_{dens,0}} \right) \times 100 [\%] \quad (4)$$

Gde je:

$h_{dens,0i}$ – debljina densifikovanog uzorka u apsolutno suvom stanju nakon i-tog ciklusa,

$h_{dens,0}$ – debljina densifikovanog uzorka u apsolutno suvom stanju pre prvog ciklusa,

$h_{init,0}$ – početna debljina nedensifikovanog uzorka u apsolutno suvom stanju (referentna vrednost iz uparenog uzorka iz iste daske);

U eksperimentu potapanja određene su vrednosti SR_1 , SR_2 i SR_3 , nakon svakog od 3 ciklusa, dok su u RH eksperimentu određene vrednosti nakon dva sprovedena ciklusa - SR_1 i SR_2 .

Pored ukupne viskoelastične relaksacije, analiziran je i dodatni parametar koji opisuje promenu SR između dva uzastopna ciklusa izlaganja vlazi, označen kao ΔSR . Ovaj parametar predstavlja meru dodatnog povratka deformacije koji nastaje tokom ponovnog izlaganja uzoraka istim uslovima relativne vlažnosti i definisan je kao razlika između vrednosti SR nakon drugog i prvog ciklusa, izraz (5):

$$\Delta SR = SR_2 - SR_1 \quad (5)$$

Na ovaj način omogućena je procena u kojoj meri prvi ciklus vlaženja nije bio dovoljan da izazove potpunu relaksaciju unutrašnjih naprezanja nastalih tokom procesa densifikacije. Vrednosti ΔSR izračunate su za sve kombinacije stepena upresovanja,

tretmana i nivoa relativne vlažnosti, a analizirane su primenom istog statističkog modela kao i osnovni parametar SR.

4.3.4 Dinamički modul elastičnosti

Dinamički modul elastičnosti (E_d) određen je metodom slobodnih rezonantnih vibracija (*resonant vibration method*), u longitudinalnom i savojnom (transverzalnom, flexuralnom) modu oscilovanja (Slika 16). Ispitivanja su sprovedena na uzorcima prethodno kondicioniranim na 20 ± 2 °C i $65 \pm 5\%$ relativne vlažnosti vazduha.

Uzorci su pobuđivani mehaničkim impulsom, nakon čega je registrovana osnovna rezonantna frekvencija prvog moda oscilovanja. Na osnovu izmerene frekvencije, geometrije uzorka i njegove gustine, izračunate su vrednosti dinamičkog modula elastičnosti.



Slika 16. Eksperimentalna postavka za određivanje dinamičkog modula (E_d) elastičnosti kod longitudinalnog i savojnog moda oscilovanja, metodom slobodnih rezonantnih vibracija

4.3.4.1 Longitudinalni dinamički modul elastičnosti

Longitudinalni dinamički modul elastičnosti ($E_{d,L}$) izračunat je na osnovu osnovne rezonantne frekvencije longitudinalnih vibracija prema jednačini (6):

$$E_{d,L} = \rho v_L^2 \quad (6)$$

Gde je:

ρ – gustina uzorka pri ispitnoj vlažnosti ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$);

v_L – brzina prostiranja longitudinalnog elastičnog talasa (m/s);

Brzina talasa određena je iz jednačine (7):

$$v_L = 2Lf_L \quad (7)$$

gde je:

L – dužina uzorka (m);

f_L – osnovna longitudinalna rezonantna frekvencija (Hz);

Konačno, izraz za longitudinalni dinamički modul elastičnosti dobija oblik (8):

$$E_{d,L} = \rho(2Lf_L)^2 \quad (8)$$

Ova metoda zasniva se na pretpostavci homogenog, linearnog elastičnog materijala, pri čemu se deformacije odvijaju u okviru elastičnog opsega bez pojave plastičnih ili viskoelastičnih efekata.

4.3.4.2 Savojni (*flexural*) dinamički modul elastičnosti

Savojni dinamički modul elastičnosti ($E_{d,F}$) određen je metodom poprečnih rezonantnih vibracija, na osnovu teorije grede slobodno oslonjene na krajevima (Euler-Bernoulli teorija). Modul je izračunat prema jednačini (9):

$$E_{d,F} = \frac{48\pi^2 \rho L^4 f_F^2}{\beta_1^4 h^2} \quad (9)$$

gde je:

f_F – osnovna savojna rezonantna frekvencija (Hz);

L – dužina uzorka (m);

h – visina (debljina) uzorka u smeru savijanja (m);

ρ – gustina uzorka ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$);

$\beta_1=4,73$ – konstanta za prvi mod vibracije slobodno oslonjene grede.

U praksi se često koristi pojednostavljeni numerički oblik jednačine (10):

$$E_{d,F} = 0,9465 \cdot \frac{\rho L^4 f_F^2}{h^2} \quad (10)$$

U cilju ispitivanja prirode zavisnosti između dinamičkog modula elastičnosti i gustine, primenjena je logaritamska transformacija eksperimentalnih podataka prema izrazu (11):

$$E_d = k \cdot \rho^n \quad (11)$$

gde je:

E_d – dinamički modul elastičnosti;

ρ – gustina;

k – konstanta proporcionalnosti;

n – eksponent koji opisuje intenzitet zavisnosti;

Primena logaritamske transformacije prema izrazu (12) omogućava linearizaciju ove relacije:

$$\log(E_d) = \log(k) + n \cdot \log(\rho) \quad (12)$$

Regresiona analiza sprovedena je primenom metode najmanjih kvadrata na logaritmovane vrednosti dinamičkog modula i gustine.

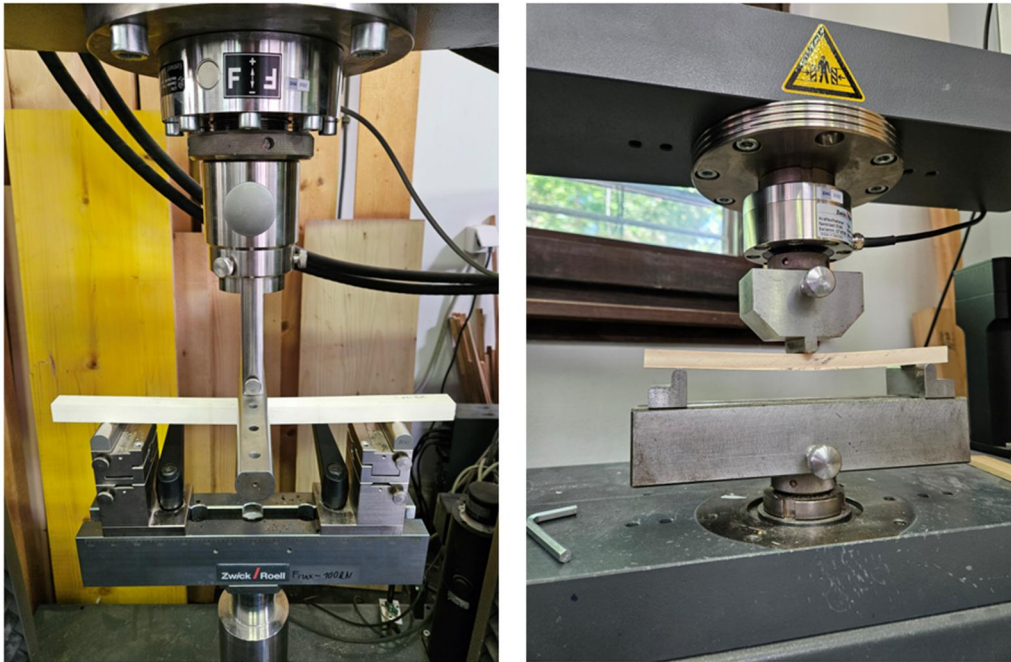
4.3.5 Savojna čvrstoća i modul elastičnosti pri savijanju

Ispitivanja savojnih svojstava sprovedena su u skladu sa standardom (EN 310:1993), korišćenjem dve univerzalne mašine za ispitivanje mehaničkih svojstava materijala - ZwickRoell Z100 i ZwickRoell Z005 (Slika 17).

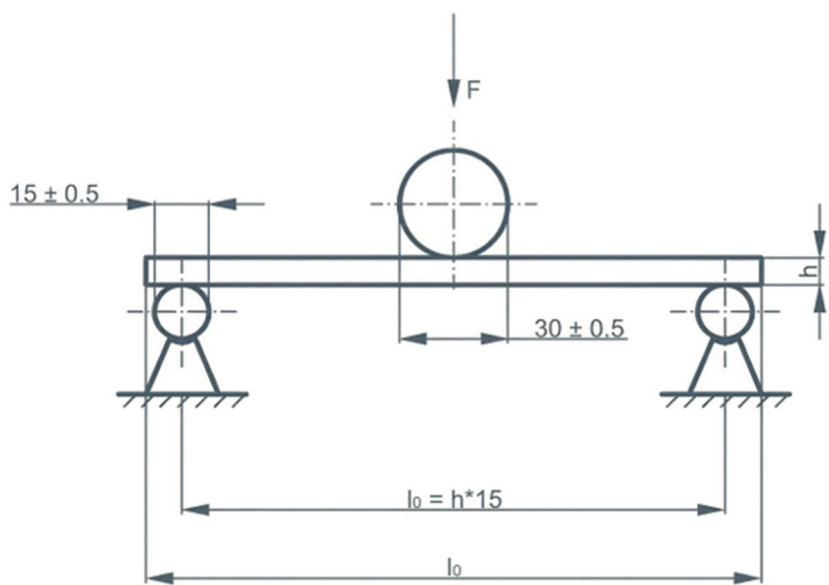
Zbog različitih konačnih debljina uzoraka, koje su rezultat THM densifikacije pri različitim stepenima upresovanja, raspon oslonaca i brzina opterećivanja prilagođeni su tako da se održi konstantan odnos raspona i debljine ($L/h = 15$) za sve grupe uzoraka (Tabela 5). Na ovaj način obezbeđena je mehanička uporedivost rezultata i usklađenost sa zahtevima standarda. Brzine opterećivanja odabrane su tako da se maksimalna sila dostigne u vremenskom intervalu od 60 ± 30 s, u skladu sa standardom.

Tabela 5. Izabrano rastojanje oslonaca i brzina opterećivanja pri ispitivanju čvrstoće i modula elastičnosti pri savijanju, prema debljini uzoraka nakon procesa THM densifikacije

CR [%]	Debljina uzorka h (mm)	Rastojanje oslonaca L (mm)	L/h	Brzina opterećivanja (mm/min)
0	20	300	15	7
50	10	150	15	5
60	8	120	15	4,5
65	7	105	15	4



Slika 17. Ispitivanje savojnih svojstava densifikovanog drveta i kontrolnih uzoraka na mašinama ZwickRoell Z100 (levo) i ZwickRoell Z005 (desno)



Slika 18. Shematski prikaz eksperimentalne postavke za ispitivanje savojne čvrstoće (MOR) i modula elastičnosti (MOE),

Izabran je test u tri tačke - dve tačke oslonca i jedna tačka delovanja sile, tačno na polovini rastojanja oslonca (Slika 18). Sila je na uzorak delovala u radijalnom

anatomskom pravcu. Čvrstoća na savijanje (MOR) i modul elastičnosti (MOE) izračunati su u skladu sa standardom (EN 310: 1993), prema jednačinama (13) i (14):

$$MOR = \frac{3F_{max}l}{2bh^2} \quad (13)$$

$$MOE = \frac{l^3\Delta F}{4bh^3\Delta y} \quad (14)$$

Gde je:

F_{max} - maksimalna primenjena sila (N);

L - rastojanje oslonaca (mm);

b - širina uzorka (mm);

h - debljina uzorka (mm);

ΔF - porast sile u linearnom elastičnom području (N);

Δy - odgovarajući ugib na sredini rastojanja oslonaca (mm);

4.4 Statistička obrada podataka

Statistička obrada podataka sprovedena je u statističkom okruženju R (R Core Team, Beč, Austrija). Zbog primenjenog uparenog (matched-position) dizajna uzorkovanja, pri kojem više uzoraka potiče iz iste daske, primenjeni su linearni mešoviti modeli (Linear mixed model - LMM), kako bi se u obzir uzelo grupisanje uzoraka unutar dasaka (van de Pol & Wright, 2009). Faktor „daska“ uključen je u model kao slučajni intercept, čime je obuhvaćena varijabilnost svojstava unutar daske.

Za svako ispitivano svojstvo, osnovni model definisan je u sledećem obliku:

Svojstvo \sim CR \times Tretman + (1 | Daska)

gde su stepen upresovanja (CR), tretman (referentni, US, TM i US+TM), kao i njihova interakcija, tretirani kao fiksni efekti. Modeli su procenjivani korišćenjem funkcije *lmer* iz paketa *lme4*, dok je statistička značajnost fiksnih efekata testirana primenom analize varijanse tipa III (*anova* iz paketa *lmerTest*) uz Kenward–Roger aproksimaciju stepena slobode. Naknadna poređenja između tretmana izvršena su na osnovu procenjenih marginalnih sredina (*emmeans* paket), uz Tukey-korekciju za višestruka poređenja između svih parova tretmana (Liepiņš et al., 2023).

U pojedinim slučajevima modeli su prilagođeni specifičnostima posmatranih svojstava:

- Elastična relaksacija (SB) analiziran je isključivo za densifikovane uzorke ($CR > 0$), s obzirom na to da za referentne uzorke ($CR = 0$) ova veličina nije definisana. Shodno tome, modeli za SB nisu uključivali nivo $CR = 0$, već su definisani u sledećem obliku:

$$SB \sim CR \times \text{Tretman} + (1 \mid \text{Daska}), \quad CR \{50\%, 60\%, 65\% \};$$

čime je izbegnuto uključivanje strukturno nedostajućih vrednosti u analizu.

- Viskoelastična relaksacija (SR) analiziran je uz uključivanje dodatnog faktora ciklusa (prvi i drugi ciklus vlaženja i sušenja), kao i njegove interakcije sa ostalim faktorima. Time je omogućeno razdvajanje inicijalnog i naknadnog povratka deformacije. S obzirom na to da su merenja vršena na istim uzorcima kroz više ciklusa, u model je uključena zavisnost ponovljenih merenja. Model je definisan u sledećem obliku:

$$SR \sim CR \times \text{Tretman} \times \text{Ciklus} + (1 \mid \text{Daska/Uzorak})$$

Dodatno, analiziran je i parametar ΔSR , definisan kao razlika između vrednosti SR u drugom i prvom ciklusu ($\Delta SR = SR_2 - SR_1$), čime je kvantifikovan dodatni povrat deformacije usled ponovljenog izlaganja vlazi.

- Kod analize mehaničkih svojstava (čvrstoća na savijanje i modul elastičnosti), u odabranim modelima dodatno su uključene kovarijante, pre svega gustina (ρ) i/ili vlažnost (MC) pri ispitivanju. Na ovaj način omogućeno je parcijalno izdvajanje efekta tretmana nezavisno od promena gustine i vlažnosti, koje su direktna posledica densifikacije i termičke modifikacije. Prošireni model imao je sledeći oblik:

Svojstvo $\sim CR \times Tretman + \rho + MC + (1 | Daska)$

Pored osnovne analize, dodatno su razmatrani sekundarni modeli za uzorke densifikovane pri CR = 50%, imajući u vidu da se ovaj stepen upresovanja smatra najrelevantnijim sa aspekta praktične primene, zbog povoljnog odnosa između unapređenja svojstava i očuvanja zapremine materijala. U tim modelima gustina pri uslovima ispitivanja uključena je kao kovarijata, sa ciljem detaljnijeg razdvajanja efekta tretmana od uticaja promena gustine, odnosno provere da li uočene razlike u svojstvima potiču od samog tretmana ili su samo posledica povećanja gustine materijala.

Pre primene modela proverene su osnovne pretpostavke normalnosti raspodele reziduala i homogenosti varijanse, vizuelnom analizom dijagrama (*QQ-plot* i dijagram reziduala u odnosu na predviđene vrednosti), kao i primenom odgovarajućih statističkih testova (npr. *Shapiro-Wilk* test za normalnost i *Levene-ov* test za homogenost varijansi).

Analiza i vizuelizacija podataka sprovedene su u programskom okruženju R, korišćenjem paketa *tidyverse* (za organizaciju, obradu i manipulaciju podacima), *ggplot2* (za grafički prikaz i vizuelizaciju rezultata), kao i paketa *lme4* i *lmerTest* (za

implementaciju linearnih mešovityh modela i procenu značajnosti efekata). Dodatno, paket *emmeans* korišćen je za izračunavanje procenjenih marginalnih sredina i sprovođenje *post hoc* poređenja.

Iako primena linearnih mešovityh modela omogućava robusnu analizu u uslovima nebalansiranog eksperimentalnog dizajna, određena ograničenja su ipak prisutna. Pre svega, smanjen broj uzoraka pri višim stepenima kompresije (CR = 60% i 65%), usled procesnih gubitaka, doveo je do smanjene statističke snage, što može otežati detekciju stvarnih efekata tretmana.

5 REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Posle THM densifikacije, uz primenu planiranih predtretmana i posttretmana, dobijeno je ukupno 240 uzoraka koji obuhvataju sva 4 nivoa upresovanja (0%, 50%, 60% i 65%), kao i sve 4 grupe tretmana (Ref., US, TM i US+TM). Iz navedenih 240 uzoraka, proizvedeno je ukupno 560 uzoraka za dalja ispitivanja.

5.1 Osnovne fizičke karakteristike THM densifikovanog drveta

5.1.1 Ostvareni stepen upresovanja (CR_r)

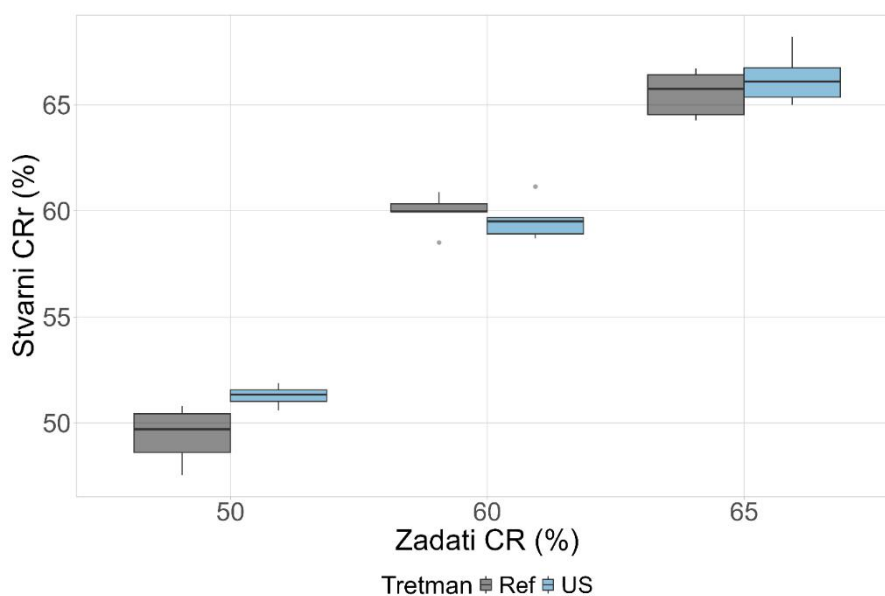
Ostvareni stepen upresovanja (CR_r) određen je na osnovu odnosa između početne debljine uzoraka pre densifikacije i debljine neposredno nakon rasterećenja prese. Analiza je obuhvatila uzorke densifikovane pri nominalnim stepenima upresovanja od 50%, 60% i 65%, sa i bez primenjenog ultrazvučnog predtretmana. U momentu kada su rađena ispitivanja ostvarenog stepena upresovanja i elastične relaksacije, još uvek nisu razrezani uzorci i odvojene dodatne grupe sa termičkim posttretmanom (TM i US+TM).

Tabela 6. Ostvareni stepen upresovanja (CR_r) i elastična relaksacija (SB) za različite stepene upresovanja i tretmane

CR [%]	Tretman	N	CR _r [%] (SD)	SB [%] (SD)
50	Ref.	20	49,49 (1,09) ^a	1,40 (2,07) ^a
	US	20	51,28 (0,38) ^b	-1,55 (0,60) ^b
60	Ref.	5	59,93 (0,88) ^a	0,36 (1,50) ^a
	US	5	59,59 (0,96) ^a	1,25 (1,48) ^a
65	Ref.	10	65,53 (1,00) ^a	-0,63 (1,53) ^a
	US	10	66,19 (1,01) ^a	-1,33 (1,49) ^a

^{a,b} - Različita slova unutar istog stepena upresovanja označavaju statistički značajne razlike između tretmana prema Tukey post-hoc testu ($p < 0,05$)

Kod referentnih uzoraka ostvarene su vrednosti od 49,5%, 59,9% i 65,5% za nominalne stepene upresovanja od 50%, 60% i 65%, respektivno (Tabela 6). Dobljene vrednosti su veoma bliske planiranim stepenima upresovanja, što ukazuje na stabilnost i preciznost procesa densifikacije.

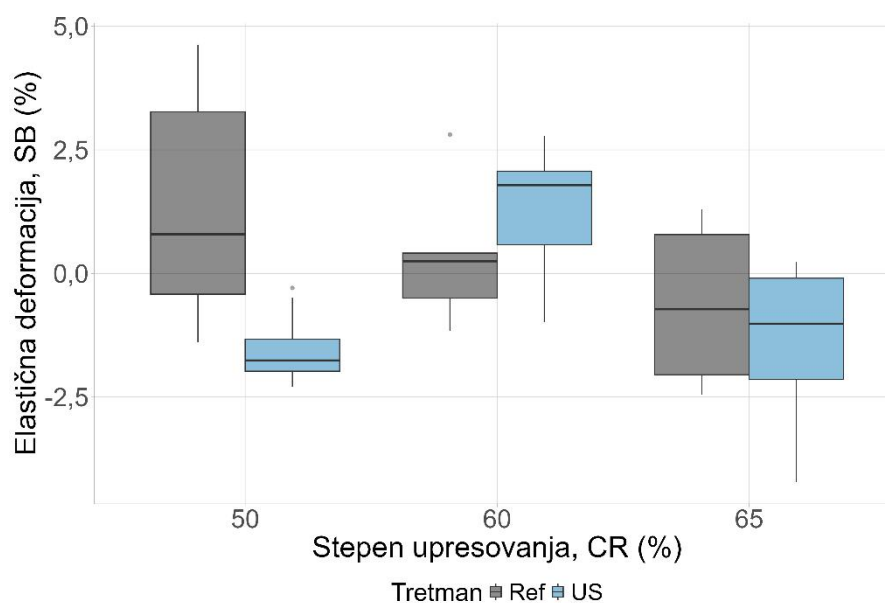


Slika 19. Ostvareni stepen upresovanja (CR_r) za različite nominalne stepene upresovanja (CR) i tretmane.

Takođe je, kod CR = 50%, utvrđen statistički značajan efekat ultrazvučnog predtretmana ($F = 8,17$, $p = 0,006$), kao i značajna interakcija između faktora CR i Treatment ($F = 6,94$, $p = 0,002$). Ultrazvučni predtretman doveo je do realizovanog stepena upresovanja pri CR = 50%, gde su uzorci sa ultrazvukom dostigli srednju vrednost od 51,3%, u poređenju sa 49,5% kod referentnih uzoraka ($p < 0,001$). Pri višim stepenima upresovanja (CR = 60% i CR = 65%) razlike između tretmana nisu bile statistički značajne.

5.1.2 Elastična relaksacija (SB)

Elastična relaksacija (SB) predstavlja trenutni povrat dela deformacije neposredno nakon rasterećenja prese i izražena je kao procenat u odnosu na planiranu kompresiju. Linearni mešoviti model pokazao je da SB značajno zavisi od nominalnog stepena upresovanja ($F = 4,52$, $p = 0,015$) i primene ultrazvučnog predtretmana ($F = 4,74$, $p = 0,035$), dok je interakcija između faktora CR i Treatment bila visoko statistički značajna ($F = 8,11$, $p < 0,001$).

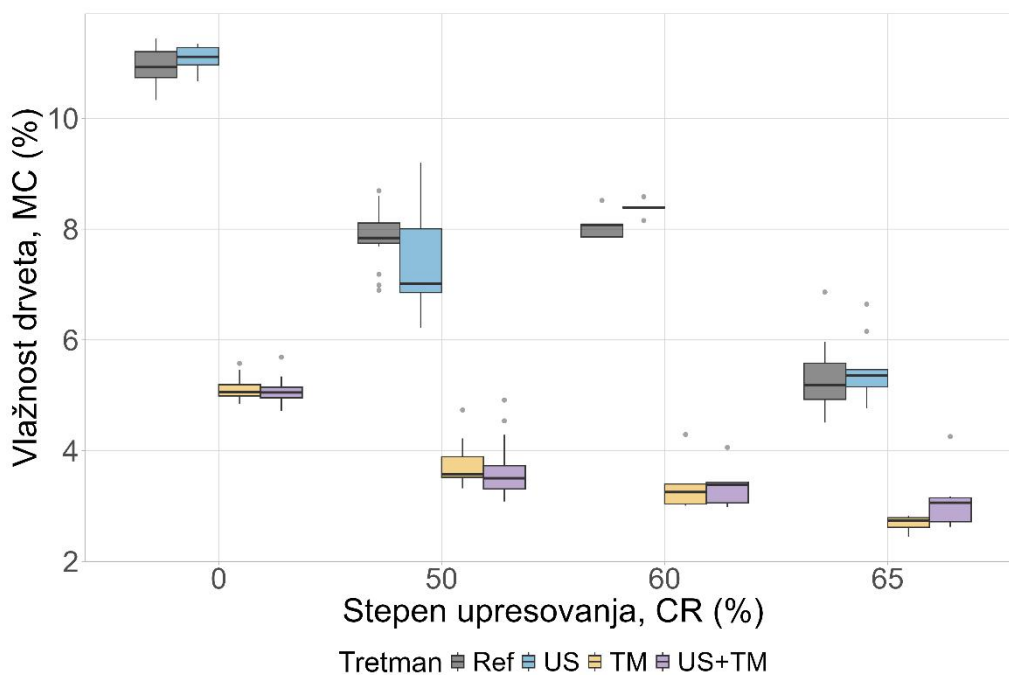


Slika 20. Vrednosti elastične relaksacije (SB) neposredno nakon densifikacije za različite stepene upresovanja (CR) i tretmane.

Najveće vrednosti elastične relaksacije (1,40%) zabeležene su pri CR = 50% kod referentnih uzoraka (Slika 20). U istoj grupi ultrazvučni predtretman doveo je do značajnog smanjenja SB, pri čemu je srednja vrednost iznosila -1,55% ($p < 0,001$). Post-hoc analiza ukazala je da primena US tretmana značajno utiče na rezultate samo pri CR = 50%, dok pri višim stepenima upresovanja (CR = 60% i CR = 65%) razlike između tretmana nisu bile statistički značajne. Kod uzoraka densifikovanih pri CR = 65%, takođe su zabeležene negativne srednje vrednosti SB, što ukazuje na vrlo mali ili praktično zanemarljiv trenutni povrat deformacije i verovatno pojavu dodatnog utezanja, kao kod US uzoraka pri CR = 50% (Tabela 6). Negativne vrednosti SB ukazuju na situacije u kojima je debljina uzorka nakon rasterećenja bila manja od teorijski definisane ciljne debljine određene položajem metalnih graničnika prese. Ova pojava može se objasniti efikasnom plastifikacijom i stabilizacijom deformacije dok je drvo još uvek pod pritiskom, naročito tokom faze hlađenja. U takvim uslovima dolazi do „zaključavanja“ strukture, uz minimalan ili izostao elastični povrat. Dodatno, blago smanjenje vlažnosti može dovesti do naknadnog utezanja i negativnih vrednosti SB.

5.1.3 Vlažnost

Vlažnost drveta (MC) nakon kondicioniranja razlikovala se između ispitivanih grupa, u zavisnosti od stepena upresovanja i primenjenog tretmana (Slika 21). Kod referentne grupe uzoraka, prosečna vlažnost iznosila je 10,94% (CR = 0), 7,87% (CR = 50), 8,12% (CR = 60) i 5,29% (CR = 65). U odnosu na nedensifikovano drvo (CR = 0), pri najvišem stepenu upresovanja (CR = 65) zabeleženo je smanjenje MC za približno 51%, što ukazuje na izražen uticaj procesa densifikacije na ravnotežnu vlažnost materijala (Tabela 7).



Slika 21. Vlažnost drveta (MC) nakon kondicioniranja u zavisnosti od stepena upresovanja (CR) i primenjenog tretmana (Ref, US, TM, US+TM).

