

# Utjecaj usmjerenosti strukture na savojni modul elastičnosti drva jele u longitudinalnom smjeru

---

Mrvelj, Nikola

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:442308>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-01**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Nikola Mrvelj**

Zagreb, 2022. godina

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Vera Rede, dipl. ing.

Student:

Nikola Mrvelj

Zagreb, 2022. godina

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svojoj mentorici prof.dr.sc. Veri Rede na izuzetnoj pomoći pri pisanju ovog rada. Svojom pristupačnošću, savjetima i razumijevanjem uvelike je pomogla izradi ovog završnog rada.

Zahvaljujem se prijateljima, kolegama te posebno obitelji na velikoj podršci tijekom studija.

Nikola Mrvelj



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 22 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Nikola Mrvelj**

JMBAG: **0035218433**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj usmjerenosti strukture na savojni modul elastičnosti drva jele u longitudinalnom smjeru**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Effect of structural orientation on the bending modulus of elasticity in the longitudinal direction of fir wood**

Opis zadatka:

Savojni modul elastičnosti u longitudinalnom smjeru jedno je od dva najvažnija i najčešće ispitivana mehanička svojstva drva. Kako je drvo prirodan tehnički materijal sa izrazito usmjerenom mikrostrukturom, postoje vrlo velike razlike u vrijednostima modula elastičnosti u tri karakteristična smjera: longitudinalnom, radijalnom i tangencijalnom. Kod nekih vrsta drva uočeno je da na vrijednost modula elastičnosti u longitudinalnom smjeru utječe položaj ispitnih uzoraka u odnosu na liniju goda. Kod nekih vrsta taj utjecaj je vrlo velik, a kod nekih uopće nije izražen.

U završnom radu potrebno je odrediti savojni modul elastičnosti za drvo obične jele (*Abies alba*) u longitudinalnom smjeru. Ispitivanje treba provesti metodom savijanja u tri točke na uzorcima kod kojih savojna sila, u odnosu na tangentu goda, djeluje pod kutem od 0°, 45° i 90°. Dobivene rezultate potrebno je statistički obraditi i na temelju svega donijeti odgovarajuće zaključke.

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Datum predaje rada:

1. rok: 24. 2. 2022.  
2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.  
3. rok: 22. 9. 2022.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 28. 2. – 4. 3. 2022.  
2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.  
3. rok: 26. 9. – 30. 9. 2022.

Zadatak zadala:

Prof. dr. sc. Vera Rede

*Rede*

Predsjednik Povjerenstva:

*Branko Bauer*  
Prof. dr. sc. Branko Bauer

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD .....	1
2. STRUKTURA DRVA.....	2
2.1 Drvna stanica.....	3
2.2 Građa stanične stijenke.....	4
2.3 Kemijski sastav stanične stijenke .....	6
2.4 Mikrostruktura četinjača .....	11
3. MEHANIČKA SVOJSTVA DRVA .....	14
3.1 Modul elastičnosti .....	14
3.2 Savojna čvrstoća.....	17
3.3 Utjecaj usmjerenosti strukture na modul elastičnosti u longitudinalnom smjeru – pregled literature .....	19
4. EKSPERIMENTALNI DIO.....	22
4.1 Cilj rada.....	22
4.2 Materijal za ispitivanje i priprema uzoraka .....	22
4.3 Određivanje gustoće i volumnog udjela .....	26
4.4 Ispitivanje savojnog modula elastičnosti.....	27
4.4.1 Rezultati ispitivanja L0 skupine uzoraka .....	28
4.4.2 Rezultati ispitivanja L45 skupine uzoraka .....	30
4.4.3 Rezultati ispitivanja L90 skupine uzoraka .....	32
5. ANALIZA REZULTATA.....	35
LITERATURA .....	38

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Aksijalni i radijalni sustav u deblu [3] .....	2
Slika 2.	Živa biljna stanica [4].....	3
Slika 3.	Mrtve drvne stanice [5] .....	4
Slika 4.	Građa stanične stijenke [5] .....	5
Slika 5.	Model stijenke drvne stanice [5] .....	5
Slika 6.	Shematski prikaz građe makrovlakna [5].....	6
Slika 7.	Udjeli celuloze, hemiceluloze i lignina u pojedinim slojevima stanične stijenke [6] .....	7
Slika 8.	Struktura celuloze [6] .....	7
Slika 9.	Struktura hemiceluloze [5] .....	8
Slika 10.	Struktura lignina [5] .....	9
Slika 11.	Struktura pektina [5].....	9
Slika 12.	Struktura škroba [5].....	10
Slika 13.	Trodimenzionalni prikaz mikrostrukture četinjača [3].....	11
Slika 14.	Osnovni tipovi drvnih stanica kod četinjača [5].....	12
Slika 15.	Poprečni presjek traheida kasnog i ranog drva [6] .....	12
Slika 16.	Smolni kanal u aksijalnom (A), radijalnom (B) i tangencijalnom presjeku (C) [6] .....	13
Slika 17.	Osnovne osi drva [1] .....	14
Slika 18.	Vrijednosti modula elastičnosti za različite tehničke materijale u GPa [7] .....	15
Slika 19.	Određivanje savojnog modula elastičnosti [1] .....	15
Slika 20.	Elastično područje krivulje sila-progib [1].....	16
Slika 21.	Prikaz djelovanja savojne sile kod metode savijanja u tri točke .....	17
Slika 22.	Položaj godova u odnosu na smjer savojne sile [1].....	18
Slika 23.	Savojni modul elastičnosti brijesta ( <i>Ulmus minor</i> ) [10] .....	19
Slika 24.	Modul elastičnosti smreke pri tlačnom opterećenju ( <i>Picea abies</i> ) [10].....	19
Slika 25.	Modul elastičnosti drva tise pri tlačnom opterećenju ( <i>Taxus baccata</i> ) [10].....	20
Slika 26.	Modul elastičnosti smreke pri tlačnom opterećenju ( <i>Picea abies</i> ) [10].....	20
Slika 27.	Savojni modul elastičnosti eukaliptusa ( <i>Eucalyptus tereticornis</i> ) [10].....	20
Slika 28.	Savojni modul elastičnosti drva cambara ( <i>Erismia uncinatum</i> ) [10] .....	21
Slika 29.	Savojni modul elastičnosti američke duglazije ( <i>Pseudotsuga menziesii</i> ) [10].....	21

---

Slika 30.	Savojni modul elastičnosti bagrema ( <i>Robinia pseudoacacia</i> ) [10].....	21
Slika 31.	Grubo izrezivanje uzoraka.....	22
Slika 32.	Precizno izrezivanje uzoraka.....	23
Slika 33.	Brušenje ispitnih uzoraka .....	24
Slika 34.	Ispitni uzorci prije ispitivanja.....	24
Slika 35.	Analitička vaga Ohaus Analytical Plus .....	26
Slika 36.	Savijanje uzorka na kidalici .....	27
Slika 37.	Vrijednosti savojnog modula elastičnosti uzoraka L0 .....	29
Slika 38.	Ispitni uzorci iz skupine L0 nakon ispitivanja.....	29
Slika 39.	Vrijednosti savojnog modula elastičnosti uzoraka L45 .....	31
Slika 40.	Ispitni uzorci iz skupine L45 nakon ispitivanja.....	31
Slika 41.	Vrijednosti savojnog modula elastičnosti uzoraka L90 .....	33
Slika 42.	Ispitni uzorci iz skupine L90 nakon ispitivanja.....	33
Slika 43.	Srednje vrijednosti modula elastičnosti za sve skupine .....	34
Slika 44.	Weibullova raspodjela za modul elastičnosti uzoraka skupine L0.....	35
Slika 45.	Weibullova raspodjela za modul elastičnosti uzoraka skupine L45.....	36
Slika 46.	Weibullova raspodjela za modul elastičnosti uzoraka skupine L90.....	36



**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Svojstva celuloznih vlakana u usporedbi s drugim materijalima [5] .....	8
Tablica 2. Vrijednosti modula elastičnosti nekih domaćih vrsta drva [8] .....	17
Tablica 3. Vrijednosti savojne čvrstoće nekih domaćih vrsta drveća [8] .....	18
Tablica 4. Širina i visina ispitnih uzoraka .....	25
Tablica 5. Udio vlage i gustoća uzoraka .....	26
Tablica 6. Vrijednosti savojnog modula elastičnosti ispitnih uzoraka iz skupine L0 .....	28
Tablica 7. Vrijednosti savojnog modula elastičnosti ispitnih uzoraka iz skupine L45 .....	30
Tablica 8. Vrijednosti savojnog modula elastičnosti ispitnih uzoraka iz skupine L90 .....	32
Tablica 9. Statistički rezultati za vrijednosti savojnog modula elastičnosti .....	35

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$m$	g	masa uzorka
$m_1$	g	masa drva sa nekim sadržajem vlage
$m_2$	g	masa drva u suhom stanju
$F$	N	sila
$F_{\max}$	N	maksimalna sila
$\rho$	$\text{g/cm}^3$	gustoća
$\rho_w$	$\text{g/cm}^3$	gustoća drva pri određenom stupnju vlage
$\rho_0$	$\text{g/cm}^3$	gustoća drva u suhom stanju
$V$	$\text{cm}^3$	volumen uzorka
$R_{\text{ms}}$	$\text{N/mm}^2$	svojna čvrstoća
$A_0$	$\text{mm}^2$	površina presjeka
$L$	mm	razmak između oslonaca
$E$	$\text{N/mm}^2$	modul elastičnosti
$b$	mm	širina uzorka
$t$	mm	visina uzorka
$d$	mm	promjer otiska
$D$	mm	promjer kuglice
$f_{\max}$	mm	maksimalni progib
$f$	mm	progib
$G$	N	težina

## SAŽETAK

Cilj ovog rada je odrediti kako usmjerenost strukture drva jele (*Abies alba*) utječe na savojni modul elastičnosti u longitudinalnom smjeru. Ispitivanje savojnog modula elastičnosti provedeno je metodom savijanja u tri točke. Savojna sila bila je okomita na longitudinalni smjer, a u odnosu na tangentu goda djelovala je pod kutom od  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  i  $90^\circ$ . Za svaki kut ispitano je po 30 uzoraka.

Utvrđeno je da savojni modul elastičnosti u longitudinalnom smjeru ovisi o kutu između savojne sile i tangente na god.

Najveća srednja vrijednost savojnog modula od  $6619,5 \text{ N/mm}^2$  dobivena je kod kuta od  $0^\circ$ , a najmanja od  $6067,2 \text{ N/mm}^2$  pod kutom od  $90^\circ$ . Vrijednost savojnog modula elastičnosti kod kuta od  $45^\circ$  iznosila je  $6113,4 \text{ N/mm}^2$ .

Rasipanja rezultata pri ispitivanju savojnog modula elastičnosti bila su relativno velika, ali je koeficijent varijacije bio ispod dopuštene vrijednosti od 20 %.

Pokazalo se da vrijednosti modula elastičnosti svih triju skupina slijede Weibullovu distribuciju.

Ključne riječi: savojni modul elastičnosti, drvo, usmjerenost, Weibullova distribucija

**SUMMARY**

The goal of this study was to determine how the orientation of the fir wood structure affects the flexural modulus of elasticity in the longitudinal direction. The flexural modulus of elasticity was tested by the three-point bending method. The flexural force was perpendicular to the longitudinal direction, and in relation to the tangent of the tree rings it acted at an angle of 0°, 45°, and 90°. For each angle were tested 30 samples.

It was found that the flexural modulus of elasticity in the longitudinal direction depends on the angle between the flexural force and the tangent per tree ring.

The highest mean value of the flexural modulus of 6619.5 N/mm<sup>2</sup> was obtained at an angle of 0°, and the lowest of 6067.2 N/mm<sup>2</sup> at an angle of 90°. The value of the flexural modulus of elasticity at an angle of 45° was 6113.4 N/mm<sup>2</sup>.

The dispersion of the results in the flexural modulus of elasticity test was relatively large, but the coefficient of variation was below the permissible value of 20%.

The values of the modulus of elasticity of all three groups were shown to follow the Weibull distribution.

Key words: flexural modulus of elasticity, wood, orientation, Weibull distribution

## 1. UVOD

Drvo ima važnu ulogu u životu ljudi od daleke povijesti pa do danas. Primjena drva imala je veliki značaj u rastu i razvoju ljudske populacije i u njihovom tehničkom i ekonomskom napretku. Koristilo se kroz povijest, a i danas, za mnoštvo različitih namjena i proizvoda. Alati, nastambe, mostovi, brodovi i namještaj, samo su neki od proizvoda načinjenih od drva. Energija koja se dobije izgaranjem drva doprinijela je razvoju industrije. Još i danas mnoga kućanstva koriste drvo kao izvor toplinske energije.

U ovom radu je ispitivano drvo jele koja je jedna od autohtonih vrsta četinjača u Hrvatskoj.

Najrasprostranjenije četinjače u Hrvatskoj su jela, smreka, crni bor i ariš, a bukva, hrast, jasen i grab su najrasprostranjenije listače. [1]

Drvo kao tehnički materijal ima posebna svojstva. Ono je prirodan, obnovljiv, biorazgradiv, ekološki visokovrijedan i tehnički svestran materijal. Drvo i dalje zauzima značajan udio u primjeni. Između većeg broja vrsta s različitim fizikalnim svojstvima može se odabrati materijal koji će biti optimalan u određenim uvjetima primjene.

Tehničko drvo je osrženi sekundarni ksilem lignoceluloznog sastava proizveden od vaskularnog bilja iz skupine sjemenjača.