Ultrazvučni predtretman (US) nije pokazao značajan uticaj na MC pri CR = 0, gde su vrednosti bile praktično identične referentnoj grupi (11,09% naspram 10,94%). Sličan obrazac zabeležen je i pri CR = 60 i CR = 65, dok je pri CR = 50 utvrđena mala, ali statistički značajna razlika između Ref i US grupe (7,87% naspram 7,41%).

Očekivano, termička modifikacija (TM), sa ili bez ultrazvučnog predtretmana, dovela je do izraženog i konzistentnog smanjenja vlažnosti na svim nivoima upresovanja. Pri CR = 0, prosečna MC kod TM i US+TM grupa iznosila je približno 5,1%, što predstavlja smanjenje od oko 53% u odnosu na referentnu grupu. Sličan trend zadržan je i kod densifikovanih uzoraka, gde su TM i US+TM grupe imale približno dva puta nižu vlažnost u poređenju sa Ref i US grupama.

Tabela 7. Vlažnost i gustina drveta nakon kondicioniranja u zavisnosti od stepena kompresije (CR) i tretmana (Ref, US, TM, US+TM)

CR [%]	Tretman	N	MC [%] (SD)	ρ_u [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] (SD)	ρ_0 [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] (SD)
0	Ref.	20	10,9 (0,3) ^a	469,6 (36,4) ^a	434,1 (43,8) ^a
	US	20	11,1 (0,2) ^a	463,3 (33,4) ^a	442,0 (52,2) ^a
	TM	20	5,1 (0,2) ^b	433,0 (33,6) ^b	417,4 (35,3) ^b
	US+TM	20	5,1 (0,2) ^b	427,9 (38,3) ^b	414,0 (36,0) ^b
50	Ref.	20	7,9 (0,5) ^a	864,7 (52,6) ^a	826,0 (49,0) ^a
	US	20	7,4 (0,8) ^a	905,4 (72,2) ^b	865,0 (68,0) ^b
	TM	20	3,7 (0,4) ^b	792,4 (71,5) ^c	760,0 (66,0) ^c
	US+TM	20	3,6 (0,5) ^b	864,5 (78,0) ^a	830,0 (72,0) ^a
60	Ref.	5	8,1 (0,3) ^a	1123,4 (57,3) ^a	1080,0 (55,0) ^a
	US	5	8,4 (0,2) ^a	1121,2 (76,5) ^a	1075,0 (73,0) ^a
	TM	5	3,4 (0,5) ^b	1004,2 (64,9) ^b	965,0 (61,0) ^b
	US+TM	5	3,4 (0,4) ^b	1050,4 (55,0) ^c	1010,0 (52,0) ^b
65	Ref.	10	5,3 (0,7) ^a	1183,4 (81,3) ^a	1135,0 (77,0) ^a
	US	10	5,4 (0,6) ^a	1190,4 (92,5) ^a	1140,0 (88,0) ^a
	TM	10	2,7 (0,1) ^b	1089,9 (44,1) ^b	1045,0 (42,0) ^b
	US+TM	10	3,1 (0,5) ^b	1089,0 (62,4) ^b	1040,0 (59,0) ^b

^{a,b} - Različita slova unutar istog stepena upresovanja označavaju statistički značajne razlike između tretmana prema Tukey post-hoc testu ($p < 0,05$)

Linearni mešoviti model (LMM), sa daskom kao slučajnim efektom i Kenward-Roger korekcijom stepena slobode, potvrdio je statistički značajan efekat stepena upresovanja ($F = 888,4$; $p < 0,001$), kao i značajan efekat tretmana ($F = 1445,8$; $p < 0,001$). Takođe je utvrđena statistički značajna interakcija između CR i tretmana ($F = 58,15$; $p < 0,001$), što ukazuje da se uticaj tretmana na vlažnost razlikuje u zavisnosti od nivoa upresovanja.

Post-hoc analiza (Tukey korekcija) pokazala je da između TM i US+TM grupa nije bilo statistički značajnih razlika ni na jednom nivou upresovanja ($p > 0,05$), dok su obe grupe imale značajno nižu vlažnost u odnosu na Ref i US ($p < 0,001$). Ultrazvučni predtretman samostalno nije pokazao konzistentan statistički značajan efekat, osim pri CR = 50, gde je zabeleženo blago smanjenje MC u odnosu na referentnu grupu.

Ukupno posmatrano, rezultati ukazuju da se smanjenje MC kod THM-modifikovanog drveta dominantno vezuje za termički posttretman, dok efekat upresovanja dodatno doprinosi redukciji vlažnosti, naročito pri višim stepenima densifikacije.

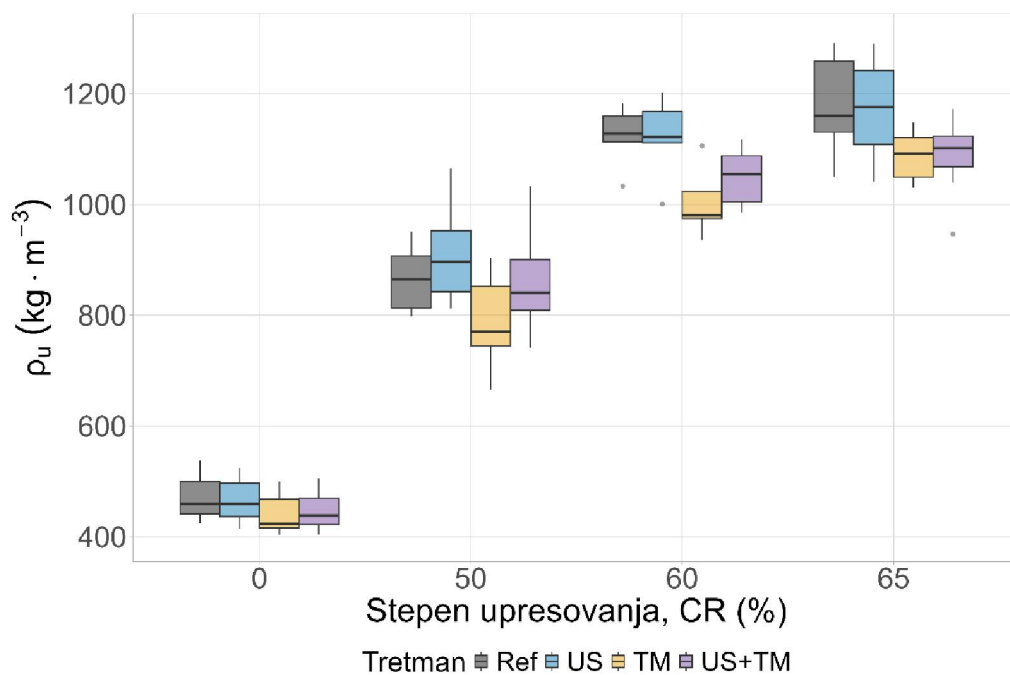
5.1.4 Gustina

- **Gustina pri uslovima ispitivanja (ρ_u):**

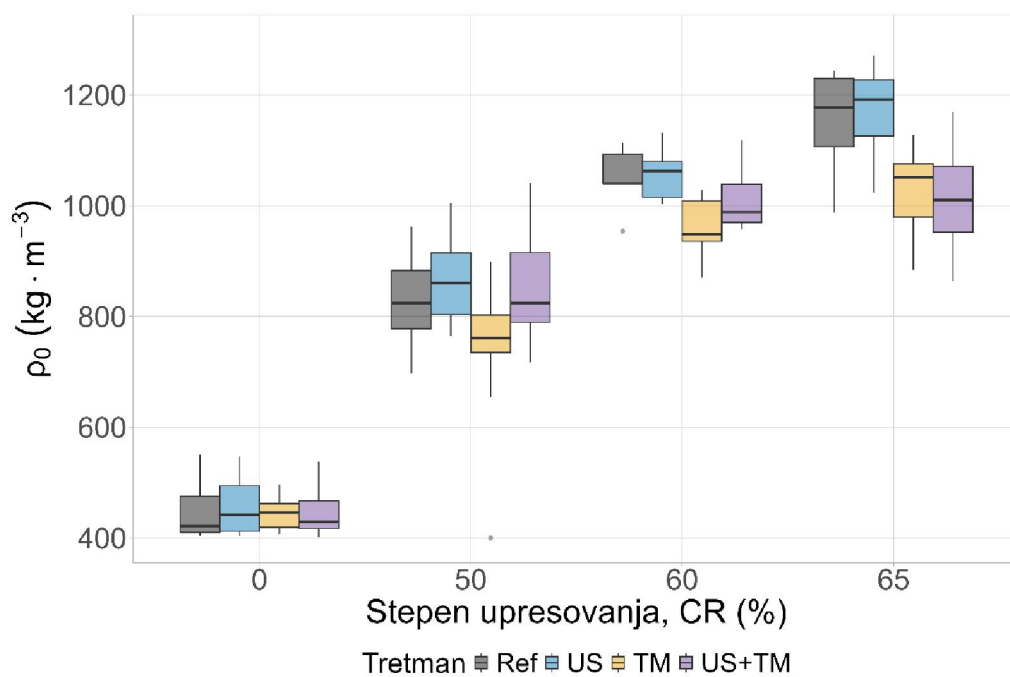
Gustina pri uslovima ispitivanja (ρ_u) pokazuje izrazit porast sa povećanjem stepena upresovanja (Slika 22). U referentnoj grupi prosečne vrednosti iznosile su približno $469 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (CR = 0), $864 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (CR = 50), $1123 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (CR = 60) i $1183 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (CR = 65). U odnosu na nedensifikovano drvo, gustina je pri najvišem stepenu upresovanja povećana približno 2,7 puta.

Linearni mešoviti model (LMM), u kojem je daska tretirana kao slučajni efekat, uz Kenward–Roger korekciju stepena slobode, pokazao je: visoko značajan efekat stepena upresovanja ($p < 0,001$), značajan efekat tretmana ($p < 0,001$), i statistički značajnu interakciju CR \times Treatment ($p < 0,001$). Dominantan faktor bio je stepen upresovanja ($F \approx 3946$), dok je efekat tretmana bio znatno manjeg intenziteta.

Post-hoc analiza pokazala je da: pri CR = 0, nema statistički značajne razlike između Ref i US grupa, dok TM i US+TM imaju značajno niže vrednosti gustine u odnosu na Ref; pri CR = 50, US grupa pokazuje značajno veću gustinu u odnosu na Ref; pri višim stepenima upresovanja (CR = 60 i 65) TM i US+TM grupe pokazuju statistički niže vrednosti gustine u odnosu na Ref i US. Ovi rezultati ukazuju da termički tretman utiče na postignutu gustinu, naročito pri višim stepenima upresovanja, dok ultrazvučni predtretman nema konzistentan efekat u celokupnom opsegu CR.



Slika 22. Gustina drveta pri uslovima ispitivanja (ρ_u) u zavisnosti od stepena upresovanja (CR) i tretmana (Ref, US, TM, US+TM).



Slika 23. Gustina drveta u apsolutno suvom stanju (ρ_0) u zavisnosti od stepena upresovanja (CR) i tretmana (Ref, US, TM, US+TM).

- **Gustina u apsolutno suvom stanju (ρ_0)**

Gustina u apsolutno suvom stanju (ρ_0) pokazala je isti opšti trend povećanja sa rastom stepena upresovanja (Slika 23). Prosečne vrednosti referentne grupe iznosile su približno $433 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (CR = 0), $825 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (CR = 50), $1032 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (CR = 60) i $1144 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (CR = 65).

Linearni mešoviti model potvrdio je: visoko značajan efekat stepena upresovanja ($p < 0,001$), značajan efekat tretmana ($p < 0,001$), značajnu interakciju CR \times Treatment ($p < 0,001$). Za razliku od ρ_u , kod ρ_0 efekat tretmana je slabije izražen i statistički potvrđen pre svega kod termički modifikovanih grupa pri višim stepenima upresovanja. Post-hoc analiza pokazala je: pri CR = 0 nema statistički značajnih razlika između tretmana, pri CR = 50 i 60 TM grupa ima niže vrednosti gustine u odnosu na Ref, pri CR = 65 TM i US+TM pokazuju značajno nižu gustinu u odnosu na Ref i US. Ovakav rezultat ukazuje da termički tretman dovodi do smanjenja gustine u apsolutno suvom stanju, što je u skladu sa poznatim mehanizmima parcijalne degradacije hemijskih komponenti ćelijskog zida tokom termičke modifikacije.

Relativni porast gustine ($\Delta\rho$), izražen kao odnos prosečne gustine densifikovanih uzoraka i prosečne gustine odgovarajuće grupe pri CR = 0, pokazao je da se gustina kod svih tretmana značajno povećavala sa porastom stepena upresovanja. Na osnovu apsolutno suve gustine (ρ_0), vrednosti $\Delta\rho$ kod referentne grupe iznosile su 1,90 (CR = 50), 2,49 (CR = 60) i 2,61 (CR = 65), dok su kod US grupe iznosile 1,96, 2,43 i 2,58. Kod termički modifikovanih uzoraka relativni porast gustine bio je nešto niži i iznosio je 1,82, 2,31 i 2,50 za TM grupu, odnosno 2,00, 2,44 i 2,51 za US+TM grupu. Ovi rezultati ukazuju da je efekat densifikacije bio izražen kod svih tretmana, ali i da je termička modifikacija delimično umanjila konačni porast gustine, najverovatnije usled gubitka mase tokom termičke degradacije.

5.2 Viskoelastična relaksacija (SR)

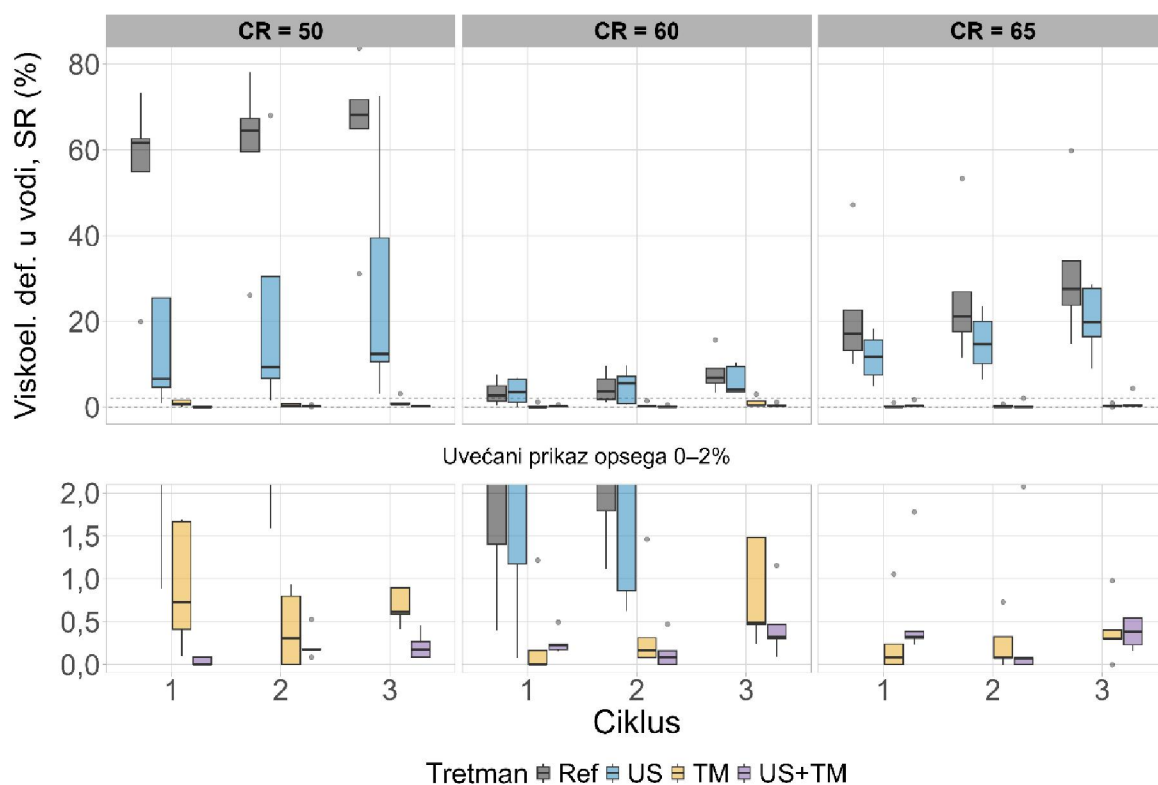
5.2.1 Viskoelastična relaksacija nakon potpunog potapanja u vodu

Viskoelastična deformacija (SR) je pojava koja kod densifikovanog drveta predstavlja meru povratka na početne dimenzije, nakon ponovnog izlaganja vlažnim uslovima. U ovom istraživanju jedan od načina određivanja SR zasnovan je na promeni debljine uzoraka (radijalni pravac) u apsolutno suvom stanju, nakon uzastopnih ciklusa potapanja u vodu i sušenja. U eksperimentu su određene vrednosti SR nakon tri uzastopna ciklusa potapanja u vodu i sušenja do apsolutno suvog stanja (SR_1 , SR_2 i SR_3), prema jednačini (3).

Na osnovu distribucije rezultata (Slika 24) može se uočiti da se vrednosti SR značajno razlikuju u zavisnosti od stepena upresovanja i primenjenog tretmana. Pri nižem stepenu upresovanja ($CR = 50\%$) referentni uzorci pokazuju najviše vrednosti SR, koje se u većini slučajeva kreću približno u opsegu 60–75%. Primena ultrazvučnog predtretmana dovodi do vidljivog smanjenja SR, pri čemu se vrednosti uglavnom nalaze u opsegu 30–45%, što predstavlja smanjenje od približno 30–40% u odnosu na referentne uzorke. Najniže vrednosti SR zabeležene su kod uzoraka podvrgnutih termičkom posttretmanu, gde se SR kod tretmana TM i US+TM kreće u veoma uskom opsegu od približno 0 do 2%, odnosno više od 95 % niže u odnosu na referentne uzorke.

Pri stepenu upresovanja $CR = 60\%$ vrednosti SR su značajno niže u poređenju sa $CR = 50\%$. Većina rezultata nalazi se u opsegu od približno 0 do 8%, pri čemu su razlike između tretmana znatno manje izražene. Referentni uzorci i uzorci sa ultrazvučnim predtretmanom pokazuju slične vrednosti SR, dok su vrednosti kod termički modifikovanih uzoraka tek neznatno niže.

Pri najvećem stepenu upresovanja (CR = 65%) ponovo se uočava jasnija razlika između tretmana. Referentni uzorci pokazuju vrednosti SR približno u opsegu 20–30%, dok se kod ultrazvučno tretiranih uzoraka SR uglavnom kreće između 10 i 20%. Nasuprot tome, uzorci podvrgnuti termičkom posttretmanu zadržavaju veoma nizak nivo povratka deformacije, pri čemu vrednosti SR kod tretmana TM i US+TM ostaju u opsegu približno 0–3%. Na grafičkom prikazu može se uočiti i blaga tendencija povećanja SR sa brojem ciklusa, naročito kod referentnih i ultrazvučno tretiranih uzoraka, dok kod termički modifikovanih uzoraka vrednosti ostaju gotovo nepromenjene i bliske nuli kroz sva tri ciklusa.



Slika 24. Viskoelastična deformacija (SR) nakon tri ciklusa potapanja u vodi i sušenja do apsolutno suvog stanja, u zavisnosti od CR i primenjenog tretmana.

Radi statističke provere uticaja analiziranih faktora primenjen je linearni mešoviti model, pri čemu su kao fiksni faktori uključeni broj ciklusa, stepen upresovanja i tretman,

dok je faktor daska uključen kao slučajni efekat. Rezultati analize varijanse pokazali su da broj ciklusa nije imao statistički značajan uticaj na SR ($p = 0,2298$). Ovakav rezultat je dobijen uprkos činjenici da su drugi i treći ciklus trajali duže, što bi se moglo očekivati da dovede do dodatne relaksacije. Deformacije nastale tokom drugog i trećeg ciklusa su bile statistički zanemarljive, što ukazuje da je najveći deo viskoelastične relaksacije ostvaren već tokom prvog ciklusa. Procene marginalnih sredina ukazuju na blagi porast SR od prvog ka trećem ciklusu (10,3 %, 11,2 % i 13,6 %), ali razlike između pojedinačnih ciklusa nisu bile statistički značajne ($p > 0,05$).

Nasuprot tome, stepen upresovanja i primenjeni tretman imali su statistički značajan uticaj ($p < 0,001$). Takođe je utvrđena statistički značajna interakcija između stepena upresovanja i tretmana ($CR \times Treatment$, $p < 0,001$), što ukazuje da efekat primenjenih modifikacionih postupaka zavisi od intenziteta densifikacije.

Dodatno je utvrđeno da interakcije koje uključuju faktor ciklusa nisu bile statistički značajne ($CR \times Ciklus$, $p = 0,9845$; $Tretman \times Ciklus$, $p = 0,8325$; $CR \times Tretman \times Ciklus$, $p = 1,0000$), što ukazuje da ponovljeni ciklusi potapanja i sušenja nisu značajno menjali obrazac razlika između tretmana niti između nivoa upresovanja.

Detaljna analiza parnih poređenja pokazala je da pri $CR = 50 \%$ postoje statistički značajne razlike između većine tretmana. Referentni uzorci imaju u proseku oko 33% veći SR od US uzoraka, dok je razlika između referentnih i termički modifikovanih uzoraka veća od 58%. Uzorci tretirani ultrazvukom takođe pokazuju značajno veći SR u odnosu na termički modifikovane uzorke, sa razlikom od približno 25%. Između tretmana TM i US+TM nije utvrđena statistički značajna razlika.

Pri $CR = 60 \%$ nisu utvrđene statistički značajne razlike između tretmana, što ukazuje da sama densifikacija pri ovom stepenu upresovanja dovodi do relativno stabilne deformacije materijala, nezavisno od primene dodatnih modifikacionih postupaka.

Pri CR = 65 % razlike između tretmana ponovo postaju statistički značajne. Referentni uzorci imaju u proseku oko 11% veći SR od uzoraka tretiranih ultrazvukom, dok je razlika između referentnih i termički modifikovanih uzoraka približno 26%. Razlika između US i termički tretiranih uzoraka iznosi približno 15%, dok između tretmana TM i US+TM nije utvrđena statistički značajna razlika.

Posmatrano unutar pojedinačnih nivoa upresovanja, procenjene srednje vrednosti SR pokazuju blagi porast od prvog ka trećem ciklusu — pri CR = 50 % od približno 20,4 % na 23,2 %, pri CR = 60 % od oko 1,9 % na 4,0 %, a pri CR = 65 % od oko 8,6 % na 13,5 % — ali nijedna od ovih promena nije bila statistički značajna ($p > 0,05$).

Posebno je uočljivo da primena termičkog posttretmana dovodi do gotovo potpune eliminacije SR kod densifikovanog drveta. Kod uzoraka tretiranih postupcima TM i US+TM vrednosti SR u svim slučajevima ostaju u veoma uskom opsegu niskih vrednosti, najčešće ispod 3%, što predstavlja smanjenje od približno 90–97% u odnosu na referentne uzorke.

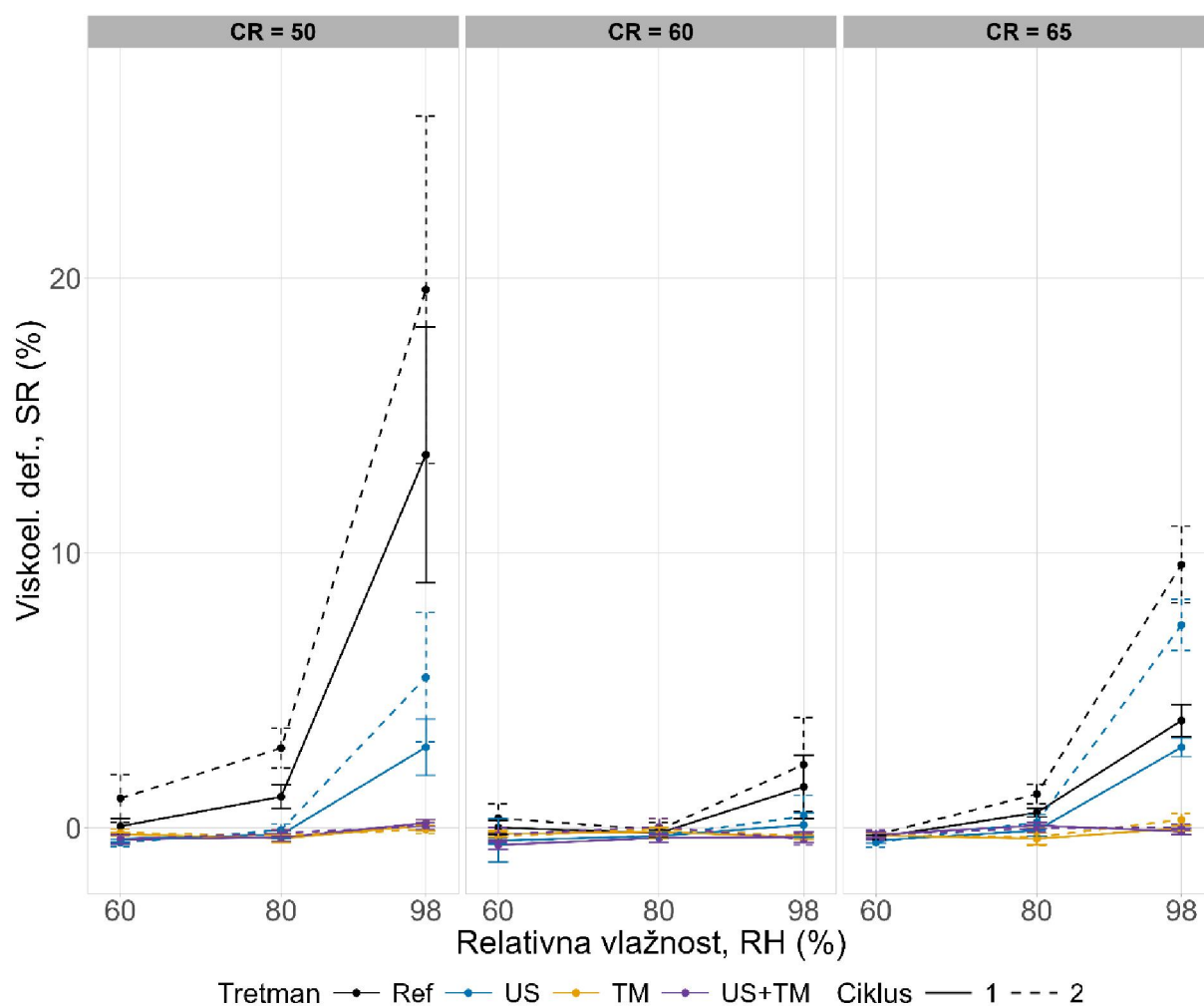
Ukupno posmatrano, rezultati ukazuju da termički posttretman ima ključnu ulogu u stabilizaciji deformacije densifikovanog drveta, dok ultrazvučni predtretman samostalno dovodi do umerenog smanjenja viskoelastičnih deformacija, naročito pri 50%. Efikasnost ovih postupaka, međutim, značajno zavisi od primenjenog stepena upresovanja.

5.2.2 Viskoelastična relaksacija pri kontrolisanoj RH

U eksperimentu su određene vrednosti SR nakon dva uzastopna ciklusa izlaganja uzoraka relativnim vlažnostima od 30%, 60%, 80% i 98% (SR_1 i SR_2), pri čemu su analizirani uticaji stepena upresovanja (CR = 50%, 60% i 65%) i primenjenog tretmana (Ref., US, TM i US+TM).

Pri RH = 30% vrednosti SR bile su vrlo male kod svih kombinacija tretmana i stepena upresovanja, bez statistički značajnih razlika između tretmana i bez praktično relevantnog povratka deformacije. Zbog toga ovaj nivo relativne vlažnosti nije uključen u dalju detaljnu analizu i grafički prikaz, već su rezultati dalje razmatrani za RH = 60%, 80% i 98%, gde je viskoelastična relaksacija bila jasnije izražena.

Može se uočiti da se SR sa porastom relativne vlažnosti jasno povećava, pri čemu je efekat naročito izražen pri RH = 98% (Slika 25). Istovremeno, razlike između tretmana i stepena upresovanja postaju sve izraženije sa porastom vlažnosti.



Slika 25. Viskoelastična deformacija (SR) u funkciji relativne vlažnosti (RH = 60, 80 i 98%) za densifikovane uzorke sa različitim stepenima upresovanja (CR = 50%, 60% i 65%) i kombinacijama tretmana (Ref, US, TM i US+TM).