Trajnost drva može se poboljšati različitim kemijskim i fizikalnim postupcima, pa uz dobru zaštitu proizvodi od drva mogu trajati stotinama godina. [2]

## 2. STRUKTURA DRVA

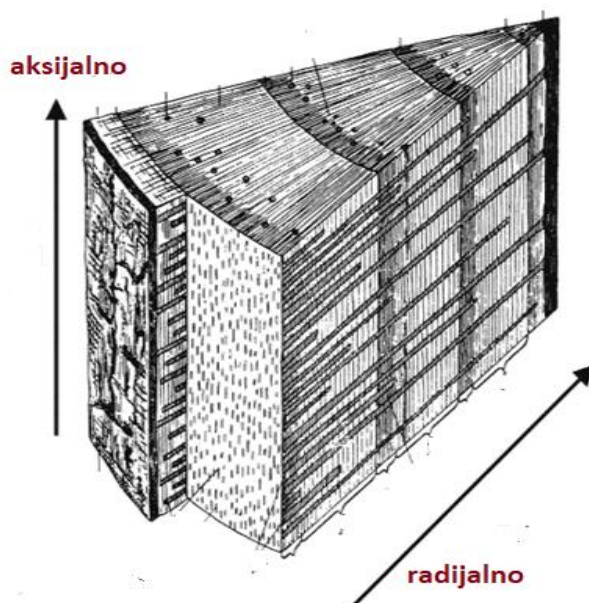
Mehanička, fizikalna i druga svojstva drva ovise prije svega o njegovoj mikrostrukuri, isto kao i kod svih drugih tehničkih materijala. Osnovno obilježje drvene strukture je njezina usmjerenost. Ova usmjerenost uvjetovana je biološkim funkcijama živog stabla.

Osnovna jedinica drvene građe je drvena stanica. Pojedinačne stanice u drvu međusobno su povezane i čine savršen sustav u kojem su svi dijelovi stabla međusobno povezani.

Sve drvene stanice imaju manje ili više izduženi oblik, a orijentirane su u jedan od dva navedena sustava:

- aksijalni sustav
- radijalni sustav.

Na slici 1. prikazani su aksijalni i radijalni sustav u drvnom tkivu.



Slika 1. Aksijalni i radijalni sustav u deblu [3]

Drvene stanice koje pripadaju aksijalnom sustavu izdužene su u smjeru osi debla odnosno u longitudinalnom smjeru. One su odgovorne za protok tvari od korijena prema vrhu debla i u obrnutom smjeru. Aksijalni sustav određuje čvrstoću stabla.

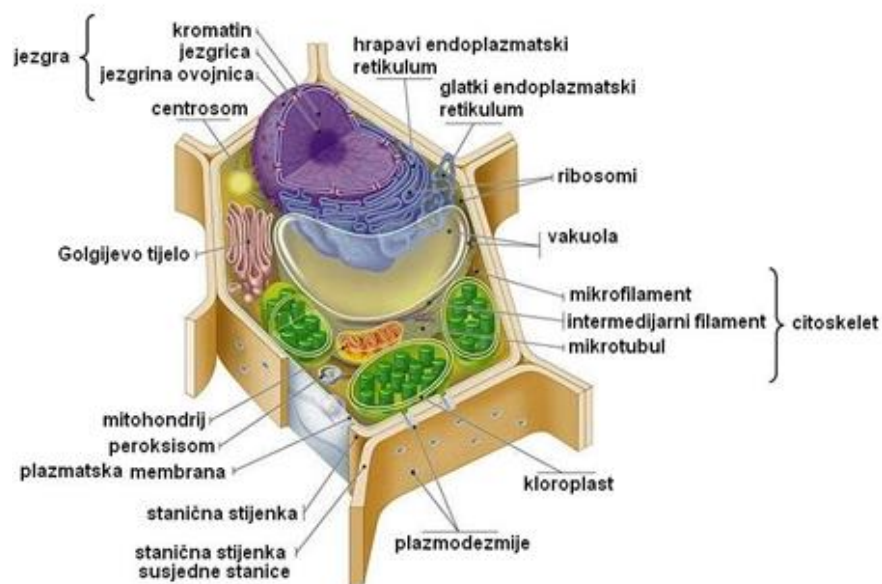
Drvne stanice koje tvore radijalni sustav izdužene su u smjeru okomitom na osnovnu os debla. One povezuju srčiku s korom, a preko njih se odvija lateralni protok biokemijskih tvari od kore prema središtu debla i obrnuto.

Aksijalni i radijalni sustav međusobno su isprepleteni i povezani, a o njima potpuno ovise svojstva drvnog tkiva. [1]

## 2.1 Drvna stanica

Biljne stanice, pa tako i drvne stanice predstavljaju strukturne i funkcionalne jedinice bilo koje biljke. Sastavljene su od protoplasti, odnosno žive tvari u staničnoj membrani i od nežive tvari koja je koncentrirana u staničnoj stijenci. Stanična stijenka je građena od ugljikohidrata.

Na slici 2. prikazan je izgled žive biljne stanice.

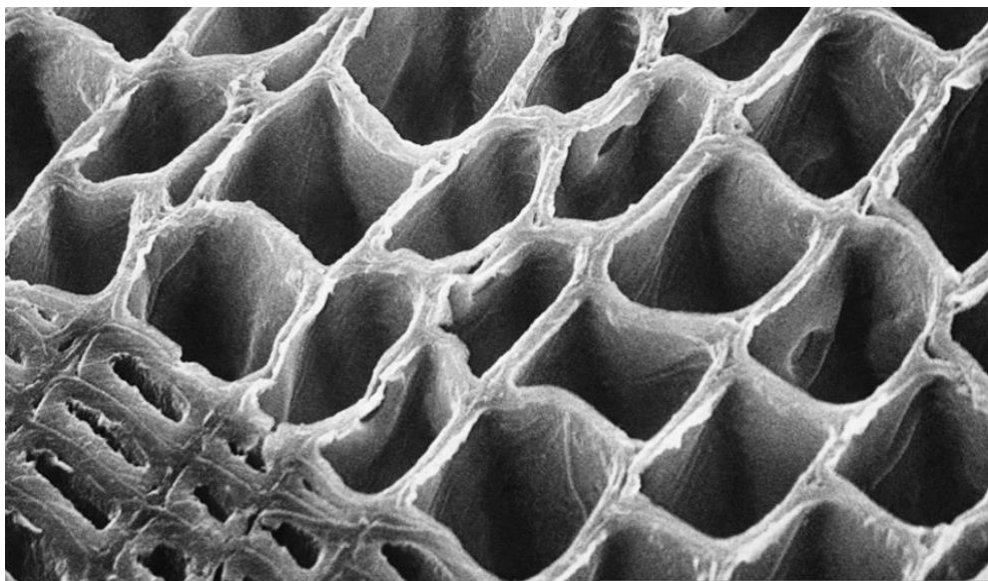


Slika 2. Živa biljna stanica [4]

Kada se govori o drvnoj stanici misli se na mrtvu biljnu stanicu bez citoplazmatskog sadržaja. Mrtvu biljnu stanicu čine stanična stijenka i prazni prostor u kojem su se, dok je stanica bila živa, nalazile protoplasti. Taj prazni prostor zove se lumen.

Stanična stijenka daje drвноj stanici stalni oblik i mehaničku potporu te ju čuva od visokog osmotskog tlaka. Lumen je vrlo važan dio drvne stanice zbog upijanja i provođenja vode. Lumen također ima važnu ulogu u nekim vrstama zaštite drva i pri formiranju drvnih kompozita.

Na slici 3. prikazane su mrtve drvne stanice bez citoplazmatskog sadržaja.



Slika 3. Mrtve drvne stanice [5]

## 2.2 Građa stanične stijenke

Stanična stijenka sastoji se od primarnog (P) i sekundarnog dijela kojeg čine tri sloja (S1, S2 i S3). Prostor između primarnih stijenki susjednih stanica predstavlja središnju lamelu (ML).

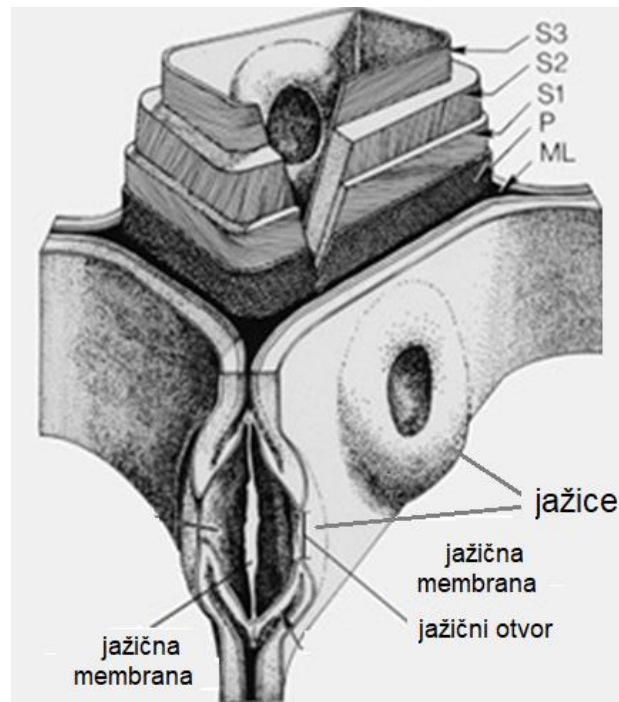
Središnja lamela bogata je ligninom i preko nje su susjedne stanice povezane u cjelinu. Ta povezanost omogućuje provođenje vode i biokemijskih tvari kroz drveno tkivo.

Primarni dio drvne stijenke nastavlja se na središnju lamelu. Taj dio je jako tanak zbog čega je teško razlučiti gdje završava središnja lamela i počinje primarni dio stanične stijenke.

Na primarni dio drvne stijenke nastavlja se sekundarni dio koji je puno deblji od primarnog i sastavljen je od tri različito debela sloja. Komunikacija između pojedinih stanica i prijelaz tvari iz jedne u drugu stanicu omogućen je preko posebnih tvorevina u staničnoj stijenci koje se zovu jažice.

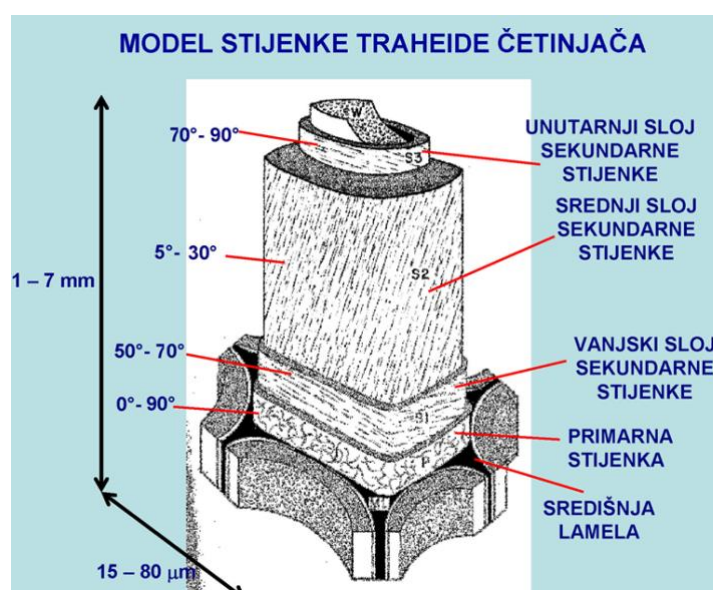
Na slici 4. prikazana je građa stanične stijenke.





Slika 4. Građa stanične stijenke [5]

Na slici 5. prikazan je model stijenke drvene stanice četinjača (traheide). Na ovoj slici također mogu se vidjeti pojedini dijelovi i slojevi stijenke te kutovi koje zatvaraju mikrovlakna celuloze sa uzdužnom osi stanične stijenke. Taj kut je različit u svakom sloju stijenke. Sve to čini stanicu vrlo stabilnom i mehanički otpornom.

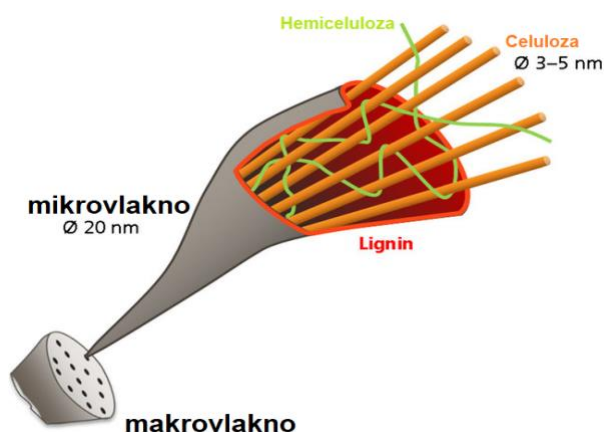


Slika 5. Model stijenke drvene stanice [5]

### 2.3 Kemijski sastav stanične stijenke

Svi dijelovi stanične stijenke izgrađeni su od celuloze, hemiceluloze i lignina. Celulozne makromolekule složene su u micelle čija je građa relativno uređena i pravilna. Celulozna mikrovlakna čini grupa od dvadesetak micela. Mikrovlakna se grupiraju i čine makrovlakna. Osim celuloze tu se nalaze i znatno kraće makromolekule hemiceluloze. Celuloza i hemiceluloza okružene su ligninom koji predstavlja matricu ovog vlaknima ojačanog kompozitnog materijala.