Pri RH = 60% vrednosti SR su veoma male kod svih kombinacija tretmana i stepena upresovanja. Srednje vrednosti SR kreću se uglavnom oko nule, od približno -0,49 do 0,57%, što ukazuje da pri ovom nivou vlažnosti vazduha praktično ne dolazi do značajnijeg povratka deformacije densifikovanog drveta. Teoretski, negativne vrednosti SR nisu očekivane, te se ovakva odstupanja mogu pripisati veoma malim apsolutnim promenama dimenzija i ograničenoj preciznosti merenja. Pri RH = 80% dolazi do blagog povećanja SR, ali su vrednosti i dalje relativno male. Najveće vrednosti SR zabeležene su kod referentnih uzoraka pri CR = 50 % (oko 2,02 %), dok se kod većine ostalih grupa SR kreće približno između -0,36 i 0,90 %. Ovi rezultati ukazuju da pri RH = 60% i RH = 80 još uvek ne dolazi do izraženog povratka deformacije (relaksacije), niti su jasne razlike između tretmana.

Nasuprot tome, pri RH = 98% dolazi do naglog porasta SR, pri čemu se efekat veoma jasno razlikuje između tretmana i stepena upresovanja. Pri CR = 50% referentni uzorci pokazuju prosečnu vrednost SR od 16,58 %, dok je kod ultrazvučno tretiranih uzoraka SR znatno niži i iznosi 4,21%. Kod termički modifikovanih uzoraka SR je praktično eliminisan, sa vrednostima od svega 0,02% kod TM i 0,1 % kod US+TM. Pri CR = 60% sve vrednosti ostaju veoma male, čak i pri RH = 98%, pri čemu se SR kreće od približno -0,37 do 1,90 %, bez jasnog razdvajanja tretmana. Pri CR = 65% ponovo dolazi do izraženog povećanja SR kod referentnih i US uzoraka, sa vrednostima od 6,74 % kod Ref. i 5,16 % kod US, dok TM i US+TM ostaju praktično na nivou nultog povratka deformacije (0,15 % i -0,05 %).

Statistička analiza za RH = 60, 80 i 98% sprovedena je primenom linearnog mešovitog modela, pri čemu su kao fiksni faktori uključeni RH, stepen upresovanja, tretman i broj ciklusa, dok je faktor daska uključen kao slučajni efekat. Rezultati analize varijanse pokazali su da svi glavni faktori imaju statistički značajan uticaj na SR: relativna

vlažnost ($p < 0,001$), stepen upresovanja ($p < 0,001$), tretman ($p < 0,001$) i broj ciklusa ($p < 0,01$). Pored toga, utvrđene su i statistički značajne interakcije RH \times CR ($p < 0,001$), RH \times Tretman ($p < 0,001$), CR \times Tretman ($p < 0,001$), RH \times Ciklus ($p < 0,05$), Tretman \times Ciklus ($p < 0,05$) i naročito RH \times CR \times Tretman ($p < 0,001$), što pokazuje da efekat tretmana zavisi i od nivoa vlažnosti vazduha i od intenziteta densifikacije.

Parna poređenja prosečnih modelovanih vrednosti tretmana unutar svakog stepena upresovanja, prosečeno preko RH i ciklusa, pokazala su da je pri CR = 50 % SR kod referentnih uzoraka (6,39 %) statistički značajno veći od svih ostalih tretmana: u odnosu na US razlika iznosi 5,20% ($p < 0,0001$), a u odnosu na TM i US+TM više od 6,5% ($p < 0,0001$). Između TM i US+TM nije utvrđena statistički značajna razlika. Pri CR = 60% nisu utvrđene statistički značajne razlike između tretmana, a prosečne modelovane vrednosti svih grupa ostale su u vrlo uskom opsegu od približno -0,32 do 0,65 %. Pri CR = 65% referentni uzorci (2,45%) imali su statistički značajno veći SR od TM (-0,16%; $p < 0,0001$) i US+TM (-0,08%; $p = 0,0002$), dok su i US uzorci (1,58%) imali značajno veći SR od TM ($p = 0,0198$) i US+TM ($p = 0,0284$). Ovi rezultati pokazuju da termički posttretman dovodi do veoma efikasnog smanjenja SR, naročito pri CR = 50% i CR = 65%, dok pri CR = 60 %, u ovom ispitivanju, sam stepen upresovanja obezbedio veoma stabilno ponašanje materijala.

Još jasnija slika dobija se kada se tretmani uporede unutar istog stepena upresovanja i istog nivoa relativne vlažnosti. Pri RH = 60% i RH = 80% nisu utvrđene statistički značajne razlike između tretmana, bez obzira na stepen upresovanja. Nasuprot tome, pri RH = 98% razlike između tretmana postaju veoma izražene. Pri CR = 50% referentni uzorci imali su značajno veći SR od svih ostalih tretmana ($p < 0,0001$), dok su i US uzorci imali značajno veći SR od TM ($p = 0,0004$) i US+TM ($p = 0,0005$). Pri CR = 65% referentni i ultrazvučno tretirani uzorci imali su statistički značajno veći SR od termički

modifikovanih uzoraka ($p < 0,0001$), dok pri CR = 60% ni pri RH = 98% nisu utvrđene značajne razlike između tretmana. Ovaj obrazac potvrđuje da se stabilizacioni efekat termičkog posttretmana statistički jasno ispoljava tek kada relativna vlažnost postane dovoljno visoka da aktivira značajniji povrat deformacija (relaksaciju), odnosno pri RH = 98%.

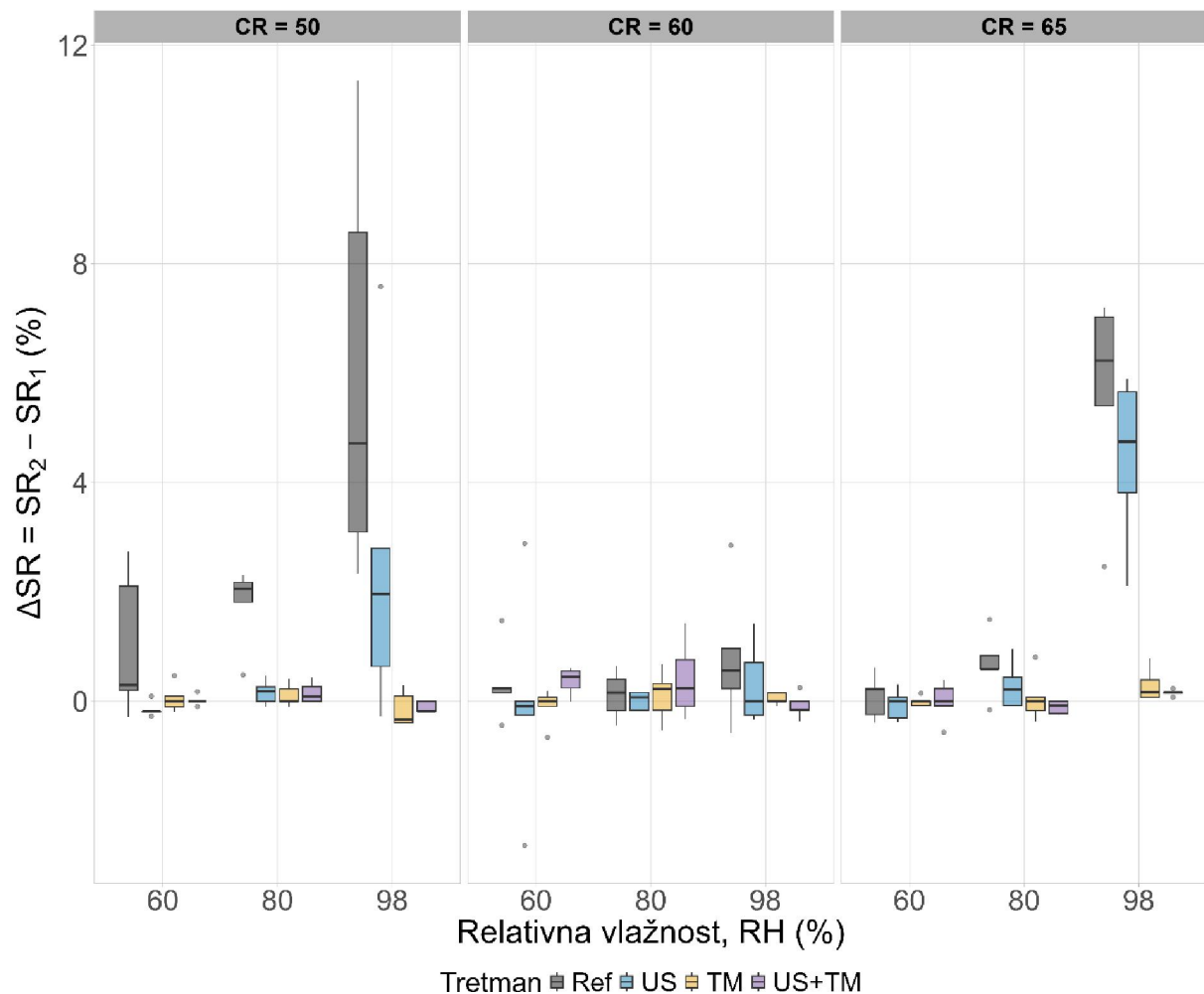
Pored ukupnog SR, analiziran je i dodatni podatak o razlici između dva uzastopna ciklusa, definisan kao ΔSR . Ovaj parametar predstavlja meru dodatnog povratka deformacije koji se javlja nakon drugog ciklusa izlaganja vlazi, odnosno pokazuje u kojoj meri prvi ciklus nije bio dovoljan da izazove potpunu relaksaciju deformacije.

Rezultati pokazuju da je dodatna deformacija (ΔSR) veoma mala pri RH = 60% i RH = 80%, dok se pri RH = 98 % naglo povećava, naročito kod referentnih uzoraka (Slika 26). Globalna analiza varijanse pokazala je da relativna vlažnost ($p < 0,001$), stepen upresovanja ($p = 0,0065$) i tretman ($p < 0,001$) imaju statistički značajan uticaj na ΔSR , kao i njihove interakcije RH \times CR ($p < 0,001$), RH \times Tretman ($p < 0,001$), CR \times Tretman ($p < 0,001$) i RH \times CR \times Tretman ($p = 0,0055$).

Kada se ΔSR posmatra unutar istih RH i CR uslova, najizraženije razlike ponovo se javljaju pri RH = 98%. Pri CR = 50% referentni uzorci pokazuju ΔSR od 6,01%, ultrazvučno tretirani 2,54%, dok TM i US+TM ostaju praktično na nuli (-0,14% i -0,11%). Pri CR = 65% referentni i US uzorci pokazuju ΔSR od 5,67% i 4,45%, dok su TM i US+TM ponovo blizu nule (0,30% i 0,16%). Pri CR = 60% ΔSR ostaje veoma mali i statistički neznačajan kod svih tretmana, čak i pri RH = 98%. Ovi rezultati potvrđuju da termički posttretman ne samo da smanjuje ukupni SR, već i gotovo u potpunosti sprečava njegov dalji razvoj tokom narednog ciklusa izlaganja visokoj relativnoj vlažnosti.

Ukupno posmatrano, rezultati ukazuju da je relativna vlažnost ključni faktor koji aktivira SR densifikovanog drveta, pri čemu se jasno izražena relaksacija javlja tek pri RH

= 98 %. Efekat tretmana zavisi od stepena upresovanja, ali je u svim analizama dosledno pokazano da termički posttretman (TM i US+TM) predstavlja najefikasniji način stabilizacije deformacije, jer ne samo da smanjuje ukupni SR, već i značajno ograničava dodatnu relaksaciju između ciklusa. Ultrazvučni predtretman samostalno dovodi do umerenog smanjenja SR, ali je njegov efekat znatno slabiji od efekta termičkog posttretmana.



Slika 26. Uticaj relativne vlažnosti (RH), stepena upresovanja (CR) i tretmana na dodatni set-recovery ($\Delta SR = SR_2 - SR_1$) densifikovanog drveta topole

U pojedinim slučajevima zabeležene su i blago negativne vrednosti SR, kao i negativne vrednosti parametra ΔSR . Ove vrednosti ukazuju na situacije u kojima je

izmerena debljina uzorka nakon ciklusa kondicioniranja bila neznatno manja od debljine neposredno nakon densifikacije ili nakon prethodnog ciklusa. S obzirom da su korišćeni uzorci relativno malih dimenzija, a promene debljine tokom kondicioniranja veoma male, ovakva odstupanja mogu se pripisati ograničenoj tačnosti merenja i malim eksperimentalnim varijacijama. Negativne vrednosti u ovom slučaju ne predstavljaju stvarni dodatni kolaps strukture, već su posledica merne nesigurnosti u situacijama kada su stvarne promene dimenzija vrlo blizu nule.

5.3 Mehanička svojstva THM densifikovanog drveta

5.3.1 Savojna čvrstoća (MOR)

Čvrstoća na savijanje značajno je rasla sa povećanjem stepena upresovanja kod svih ispitivanih tretmana (Tabela 8). Srednje vrednosti MOR porasle su sa približno 70–75 MPa kod nedensifikovanih uzoraka na vrednosti veće od 250 MPa pri najvišem stepenu densifikacije, što potvrđuje dominantan uticaj stepena upresovanja na čvrstoću na savijanje. Ovaj trend je dosledno uočen kod svih tretmana, što ukazuje da je densifikacija bila primarni faktor koji određuje MOR (Slika 27).

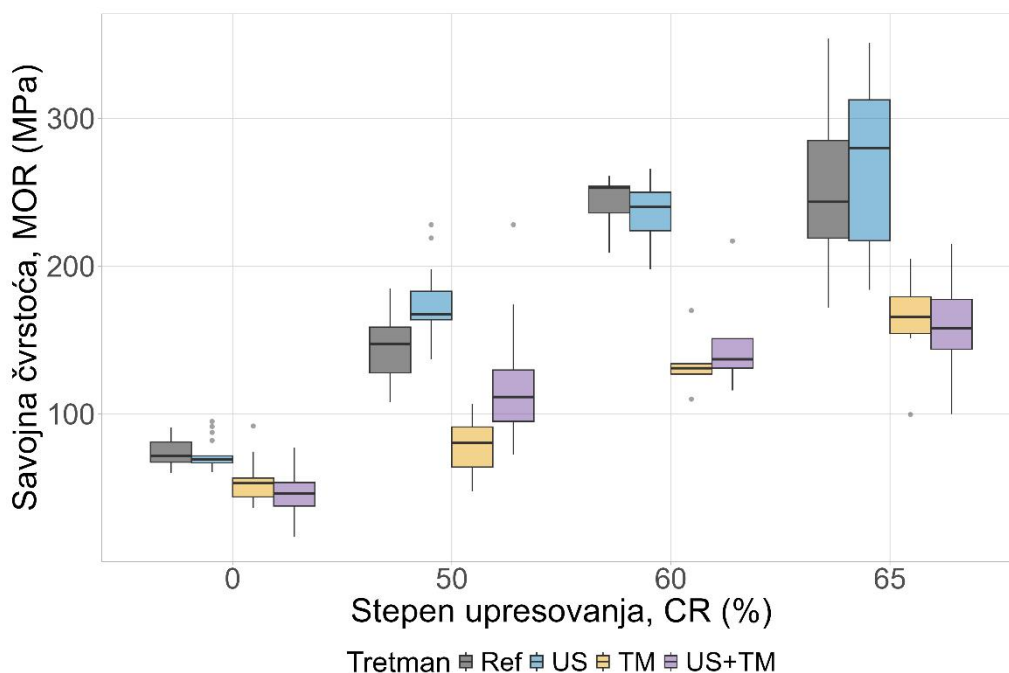
Analiza linearnog mešovitog modela potvrdila je visoko statistički značajan uticaj stepena upresovanja na MOR ($p < 0,001$), kao i visoko značajnu interakciju između stepena upresovanja i tretmana ($CR \times$ tretman; $p < 0,001$), što ukazuje da efekat tretmana zavisi od nivoa densifikacije. U poređenju sa nedensifikovanim uzorcima ($CR = 0\%$), MOR je porastao za približno 98% pri $CR = 50\%$, za oko 226% pri $CR = 60\%$ i za približno 242% pri $CR = 65\%$, što ukazuje na snažno povećanje čvrstoće sa rastom upresovanja, ali uz postepeno smanjenje dodatnog prirasta pri višim stepenima upresovanja.

Tabela 8. Savojna čvrstoća (MOR), vlažnost i gustina uzoraka u trenutku ispitivanja, za sve grupe po stepenu upresovanja (CR) i primenjenih tretmana (Ref., US, TM i US+TM)

CR [%]	Tretman	N	ρ_u [kg·m ⁻³] (SD)	MC [%] (SD)	MOR [MPa] (SD)
0	Ref.	20	469,6 (36,4) a	10,9 (0,3) a	74,4 (8,9) a
	US	20	463,3 (33,4) a	11,1 (0,2) a	72,0 (9,5) a
	TM	20	433,0 (33,6) b	5,1 (0,2) b	53,5 (12,7) b
	US+TM	20	427,9 (38,3) b	5,1 (0,2) b	47,2 (14,6) b
50	Ref.	20	864,7 (52,6) a	7,9 (0,5) a	147,5 (22,4) a
	US	20	905,4 (72,2) b	7,4 (0,8) a	174,2 (22,1) b
	TM	20	792,4 (71,5) c	3,7 (0,4) b	78,8 (16,7) c
	US+TM	20	864,5 (78,0) a	3,6 (0,5) b	119,4 (37,3) d
60	Ref.	5	1123,4 (57,3) a	8,1 (0,3) a	242,6 (20,9) a
	US	5	1121,2 (76,5) a	8,4 (0,2) a	235,6 (26,0) a
	TM	5	1004,2 (64,9) b	3,4 (0,5) b	134,4 (22,0) b
	US+TM	5	1050,4 (55,0) c	3,4 (0,4) b	150,4 (39,3) b
65	Ref.	10	1183,4 (81,3) a	5,3 (0,7) a	254,3 (55,3) a
	US	10	1190,4 (92,5) a	5,4 (0,6) a	269,4 (57,8) a
	TM	10	1089,9 (44,1) b	2,7 (0,1) b	164,7 (29,1) b
	US+TM	10	1089,0 (62,4) b	3,1 (0,5) b	160,9 (32,7) b

^{a,b} - Različita slova unutar istog stepena upresovanja označavaju statistički značajne razlike između tretmana prema Tukey post-hoc testu ($p < 0,05$)

Ovakav trend potvrđuje da je densifikacija dominantni mehanizam unapređenja savojne čvrstoće, što je u saglasnosti sa ranijim istraživanjima na densifikovanom drvetu brzorastućih lišćarskih vrsta (Balasso et al., 2020; Bao et al., 2017; Cabral et al., 2022).



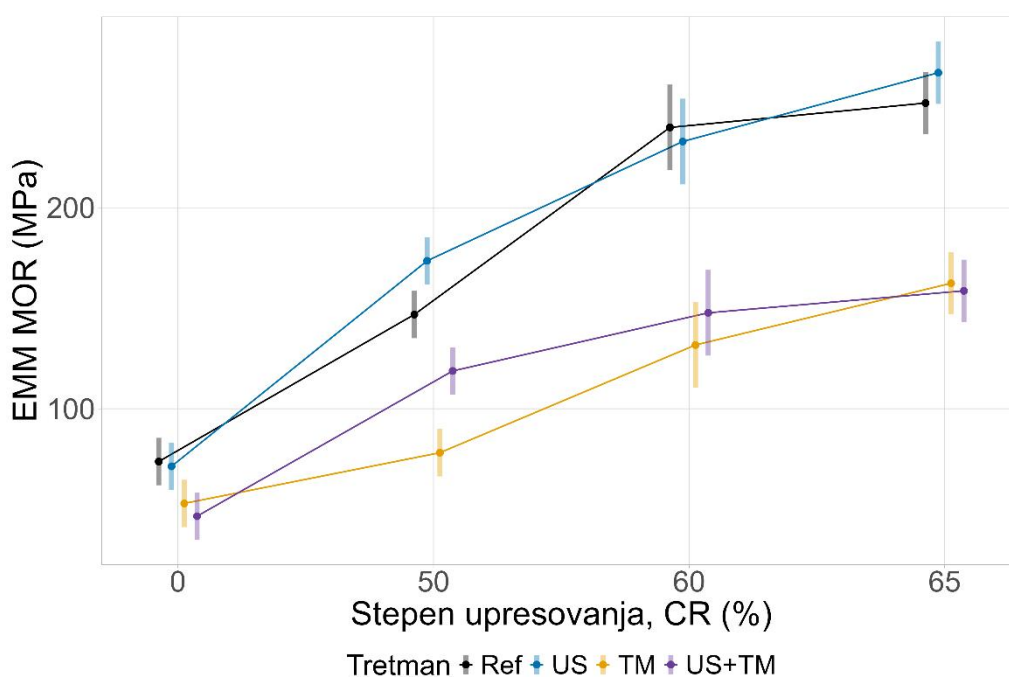
Slika 27. Savojna čvrstoća (MOR), za sve grupe po stepenu upresovanja (CR) i primenjenih tretmana (Ref., US, TM i US+TM)

Unutar pojedinačnih grupa stepena upresovanja uočene su statistički značajne razlike između tretmana (Tabela 8). Pri CR = 0% nije utvrđena statistički značajna razlika u MOR između kontrolnih uzoraka i uzoraka sa ultrazvučnim predtretmanom (US), dok su uzorci podvrgnuti termičkom posttretmanu (TM) pokazali značajno niže vrednosti MOR u poređenju sa grupama bez termičkog tretmana. Ovo ukazuje da sam ultrazvučni tretman nije uticao na čvrstoću na savijanje nedensifikovanog drveta, dok je termički tretman doveo do smanjenja MOR čak i u odsustvu densifikacije.

Kod densifikovanih uzoraka efekti tretmana zavisili su od stepena upresovanja. Pri CR = 50% ultrazvučni predtretman doveo je do značajnog povećanja MOR, dok je termički posttretman izazvao izraženo smanjenje ovog svojstva. Kombinacija US i TM tretmana rezultovala je srednjim vrednostima MOR. Pri CR = 60% i 65% ultrazvučni tretman nije doveo do statistički značajnih razlika u odnosu na referentnu grupu, dok je TM tretman dosledno smanjivao MOR. Međutim, zbog smanjenog broja uzoraka pri ovim stepenima

upresovanja, statistička snaga analize bila je ograničena, pa ove rezultate treba tumačiti sa određenim oprezom.

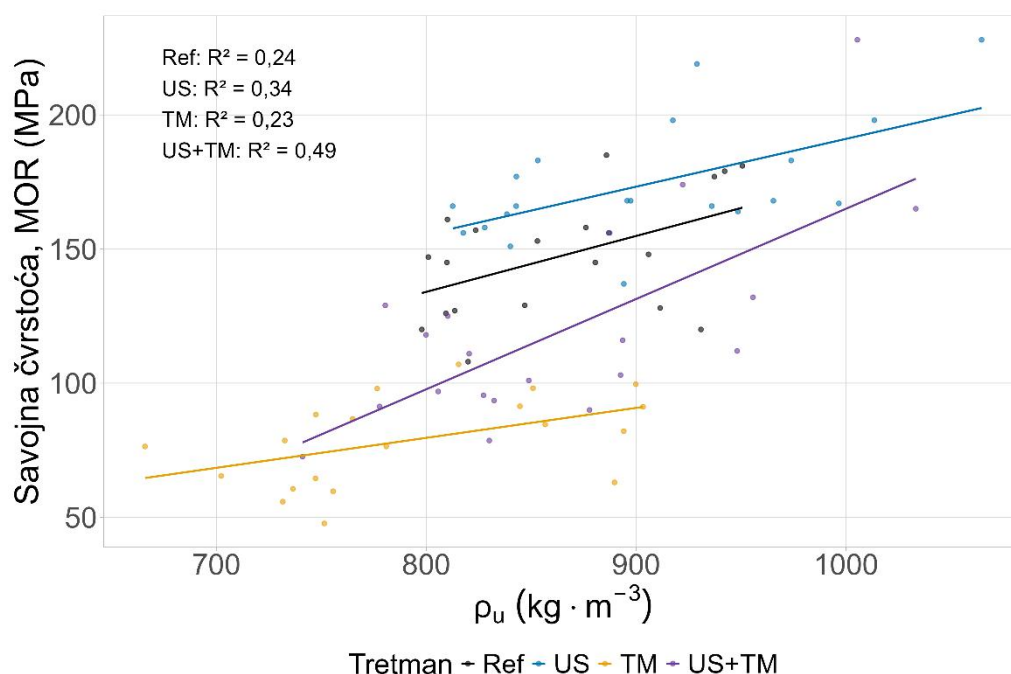
Analiza linearnog mešovitog modela (LMM) potvrdila je da su na čvrstoću na savijanje značajno uticali stepen upresovanja i tretman, kao i njihova međusobna interakcija. Statistički značajna interakcija CR × tretman ukazuje da efekat ultrazvučnog i termičkog tretmana na MOR zavisi od nivoa densifikacije. Modelom procenjene marginalne sredine (EMM) ilustruju različite trendove razvoja MOR za pojedine tretmane duž opsega upresovanja (Slika 28), pri čemu su najizraženiji relativni efekti tretmana uočeni pri umerenim stepenima densifikacije.



Slika 28. Procene marginalnih sredina (EMM) za MOR pri savijanju, za sve grupe po stepenu upresovanja (CR) i primenjenih tretmana (Ref., US, TM i US+TM)

Da bi se procenilo da li se uočeni efekti tretmana mogu objasniti isključivo razlikama u gustini uzoraka, sprovedena je dodatna analiza za uzorke densifikovane pri CR = 50%, gde je postojao dovoljan broj uzoraka za ovakvu proveru. MOR je rastao sa

povećanjem gustine pri uslovima ispitivanja kod svih tretmana, što potvrđuje da gustina predstavlja jedan od ključnih faktora koji određuju čvrstoću na savijanje (Slika 29).



Slika 29. MOR pri savijanju, za $CR \approx 50\%$ pri različitim tretmanima (Ref., US, TM i US+TM) — sa linearnim regresionim modelima i odgovarajućim koeficijentima determinacije (R^2)

Međutim, pri uporedivim vrednostima gustine, uzorci sa ultrazvučnim predtretmanom (US) pokazivali su više vrednosti MOR u odnosu na referentne uzorke, dok su uzorci podvrgnuti termičkom posttretmanu (TM) dosledno imali niže vrednosti MOR. Kada je gustina pri uslovima ispitivanja uključena kao kovarijata u LMM, utvrđen je snažan pozitivan uticaj gustine na MOR. Važno je istaći da je primenjeni tretman ostao statistički značajan faktor i nakon korekcije na gustinu, pri čemu je uočena i značajna interakcija između gustine i tretmana. Ovi rezultati ukazuju da razlike u čvrstoći na savijanje između tretmana ne mogu biti objašnjene isključivo promenama gustine, već da ultrazvučni i termički tretmani menjaju odnos između gustine i MOR.

Posmatrano u celini, rezultati MOR pokazuju da, iako stepen upresovanja određuje apsolutni nivo čvrstoće THM-densifikovanog drveta topole, dodatni tretmani značajno utiču na razvoj čvrstoće na način koji zavisi od nivoa upresovanja. Ultrazvučni predtretman povećavao je MOR pri umerenim stepenima densifikacije, dok je termički posttretman dosledno smanjivao čvrstoću na savijanje pri svim ispitivanim stepenima upresovanja.

5.3.2 Modul elastičnosti (MOE)

Modul elastičnosti pokazao je sistematsko povećanje sa porastom stepena upresovanja kod svih ispitivanih tretmana (Tabela 9). Srednje vrednosti MOE porasle su sa približno 9–10 GPa kod nedensifikovanih uzoraka na vrednosti veće od 22 GPa pri najvišim nivoima densifikacije, što potvrđuje da je stepen upresovanja dominantan faktor koji određuje MOE materijala. Analiza linearnog mešovito modela pokazala je visoko statistički značajan uticaj stepena upresovanja na MOE ($p < 0,001$), takođe su i primenjeni tretman, kao i interakcija CR \times tretman, bili statistički značajni ($p < 0,001$).

U poređenju sa nedensifikovanim uzorcima, MOE je porastao za približno 30% pri CR = 50%, za oko 133% pri CR = 60% i za približno 143% pri CR = 65%, čime se dodatno potvrđuje dominantna uloga stepena upresovanja u određivanju elastične krutosti. U poređenju sa čvrstoćom na savijanje, MOE je pokazao manju relativnu varijabilnost unutar grupa istog stepena upresovanja, što ukazuje na ujednačeniji odgovor elastične krutosti na proces densifikacije.