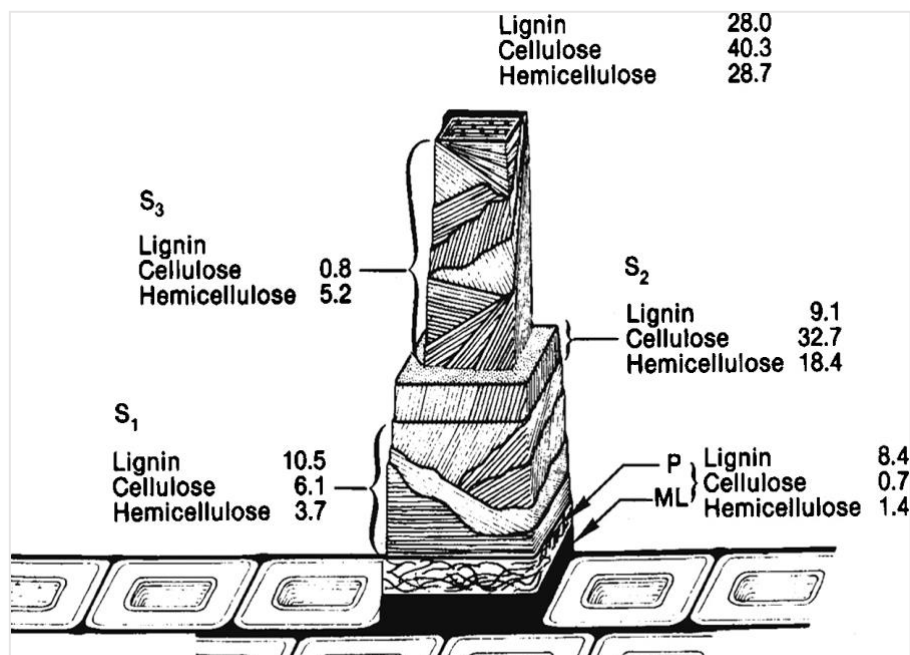
Na slici 6. shematski je prikazana građa mikrovlakna i makrovlakna sastavljena od celuloze, hemiceluloze i lignina.



Slika 6. Shematski prikaz građe makrovlakna [5]

Na slici 7. prikazani su udjeli celuloze, hemiceluloze i lignina u pojedinim slojevima stanične stijenke. Također su navedeni pojedinačni udjeli celuloze (40,3 %), hemiceluloze (28,7 %) i lignina (28,0 %) u staničnoj stijenci.

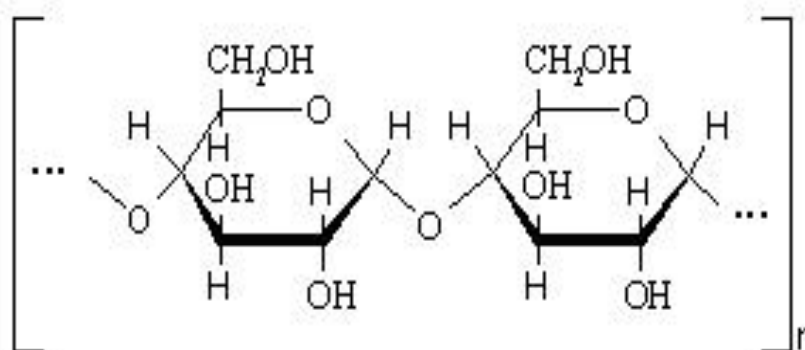
Debljine slojeva i udjeli celuloze, hemiceluloze i lignina u slojevima stanične stijenke dosta se razlikuju. Srednji sloj sekundarne stijenke (S2) je najdeblji i njegov utjecaj na svojstva i čvrstoću stanične stijenke je najveći. U njemu je relativni udio celuloze najviši. Lignina proporcionalno ima najmanje u zadnjem sloju stanične stijenke što je povezano s njegovim svojstvom hidrofobnosti.



Slika 7. Udjeli celuloze, hemiceluloze i lignina u pojedinim slojevima stanične stijenke [6]

Celuloza je polimer sastavljen od različitih ugljikohidrata i čini najrašireniji ugljikov spoj na Zemlji. Kod drvene celuloze u lancima, broj glukoznih jedinica najčešće je između 9 i 10 tisuća te maksimalno može biti oko 15 tisuća. Kod povećanja stupnja uređenosti povećava se i gustoća molekula celuloze. U drvu je stupanj uređenosti celuloze vrlo visok, u prosjeku više od 60 %. Kod četinjača iznos celuloznog sadržaja u drvenoj stijenci kreće se između 40 i 45 %.

Na slici 8. prikazana je struktura celuloze, a tablica 1. prikazuje svojstva celuloznih vlakana u usporedbi s drugim materijalima od kojih se izrađuju vlakna.



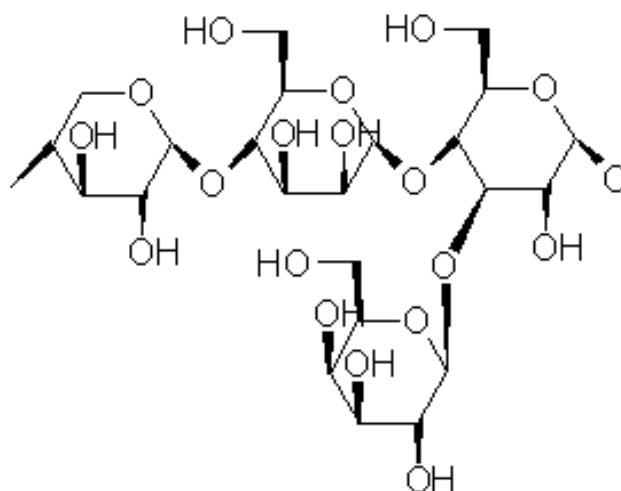
Slika 8. Struktura celuloze [6]

Tablica 1. Svojstva celuloznih vlakana u usporedbi s drugim materijalima [5]

Materijal	Gustoća g/cm <sup>3</sup>	Modul elastičnosti GPa	Vlačna čvrstoća MPa
<b>Celuloza</b>	1,5	44-128	220-938
<b>E- staklo</b>	2,5	70	2000-3500
<b>S- staklo</b>	2,5	86	4570
<b>Aramid</b>	1,4	63-67	3000-3150
<b>Ugljik</b>	1,4	230-240	4000

Hemiceluloza je razgranati polimer s nižim iznosom stupnja polimerizacije, od 100 do 200 jedinica. Sastavljena je od različitih monomernih šećera te se lako otapa u lužinama. Kod četinjača iznos hemiceluloznog sadržaja kreće se u rasponu od 7 do 14 %.

Na slici 9. prikazana je razgranata struktura hemiceluloze.

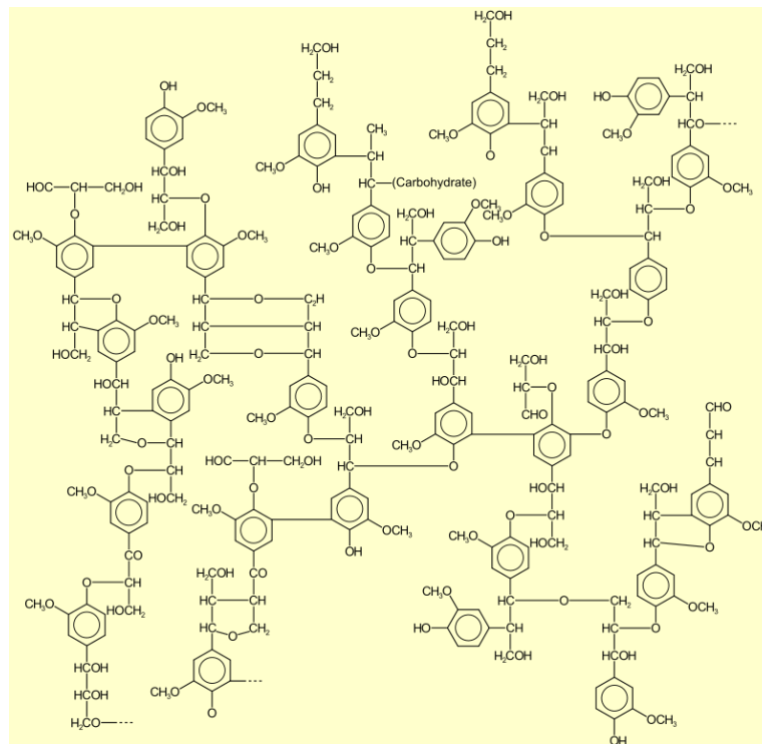


Slika 9. Struktura hemiceluloze [5]

Lignin je organski, amorfni, aromatski polimer s vrlo kompleksnom građom. Sastoji se od vrlo raznolikih osnovnih gradbenih jedinica i vrlo je heterogen. Njegova građa može se opisati kao dendritično umrežena. Zbog izrazite heterogenosti stupanj polimerizacije lignina teško se određuje. Sastav lignina kod četinjača i listača nije isti i varira od vrste do vrste.

Udio lignina kod četinjača može biti između 25 i 35 %, a kod listača je između 18 i 25 %.

Na slici 10. prikazana je struktura lignina.

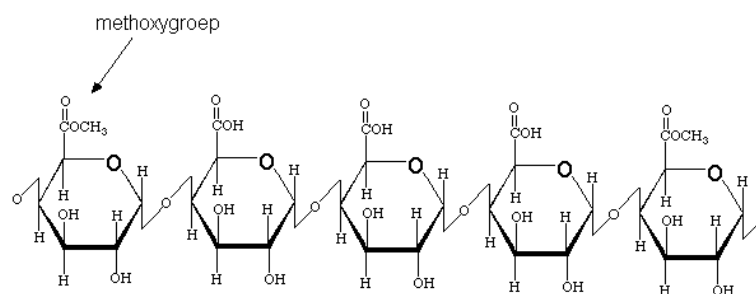


Slika 10. Struktura lignina [5]

Osim celuloze, hemiceluloze i lignina u stijenci drvene stanice mogu se naći još neki ugljikohidratni polimeri. Najčešći su pektin, škrob i proteini.

Pektin je heteropolisaharid koji se u većoj koncentraciji može naći u staničnoj stijenci parenhimskih stanica unutarnje kore. Uglavnom se nalazi u središnjoj lameli.

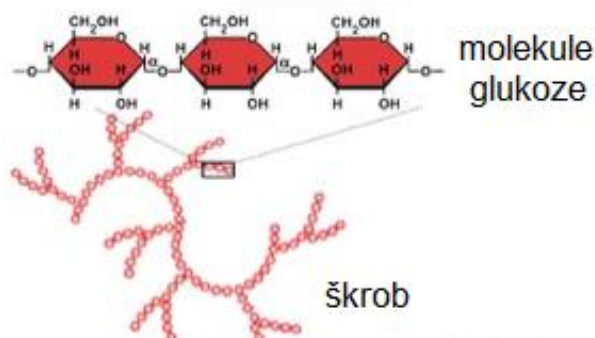
Na slici 11. prikazana je struktura pektina.



Slika 11. Struktura pektina [5]

U drvnom tkivu škrob se sintetizira iz glukoze i pohranjuje u obliku škrobnih zrnaca. To je osnovni rezervni polisaharid u drvu, a u manjoj mjeri može biti prisutan i u staničnoj stijenci.

Na slici 12. prikazana je struktura škroba.



**Slika 12. Struktura škroba [5]**

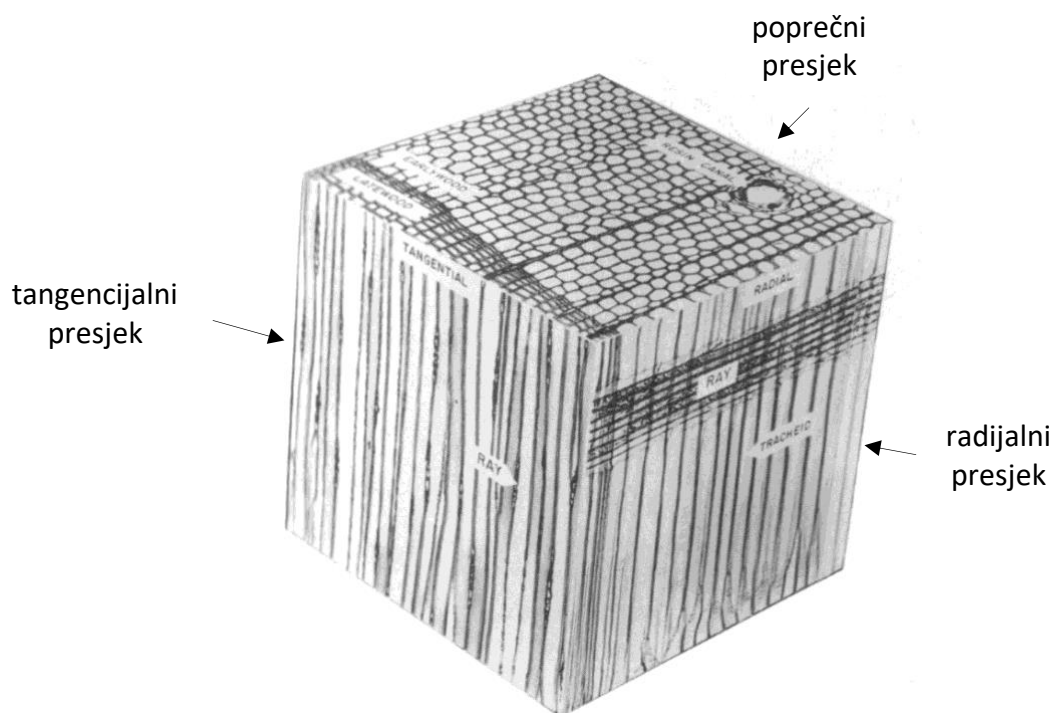
Na elementarnoj razini drveno tkivo građeno je od ugljika, kisika i vodika. Maseni udio vodika je oko 50 %, kisika oko 44 % i vodika oko 6 %. Kako polovicu ukupne mase drva čini masa ugljika uzetog iz atmosfere, ovaj ugljik je dugotrajno pohranjen u drvnom tkivu što utječe na smanjenje stakleničkog plina CO<sub>2</sub> i usporavanje globalnog zagrijavanja.

## 2.4 Mikrostruktura četinjača

U usporedbi s listačama, četinjače imaju puno jednostavniju mikrostrukturu. Njihova mikrostruktura uglavnom se sastoji od relativno jednostavnih stanica koje se zovu traheide. Traheide su usmjerene aksijalno, tj. paralelno s glavnom osi debla. Kod nekih četinjača, osim traheida, u aksijalnom smjeru mogu se naći i parenhimske stanice u vrlo malom udjelu.

Drvni traci koji su radijalno usmjereni od srčike prema kori sačinjeni su od parenhimskih stanica.

Na slici 13. trodimenzionalno je prikazana mikrostruktura četinjača. Na slici su naznačena tri karakteristična presjeka – poprečni, radijalni i tangencijalni.