Unutar pojedinačnih grupa stepena upresovanja uočene su razlike između tretmana u vrednostima MOE (Slika 30), iako su ove razlike bile generalno manje izražene nego kod MOR. Pri CR = 0% nisu utvrđene statistički značajne razlike u MOE između

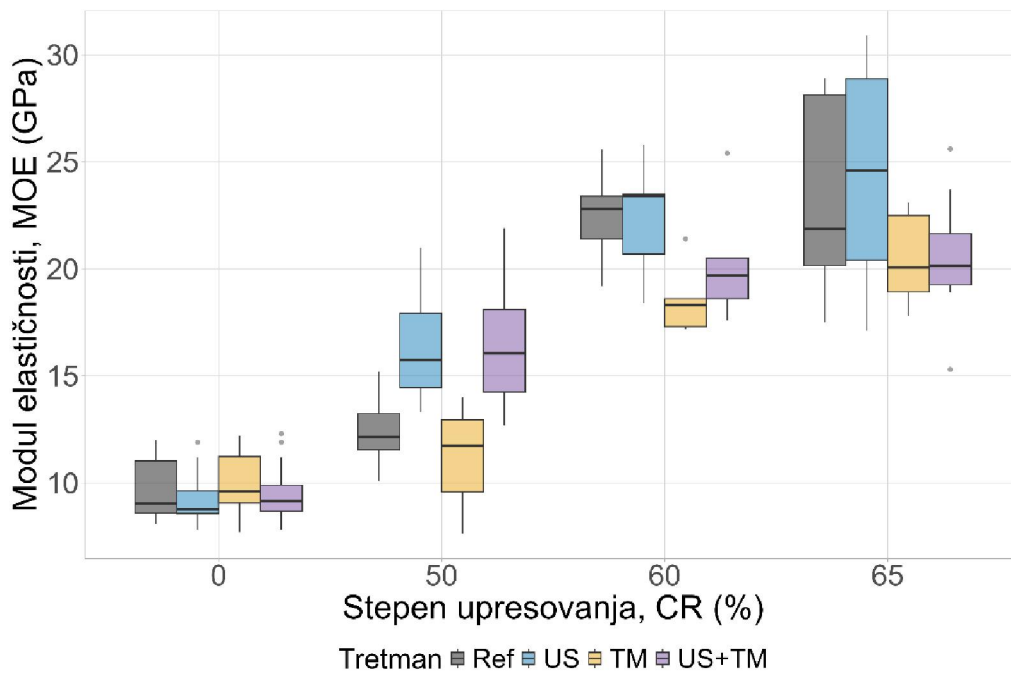
tretmanskim grupama, što ukazuje da ni ultrazvučni predtretman (US) ni termički posttretman (TM) nisu uticali na elastičnu krutost nedensifikovanog drveta.

Tabela 9. Modul elastičnosti (MOE) uzoraka, uz prikaz njihove vlažnosti i gustine u trenutku ispitivanja, za sve grupe po stepenu upresovanja (CR) i primenjenih tretmana (Ref., US, TM i US+TM)

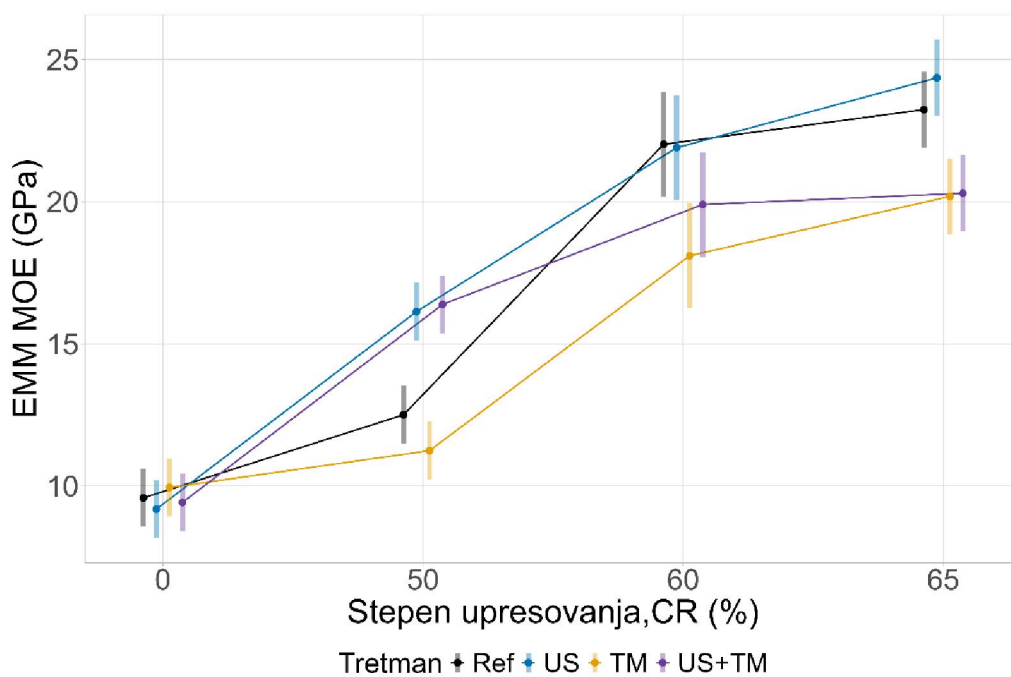
CR [%]	Tretman	N	ρ_0 [kg·m ⁻³] (SD)	MC [%] (SD)	MOE [GPa] (SD)
0	Ref.	20	434,1 (43,8) ^a	10,9 (0,3) ^a	9,65 (1,35) ^a
	US	20	442,0 (52,2) ^a	11,1 (0,2) ^a	9,25 (1,06) ^a
	TM	20	417,4 (35,3) ^a	5,1 (0,2) ^b	10,01 (1,31) ^a
	US+TM	20	418,8 (51,1) ^a	5,1 (0,2) ^b	9,49 (1,24) ^a
50	Ref.	20	826,1 (70,0) ^a	7,9 (0,5) ^a	12,57 (1,51) ^a
	US	20	867,3 (69,3) ^b	7,4 (0,8) ^a	16,20 (2,18) ^b
	TM	20	762,4 (107,8) ^c	3,7 (0,4) ^b	11,30 (1,99) ^c
	US+TM	20	850,2 (88,7) ^a	3,6 (0,5) ^b	16,45 (2,80) ^b
60	Ref.	5	1048,6 (61,9) ^a	8,1 (0,3) ^a	22,48 (2,38) ^a
	US	5	1058,6 (52,1) ^a	8,4 (0,2) ^a	22,36 (2,86) ^a
	TM	5	958,6 (63,1) ^b	3,4 (0,5) ^b	18,56 (1,70) ^b
	US+TM	5	1014,8 (65,4) ^{ab}	3,4 (0,4) ^b	20,36 (3,02) ^{ab}
65	Ref.	10	1159,6 (83,7) ^a	5,3 (0,7) ^a	23,48 (4,35) ^a
	US	10	1171,8 (80,6) ^a	5,4 (0,6) ^a	24,60 (4,98) ^a
	TM	10	1030,4 (74,6) ^b	2,7 (0,1) ^b	20,43 (2,13) ^b
	US+TM	10	1011,7 (91,6) ^b	3,1 (0,5) ^b	20,54 (2,80) ^b

^{a,b} - Različita slova unutar istog stepena upresovanja označavaju statistički značajne razlike između tretmana prema Tukey post-hoc testu ($p < 0,05$)

Kod densifikovanih uzoraka efekti tretmana na MOE zavisili su od stepena upresovanja, kao i kod MOR. Pri CR = 50% ultrazvučni predtretman (US) doveo je do statistički značajnog povećanja MOE, dok je termički posttretman (TM) značajno smanjio elastičnu krutost, pri čemu je kombinovani tretman rezultovao srednjim vrednostima. Pri CR = 60% nisu utvrđene statistički značajne razlike između referentne, US i kombinovane grupe, dok su uzorci sa TM tretmanom pokazivali niže vrednosti MOE. Pri CR = 65% TM je ponovo doveo do statistički značajno nižih vrednosti MOE, dok razlike između referentne i US grupe nisu bile statistički značajne.



Slika 30. Modul elastičnosti pri savijanju (MOE), za sve grupe po stepenu upresovanja (CR) i primenjenih tretmana (Ref., US, TM i US+TM)



Slika 31. Procene marginalnih sredina (EMM) za MOE pri savijanju, za sve grupe po stepenu upresovanja (CR) i primenjenih tretmana (Ref., US, TM i US+TM)

Analiza linearnog mešovitog modela (LMM) potvrdila je da su na MOE statistički značajno uticali stepen upresovanja i tretman, kao i njihova međusobna interakcija. Statistički značajna interakcija CR × tretman ukazuje da efekti tretmana na elastičnu krutost zavise od nivoa densifikacije.

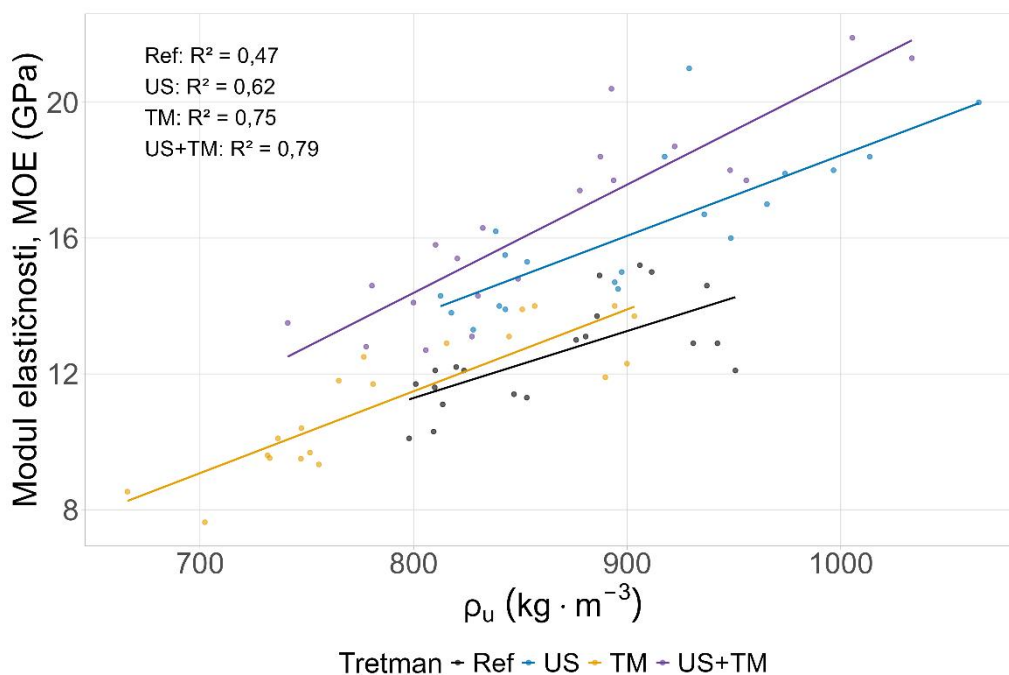
Marginalne srednje vrednosti (EMM) procenjene iz LMM jasno ilustruju različite trendove razvoja krutosti između tretmana duž opsega stepena upresovanja (Slika 31), pri čemu su najizraženiji relativni efekti tretmana uočeni pri umerenim nivoima densifikacije.

Da bi se procenio uticaj gustine na elastičnu krutost, sprovedena je dodatna analiza za uzorke densifikovane pri CR = 50%. MOE je rastao sa povećanjem gustine pri uslovima ispitivanja kod svih tretmana, što potvrđuje da gustina predstavlja primarni faktor koji određuje elastičnu krutost (Slika 32). U poređenju sa odnosom između MOR i gustine, veza između MOE i gustine pokazala je jasniji i manje rasut trend.

Kada je gustina pri uslovima ispitivanja uključena kao kovarijata u LMM, utvrđen je snažan pozitivan uticaj gustine na MOE. Nakon korekcije na gustinu, tretman je ostao statistički značajan faktor, iako je njegov doprinos bio manji u odnosu na uticaj gustine. Ovi rezultati ukazuju da je MOE u najvećoj meri određen povećanjem gustine povezanim sa procesom densifikacije, dok dodatni tretmani uvode sekundarne, ali statistički detektabilne promene u razvoju elastične krutosti.

Posmatrano u celini, rezultati MOE pokazuju da je elastična krutost THM-densifikovanog drveta topole prvenstveno određena stepenom upresovanja i pratećim povećanjem gustine, pri čemu ultrazvučni predtretman (US) unapređuje razvoj krutosti pri umerenim stepenima upresovanja, dok termički posttretman (TM) dosledno smanjuje MOE pri svim ispitivanim stepenima upresovanja. U poređenju sa čvrstoćom na savijanje,

efekti tretmana na MOE bili su manje izraženi, što odražava fundamentalno drugačiju mehaničku prirodu elastične krutosti.



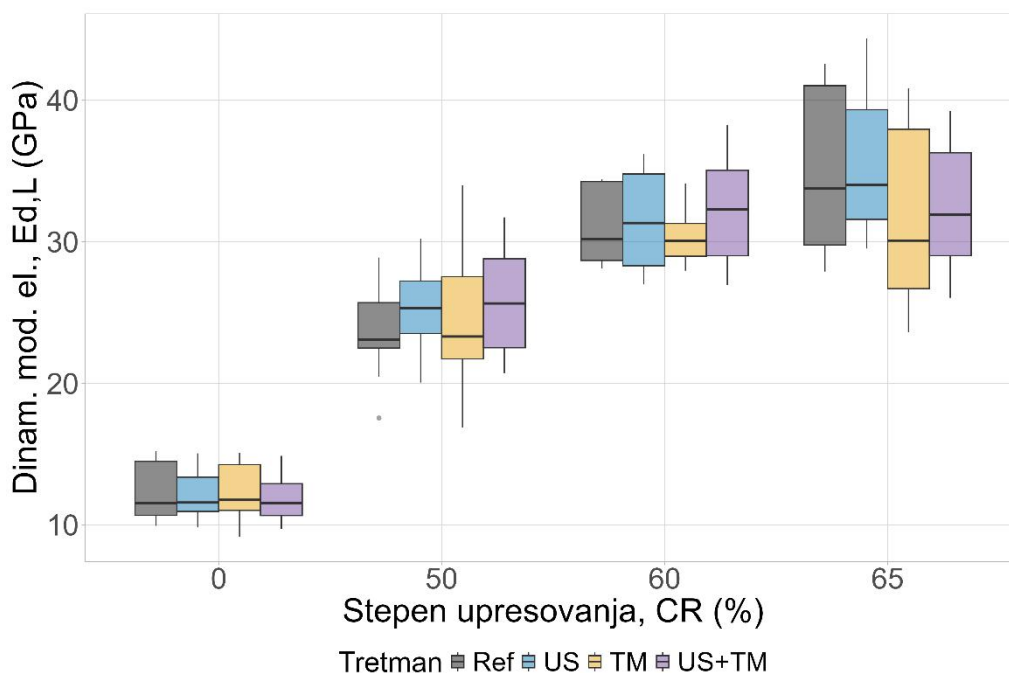
Slika 32. MOE pri savijanju, za CR \approx 50% pri različitim tretmanima (Ref., US, TM i US+TM) — sa linearnim regresionim modelima i odgovarajućim koeficijentima determinacije (R^2)

5.3.3 Dinamički modul elastičnosti (E_d)

Dinamički modul elastičnosti određen je metodom slobodnih rezonantnih vibracija na uzorcima kondicioniranim pri 20 ± 2 °C i 65 ± 5 % relativne vlažnosti vazduha. Ispitivanja su sprovedena u longitudinalnom i savojnom modu oscilovanja

5.3.3.1 Longitudinalni dinamički modul elastičnosti ($E_{d,L}$)

Vrednosti longitudinalnog dinamičkog modula rastu sa povećanjem stepena upresovanja (Slika 33). Prosečne vrednosti za referentnu grupu uzoraka iznosile su 12,3 GPa (CR = 0), 23,7 GPa (CR = 50), 31,1 GPa (CR = 60) i 35,1 GPa (CR = 65) (Tabela 10). Relativni porast između CR = 0 i CR = 65 iznosio je približno 185%, odnosno modul je povećan gotovo 2,9 puta u odnosu na nedensifikovano drvo.



Slika 33. Longitudinalni dinamički modul elastičnosti ($E_{d,L}$) u zavisnosti od stepena upresovanja (CR) i primenjenog tretmana (Ref, US, TM, US+TM)

Linearni mešoviti model (LMM) sa Kenward–Roger korekcijom stepena slobode, potvrdio je statistički značajan efekat stepena upresovanja ($p < 0,001$), dok efekat tretmana (US, TM, US+TM) nije bio statistički značajan ($p > 0,05$).

Interakcija između stepena upresovanja i tretmana bila je statistički značajna ($p < 0,01$), što ukazuje da se efekat tretmana razlikuje u zavisnosti od nivoa upresovanja. Međutim, detaljna post-hoc analiza pokazala je da je razlika između tretmana izražena samo pri CR = 50, gde su modifikovani uzorci (posebno US+TM) pokazali više vrednosti $E_{d,L}$ u odnosu na referentne, dok pri višim stepenima upresovanja (CR = 60 i 65) taj efekat nije bio statistički potvrđen.

U cilju razdvajanja efekta gustine od potencijalnog nezavisnog uticaja tretmana, formiran je dodatni LMM u kojem je gustina uključena kao kovarijata. Uvođenjem gustine u model omogućeno je statističko kontrolisanje ovog faktora i ispitivanje da li neki od tretmana ima nezavisan ili zajednički uticaj na $E_{d,L}$.

Rezultati su pokazali da gustina ostaje visoko značajan prediktor dinamičkog modula ($p < 0,001$), dok tretman nakon kontrole gustine ne pokazuje statistički značajan efekat ($p > 0,05$). Interakcija gustine i tretmana takođe nije bila značajna, što ukazuje da tretman ne menja nagib kod relacije $E_{d,L}-\rho$. Drugim rečima, pozitivan efekat tretmana, koji se na prvi pogled vidi u sirovim vrednostima pri CR = 50 može se objasniti razlikama u postignutoj gustini između grupa, dok ne postoji dokaz da tretman modifikuje osnovni mehanizam elastičnog prenosa opterećenja nezavisno od gustine.

Logaritamska analiza relacije između $E_{d,L}$ i gustine dala je eksponent $n = 1,078$, što ukazuje na blago superlinearnu, ali praktično proporcionalnu zavisnost $E_{d,L} \sim \rho^1$ u analiziranom opsegu gustina.

Tabela 10. Dinamički modul elastičnosti, longitudinalni $E_{d,L}$ i savojni $E_{d,F}$ standardna devijacija (SD) za sve eksperimentalne grupe

CR [%]	Tretman	N	ρ_u [kg·m ⁻³] (SD)	$E_{d,L}$ [GPa] (SD)	$E_{d,F}$ [GPa] (SD)
0	Ref.	20	469,6 (36,4) ^a	12,3 (2,0) ^a	11,6 (1,9) ^a
	US	20	463,3 (33,4) ^a	12,1 (1,5) ^a	11,1 (1,4) ^a
	TM	20	433,0 (33,6) ^b	12,2 (1,8) ^a	11,3 (1,6) ^a
	US+TM	20	427,9 (38,3) ^b	12,0 (1,7) ^a	11,0 (1,6) ^a
50	Ref.	20	864,7 (52,6) ^a	23,7 (2,6) ^a	19,0 (2,3) ^a
	US	20	905,4 (72,2) ^b	25,2 (2,7) ^{ab}	23,8 (3,3) ^b
	TM	20	792,4 (71,5) ^c	24,7 (4,5) ^{ab}	21,2 (10,1) ^{ab}
	US+TM	20	864,5 (78,0) ^a	25,8 (3,6) ^b	22,8 (4,0) ^b
60	Ref.	5	1123,4 (57,3) ^a	31,1 (3,0) ^a	30,0 (3,0) ^a
	US	5	1121,2 (76,5) ^a	31,5 (4,0) ^a	31,5 (6,2) ^a
	TM	5	1004,2 (64,9) ^b	30,5 (2,4) ^a	28,4 (3,8) ^a
	US+TM	5	1050,4 (55,0) ^c	32,3 (4,5) ^a	33,4 (8,7) ^a
65	Ref.	10	1183,4 (81,3) ^a	35,1 (6,1) ^a	31,1 (7,3) ^a
	US	10	1190,4 (92,5) ^a	35,5 (5,0) ^a	31,6 (5,2) ^a
	TM	10	1089,9 (44,1) ^b	31,8 (6,6) ^b	30,1 (10,8) ^a
	US+TM	10	1089,0 (62,4) ^b	32,4 (4,7) ^{ab}	33,3 (6,8) ^a

^{a,b} - Različita slova unutar istog stepena upresovanja označavaju statistički značajne razlike između tretmana prema Tukey post-hoc testu ($p < 0,05$)

Ovakav rezultat sugerše da, u okviru primenjenih parametara THM procesa, nije došlo do takvih mikrostrukturnih promena (npr. značajne degradacije hemijskih

komponenti ili trajne promene mikrostrukture ćelijskog zida) koje bi modifikovale elastični odziv nezavisno od gustine.

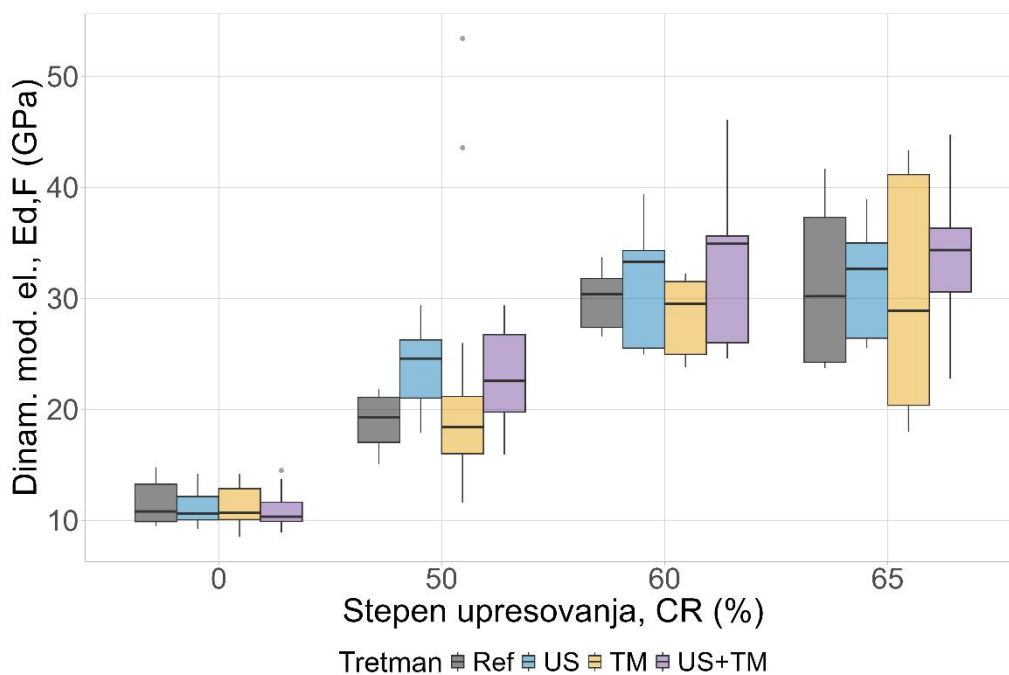
5.3.3.2 Savojni dinamički modul elastičnosti ($E_{d,F}$)

Savojni dinamički modul pokazao je analogan trend povećanja sa porastom stepena upresovanja (Slika 34). Prosečne vrednosti za referentni tretman iznosile su 11,6 GPa (CR = 0), 19,0 GPa (CR = 50), 30,0 GPa (CR = 60) i 31,1 GPa (CR = 65) (Tabela 10). Relativni porast između CR = 0 i CR = 65 iznosio je približno 168 %, odnosno oko 2,7 puta.

Statistička analiza potvrdila je značajan efekat CR ($p < 0,001$), dok tretman nije pokazao nezavisan uticaj ($p > 0,05$). Gustinski kontrolisana analiza pokazala je da gustina ostaje dominantan faktor i u savojnom modu ($p < 0,001$), dok tretman nema statistički značajan doprinos. To ukazuje da povećanje savojne dinamičke krutosti proizlazi pre svega iz povećanja zapreminske mase i promene efektivne strukture materijala, a ne iz promena u mikrostrukтури koje bi modifikovale odnos krutosti i gustine.

Eksponent iz logaritamskog modela iznosio je $n = 1,066$, što potvrđuje da i savojni dinamički modul prati gotovo proporcionalnu zavisnost od gustine.

Longitudinalni modul je bio sistematski viši od savojnog. Razlika između $E_{d,L}$ i $E_{d,F}$ iznosila je približno 6 % pri CR = 0, 25 % pri CR = 50, 4 % pri CR = 60 i 13 % pri CR = 65. Ova razlika nije pokazivala monotoni trend sa povećanjem CR, što ukazuje da se odnos između aksijalne i savojne krutosti menja usled kombinovanog efekta gustine i geometrijskih promena preseka.



Slika 34. Savojni dinamički modul elastičnosti ($E_{d,F}$) u zavisnosti od stepena upresovanja (CR) i primenjenog tretmana (Ref, US, TM, US+TM)

5.3.3.3 Odnos dinamičkog i statičkog modula elastičnosti

Relacija između statičkog modula elastičnosti (MOE) i longitudinalnog dinamičkog modula prikazana je na grafikonu (Slika 35). Utvrđena je visoka linearna povezanost ($p < 0,001$; $R^2 \approx 0,78$), regresionom jednačinom u kojoj je MOE tretiran kao zavisna varijabla:

$$MOE = 2,44888 + 0,54063 \cdot E_{d,L} \quad (15)$$

Dobijeni nagib ukazuje da povećanje dinamičkog longitudinalnog modula za 1 GPa prati povećanje statičkog modula od približno 0,54 GPa. U analiziranom opsegu vrednosti dinamički longitudinalni modul bio je u proseku približno 1,8 puta veći od statičkog modula elastičnosti.

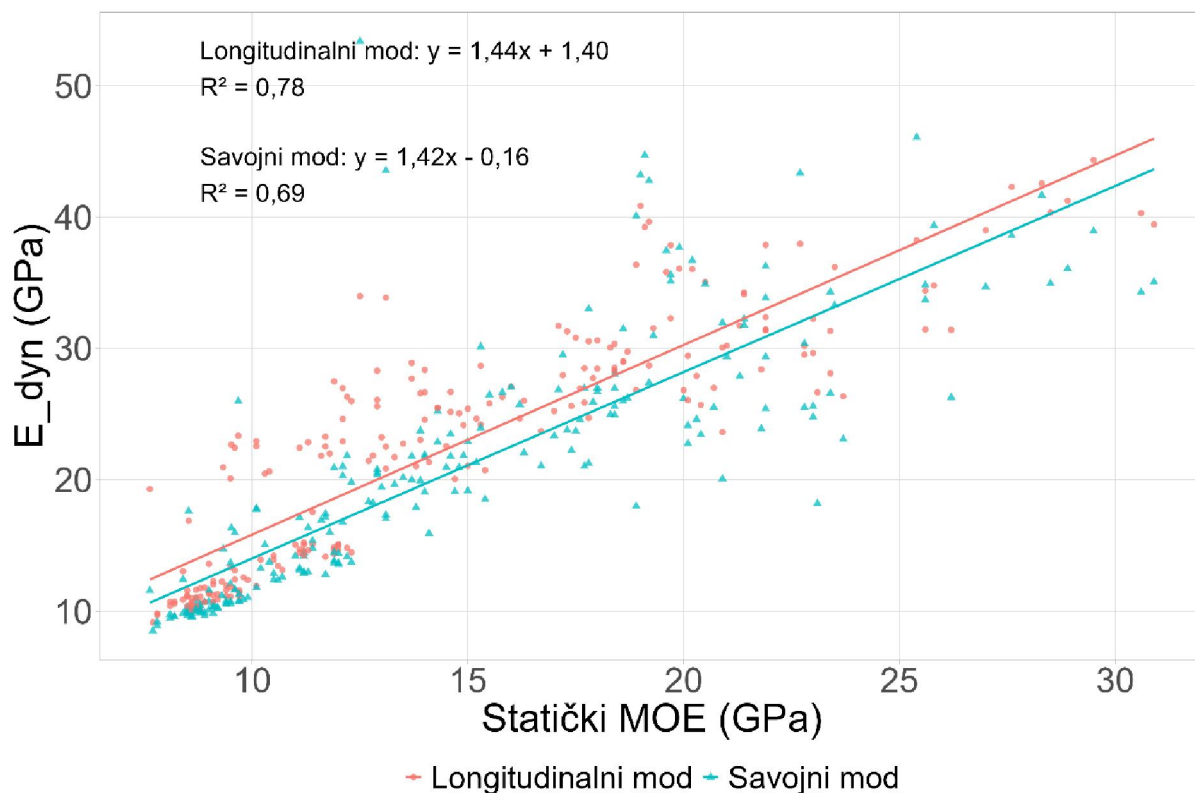
Za savojni dinamički modul dobijena je analogna relacija ($R^2 = 0,69$; $p < 0,001$):

$$MOE = 4,54234 + 0,48939 \cdot E_{d,F} \quad (16)$$

Između savojnog dinamičkog i statičkog modula elastičnosti postoji visoka linearna povezanost, ali nešto slabija nego kod $E_{d,L}$. U ovom slučaju dinamički savojni modul je bio približno 1,9–2,0 puta veći od statičkog modula u analiziranom opsegu.