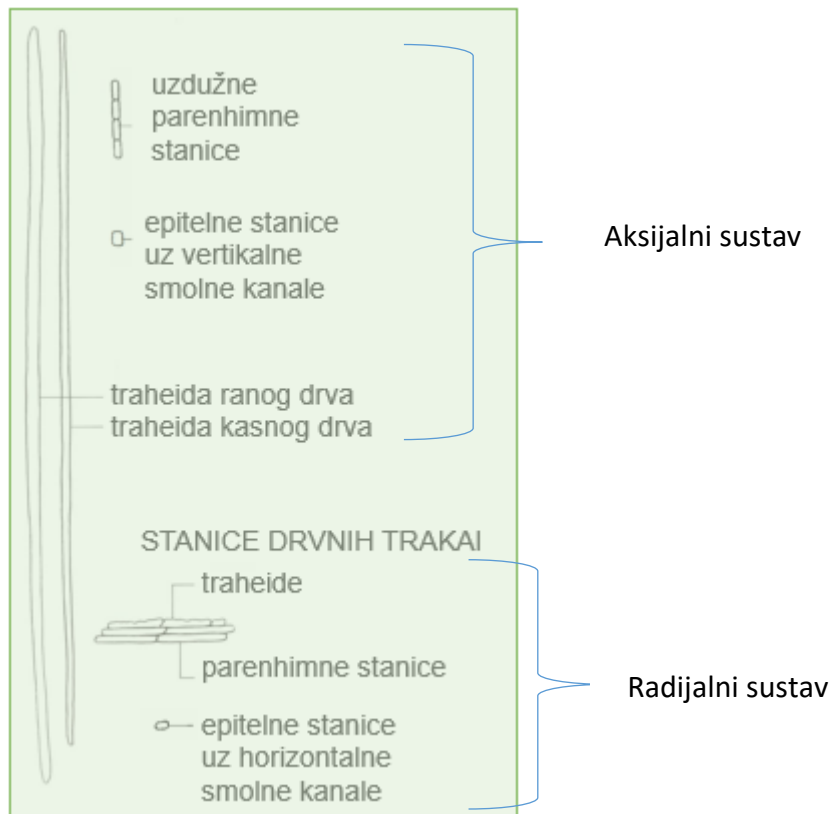


Slika 13. Trodimenzionalni prikaz mikrostrukture četinjača [3]

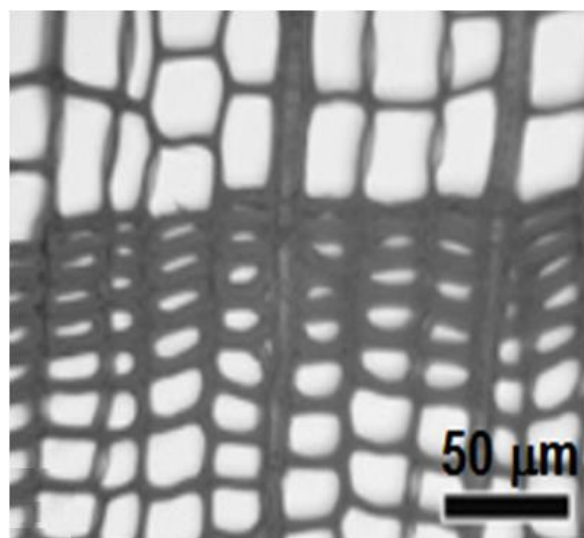
Na slici 14. shematski su prikazani osnovni tipovi stanica kod četinjača. Naznačeno je koje stanice pripadaju aksijalnom, a koje radijalnom sustavu.

Traheide u poprečnom presjeku imaju pravokutan oblik i sve su istog tipa. Njihova duljina kod vrsta umjerenog pojasa kreće se između 0,7 i 9 mm. Stanice u ranom dijelu goda imaju veći lumen i tanju stijenku nego stanice u kasnom dijelu goda gdje je stijenka deblja, a lumen manji. Traheide imaju omjer između duljine i širine oko 100:1. U drvu četinjača njihov volumni udio iznosi preko 90 %. Njihova osnovna funkcija je provođenje vode te mehanički suport.

Otopljene tvari zajedno s vodom prelaze iz jedne u drugu stanicu preko jažica koje su locirane u suženim dijelovima drvnih stanica. Na slici 15. prikazan je poprečni presjek traheida u kasnom i ranom dijelu goda.



Slika 14. Osnovni tipovi drvnih stanica kod četinjača [5]

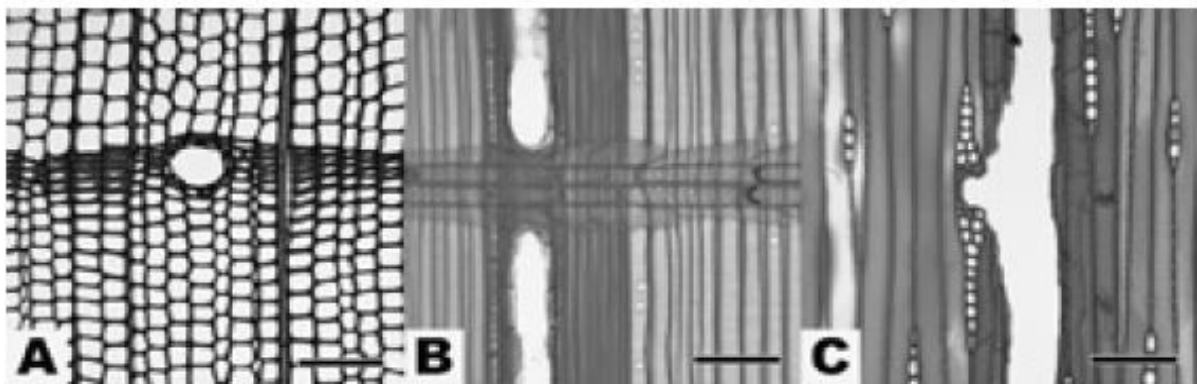


Slika 15. Poprečni presjek traheida kasnog i ranog drva [6]



Smolni kanali prisutni su u mikrostrukturi nekih četinjača. Mogu biti usmjereni aksijalno i radijalno. Smolni kanali su šupljine okružene posebnim parenhimskim stanicama. Te stanice proizvode smolu. Kod nekih četinjača smolni kanali su veliki i mogu biti vidljivi golim okom. Također smolni kanali mogu biti jako sitni. Radijalni smolni kanali često su „ugrađeni“ u drvene trake pa su takvi drveni traci puno viši i širi od drvnih traka bez smolnih kanala. Kao reakcija na bolesti ili mehanička oštećenja, kod nekih vrsta četinjača mogu se formirati vrlo veliki smolni kanali tzv. *klasteri*.

Na slici 16. prikazani su smolni kanali u aksijalnom, radijalnom i tangencijalnom presjeku.



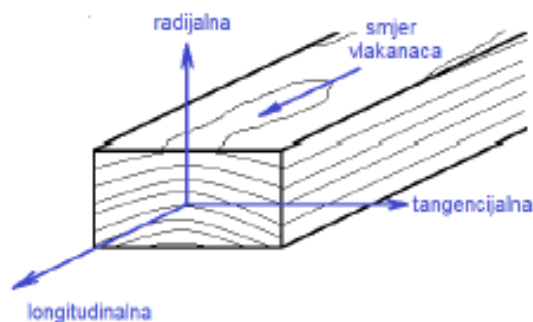
**Slika 16. Smolni kanal u aksijalnom (A), radijalnom (B) i tangencijalnom presjeku (C) [6]**

Drveni traci koji su radijalno usmjereni od srčike prema kori sačinjeni su od parenhimskih stanica. Te stanice imaju prizmatičan oblik i visinu oko 15  $\mu\text{m}$ , širinu oko 10  $\mu\text{m}$  i duljinu od 150 do 250  $\mu\text{m}$ . Na slici 16. (A) vide se drveni traci kao tamne vertikalne pruge. Drveni traci, u većini slučajeva, nisu širi od jedne stanice, osim u slučaju kad se u njima nalaze radijalni smolni kanali. Drveni traci imaju primarnu ulogu sinteze, skladištenja i lateralnog transporta biokemijskih tvari.

### 3. MEHANIČKA SVOJSTVA DRVA

Za drvo je kao i za ostale prirodne materijale karakteristična velika varijabilnost svojstava. Njegova fizikalna, kemijska, termička, električna, akustična, optička i mehanička svojstva ovise o mikrostrukturi i razlikuju se od vrste do vrste. Velike razlike moguće su i unutar iste vrste pa čak i unutar istog debla. S obzirom na usmjerenost mikrostrukture većina nabrojanih svojstava drva je također usmjerena, tj. razlikuju se u radijalnom, tangencijalnom i longitudinalnom smjeru, slika 17.

Kod primjene drva kao tehničkog materijala, vrlo važnu ulogu imaju njegova mehanička svojstva koja su također usmjerena i razlikuju se u tri međusobno okomite osi.



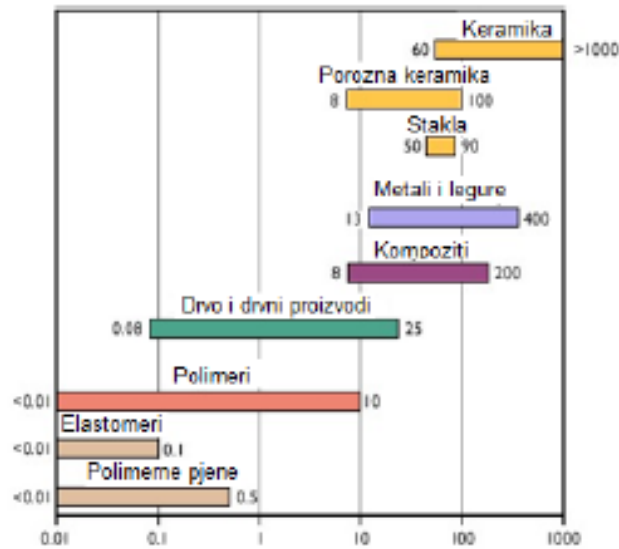
Slika 17. Osnovne osi drva [1]

#### 3.1 Modul elastičnosti

Modul elastičnosti jedno je od najčešće određivanih mehaničkih svojstava drva. Ono predstavlja otpor materijala prema elastičnoj deformaciji. Modul elastičnosti ovisi o građi materijala, vanjskim uvjetima kao što su udio vlage, temperatura, kemijski tretman i način opterećenja te o položaju u odnosu na glavne tri osi: L, R i T. Pri određivanju modula elastičnosti javljaju se velika rasipanja vrijednosti unutar iste vrste drveta. Modul elastičnosti za različite vrste drva uvelike se razlikuje. Prosječna vrijednost modula elastičnosti za drvo kreće se u širokom rasponu od 0,08 do 25 GPa.

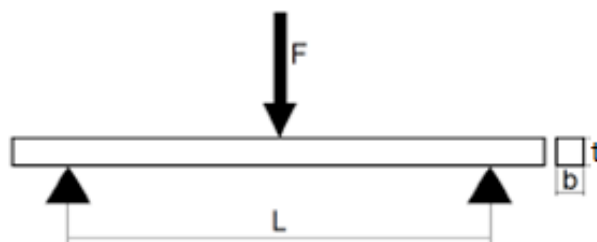
Kod većine vrsta vrijednosti modula elastičnosti u longitudinalnom pravcu ( $E_L$ ) su od 10 do 20 puta više nego vrijednosti u radijalnoj ( $E_R$ ) i tangencijalnoj ( $E_T$ ) osi. Modul elastičnosti u radijalnoj osi može biti od 1,5 do 6 puta viši od onoga u tangencijalnoj osi.

Na slici 18.prikazane su vrijednosti modula elastičnosti za drvo i drvene kompozite te za druge tehničke materijale.



Slika 18. Vrijednosti modula elastičnosti za različite tehničke materijale u GPa [7]

Određivanje savojnog modula elastičnosti propisano je ISO i EN normama. Najčešći oblik određivanja savojnog modula elastičnosti je standardnom metodom u tri točke. Metoda je shematski prikazana na slici 19.



Slika 19. Određivanje savojnog modula elastičnosti [1]

Vrijednost savojnog modula elastičnosti računa se pomoću izraza:

$$E = \frac{L^3(F_2 - F_1)}{4bt^3(a_2 - a_1)}, \text{ N/mm}^2 \quad (1)$$

gdje je:

$L$  – razmak između oslonaca u mm

$b$  – širina uzorka u mm

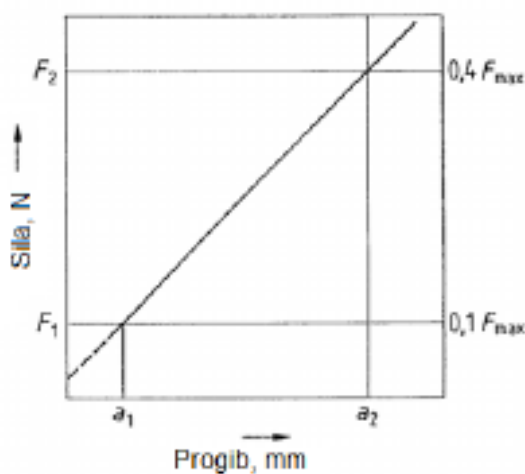
$t$  – visina uzorka u mm

$F_2 - F_1$  – prirast sile u području gdje je ovisnost sila-progib linearna

$F_1 \approx 0,1 F_{\max}$  i  $F_2 \approx 0,4 F_{\max}$

$F_{\max}$  – maksimalna sila u N

$a_2 - a_1$  – prirast progiba (odgovara razlici  $F_2 - F_1$ ), slika 20.



Slika 20. Elastično područje krivulje sila-progib [1]

U tablici 2. prikazane su vrijednosti modula elastičnosti za neke domaće vrste drva među kojima je i drvo jele sa vrijednostima između 6,6 i 17,2 GPa.

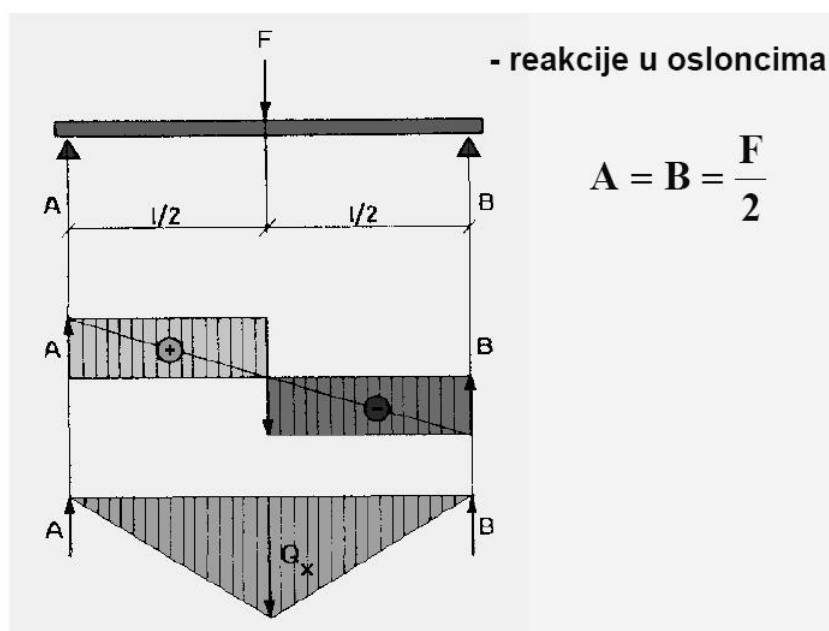
Tablica 2. Vrijednosti modula elastičnosti nekih domaćih vrsta drva [8]

Vrsta drva	Modul elastičnosti u GPa
Hrast (lužnjak)	10,0 ... 11,7 ... 13,2
Jasen (obični)	4,4 ... 13,4 ... 18,1
Bukva	10,0 ... 16,0 ... 18,0
Brijest	5,9 ... 11,0 ... 16,0
Orah (obični)	12,5
Bor (crni)	6,9 ... 12,0 ... 20,1
Smreka	7,3 ... 10,7 ... 21,4
Jela (obična)	6,6 ... 10,7 ... 17,2
Ariš	6,3 ... 13,8 ... 20,0
Čempres	9,8 ... 13,0 ... 16,0

### 3.2 Savojna čvrstoća

Savojna čvrstoća, uz tlačnu i smičnu čvrstoću, je jedno od najčešće određivanih svojstava drva. Najčešće se određuje metodom savijanja u tri točke.

Na slici 21. vidi se kako savojna sila djeluje na sredini između oslonaca. Gornja polovica ispitnog uzorka opterećena je tlačno, donja vlačno, a sredina je neutralna. Ispitivanje se provodi sve dok se ispitni uzorak ne dovede do loma.



Slika 21. Prikaz djelovanja savojne sile kod metode savijanja u tri točke

Savojna čvrstoća računa se prema izrazu:

$$R_{ms} = \frac{3F_{max} \cdot L}{2b \cdot t^2}, \text{ N/mm}^2 \quad (2)$$

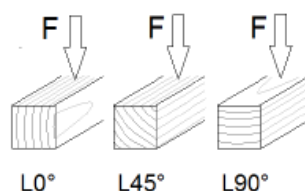
gdje su  $F_{max}$ ,  $L$ ,  $b$  i  $t$  isto kao i kod računanja modula elastičnosti

U tablici 3. prikazana je vrijednost savojne čvrstoće nekih domaćih vrsta drva.

**Tablica 3. Vrijednosti savojne čvrstoće nekih domaćih vrsta drveća [8]**

<i>Vrsta drva</i>	<i>Savojna čvrstoća, N/mm<sup>2</sup></i>
Hrast (lužnjak)	74,0 ... 88,0 ... 105,0
Jasen (obični)	58,0 ... 120,0 ... 210,0
Bukva	74,0 ... 123,0 ... 210,0
Brijest	56,0 ... 89,0 ... 260,0
Orah (obični)	99,0 ... 147,0 ... 178,0
Bor (obični)	41,0 ... 100,0 ... 206,0
Bor (crni)	69,0 ... 130,5 ... 198,5
Smreka	49,0 ... 78,0 ... 136,0
Jela (obična)	47,0 ... 73,0 ... 118,0
Ariš	64,0 ... 99,0 ... 132,0

Savojna čvrstoća i savojni modul elastičnosti su vrlo važna svojstva za primjenu drva u građevini, mostogradnji i proizvodnji namještaja. Vrijednosti savojnog modula elastičnosti i savojne čvrstoće ovise o usmjerenosti strukture. U longitudinalnom smjeru te vrijednosti su najviše. Iz literature je poznato da kod nekih vrsta drva ove vrijednosti u longitudinalnom smjeru ovise i o kutu koji zatvaraju savojna sila i tangenta na god. Mjerenja se najčešće izvode za kutove od 0°, 45° i 90°, kako je shematski prikazano na slici 22.



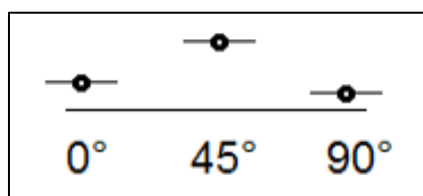
**Slika 22. Položaj godova u odnosu na smjer savojne sile [1]**

### 3.3 Utjecaj usmjerenosti strukture na modul elastičnosti u longitudinalnom smjeru – pregled literature

U nastavku su prikazani rezultati ispitivanja koja su provedena s ciljem da se utvrdi kako promjena navedenog kuta između sile i tangente na god utječe na vrijednost savojnog modula elastičnosti kod pojedinih vrsta.

Essert i dr. proveli su ispitivanja na subfossilnom brijestu i dobili najveću vrijednost savojnog modula elastičnosti pri kutu od  $45^\circ$ , a najmanju pri kutu od  $90^\circ$ . [10]

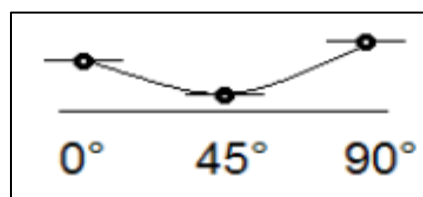
Rezultati su shematski prikazani na slici 23.



Slika 23. Savojni modul elastičnosti brijesta (*Ulmus minor*) [10]

Garab i dr. ispitivali su 2010. godine modul elastičnosti smreke pri tlačnom opterećenju i dobili da je najveći modul pri kutu od  $90^\circ$ , a najmanji pri kutu od  $45^\circ$ . [11]

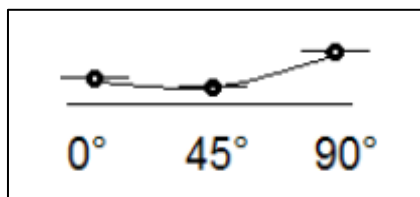
Rezultati su prikazani na slici 24.



Slika 24. Modul elastičnosti smreke pri tlačnom opterećenju (*Picea abies*) [10]

Također, u istom radu, Garab. i dr ispitivali su modul elastičnosti drva tise pri tlačnom opterećenju i dobili najveću vrijednost modula pri kutu od  $90^\circ$ , a najmanju pri kutu od  $45^\circ$ . [11]

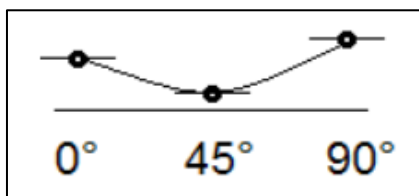
Rezultati su shematski prikazani na slici 25.



**Slika 25.** Modul elastičnosti drva tise pri tlačnom opterećenju (*Taxus baccata*) [10]

Miksic i dr. ispitivali modul elastičnosti smreke pri tlačnom opterećenju. Napravili su to ispitivanje 3 godine nakon Garaba i dr. te potvrdili da je najveći modul pri kutu od 90°, a najmanji pri kutu od 45°. [12]

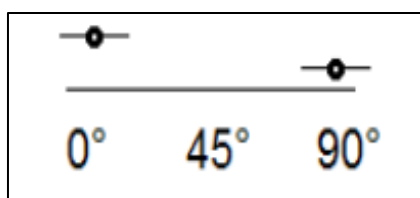
Rezultati su prikazani na slici 26.



**Slika 26.** Modul elastičnosti smreke pri tlačnom opterećenju (*Picea abies*) [10]

Godine 2014., Lahr i dr. proveli su ispitivanje savojnog modula elastičnosti eukaliptusa. Ispitivanje provedeno je bez uzoraka kod kojih savojna sila i tangenta na god zatvaraju kut od 45°. Dobili su rezultate da je vrijednost savojnog modula pri kutu od 0° veća nego pri kutu od 90°. [13]

Rezultati su shematski prikazani na slici 27.



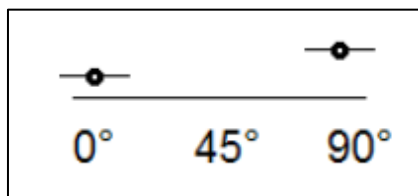
**Slika 27.** Savojni modul elastičnosti eukaliptusa (*Eucalyptus tereticornis*) [10]

U istom radu, Lahr i dr. također su proveli ispitivanje savojnog modula elastičnosti drva cambara. Prilikom ispitivanja nisu imali ispitne uzorke kod kojih savojna sila i tangenta na god



zatvaraju kut od  $45^\circ$ . Dobili su rezultate da je vrijednost savojnog modula pri kutu od  $90^\circ$  veća nego pri kutu od  $0^\circ$ . [13]

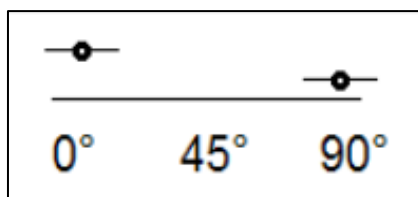
Rezultati ispitivanja su prikazani na slici 28.



**Slika 28.** Savojni modul elastičnosti južnoameričke vrste cambara (*Erisma uncinatum*) [10]

Grotta i dr. proveli su ispitivanje na američkoj duglaziji 2005. godine. Dobili su da je vrijednost savojnog modula pri kutu od  $0^\circ$  veća nego pri kutu od  $90^\circ$ . Ispitivanja pri kutu od  $45^\circ$  nisu provodili. [13]

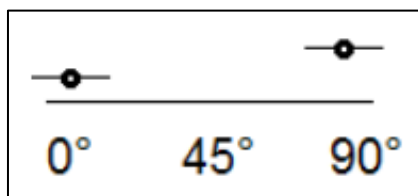
Na slici 29. shematski su prikazani rezultati ovog ispitivanja.



**Slika 29.** Savojni modul elastičnosti američke duglazije (*Pseudotsuga menziesii*) [10]

Adamopoulos i dr. proveli su ispitivanje na bagremu te utvrdili da je vrijednost savojnog modula elastičnosti pri kutu od  $90^\circ$  veći nego pri kutu od  $0^\circ$ . Ispitivanja nisu provodili na uzorcima pri kutu od  $45^\circ$ . [14]

Na slici 30. prikazani su rezultati ispitivanja.



**Slika 30.** Savojni modul elastičnosti bagrema (*Robinia pseudoacacia*) [10]

## 4. EKSPERIMENTALNI DIO

### 4.1 Cilj rada

Osnovni cilj završnog rada bio je odrediti kako usmjerenost strukture u longitudinalnom smjeru u drvu jele (*Abies alba*) utječe na vrijednost savojnog modula elastičnosti. Savojni modul elastičnosti određen je prema normi ISO 13061-4, metodom savijanja u 3 točke. [16]

U tu svrhu određeno je sljedeće:

- udio vlage u ispitnim uzorcima
- gustoća pri postojećem udjelu vlage, u apsolutnom suhom stanju i pri 12% vlage
- savojni modul elastičnosti
- analiza dobivenih rezultata

### 4.2 Materijal za ispitivanje i priprema uzoraka

Svi uzorci za predviđena ispitivanja izrezani su iz drva jele (*Abies alba*). Uzorci su imali dimenzije  $6 \times 6 \times 100$  mm i oblik pravilne četverostrane prizme. Visina prizme (100 mm) podudarala se s longitudinalnom osi drva. Svi uzorci izrezani su u Laboratoriju za strojnu obradu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje sveučilišta u Zagrebu.

Rezanje uzoraka prikazano je slici 31. i slici 32.



Slika 31. Grubo izrezivanje uzoraka

Ukupno je izrezano više od stotinu uzoraka. Kod jedne trećine uzoraka smjer godova u poprečnom presjeku ( $6 \times 6$  mm) u odnosu na stranicu bio je pod  $45^\circ$ , a kod preostalih uzoraka paralelan odnosno okomit na stranicu.