Nešto viša korelacija za longitudinalni mod u odnosu na savojni može se objasniti činjenicom da longitudinalni rezonantni mod dominantno odražava aksijalnu krutost ćelijskog zida, dok savojni mod uključuje i uticaj geometrije preseka, raspodele mase i smičnih deformacija. Bez obzira na razliku u nagibu, oba dinamička parametra pokazuju stabilan i proporcionalan odnos sa statičkim modulom, što potvrđuje da densifikacija ne menja fundamentalnu prirodu elastičnog odziva materijala, već primarno utiče na njegovu apsolutnu krutost.

Razlika između dinamičkog i statičkog modula može se objasniti činjenicom da dinamičko ispitivanje obuhvata isključivo elastičnu komponentu deformacije, pri čemu nema vremena za viskoelastične relaksacije i razvoj mikrooštećenja. U statičkom savijanju, naročito kod viših nivoa naprezanja, dolazi do lokalnih mikroklizanja u zidu ćelije i interakcija između ćelija, što dovodi do nižih efektivnih vrednosti modula. Testiranje interakcije između $E_{d,L}$ i stepena upresovanja pokazalo je da se nagib regresione prave ne razlikuje statistički između nedensifikovanih i densifikovanih uzoraka ($p > 0,05$), što potvrđuje da densifikacija ne menja proporcionalni odnos između dinamičkog i statičkog elastičnog odziva.

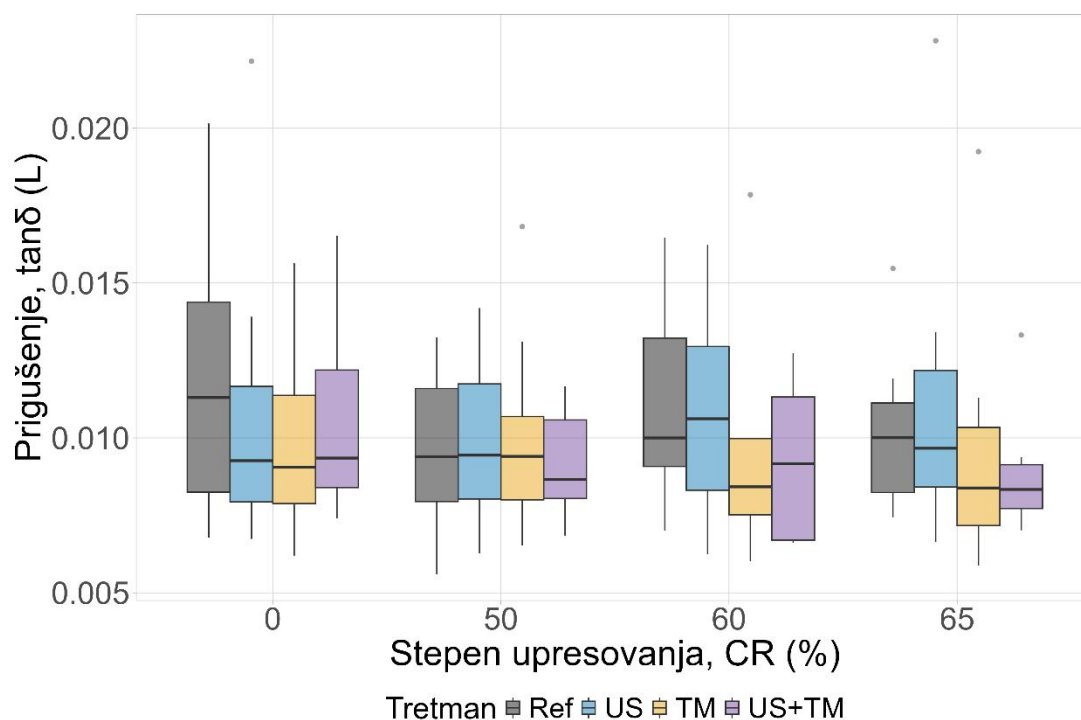


Slika 35. Relacija između statičkog modula elastičnosti (MOE) i dinamičkog modula elastičnosti (E_d) za longitudinalni i savojni mod; prikaz regresionih pravih i koeficijenata determinacije (R^2)

5.3.3.4 Prigušenje i viskoelastični odgovor

U longitudinalnom modu oscilovanja (Slika 36) ne uočava se jasan i konzistentan trend promene prigušenja $\tan\delta$ sa povećanjem stepena upresovanja. Vrednosti $\tan\delta$ ostaju u približno istom opsegu kroz sve nivoe CR, pri čemu varijacije između tretmana ne pokazuju sistematski obrazac. Promene su blage i bez izražene monotone zavisnosti od upresovanja.

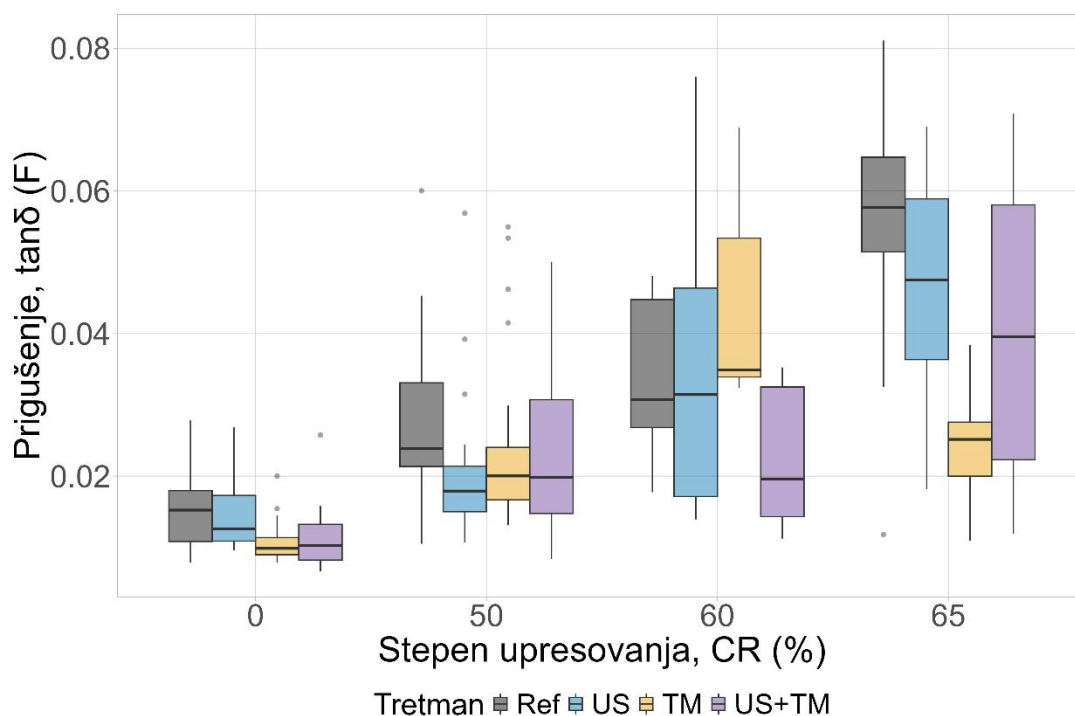
Linearni mešoviti model nije pokazao statistički značajan efekat stepena upresovanja na $\tan\delta$ u longitudinalnom modu ($p > 0,05$), niti je tretman imao nezavisan uticaj ($p > 0,05$). Interakcija između faktora takođe nije bila značajna. Ovi rezultati ukazuju da densifikacija u analiziranom opsegu ne dovodi do sistematske promene longitudinalnog viskoelastičnog odgovora materijala.



Slika 36. Prigušenje ($\tan\delta$) u longitudinalnom modu oscilovanja u zavisnosti od stepena upresovanja (CR) i primenjenog tretmana (Ref, US, TM, US+TM)

Za razliku od longitudinalnog moda, u savojnom modu oscilovanja (Slika 37) uočava se jasniji obrazac promene $\tan\delta$ sa povećanjem stepena upresovanja. Vrednosti $\tan\delta$ pokazuju sistematsku varijaciju sa porastom CR, što ukazuje na promenu disipativnih svojstava sistema usled upresovanja i promene geometrije preseka. Povećanje upresovanja dovodi do smanjenja debljine i promene raspodele mase u odnosu na neutralnu osu, čime se menja odnos između elastične i disipativne komponente odziva u savojnom režimu.

Statistička analiza potvrdila je značajan efekat stepena upresovanja u savojnom modu ($p < 0,01$). Međutim, tretman nije pokazao nezavisan efekat nakon kontrole gustine ($p > 0,05$), što znači da se uočene razlike u $\tan\delta$ mogu pripisati prvenstveno efektu upresovanja, a ne specifičnim uticajima ultrazvučnog ili termičkog tretmana.



Slika 37. Prigušenje ($\tan\delta$) u savojnom modu oscilovanja u zavisnosti od stepena upresovanja (CR) i primenjenog tretmana (Ref, US, TM, US+TM)

S obzirom da gustina nije pokazala značajan nezavisan efekat u modelima koji uključuju kovarijatu gustine, promene $\tan\delta$ ne mogu se objasniti prostim povećanjem zapreminske mase. To ukazuje da se varijacije u prigušenju pre svega odnose na globalne strukturne promene usled upresovanja (promena geometrije, kontakt između ćelijskih zidova, redistribucija naprezanja), a ne na linearnu zavisnost od gustine.

6 DISKUSIJA REZULTATA

6.1 Ostvareni stepen upresovanja i elastična relaksacija

Rezultati pokazuju da je proces densifikacije bio stabilan i dobro kontrolisan, jer su ostvareni stepeni upresovanja (CRr) bili veoma bliski nominalno zadatim vrednostima za sve analizirane nivoe upresovanja. Kod referentnih uzoraka ostvarene srednje

vrednosti iznosile su 49,5%, 59,9% i 65,5% za nominalne stepene upresovanja od 50%, 60% i 65%, respektivno.

Statistička analiza pokazala je da ultrazvučni predtretman može uticati na ostvareni stepen upresovanja, ali da je taj efekat izražen samo pri nižem nominalnom stepenu upresovanja (CR = 50%). U ovoj grupi uzorci tretirani ultrazvukom ostvarili su statistički značajno veći realizovani stepen upresovanja u odnosu na referentne uzorke. Ovakav rezultat može se objasniti promenama u strukturi drveta koje nastaju tokom ultrazvučnog tretmana. Ultrazvučni talasi u vodenoj sredini izazivaju pojavu kavitacije i mikrostrujanja fluida, što može dovesti do delimičnog oštećenja aspiriranih jamica, formiranja mikropukotina i povećanja provodnosti u ćelijskoj strukturi drveta (Rudak et al., 2021). Kao posledica toga, tokom zagrevanja i plastifikacije dolazi do efikasnijeg prenosa vlage i toplote u unutrašnjost materijala, što može olakšati deformaciju ćelijskog zida tokom presovanja. Međutim, pri višim stepenima upresovanja (CR = 60% i CR = 65%) razlike između tretmana nisu bile statistički značajne. Ovo ukazuje da pri većim deformacijama dominira mehaničko sabijanje ćelijske strukture, pri čemu eventualne promene izazvane ultrazvukom imaju znatno manji relativni uticaj.

Rezultati elastične relaksacije (SB) pokazali su da su najveće vrednosti zabeležene kod uzoraka densifikovanih pri najnižem stepenu upresovanja (CR = 50%), dok su se sa povećanjem stepena upresovanja vrednosti SB načelno smanjivale. U ovom istraživanju referentni uzorci su pokazali srednje vrednosti SB od 1,40% pri CR = 50%, 0,36% pri CR = 60% i -0,63% pri CR = 65%. Ovakav trend je u skladu sa ranijim istraživanjima (Laine et al., 2013; Rautkari et al., 2011), koja pokazuju da veći stepen upresovanja u određenim uslovima može dovesti do stabilnije deformacije ćelijskog zida i manjeg trenutnog povratka nakon rasterećenja. Na primer, Laine et al. (2013) su kod densifikacije bora zabeležili smanjenje SB sa približno 6–8% pri kompresiji od 20% na oko 3–5% pri

kompresiji od 40%, dok su Rautkari et al. (2011) kod površinske densifikacije bora dobili smanjenje SB sa oko 4–6% na približno 2–3% pri povećanju upresovanja sa 20% na 40%. Pri većem sabijanju dolazi do intenzivnijeg kolapsa lumena i delimično plastične deformacije ćelijskih zidova, što smanjuje udeo elastične komponente deformacije i time ograničava momentalni povrat materijala (Gao et al., 2016).

Međutim, u literaturi su zabeleženi i suprotni trendovi, gde povećanje stepena upresovanja dovodi do veće elastične deformacije usled akumuliranja većih naprezanja u ćelijskom zidu tokom procesa densifikacije. Na primer, Pelit et al. (2014) su kod termomehaničke densifikacije topole zabeležili povećanje SB sa približno 5–7% pri 20% upresovanja na oko 12–16% pri 40% upresovanja, dok Fang et al. (2012) navode porast SB sa približno 4–6% na 9–12% pri povećanju upresovanja sa 20% na 40%. Ove razlike ukazuju da odnos između stepena upresovanja i elastične relaksacije nije univerzalan, već zavisi karakteristika materijala, kao i od parametara procesa densifikacije.

Uticaj ultrazvučnog predtretmana na elastičnu relaksaciju bio je izražen samo pri nižem stepenu upresovanja. U grupi sa CR = 50% ultrazvučni predtretman doveo je do značajnog smanjenja SB, pri čemu su kod ultrazvučno tretiranih uzoraka zabeležene čak i negativne vrednosti elastične relaksacije. Pri višim stepenima upresovanja (CR = 60% i CR = 65%) razlike između tretmana nisu bile statistički značajne.

Negativne vrednosti SB zabeležene u ovom istraživanju ukazuju na situacije u kojima je debljina uzorka nakon rasterećenja bila manja od ciljne debljine određene položajem metalnih graničnika prese. Ovakva pojava može se objasniti kombinacijom nekoliko faktora. Prvo, tokom plastifikacije i upresovanja može doći do dodatnog sabijanja ćelijske strukture nakon dostizanja nominalnog položaja prese (Kutnar & Kamke, 2012). Drugo, male tolerancije u dimenzijama početnih uzoraka i ograničena tačnost merenja debljine mogu dovesti do toga da izračunata vrednost SB postane

negativna iako je realna razlika vrlo mala. Slične pojave negativnih vrednosti SB ili vrlo malog momentalnog povratka zabeležene su i u drugim istraživanjima densifikacije drveta (Laine et al., 2013; Rautkari et al., 2011).

6.2 Vlažnost i gustina densifikovanog drveta

- Vlažnost densifikovanog drveta

Rezultati ovog istraživanja pokazali su da se ravnotežna vlažnost drveta (MC) značajno menja u zavisnosti od stepena upresovanja i primenjenog tretmana. Kod referentne grupe uzoraka vlažnost se smanjivala sa povećanjem stepena upresovanja, pri čemu su prosečne vrednosti iznosile 10,9% za nedensifikovano drvo (CR = 0), 7,8% pri CR = 50, 8,1% pri CR = 60 i 5,2% pri CR = 65. Ovakav rezultat ukazuje da proces densifikacije može uticati na sorpciona svojstva drveta, naročito pri visokim stepenima upresovanja.

Smanjenje ravnotežne vlažnosti kod densifikovanog drveta zabeleženo je i u brojnim prethodnim istraživanjima koja se bave termo-hidro-mehaničkom obradom drveta. Carvalho et al. (2024) navode da je kod kontrolnih uzoraka ravnotežna vlažnost iznosila približno 13%, dok je kod densifikovanih uzoraka opala na vrednosti između 7,6% i 10,9%. Autori ovaj efekat objašnjavaju promenama u strukturi ćelijskog zida, pre svega povećanjem kristalnosti celuloze i smanjenjem amorfne frakcije hemiceluloza, što smanjuje dostupnost aktivnih mesta za vezivanje molekula vode. Slično tome, istraživanja na eukalptusu su pokazala da se ravnotežna vlažnost smanjuje sa povećanjem stepena densifikacije, pri čemu autori ističu da je niža ravnotežna vlažnost direktno povezana sa povećanom dimenzionalnom stabilnošću densifikovanog materijala (Sargent et al., 2023). Sličan trend zabeležen je i u istraživanjima na hibridnoj topoli densifikovanoj visokim

pritiskom, gde se ravnotežna vlažnost densifikovanih uzoraka kretala se između približno 4,8% i 5,9% (pri RH = 33%), dok je vlažnost kontrolnih uzoraka bila značajno viša (K. Yan et al., 2020).

U poređenju sa tim rezultatima, smanjenje ravnotežne vlažnosti kod referentne grupe u ovom istraživanju je izraženije. Vlažnost se smanjila sa približno 10,9% kod nedensifikovanog drveta na oko 5,2% pri najvišem stepenu upresovanja (CR = 65), što predstavlja smanjenje od oko 51%. Za razliku od većine prethodnih studija, gde su temperature densifikacije bile u opsegu od približno 140 do 160 °C (Paul et al., 2024; Pelit et al., 2016; Sadatnezhad et al., 2017; Scharf et al., 2023), u ovom istraživanju densifikacija je izvedena pri temperaturi do 200 °C, i visokom stepenu upresovanja (do 65%). Pri takvim uslovima dolazi do intenzivnijih deformacija ćelijske strukture, što se manifestuje kroz potpuni kolaps lumena ćelija (Gao et al., 2016), ali i do mogućih hemijskih promena u komponentama ćelijskog zida kao rezultat dejstva više temperature, što direktno utiče na higroskopnost (C. Hill et al., 2021; Jančíková & Jablonský, 2025). Zbog toga je verovatno da je izraženije smanjenje MC zabeleženo u ovom istraživanju rezultat kombinovanog delovanja visokog stepena upresovanja i relativno visoke temperature tokom procesa densifikacije. Slične efekte kombinovanog delovanja temperature i upresovanja navode i Welzbacher et al. (2008), koji ističu da povećanje temperature tokom THM procesa može dovesti ne samo do plastične deformacije ćelijskih zidova, već i do delimičnih hemijskih promena u hemicelulozama, što može dodatno smanjiti higroskopnost materijala.

Međutim, pored samog THM procesa i stepena upresovanja, na ravnotežnu vlažnost drveta mogu značajno uticati i dodatni tretmani (US i TM) primenjeni tokom procesa modifikacije. Očekivano, termički posttretman pokazao je dominantan uticaj na ravnotežnu vlažnost drveta. Kod nedensifikovanih uzoraka (CR = 0), prosečna vlažnost u TM i US+TM grupama iznosila je približno 5,1%, dok je kod referentne grupe iznosila

10,9%, što predstavlja smanjenje za oko 53%. Sličan odnos zadržan je i kod densifikovanih uzoraka, gde su vrednosti MC kod termički modifikovanih grupa bile približno dva puta niže u odnosu na netretirane uzorke.

Slične rezultate navode Pelit & Yorulmaz (2023), koji su pokazali da su densifikovani uzorci topole termički tretirani na temperaturi od 200 °C imali ravnotežnu vlažnost približno 41% nižu u odnosu na netretirane uzorke. U ranijem istraživanju istih autora zabeleženo je da ravnotežna vlažnost uzoraka topole termički tretiranih na 200 °C iznosi oko 5,9%, dok je kod netretiranih uzoraka bila približno 11,1%. Prema Hill (2006) ravnotežna vlažnost termički modifikovanog drveta može biti smanjena za približno 40–60% u odnosu na netretirano drvo, dok Esteves & Pereira (2009) navode da se EMC termički modifikovanog drveta pri standardnim klimatskim uslovima najčešće kreće između približno 4 i 6%. Vrednosti dobijene u ovom istraživanju (oko 5%) gotovo se u potpunosti uklapaju u taj opseg. Skyba (2008) navodi da sama densifikacija (VTC metoda) ima relativno mali uticaj na ravnotežnu vlažnost, dok termički posttretman dovodi do značajnog smanjenja EMC. Na primer, pri relativnoj vlažnosti vazduha od 65% kontrolni uzorci imali su ravnotežnu vlažnost od približno 12,8%, dok su densifikovani uzorci bez termičkog posttretmana imali slične vrednosti (oko 12,6%), što je verovatno posledica različitog postupka densifikacije. Međutim, nakon termičkog posttretmana na 180 °C ravnotežna vlažnost se smanjila na približno 9,5% odnosno 9,1%, u zavisnosti od režima obrade. Sličan efekat navode i Carvalho et al. (2024), koji su pokazali da densifikacija uz termički tretman može smanjiti ravnotežnu vlažnost sa približno 13% na oko 7,6%.

Za razliku od termičkog tretmana, ultrazvučni predtretman u ovom istraživanju nije pokazao značajan uticaj na ravnotežnu vlažnost. Vrednosti MC kod US grupa bile su vrlo slične referentnim uzorcima, što ukazuje da ultrazvuk nema značajan uticaj na higroskopna svojstva drveta. Ovakav rezultat je u skladu sa istraživanjima koja pokazuju

da ultrazvučni tretman prvenstveno utiče na strukturu i permeabilnost drveta kroz razaranje membrana jamica i stvaranje mikro-kanala (H. Liu et al., 2018; Tanaka et al., 2010), ali ne dovodi do značajnih hemijskih promena u samom ćelijskom zidu (Y. Liu et al., 2019). Kako autori navode, ultrazvučna kavitacija oštećuje lignoceluloznu matricu fizički, ali ne menja bitno njen hemijski sastav, što objašnjava izostanak promene u higroskopnosti materijala.

- Gustina densifikovanog drveta

Rezultati dobijeni u ovom istraživanju jasno pokazuju da je stepen upresovanja (CR) dominantan faktor koji određuje gustinu densifikovanog drveta. Očekivano, kod svih tretmana uočen je izražen porast gustine sa povećanjem stepena upresovanja. U referentnoj grupi gustina nakon kondicioniranja (ρ_u) povećala se sa približno $465 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ kod nedensifikovanog drveta na oko $1185 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ pri najvećem stepenu upresovanja (CR = 65%). Sličan trend uočen je i za gustinu u apsolutno suvom stanju (ρ_0), koja je porasla sa približno $430 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ na oko $1140 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Pri stepenu upresovanja od 50%, ρ_0 u referentnoj grupi povećana je sa $434 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ na $826 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, što predstavlja relativni porast od približno 90%. Ovakav trend je u potpunosti u skladu sa nalazima brojnih autora koji su primenili slične tretmane na vrstama drveta male početne gustine (Pelit & Yorulmaz, 2019; Shao et al., 2020; Tenorio & Moya, 2020; Yu et al., 2020).

Dalje povećanje nominalnog stepena upresovanja na 60% i 65% u ovom istraživanju rezultovalo je prosečnim gustinama od $1080 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ i $1135 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, što predstavlja povećanje od 2,5 odnosno 2,6 puta u odnosu na kontrolne uzorke. Ovako visoke vrednosti potvrđuju da drvo topole, usled svoje izražene poroznosti i tankih ćelijskih zidova, poseduje izuzetan kapacitet za sabijanje. Postignuta apsolutno suva gustina od $1144 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ pri CR 65% nalazi se u samom vrhu opsega koji se u literaturi

navodi za visokokvalitetno densifikovano drvo ($1000\text{--}1200\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), što je potvrđeno u studijama na topoli, smrči i bukvi (Jakob et al., 2022; Shao et al., 2020; Zhou et al., 2019)

Jedan od očekivanih rezultata ovog istraživanja jeste smanjenje gustine kod termički modifikovanih grupa (TM i US+TM) u odnosu na uzorke koji nisu termički tretirani. Smanjenje gustine kod termički modifikovanog drveta primarno se objašnjava gubitkom mase tokom termičke degradacije pojedinih hemijskih komponenti ćelijskog zida (Kozakiewicz et al., 2019; Marcon et al., 2018).

U kontekstu densifikacije, ovaj efekat postaje posebno izražen kod densifikovanih uzoraka, odnosno pri višim stepenima upresovanja. Dok je kod nedensifikovanog drveta razlika u gustini između Ref i TM grupa relativno mala, kod densifikovanih uzoraka ta razlika postaje znatno izraženija (Sözbir et al., 2019; Sözbir & Bektaş, 2017). U ovom istraživanju razlika između Ref i TM uzoraka jasno raste sa povećanjem stepena upresovanja. Kod nedensifikovanog drveta ($CR = 0$) razlika je iznosila svega oko $16,7\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (ρ_0), dok je kod $CR = 50$ porasla na približno $66\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Najveća razlika zabeležena je pri $CR = 60$, gde je iznosila oko $115\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, dok je pri $CR = 65$ ostala visoka i iznosila približno $90\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Ovakav trend se može povezati sa činjenicom da povećanje gustine materijala obično dovodi i do povećanja njegove toplotne provodnosti (Klinger et al., 2025; TenWolde et al., 1988). Kod densifikovanih uzoraka veća gustina može omogućiti efikasniji prenos toplote tokom procesa termičke modifikacije, što potencijalno dovodi do bržeg zagrevanja materijala i dostizanja ciljne temperature u unutrašnjosti uzorka (Paul et al., 2024; Todaro et al., 2021). Posledično, intenzitet termičke degradacije hemiceluloza može biti nešto veći, što doprinosi većem gubitku mase i izraženijem smanjenju gustine kod uzoraka sa termičkim posttretmanom.

Za razliku od termičke modifikacije, ultrazvučni predtretman u većini slučajeva nije pokazao konzistentan uticaj na gustinu drveta kroz ceo opseg stepena upresovanja. Međutim, važno je naglasiti da je pri srednjem stepenu upresovanja (CR = 50%) gustina US grupe bila statistički značajno veća u odnosu na referentnu grupu. Ovaj rezultat ukazuje na to da ultrazvučni predtretman u specifičnim uslovima može modifikovati mikrostrukturu drveta i doprineti efikasnijem procesu densifikacije. Pretpostavlja se da ultrazvučni tretman, usled kavitacije i akustičnog strujanja, dovodi do povećanja difuzivnosti drveta kroz stvaranje mikropukotina u ćelijskim zidovima i delimično otvaranje jamica (T. Han et al., 2023; Yang et al., 2021). Ovakve promene značajno unapređuju transport vlage i prenos toplote unutar drveta, što je ključno za postizanje brže i ravnomernije plastifikacije celokupne zapremine materijala tokom THM tretmana (Paul et al., 2024). Bolja plastifikacija lignocelulozne matrice omogućava lakšu deformaciju ćelijske strukture pod pritiskom uz manju elastičnu relaksaciju nakon rasterećenja, što se u ovom istraživanju manifestovalo većom postignutom gustinom kod US uzoraka pri CR = 50%.

6.3 Viskoelastična relaksacija (SR)

Viskoelastična relaksacija, predstavlja tendenciju densifikovanog drveta da povрати svoju prvobitnu dimenziju nakon izlaganja povišenoj vlazi, što je jedna od najvećih prepreka za komercijalnu primenu ovog materijala (Neyses et al., 2017, 2020). Ovaj fenomen nastaje jer se tokom densifikacije elastična energija skladišti u kristalnoj celulozi (Laine et al., 2013; Scharf et al., 2023), dok je okolna matrica lignina i hemiceluloze stabilizuje deformisanu strukturu nakon hlađenja i rasterećenja (Fu et al., 2017).

Ponovnim vlaženjem dolazi do replastifikacije matrice i oslobađanja te energije – viskoelastična relaksacija (Neyses et al., 2017).

Veličina viskoelastične deformacije je u ovom istraživanju analizirana kroz dva različita eksperimentalna pristupa: kroz cikluse kondicioniranja pri različitim relativnim vlažnostima vazduha (RH), kao i kroz intenzivnije cikluse potapanja u vodu i sušenja do apsolutno suvog stanja. Ovakav pristup omogućava procenu stabilnosti densifikovanog drveta kako u umerenim higroskopnim uslovima, tako i u ekstremnijim uslovima vlaženja, koji dovode do potpune replastifikacije ćelijskog zida.

6.3.1 Uticaj stepena upresovanja

Rezultati istraživanja pokazuju da je stepen upresovanja (CR) imao značajan uticaj na vrednosti viskoelastične relaksacije. U oba eksperimentalna pristupa – i pri promenama relativne vlažnosti vazduha i tokom ciklusa potapanja u vodi – uočeno je da se vrednosti SR značajno menjaju sa promenom stepena upresovanja.

U testu sa potapanjem u vodi referentni uzorci pri CR = 50% pokazali su vrlo visoke vrednosti SR, često u opsegu od približno 60 do 75%. Sa povećanjem stepena upresovanja vrednosti SR se značajno smanjuju, pri čemu se većina rezultata kod CR = 60% nalazi u opsegu od približno 0 do 8%, dok su kod CR = 65% zabeležene nešto više vrednosti, oko 15%.

Iako neki radovi ukazuju da povećanje stepena upresovanja vodi ka većoj viskoelastičnoj relaksaciji usled većih unutrašnjih naprezanja (Neyses et al., 2021; Scharf et al., 2023), dobijeni rezultati u ovom radu pokazuju drugačiji trend. Smanjenje SR sa porastom CR sa 50% na 65% je u saglasnosti sa istraživanjima Pelit & Yorulmaz (2023) koji su zabeležili niže vrednosti SR pri većim stepenima densifikacije kod topole i smrče.

Sličan trend su zabeležili i Bao et al. (2017) pri ispitivanju svojstava THM densifikovanog drveta topole.

Ovakvo ponašanje se može pripisati prekoračenju granice elastične deformacije ćelijskih zidova pri visokim pritiscima. Kod mekih vrsta poput topole, prekomerna kompresija (iznad približno 50%) može dovesti do trajnog kolapsa i lokalnih oštećenja ćelijskih zidova (Bao et al., 2017; K. Yan et al., 2020), čime se smanjuje udeo povratne elastične energije koja je odgovorna za SR (Pelit & Arisüt, 2023).

Rezultati izlaganja uzoraka različitim nivoima relativne vlažnosti potvrđuju da je apsorpcija vode primarni „okidač“ za oslobađanje uskladištene elastične energije u densifikovanom drvetu (Neyses et al., 2020). Odsustvo značajnog SR pri nižim vlažnostima (30 % i 60 % RH) i nagli skok pri 98% RH u potpunosti je u skladu sa istraživanjem koje su sproveli Laine et al. (2013). Oni su utvrdili da proces povratka dimenzija (elastične deformacije) kod densifikovanog bora počinje tek kada RH pređe kritičnu granicu između 65% i 75%. Rezultati ovog istraživanja ukazuju da je kod topole ovaj prag sličan, jer su vrednosti SR na 80% RH i dalje bile niske (ispod 2,1 %), dok je tek zasićena atmosfera (98% RH) dovela do potpune replastifikacije ligninsko-hemicelulozne matrice (Laine et al., 2013; Neyses et al., 2020). Uočeni trend promene SR u zavisnosti od stepena upresovanja pri visokoj vlažnosti vazduha (RH = 98%) u potpunosti je u skladu sa rezultatima dobijenim u eksperimentu potapanja u vodu. U oba slučaja vrednosti SR kod uzoraka sa većim stepenom upresovanja (CR = 60% i 65%) bile su značajno niže u poređenju sa uzorcima kod kojih je primenjen CR = 50%.

6.3.2 Uticaj termičkog posttretmana

Termička modifikacija pokazala je dominantan uticaj na smanjenje viskoelastične deformacije. U oba eksperimentalna pristupa – i u testu pri različitim relativnim

vlažnostima vazduha i u testu potapanja u vodi – uzorci koji su nakon densifikacije bili podvrgnuti termičkom tretmanu pokazali su znatno niže vrednosti SR u poređenju sa netretiranim uzorcima.

U testu potapanja u vodu, uzorci TM i US+TM pokazali su izuzetnu stabilnost, sa vrednostima SR < 3%, što predstavlja smanjenje od približno 95% u odnosu na referentne uzorke. Ovi rezultati su u skladu sa prethodnim istraživanjima na drvetu bora gde je zabeleženo da se SR sa ekstremnih 77,6 % (kod densifikovanih referentnih uzoraka) smanjuje na svega 9,8% primenom termičkog posttretmana (Laine et al., 2013).

Rezultati našeg istraživanja ukazuju na još izraženiji efekat stabilizacije, što se može povezati sa specifičnim anatomskim karakteristikama topole kao vrste niže gustine i veće kompresibilnosti (Bao et al., 2017). Doslednost ovih rezultata potvrđuje da je termički posttretman jedan od najefikasnijih pristupa stabilizaciji dimenzija densifikovanog drveta u uslovima izlaganja povišenoj relativnoj vlažnosti što je u skladu sa zaključcima koje navode Sargent et al. (2023). Posebno je značajan uticaj TM uočen pri testovima sa različitim relativnim vlažnostima vazduha. Dok referentni uzorci (naročito pri CR = 50%) pokazuju nagli skok SR pri vlažnosti od 98% (SR = 16,58%), termički modifikovani uzorci ostaju praktično stabilni sa vrednostima ispod 0,1%. Ovaj fenomen se može objasniti pomeranjem praga vlažnosti potrebnog za aktivaciju viskoelastične relaksacije kod termički modifikovanog drveta ovaj prag se sa 65–75% RH podiže na vrednosti 75–84% RH (Laine et al., 2013). Rezultati ovog istraživanja ukazuju da termička modifikacija kod topole značajno doprinosi stabilizaciji densifikovane strukture čak i pri veoma visokim vrednostima relativne vlažnosti vazduha (98% RH).

6.3.3 Uticaj ultrazvučnog predtretmana

Ultrazvučni predtretman pokazao je statistički značajan uticaj na smanjenje viskoelastične relaksacije pri nižem stepenu upresovanja (CR = 50%). Kao što je u prethodnim poglavljima detaljno objašnjeno, mikrostrukturne promene i povećanje propustljivosti drveta izazvane ultrazvučnim tretmanom (H. Liu et al., 2018; Tanaka et al., 2010) omogućavaju brže i ravnomernije prodiranje toplote i vlage kroz uzorak, što vodi ka homogenijoj plastifikaciji matrice lignina i hemiceluloze tokom procesa presovanja (Rudak et al., 2021). Na taj način se smanjuje nivo akumuliranih elastičnih naprezanja u mikrofibrilima celuloze, čime se direktno smanjuje potencijal za kasniju relaksaciju i povrat debljine nakon ponovnog vlaženja (Neyses et al., 2020). Međutim, pozitivan efekat US tretmana kod CR 60% i 65% nije statistički značajan.

Kod testa izlaganja uzoraka različitim RH uticaj US predtretmana primetan je pretežno pri visokoj vlažnosti od 98%, dok je pri nižim nivoima (30%, 60% i 80% RH) njegov doprinos statistički zanemarljiv. Ovakav nalaz je u skladu sa ranije pomenutom teorijom o pragu aktivacije viskoelastične relaksacije (Laine et al., 2013). Na nižim nivoima relativne vlažnosti količina apsorbovane higroskopne vlage nije dovoljna da izazove dovoljno omekšavanje ćelijskog zida, pa izostaje memorijski efekat deformacije – SR. Tek u uslovima visoke vlažnosti (RH 98%), gde dolazi do značajne replastifikacije ćelijskog zida, efekat ultrazvuka postaje jasno vidljiv, naročito pri CR = 50%. U ovim uslovima ultrazvučni predtretman smanjio je SR sa 16,58 % kod referentnih uzoraka na 4,21 %. Ovo smanjenje može se povezati sa homogenijom densifikacijom usled pomenute bolje difuzivnosti uzoraka sa US tretmanom. Međutim, efikasnost US predtretmana značajno opada sa povećanjem intenziteta sabijanja. Pri CR = 65% razlika između

referentnih (6,74%) i US uzoraka (5,16%) je znatno manja, dok je pri CR = 60 % SR za obe grupe bio ispod 2%, bez statistički značajne razlike.

6.3.4 Promene tokom ciklusa vlaženje-sušenje

Analiza uzastopnih ciklusa potapanja u vodi i sušenja pokazuje da se najveći deo povratka debljine dešava već tokom prvog ciklusa, što je u skladu sa nalazima Laine et al. (2013). Iako se u ovom istraživanju primećuje blagi trend rasta prosečnog SR sa približno 10 % u prvom na oko 14% u trećem ciklusu, statistička analiza potvrđuje da ove razlike nisu signifikantne. Ovakav rezultat ukazuje na to da inicijalno kvašenje oslobađa najveći deo akumulirane elastične energije. Statistička analiza je pokazala da ne postoji značajna interakcija faktora „ciklus“ sa primenjenim tretmanom ili stepenom upresovanja, što sugeriše da ponovljeno vlaženje ne menja osnovni obrazac ponašanja materijala, već samo potvrđuje inicijalno uspostavljene razlike između eksperimentalnih grupa.

Nasuprot tome, u eksperimentu sa primenom različitih RH, parametar dodatnog povratka (ΔSR) jasno ukazuje da je uticaj drugog ciklusa usko povezan sa nivoom vlažnosti i primenjenim tretmanom. Pri nižim vlažnostima (60% i 80% RH), ΔSR je bio zanemarljiv, dok se pri 98% RH, kod referentnih uzoraka, javlja značajna dodatna relaksacija (npr. 6,01% pri CR = 50%). Ovo sugeriše da prvi ciklus izlaganja referentnih uzoraka vlažnom vazduhu nije bio dovoljan za potpunu relaksaciju napona, verovatno zbog sporije difuzije vodene pare u poređenju sa direktnim potapanjem u vodu, što je u skladu sa rezultatima (Laine et al., 2013). Sa druge strane, kod termički modifikovanih uzoraka (TM i US+TM) ΔSR ostaje praktično na nuli u svim uslovima, što potvrđuje da termički posttretman gotovo u potpunosti otklanja viskoelastičnu relaksaciju i promene tokom ciklusa vlaženja su zanemarljive.

6.4 Mehanička svojstva densifikovanog drveta

6.4.1 Savojna čvrstoća i modul elastičnosti pri statičkom ispitivanju

Savojna čvrstoća (MOR) i modul elastičnosti (MOE) predstavljaju dva ključna parametra za procenu mehaničkih performansi densifikovanog drveta. Iako oba svojstva zavise od strukture ćelijskog zida i gustine materijala, ona opisuju različite aspekte mehaničkog ponašanja. Dok MOE prvenstveno odražava elastični odziv materijala i snažno je povezan sa gustinom i krutošću ćelijskog zida, MOR je povezan sa procesom inicijacije i propagacije loma i zbog toga je znatno osetljiviji na lokalne strukturne defekte i eventualna oštećenja nastala tokom modifikacije drveta (Zhang, 1994).

Rezultati ovog istraživanja pokazuju da su i MOR i MOE značajno zavisili od stepena upresovanja i primenjenog tretmana. Linearni mešoviti modeli (LMM) pokazali su statistički značajan uticaj stepena upresovanja, tretmana, kao i njihove interakcije, što ukazuje da povećanje gustine usled densifikacije ne može u potpunosti objasniti promene mehaničkih svojstava, već da važnu ulogu imaju i strukturne i hemijske promene nastale tokom primenjenih postupaka modifikacije.

- Uticaj stepena upresovanja

Povećanje CR dovelo je do izraženog povećanja i MOR i MOE kod svih posmatranih tretmana. Ovakav trend je očekivan i u skladu je sa osnovnim mehanizmom densifikacije drveta, pri kojem mehanička kompresija dovodi do smanjenja zapremine lumena i povećanja udela nosivog materijala ćelijskog zida po jedinici zapremine. Kao posledica toga dolazi do povećanja efektivne gustine materijala i poboljšanja njegovih mehaničkih performansi. Slične rezultate prijavili su brojni autori koji su proučavali THM

densifikaciju drveta, gde je povećanje gustine prepoznato kao glavni faktor povećanja mehaničke krutosti i čvrstoće materijala (Bao et al., 2017; Rautkari et al., 2010; Tenorio & Moya, 2020).

U ovom istraživanju gustina densifikovanog drveta bila je približno 1,9 do 2,6 puta veća od gustine kontrolnih uzoraka, u zavisnosti od stepena upresovanja. Ovakav porast gustine doveo je do značajnog povećanja mehaničkih svojstava, pri čemu je povećanje MOE pokazivalo relativno konzistentan i predvidljiv trend. Vrednost modula elastičnosti pri CR = 50 % (oko 12,5 GPa) u velikoj meri je usaglašena sa rezultatima (Shao et al., 2020) koji su za topolu pri istom stepenu upresovanja dobili 13,9 GPa, kao i sa vrednostima za vrstu *Alnus* od 14,2 GPa (Tenorio & Moya, 2020). Međutim, pri maksimalnom stepenu upresovanja u ovom radu (CR = 65%), postignuti MOE od preko 24 GPa značajno prevazilazi vrednosti od 19,8 GPa zabeležene kod bele topole (Gao et al., 2016) i približava se nivoima krutosti koji se kod četinara postižu tek pri ekstremnim CR od preko 75% (Anshari et al., 2011).

Sa druge strane, promena MOR sa povećanjem stepena upresovanja pokazala je veći stepen varijabilnosti između različitih tretmana. Iako su najveće vrednosti savojne čvrstoće zabeležene pri najvišim stepenima upresovanja, intenzitet povećanja zavisio je od tipa primenjenog tretmana. Postignuta čvrstoća pri CR = 50 % od približno 147 MPa skoro je identična onoj koju navode Tenorio & Moya (2020), dok je vrednost od preko 250 MPa pri CR = 65% superiorna u odnosu na većinu THM studija topole gde se vrednosti obično kreću u rasponu od 131 do 154 MPa (Gao et al., 2016; Shao et al., 2020). Ovakva varijabilnost je očekivana jer je savojna čvrstoća osetljivija na lokalne strukturne promene i mikro-oštećenja ćelijskog zida nastala tokom procesa densifikacije (Fu et al., 2017).

- Uticaj termičke modifikacije

Termička modifikacija pokazala je izražen uticaj na mehaničko ponašanje materijala, naročito na savojnu čvrstoću. U svim grupama stepena upresovanja termički tretirani uzorci pokazali su značajno niže vrednosti MOR u poređenju sa odgovarajućim netretiranim uzorcima, dok je uticaj na modul elastičnosti bio znatno manje izražen. Smanjenje savojne čvrstoće nakon termičke modifikacije široko je dokumentovano u literaturi i najčešće se objašnjava hemijskim promenama koje nastaju tokom izlaganja drveta visokim temperaturama (Candelier et al., 2016; C. Hill et al., 2021; Todorović et al., 2015).

Pre svega dolazi do degradacije hemiceluloza, koje predstavljaju termički najosetljiviju komponentu ćelijskog zida i počinju da se razgrađuju pri temperaturama iznad približno 150 °C (Cabral et al., 2022). Njihova depolimerizacija dovodi do smanjenja nosivosti polisaharidne matrice i posledičnog pada savojne čvrstoće materijala (B. M. Esteves & Pereira, 2009). Dodatno, pri intenzivnijim procesima termičkog tretmana može doći i do parcijalne degradacije celuloze, što može doprineti smanjenju modula elastičnosti, dok lignin, iako termički stabilniji, prolazi kroz strukturne promene koje utiču na mehaničko ponašanje materijala (C. A. S. Hill, 2006). Ove hemijske promene često dovode do promena u načinu loma, pri čemu termički modifikovano drvo pokazuje izraženije krto ponašanje tokom mehaničkog opterećenja.

Nasuprot MOR, uticaj termičkog tretmana na MOE bio je znatno manje izražen. U pojedinim slučajevima termički tretirani uzorci pokazali su slične ili čak nešto veće vrednosti MOE u poređenju sa netretiranim uzorcima pri istom stepenu upresovanja. Ovaj fenomen je takođe zabeležen u brojnim istraživanjima i objašnjava se promenama u ligninskoj matrici i relativnim povećanjem njenog doprinosa mehaničkom odzivu nakon

termičke modifikacije, što može povećati krutost materijala iako je njegova otpornost na lom smanjena (C. A. S. Hill, 2006).

Analiza dobijenih rezultata pokazala je da negativan uticaj termičke modifikacije na savojnu čvrstoću ostaje prisutan i nakon uzimanja u obzir razlika u gustini između uzoraka. Linearni mešoviti modeli (LMM), u kojima je gustina uključena kao kovarijata, pokazali su da efekat tretmana ostaje statistički značajan, što ukazuje da smanjenje čvrstoće ne može biti objašnjeno samo razlikama u gustini. Ovakav rezultat potvrđuje da termička modifikacija dovodi do promena u hemijskoj strukturi ćelijskog zida koje direktno utiču na nosivost materijala.

Istovremeno, termički modifikovani uzorci pokazali su znatno niže vrednosti ravnotežne vlažnosti u poređenju sa netretiranim uzorcima, što je u skladu sa smanjenom higroskopnošću drveta nakon termičke modifikacije. Međutim, dodatne LMM analize u kojima je vlažnost uključen kao kovarijata pokazale su da efekti tretmana i stepena upresovanja na MOR i MOE ostaju statistički značajni i nakon kontrole ovog faktora. To ukazuje da niže vrednosti vlage kod TM uzoraka mogu delimično uticati na intenzitet mehaničkog odziva, ali ne predstavljaju primarni uzrok uočenih razlika u mehaničkim svojstvima.

Sa aspekta primene, ovi rezultati potvrđuju dobro poznat kompromis između poboljšane dimenzione stabilnosti i smanjenih mehaničkih svojstava kod termički modifikovanog drveta. Iako termička modifikacija smanjuje higroskopnost i poboljšava stabilnost materijala, ona istovremeno dovodi do smanjenja savojne čvrstoće usled degradacije hemicelulozne matrice i promena u strukturi ćelijskog zida. Rezultati ovog istraživanja pokazuju da ovaj kompromis ostaje prisutan čak i kod visoko densifikovanog drveta, što ukazuje na potrebu pažljivog balansiranja intenziteta densifikacije i termičke modifikacije u zavisnosti od planirane primene materijala.

- Uticaj ultrazvučnog predtretmana

Ultrazvučni predtretman pokazao je drugačiji obrazac uticaja u poređenju sa termičkom modifikacijom. Kod nedensifikovanih uzoraka ultrazvučni tretman nije imao statistički značajan uticaj na savojnu čvrstoću i modul elastičnosti, što ukazuje da ultrazvuk sam po sebi nije dovoljan da poboljša mehanička svojstva drveta u primenjenim uslovima.

Međutim, kod densifikovanih uzoraka ultrazvučni predtretman doveo je do povećanja savojne čvrstoće, a u manjoj meri i modula elastičnosti, naročito pri umerenim stepenima upresovanja. Najizraženiji pozitivan efekat zabeležen je pri CR = 50%, gde su ultrazvučno tretirani uzorci pokazali veće vrednosti MOR u poređenju sa referentnim uzorcima. Linearni mešoviti modeli (LMM), u kojima je gustina uključena kao kovarijata, pokazali su da efekat ultrazvučnog predtretmana ostaje prisutan i pri uporedivim nivoima gustine, što ukazuje da uočeno povećanje savojne čvrstoće nije posledica samo razlika u gustini, već i promena u načinu na koji se deformacija ćelijske strukture odvija tokom procesa densifikacije.

Ovakvi rezultati sugerišu da ultrazvučni predtretman ne deluje direktno na povećanje čvrstoće drveta, već prvenstveno utiče na efikasnost procesa densifikacije. Ultrazvučni tretman u vodenoj sredini može izazvati pojave kavitacije koje dovode do delimičnog oštećenja pit membrana i formiranja mikrokanala unutar strukture drveta. Ove promene povećavaju propustljivost materijala i olakšavaju transport vlage (Pelit et al., 2016). U kontekstu THM densifikacije povećana propustljivost može omogućiti ravnomerniju raspodelu vlage i temperature tokom procesa upresovanja, čime se postiže homogenija plastifikacija ćelijskog zida i smanjuje nivo unutrašnjih naprezanja. Takva homogenizacija procesa deformacije može dovesti do efikasnije densifikacije i boljih mehaničkih performansi materijala, naročito pri umerenim stepenima upresovanja.

Važno je naglasiti da se pozitivan efekat ultrazvučnog predtretmana nije ispoljavao jednako kroz sve nivoe upresovanja. Pri višim stepenima upresovanja (CR = 60% i CR = 65%) njegov doprinos postajao je manje izražen, odnosno ultrazvučni predtretman ne deluje kao samostalan faktor povećanja čvrstoće, već pre svega kao faktor koji može povećati efikasnost procesa densifikacije, posebno pri umerenim stepenima upresovanja (CR = 50%).

- Interakcija između stepena upresovanja i tretmana

Statistički značajna interakcija između faktora stepena upresovanja i tretmana pokazuje da se mehaničko ponašanje densifikovanog drveta ne može objasniti jednostavnim sabiranjem efekata densifikacije i modifikacionih tretmana. Efekti ultrazvučnog i termičkog tretmana zavisili su od nivoa upresovanja, što ukazuje na složen odnos između gustine, stanja ćelijskog zida i hemijskih promena izazvanih modifikacijom.

Iako je u modelu bez kontrole gustine uočena značajna interakcija CR × Treatment, dodatna analiza u kojoj je gustina uključena kao kovarijata pokazala je da tretman ne zadržava nezavisan statistički značaj nakon kontrole gustine u slučaju modula elastičnosti. To ukazuje da je efekat tretmana pri većim stepenima upresovanja (CR = 60% i CR = 65%), posebno kod MOE, prvenstveno kroz razlike u postignutoj gustini, dok osnovna relacija između gustine i elastičnog odziva ostaje nepromenjena.

Drugim rečima, povećanje stepena upresovanja prvenstveno povećava gustinu materijala, a time i njegovu krutost, dok modifikacioni tretmani uglavnom utiču na način na koji se ta gustina postiže i na lokalnu očuvanost ćelijskog zida.

Kod MOR je situacija složenija. Iako gustina snažno utiče na savojnu čvrstoću, rezultati pokazuju da tretman može menjati efikasnost sa kojom se povećanje gustine

prevodi u povećanje čvrstoće. Drugim rečima, isti nivo gustine ne mora nužno voditi istom nivou MOR, jer savojna čvrstoća zavisi i od lokalne očuvanosti ćelijskog zida, krhkosti matrice i prisustva mikrodefekata nastalih tokom obrade.

- Odnos gustine i mehaničkih svojstava

Dalja analiza odnosa između gustine i mehaničkih svojstava dodatno potvrđuje razliku u ponašanju MOR i MOE. Kod uzoraka densifikovanih na CR = 50% utvrđena je izražena linearna veza između gustine i modula elastičnosti, sa relativno visokim koeficijentima determinacije u svim tretmanskim grupama. Ovaj rezultat potvrđuje da se značajan deo varijabilnosti MOE može objasniti promenama gustine materijala.

Nasuprot tome, odnos između gustine i MOR bio je znatno slabiji i pokazivao je veću varijaciju rezultata. Niži koeficijenti determinacije ukazuju da savojna čvrstoća zavisi i od dodatnih faktora koji nisu direktno obuhvaćeni gustinom, kao što su lokalna strukturna oštećenja, mikro-pukotine, hemijske promene u ćelijskom zidu i nehomogenost deformacije tokom THM procesa. Ovakav nalaz je u skladu sa opštim razumevanjem mehaničkog ponašanja drveta, prema kojem gustina predstavlja pouzdan prediktor krutosti, ali znatno slabiji prediktor čvrstoće (Bodig & Jayne, 1982).

- Uticaj vlažnosti drveta

Iako su svi uzorci pre ispitivanja kondicionirani u identičnim klimatskim uslovima, između tretmanskih grupa uočene su značajne razlike u ravnotežnoj vlažnosti. Termički modifikovani uzorci pokazali su znatno niže vrednosti vlažnosti, što je posledica smanjene higroskopnosti ćelijskog zida nakon termičke modifikacije.

Dodatni linearni mešoviti modeli (LMM), u kojima je vlažnost uključena kao dodatna kovarijata, pokazali su da uticaji stepena upresovanja i tretmana na MOR i MOE ostaju statistički značajni i nakon uzimanja u obzir ovog faktora. To ukazuje da razlike u mehaničkim svojstvima ne mogu biti objašnjene isključivo razlikama u sadržaju vlage.

Ipak, vlažnost verovatno doprinosi intenzitetu uočenih razlika, posebno kod termički tretiranih uzoraka. Niža vlažnost smanjuje plastifikaciju ćelijskog zida, što može povećati krutost materijala, ali istovremeno doprineti krtijem ponašanju pri lomu. Zbog toga vlažnost deluje kao sekundarni faktor koji moduliše mehaničko ponašanje materijala, dok primarni uticaji potiču od strukturnih i hemijskih promena izazvanih densifikacijom i modifikacionim tretmanima.

6.4.2 Dinamički modul elastičnosti

Rezultati dinamičkog ispitivanja potvrđuju da povećanje stepena upresovanja dovodi do značajnog porasta elastične krutosti materijala, što je u skladu sa opštim mehanizmom densifikacije drveta. Sabijanjem ćelijske strukture dolazi do smanjenja zapremine lumena i povećanja relativnog udela nosivog materijala ćelijskog zida po jedinici zapremine, što direktno utiče na povećanje modula elastičnosti. Ovakav trend je jasno izražen i kod longitudinalnog i kod savojnog dinamičkog modula, pri čemu se najveće vrednosti javljaju kod najviših stepeni upresovanja (CR = 60 i CR = 65).

Rezultati statističke analize dodatno potvrđuju dominantnu ulogu gustine u određivanju dinamičkog modula elastičnosti. U modelima u kojima je gustina uključena kao kovarijata pokazano je da ona ostaje visoko značajan prediktor E_d , dok modifikacioni tretmani (US, TM, US+TM) ne pokazuju nezavisan statistički efekat. Ovakav nalaz ukazuje da povećanje dinamičke krutosti proizlazi prvenstveno iz povećanja gustine i kompakcije ćelijske strukture, dok modifikacioni tretmani ne menjaju fundamentalni odnos između

gustine i elastičnog odziva materijala. Drugim rečima, u analiziranom opsegu gustina dinamički modul elastičnosti prati gotovo proporcionalnu zavisnost od gustine, što potvrđuju i eksponenti iz logaritamskih modela ($n \approx 1$).

Dobijeni rezultati su u skladu sa mehaničkim modelima drveta prema kojima elastična krutost materijala prvenstveno zavisi od količine i kontinuiteta ćelijskog zida u pravcu opterećenja. Kod densifikovanog drveta povećanje gustine dovodi do smanjenja lokalnih deformacija ćelijskih zidova i povećanja efektivne nosivosti strukture, čime se povećava brzina širenja elastičnih talasa i, posledično, dinamički modul elastičnosti.

Poseban značaj ima visoka korelacija između dinamičkog i statičkog modula elastičnosti utvrđena u ovom istraživanju. Linearna regresija između E_d i MOE pokazala je visok stepen povezanosti ($R^2 \approx 0,7-0,8$), što potvrđuje da oba parametra odražavaju istu fundamentalnu mehaničku karakteristiku materijala – njegovu elastičnu krutost. Međutim, dinamički modul je sistematski viši od statičkog, što je očekivano i u skladu sa brojnim istraživanjima u oblasti nedestruktivnog ispitivanja drveta (Brancheriau & Bailleres, 2002; Ross & Pellerin, 1994). Razlika između ova dva parametra proizlazi iz činjenice da dinamičko ispitivanje obuhvata gotovo isključivo elastičnu komponentu deformacije, dok statičko savijanje uključuje i viskoelastične deformacije, mikroklizanja u ćelijskom zidu i razvoj lokalnih mikrooštećenja pri većim nivoima naprezanja.