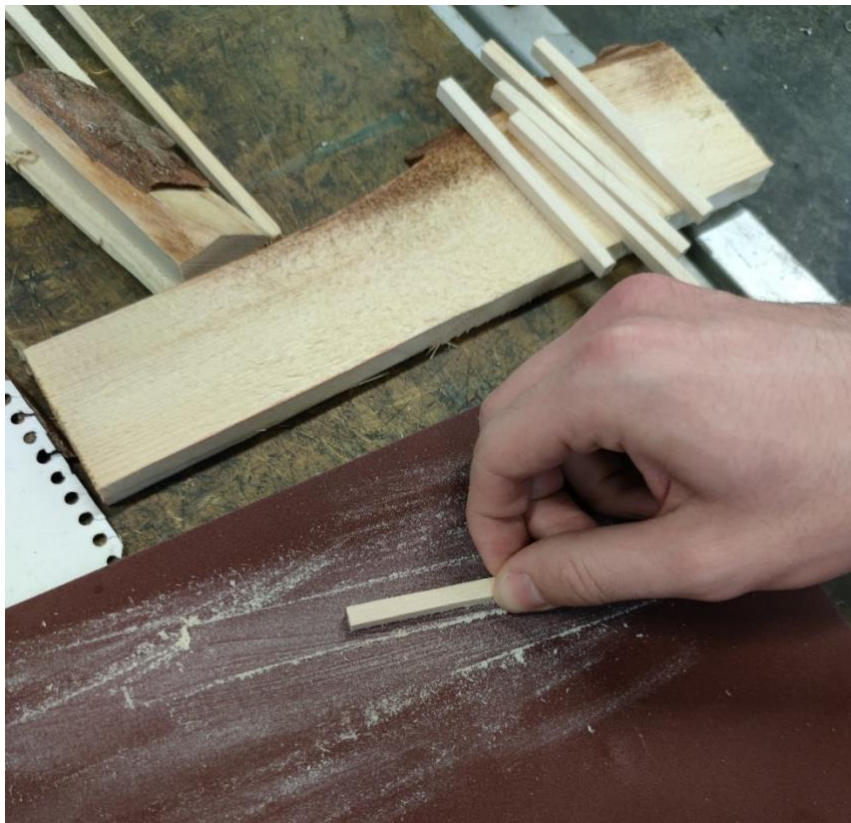
**Slika 32. Precizno izrezivanje uzoraka**

Nakon izrezivanja na potrebne dimenzije površina uzoraka je brušena na brusnom papiru kako bi se uklonili tragovi rezanja koji bi mogli utjecati na rezultate mjerenja. Na slici 33. je prikazano brušenje uzoraka.

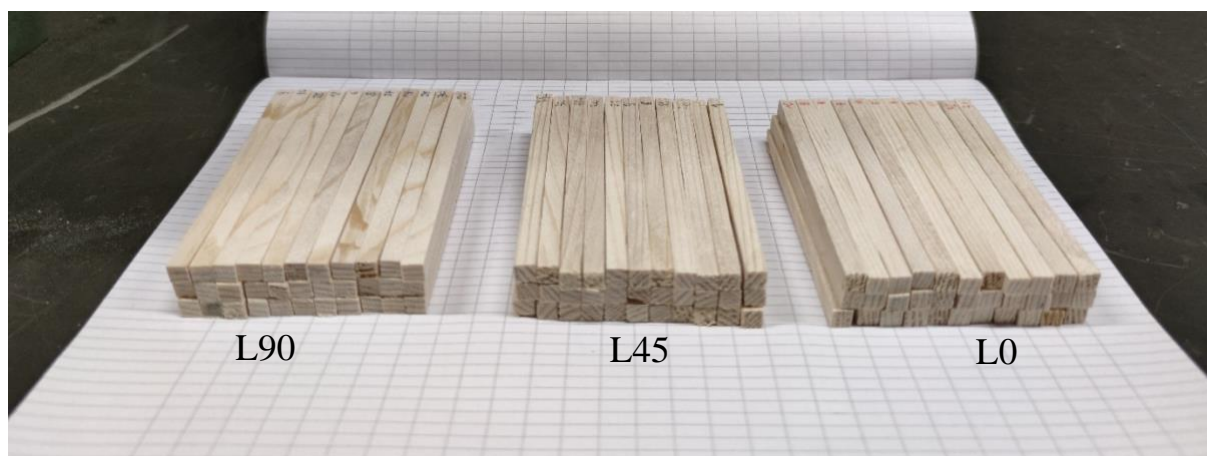
Nakon brušenja, uzorci su pomno pregledani. Izabrano je po 30 uzorka za svaku skupinu (L0, L45 i L90). Kod uzoraka u skupini L0 savojna sila pri ispitivanju djeluje okomito na longitudinalnu os i paralelna je s tangentom na godove. Kod uzoraka u skupini L45 savojna sila je također okomita na longitudinalnu os, a s tangentom na god zatvara kut od  $45^\circ$ . Kod uzoraka u skupini L90 savojna sila je okomita na longitudinalnu os i s tangentom na god zatvara kut od  $90^\circ$ . Ispitni uzorci unutar iste skupine označeni su brojevima od 1 do 30.

Na svim uzorcima izmjerene su širina (b), visina (t) i duljina (l). Dobivene širine i visine svih uzoraka prikazane su u tablici 4.

Na slici 34. prikazane su sve tri skupine ispitnih uzoraka prije ispitivanja savojne čvrstoće.



**Slika 33. Brušenje ispitnih uzoraka**



**Slika 34. Ispitni uzorci prije ispitivanja**

Tablica 4. Širina i visina ispitnih uzoraka

Broj uzorka	SKUPINA L0		SKUPINA L45		SKUPINA L90	
	t-visina uzorka, mm	b-širina uzorka, mm	t-visina uzorka, mm	b-širina uzorka, mm	t-visina uzorka, mm	b-širina uzorka, mm
1	6,00	5,95	5,93	5,98	6,02	6,04
2	5,83	6,06	6,01	6,05	5,99	6,01
3	5,99	5,91	6,08	5,94	6,04	6,14
4	6,06	5,91	6,05	6,01	5,67	6,04
5	5,93	6,04	6,01	5,96	6,11	5,94
6	5,82	6,15	6,03	5,78	6,03	6,03
7	5,91	5,84	5,78	5,99	6,04	6,03
8	5,99	5,94	6,01	6,18	6,10	5,90
9	5,92	6,03	6,04	6,14	6,15	5,98
10	6,08	5,93	6,11	6,16	6,08	5,97
11	5,92	5,95	5,91	5,82	5,91	6,06
12	5,79	6,08	5,97	5,72	6,03	6,01
13	6,05	5,97	6,14	6,05	5,92	6,00
14	6,06	5,89	6,20	6,04	5,95	5,96
15	6,00	6,05	6,01	5,96	5,95	5,95
16	6,00	6,03	5,94	6,03	6,09	6,03
17	5,95	5,77	5,87	6,01	6,14	6,03
18	6,02	5,87	6,12	6,01	6,20	6,02
19	5,94	6,06	5,80	5,84	6,05	5,93
20	5,85	5,91	6,12	6,07	6,15	5,77
21	5,74	6,14	6,06	5,80	6,08	5,93
22	6,09	5,90	6,00	5,71	6,14	5,99
23	5,95	6,00	6,01	5,94	5,89	5,98
24	5,84	6,15	6,08	6,02	6,00	6,04
25	6,03	6,04	6,09	6,15	6,09	5,91
26	5,98	5,88	5,96	6,13	5,94	5,73
27	5,68	6,09	5,84	5,77	5,83	6,04
28	5,87	6,03	5,94	5,92	5,98	5,96
29	5,90	6,15	6,05	5,80	5,98	5,88
30	6,07	5,86	6,03	5,92	6,12	5,84

### 4.3 Određivanje gustoće i volumnog udjela

U Laboratoriju za analizu metala Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu određena je gustoća ispitnih uzoraka. Prvo su uzorcima izmjerene dimenzije i izračunat volumen, a nakon toga im je izmjerena masa na analitičkoj vagi Ohaus Analytical Plus. Na temelju podataka o masi i volumenu izračunata je gustoća ispitivanog drva s udjelom vlage koji će se naknadno odrediti. Na slici 35. prikazana je analitička vaga Ohaus Analytical Plus. Nakon toga ispitni uzorci su stavljeni u peč na temperaturu od  $105 \pm 3^\circ\text{C}$  i sušeni dok se, kod dva uzastopna mjerenja njihove mase više nije moglo očitati smanjenje mase. To znači da je udio vlage u drvu bio približno jednak nuli.

Na temelju vrijednosti mase uzoraka u apsolutno suhom stanju izračunat je udio vlage u drvu, gustoća u apsolutnom suhom stanju i gustoća pri 12 % vlage prikazani u tablici 5.



Slika 35. Analitička vaga Ohaus Analytical Plus

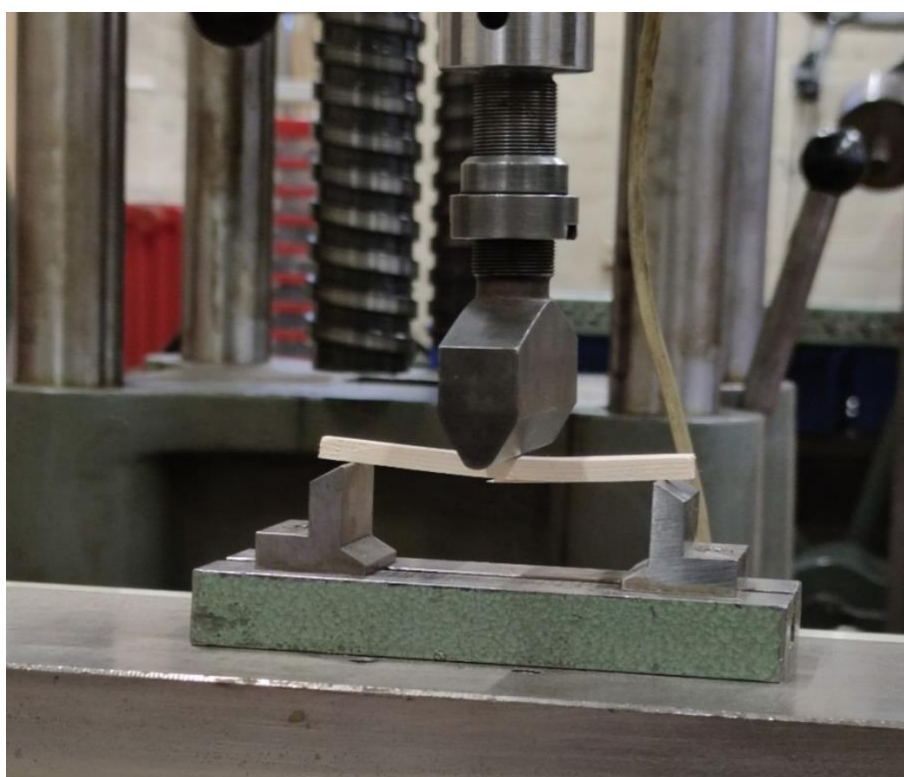
Tablica 5. Udio vlage i gustoća uzoraka

Srednji udio vlage pri ispitivanju	7,03 %
Gustoća pri udjelu vlage od 7,03 %	0,436 g/cm <sup>3</sup>
Gustoća u apsolutno suhom stanju	0,406 g/cm <sup>3</sup>
Gustoća pri udjelu vlage od 12 %	0,448 g/cm <sup>3</sup>

#### 4.4 Ispitivanje savojnog modula elastičnosti

Ispitivanje savojnog modula elastičnosti provedeno je u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Ispitivanje metodom savijanja u tri točke provedeno je na kidalici Erichsen. Pri ispitivanju očitavane su vrijednosti progiba i sile na upravljačkom računalu kidalice. Razmak među osloncima iznosio je 80 mm, a promjer oslonaca 2 mm. Promjer središnjeg valjka preko kojeg su opterećeni uzorci iznosio je 10 mm. Brzina opterećenja iznosila je 2 mm/min.

Na slici 36. prikazano je savijanje uzorka na kidalici.



**Slika 36. Savijanje uzorka na kidalici**

Ukupno je ispitano 90 ispitnih uzoraka, za svaku skupinu po 30. Svaki ispitni uzorak opterećen je do loma. Nakon očitavanja maksimalne sile izračunate su vrijednosti 10 % i 40 % od maksimalne sile i za te vrijednosti savojne sile su očitane vrijednosti progiba za svaki uzorak. Vrijednosti modula elastičnosti izračunate su prema izrazu (1). Kako je savojni modul elastičnosti, kao i mnoga druga svojstva drva, ovisan o udjelu vlage u uzorcima, izračunate su i vrijednosti savojnog modula elastičnosti za udio vlage od 12%.

#### 4.4.1 Rezultati ispitivanja L0 skupine uzoraka

U tablici 6. prikazan3 su dobivene vrijednosti maksimalne savojne sile i maksimalnog progiba te izračunati moduli elastičnosti za udio vlage od 7,03 i 12%, za uzorke iz skupine L0.

**Tablica 6. Vrijednosti savojnog modula elastičnosti ispitnih uzoraka iz skupine L0**

Broj epruvete	$F_{\max}$ , N	$f_{\max}$ , mm	$E$ , N/mm <sup>2</sup> za 7,03 % vlage	$E$ , N/mm <sup>2</sup> za 12 % vlage
1	179,2	3,44	9552,0	8688,3
2	130,4	2,94	6326,9	5754,9
3	161,3	2,35	9107,8	8284,3
4	156,9	2,65	9087,5	8265,8
5	121,8	2,09	6753,6	6143,0
6	99,7	2,14	5545,1	5043,7
7	125,3	2,65	7171,0	6522,7
8	131,4	1,99	8373,3	7616,3
9	104,7	2,23	5434,1	4942,8
10	117,5	2,05	6978,0	6347,1
11	164,5	2,65	9045,6	8227,7
12	110,1	1,88	6497,7	5910,2
13	147,4	2,44	7713,9	7016,5
14	139,4	2,53	7859,8	7149,2
15	120,7	2,73	6014,4	5470,6
16	122,8	2,52	5876,2	5344,9
17	112,1	2,45	6607,2	6009,8
18	152,6	2,35	8020,9	7295,7
19	94,6	1,74	7046,2	6409,1
20	114,8	2,40	6637,3	6037,2
21	131,2	2,12	7154,4	6507,5
22	145,3	2,56	7434,9	6762,6
23	134,2	2,18	8531,3	7760,0
24	133,1	2,48	7235,5	6581,3
25	127,5	2,35	7086,1	6445,5
26	145,8	2,50	7805,6	7099,8
27	123,4	2,26	7242,3	6587,5
28	128,9	2,46	7691,7	6996,3
29	118,5	2,16	5817,0	5291,0
30	127,4	2,43	6675,3	6071,7

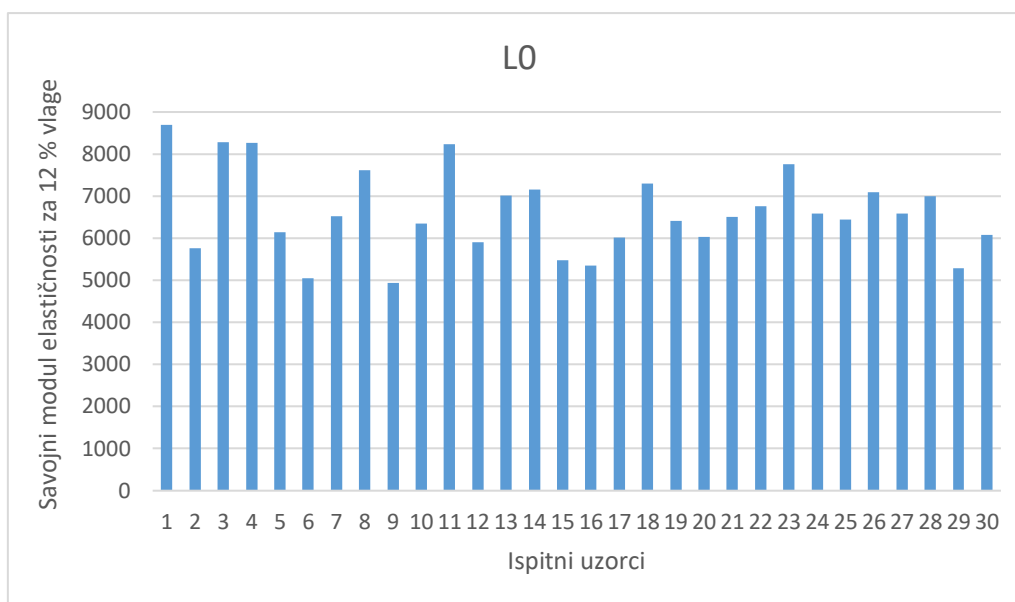
Srednja vrijednost savojnog modula elastičnosti pri 12 % vlage uzoraka iz skupine L0 iznosi 6619,45 N/mm<sup>2</sup>, standardna devijacija iznosi 993,02 te koeficijent varijacije 15.