Uočena nešto viša korelacija između statičkog modula i longitudinalnog dinamičkog modula u odnosu na savojni može se objasniti prirodom oscilacionog moda. Longitudinalne vibracije dominantno odražavaju aksijalnu krutost ćelijskog zida, dok savojni mod uključuje i dodatne faktore, kao što su geometrija preseka, raspodela mase i uticaj smičnih deformacija. Zbog toga savojni dinamički modul u većoj meri zavisi od globalnih geometrijskih karakteristika uzorka, što može dovesti do nešto većeg rasipa rezultata.

Analiza faktora gubitka ($\tan\delta$) pruža dodatni uvid u viskoelastično ponašanje materijala. U longitudinalnom modu oscilovanja nije uočen jasan trend promene $\tan\delta$ sa povećanjem stepena upresovanja, što ukazuje da densifikacija u analiziranom opsegu ne dovodi do sistematske promene aksijalnog viskoelastičnog odziva materijala. Ovakav rezultat sugeriše da kompresija prvenstveno utiče na elastičnu krutost sistema, dok sposobnost disipacije energije u aksijalnom pravcu ostaje relativno nepromenjena.

Nasuprot tome, u savojnom modu oscilovanja uočena je izraženija promena faktora gubitka sa povećanjem stepena upresovanja. Ovaj efekat verovatno je povezan sa promenama geometrije preseka i redistribucijom naprezanja tokom savijanja. Smanjenje debljine uzorka i povećanje gustine dovode do promene odnosa između elastične i disipativne komponente odziva. Međutim, statistička analiza pokazala je da tretman nema nezavisan efekat na $\tan\delta$ nakon kontrole gustine, što ukazuje da su uočene promene prvenstveno posledica promene zapreminske mase, a ne specifičnih mikrostrukturnih promena izazvanih ultrazvučnim ili termičkim tretmanom.

Ukupno posmatrano, rezultati dinamičkog ispitivanja potvrđuju da densifikacija drveta u analiziranom opsegu parametara prvenstveno utiče na povećanje elastične krutosti materijala kroz povećanje gustine i kompakciju ćelijske strukture, dok dodatni tretmani ne menjaju osnovni mehanizam elastičnog odziva. Istovremeno, visoka korelacija između dinamičkog i statičkog modula elastičnosti potvrđuje da dinamičke metode mogu predstavljati pouzdan nedestruktivni alat za procenu mehaničkih svojstava densifikovanog drveta.

7 ZAKLJUČCI

Na osnovu sprovedenog eksperimentalnog istraživanja termo-hidro-mehaničke (THM) densifikacije drveta topole, uz primenu ultrazvučnog predtretmana i termičkog posttretmana, mogu se izvesti sledeći zaključci.

1. Efekat THM densifikacije na gustinu i mehanička svojstva

THM densifikacija u otvorenom sistemu pokazala se kao efikasan postupak za unapređenje svojstava drveta topole – brzorastuće vrste niske početne gustine. Povećanjem stepena upresovanja ostvareno je značajno povećanje zapreminske mase, koje je direktno uslovalo povećanje savojne čvrstoće, statičkog modula elastičnosti i dinamičkih modula elastičnosti.

Savojna čvrstoća (MOR) pokazala je izrazit rast sa povećanjem stepena upresovanja, pri čemu su vrednosti kod najvišeg stepena upresovanja bile višestruko veće u odnosu na nedensifikovano drvo. Sličan trend zabeležen je i za statički modul elastičnosti (MOE), kao i za longitudinalni i savojni dinamički modul elastičnosti (Ed,L i Ed,F). Na osnovu toga može se zaključiti da THM densifikacija predstavlja veoma efikasan način za povećanje mehaničkih performansi drveta topole.

Ovim je posebna hipoteza H1 potvrđena, jer je eksperimentalno pokazano da THM modifikacija dovodi do značajnog povećanja gustine i unapređenja mehaničkih svojstava drveta.

2. Veza između stepena upresovanja, gustine i mehaničkih svojstava

Rezultati su pokazali jasnu i konzistentnu vezu između stepena upresovanja, povećanja gustine i poboljšanja mehaničkih svojstava. Sa porastom stepena upresovanja dolazi do povećanja gustine, a povećanje gustine prati porast MOR, MOE i dinamičkih modula elastičnosti.

Kod modula elastičnosti utvrđena je gotovo proporcionalna zavisnost od gustine, dok je kod savojne čvrstoće uočena nešto veća varijabilnost rezultata, što se može objasniti lokalnim mikrostrukturnim oštećenjima i heterogenošću materijala. Uprkos tome, opšti trend povećanja MOR sa povećanjem stepena upresovanja bio je jasan i statistički potvrđen.

Na osnovu toga može se zaključiti da postoji jasna pozitivna korelacija između stepena upresovanja, gustine i mehaničkih svojstava drveta, čime je posebna hipoteza H2 potvrđena.

3. Efekat ultrazvučnog predtretmana

Ultrazvučni predtretman nije pokazao univerzalan efekat kroz sve stepene upresovanja, već se njegov pozitivan uticaj jasno manifestovao samo pri umerenim nivoima upresovanja. Najizraženiji efekat ultrazvučnog tretmana zabeležen je pri CR \approx 50%, gde su uzorci sa ultrazvučnim predtretmanom pokazali: veći ostvareni stepen upresovanja, povećanu savojnu čvrstoću, povećan modul elastičnosti, smanjenu elastičnu i delimično smanjenu viskoelastičnu deformaciju.

Posebno značajan rezultat istraživanja jeste činjenica da efekat ultrazvučnog predtretmana nije bio univerzalan, već je bio najizraženiji upravo pri umerenim stepenima upresovanja (CR \approx 50%), gde su netretirani uzorci pokazivali niža mehanička

svojstva i veću relaksaciju deformacije. U tim uslovima ultrazvučni predtretman značajno je unapredio savojnu čvrstoću, modul elastičnosti i stabilnost deformacije. Sa druge strane, pri višim stepenima upresovanja, gde su već i referentni uzorci postizali veoma visoka mehanička svojstva usled intenzivnog sabijanja drvene strukture, dodatni efekat ultrazvučnog predtretmana postao je znatno manje izražen.

Na osnovu toga može se zaključiti da ultrazvučni predtretman ne utiče samo na povećanje gustine, već i na efikasnost THM densifikacije, odnosno na način formiranja densifikovane drvene strukture. Poseban doprinos ove disertacije ogleda se u pokazivanju da efekat ultrazvučnog predtretmana izrazito zavisi od stepena upresovanja i uslova deformacije ćelijske strukture tokom THM procesa.

Pri višim stepenima upresovanja ($CR \geq 60\%$) pozitivan uticaj ultrazvučnog predtretmana se značajno smanjuje ili potpuno nestaje, a razlike između tretiranih i netretiranih uzoraka više nisu statistički značajne. To ukazuje da ultrazvučni predtretman ima smisla primenjivati pre svega kod umerenih stepena upresovanja, dok pri vrlo visokim stepenima upresovanja njegov doprinos procesu densifikacije postaje zanemarljiv. Zbog toga se posebna hipoteza H3 smatra delimično potvrđenom, jer ultrazvučni predtretman može doprineti poboljšanju mehaničkih svojstava i smanjenju relaksacije deformacije, ali samo u ograničenom opsegu procesnih parametara.

4. Efekat termičkog posttretmana

Termički posttretman imao je snažan efekat na dimenzionu stabilnost densifikovanog drveta. Termički modifikovani uzorci pokazali su značajno smanjenje higroskopnosti i znatno niže vrednosti viskoelastične relaksacije u odnosu na uzorke bez

termičkog tretmana. U pojedinim slučajevima SR je praktično eliminisan, čak i pri vrlo visokim relativnim vlažnostima vazduha.

Istovremeno, termički posttretman doveo je do smanjenja savojne čvrstoće, a u manjoj meri i modula elastičnosti, što je u skladu sa poznatim hemijskim promenama u hemicelulozama i ligninu tokom termičke modifikacije drveta. To pokazuje da termički posttretman predstavlja veoma efikasan postupak stabilizacije densifikovanog drveta, ali uz određeni kompromis u pogledu mehaničkih svojstava.

5. Optimalne kombinacije procesnih parametara

Rezultati istraživanja pokazali su da optimalna kombinacija procesnih parametara zavisi od cilja modifikacije. Ukoliko je cilj postizanje visokih mehaničkih svojstava, najefikasniji pristup je primena većih stepena upresovanja ($CR \geq 60\%$), pri čemu dodatni ultrazvučni predtretman nema značajan doprinos.

Ukoliko je cilj postizanje dobrog balansa između povećanja mehaničkih svojstava i efikasnosti procesa, ultrazvučni predtretman ima smisla koristiti pri umerenim stepenima upresovanja (oko $CR \approx 50\%$), gde doprinosi poboljšanju svojstava uz manji gubitak zapremine drveta tokom densifikacije.

Ukoliko je cilj visoka dimenziona stabilnost materijala, naročito u uslovima gde se očekuje izlaganje visokim relativnim vlažnostima vazduha, primena termičkog posttretmana je neophodna. Sa druge strane, ukoliko se materijal koristi u stabilnim uslovima relativne vlažnosti vazduha (ispod približno 60%), termički posttretman nije nužan.

Na osnovu toga može se zaključiti da kombinovana primena ultrazvučnog predtretmana, THM densifikacije i termičkog posttretmana omogućava optimizaciju

svojstava drveta u zavisnosti od ciljane namene. U tom smislu posebna hipoteza H4 može se smatrati potvrđenom, jer je pokazano da kombinovanje različitih postupaka modifikacije rezultuje različitim odnosom mehaničkih svojstava i dimenzione stabilnosti.

Rezultati istraživanja pokazuju da THM densifikacija drveta topole predstavlja efikasnu metodu za unapređenje svojstava drveta niske prirodne gustine. Kombinacijom različitih modifikacionih postupaka moguće je ciljno podešavati odnos mehaničkih svojstava i dimenzione stabilnosti materijala.

Ultrazvučni predtretman pokazao se korisnim pre svega pri umerenim stepenima upresovanja, dok termički posttretman predstavlja ključni postupak stabilizacije densifikovanog drveta u uslovima povećane vlažnosti.

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da modifikovano drvo topole dobijeno THM densifikacijom predstavlja materijal značajno unapređenih performansi, sa potencijalom za primenu u oblastima gde je potrebna povećana mehanička otpornost drveta.

8 BUDUĆA ISTRAŽIVANJA

Na osnovu rezultata ovog istraživanja, buduća istraživanja biće usmerena pre svega ka detaljnijoj karakterizaciji modifikovanog drveta i preciznijem razdvajanju efekata ultrazvučnog (US) predtretmana u okviru THM procesa.

U ovom radu je pokazano da efekti US predtretmana nisu jednoznačni i da u velikoj meri zavise od stepena upresovanja i kombinacije sa termičkim posttretmanom. Posebno je uočeno da se pozitivni efekti US tretmana izraženije manifestuju pri nižim stepenima upresovanja ($CR \approx 50\%$), dok pri višim nivoima densifikacije dolazi do njihovog slabljenja

ili potpunog izostanka. Zbog toga će dalja istraživanja biti usmerena ka preciznijem utvrđivanju razlika između uzoraka sa i bez US predtretmana, kao i identifikaciji uslova u kojima ovaj tretman ima stvarni tehnološki značaj.

Poseban pravac istraživanja odnosiće se na detaljniju mikro-strukturnu karakterizaciju modifikovanog drveta, sa ciljem objašnjenja mehanizama koji stoje iza uočenih razlika u elastičnoj i viskoelastičnoj relaksaciji, kao i mehaničkim svojstvima. U tom smislu, planira se primena metoda kao što su SEM analiza oštećenja ćelijskog zida i kolapsa lumena, FTIR ili srodne spektroskopske tehnike za praćenje hemijskih promena, kao i detaljnija analiza profila gustine po debljini. Takođe, dalja istraživanja biće usmerena ka optimizaciji parametara ultrazvučnog predtretmana, uključujući trajanje tretmana i intenzitet delovanja, sa ciljem postizanja većeg efekta pri densifikaciji, naročito u kombinaciji sa umerenim stepenima upresovanja.

Konačno, poseban fokus budućih istraživanja biće na definisanju optimalnog režima obrade, kojim se postiže balans između povećanja mehaničkih svojstava i dimenzione stabilnosti materijala. U tom kontekstu, rezultati ovog rada ukazuju da su niži stepeni upresovanja (oko 50%) potencijalno najpovoljniji sa aspekta tehničke i praktične primene, što predstavlja važnu smernicu za dalji razvoj i primenu THM densifikacije drveta topole.

9 LITERATURA

1. Anshari, B., Guan, Z. W., Kitamori, A., Jung, K., Hassel, I., & Komatsu, K. (2011). Mechanical and moisture-dependent swelling properties of compressed Japanese cedar. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1718–1725. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.095>
2. Aydin, M., & Aydin, T. Y. (2023). Influence of growth ring number and width on elastic constants of poplar. *BioResources*, 18(4), 8383–8502.
3. Back, E., & Salmén, L. (1982). Glass transitions of wood components hold implications for molding and pulping processes. *Tappi Journal*, 65, 107110.
4. Báder, M., & Németh, R. (2023). A Review of Wood Compression along the Grain—After the 100th Anniversary of Pleating. *Forests 2023, Vol. 14*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/f14040763>
5. Balasso, M., Kutnar, A., Niemelä, E. P., Mikuljan, M., Nolan, G., Kotlarewski, N., Hunt, M., Jacobs, A., & O'reilly-Wapstra, J. (2020). Wood properties characterisation of thermo-hydro mechanical treated plantation and native tasmanian timber species. *Forests*, 11(11), 1–15. <https://doi.org/10.3390/f11111189>
6. Banković, S., Medarević, M., Pantić, D., Petrović, N., Šljukić, B., & Obradović, S. (2009). The growing stock of the Republic of Serbia: State and problems. *Glasnik Šumarskog Fakulteta*, (100), 7–29. <https://doi.org/10.2298/GSF0900007B>
7. Bao, M., Huang, X., Jiang, M., Li, N., Yu, Y., & Yu, W. (2018). Study on the changes in surface characteristics of *Populus tomentosa* due to thermo-hydro-process. *Journal of Wood Science*, 64(3), 264–278. <https://doi.org/10.1007/s10086-018-1697-9>
8. Bao, M., Huang, X., Jiang, M., Yu, W., & Yu, Y. (2017). Effect of thermo-hydro-mechanical densification on microstructure and properties of poplar wood (*Populus tomentosa*). *Journal of Wood Science*, 63(6), 591–605. <https://doi.org/10.1007/s10086-017-1661-0>
9. Bhuiyan, M. T. R., & Hirai, N. (2005). Study of crystalline behavior of heat-treated wood cellulose during treatments in water. *Journal of Wood Science*, 51(1), 42–47. <https://doi.org/10.1007/s10086-003-0615-x>
10. Bodig, J., & Jayne, B. A. (1982). *Mechanics of wood and wood composites*. Van Nostrand Reinhold. <http://catalog.hathitrust.org/api/volumes/oclc/7573105.html>

11. Boonstra, M. J., & Tjeerdsma, B. (2006). Chemical analysis of heat treated softwoods. *Holz Als Roh- Und Werkstoff* 2005 64:3, 64(3), 204–211. <https://doi.org/10.1007/s00107-005-0078-4>
12. Börcsök, Z., & Pásztor, Z. (2021). The role of lignin in wood working processes using elevated temperatures: an abbreviated literature survey. In *European Journal of Wood and Wood Products* (Vol. 79, Number 3, pp. 511–526). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01637-3>
13. Bourgois, J., & Guyonnet, R. (1988). Characterization and analysis of torrefied wood. *Wood Science and Technology*, 22(2), 143–155. <https://doi.org/10.1007/BF00355850>
14. Brancheriau, L., & Bailleres, H. (2002). Natural vibration analysis of clear wooden beams: A theoretical review. *Wood Science and Technology*, 36(4), 347–365. <https://doi.org/10.1007/s00226-002-0143-7>
15. Bucur, V. (2023). A Review on Acoustics of Wood as a Tool for Quality Assessment. *Forests*, 14(8). <https://doi.org/10.3390/f14081545>
16. Budakçı, M., Şenol, S., & Korkmaz, M. (2021). Effects of Thermo-Vibro-Mechanic® densification on the density and swelling of pre-treated Uludağ fir and black poplar wood. *BioResources*, 16(1), 1581–1599.
17. Cabral, J. P., Kafle, B., Subhani, M., Reiner, J., & Ashraf, M. (2022). Densification of timber: a review on the process, material properties, and application. *Journal of Wood Science*, 68(1), 1–24. <https://doi.org/10.1186/S10086-022-02028-3>
18. Cai, J., Ding, T., & Yang, L. (2012). Dimensional Stability of Poplar Wood after Densification Combined with Heat Treatment. *Applied Mechanics and Materials*, 152–154, 112–116. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.152-154.112>
19. Candelier, K., Hannouz, S., Elaieb, M., Collet, R., Dumarçay, S., Pétrissans, A., Gérardin, P., & Pétrissans, M. (2015). Utilization of temperature kinetics as a method to predict treatment intensity and corresponding treated wood quality: Durability and mechanical properties of thermally modified wood. *Maderas: Ciencia y Tecnologia*, 17(2), 253–262. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000024>
20. Candelier, K., Thevenon, M. F., Petrissans, A., Dumarçay, S., Gerardin, P., & Petrissans, M. (2016). Control of wood thermal treatment and its effects on decay resistance: a review. *Annals of Forest Science*, 73(3), 571–583. <https://doi.org/10.1007/s13595-016-0541-x>

21. Cao, R., Marttila, J., Möttönen, V., Heräjärvi, H., Ritvanen, P., & Verkasalo, E. (2020). Mechanical properties and water resistance of Vietnamese acacia and rubberwood after thermo-hygro-mechanical modification. *European Journal of Wood and Wood Products* 2020 78:5, 78(5), 841–848. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01552-7>
22. Carvalho, D. E., da Rocha, M. P., Klitzke, R. J., & de Cademartori, P. H. G. (2024). Surface changes in wood submitted to thermomechanical densification. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 26, e4224. <https://doi.org/10.22320/s0718221x/2024.42>
23. Costa, J. C., Branco, J. M., Camões, A. F., Costa, J. C., Branco, J. M., & Camões, A. F. (2019). Thermal modification of most representative Portuguese wood species. A preliminary study. *Revista de La Construcción*, 18(3), 488–500. <https://doi.org/10.7764/RDLC.18.3.488>
24. De Boever, L., Vansteenkiste, D., Van Acker, J., & Stevens, M. (2007). End-use related physical and mechanical properties of selected fast-growing poplar hybrids (*Populus trichocarpa* x *P. deltoides*). *Annals of Forest Science*, 64(6), 621–630. <https://doi.org/10.1051/forest:2007040>
25. EN 310: (1993). Wood-based panels — Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength. *European Committee for Standardization (CEN), Brussels*.
26. EN 13183-1: (2002). Moisture content of a piece of sawn timber — Part 1: Determination by oven dry method. *European Committee for Standardization (CEN), Brussels*.
27. Espinosa, L., Brancheriau, L., Cortes, Y., Prieto, F., & Lasaygues, P. (2020). Ultrasound computed tomography on standing trees: accounting for wood anisotropy permits a more accurate detection of defects. *Annals of Forest Science*, 77, 68. <https://doi.org/10.1007/s13595-020-00971-z/Published>
28. Esteves, B., Graça, J., & Pereira, H. (2008). *Extractive composition and summative chemical analysis of thermally treated eucalypt wood*. *Holzforschung*, 62(3), 344–351. <https://doi.org/doi:10.1515/HF.2008.057>
29. Esteves, B. M., Domingos, I. J., & Pereira, H. M. (2008). Heat treatment of pine wood. *BioResources*, 3(1), 142–154.
30. Esteves, B. M., & Pereira, H. M. (2009). Heat treatment of wood. *BioResources*, 4(1), 370–404.

31. Esteves, B., Marques, A. V., Domingos, I., & Pereira, H. (2007). Influence of steam heating on the properties of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood. *Wood Science and Technology* 2006 41:3, 41(3), 193–207. <https://doi.org/10.1007/s00226-006-0099-0>
32. Fengel, D., & Wegener, G. (1984). *Wood: chemistry, ultrastructure, reactions*. Walter de Gruyter.
33. Fleming, M. R., Agrawal, D. K., Bhardwaj, M. C., Bauer, L. S., Janowiak, J. J., Shield, J. E., Hoover, K., & Roy, R. (2005). Noncontact ultrasound detection of exotic insects in wood packing materials. *Forest Products Journal*. 55(6): 33-37., 55. <https://research.fs.usda.gov/treesearch/19371>
34. Fu, Q., Cloutier, A., & Laghdir, A. (2017). Effects of Heat and Steam on the Mechanical Properties and Dimensional Stability of Thermo-hygromechanically-densified Sugar Maple Wood. *BioResources*, 12(4), 9212–9226.
35. Gao, Z., Huang, R., Lu, J., Chen, Z., Guo, F., & Zhan, T. (2016). Sandwich compression of wood: control of creating density gradient on lumber thickness and properties of compressed wood. *Wood Science and Technology*, 50(4), 833–844. <https://doi.org/10.1007/s00226-016-0824-2>
36. Han, L., Kutnar, A., Couceiro, J., & Sandberg, D. (2022). Creep Properties of Densified Wood in Bending. *Forests*, 13(5). <https://doi.org/10.3390/f13050757>
37. Han, T., Gao, J., Lu, M., Avramidis, S., Liu, S., He, Z., & Qian, J. (2023). *Effect of ultrasound-assisted pretreatment on the hygroscopic dimensional stability of Ailanthus altissima wood modified with 1,3-dimethylol-4,5-dihydroxy ethylene urea*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3332966/v1>
38. He, Z., Yang, F., Peng, Y., & Yi, S. (2013). Ultrasound-Assisted Vacuum Drying of Wood: Effects on Drying Time and Product Quality. *BioResources*, 8(1), 855–863.
39. He, Z., Zhang, Y., Wang, Z., Zhao, Z., & Yi, S. (2016). Reducing wood drying time by application of ultrasound pretreatment. *Drying Technology*, 34(10), 1141–1146. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1099107>
40. He, Z., Zhao, Z., Yang, F., & Yi, S. (2014). Effect of ultrasound pretreatment on wood prior to vacuum drying. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 16(4), 395–402. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2014005000031>

41. Hill, C. A. S. (2006). Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes. In *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes*. <https://doi.org/10.1002/0470021748>
42. Hill, C., Altgen, M., & Rautkari, L. (2021). Thermal modification of wood—a review: chemical changes and hygroscopicity. *Journal of Materials Science*, 56(11), 6581–6614. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05722-z>
43. Huber, C., Langmaier, M., Stadlmann, A., Hochbichler, E., Grabner, M., Teischinger, A., Konnerth, J., Grabner, M., Müller, U., & Pramreiter, M. (2023). Potential alternatives for Norway spruce wood: a selection based on defect-free wood properties. In *Annals of Forest Science* (Vol. 80, Number 1). Springer-Verlag Italia s.r.l. <https://doi.org/10.1186/s13595-023-01206-7>
44. ISO 13061-2: (2014). Physical and mechanical properties of wood — Test methods for small clear wood specimens — Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests. *ISO, Geneva, Switzerland*.
45. Ivetic, V., & Vilotic, D. (2014). The role of plantation forestry in sustainable development. *Glasnik Sumarskog Fakulteta*, (suppl.), 157–180. <https://doi.org/10.2298/gsf14s1157i>
46. Jakob, M., Czabany, I., Veigel, S., Müller, U., & Gindl-Altmutter, W. (2022). Comparing the suitability of domestic spruce, beech, and poplar wood for high-strength densified wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 80(4), 859–876. <https://doi.org/10.1007/s00107-022-01828-0>
47. Jančíková, V., & Jablonský, M. (2025). Thermal Modification of Wood—A Review. *Sustainable Chemistry 2025, Vol. 6*, 6(3). <https://doi.org/10.3390/suschem6030019>
48. Jones, D., & Sandberg, D. (2020). A Review of Wood Modification Globally – Updated Findings from COST FP1407. *Interdisciplinary Perspectives on the Built Environment*, 1. <https://doi.org/10.37947/ipbe.2020.vol1.1>
49. Keca, L., & Keca, N. (2011). Investment Appraisal of Poplar Plantations in Serbi. *Baltic Forestry*, 17(2), 1392–1355. <https://www.researchgate.net/publication/265865163>
50. Kerr, T., & Bailey, I. W. . (1934). The Cambium and Its Derivative Tissues: No. X. Structure, Optical Properties and Chemical Composition of the So-Called Middle Lamella. *Journal of the Arnold Arboretum*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:99837855>

51. Klinger, J., Westover, T., Saha, N., Sibbett, C., & Williams, C. L. (2025). Thermal properties of native and densified hardwood, softwoods, and agricultural residue. *Biomass and Bioenergy*, 195(6), 107711. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107711>
52. Komán, S., Németh, R., & Báder, M. (2023). An Overview of the Current Situation of European Poplar Cultures with a Main Focus on Hungary. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(23). <https://doi.org/10.3390/app132312922>
53. Kooche, P. (2007). Thermo-Hydro-Mechanical Densification of Western Hemlock (*Tsuga heterophylla*). In *Technology*.
54. Kord, B., Kialashaki, A., & Kord, B. (2010). The within-tree variation in wood density and shrinkage, and their relationship in *Populus euramericana*. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 34(2), 121–126. <https://doi.org/10.3906/tar-0903-14>
55. Kozakiewicz, P., Drożdżek, M., Laskowska, A., Grześkiewicz, M., Bytner, O., Radomski, A., & Zawadzki, J. (2019). Effects of thermal modification on selected physical properties of sapwood and heartwood of black poplar (*Populus nigra* L.). *BioResources*, 14(4), 8391–8404.
56. Kutnar, A., & Kamke, F. A. (2012). Compression of wood under saturated steam, superheated steam, and transient conditions at 150°C, 160°C, and 170°C. *Wood Science and Technology*, 46(1–3), 73–88. <https://doi.org/10.1007/s00226-010-0380-0>
57. Laine, K., Belt, T., Rautkari, L., Ramsay, J., Hill, C. A. S., & Hughes, M. (2013). Measuring the thickness swelling and set-recovery of densified and thermally modified Scots pine solid wood. *Journal of Materials Science*, 48(24), 8530–8538. <https://doi.org/10.1007/s10853-013-7671-4>
58. Laine, K., Rautkari, L., & Hughes, M. (2012). The effect of process parameters on the hardness of surface densified Scots pine solid wood. *European Journal of Wood and Wood Products* 2012 71:1, 71(1), 13–16. <https://doi.org/10.1007/S00107-012-0649-0>
59. Li, C., Pradhan, P., Chen, G., Kropp, J. P., & Schellnhuber, H. J. (2025). Carbon footprint of the construction sector is projected to double by 2050 globally. *Communications Earth and Environment*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02840-x>
60. Li, J., Kocaefe, S. · D., Zhang, · J, Shi, J. L., Zhang, J., & Kocaefe, D. (2007). Mechanical behaviour of Québec wood species heat-treated using ThermoWood process. *Holz Als*

- Roh- Und Werkstoff* 2007 65:4, 65(4), 255–259. <https://doi.org/10.1007/s00107-007-0173-9>
61. Li, L., Gong, M., Yuan, N., & Li, D. (2013). Optimal densification of fir. *BioResources*, 8(3), 3967–3981.
62. Liepiņš, J., Jaunslaviete, I., Liepiņš, K., Jansone, L., Matisons, R., Lazdiņš, A., & Jansons, Ā. (2023). Effect of stem rot on wood basic density, carbon, and nitrogen content of living deciduous trees in hemiboreal forests. *Silva Fennica*, 57(3). <https://doi.org/10.14214/sf.23040>
63. Liu, H., Zhang, Y., Yang, L., & Wu, Z. (2018). Effects of Ultrasound Pretreatment on Microstructure and Drying Characteristics of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*. *BioResources*, 13(3), 5953–5964. <https://doi.org/DOI:10.15376/biores.13.3.5953-5964>
64. Liu, Y., Nie, Y., Lu, X., Zhang, X., He, H., Pan, F., Zhou, L., Liu, X., Ji, X., & Zhang, S. (2019). Cascade utilization of lignocellulosic biomass to high-value products. *Green Chem.*, 21(13), 3499–3535. <https://doi.org/10.1039/C9GC00473D>
65. Luan, Y., Fang, C. H., Ma, Y. F., & Fei, B. H. (2022). Wood mechanical densification: a review on processing. *Materials and Manufacturing Processes*, 37(4), 359–371. <https://doi.org/10.1080/10426914.2021.2016816>
66. Mahapatra, K., & Gustavsson, L. (2008). Multi-storey timber buildings: breaking industry path dependency. *Building Research & Information*, 36(6), 638–648. <https://doi.org/10.1080/09613210802386123>
67. Marcon, B., Goli, G., Matsuo-Ueda, M., Denaud, L., Umemura, K., Gril, J., & Kawai, S. (2018). Kinetic analysis of poplar wood properties by thermal modification in conventional oven. *IForest*, 11(1), 131–139. <https://doi.org/10.3832/ifor2422-010>
68. Mburu, F., Dumarçay, S., Bocquet, J. F., Petrissans, M., & Gérardin, P. (2008). Effect of chemical modifications caused by heat treatment on mechanical properties of *Grevillea robusta* wood. *Polymer Degradation and Stability*, 93(2), 401–405. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2007.11.017>
69. Milić, G., Todorović, N., Veizović, M., & Popadić, R. (2023). Heating Rate during Thermal Modification in Steam Atmosphere: Influence on the Properties of Maple and Ash Wood. *Forests*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/f14020189>

70. Navi, P., & Girardet, F. (2000). *Effects of Thermo-Hydro-Mechanical Treatment on the Structure and Properties of Wood*. *Holzforschung*, 54(3), 287–293. <https://doi.org/doi:10.1515/HF.2000.048>
71. Navi, P., & Heger, F. (2004). Combined Densification and Thermo-Hydro-Mechanical Processing of Wood. *MRS Bulletin*, 29(5), 332–336. <https://doi.org/10.1557/mrs2004.100>
72. Navi, P., & Pizzi, A. (2015). Property changes in thermo-hydro-mechanical processing: COST Action FP0904 2010-2014: Thermo-hydro-mechanical wood behavior and processing. *Holzforschung*, 69(7), 863–873. <https://doi.org/10.1515/hf-2014-0198>
73. Neyses, B., Karlsson, O., & Sandberg, D. (2020). The effect of ionic liquid and superbase pre-treatment on the spring-back, set-recovery and Brinell hardness of surface-densified Scots pine. *Holzforschung*, 74(3), 303–312. <https://doi.org/10.1515/hf-2019-0158>
74. Neyses, B., Peeters, K., Buck, D., Rautkari, L., & Sandberg, D. (2021). In-situ penetration of ionic liquids during surface densification of Scots pine. *Holzforschung*, 75(6), 555–562. <https://doi.org/10.1515/hf-2020-0146>
75. Neyses, B., Rautkari, L., Yamamoto, A., & Sandberg, D. (2017). Pre-treatment with sodium silicate, sodium hydroxide, ionic liquids or methacrylate resin to reduce the set-recovery and increase the hardness of surface-densified scots pine. *IForest*, 10(5), 857–864. <https://doi.org/10.3832/ifor2385-010>
76. Paul, B. N., Shukla, S. R., Kelkar, B. U., & Nagraik, P. (2024). Production processes, material properties and applications of densified wood: an overview. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*. <https://doi.org/10.1007/s13196-024-00348-z>
77. Pelit, H., & Arisüt, U. (2023). *Roughness, wettability, and morphological properties of impregnated and densified wood materials*. 18(1), 429–446.
78. Pelit, H., Budakçı, M., & Sönmez, A. (2016). Effects of heat post-treatment on dimensional stability and water absorption behaviours of mechanically densified Uludağ fir and black poplar woods. *BioResources*, 11(2), 3215–3229.
79. Pelit, H., & Yorulmaz, R. (2019). Influence of Densification on Mechanical Properties of Thermally Pretreated Spruce and Poplar Wood. *BioResources*, 4(4), 9739–9754.

80. Pelit, H., & Yorulmaz, R. (2023). Influence of thermal pretreatments on dimensional change and humidity sensitivity of densified spruce and poplar wood. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 26, e0924. <https://doi.org/10.22320/s0718221x/2024.09>
81. Pertuzzatti, A., Missio, A. L., De Cademartori, P. H. G., Santini, E. J., Haselein, C. R., Berger, C., Gatto, D. A., & Tondi, G. (2018). Effect of process parameters in the thermomechanical densification of *Pinus elliottii* and *Eucalyptus grandis* fast-growing wood. *BioResources*, 13(1), 1576–1590.
82. Placet, V., Passard, J., & Perré, P. (2008). Viscoelastic properties of wood across the grain measured under water-saturated conditions up to 135 °c: Evidence of thermal degradation. *Journal of Materials Science*, 43(9), 3210–3217. <https://doi.org/10.1007/s10853-008-2546-9>
83. Poncsá, S., Kocaefe, A. D., Bouazara, A. M., Pichette, A., Ndor, S., Ae, P., Kocaefe, D., Mohamed, A. E., Ae, B., & Pichette, A. (2006). Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (*Betula papyrifera*). *Wood Science and Technology* 2006 40:8, 40(8), 647–663. <https://doi.org/10.1007/s00226-006-0082-9>
84. Postnikov, V. V., Kamalova, N. S., & Kal'Chenko, S. V. (2010). Ultrasonic plasticization of lignin in modified wood. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 74(9), 1319–1320. <https://doi.org/10.3103/S106287381009039X/METRICS>
85. Qiu, S., Wang, Z., He, Z., & Yi, S. (2016). The effect of ultrasound pretreatment on poplar wood dimensional stability. *BioResources*, 11(3), 7811–7821.
86. Ramage, M. H., Burrige, H., Busse-Wicher, M., Fereday, G., Reynolds, T., Shah, D. U., Wu, G., Yu, L., Fleming, P., Densley-Tingley, D., Allwood, J., Dupree, P., Linden, P. F., & Scherman, O. (2017). The wood from the trees: The use of timber in construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68(October 2015), 333–359. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107>
87. Rautkari, L., Kamke, F. A., & Hughes, M. (2011). Density profile relation to hardness of viscoelastic thermal compressed (VTC) wood composite. *Wood Science and Technology*, 45(4), 693–705. <https://doi.org/10.1007/s00226-010-0400-0>
88. Rautkari, L., Kutnar, A., Hughes, M., & Kamke, F. (2010). Wood surface densification using different methods. *11th World Conference on Timber Engineering 2010, WCTE 2010*, 4.
89. Ross, R. J., & Pellerin, R. F. (1994). *Nondestructive testing for assessing wood members in structures : a review*. <https://doi.org/10.2737/fpl-gtr-70>

90. Rosso, L., Cantamessa, S., Bergante, S., Biselli, C., Fricano, A., Chiarabaglio, P. M., Gennaro, M., Nervo, G., Secchi, F., & Carra, A. (2023). Responses to Drought Stress in Poplar: What Do We Know and What Can We Learn? *Life* 2023, Vol. 13, 13(2). <https://doi.org/10.3390/LIFE13020533>
91. Rowell, R. M. . (1984). *The Chemistry of solid wood*. American Chemical Society.
92. Rudak, O., Barcik, S., Rudak, P., Chayeuski, V., & Koleda, P. (2021). Densification of wood – Chemical and structural changes due to ultrasonic and mechanical treatment. *BioResources*, 16(4), 8379–8393. <https://doi.org/10.15376/biores.16.4.8379-8393>
93. Sadatnezhad, S. H., Khazaeian, A., Sandberg, D., & Tabarsa, T. (2017). Continuous surface densification of wood: A new concept for large-scale industrial processing. *BioResources*, 12(2), 3122–3132. <https://doi.org/10.15376/biores.12.2.3122-3132>
94. Salmén, L. (1982). *TEMPERATURE AND WATER INDUCED SOFTENING BEHAVIOUR OF WOOD FIBER BASED MATERIALS*.
95. Sandberg, D., Haller, P., & Navi, P. (2013). Thermo-hydro and thermo-hydro-mechanical wood processing: An opportunity for future environmentally friendly wood products. *Wood Material Science and Engineering*, 8(1), 64–88. <https://doi.org/10.1080/17480272.2012.751935>
96. Sargent, R., Mikuljan, M., & Kutnar, A. (2023). Densification Of New Zealand-Grown Eucalyptus Species: Effect Of Grain Orientation And Densification Process On Wood Properties. *Wood and Fiber Science*, 55(2), 143–156. <https://doi.org/10.22382/wfs-2023-13>
97. Scharf, A., Lemoine, A., Neyses, B., & Sandberg, D. (2023). The effect of the growth ring orientation on spring-back and set-recovery in surface-densified wood. *Holzforschung*, 77(6), 394–406. https://doi.org/10.1515/HF-2023-0004/ASSET/GRAPHIC/J_HF-2023-0004_FIG_009.JPG
98. Shao, Y., Li, L., Chen, Z., Wang, S., & Wang, X. (2020). Effects of Thermo-Hydro-Mechanical Treatments on Various Physical and Mechanical Properties of Poplar (Populus) Wood. *BioResources*, 15(4), 9596–9610. <https://doi.org/10.15376/biores.15.4.9596-9610>
99. Sivonen, H., Maunu, {Sirkka L.}, Sundholm, F., Jämsä, S., & Viitaniemi, P. (2002). Magnetic Resonance Studies of Thermally Modified Wood. *Holzforschung*, 56(6), 648–654. <https://doi.org/10.1515/HF.2002.098>

100. Skyba, O. (2008). *Durability and Physical Properties of Thermo-Hygro-Mechanically (THM)-densified Wood*. ETH Zurich.
101. Soria, A. C., & Villamiel, M. (2010). Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 21(7), 323–331. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2010.04.003>
102. Sözbir, G. D., & Bektaş, İ. (2017). The Effect of Heat Modification and Densification on Physical Properties of Poplar Wood. *Drvna Industrija*, 68(4), 315–321. <https://doi.org/10.5552/drind.2017.1719>
103. Sözbir, G. D., Bektaş, I., & Ak, A. K. (2019). Influence of combined heat treatment and densification on mechanical properties of poplar wood. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 21(3), 481–492. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2019005000405>
104. Suslick, K. S. (1990). Sonochemistry. *Science*, 247(4949), 1439–1445. <https://doi.org/10.1126/science.247.4949.1439>
105. Tanaka, T., Avramidis, S., & Shida, S. (2010). A PRELIMINARY STUDY ON ULTRASONIC TREATMENT EFFECT ON TRANSVERSE WOOD PERMEABILITY. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 12(1), 03–09. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2010000100001>
106. Tenorio, C., & Moya, R. (2020). Effect of thermo-hydro-mechanical densification on the wood properties of three short-rotation forest species in Costa Rica. *BioResources*, 15(4).
107. TenWolde, A., McNatt, J. D., & Krahn, L. (1988). *Thermal properties of wood and wood panel products for use in buildings*. <https://doi.org/10.2172/6059532>
108. Tischer, P. C. S. F., Sierakowski, M. R., Westfahl, H., & Tischer, C. A. (2010). Nanostructural Reorganization of Bacterial Cellulose by Ultrasonic Treatment. *Biomacromolecules*, 11(5), 1217–1224. <https://doi.org/10.1021/bm901383a>
109. Tjeerdsma, B. F., Boonstra, M., Pizzi, A., Tekely, P., & Militz, H. (1998). Characterisation of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement. *Holz Als Roh- Und Werkstoff*, 56, 149–153. <https://doi.org/10.1007/s001070050287>
110. Tjeerdsma, B. F., & Militz, H. (2005). Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood. *Holz Als Roh - Und Werkstoff*, 63(2), 102–111. <https://doi.org/10.1007/s00107-004-0532-8>

111. Todaro, L., Liuzzi, S., Pantaleo, A. M., Lo Giudice, V., Moretti, N., & Stefanizzi, P. (2021). Thermo-modified native black poplar (*Populus nigra* L.) wood as an insulation material. *IForest*, *14*(3), 268–273. <https://doi.org/10.3832/ifor3710-014>
112. Todorović, N., Popović, Z., & Milić, G. (2015). Estimation of quality of thermally modified beech wood with red heartwood by FT-NIR spectroscopy. *Wood Science and Technology*, *49*(3), 527–549. <https://doi.org/10.1007/s00226-015-0710-3>
113. Tuziuti, T., Yasui, K., & Kanematsu, W. (2025). Impregnation of wood with water using ultrasonic irradiation and water containing bulk nanobubbles. *Wood Science and Technology*, *59*(1). <https://doi.org/10.1007/s00226-024-01611-9>
114. van de Pol, M., & Wright, J. (2009). A simple method for distinguishing within-versus between-subject effects using mixed models. *Animal Behaviour*, *77*(3), 753–758. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2008.11.006>
115. Vitaniemi, P., Jimsi, S., & Elk, P. (1997). *METHOD FOR IMPROVING BODEGRADATION RESISTANCE AND OMENSONAL STABLITY OF CELLULOSC PRODUCTS 54*).
116. Vorreiter Ludwig. (1942). Gehärtete und mit Metall oder Öl getränkte Hölzer. *Holz Als Roh- Und Werkstoff*, *5*, 59–69.
117. Wan, P. J., Muanda, M. wa, & Covey, J. E. (1992). Ultrasonic vs. nonultrasonic hydrogenation in a batch reactor. *Journal of the American Oil Chemists Society*, *69*(9), 876–879. <https://doi.org/10.1007/BF02636336>
118. Wehsener, J., Brischke, C., Meyer-Veltrup, L., Hartig, J., & Haller, P. (2018). Physical, mechanical and biological properties of thermo-mechanically densified and thermally modified timber using the Vacu3-process. *European Journal of Wood and Wood Products*, *76*(3), 809–821. <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1278-4>
119. Welzbacher, C. R., Wehsener, J., Rapp, A. O., & Haller, P. (2008). Thermo-mechanical densification combined with thermal modification of Norway spruce (*Picea abies* Karst) in industrial scale – Dimensional stability and durability aspects. *Holz Als Roh- Und Werkstoff* *2007 66:1*, *66*(1), 39–49. <https://doi.org/10.1007/S00107-007-0198-0>
120. Wikberg, H., & Maunu, S. L. (2004). Characterisation of thermally modified hard- and softwoods by ¹³C CPMAS NMR. *Carbohydrate Polymers*, *58*(4), 461–466. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2004.08.008>
121. Winandy, J. E., Lebow, P. K., & Statisticlan, M. (2001). Modeling Strength Loss in Wood by Chemical Composition. Part I. an Individual Component Model for Southern

- Pine. *Wood and Fiber Science*, 239–254.
<https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/1465>
122. Windeisen, E., Strobel, C., & Wegener, G. (2007). Chemical changes during the production of thermo-treated beech wood. *Wood Science and Technology*, 41(6), 523–536. <https://doi.org/10.1007/s00226-007-0146-5>
123. Wu, G., Shah, D. U., Janeček, E. R., Burridge, H. C., Reynolds, T. P. S., Fleming, P. H., Linden, P. F., Ramage, M. H., & Scherman, O. A. (2017). Predicting the pore-filling ratio in lumen-impregnated wood. *Wood Science and Technology*, 51(6), 1277–1290. <https://doi.org/10.1007/s00226-017-0933-6>
124. Xu, B. H., Liu, K., & Bouchaïr, A. (2020). Mechanical properties and set recovery of compressed poplar with glycerin pretreatment. *Wood Research*, 65(2), 293–302. <https://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/65.2.293302>
125. Yan, K., Zhang, F., Du, Y., Ramaswamy, H. S., Zhu, S., Hu, L., & Yu, Y. (2020). Delayed Elastic Strain and Set-recovery Evaluation in High-pressure Densified Hybrid Poplar Wood-New Assessment Considerations. *BioResources*, 15(2), 2691–2707.
126. Yan, S., Eichhorn, S. J., & Toumpanaki, E. (2022). Numerical simulation of transverse compression and densification of wood. *Wood Science and Technology*, 56(4), 1007–1027. <https://doi.org/10.1007/s00226-022-01388-9>
127. Yang, H., Gao, M., Wang, J., Mu, H., & Qi, D. (2021). Fast Preparation of High-Performance Wood Materials Assisted by Ultrasonic and Vacuum Impregnation. *Forests*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/f12050567>
128. Yildiz, S., Gezer, E. D., & Yildiz, U. C. (2006). Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat. *Building and Environment*, 41(12), 1762–1766. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.017>
129. Yu, Y., Li, A., Yan, K., Ramaswamy, H. S., Zhu, S., & Li, H. (2020). High-pressure densification and hydrophobic coating for enhancing the mechanical properties and dimensional stability of soft poplar wood boards. *Journal of Wood Science*, 66(1). <https://doi.org/10.1186/s10086-020-01892-1>
130. Zaman, A., Alén, R., & Kotilainen, R. (2000). Thermal Behavior of Scots Pine (*Pinus Sylvestris*) and Silver Birch (*Betula Pendula*) at 200-230°. *Wood and Fiber Science*, 138–143. <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/996>

131. Zawadzki, J., Radomski, A., & Gawron, J. (2013). THE EFFECT OF THERMAL MODIFICATION ON SELECTED PHYSICAL PROPERTIES OF WOOD OF SCOTS PINE (PINUS SYLVESTRIS L.). *Wood Research*, 58, 243–250.
132. Zhao, Z., Ma, Q., He, Z., & Yi, S. (2016). Effects of Frequency and Processing Time on the Drying Course of Ultrasound-assisted Impregnated Wood. *BioResources*, 11(1), 1951–1958.
133. Zhou, Q., Chen, C., Tu, D., Zhu, Z., & Li, K. (2019). Surface densification of poplar solid wood: Effects of the process parameters on the density profile and hardness. *BioResources*, 14(2), 4814–4831.

BIOGRAFIJA AUTORA

Marko Veizović mast. inž.

Lični podaci:

Mesto rođenja: Beograd, Srbia
Datum rođenja: 24.03.1991.
E-mail adresa: marko.veizovic@sfb.bg.ac.rs
Strani jezik: Engleski C1

Radno iskustvo:

2018 - trenutno Univerzitet u Beogradu – Šumarski fakultet
Odsek za tehnologije drveta
Asistent

2016 – 2018 Univerzitet u Beogradu – Šumarski fakultet
Odsek za tehnologije, menadžment i projektovanje nameštaja i
proizvoda od drveta
Saradnik u nastavi

2013 – 2016 Rad u industriji
preduzeće Active design – **menadžer proizvodnje**
preduzeće Nobili furniture – **konstruktor/projektant**

Obrazovanje:

2017 – u toku Univerzitet u Beogradu – Šumarski fakultet
Doktorske studije u oblasti tehnologija drveta

2015 - 2017 Univerzitet u Beogradu – Šumarski fakultet
Stepen: Master inženjer za tehnologije, menadžment i
projektovanje nameštaja i proizvoda od drveta
Master rad: “Kvalitet sušenja i fizičko-mehanička svojstva
subfosilnog drveta hrasta (quercus spp.) iz centralne Srbije”

2014 Fakultet za tehnologiju drveta, Univerzitet prirodnih nauka,
Poznan, Poljska
CEEPUS razmena studenata – jedan semestar

2010 - 2015 Univerzitet u Beogradu – Šumarski fakultet
Stepen: Diplomirani inženjer za preradu drveta
Završni rad: “Kvalitet parenja bagremovog drveta”

Oblasti istraživanja:

- svojstva drveta, sušenje drveta, modifikacije drveta, upotreba drveta u gradnji

Druge aktivnosti i usavršavanja:

· Učesnik na projektima:

- DECORATOR – Danubians Cradle-to-Cradle Architecture and construction processes. Interreg programme – Danube region DRP0200466 (2024 – 2026)
- DRWO4.0 – Danube Region Wood Industry Transformation Model towards Industry 4.0 DRP0200218 (2024 – 2025)
- FULAR – Shaping new paths towards Furniture Circularity, IPA-ADRION00373 (2024-2027)
- FORESDA – „Forest-based cross sectoral value chains fostering innovation and competitiveness in the Danube Region“ (2017-2019) #DTP1-383-1.1
- Projekat Ministarstva nauke Srbije #31041 i Bilateralni projekat Slovenija – Srbija (2018-2022)
- Bilateralni projekat Srbija-Slovenija, InnoRenew CoE – Srbija, Univerzitet u Beogradu, Šumarski fakultet (2018-2019)
- Projekat “Uprave za šume Republike Srbije” - Предлог критеријума и индикатора расподеле дрвета из државних шума у Републици Србији (2019-2020)
- COST - CA20139 - Holistic design of taller timber buildings (2021-2025)
- “Innovation School Sprungbrett” Berner Fachhochschule, Switzerland 2017; Technical faculty Bihac, Bosnia and Herzegovina 2017, University of Ljubljana, Slovenia 2018; University of wood science and technology Sankt Petersburg, Russia 2018

· Seminari i treninzi:

- COST HELEN Summer School - LCA for Tall Timber Buildings
- European Institute of Innovation & Technology, EIT Climate - KIC Summer school "Wood construction in climate change mitigation", 2019 (Alto University, Helsinki; Chalmers University of Technology, Gøteborg)
- Horizon 2020 Upravljanje projektima i pisanje predloga projekta - trening, UNDP, 2019
- TRAIN - Training and research for Academic Newcomers: Preduzetništvo, Umrežavanje i timski rad; Priprema prijave projekta I upravljanje projektima; Metode istraživanja i akademsko pisanje, 2019
- Expanding Mass Timber Opportunities through testing and Code development - American Wood Council DES612
- Wood Construction and the fire investigator - American Wood Council BCD238
- Short time scientific mision - na Biotehničkom fakultetu Univerziteta u Ljubljani - Odsek za tehnologije drveta, (Slovenija) odobreno od COST action FP1407
- Google Data Analytics Professional Certificate (Excel, R)
- SEMOS Data Analyst Academy – Python, SQL (query), data analysis, data manipulation and visualization

Publikacije:

1. Veizović M., Todorović N., Straže A., Milić G. (2026): Bending Performance of Thermo-Hydro-Mechanically Densified Poplar Wood: Effects of Ultrasonic Pretreatment and Thermal Posttreatment at Different Compression Ratios. *Forests* 17(2):284.
2. Tojić, T., Milić, G., Vrbničanin, S., Špirović-Trifunović B., Božić D., Gavrilović-Grmuša I., Veizović M. (2026): Valorisation of beech steaming condensate: in vitro phytotoxicity and selectivity. *Wood Sci Technol* 60, 31
3. Josifovski A., Živković I., Todorović N., Veizović M., Milošević J., Rajčić A. (2025): Photometric Analysis Of Homogenized X-Ray Images In Determining The Mechanical Properties Of Wood: Preliminary Results, *International Conference Synergy of Architecture and Civil Engineering SINARG 2025*, 1(4), 1649-1656
4. Rančić M., Gavrilović-Grmuša I., Todorović N., Popović M., Veizović M., Milić G. (2025): Using Beech Timber Steaming Condensate in Wood-Based Panel Production, 15th International Scientific Conference on Manufacturing Engineering development and modernization of manufacturing, 161-167
5. Veizović M., Todorović N., Popadić R., Milić G. (2025): Effect of ultrasound pretreatment on spring-back and moisture behavior in densified poplar wood, 7 th International Scientific Conference „Wood Technology & Product Design“, Ohrid, Republic of North Macedonia, 105-109
6. Milić G., Todorović N., Veizović M., Popadić R. (2025): Influence of steaming on the drying behavior of black locust sawn timber, 7 th International Scientific Conference „Wood Technology & Product Design“, Ohrid, Republic of North Macedonia, 52-56
7. Popadić R., Milić G., Todorović N., Veizović M. (2025): The impact of beech log quality on the workload of the production system in the sawmill processing, 7 th International Scientific Conference „Wood Technology & Product Design“, Ohrid, Republic of North Macedonia, 73-77
8. Josifovski, A., Živković, I., Todorović, N., Veizović, M., Milošević, J., & Rajčić, A. (2025): Photometric analysis of an X-ray image, 10th International Academic Conference on PLACES AND TECHNOLOGIES 2025, Beograd, 35
9. Rančić, M., Popović, M., Milić, G., Todorović, N., Veizović, M., & Gavrilović-Grmuša, I. (2024). The effect of the beech wood steaming condensate on curing behaviour of urea-formaldehyde adhesive. *European Journal of Wood and Wood Products*. <https://doi.org/10.1007/s00107-024-02151-6>
10. Tojić, T., Milić, G., Špirović-Trifunović, B., Gavrilović, I. G., Veizović, M., Božić, D., & Vrbničanin Sava, . (2024). Uticaj kondenzata drveta bukve (*Fagus sylvatica* L.) na klijanje semena i rani porast klijanaca korovskih vrsta. XII Kongres O Korovima I Savetovanje O Herbicidima I Regulatorima Rasta.
11. Veizović, M., Cvjetičanin G., Todorović, N., Popadić, R., & Milić, G. (2023). Influence of thermal modification schedules on the natural weathering of maple and ash wood. 6th Conference WOOD TECHNOLOGY & PRODUCT DESIGN.
12. Josifovski, A., Todorović, N., Milošević, J., Veizović, M., Pantelić, F., Aškrabić, M., Vasov, M., & Rajčić, A. (2023). An Approach to In Situ Evaluation of Timber Structures Based on Equalization of Non-Destructive and Mechanical Test Parameters [Basel : MDPI AG, 2011-]. *Buildings*, 13(6), 1405–1405. <https://doi.org/10.3390/buildings13061405>

13. Milic, G., Todorovic, N., Veizovic, M., & Popadic, R. (2023). Heating Rate during Thermal Modification in Steam Atmosphere: Influence on the Properties of Maple and Ash Wood. *FORESTS*, 14(2), 189–189. <https://doi.org/10.3390/f14020189>
14. Veizović, M., Todorović, N., Lovrić, A., & Milić, G. (2022). Rotaciono zavarivanje drveta: mehanička svojstva termički tretiranog drveta hrasta, *Glasnik Šumarskog Fakulteta*, 126. <https://doi.org/10.2298/GSF2226157V>
15. Todorović, N., Popović, Z., Milić, G., Veizović, M., & Popadić, R. (2022). Quality evaluation of heat-treated sessile oak (*Quercus petraea* L.) wood by colour and FT-NIR spectroscopy [Abingdon : Taylor & Francis]. *Wood Material Science & Engineering*, 17(3), 202–209. <https://doi.org/10.1080/17480272.2020.1847188>
16. Milić, G., Todorović, N., Veizović, M., Popadić, R., & Milivojević, T. (2022). Sušenje hrastovih lamela: deo 2. Uticaj temperature na kvalitet sušenja i boju drveta, *Glasnik Šumarskog Fakulteta*, 126. <https://doi.org/10.2298/GSF2226075M>
17. Milić, G., Todorović, N., Veizović, M., & Popadić, R. (2021). Possibility of drying oak lamellas in dehumidification kilns. *Proceedings - 5th International Scientific Conference Wood Technology & Product Design, Ohrid, 14-17 September, 2021. Skopje : Faculty of design and technologies of furniture and interior.*
18. Milić, G., Todorović, N., Veizović, M., & Popadić, R. (2021). Sušenje hrastovih lamela - Deo 1. Analiza procesa u kondezacionoj sušari, *Glasnik Šumarskog Fakulteta*, 124. <https://doi.org/10.2298/GSF2124045M>

Izjava o autorstvu

Ime i prezime autora: Marko Veizović

Broj indeksa: 03/2017

Izjavljujem da je doktorska disertacija pod naslovom „**Termo-hidro-mehanički tretman drveta topole - uticaj procesnih parametara na svojstva drveta**“

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada;
- da disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za sticanje druge diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova;
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio/la autorska prava i koristio/la intelektualnu svojinu drugih lica.

U Beogradu,

Potpis autora

Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora: Marko Veizović

Broj indeksa: 03/2017

Studijski program: Tehnologije drveta (Primarna prerada drveta)

Naslov rada: **Termo-hidro-mehanički tretman drveta topole - uticaj procesnih parametara na svojstva drveta**

Mentori: dr Nebojša Todorović, red. prof., Univerzitet u Beogradu, Šumarski fakultet
dr Goran Milić, red. prof., Univerzitet u Beogradu, Šumarski fakultet

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao radi pohranjena u Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog naziva doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

U Beogradu,

Potpis autora

Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

„Termo-hidro-mehanički tretman drveta topole - uticaj procesnih parametara na svojstva drveta“

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim priložima predao sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu i dostupnu u otvorenom pristupu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo (CC BY)
2. Autorstvo – nekomercijalno (CC BY-NC)
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada (CC BY-NC-ND)
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima (CC BY-NC-SA)
5. Autorstvo – bez prerada (CC BY-ND)
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima (CC BY-SA)

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci.

Kratak opis licenci je sastavni deo ove izjave).

U Beogradu,

Potpis autora

1. Autorstvo. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.

2. Autorstvo – nekomercijalno. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.

3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.

4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.

5. Autorstvo – bez prerada. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.

6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.