Vrijednost dopuštenog koeficijenta varijacije prema normi ISO 13061 treba biti manji od 20 % ili manji od 22 % prema literaturi [9].

Na slici 37. grafički su prikazane sve vrijednosti savojnog modula elastičnosti pri 12 % vlage.

Na slici 38. prikazano je nekoliko potrganih ispitnih uzoraka iz skupine L0 s tipičnim oblikom prijeloma za ovu skupinu.



**Slika 37.** Vrijednosti savojnog modula elastičnosti uzoraka L0



**Slika 38.** Ispitni uzorci iz skupine L0 nakon ispitivanja

#### 4.4.2 Rezultati ispitivanja L45 skupine uzoraka

U tablici 7. prikazane su dobivene vrijednosti maksimalne savojne sile i maksimalnog progiba te izračunati moduli elastičnosti za udio vlage od 7,03 i 12%, za uzorke iz skupine L45.

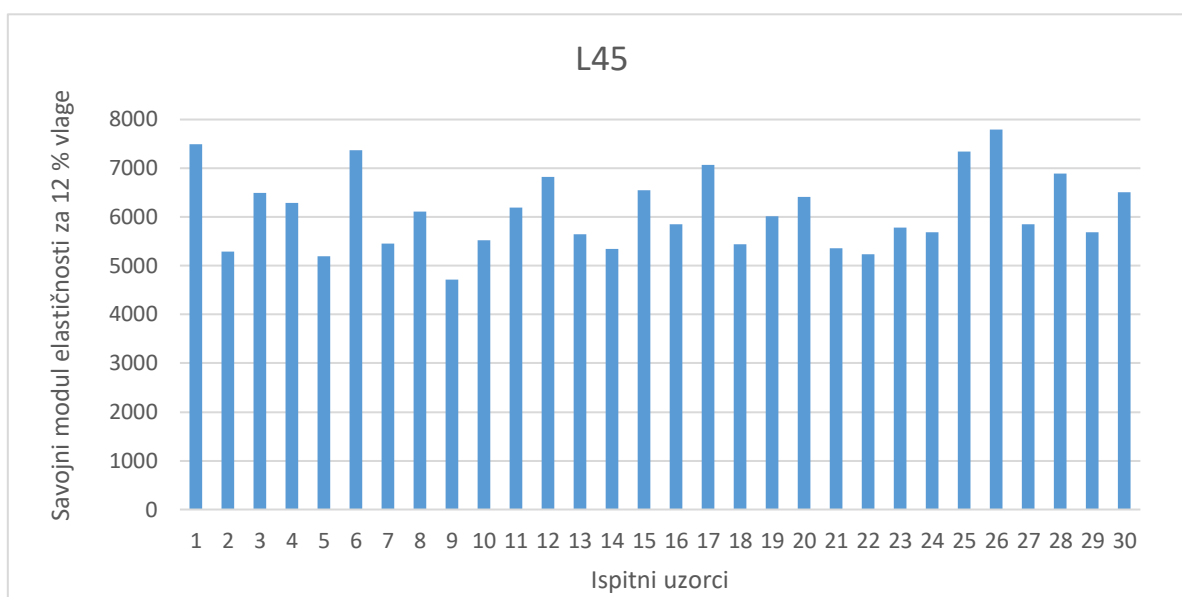
**Tablica 7. Vrijednosti savojnog modula elastičnosti ispitnih uzoraka iz skupine L45**

Broj epruvete	$F_{\max}$ , N	$f_{\max}$ , mm	$E$ , N/mm <sup>2</sup> za 7,03 % vlage	$E$ , N/mm <sup>2</sup> za 12 % vlage
1	146,80	3,14	8232,00	7487,72
2	123,10	2,85	5822,63	5296,18
3	132,60	3,55	7135,49	6490,35
4	99,30	1,66	6912,77	6287,77
5	117,20	3,19	5704,98	5189,17
6	125,20	3,65	8095,89	7363,92
7	102,70	3,13	5989,87	5448,31
8	121,60	3,03	6717,83	6110,45
9	101,80	2,37	5177,78	4709,64
10	128,70	2,63	6070,88	5521,99
11	101,20	3,39	6807,05	6191,61
12	111,40	2,79	7507,30	6828,54
13	129,80	3,16	6213,26	5651,50
14	119,10	2,81	5873,08	5342,07
15	126,50	3,49	7203,32	6552,05
16	120,10	2,74	6438,33	5856,22
17	136,60	3,26	7766,84	7064,62
18	105,60	2,12	5984,81	5443,70
19	109,50	2,75	6617,84	6019,50
20	105,60	1,57	7053,88	6416,12
21	119,70	3,43	5890,13	5357,59
22	97,00	2,80	5749,31	5229,49
23	127,20	3,34	6357,04	5782,28
24	123,10	2,98	6252,03	5686,77
25	152,00	3,13	8079,08	7348,63
26	156,30	3,09	8572,20	7797,16
27	99,50	2,82	6425,96	5844,97
28	133,60	2,63	7568,74	6884,43
29	111,50	3,03	6253,72	5688,31
30	139,90	3,50	7156,74	6509,68

Srednja vrijednost savojnog modula elastičnosti pri 12 % vlage uzoraka iz skupine L45 iznosi 6113,36 N/mm<sup>2</sup>, standardna devijacija iznosi 786,9 te koeficijent varijacije 12,9, što je manje od dopuštenog.

Na slici 39. grafički su prikazane sve vrijednosti savojnog modula elastičnosti pri 12 % vlage.

Na slici 40. prikazano je nekoliko potrganih ispitnih uzoraka iz skupine L45 s tipičnim oblikom prijeloma za ovu skupinu.



**Slika 39. Vrijednosti savojnog modula elastičnosti uzoraka L45**



**Slika 40. Ispitni uzorci iz skupine L45 nakon ispitivanja**

#### 4.4.3 Rezultati ispitivanja L90 skupine uzoraka

U tablici 8, prikazane su dobivene vrijednosti maksimalne savojne sile i maksimalnog progiba te izračunati moduli elastičnosti za udio vlage od 7,03 i 12%, za uzorke iz skupine L90.

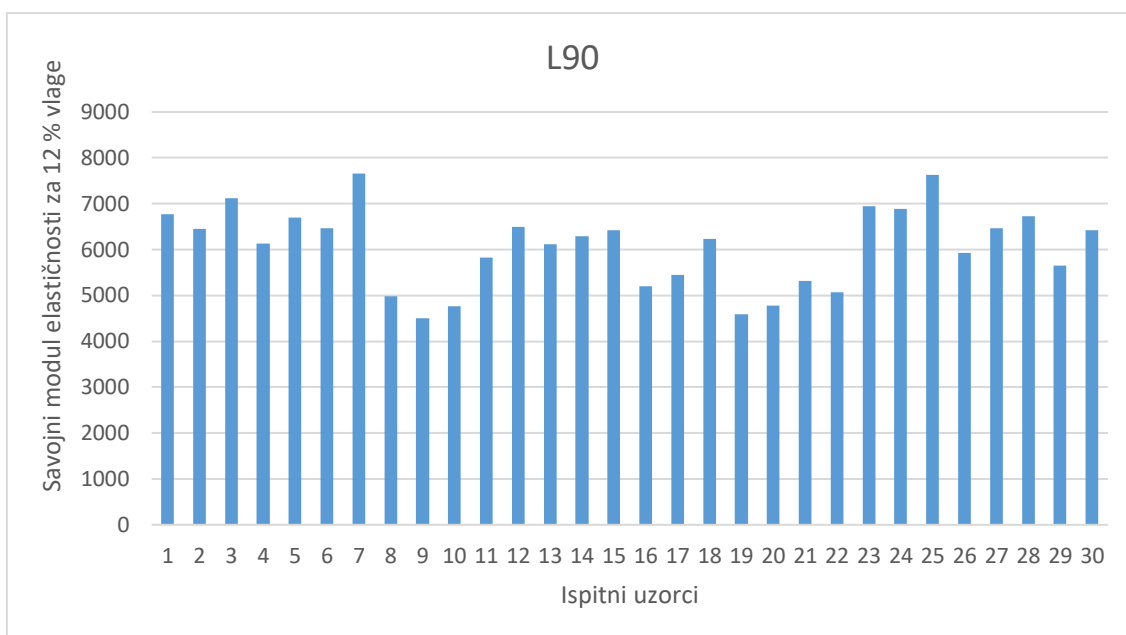
**Tablica 8. Vrijednosti savojnog modula elastičnosti ispitnih uzoraka iz skupine L90**

Broj epruvete	$F_{\max}$ , N	$f_{\max}$ , mm	$E$ , N/mm <sup>2</sup> za 7,03 % vlage	$E$ , N/mm <sup>2</sup> za 12 % vlage
1	115,70	1,83	7442,94	6770,01
2	148,80	3,14	7087,49	6446,69
3	162,60	3,09	7834,93	7126,55
4	144,90	3,40	6747,79	6137,71
5	118,00	2,21	7371,76	6705,26
6	151,60	3,37	7101,82	6459,72
7	148,10	3,13	8420,29	7658,99
8	110,80	2,57	5477,64	4982,39
9	96,50	1,98	4943,16	4496,24
10	109,40	2,44	5237,58	4764,03
11	147,00	3,39	6405,73	5826,57
12	124,20	2,43	7144,01	6498,10
13	123,20	2,41	6726,73	6118,54
14	136,20	3,76	6919,92	6294,27
15	129,00	2,42	7057,73	6419,62
16	123,30	2,68	5719,17	5202,09
17	132,40	3,04	5994,57	5452,59
18	127,90	3,68	6850,85	6231,45
19	71,30	1,76	5046,99	4590,68
20	102,00	3,06	5262,45	4786,66
21	104,20	2,14	5844,37	5315,96
22	122,70	2,79	5578,88	5074,48
23	122,80	2,03	7640,37	6949,59
24	156,30	4,00	7566,18	6882,10
25	148,30	2,67	8388,78	7630,33
26	123,40	3,26	6523,53	5933,72
27	111,70	1,65	7104,07	6461,77
28	121,80	3,19	7388,71	6720,67
29	96,50	2,09	6220,56	5658,14
30	170,30	4,14	7058,99	6420,76

Srednja vrijednost savojnog modula elastičnosti pri 12 % vlage uzoraka iz skupine L90 iznosi 6067,19 N/mm<sup>2</sup>, standardna devijacija iznosi 869,54 te koeficijent varijacije 14,3.

Na slici 41. grafički su prikazane sve vrijednosti savojnog modula elastičnosti pri 12 % vlage.

Na slici 42. prikazano je nekoliko potrganih ispitnih uzoraka iz skupine L90 s tipičnim oblikom prijeloma za ovu skupinu.



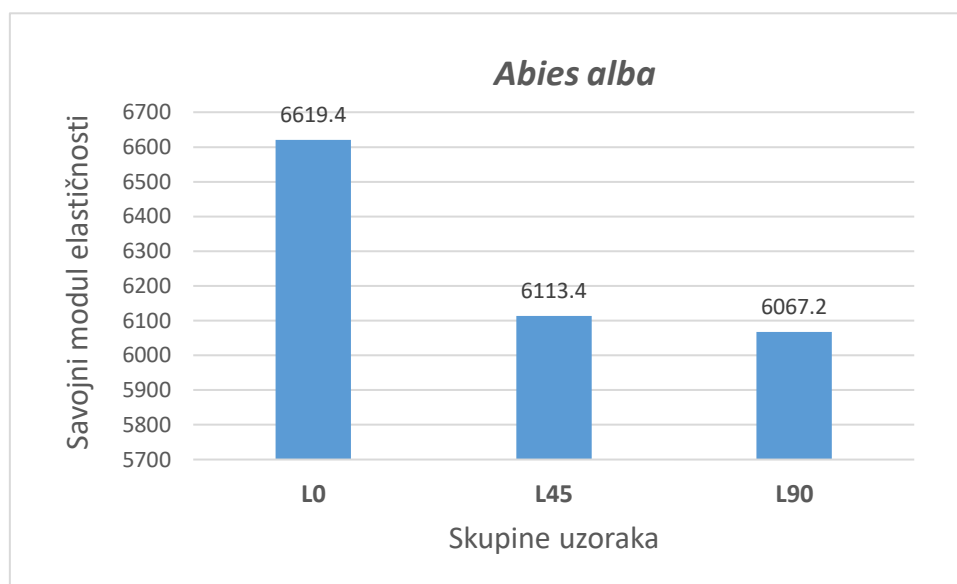
**Slika 41. Vrijednosti savojnog modula elastičnosti uzoraka L90**



**Slika 42. Ispitni uzorci iz skupine L90 nakon ispitivanja**

U dijagramu na slici 43. prikazane su srednje vrijednosti modula elastičnosti za sve tri skupine uzoraka. Najveća vrijednost modula elastičnosti u longitudinalnom smjeru dobivena je kod skupine L0 kod koje je kut između savojne sile i tangente na god iznosio  $0^\circ$ , odnosno kod koje su savojna sila i tangenta na god u poprečnom presjeku paralelne.

Vrijednosti modula elastičnosti kod kuta od  $45^\circ$  i  $90^\circ$  manje su za 7,6 % odnosno 8,34 % od vrijednosti modula elastičnosti za kut od  $0^\circ$ .



**Slika 43.** Srednje vrijednosti modula elastičnosti za sve skupine

## 5. ANALIZA REZULTATA

Vrijednosti savojnog modula elastičnosti, izračunate iz podataka dobivenih pri ispitivanju savijanja metodom u tri točke, analizirane su Weibullovom raspodjelom.

Na slikama 44, 45 i 46 prikazani su dijagrami na kojima se vide regresijske jednadžbe za savojni modul elastičnosti uzoraka pri 12 % vlage, za skupine L0, L45 i L90.

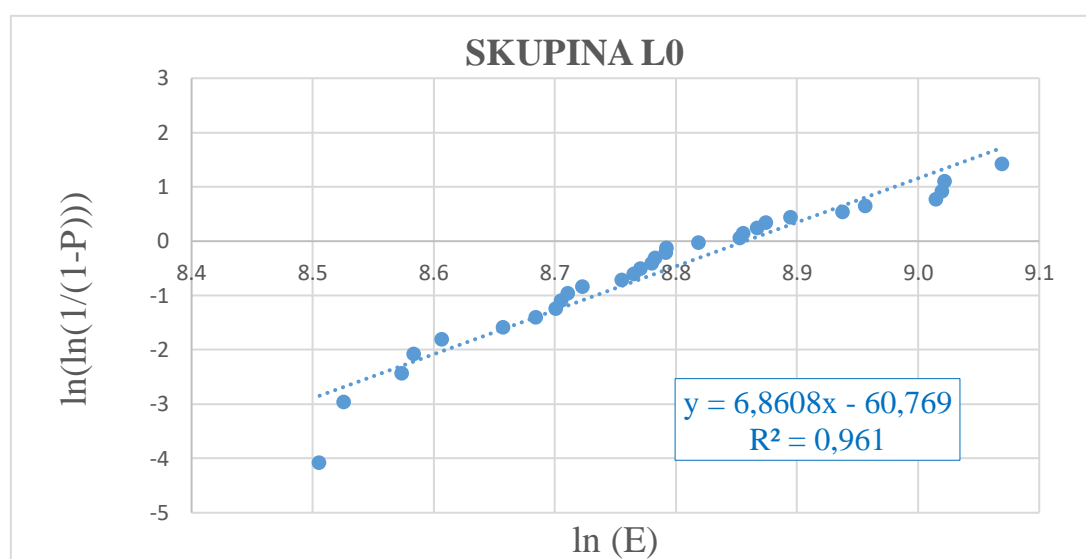
Vrijednost koeficijenta  $m$  u jednadžbama  $y = mx \pm b$  predstavlja Weibullov modul rasipanja čije se vrijednosti uobičajeno kreću u rasponu od 10 do 20. Što su njegove vrijednosti više to je materijal homogeniji. Koeficijent  $b$  u gornjoj jednadžbi predstavlja odsječak na osi  $y$ .

Vrlo visoke vrijednosti koeficijenta determinacije (0,961, 0,885 i 0,911) potvrđuju reprezentativnost modela.

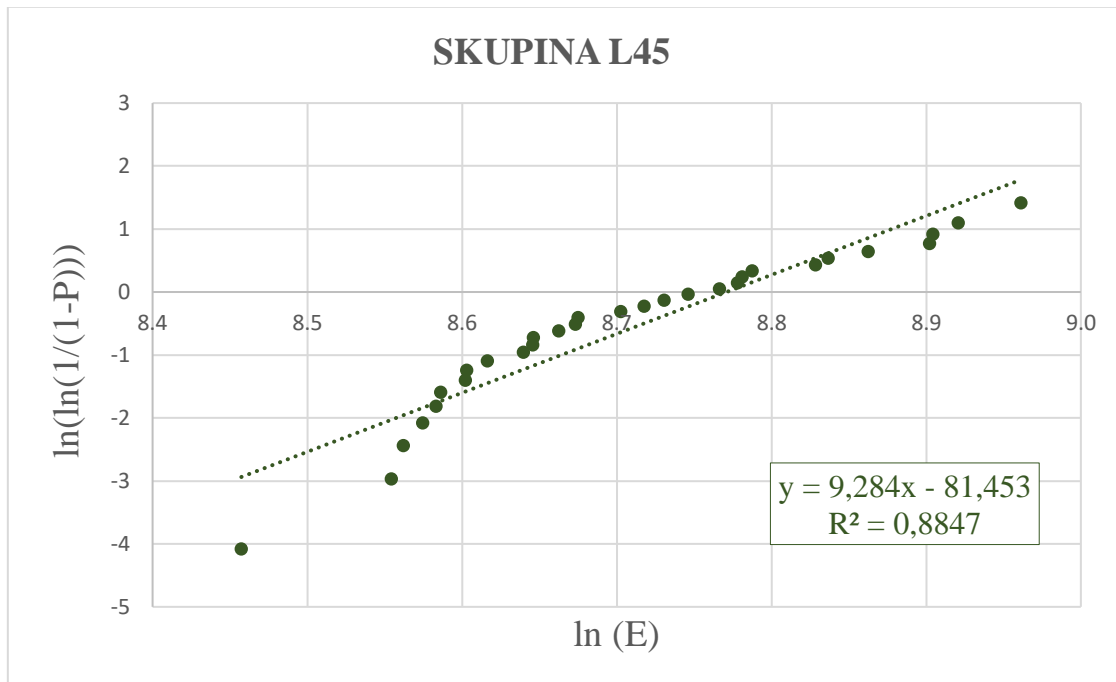
U tablici 9. prikazani su statistički podaci za vrijednosti savojnog modula elastičnosti svih triju skupina uzoraka.

**Tablica 9. Statistički rezultati za vrijednosti savojnog modula elastičnosti**

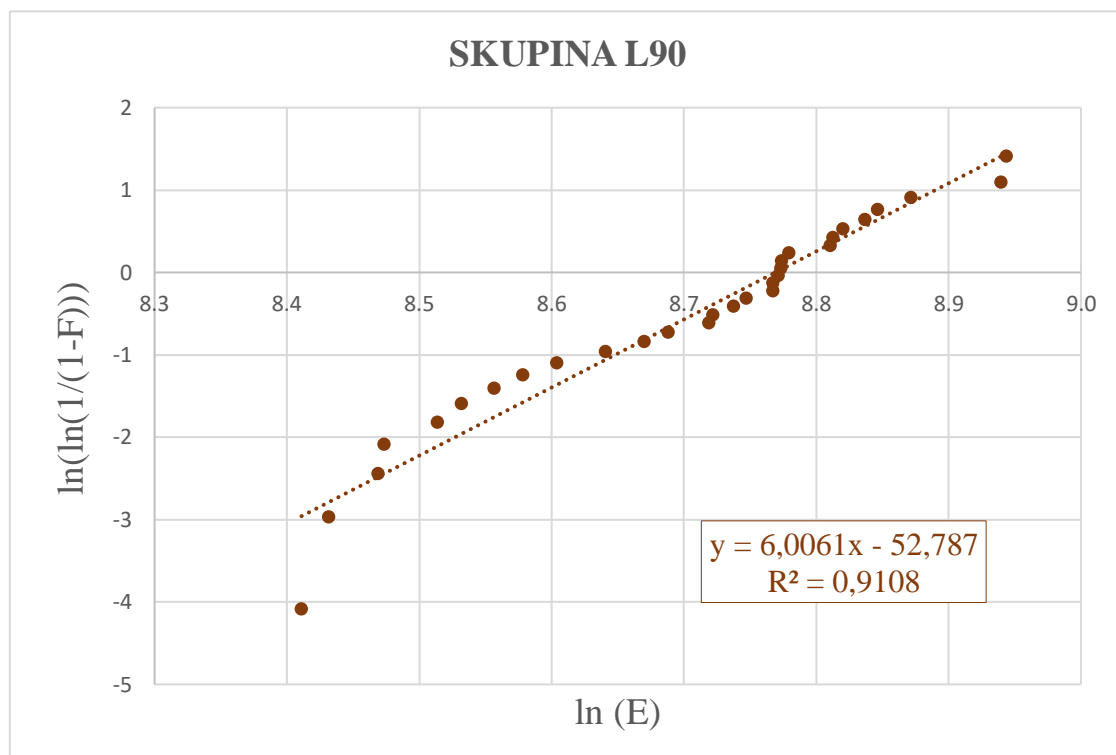
Skupina uzorka	Savojni modul elastičnosti, N/mm <sup>2</sup>				Weibullov modul $m$
	min	max	srednja vrijed.	stand. devij.	
L0	4942,8	8688,3	6619,5	993,1	6,86
L45	4709,6	7797,2	6113,4	786,9	9,28
L90	4496,2	7658,9	6067,2	869,5	6,01



**Slika 44. Weibullova raspodjela za modul elastičnosti uzoraka skupine L0**



**Slika 45. Weibullova raspodjela za modul elastičnosti uzoraka skupine L45**



**Slika 46. Weibullova raspodjela za modul elastičnosti uzoraka skupine L90**



## 6. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih ispitivanja i pritom dobivenih rezultata može se zaključiti sljedeće:

1. Vrijednosti savojnog modula elastičnosti za drvo jele (*Abies alba*) u longitudinalnom smjeru ovise o kutu koji zatvaraju savojna sila i tangenta na god.
2. Najviša srednja vrijednost savojnog modula elastičnosti dobivena je kad je kut između savojne sile i tangente na god bio  $0^\circ$  i iznosila je  $6619,5 \text{ N/mm}^2$ . Najmanja srednja vrijednost savojnog modula elastičnosti izmjerena je pod kutem od  $90^\circ$  i iznosila je  $6067,2 \text{ N/mm}^2$ . Srednja vrijednost savojnog modula elastičnosti kod kuta od  $45^\circ$  iznosila je  $6113,4 \text{ N/mm}^2$ .
3. Rasipanja rezultata pri ispitivanju bila su relativno velika, ali su iznosi koeficijenta varijacije kod svake skupine bili ispod dopuštene vrijednosti od 20 %.
4. Postignute vrijednosti modula elastičnosti svih triju skupina slijede Weibullovu distribuciju. Najveći Weibullov modul bio je kod skupine L45. Koeficijent determinacije vrlo je visok za sve skupine (0,96, 0,89 i 0,91).

## LITERATURA

- [1] Rede, V.: Drvo-tehnički materijal, autorizirana skripta
- [2] Nacrt šumskogospodarske osnove područja Republike Hrvatske 2016. – 2025., <http://www.mps.hr/default.aspx?id=8451>, pristup 17. 2. 2022.
- [3] Rede, V.: Autorizirane vježbe iz kolegija „keramika, beton, drvo „, [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1401970934-0-drvo\\_14.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1401970934-0-drvo_14.pdf), pristup 18. 2. 2022.
- [4] [http://instrukcije-kemija.blogspot.com/2011/05/instrukcije-iz-biologije\\_27.html](http://instrukcije-kemija.blogspot.com/2011/05/instrukcije-iz-biologije_27.html), pristup 18. 2. 2022.
- [5] Rede, V.: Građa drva – mikrostruktura, materijali s predavanja
- [6] Rowell, R. M.: Handbook of wood chemistry and wood composites, CRC Press, 2005.
- [7] <http://www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/properties/non-IE/stiffness.html>, pristup 22. 2. 2022.
- [8] Horvat, I.: *Tehnologija drva*, Drvnoindustrijski priručnik, Tehnička knjiga, Zagreb
- [9] Green, D. W., Winandy, J. E. and Kretschmann, D. E.: Mechanical Properties of Wood, 1999.
- [10] Essert, S., Rede, V., Švigelj, Z.: The bending modulus od elasticity of subfossil elm wood, wood research 63 (2) : 239-248.
- [11] Garab, J., Keunecke, D., Hering, S., Szalai, J., Niemz, P.: Measurement of standard and off-axis elastic moduli and Poisson’s ratios of spruce and yew wood in the transverse plane, Wood. Sci. Technol. 2010, 44: 451–464.
- [12] Miksic. A., Myntti, M., Koivisto, J., Salminen, L., Alava, M.: Effect of fatigue and annual rings’ orientation on mechanical properties of wood under cross-grain uniaxial compression, Wood Sci. Technol. 2013, 47: 1117–1133.
- [13] Lahr, F.A.R., Christoforo, A.L., Panzera, T.H., Silva, D.A.L., Goncalves, D.: Anisotropy influence in obtaining stiffness property bending of Brazilian wood species. Int. J. Mater. Eng., 2014, 4(3): 92-96.
- [14] Grotta, A., Leichti, R.J., Gartner, B.L., Johnson, G.R.: Effect of growth ring orientation and placement of earlywood and latewood on MOE and MOR of very small clear Douglas fir beams, Wood Fiber Sci., 2005, 37(2): 207-212.

- [15] Adamopoulos, S.: Flexural properties of black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) small clear wood specimens in relation to the direction of load application, *Holz Roh Werkst.*, 2002, 60(5): 325–327.
- [16] ISO 13061, 2014: Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens.