

Utjecaj usmjerene strukture na savojna svojstva subfosilnog drva jasena u longitudinalnom smjeru

Ribić, Borna

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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:235:943136>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-06-22**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Borna Ribić

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentorica:

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

Student:

Borna Ribić

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se tehničkim suradnicima Romanu Divjaku i Damiru Švecu na pomoći pri laboratorijskom ispitivanju uzoraka.

Veliko hvala i prof. dr. sc. Veri Rede i asistentici Heleni Lukšić, mag. ing. na velikoj pristupačnosti te uloženom trudu i vremenu prilikom izrade ovog diplomskog rada.

Također, zahvaljujem se i Matei Hofer, mag. educ. biol. et chem. na prekrasnim fotografijama mikrostrukture uzoraka.

Na kraju, najveće hvala mojoj obitelji, psu Pati i prijateljima što su bili jedna velika potpora tijekom mog studiranja.

Borna Ribić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:

Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Borna Ribić** JMBAG: 0035216647

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj usmjerene strukture na savojna svojstva subfosilnog drva jasena u longitudinalnom smjeru**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The influence of directional structure on the bending properties of subfossil ash wood in the longitudinal direction**

Opis zadatka:

Vrijednosti savojnog modula elastičnosti i savojne čvrstoće kod svih vrsta drva najveće su kad savojna sila djeluje okomito na uzdužnu os debla, odnosno u longitudinalnom smjeru. Vrijednosti istih svojstava u tangencijalnom i radijalnom smjeru puno su niže i međusobno su podjednake. Kod nekih vrsta drva vrijednosti savojne čvrstoće i savojne krutosti u longitudinalnom smjeru ovise o kutu između savojne sile i tangente na godove, a kod drugih vrsta ovaj kut nema nikav utjecaj. Iz dostupne literature nije jasno koji je uzrok takvom ponašanju nekih vrsta drva pri savojnom opterećenju.

U radu je potrebno odrediti kako navedeni kut utječe na vrijednosti savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti kod subfosilnog drva jasena. Ispitivanje savijanjem provesti metodom savijanja u tri točke, pri čemu je kut između savojne sile i tangente na god 0° , 45° i 90° . Dobivene rezultate statistički obraditi, analizirati i usporediti s rezultatima dobivenim pri sličnim ispitivanjima na drugim vrstama drva te na temelju svega navedenog donijeti odgovarajuće zaključke.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

7. ožujka 2024.

9. svibnja 2024.

13. – 17. svibnja 2024.

Zadatak zadala: *Rede*

Prof. dr. sc. Vera Rede

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. STRUKTURA DRVA	2
2.1. Botanička podjela drva.....	2
2.2. Poprečni presjek kroz deblo	3
2.3. Karakteristični presjeci u drvu	4
2.4. Godovi.....	5
2.5. Drvna stanica.....	7
2.6. Stanična stijenka	8
3. STRUKTURA DRVA NA MOLEKULARNOJ RAZINI	10
3.1. Lignin	10
3.2. Celuloza	11
3.3. Hemiceluloza	12
3.4. Ekstrahirane tvari	13
3.5. Anorganske tvari	13
4. MEHANIČKA SVOJSTVA DRVA	14
4.1. Modul elastičnosti	14
4.2. Savojna čvrstoća	17
4.3. Tlačna čvrstoća	19
4.4. Vlačna čvrstoća	19
4.5. Smična čvrstoća	20
4.6. Žilavost.....	21

4.7. Tvrdoća	22
5. JASEN	24
5.1. Fizikalna i mehanička svojstva običnog jasena (lat. <i>Fraxinus excelsior</i>).....	24
5.2. Utjecaj toplinske obrade na drvo jasena	27
6. EKSPERIMENTALNI DIO	28
6.1. Cilj rada i provedena ispitivanja	28
6.2. Materijal za ispitivanje.....	28
6.3. Analiza mikrostrukture	31
6.4. Određivanje udjela vlage i gustoće prema normi ISO 13061	33
6.5. Uzorci za ispitivanje.....	35
6.6. Ispitivanje savojnog modula elastičnosti i savojne čvrstoće.....	38
6.7. Rezultati ispitivanja.....	39
7. ANALIZA REZULTATA	44
7.1. Weibullova razdioba	45
8. ZAKLJUČAK.....	54
LITERATURA.....	55

POPIS SLIKA

Slika 1.	A) Četinjača, B) Listača, C) Poprečni presjek kroz deblo četinjače, D) Poprečni presjek kroz deblo listače [5].....	2
Slika 2.	Poprečni presjek kroz deblo [6].....	3
Slika 3.	Tri karakteristična presjeka u drvu [7]	4
Slika 4.	A) Poprečni presjek četinjače (bor (<i>Pinus resinosa</i>)), B) Poprečni presjek listače (hrast (<i>Quercus rubra</i>)) [4].....	6
Slika 5.	Tri karakteristične vrste godova kod četinjača i listača, A i D – nema prijelaza iz ranog u kasni dio goda, B i E – postupan je prijelaz iz ranog u kasni dio goda, C i F – nagli prijelaz iz ranog u kasni dio goda [4].....	6
Slika 6.	Poprečni presjeci kroz drvo četinjače (A) i listače (B) [9].....	8
Slika 7.	Građa stanične stijenke [10]	9
Slika 8.	Raspored biopolimera stanične stijenke drva [11]	10
Slika 9.	Molekularna struktura lignina [11].....	11
Slika 10.	Molekularna struktura celuloze [11]	12
Slika 11.	Molekularna struktura hemiceluloze [11]	12
Slika 12.	Moduli elastičnosti za drva i ostale tehničke materijale u GPa [4].....	15
Slika 13.	Shematski prikaz ispitivanja savojne čvrstoće i modula elastičnosti standardnom metodom u tri točke [14]	15
Slika 14.	Elastično područje krivulje sila-progib [4].....	16
Slika 15.	Djelovanje opterećenja na uzorak [16].....	17
Slika 16.	Kut između linije godova i smjera savojne sile [4]	18
Slika 17.	Utjecaj promjene kuta na vrijednosti modula elastičnosti i čvrstoće pri savijanju uzoraka drvnog kompozita [17]	18
Slika 18.	a) djelovanje tlaka okomito na longitudinalni smjer, b) djelovanje tlaka okomito na radijalni smjer, c) djelovanje tlaka okomito na tangencijalni smjer [18]	19
Slika 19.	Shematski prikaz smičnog naprežanja [4].....	20
Slika 20.	Odnos čvrstoće i žilavosti za različite vrste drva i ostale tehničke materijale [4].	22
Slika 21.	Ispitivanje tvrdoće drva metodom po Janki [21].....	23
Slika 22.	Stablo jasena.....	24
Slika 23.	Ovisnost modula elastičnosti o udjelu vlage za drvo jasena za različite metode mjerenja [22]	26
Slika 24.	Ovisnost modula smičnosti o udjelu vlage za drvo jasena [22]	26

Slika 25.	Grafički prikaz starosti subfosilnog drva jasena [25].....	30
Slika 26.	Mikrostruktura jasena u poprečnom presjeku	31
Slika 27.	Mikrostruktura jasena u radijalnom presjeku	32
Slika 28.	Mikrostruktura jasena u tangencijalnom presjeku.....	32
Slika 29.	Mjerenje uzorka na analitičkoj vagi	33
Slika 30.	Peć za sušenje uzorka	34
Slika 31.	Subfosilno drvo jasena za ispitivanje	35
Slika 32.	Rezanje uzoraka za savojno ispitivanje.....	36
Slika 33.	Tri grupe ispitnih uzoraka za savojno ispitivanje.....	36
Slika 34.	Elektrodinamička kidalica STEPLAB.....	38
Slika 35.	Uzorak za ispitivanje postavljen na oslonce.....	39
Slika 36.	Primjeri ispitanih uzoraka nakon loma.....	39
Slika 37.	Krivulje savojna sila – progib za prvih 10 ispitivanja s kutom od 0°	42
Slika 38.	Krivulje savojna sila – progib za prvih 10 ispitivanja s kutom od 45°	43
Slika 39.	Krivulje savojna sila – progib za prvih 10 ispitivanja s kutom od 90°	43
Slika 40.	Usporedba rezultata savojne čvrstoća za 0°, 45° i 90°	44
Slika 41.	Usporedba rezultata savojnih modula elastičnosti za različite kutove	45
Slika 42.	Utjecaj Weibullovog modula na oblik Weibullove razdiobe [27]	46
Slika 43.	Kumulativna Weibullova razdioba normalizirane savojne čvrstoće za 0°	46
Slika 44.	Kumulativna Weibullova razdioba normalizirane savojne čvrstoće za 45°	47
Slika 45.	Kumulativna Weibullova razdioba normalizirane savojne čvrstoće za 90°	47
Slika 46.	Kumulativna Weibullova razdioba normaliziranog modula elastičnosti za 0°	48
Slika 47.	Kumulativna Weibullova razdioba normaliziranog modula elastičnosti za 45° ..	49
Slika 48.	Kumulativna Weibullova razdioba normaliziranog modula elastičnosti za 90° ...	49

POPIS TABLICA

Tablica 1. Moduli elastičnosti u tri karakteristična smjera za američku duglaziju [15]	16
Tablica 2. Odnos između vlačnih čvrstoća u tangencijalnom te radijalnom smjeru i vlačne čvrstoće u longitudinalnom smjeru za četinjače i listače	20
Tablica 3. Rezultati ispitivanja starosti subfosilnog drva jasena [25]	29
Tablica 4. Rezultati mjerenja mase, udjela vlage i gustoće.....	35
Tablica 5. Izmjerene vrijednosti širine (b) i visine (h) uzoraka	37
Tablica 6. Vrijednosti maksimalne sile za svih 90 uzoraka	40
Tablica 7. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti.....	41
Tablica 8. Statistički podaci savojne čvrstoće.....	48
Tablica 9. Statistički podaci savojnog modula elastičnosti.....	50
Tablica 10. Shematski prikaz vrijednosti savojne čvrstoće u ovisnosti o kutu između savojne sile i tangente na godove	51
Tablica 11. Shematski prikaz vrijednosti modula elastičnosti u ovisnosti o kutu između savojne sile i tangente na godove	52

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$A_{t=0}$	-	koncentracija aktivnosti ^{14}C u organizmu u trenutku smrti
A_t	-	koncentracija aktivnosti u trenutku mjerenja
b	mm	širina uzorka
$f(x)$	-	učestalost razdiobe slučajne varijable x
G_{LR}	MPa	modul smičnosti u longitudinalno radijalnoj ravnini
G_{LT}	MPa	modul smičnosti u longitudinalno tangencijalnoj ravnini
G_{RT}	MPa	modul smičnosti u radijalno tangencijalnoj ravnini
h	mm	visina uzorka
m	-	Weibullov modul
m_1	g	masa uzorka prije sušenja
m_2	g	masa uzorka nakon sušenja
m_w	g	masa pri određenom udjelu vlage
R^2	-	koeficijent determinacije
V_w	cm^3	volumen pri određenom udjelu vlage
w	%	udio vlage
x	-	slučajna varijabla
ρ_{12}	g/cm^3	gustoća za udio vlage od 12 %
$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$	g/cm^3	gustoća vode
ρ_w	g/cm^3	gustoća vode pri određenom udjelu vlage
σ_f	MPa	savojna čvrstoća

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu istražen je utjecaj kuta između smjera savojne sile i tangente na godove na savojnu čvrstoću i savojni modul elastičnosti subfosilnog drva jasena u longitudinalnom smjeru. Savojno ispitivanje provedeno je metodom savijanja u tri točke.

Metodom radioaktivnog ugljikovog izotopa ^{14}C , procijenjena je starost drva jasena na 775 ± 50 godina.

Ispitivanjima je utvrđeno da kut između savojne sile i tangente na godove ima veliki utjecaj na vrijednosti savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti. Najveće vrijednosti i najmanja rasipanja dobivene su za kut od 0° , dok su dobivene vrijednosti za kut od 45° najmanje i s najvećim rasipanjem rezultata. Također, rezultati se mogu dobro opisati Weibullovom razdiobom, a najveći modul je kod uzorka gdje je kut između savojne sile i savojnog modula elastičnosti 0° .

Ključne riječi: subfosilni jasen, savojna čvrstoća, savojni modul elastičnosti, Weibullova razdioba

SUMMARY

This master thesis investigates the influence of the angle between the direction of bending force and the tangent to the growth rings on the bending strength and bending modulus of elasticity of subfossil ash wood in the longitudinal direction. Bending tests were conducted using the three-point bending method.

Using the radiocarbon isotope method ^{14}C , the age of ash wood was estimated to be 775 ± 50 years.

The research found that the angle between the bending force and the tangent to the growth rings has a significant influence on the values of bending strength and bending modulus of elasticity. The highest values and the smallest scatter were obtained for the 0° angle, while the values obtained for the 45° angle were lowest and with largest scatter. Additionally, the results can be well described by the Weibull distribution, with the highest modulus in samples where the angle between the bending force and bending modulus of elasticity is 0° .

Key words: subfossil ash wood, bending strength, bending modulus of elasticity, Weibull distribution.

1. UVOD

Drvo, kao prirodni kompozit, sve više pronalazi primjenu u građevinarstvu i industriji namještaja, uz visoku estetsku vrijednost i ekološku održivost. Održivost je vrlo bitna stavka u bilo kojoj industriji, a posebice u građevinarstvu gdje različiti faktori pridonose popularnosti ovog materijala, uključujući smanjenje emisije ugljičnog dioksida, brigu o energetske i vodnoj sigurnosti te želju za održivim rastom industrije. Zahvaljujući obilju šuma, materijali na bazi drva mogu zadovoljiti potrebe za ekonomičnim kompozitima visokih performansi s minimalnim utjecajem na okoliš [1].

Drvo se može opisati kao anizotropan materijal što znači da ima različita i neovisna mehanička svojstva u različitim smjerovima. Mehanička svojstva drva opisuju se s obzirom na tri međusobno okomite osi:

longitudinalnu (L) – koja je paralelna s vlakancima i s centralnom osi debla

radijalnu (R) – koja je okomita na vlakanca i uzdužnu os debla

tangencijalnu (T) – koja je okomita na vlakanca i tangira liniju godova [2].

U ovom radu ističe se važnost savojnog modula elastičnosti i savojne čvrstoće drva, posebno u longitudinalnom smjeru, gdje su ove vrijednosti najviše. Međutim, kod nekih vrsta drva, ova svojstva ovise o kutu između savojne sile i tangente na godove, dok kod drugih vrsta taj kut nema utjecaja. S obzirom na to da iz literature nije jasno zašto se takvo ponašanje javlja kod određenih vrsta drva, u ovom radu istraženo je kako navedeni kut utječe na savojnu čvrstoću i modul elastičnosti kod subfosilnog drva jasena. Ispitivanje je provedeno metodom savijanja u tri točke pri kutovima između savojne sile i tangente na god od 0° , 45° i 90° .

Dobiveni rezultati statistički su obrađeni i analizirani te je napravljena usporedba s rezultatima sličnih ispitivanja na drugim vrstama drva. Ovim istraživanjem nastoji se doprinijeti razumijevanju ponašanja drva pod savojnim opterećenjem i eventualno pronaći nove smjernice za optimizaciju konstrukcija i materijala u inženjerskoj praksi.

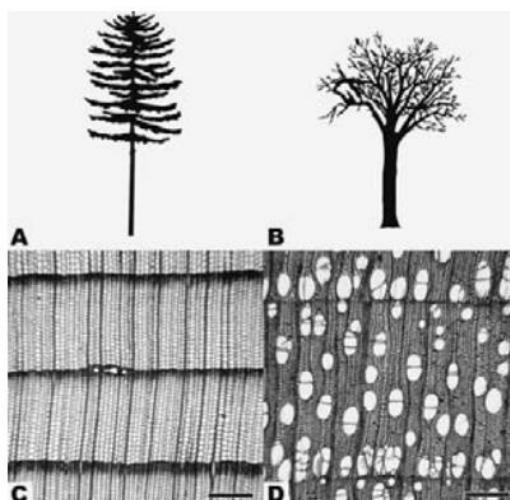
2. STRUKTURA DRVA

Drvo i drvni artefakti pripadaju skupini organskih materijala te stoga podliježu kemijskim procesima recikliranja prirode. U širem smislu, drvo se proizvodi od osnovnih građevnih blokova ugljikovog dioksida i vode, a priroda ga reciklira natrag u ugljični dioksid i vodu. Kako bi artefakti iz prošlih civilizacija preživjeli, moraju biti u stanju preživjeti kemijske procese recikliranja prirode [3].

Mnogi povijesni drvni artefakti koje danas imamo, prošli su brojne kemijske i fizikalne promjene. Veliki broj njih je izgubljeno radi biorazgradive prirode materijala. Stoga je za proučavanje i razumijevanje promjena kroz koje su drvni artefakti prošli kroz vrijeme izrazito važno razumjeti strukturu drva [3].

2.1. Botanička podjela drva

Kako bi se što bolje razumjelo ponašanje drva kao tehničkog materijala, njegovu strukturu treba promatrati na različitim razinama, a to su: makro, sub-makro, mikro, sub-mikro te na molekularnoj razini. Sve vrste drva mogu se podijeliti u dvije kategorije, a to su četinjače i listače [3]. Drugi naziv za četinjače je i *meko drvo* (engl. *softwood*) te za listače *tvrd drvo* (engl. *hardwood*), iako to nije uvijek povezano s njihovom stvarnom tvrdoćom. U komercijalnim vrstama drva, listače prednjače s oko 2000 vrsta, dok komercijalnih vrsta četinjača nema puno [4]. Na slici 1. prikazan je opći oblik stabla listača i četinjača te njihova mikrostruktura u poprečnom presjeku [5].



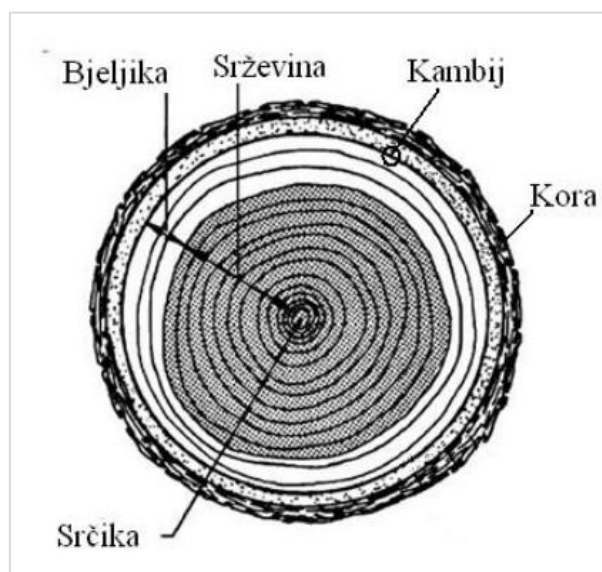
Slika 1. A) Četinjača, B) Listača, C) Poprečni presjek kroz deblo četinjače, D) Poprečni presjek kroz deblo listače [5]

Četinjače su vrste drva koje pripadaju golosjemenjačama, dok s druge strane listače pripadaju kritosjemenjačama te su poznate i pod nazivom bjelogorica. U dijelu sjeverne hemisfere, četinjače su obično zimzelene poput bora (*Pinus*), smreke (*Picea*) i jele (*Abies*), a listače su obično listopadna stabla sa širokim lišćem poput javora (*Acer*), breze (*Betula*), jasena (*Fraxinus*), hrasta (*Quercus*) i dr. Osim što četinjače i listače pripadaju različitim skupinama, također se razlikuju i po osnovnim gradivnim stanicama. Najvažnija razlika između ova dva opća tipa drva je što listače sadrže pore, dok četinjače to nemaju, što je vidljivo na slici 1. [4,5].

Stablo se sastoji od tri osnovna dijela, a to su korijenje, deblo i krošnja. Svaki od ta tri osnovna dijela obavlja vrlo važnu ulogu u životu stabla. Korijenje pruža stabilnost stablu te mu omogućuje upijanje vode i mineralnih tvari iz tla. Deblo podržava krošnju i služi kao put za prijenos vode i minerala iz korijena prema krošnji, dok se u dubljim slojevima pohranjuju rezervne tvari i šećeri. Krošnja se sastoji od grana različitih debljina, lišća i izboja. Listovi apsorbiraju ugljični dioksid iz zraka i sunčevu energiju te ih koriste za proizvodnju ugljikohidrata i kisika putem procesa fotosinteze [4].

2.2. Poprečni presjek kroz deblo

Ako se promatra poprečni presjek debla, gledajući iz van prema unutra, drvo se sastoji od sljedećih slojeva: vanjske kore, unutarnje kore, kambija, bjeljike, srževine i srži. Na slici 2. prikazan je poprečni presjek debla [4].



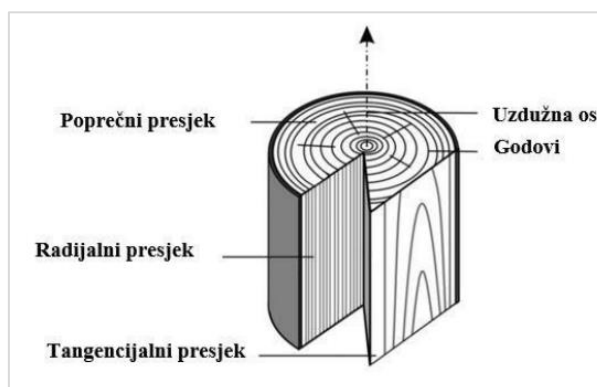
Slika 2. Poprečni presjek kroz deblo [6]

Vanjska kora djeluje kao zaštita za unutarnju koru te štiti cijelo deblo od isušivanja. Unutarnja kora, poznata i kao floem, nalazi se ispod vanjske i služi za transport produkata fotosinteze s listova prema korijenu ili rastućim dijelovima biljke. Tanki sloj kambija nalazi se između kore i drvnog tkiva. Svake godine, obično u proljeće, kambij počinje rasti prema unutra, stvarajući time novi sloj drva (sekundarni ksilem), i prema van, stvarajući novi sloj unutarnje kore (sekundarni floem). Odnos između ta dva sloja (sekundarnog ksilema i floema) tijekom jedne vegetacijske sezone iznosi otprilike 1:10. Bjeljika predstavlja živi sloj drva s metaboličkom aktivnošću, kroz koji se voda i mineralne tvari prenose od korijena prema lišću. Ovdje se također sintetiziraju i pohranjuju škrob i lipidi, što može utjecati na trajnost i obradivost drva. Srževina se nalazi ispod bjeljike te je tamnija od nje. U srževini se nalaze različite biokemijske tvari, nazvane ekstraktivi, koji uzrokuju tamniju boju srževine i sprječavaju kondukciju mineralnih tvari i vode. Mehanička i tehnološka svojstva ovise o vrsti i količini ekstrahiranih tvari. U središtu drvnog valjka nalazi se srčika, ostatak tkiva iz rane faze rasta stabla prije formiranja debla [4].

2.3. Karakteristični presjeci u drvu

Radi usmjerene građe drva i orijentacije u aksijalnom i radijalnom smjeru, drvo je potrebno promatrati u tri različita presjeka kako bismo dobili cjelovitu predodžbu o mikrostrukturi i njegovim svojstvima[4]. Poprečni presjek okomit je na uzdužnu os debla kao i na drvena vlakanca. U ravnini koju određuju radijus i uzdužna os debla nalazi se radijalni presjek koji nastaje kada se deblo rascijepi preko srčike. Tangencijalni presjek okomit je na radijalni presjek, paralelan s uzdužnom osi debla te okomit na radijus valjka debla[4].

Za pravu i potpunu sliku o mikrostrukturi i svojstvima drva, potrebna je analiza u sva tri presjeka. Na slici 3. prikazana su tri karakteristična presjeka u drvu.



Slika 3. Tri karakteristična presjeka u drvu [7]

2.4. Godovi

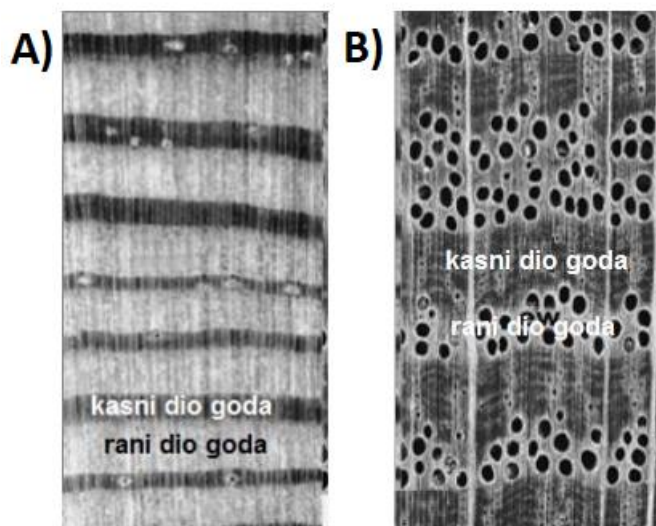
Tijekom svog života, stablo raste u dva smjera, a to su visina i debljina. Rast u visinu nazvan je primarnim rastom te je ograničen na vegetativne vrhove stabla, dok se rast u debljinu, poznat i kao sekundarni rast, odvija zahvaljujući tankom sloju kambija koji se, kao što je već navedeno ranije, nalazi između unutarnje kore i bjeljike. Djelovanje kambija može biti diskontinuirano i kontinuirano [4,8].

Diskontinuirano, ili sezonsko, djelovanje kambija tipično je za umjereni geografski pojas s jasnom promjenom godišnjih doba. Kambij je područje stabla gdje se odvija dioba stanica koja dodaje novo drvo i povećava promjer stabla. On počinje djelovati i postaje najaktivniji u proljeće, a zatim se njegova aktivnost smanjuje i u potpunosti prestaje tijekom ljeta, najkasnije u jesen. Točan mehanizam koji zaustavlja aktivnost kambija u jesen još nije u potpunosti poznat. Smanjenje duljine dana pokazalo se kao čimbenik, kao i niske temperature. Međutim, neka će stabla zaustaviti rast prije nego što temperature padnu blizu nule i prije nego što dani postanu dovoljno kratki za poticanje mirovanja. Prirast sekundarnog ksilema koji se događa tijekom ovog razdoblja naziva se god [4,8].

Djelovanje kambija je kontinuirano kod vrsta koje rastu u vlažnoj tropskoj klimi. Takve vrste ili nemaju godove ili ih mogu imati, ali se oni ne mogu uspoređivati s godovima vrsta koje rastu u kontinentalnoj klimi [4].

Kada se dioba stanica pokrene u proljeće, ona brzo napreduje, a zatim počinje usporavati krajem ljeta i potpuno se zaustavlja u jesen. Taj rast oblikuje jedan god godišnje. Stanice koje tvore rani dio goda razlikuju se od stanica u kasnom dijelu goda [8]. Godovi na poprečnom presjeku četinjača i listača prikazani su na slici 4.

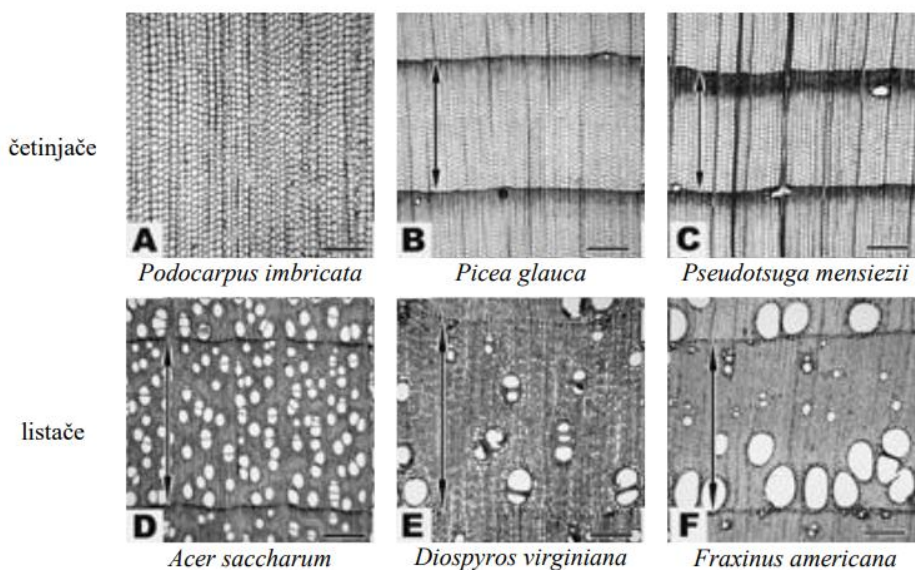
Rani dio goda obično je svjetliji od kasnog goda. Razlika u boji može se vidjeti na makroskopskoj razini. Ako se godovi promatraju pod mikroskopom, vidjet će se da stanice u ranom dijelu goda imaju tanke stanične stijenke. U ovom dijelu vegetacijske sezone, većina šećera koji se koriste za rast dolaze iz pohranjenih rezervi u stablu, poput korijena. Kada se listovi potpuno formiraju, a fotosinteza je u punom jeku i stvara puno šećera, stanične stijenke počinju postajati deblje zbog obilja dostupnih šećera. To stvara tamniju boju koja se nalazi u kasnom godu [8].



Slika 4. A) Poprečni presjek četinjače (bor (*Pinus resinosa*)), B) Poprečni presjek listače (hrast (*Quercus rubra*)) [4]

Prema izgledu stanica ranog i kasnog dijela goda, sve vrste drva mogu se podijeliti u tri različite skupine koje su prikazane na slici 5. [4]:

- vrste kod kojih nema razlike između stanica ranog i kasnog goda
- vrste kod kojih se unutarnji promjer stanica postepeno smanjuje od ranog prema kasnom dijelu goda
- vrste kod kojih se unutarnji promjer naglo smanjuje prelaskom iz ranog u kasni dio goda.



Slika 5. Tri karakteristične vrste godova kod četinjača i listača, A i D – nema prijelaza iz ranog u kasni dio goda,

B i E – postupan je prijelaz iz ranog u kasni dio goda,

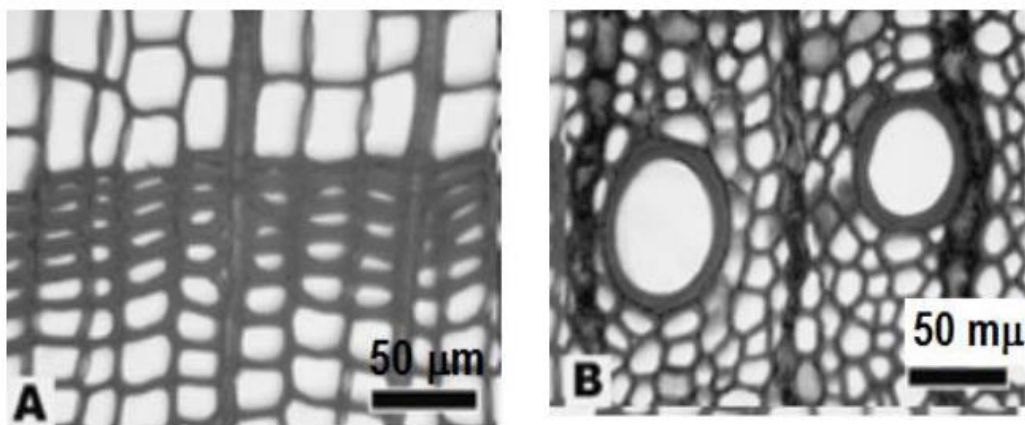
C i F – nagli prijelaz iz ranog u kasni dio goda [4]

2.5. Drvna stanica

Za razumijevanje godova u drvu, bitno je razumijevanje strukture, funkcije i varijabilnosti stanica. Biljna stanica sastoji se od protoplasta i stanične stijenke. Protoplast je živi sadržaj koji je omeđen staničnom membranom. Stanična stijenka je neživa tvar uglavnom izgrađena od ugljikohidrata koji izlučuju protoplast prema vanjskoj strani stanične membrane. Stanična stijenka biljnoj stanici pruža zaštitu od previsokog osmotskog tlaka, daje joj stalan oblik te osigurava značajnu mehaničku potporu biljci u cjelini [9].

Za drvne stanice situacija je nešto složenija od gore navedene biljne stanice. U mnogim slučajevima u drvu, konačna funkcija stanice u potpunosti se ostvaruje samo putem stanične stijenke. To znači da mnoge zrele stanice u drvu ne zahtijevaju protoplaste, već ih zapravo moraju u potpunosti ukloniti prije postizanja funkcionalne zrelosti. Drugim riječima, drvna stanica je mrtva biljna stanica bez plazmatskog sadržaja. U slučaju zrele drvne stanice bez protoplasta, taj otvoreni dio stanice gdje bi bio protoplast naziva se lumenski prostor, odnosno lumen. Lumen sam po sebi nema strukturu budući da je to zapravo prazan prostor u unutrašnjosti stanice, ali je izrazito važan dio drvne stanice pogotovo sa stajališta upijanja vlage i formiranja drvnih kompozita [9].

Na slici 6. prikazani su poprečni presjeci stanične stijenke i lumena za četinjače i listače. Kod četinjača, sve pravokutne stanice istog su tipa i zovu se traheide. U kasnom dijelu goda traheide imaju deblju staničnu stijenku i užu lumenski prostor, dok u ranom dijelu goda imaju tanju stijenku i širi lumenski prostor. S druge strane, listače se razlikuju po velikim okruglim stanicama koje imaju debelu staničnu stijenku i vrlo velike lumenske prostore. Ostale stanice imaju tanje stijenke i uže lumenske prostore [9].



Slika 6. Poprečni presjeci kroz drvo četinjače (A) i listače (B) [9]

2.6. Stanična stijenka

Stanična stijenka sastavljena je od tri glavna dijela, a to su središnja lamela, primarna stanična stijenka te sekundarna stanična stijenka. Sva tri dijela stanične stijenke izgrađena su od celuloze, hemiceluloze te pektina i lignina. Makromolekule celuloze složene su kristalnom pravilnošću u micela, a otprilike dvadesetak micela zajedno formiraju celulozna mikrovlakna. Hemiceluloza i celulozna mikrovlakna okružena su matricom koja je uglavnom sastavljena od pektina (u primarnom dijelu stijenke) i lignina (u sekundarnom dijelu stijenke). Središnja lamela bogata je ligninom te se nalazi između primarnih stijenki susjednih stanica. Susjedne stanice su preko središnje lamele povezane u cjeline što im omogućava provođenje vode i biokemijskih tvari [4].

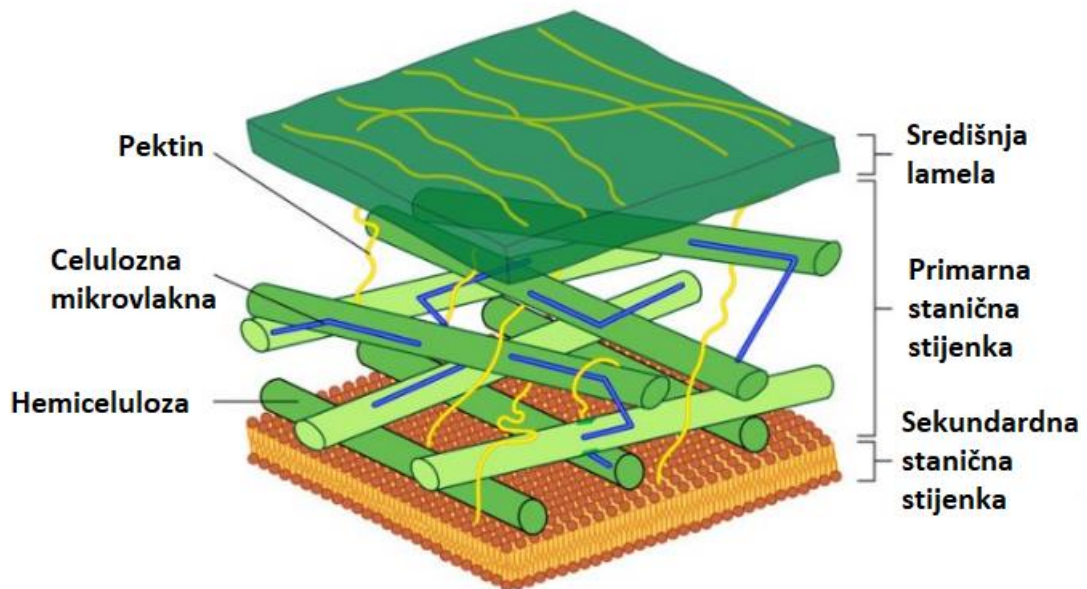
Na središnju lamelu nastavlja se primarna stanična stijenka, koja je sastavljena od dugih mikrovlakana celuloze. Stijenka obavija stanicu pod različitim kutovima u rasponu od 0° do 90° u odnosu na uzdužnu os stanice. S obzirom na to da je primarna stijenka vrlo tanka, teško ju je razlikovati od središnje lamele. Nakon primarne stijenke dolazi sekundarna stijenka, koja se sastoji od tri sloja različite debljine [4].

Kod prvog sloja sekundarne stijenke, mikrovlakna položena su pod kutom od 50° do 70° u odnosu na središnju os stanice. Također, prvi sloj je relativno tanak. Drugi sloj je najdeblji sloj sekundarne stijenke te značajno utječe na svojstva same stanične stijenke, kao i na svojstva drva na makroskopskoj razini. Kut mikrovlakana celuloze i središnje osi kreće se između 5° i 30° , a udio lignina u ovom sloju manji je nego u središnjoj lameli i primarnoj staničnoj stijenci.

Nakon drugog sloja nalazi se i treći sloj sekundarne stanične stijenke koji sadrži još manje lignina nego drugi sloj. Kao i prvi sloj, ovaj sloj je relativno tanak, a mikrovlakna su omotana

pod kutom većim od 70° . Lignin je građen od hidrofobnih makromolekula, a njegov udio postupno opada od središnje lamele prema lumenu kako bi se olakšao protok vode i transpiracija u živom drvu [4].

Na slici 7. prikazana je građa stanične stijenke.

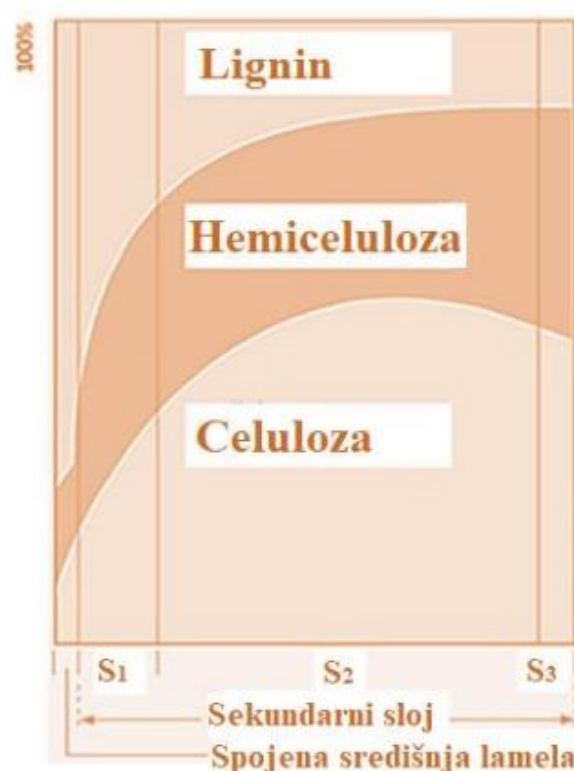


Slika 7. Građa stanične stijenke [10]

3. STRUKTURA DRVA NA MOLEKULARNOJ RAZINI

Na molekularnoj razini mogu se proučavati polimeri stanične stijenke (celuloza, lignin i hemiceluloza) i njihovi gradivni blokovi jednostavnih šećera, fenolnih jedinica, kao i struktura ekstraktivnih tvari i anorganskih spojeva [3].

Na slici 8. prikazan je raspored biopolimera stanične stijenke drva.



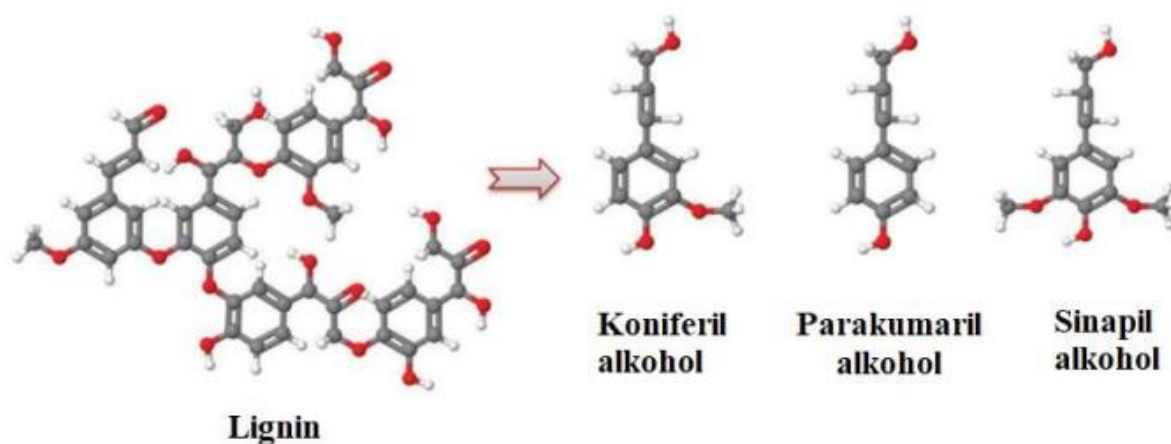
Slika 8. Raspored biopolimera stanične stijenke drva [11]

3.1. Lignin

Lignin (lat. *lignum* – drvo) je fenilpropanski polimer prisutan u staničnoj stijenci drva. Ključna je strukturna komponenta primarne i sekundarne stanične stijenke radi održavanja strukturne cjelovitosti, pružajući time krutost i čvrstoću drvu. Uglavnom se dobiva iz tri cimetil alkohola: koniferilnog, parakumarilnog i sinapilnog [11].

Lignin se može razlikovati od vrste do vrste drva, isto kao i njegov udio u suhoj drvnoj tvari. Kod četinjača udio lignina kreće se između 25 i 35 %, dok se kod listača taj udio kreće između 18 i 25 % [4].

Na slici 9. prikazana je molekularna struktura lignina.

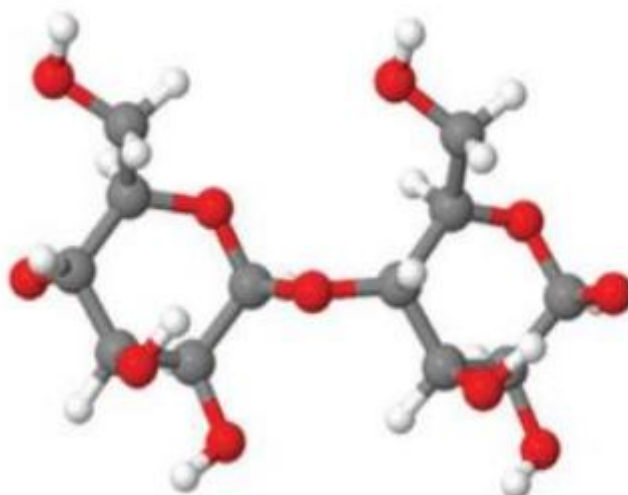


Slika 9. Molekularna struktura lignina [11]

3.2. Celuloza

Celuloza formira strukturno snažan okvir stanične stijenke. Taj okvir ugrađen je u matricu polimera (hemiceluloze i pektina) i pokriven ligninom. Pektin se nalazi samo u središnjoj lameli i u primarnoj stijenci. Celuloza je linearni polimerni lanac povezan β -1,4 glikozidnim vezama koja staničnoj stijenci pruža visoku vlačnu čvrstoću. Dvije povezane glukozne molekule čine anhidroglikoznu jedinicu, kao što je prikazano na slici 10. Par jedinica naziva se celobiozom, koja se ponavlja u celuloznom polimeru. Nekoliko lanaca celuloze povezano je vodikovim vezama i van der Waalsovima silama kako bi formirali mikrovlakna, koja uključuju i kristalnu i amorfnu celulozu [11].

Orijentacija celuloznih molekula je nasumična, a povećanjem gustoće formiraju se uređenija područja odnosno stupanj kristaliničnosti postaje veći. Omjer kristalne i amorfne celuloze je otprilike 65:35 u korist kristalne, čime je celuloza u drvu uglavnom visokokristalinična. Također, celuloza se teško izolira iz drvene tvari iz razloga što je vrlo tijesno povezana s hemicelulozom i ligninom. Udio celuloze u četinjačama je između 40 i 45 %, a kod listača između 38 i 49 % [4].



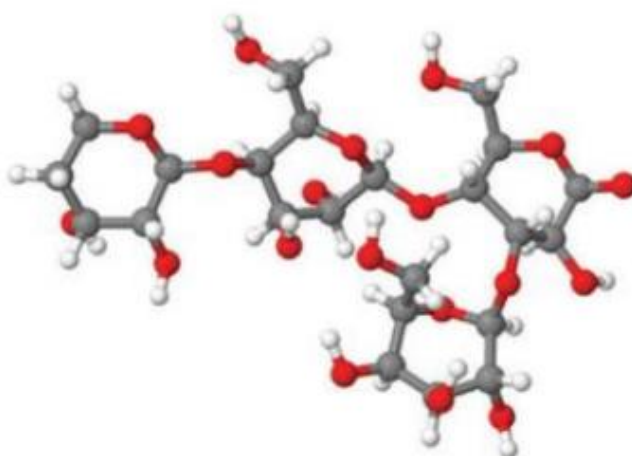
Slika 10. Molekularna struktura celuloze [11]

3.3. Hemiceluloza

Hemiceluloza je heteropolisaharid koji se sastoji od različitih vrsta šećernih jedinica. Uglavnom je amorfna te povezuje celulozu i lignin. Svojim propuštanjem vode hemiceluloza pruža fleksibilnost i potporu staničnoj stijenci [11].

Najveći udio hemiceluloze može se pronaći u jače napregnutim dijelovima drva, kao što je na primjer u kompresijskom drvu. Sadržaj hemiceluloze nešto je manji kod četinjača (7 do 14 %) nego kod listača (19 do 26 %) [4].

Na slici 11. prikazana je molekularna struktura hemiceluloze.



Slika 11. Molekularna struktura hemiceluloze [11]

3.4. Ekstrahirane tvari

Kao što i samo ime sugerira, ekstrahirane tvari u drvu su prirodni spojevi koji se dobivaju ekstrakcijom iz biljnih sokova. Postoje stotine različitih ekstrakтива, pri čemu je uloga nekih poznata, dok za neke još uvijek nije jasno čemu služe. Neki od ovih spojeva nastaju kao odgovor drva na različita mehanička ili druga oštećenja, dok su drugi prekursori za stvaranje drugih kemijskih spojeva. Ekstraktivi iz drva nalaze svoju primjenu u mnogim područjima, neka od njih su medicina i farmacija. Na primjer, smola nekih četinjača se kroz povijest koristila za impregnaciju plovila [4].

Ekstrahirane tvari su obično koncentrirane u srževini drva, pri čemu ih je kod listača puno manje nego kod četinjača. Mogu se također naći i u kori drva. Ekstrahirane tvari sastoje se od masti, masnih kiselina, fenola, terpentina, smola, smolnih kiselina, voska i ostalih organskih tvari. Boja, miris i trajnost drva ovise o vrsti i količini ekstrahiranih tvari [4].

3.5. Anorganske tvari

Određivanje udjela anorganskih tvari u drvu odvija se mjerenjem mase preostalog pepela nakon izgaranja drva na temperaturi od 575 ± 25 °C. Pepeo se sastoji od mineralnih soli i drugih anorganskih tvari, a kod većine vrsta taj udio iznosi manje od 0,5 %. Većinu udjela pepela (oko 80 %) čine magnezij, kalcij i kalij, a osim njih prisutni su i mnogi drugi elementi kao na primjer Na, Fe, Cu, Zn, Al, Ag. Elementi su apsorbirani u obliku iona iz tla te u sve dijelove biljke dolaze preko korijena, debla i grana [4].

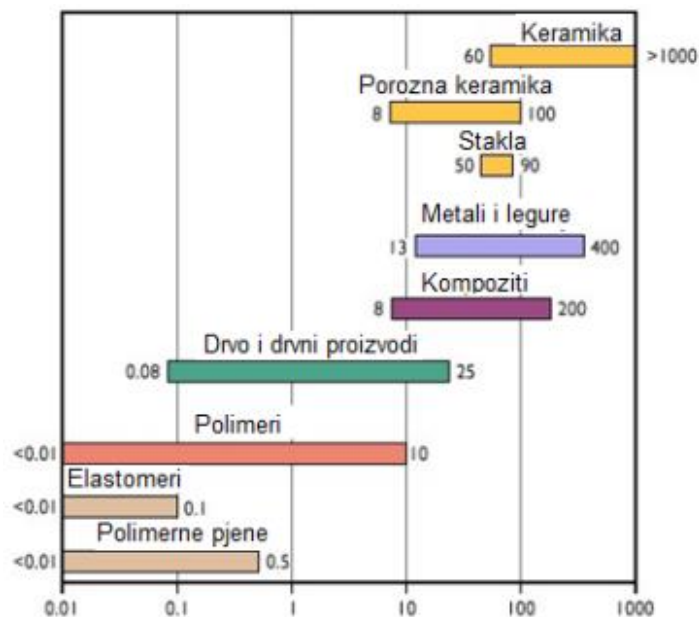
4. MEHANIČKA SVOJSTVA DRVA

Drvo je anizotropan prirodni kompozit koji sadrži celulozna vlakna koja imaju visoku vlačnu čvrstoću. Celulozna vlakna ugrađena su u matricu lignina koja pruža i dobru otpornost na kompresiju [12]. S obzirom na to da je drvo prirodan materijal, karakteristična je i varijabilnost njegovih svojstava. Tako se među različitim vrstama drva mehanička svojstva mogu izrazito razlikovati, a ta varijabilnost postoji čak i unutar iste vrste. Također, zbog svoje anizotropnosti svojstva drva ovise i o smjeru međusobno okomitih osi, a to su longitudinalna (L), radijalna (R) i tangencijalna (T) [4].

4.1. Modul elastičnosti

Modul elastičnosti vrlo je važno mehaničko svojstvo materijala koje predstavlja otpornost materijala na elastičnu deformaciju. On ovisi o jakosti atomskih veza, odnosno o atomskoj strukturi materijala. Za svaku vrstu drva vrijednosti modula elastičnosti znatno se razlikuju, a i variraju unutar iste vrste drva. Također, vrijednosti modula elastičnosti ovise o orijentaciji mikrostrukture drva, odnosno o položaju testiranog uzorka u odnosu na tri glavne osi: L, R i T. Prema nekim izvorima vrijednosti modula elastičnosti u longitudinalnom smjeru su 42 do 122 puta veće od onih u radijalnom i tangencijalnom smjeru za četinjače i 12 do 62 puta veće za listače. Odnos između radijalnog i tangencijalnog modula elastičnosti je 1,5 do 6 puta veći u korist radijalne osi [13].

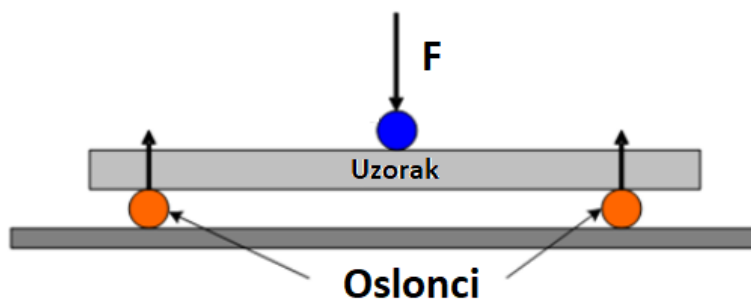
Modul elastičnosti u longitudinalnom smjeru ovisi o kutu između smjera opterećenja i godova. U longitudinalnom smjeru, prilikom određivanja modula elastičnosti opterećenje djeluje okomito na vlakanca, a kutovi između smjera opterećenja i godova mogu biti od 0 do 90 stupnjeva. Za neke vrste drva promjena kuta između smjera opterećenja i godova ne utječe na modul elastičnosti, dok neke vrste imaju maksimalni modul elastičnosti pod određenim kutom. Na slici 12. prikazane su vrijednosti modula elastičnosti za drvo u odnosu na druge tehničke materijale [13].



Slika 12. Moduli elastičnosti za drva i ostale tehničke materijale u GPa [4]

Normama je propisano sve vezano uz ispitivanje savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti. Određivanje savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti, najčešće se provodi standardnom metodom u tri točke prema normi ISO 130161.

Shematski prikaz standardnog ispitivanja savojne čvrstoće i modula elastičnosti prikazan je na slici 13.



Slika 13. Shematski prikaz ispitivanja savojne čvrstoće i modula elastičnosti standardnom metodom u tri točke [14]

Vrijednost savojnog modula elastičnosti izračunava se prema [4]:

$$E_f = \frac{L^3 * (F_2 - F_1)}{4 * b * h^3 * (a_2 - a_1)} \quad (1)$$

gdje je:

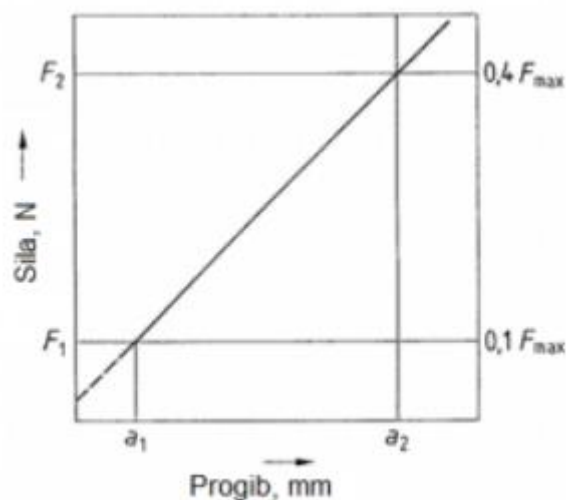
L – razmak između oslonaca, mm

b – širina uzorka, mm

h – visina uzorka, mm

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

$(a_2 - a_1)$ – prirast progiba (odgovara razlici $(F_2 - F_1)$), koji je prikazan na slici 14.



Slika 14. Elastično područje krivulje sila-progib [4]

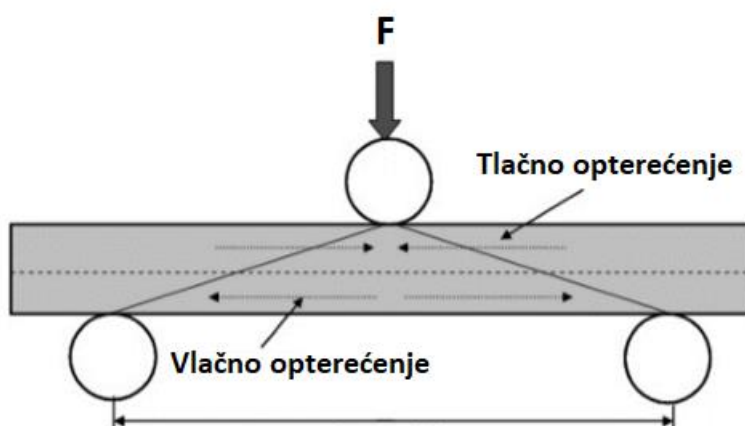
Vrijednosti savojnog modula elastičnosti razlikuju se za tri karakteristična presjeka drva. Također, vrijednost savojnog modula elastičnosti kod nekih vrsta drva ovisi i o kutu koji zatvaraju savojna sila i linije goda. Koliko se te vrijednosti mogu razlikovati prikazano je u tablici 1. na primjeru američke duglazije [15].

Tablica 1. Moduli elastičnosti u tri karakteristična smjera za američku duglaziju [15]

Modul elastičnosti	Puno drvo	Rani dio goda	Kasni dio goda
E_T , MPa	620	152	1215
E_R , MPa	960	566	1752
E_L , MPa	14500	10400	20700

4.2. Savojna čvrstoća

Savojna čvrstoća jedno je od najvažnijih i najispitivanijih svojstava drva. Jedna od češćih standardnih metoda za ispitivanje savojne čvrstoće je metoda ispitivanja u tri točke, ali postoje i druge standardne metoda kao što je na primjer metodom savijanja u četiri točke. Kao što je prikazano na slici 13., savojna sila djeluje na sredini između oslonaca, prilikom čega je gornja polovica uzorka opterećena tlačno, donja polovica vlačno, dok je sredina neutralna, što je prikazano na slici 15. Ispitivanje se provodi do loma uzorka [4].



Slika 15. Djelovanje opterećenja na uzorak [16]

Vrijednost savojne čvrstoće računa se prema izrazu:

$$\sigma_f = \frac{3 * F_{max} * L}{2 * b * h^2} \quad (2)$$

gdje je:

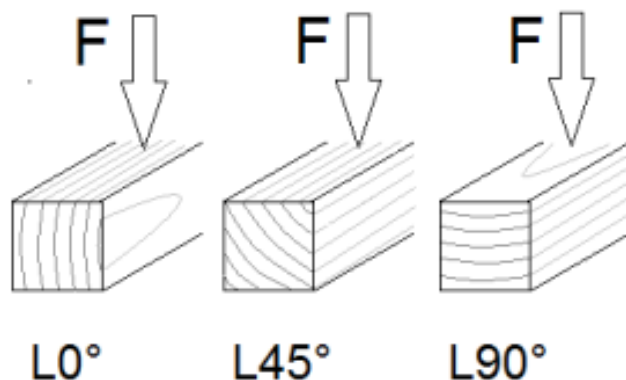
F_{max} – maksimalna sila, N

L – razmak između oslonaca, mm

b – širina uzorka, mm

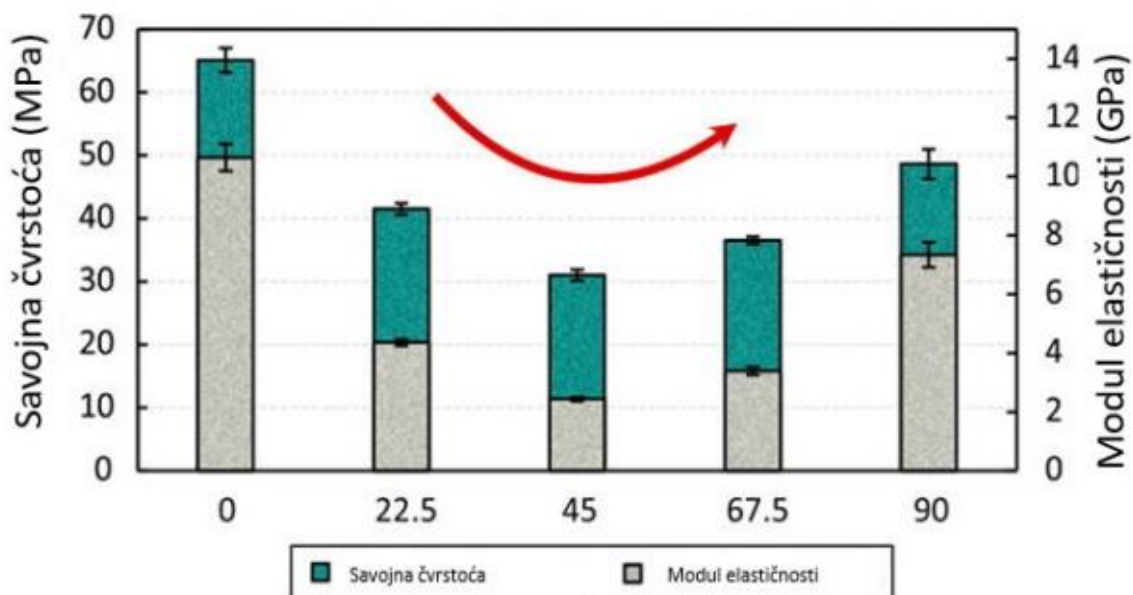
h – visina uzorka, mm

Kao i kod savojnog modula elastičnosti, vrijednost savojne čvrstoće ovisi o usmjerenosti strukture koja je najviša u longitudinalnom smjeru. Isto tako, kao i kod modula elastičnosti, kod nekih vrsta drva vrijednost savojne čvrstoće ovisi i o kutu između savojne sile i linije goda, slika 16. [4].



Slika 16. Kut između linije godova i smjera savojne sile [4]

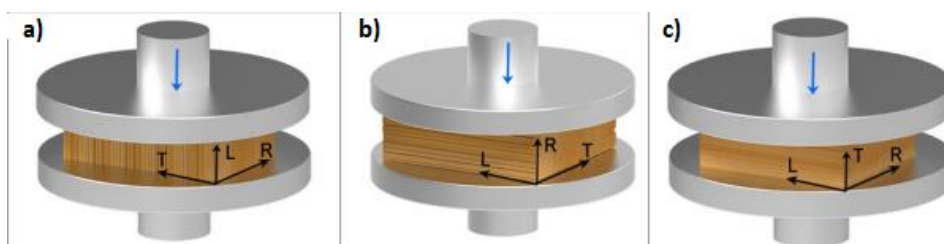
Wang i suradnici u svojem su radu istraživali sličan utjecaj kuta na šperploči napravljenoj od brezovih furnira. Ispitivanja su provedena za kut od 0° , $22,5^\circ$, 45° , $67,5^\circ$ i 90° . Rezultati njihovog ispitivanja prikazani su na slici 17. Maksimalne vrijednosti savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti dobivene su pri kutu od 0° , malo niže vrijednosti su pri kutu od 90° , dok je ispitivanje za kut od 45° prikazalo najniže vrijednosti [17].



Slika 17. Utjecaj promjene kuta na vrijednosti modula elastičnosti i čvrstoće pri savijanju uzoraka drvnog kompozita [17]

4.3. Tlačna čvrstoća

Tlačna čvrstoća predstavlja najveće naprezanja koje se pojavljuje na ispitnom uzorku smještenom na horizontalnoj podlozi kada na njega djeluje okomita sila i nastoji ga stlačiti. Kao i kod savojne čvrstoće, tlačna čvrstoća ovisi o tome na koji od tri karakteristična presjeka sila djeluje. Ako tlačna sila djeluje okomito na smjer vlaknaca čvrstoća je 3 do 10 puta manja od čvrstoće kad tlačna sila djeluje u smjeru vlaknaca. Na slici 18. nalazi se shematski prikaz ispitivanja tlačne čvrstoće za različito djelovanje sile u odnosu na smjer vlaknaca.



Slika 18. a) djelovanje tlaka okomito na longitudinalni smjer, b) djelovanje tlaka okomito na radijalni smjer, c) djelovanje tlaka okomito na tangencijalni smjer [18]

4.4. Vlačna čvrstoća

Vlačna čvrstoća definirana je kao omjer između maksimalne postignute sile pri vlačnom opterećenju i početnog presjeka uzorka [19]. Izraz za računanje vlačne čvrstoće je:

$$R_m = \frac{F_{max}}{A} \quad (3)$$

gdje je:

R_m – vlačna čvrstoća, MPa

F_{max} – maksimalna sila, N

A – dimenzije početne površine u mm².

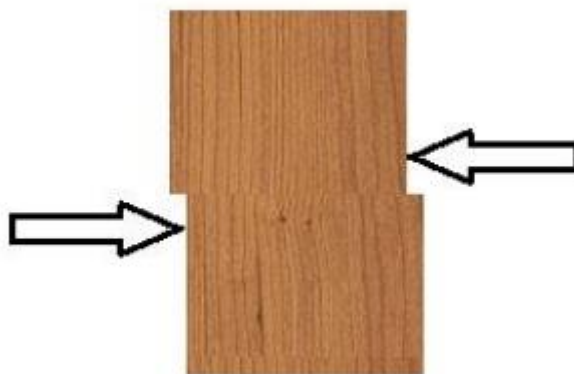
U longitudinalnom smjeru, odnosno u smjeru vlaknaca, vlačna čvrstoća je puno veća od čvrstoće okomito na vlakanca. Odnos između vlačnih čvrstoća u tangencijalnom te radijalnom smjeru i vlačne čvrstoće u longitudinalnom smjeru za četinjače i listače prikazan je u tablici 2.

Tablica 2. Odnos između vlačnih čvrstoća u tangencijalnom te radijalnom smjeru i vlačne čvrstoće u longitudinalnom smjeru za četinjače i listače

	Tangencijalni smjer	Radijalni smjer
Četinjače	0,025 – 0,030	0,040 – 0,050
Listače	0,040 – 0,065	0,070 – 0,100

4.5. Smična čvrstoća

Smično naprezanje rezultat je paralelnog djelovanja dviju suprotnih sila. Ravnina smicanja određena je s te dvije posmične sile. Površine smicanja koje se mogu pojaviti s dvije suprotne sile su: uzdužna (radijalna i tangencijalna), poprečna i dijagonalna. Smjer djelovanja posmičnih sila kod uzdužnih površina može biti u smjeru ili okomito na vlakanca, dok kod poprečne površine smicanja sile mogu biti paralelne ili okomite s godovima. Kod poprečne ravnine, smična čvrstoća u smjeru vlakancaca znatno je manja od smične čvrstoće okomito na vlakanca. Što se tiče razlike u smičnoj čvrstoći u smjeru vlakancaca između radijalne i tangencijalne ravnine, ona je za 15 do 35 % veća u tangencijalnoj ravnini [4]. Shematski prikaz smičnog naprezanja prikazan je na slici 19.



Slika 19. Shematski prikaz smičnog naprezanja [4]

Smična čvrstoća izračunava se prema formuli:

$$\tau = \frac{F_{max}}{b \times l} \quad (4)$$

gdje je:

τ – smična čvrstoća, MPa

F_{\max} – maksimalna sila, N

b, l – dimenzije smične površine u mm.

4.6. Žilavost

Žilavost ili udarni rad loma prikazuje ponašanje određenog materijala u uvjetima udarnog opterećenja, a ispituje se na Charpyjevom batu. Izračun kojim se dobiva vrijednost udarnog rada loma glasi [4]:

$$KU(KV) = G(h_1 - h_2) \quad (5)$$

gdje je:

$KU(KV)$ – udarni rad loma, J

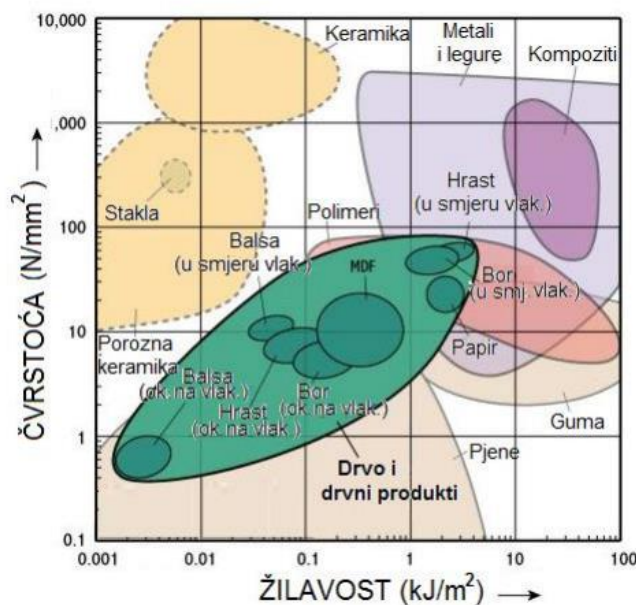
G – težina bata u N,

h_1 – početna visina bata u m,

h_2 – visina bata nakon loma epruvete u m.

Kao i većina mehaničkih svojstava drva, i žilavost je ovisna o usmjerenosti strukture te je najmanja prilikom pada udarca tangencijalno na godove, dok je najveća prilikom pada u radijalnom smjeru. Vrlo male promjene u mikrostrukтури drva uzrokuju pad žilavosti prije negoli smanjenje gustoće ili čvrstoće drva [4].

Na slici 20. prikazan je odnos čvrstoće i žilavosti za neke vrste drva i ostalih tehničkih materijala. Unutar samog drva, vidljiva je velika razlika između pojedinih vrsta, pa čak i unutar iste vrste drva za različite orijentacije s obzirom na smjer vlakanaca.



Slika 20. Odnos čvrstoće i žilavosti za različite vrste drva i ostale tehničke materijale [4]

4.7. Tvrdoća

Tvrdoća je vrlo važno svojstvo drva te predstavlja otpor kojim se drvo suprotstavlja prodiranju drugog tijela u njegov volumen. Zbog usmjerenosti strukture i ovo svojstvo se razlikuje u longitudinalnom, radijalnom i tangencijalnom presjeku [4].

Najčešća metoda koja se koristi za ispitivanje tvrdoće drva je metoda po Janki koju je osmislio austrijski znanstvenik Gabriel Janka, 1906. godine. Ova metoda standardizirana je 1927. godine američkim standardom, a trenutno važeća norma je ASTM D 1037-12[20].

Tvrdoća drva određuje se prema sili potrebnoj da se čelična kuglica promjera 11,28 mm utisne u drvo do polovice svog promjera, koji iznosi 5,64 mm. Ploština otiska na površini drva tada je točno 1 mm². Brzina kojom se utiskuje kuglica je konstantna i kreće se između 0,05 i 0,1 mm/s. Uzorci drva na kojima se vrši ispitivanje tvrdoće trebaju imati dimenzije 50 × 50 × 30 mm [20].

Tvrdoća po Janki izračunava se prema:

$$H_j = K \times F \quad (6)$$

gdje je:

H_j – tvrdoća po Janki u N,

K – koeficijent ovisan o dubini prodora kuglice

F – sila utiskivanja na propisanu dubinu u N.

Na slici 21. prikazano je ispitivanje tvrdoće drva metodom po Janki.



Slika 21. Ispitivanje tvrdoće drva metodom po Janki [21]

5. JASEN

Drvo jasena prema botaničkoj podjeli pripada skupini tvrdog drva odnosno listača. Općenito, listače pokazuju ortotropno ponašanje slično kao i četinjače. Međutim, omjeri mehaničkih parametara između tri karakteristična smjera razlikuju se i izrazito ovise o individualnoj mikrostrukturi vrste drva [22].

Jasen je široko korišteno tvrdo drvo poznato po svojoj jednoličnoj teksturi i istaknutoj žilavosti. Često se koristi u izradi glazbenih instrumenata, namještaja i arhitektonskih ukrasa zbog svoje prilagodljivosti i atraktivnog izgleda. Međutim, vlačna i tlačna čvrstoća drva jasena su niske. Također, zbog svojih fizikalnih i mehaničkih svojstava, ponekad se zahtijeva postupak omekšavanja. Omekšavanje se provodi specijalnim otapalima koje daskama drva jasena mogu poboljšati plastičnost, smanjiti tvrdoću i poboljšati obradivost. Time se proširuje opseg njihove upotrebe [23].

Na slici 22. prikazano je stablo jasena.



Slika 22. Stablo jasena

5.1. Fizikalna i mehanička svojstva običnog jasena (lat. *Fraxinus excelsior*)

Niemz i dr. u svom radu ispitivali su fizikalna i mehanička svojstva drva jasena koji potječe s područja istočne Švicarske. Prosječna gustoća uzoraka iznosila je $0,640 \text{ g/cm}^3$, pri vlažnosti od otprilike 12 %. Prilikom ispitivanja određena su sljedeća fizikalna i mehanička svojstva[22]:

Fizikalna svojstva:

- omjer diferencijalnog bubrenja

- koeficijent apsorpcije vode
- otpornost na difuziju vodene pare
- toplinska vodljivost (pri 25 °C i 65 % relativne vlažnosti).

Ispitivanje mehaničkih svojstava provedena su za tri karakteristična presjeka: radijalni (R), tangencijalni (T) i poprečni (P). Izmjerena su sljedeća mehanička svojstva:

- modul elastičnosti
- modul smičnosti
- vlačna, tlačna i savojna čvrstoća.

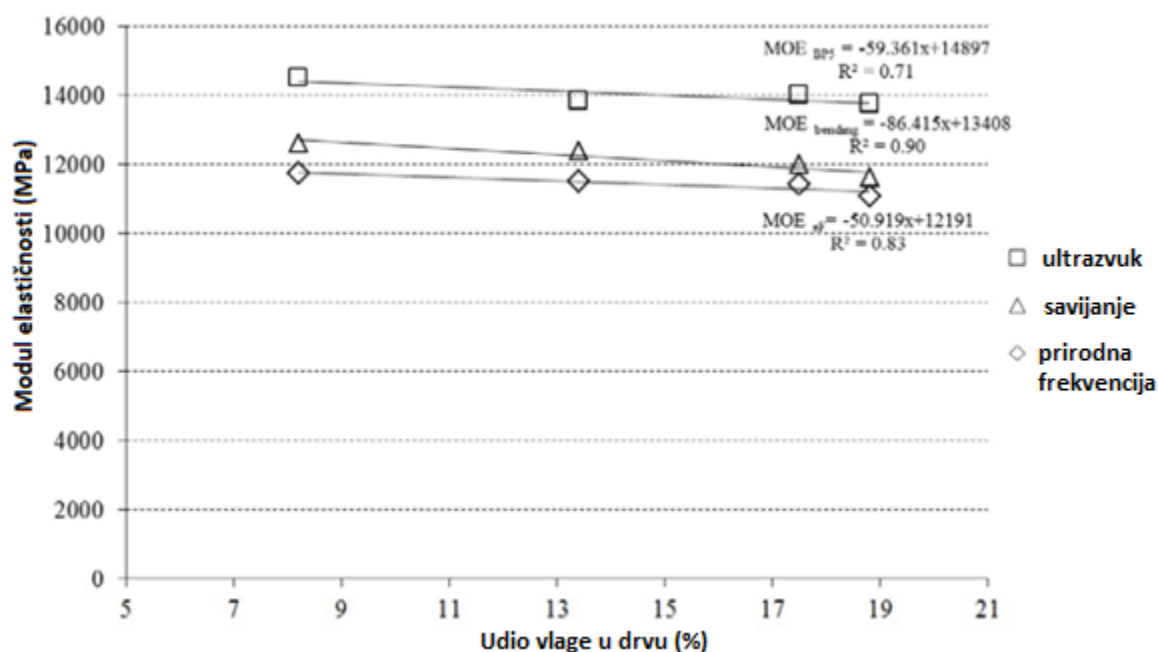
Omjer diferencijalnog bubrenja ispitanih uzoraka iznosio je 0,01 % u longitudinalnom smjeru, 0,19 % u radijalnom te 0,39 % u tangencijalnom.

Koeficijent apsorpcije vode paralelno s vlakancima osam je puta veći od koeficijenta apsorpcije vode prilikom mjerenja okomito na vlakanca. Također, kapilarna apsorpcija vode u radijalnom smjera nešto je veća nego u tangencijalnom. Izmjerene vrijednosti kapilarne apsorpcije vode drva jasena nalaze se u rasponu drugih listača, poput bukve i hrasta.

Što se tiče otpornosti na difuziju vodene paru, ona je mjerena u suhim (20 °C, 65 % vlažnosti zraka) i vlažnim uvjetima (20 °C, 100 % vlažnosti zraka). Za oba uvjeta ispitivanja vrijednosti su veće u radijalnom nego u tangencijalnom smjeru u smjeru. Ova razlika proizlazi iz radijalno orijentiranih drvnih traka.

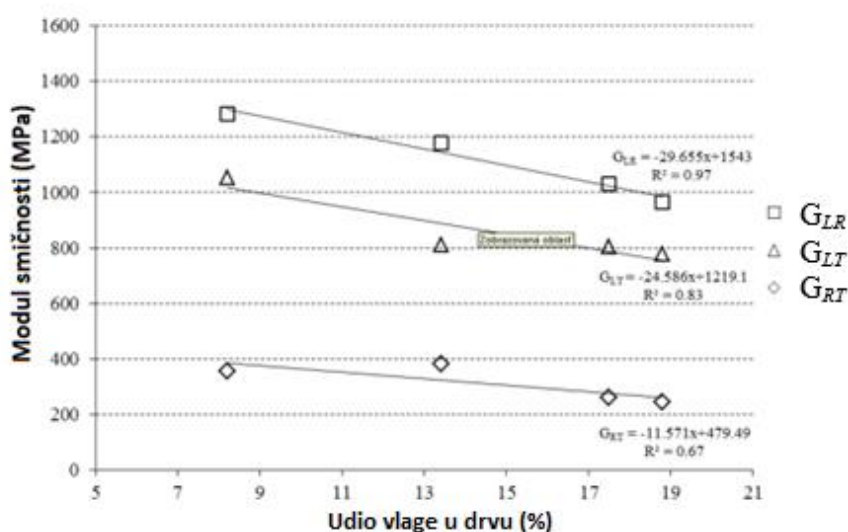
Izmjerena toplinska vodljivost iznosila je 0,14 W/mK što je unutar raspona vrijednosti za ostale listače sa sličnom gustoćom, kao što su hrast i bukva[22].

Niemz i dr. u svom su radu određivali modul elastičnosti u longitudinalnom smjeru na dva načina: statičkim savojnim ispitivanjem i dinamičkim testovima (propagacijom zvuka i prirodnom frekvencijom). Najviši modul elastičnosti dobiven je ultrazvučnim mjerenjem. Uzimajući u obzir efekte smicanja, vrijednosti modula elastičnosti ultrazvučnim mjerenjem su 15 % veće od onih dobivenih statičkim savojnim ispitivanjem. Modul elastičnosti dobiven prirodnom frekvencijom sličan je vrijednostima dobivenim statičkim savojnim ispitivanjem. Autori su uspoređivali rezultate mjerenja modula elastičnosti pri različitim udjelima vlage u drvu. Utvrdili su da povećanje udjela vlage u drvu smanjuje modul elastičnosti što je prikazano na slici 23 [22].



Slika 23. Ovisnost modula elastičnosti o udjelu vlage za drvo jasena za različite metode mjerenja [22]

Kao i modul elastičnosti, vrijednosti modula smičnosti prikazuju značajnu korelaciju s udjelom vlage. Najviša vrijednost modula smičnosti dobivena je u LR ravnini (1410 MPa), a zatim slijede LT (620 MPa) i RT (511 MPa) ravnina. Na slici 24. prikazana je ovisnost modula smičnosti o udjelu vlage za drvo jasena, za sve tri ravnine [22].



Slika 24. Ovisnost modula smičnosti o udjelu vlage za drvo jasena [22]

Udio vlage u drvu ima značajan utjecaj na vlačnu i tlačnu čvrstoću. Unutar istraženog raspona, vrijednosti čvrstoća linearno opadaju s porastom udjela vlage.

Iako je modul elastičnosti jasena sličan modulu elastičnosti četinjača (poput smreke), vlačna čvrstoća u longitudinalnom smjeru (130 MPa) značajno je veća od smreke (80 MPa) te nešto veća od javora (112 MPa) i europske bukve (97 MPa). Međutim, tlačna čvrstoća jasena (43 MPa) manja je od referentnih vrsta javora (61 MPa) i europske bukve (45 MPa). To dovodi do većeg omjera vlak-tlak za jasen (3,0) u standardnim klimatskim uvjetima u longitudinalnom smjeru u usporedbi s vrstama javora (1,8) i europskom bukvom (2,1) [22].

5.2. Utjecaj toplinske obrade na drvo jasena

Govorčin i dr. u svome su radu uspoređivali fizikalna i mehanička svojstva između toplinski modificiranog i recentnog drva jasena. Provedeno istraživanje fizikalnih i mehaničkih svojstava recentnog drva jasena (lat. *Fraxinus excelsior*) pokazalo je značajne razlike između toplinski modificiranih uzoraka na 200°C i recentnog uzorka. U radijalnom smjeru, raspored gustoće toplinski modificiranog jasena u apsolutno suhom stanju odstupa od uobičajenog rasporeda recentnog jasena. Također je kod toplinski obrađenog jasena vidljiv gubitak mase uz relativno konstantan volumen u radijalnom smjeru, posebice u dijelu srčike. Srednja vrijednost gustoće recentnog jasena u apsolutno suhom stanju veća je za 8,4 % u usporedbi s toplinski modificiranim uzorcima. Utezanje u radijalnom, tangencijalnom i longitudinalnom smjeru recentnog jasena veće je nego kod toplinskih obrađenih uzoraka: za 70 % u radijalnom smjeru, 62,2 % u tangencijalnom i 63,7 % u longitudinalnom. Sva istraživana fizikalna svojstva recentnog jasena značajno se razlikuju od fizikalnih svojstava toplinski modificiranog [24].

Što se tiče mehaničkih svojstava, ona su značajno veća od svojstava toplinski modificiranog. Tlačna čvrstoća u longitudinalnom smjeru recentnog jasena veća je za 36,8 %, savojna čvrstoća za 48 %. Nadalje, tvrdoća recentnog jasena u poprečnom presjeku veća je za 31,3 %, u radijalnom za 22,8 % te u tangencijalnom za 25,9 % u usporedbi s toplinski modificiranim uzorcima [24].

Iz dobivenih rezultata u radu Govorčina i dr. može se zaključiti kako je utjecaj toplinske modifikacije na drvo jasena vrlo značajan.

6. EKSPERIMENTALNI DIO

6.1. Cilj rada i provedena ispitivanja

Usmjerenost strukture drva ima veliki utjecaj na vrijednost mehaničkih svojstava. Svojstva drva razlikuju se u tri karakteristična presjeka – poprečnom, radijalnom i tangencijalnom. Vrijednosti savojnog modula elastičnosti i savojne čvrstoće kod svih vrsta drva najveće su kada savojna sila djeluje okomito na uzdužnu os debla, odnosno na longitudinalni smjer. Vrijednosti tih svojstava u tangencijalnom i radijalnom smjeru puno su niže i međusobno podjednake. Kod nekih vrsta drva vrijednosti savojne čvrstoće i savojne krutosti u longitudinalnom smjeru ovise o kutu između savojne sile i tangente na godove, dok kod nekih drugih vrsta to nije slučaj. Iz dostupne literature uzrok takvom ponašanju nekih vrsta drva pri savojnom opterećenju i dalje nije jasan.

Cilj ovog rada je analizirati kako promjena kuta između savojne sile i tangente na godove utječe na vrijednosti savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti kod subfossilnog drva jasena. Savojno ispitivanje provedeno je metodom u tri točke, za kutove od 0°, 45° i 90°. Osim savojnog modula elastičnosti i savojne čvrstoće, uzorcima je izmjereno i udio vlage te je određena gustoća u apsolutno suhom stanju i gustoća za 12 % vlage.

6.2. Materijal za ispitivanje

Ispitani materijal u ovome radu je subfossilno drvo jasena. Starost debla jasena iz kojega su izrezani uzorci određena je na Institutu Ruđera Boškovića u Laboratoriju za mjerenje niskih radioaktivnosti metodom radioaktivnog izotopa ugljika ^{14}C .

Određivanje starosti organskih materijala pomoću metode radioaktivnog izotopa ugljika ^{14}C , pruža efikasan način apsolutnog datiranja materijala koji potječe do otprilike 60 000 godina unatrag. Ova metoda temelji se na ravnoteži koja se uspostavlja u živim bićima između gubitka ^{14}C zbog radioaktivnog raspadanja i njegove nadoknade iz atmosfere. Kada organizam umre, prestaje razmjena tvari, što rezultira smanjenjem koncentracije ^{14}C radi radioaktivnog raspadanja. Time je omogućeno da se odredi koliko je vremena prošlo od smrti organizma [25].

Glavna ideja određivanja starosti metodom radioaktivnog izotopa ugljika ^{14}C je da sav organski materijal u biosferi sadrži tragove radioaktivnog izotopa ^{14}C . Osim toga, koncentracija ^{14}C u živom organizmu je stalna jer je stalnom izmjenom tvari uspostavljena ravnoteža između gubitka uslijed radioaktivnog raspada i unosa novih ^{14}C atoma [25].

Koncentracija aktivnosti ^{14}C u trenutku mjerenja računa se prema izrazu:

$$A_t = A_{t=0}e^{-\lambda t} \quad (7)$$

gdje je:

$A_{t=0}$ – koncentracija aktivnosti ^{14}C u organizmu u trenutku smrti,

A_t – koncentracija aktivnosti ^{14}C u trenutku mjerenja, odnosno nakon mjerenja t koje je proteklo od trenutka kada je uzorak bio odstranjen iz dinamičkog rezervoara ugljika

λ – konstanta radioaktivnog raspada za ^{14}C .

Konstanta radioaktivnog raspada računa se prema izrazu:

$$\lambda = \ln 2 / T_{1/2} \quad (8)$$

gdje je:

$T_{1/2}$ – vrijeme poluraspada ^{14}C .

Nakon smrti organizma, kada prestaje izmjena tvari, prestaje i nadoknada novih atoma ^{14}C , što dovodi do postupnog smanjenja ^{14}C aktivnosti prema zakonu radioaktivnog raspada. Mjerenjem preostale aktivnosti ^{14}C u organskom materijalu možemo procijeniti koliko je vremena prošlo od trenutka smrti, odnosno kada je prestala izmjena tvari. Kako bismo dobili stvarnu starost, potrebno je znati i brzinu stvaranja ^{14}C u atmosferi, kao i njene promjene unazad 60 000 godina te raspodjelu ugljikovih izotopa u biosferi [25].

U tablici 3. prikazani su rezultati mjerenja starosti subfosilnog drva jasena.

Tablica 3. Rezultati ispitivanja starosti subfosilnog drva jasena [25]

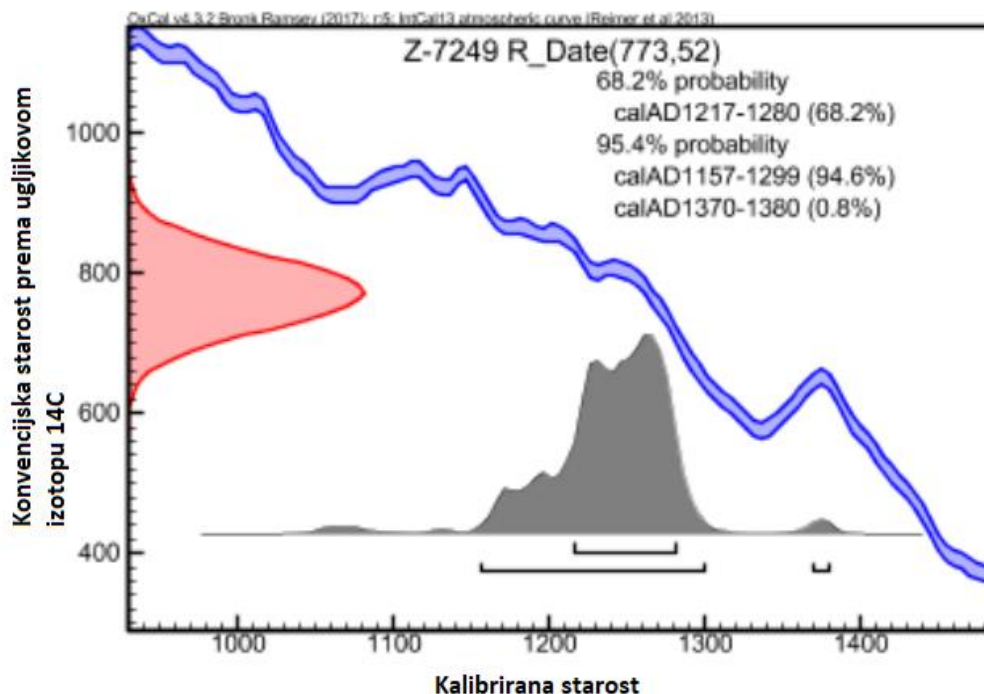
Oznaka	Vrsta predmeta ispitivanja	$\delta^{14}\text{C}$ (pMC)	^{14}C starost (BP)	Kalibrirani period (cal BC, cal AD)
Z-7249 B1696	Abonos iz Save, Grebnica, BiH	$90,8 \pm 0,6$	775 ± 50	Cal AD 1217 – 1280 68,2 %

gdje su:

Relativna specifična aktivnost ^{14}C ($a^{14}\text{C}$): izmjerena aktivnost ^{14}C u uzorku izražena kao udio modernog ugljika u % (pMC) [25].

Konvencijska starost (^{14}C starost): apsolutna starost izražena u godinama „prije sadašnjosti“ (*BP – before present*), gdje se kao početna godina uzima 1950 g. uz primijenjenu normalizaciju na vrijednost $\delta^{13}\text{C}$ od -25 ‰ i konvencijski usvojeno vrijeme poluraspada izotopa ^{14}C od 5570 godina (tzv. Libbyjevo vrijeme poluraspada). Rezultat je dan s mjernom nesigurnošću koja odgovara sastavljenoj standardnoj mjernoj nesigurnosti uz faktor pokrivanja $k = 1$, koji za normalnu raspodjelu odgovara vjerojatnosti pokrivanja od približno 68 %. Zaokruživanje znamenki u skladu je s preporukama časopisa „Radiocarbon“ [25].

Kalibrirani period: raspon povijesnih godina, izražen u kalibriranim godinama (cal BC, cal AD), određen na osnovi dendrokronološke kalibracijske krivulje IntCal13 programom OxCal najnovije verzije. Rezultat je dan uz faktor pokrivanja $k = 1$, koji za normalnu raspodjelu odgovara vjerojatnosti pokrivanja od približno 68 %. Na grafičkom prikazu (slika 25.) kalibracijske krivulje prikazuju se kalibrirani periodi za faktore pokrivanja $k = 1$ i $k = 2$ što odgovara vjerojatnostima pokrivanja od približno 68 % i 95 % za normalnu raspodjelu [25].



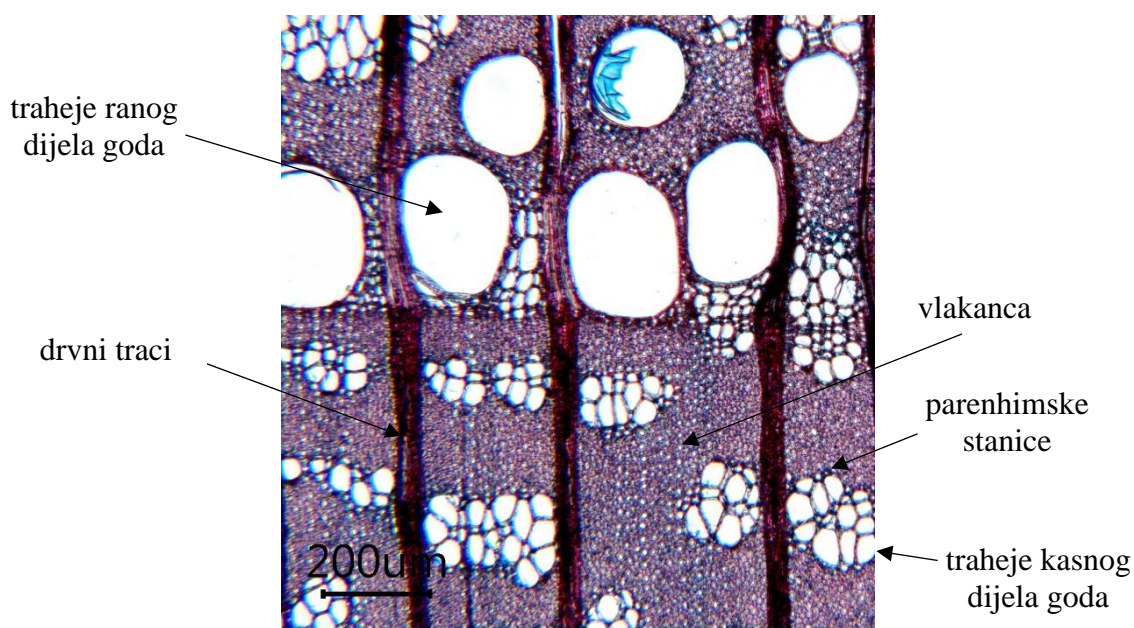
Slika 25. Grafički prikaz starosti subfosilnog drva jasena [25]

Na slici 25. dan je grafički prikaz analiza starosti subfosilnog drva jasena na kojem je vidljivo da je s intervalom vjerojatnosti 68,2 % određeno starosno razdoblje od 1217 do 1280 AD, dok je s intervalom vjerojatnosti od 95,4 % određeno starosno razdoblje od od 1157 do 1299 AD (94,6 %) ili od 1370 do 1380 AD (0,8 %).

6.3. Analiza mikrostrukture

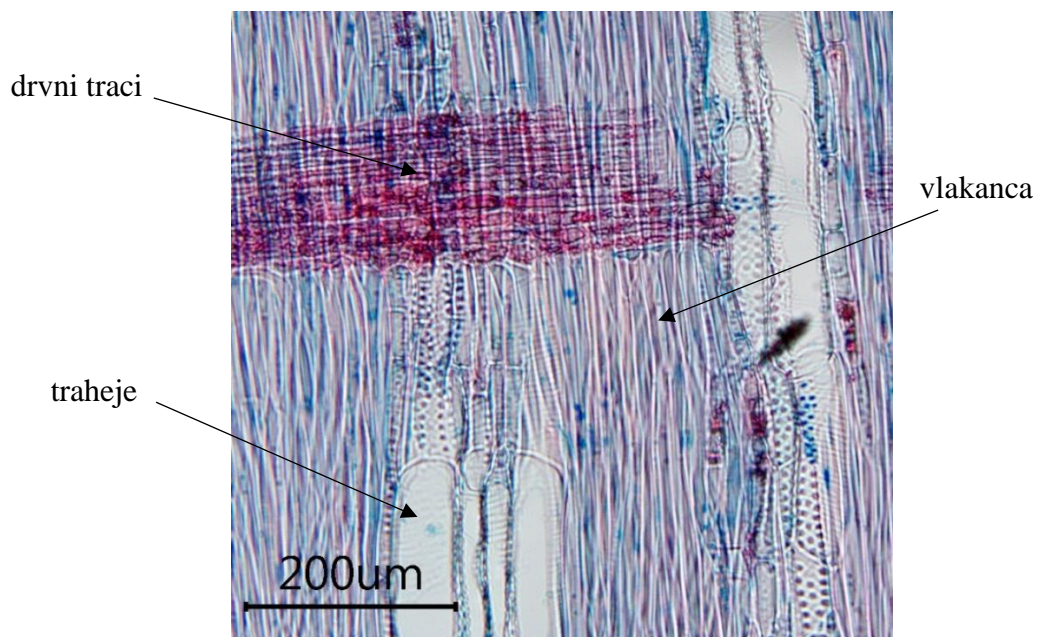
Na Biološkom odsjeku Prirodoslovnog matematičkog fakulteta u Zagrebu analizirana je mikrostruktura subfosilnog jasena.

Na slici 26. prikazana je mikrostruktura u poprečnom presjeku. Jasno se mogu vidjeti velike traheje grupirane u ranom dijelu goda što jasen svrstava u prstenasto porozne vrste. Granica goda jasno je izražena. U kasnom dijelu goda mogu se uočiti puno sitnije, grupirane traheje koje su okružene parenhimskim stanicama. Stanice s najmanjim lumenom su vlakanca. U ovom presjeku vide se drvni traci kao relativno tanke pruge usmjerene odozdo prema gore.



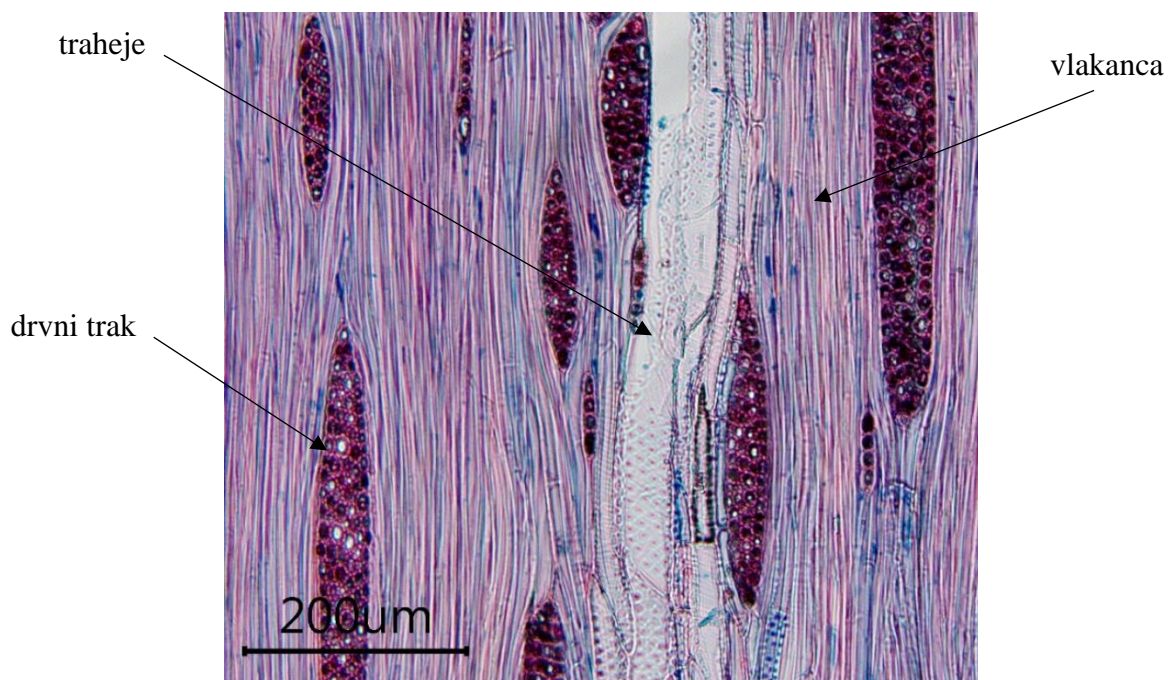
Slika 26. Mikrostruktura jasena u poprečnom presjeku

Na slici 27. prikazana je mikrostruktura u radijalnom presjeku. Jasno se mogu vidjeti uzdužno presječene traheje. U ovom presjeku drvni traci se vide kao vodoravno crvenkaste linije, a osim drvnih traka i traheja, vlakanca se mogu vidjeti kao tanke uzdužne cjevčice u preostalom dijelu slike.



Slika 27. Mikrostruktura jasena u radijalnom presjeku

Na slici 28. mikrostruktura je prikazana u tangencijalnom presjeku. Traheje su i u ovom presjeku uzdužno presječene kao i drvena vlakanca. Drvni traci su različitih širina i visina, a na ovom presjeku su poprečno presječeni.



Slika 28. Mikrostruktura jasena u tangencijalnom presjeku

6.4. Određivanje udjela vlage i gustoće prema normi ISO 13061

Određivanje udjela vlage i gustoće provedeno je u Laboratoriju za analizu metala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje na Zavodu za materijale. Uzorak je izrezan na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za alatne strojeve. Dimenzija uzorka je $21,5 \times 21,36 \times 22$. Na slici 29. prikazan je uzorak na analitičkoj vagi OHAUS ANALYTICAL Plus.



Slika 29. Mjerenje uzorka na analitičkoj vagi

Za određivanje udjela vlage i gustoće uzorka u apsolutno suhom stanju, uzorak je grijan u peći na temperaturi od 103 ± 2 °C. Peć za sušenje prikazana je na slici 30.



Slika 30. Peć za sušenje uzorka

Udio vlage i gustoće prema normi ISO 13061 računa se na sljedeći način [26].

Udio vlage (w) u uzorku računa se prema izrazu:

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100, \quad \% \quad (9)$$

gdje je:

m_1 – masa uzorka prije sušenja, g

m_2 – masa uzorka nakon sušenja, g.

Nadalje, gustoća uzorka pri određenom udjelu vlage (ρ_w) računa se prema:

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \quad (10)$$

gdje je:

m_w – masa pri određenom udjelu vlage, g

V_w – volumen pri određenom udjelu vlage, cm^3 .

Dobivene vrijednosti gustoće, preračunate su na vrijednost gustoće za udio vlage od 12 % (ρ_{12}) prema izrazu:

$$\rho_{12} = \frac{1 + 0,01 \times (12 - w)}{1 + 0,01 \times \frac{\rho_w}{\rho_{H_2O}}} \quad (11)$$

gdje je:

ρ_{H_2O} – gustoća vode = 1 g/cm³.

Norma ISO13061 propisuje postignuće apsolutno suhog stanja kada je između dva uzastopna vaganja razlika masa manja od 0,1 %.

Rezultati mjerenja mase, udjela vlage i gustoće prikazani su u tablici 4.

Tablica 4. Rezultati mjerenja mase, udjela vlage i gustoće

	Dimenzije, mm	Masa, g	Udio vlage, %	Gustoća, g/cm ³
Prije sušenja	21,5 × 21,36 × 22	6,40282	6,87	0,634
Nakon sušenja	21,17 × 20,76 × 22,01	5,96269	0	0,614

6.5. Uzorci za ispitivanje

Uzorci za ispitivanje savojnog modula elastičnosti i savojne čvrstoće izrezani su iz debla subfosilnog drva jasena, pronađenog u Savi u Bosni i Hercegovini u Grebnici. Komadi drva iz kojih su izrezani ispitni uzorci prikazani su na slici 31.



Slika 31. Subfosilno drvo jasena za ispitivanje

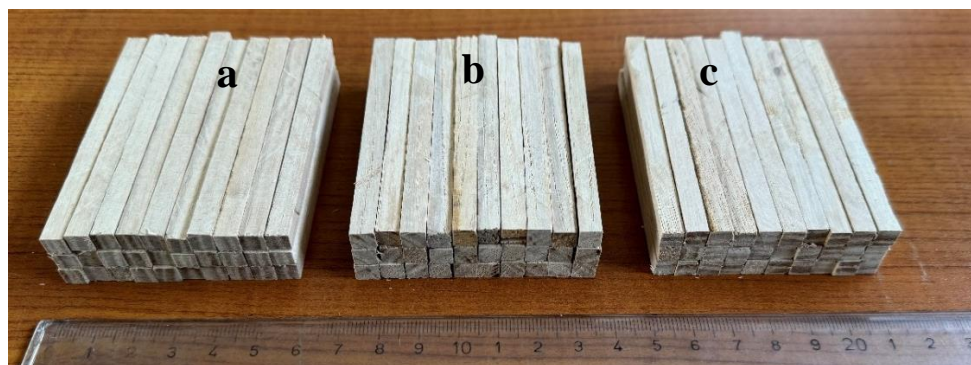
Uzorci za ispitivanje izrezani su u Laboratoriju za alatne strojeve na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Dimenzije izrezanih uzoraka bile su $6 \times 6 \times 80$ mm.

Na slici 32. prikazan je proces rezanja uzoraka.



Slika 32. Rezanje uzoraka za savojno ispitivanje

Izrezano je ukupno 90 uzoraka. Svi uzorci usmjereni su u longitudinalnom smjeru. Nakon toga uzorci su raspoređeni u tri grupe, svaka s 30 uzoraka. Kod prve grupe uzoraka savojna sila će s tangentom na godove zatvarati kut od 0° (a), kod druge kut od 45° (b), a kod treće grupe uzoraka kut od 90° (c). Na slici 33. prikazane su navedene grupe uzoraka.



Slika 33. Tri grupe ispitnih uzoraka za savojno ispitivanje

Nakon rezanja, stranice uzoraka su brušene brusnim papirom kako bi bili spremni za ispitivanje. Također, prije ispitivanja pomičnim mjerilom su izmjerene točne dimenzije visine (h) i širine (b) uzoraka. U tablici 5. prikazane su izmjerene vrijednosti širine (b) i visine (h) uzoraka.

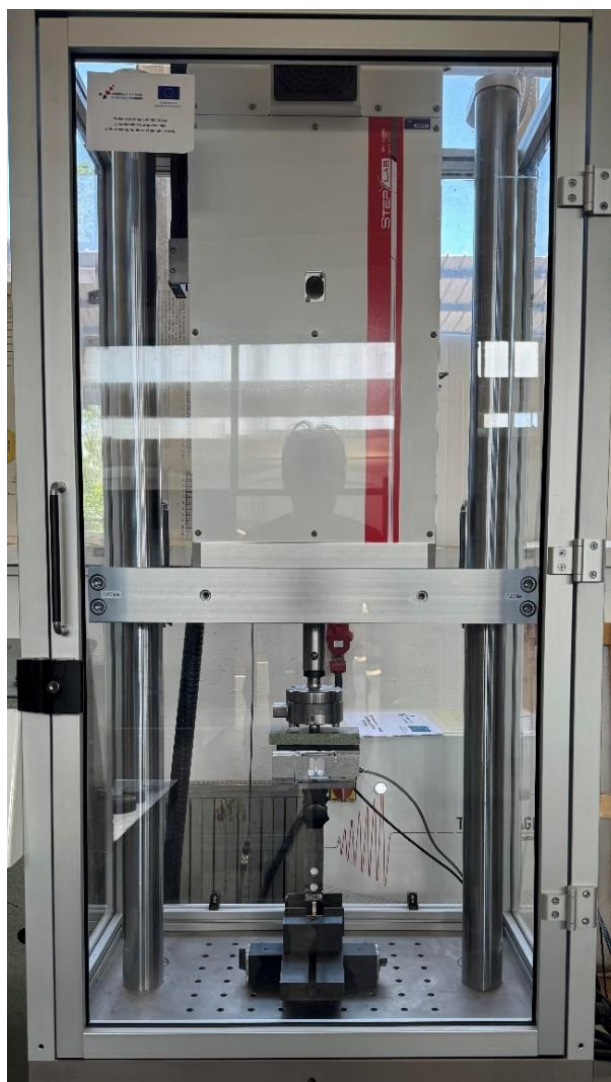
Tablica 5. Izmjerene vrijednosti širine (b) i visine (h) uzoraka

Uzorci	Dimenzije uzoraka					
	0°		45°		90°	
	b, mm	h, mm	b, mm	h, mm	b, mm	h, mm
1	6,09	5,67	5,93	5,92	5,83	6,00
2	5,87	5,84	6,33	5,94	5,94	6,04
3	6,07	6,07	6,43	6,53	5,66	6,03
4	5,99	5,98	5,78	6,28	5,97	5,94
5	6,14	6,11	6,51	6,40	5,98	5,92
6	5,90	6,06	6,34	5,82	6,08	5,92
7	6,11	5,98	6,04	5,84	5,98	5,74
8	5,83	5,91	6,37	5,86	5,62	5,66
9	5,98	5,67	6,30	5,92	5,99	5,76
10	5,86	5,77	5,92	6,22	6,19	5,98
11	5,82	6,12	5,90	6,33	5,83	5,84
12	5,85	5,98	5,88	6,31	6,08	5,99
13	5,60	6,04	6,47	5,74	5,87	5,95
14	5,93	6,10	6,45	6,49	6,09	6,15
15	6,08	6,00	6,22	5,84	5,64	5,95
16	5,98	6,00	5,92	5,94	5,92	5,95
17	6,00	5,87	5,95	6,29	6,06	6,14
18	5,98	6,01	6,45	6,57	6,00	5,80
19	5,87	5,94	6,32	5,90	5,77	6,08
20	6,09	5,86	5,83	6,18	5,85	5,78
21	5,80	5,93	6,25	5,89	6,18	6,00
22	5,88	5,97	6,03	6,35	6,05	6,08
23	5,94	5,67	5,52	6,27	5,96	6,00
24	5,98	6,01	5,62	6,27	5,78	5,70
25	6,01	6,09	6,43	6,48	5,75	5,97
26	5,98	5,76	6,28	5,95	5,97	6,04
27	5,77	5,72	5,90	6,07	5,95	5,98
28	5,82	5,78	5,97	6,31	5,59	5,78
29	5,97	5,71	6,50	5,92	5,70	5,76
30	5,93	5,91	5,52	6,27	5,78	5,80

6.6. Ispitivanje savojnog modula elastičnosti i savojne čvrstoće

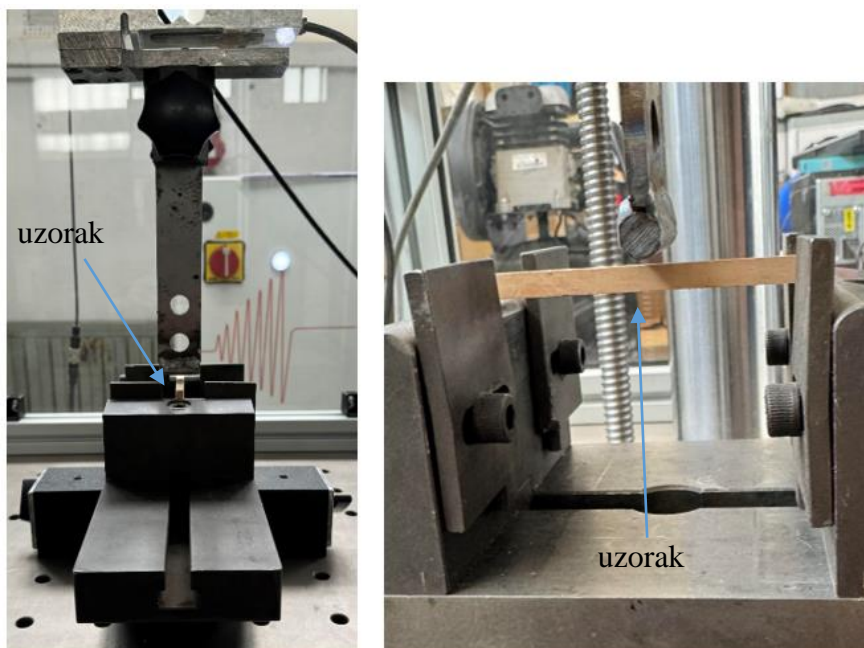
Ispitivanje savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti provedeno je na elektrodinamičkoj kidalici STEPLAB u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava Zavoda za materijale na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Norma prema kojoj je ispitivanje provedeno je ISO 13061-5:2020 [26]. Uređaj na kojem je provedeno ispitivanje prikazan je na slici 34.

Ispitivanje je provedeno savijanjem u tri točke na ukupno 90 uzoraka. Svi uzorci su usmjereni u longitudinalnom smjeru. Razmak između oslonaca bio je 70 mm. Brzina spuštanja srednjeg valjka preko kojega se opterećivao uzorak iznosila je 2,8 mm/min. Naprezanje se povećavalo sve do loma uzoraka, a prilikom ispitivanja mjerila se savojna sila i progib.



Slika 34. Elektrodinamička kidalica STEPLAB

Na slici 35. prikazan je uzorak postavljen na oslonce u kidalici.



Slika 35. Uzorak za ispitivanje postavljen na oslonce

Na slici 36. prikazani su primjeri uzoraka nakon ispitivanja, odnosno nakon loma.



Slika 36. Primjeri ispitanih uzoraka nakon loma

6.7. Rezultati ispitivanja

U tablici 6. prikazane su vrijednosti maksimalne sile, odnosno sile kod koje je došlo do loma uzorka za svih 90 uzoraka.

Tablica 6. Vrijednosti maksimalne sile za svih 90 uzoraka

Uzorak	maksimalna sila, N		
	0°	45°	90°
1	181,03	92,27	188,00
2	203,50	206,60	190,30
3	278,70	257,00	167,80
4	257,45	211,90	147,70
5	227,50	248,70	252,90
6	233,90	197,90	181,70
7	250,20	165,00	175,90
8	211,70	171,80	177,70
9	195,40	104,60	189,50
10	193,70	91,30	265,80
11	254,90	156,00	181,50
12	213,50	143,90	206,60
13	235,50	107,90	237,40
14	237,70	237,90	272,90
15	226,10	147,20	173,80
16	224,90	136,70	245,90
17	229,00	131,00	225,40
18	186,20	246,70	222,00
19	216,30	131,10	229,50
20	217,30	121,10	164,30
21	219,90	122,60	274,70
22	238,50	139,90	266,00
23	195,40	161,00	197,90
24	224,70	105,60	153,70
25	234,50	243,90	199,70
26	215,90	166,60	288,90
27	240,10	147,00	224,00
28	209,10	216,90	163,20
29	196,60	125,70	197,20
30	210,50	163,30	198,10
Aritmetička sredina	221,99	163,30	208,67
Standardna varijacija	22,38	50,07	39,61
Koeficijent varijacije, %	10,08	30,66	18,98

U tablici 7. prikazane su vrijednosti savojne čvrstoće i modula elastičnosti za sve uzorke. Savojni modul elastičnosti izračunat je prema izrazu (1), a savojna čvrstoća prema izrazu (2).

Tablica 7. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti

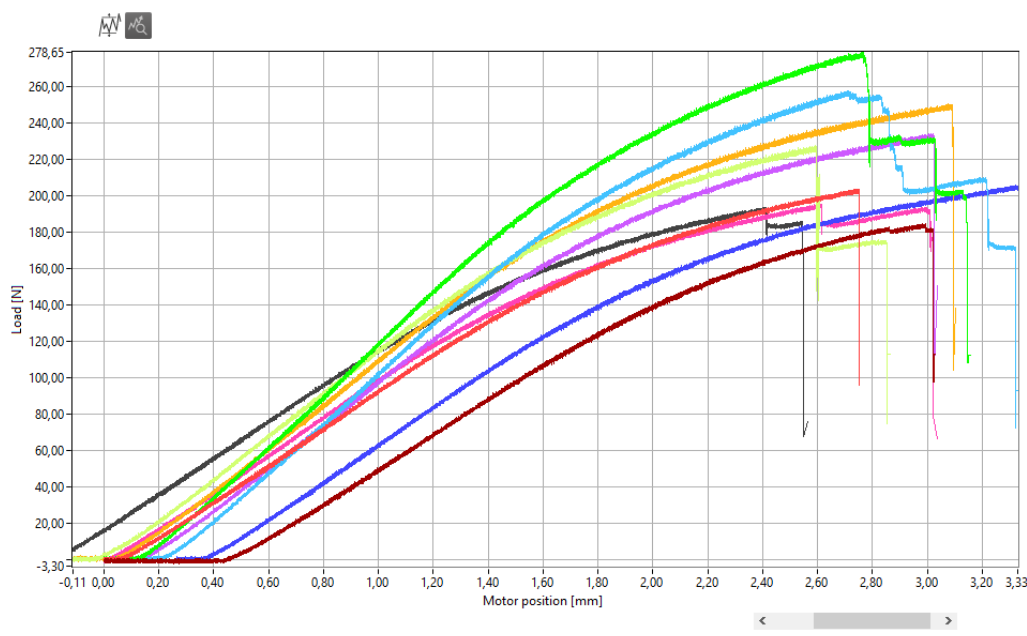
Uzorak	0°		45°		90°	
	σ , MPa	E , GPa	σ , MPa	E , GPa	σ , MPa	E , GPa
1	97,09	7,37	46,62	4,20	94,05	7,54
2	106,73	7,59	97,13	7,15	92,21	6,34
3	130,85	8,95	98,42	6,84	85,61	7,24
4	126,20	9,07	97,61	6,93	73,62	5,05
5	104,21	7,08	97,93	6,47	126,70	8,19
6	113,35	7,64	96,76	7,02	89,54	6,17
7	120,24	7,82	84,10	5,78	93,74	6,56
8	109,16	7,17	82,47	5,75	103,64	6,50
9	106,72	8,09	49,74	4,57	100,12	6,36
10	104,25	7,63	41,86	3,23	126,08	7,49
11	122,78	8,62	69,29	5,16	95,85	7,73
12	107,16	7,08	64,54	4,25	99,44	6,26
13	121,04	9,26	53,15	4,53	119,95	9,50
14	113,11	7,43	91,95	5,34	124,40	8,69
15	108,46	7,64	72,86	5,46	91,40	6,60
16	109,69	7,46	68,72	5,15	123,19	7,46
17	116,30	8,09	58,43	4,55	103,59	6,89
18	90,51	6,26	93,04	6,31	115,49	6,34
19	109,66	7,54	62,57	4,56	112,98	7,85
20	109,10	7,36	57,11	4,12	88,27	6,24
21	113,21	6,98	59,37	3,86	129,65	9,45
22	119,50	8,60	60,41	3,95	124,88	8,25
23	107,44	7,37	77,90	5,74	96,85	7,19
24	109,23	7,07	50,19	4,08	85,94	6,26
25	110,46	7,28	94,85	6,64	102,32	8,07
26	114,26	7,84	78,68	5,59	139,28	9,91
27	133,54	9,23	71,00	5,41	110,54	7,19
28	112,92	8,55	95,81	6,89	91,76	7,63
29	106,05	7,84	57,94	4,44	109,49	7,76
30	106,71	7,25	79,01	5,83	106,98	7,93
Aritmetička sredina	112,00	7,77	73,65	5,33	105,25	7,35
Standardna devijacija	9,08	7,36	18,05	1,11	16,06	1,11
Koeficijent varijacije, %	8,1	9,47	24,5	20,77	15,26	15,17

Također su određene aritmetička sredina, standardna devijacija te koeficijent varijacije.

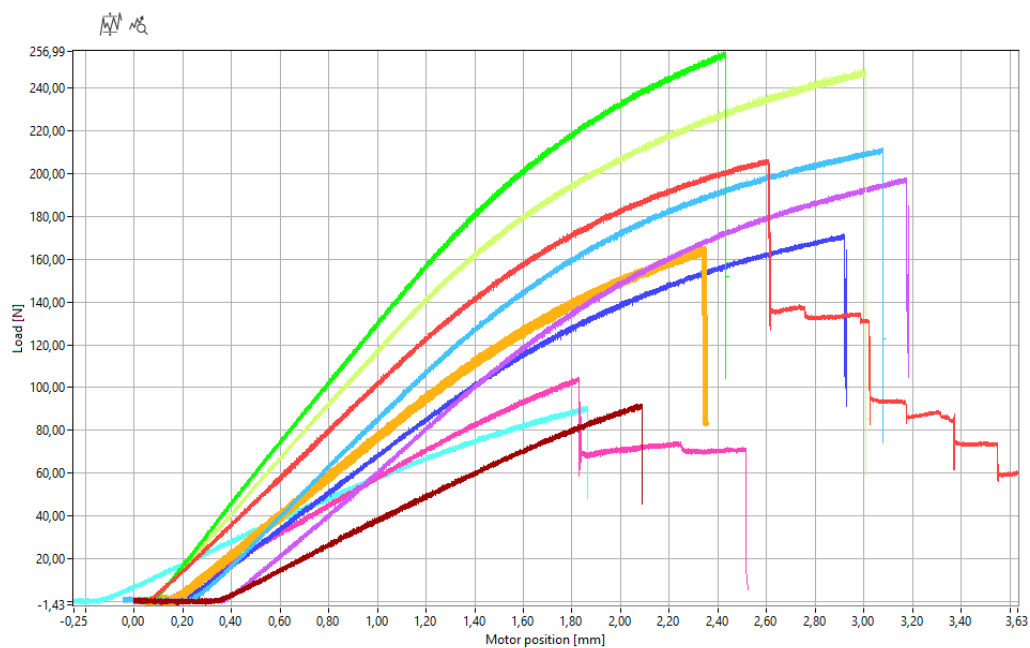
Prema podacima iz literature [2] vrijednost savojne čvrstoće za recentno drvo iste vrste jasena je 103 MPa, a vrijednost savojnog modula elastičnosti je 12 GPa. Može se zaključiti da starost subfosilnog jasena nije znatno utjecala na vrijednost savojne čvrstoće, dok je vrijednost savojnog modula elastičnosti znatno niža.

Tijekom ispitivanja za svaki je uzorak snimljena i krivulja savojna sila - progib.

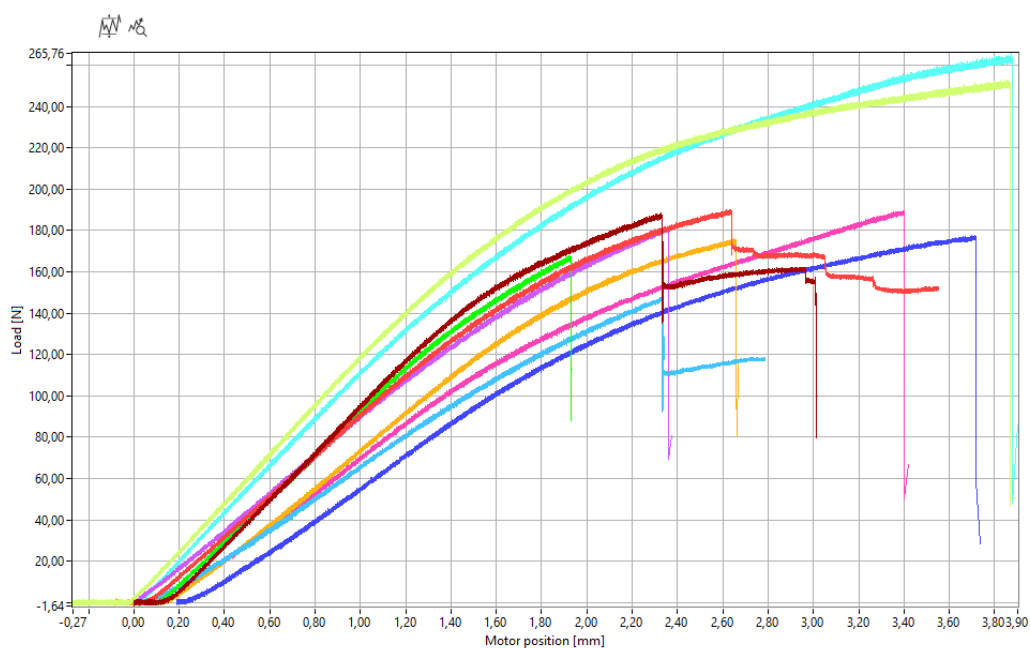
Kao reprezentativni primjer prikazane su tri krivulje na idućim slikama. Slika 37. prikazuje krivulje prvih 10 uzoraka za kut od 0° između savojne sile i tangente na godove. Na slici 38. prikazane su krivulje za prvih 10 uzoraka za kut od 45°, dok slika 39. prikazuje prvih 10 uzoraka za kut od 90°.



Slika 37. Krivulje savojna sila – progib za prvih 10 ispitivanja s kutom od 0°



Slika 38. Krivulje savojna sila – progib za prvih 10 ispitivanja s kutom od 45°

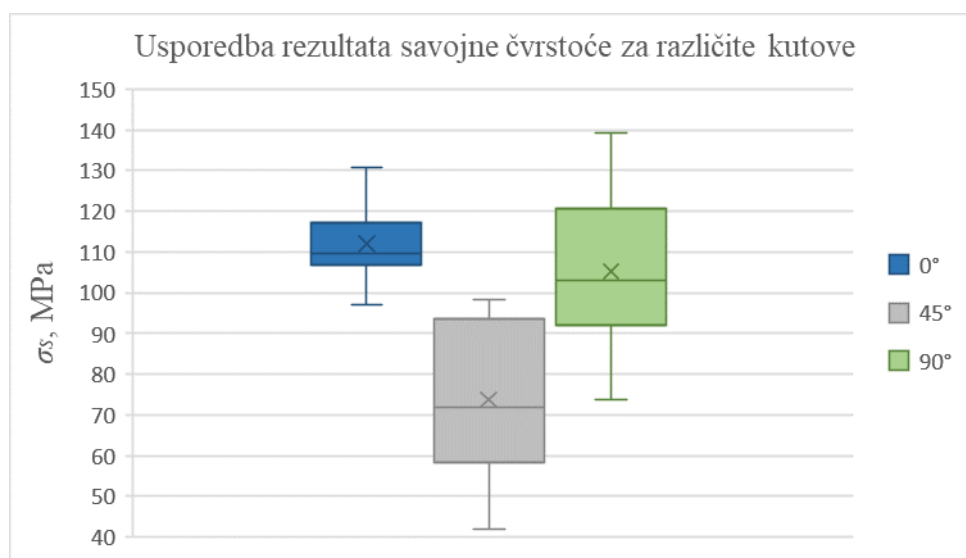


Slika 39. Krivulje savojna sila – progib za prvih 10 ispitivanja s kutom od 90°

7. ANALIZA REZULTATA

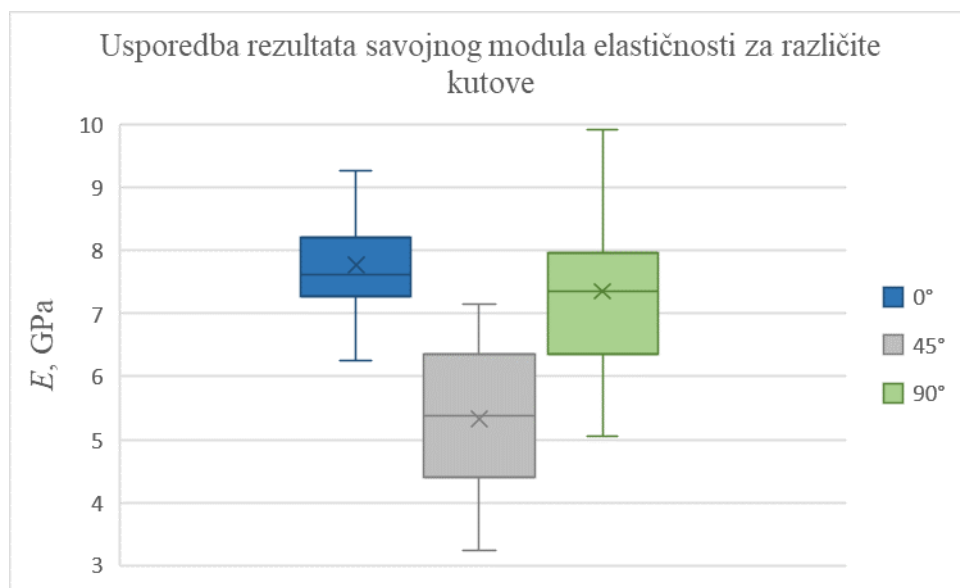
Iz rezultata ispitivanja savojnog modula elastičnosti i savojne čvrstoće može se primijetiti veliko rasipanje rezultata što je očekivano s obzirom na to da je drvo prirodan, heterogen i anizotropan materijal.

Dijagram na slici 40. grafički prikazuje rezultate mjerenja savojne čvrstoće za sve tri grupe uzoraka. Najviše vrijednosti čvrstoće subfosilnog jasena u longitudinalnom smjeru izmjerene su za kut između savojne sile i tangente na godove od 0° . Istodobno su rasipanja rezultata za ovu grupu uzoraka najmanja. Najniže vrijednosti savojne čvrstoće izmjerene su za kut od 45° . Kod ove grupe uzoraka standardna devijacija je najveća kao i koeficijent varijacije. Kod grupe uzoraka za kut od 90° , srednja vrijednost savojne čvrstoće malo je niža od prve grupe uzoraka, ali sa znatno većim rasipanjem rezultata.



Slika 40. Usporedba rezultata savojne čvrstoća za 0° , 45° i 90°

Dijagram na slici 41. grafički prikazuje rezultate mjerenja savojnog modula elastičnosti za sve tri grupe uzoraka. Kao i za savojnu čvrstoću, najviše vrijednosti modula elastičnosti u longitudinalnom smjeru izmjerene su za kut između savojne sile i tangente na godove od 0° . Istodobno su rasipanja rezultata za ovu grupu uzoraka najmanja. Najniže vrijednosti modula elastičnosti izmjerene su za kut od 45° . Kod ove grupe uzoraka standardna devijacija je najveća kao i koeficijent varijacije. Kod grupe uzoraka za kut od 90° , srednja vrijednost modula elastičnosti malo je niža od prve grupe uzoraka, ali sa znatno većim rasipanjem rezultata.



Slika 41. Usporedba rezultata savojnih modula elastičnosti za različite kutove

7.1. Weibullova razdioba

Weibull je razvio teoriju zasnovanu na konceptu otkazivanja funkcije najslabijeg člana. Weibullovom razdiobom može se opisati niz različitih problema, a pomoću nje se može vrlo dobro objasniti rasipanje vrijednosti za čvrstoću i modul elastičnosti krhkih materijala [27].

Nakon određivanja parametara razdiobe dobiva se jednoznačna veza između opterećenja i vjerojatnosti loma. Weibullov modul (m) mjeri je za rasipanje čvrstoće, a što je taj modul veći, materijal je homogeniji što znači da su pogreške raspodijeljene po cijelom volumenu ravnomjerno, a time je također i krivulja razdiobe rasipanja uža. Weibullova razdioba je dvoparameterska poluempirijska razdioba prikazana izrazom [27]:

$$f(x) = m(x)^{m-1}e^{-x^m} \quad (12)$$

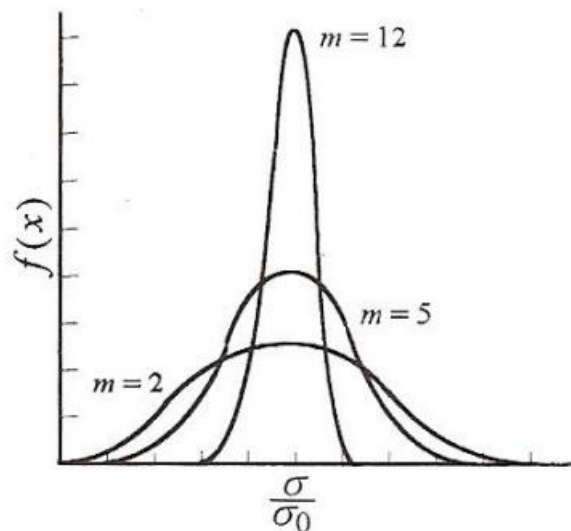
gdje je:

$f(x)$ – učestalost razdiobe slučajne varijable x

x – slučajna varijabla odnosno promatrana veličina (σ/σ_0)

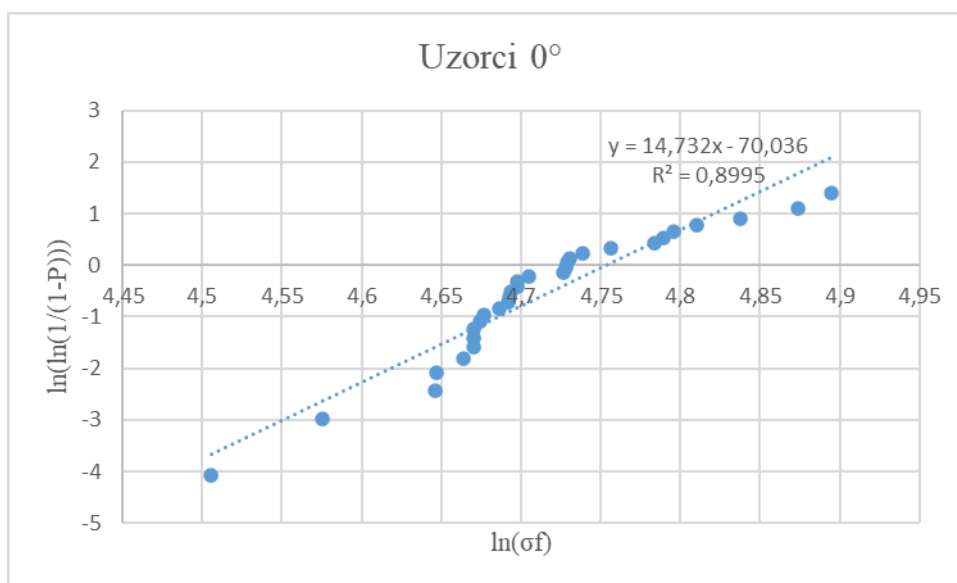
m – faktor oblika, uglavnom se odnosi na Weibullov modul

Kada je jednačba (12) nacrtana kao na slici 42., širina i oblik krivulje ovise o Weibullovom modulu. Što je on veći krivulja je uža.

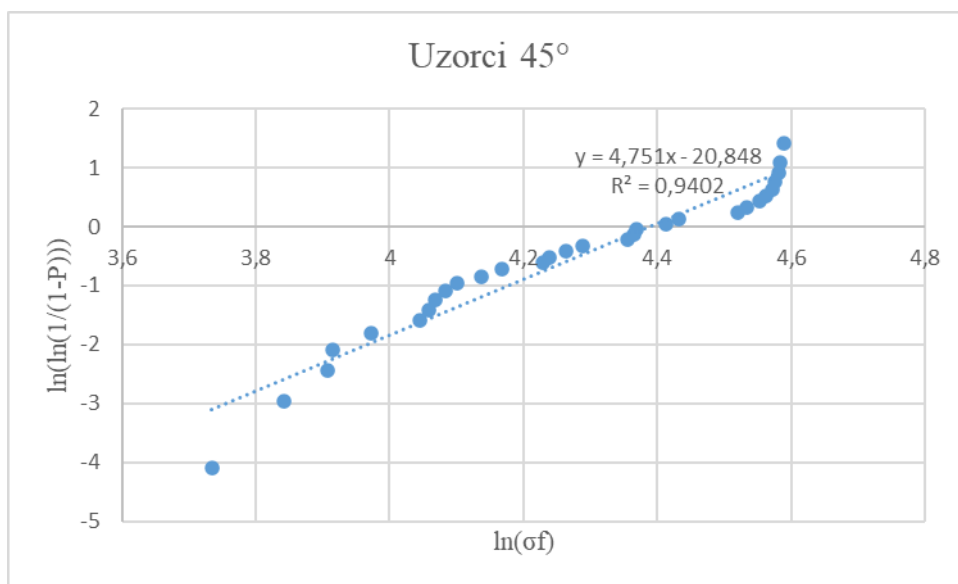


Slika 42. Utjecaj Weibullovog modula na oblik Weibullove razdiobe [27]

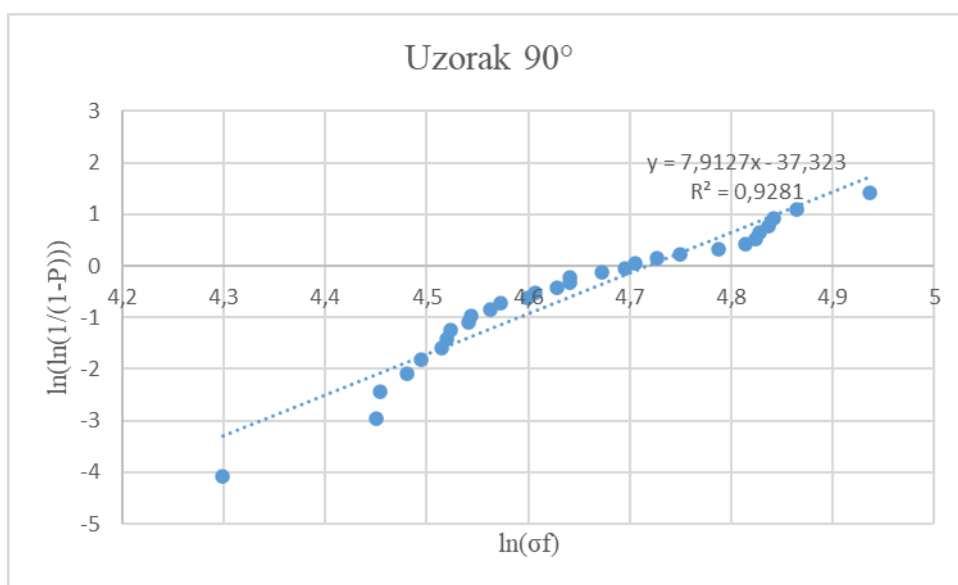
Na slikama 43., 44. i 45. prikazane su regresijske jednadžbe savojne čvrstoće za sve tri grupe uzoraka (0° , 45° i 90°) iz kojih se može iščitati Weibullov modul (m).



Slika 43. Kumulativna Weibullova razdioba normalizirane savojne čvrstoće za 0°



Slika 44. Kumulativna Weibullova razdioba normalizirane savojne čvrstoće za 45°



Slika 45. Kumulativna Weibullova razdioba normalizirane savojne čvrstoće za 90°

Kao što je već navedeno, iz jednadžbe regresijskog pravca može se iščitati Weibullov modul, a taj modul predstavlja nagib regresijskog pravca. Weibullovi moduli su:

- za ispitivanje pod 0°: $m = 14,73$
- za ispitivanje pod 45°: $m = 4,75$
- za ispitivanje pod 90°: $m = 7,91$

Najveći Weibullov modul dobiven je za uzorke koji su ispitivani pod kutom od 0° , a za 90° modul je nešto veći nego kod 45° . To govori da je pod kutom od 0° homogenost mikrostrukture najveća, dok je pod kutom od 45° homogenost najmanja.

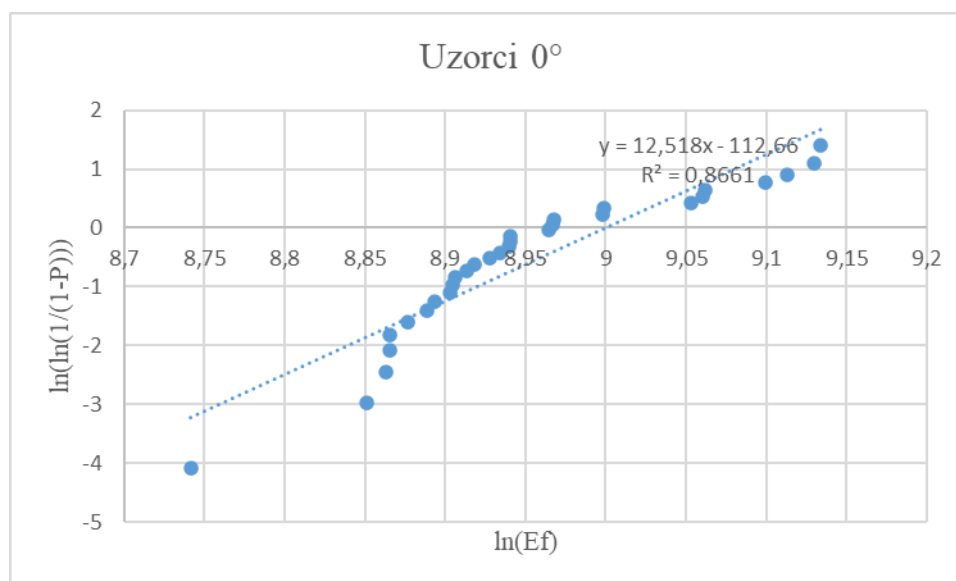
U tablici 8. nalaze se rezultati savojne čvrstoće za sve tri grupe uzoraka.

Tablica 8. Statistički podaci savojne čvrstoće

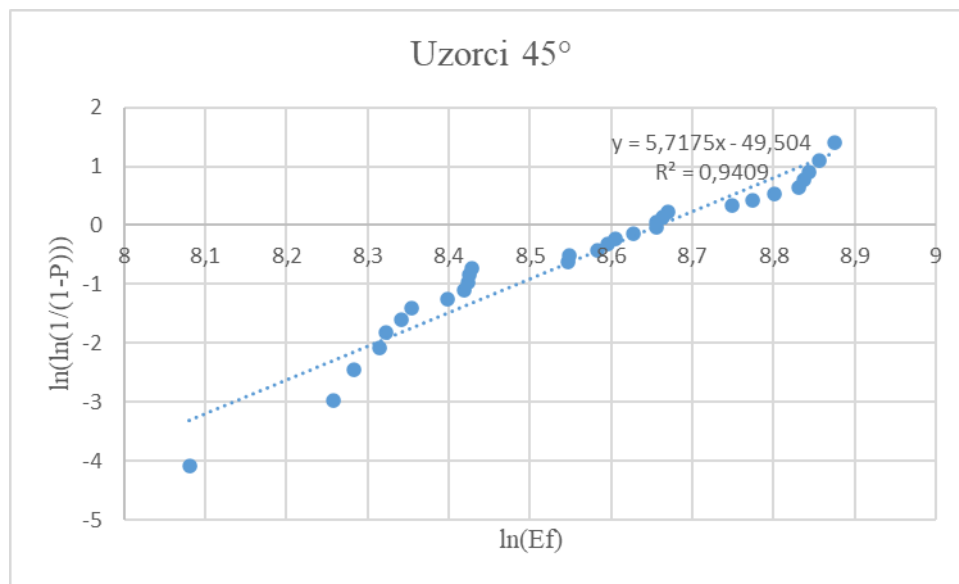
Grupa uzoraka	Savojna čvrstoća, MPa			Standardna devijacija	Weibullov modul	Koefficient varijacije, %
	min	max	srednja			
0°	97,09	133,54	112,00	9,08	14,73	8,1
45°	41,86	98,42	73,65	18,05	4,75	24,5
90°	73,62	139,28	105,25	16,06	7,91	15,3

Prema normi ISO 13061-5:2020, koeficijent varijacije za savojnu čvrstoću ne smije biti veća od 16 %. Ispitivanja pod kutom od 45° ne zadovoljavaju taj uvjet, dok ispitivanja pod kutom od 0° i 90° zadovoljavaju [26].

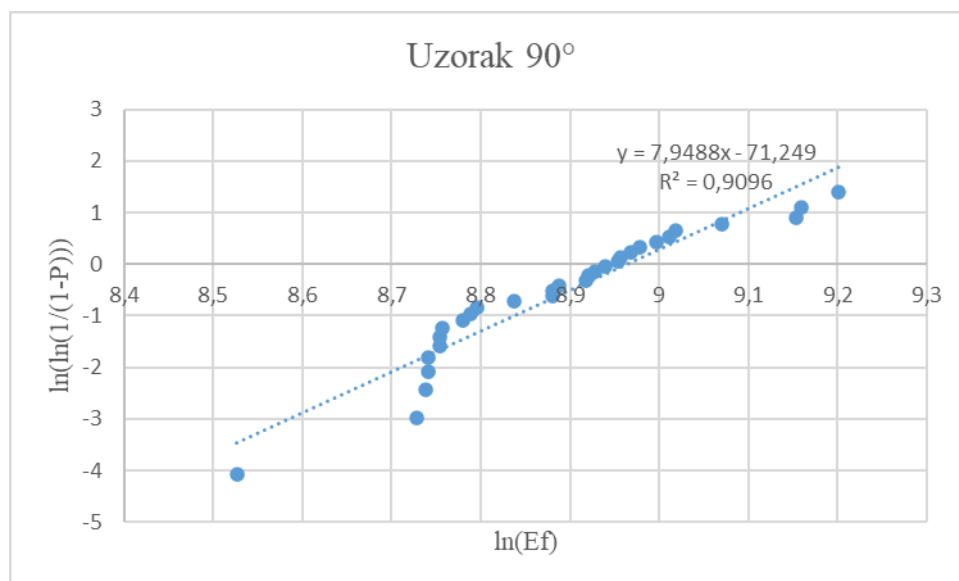
Na slikama 46., 47. i 48. prikazane su regresijske jednadžbe modula elastičnosti za sve tri grupe uzoraka (0° , 45° i 90°) iz kojih se također iščitava Weibullov modul.



Slika 46. Kumulativna Weibullova razdioba normaliziranog modula elastičnosti za 0°



Slika 47. Kumulativna Weibullova razdioba normaliziranog modula elastičnosti za 45°



Slika 48. Kumulativna Weibullova razdioba normaliziranog modula elastičnosti za 90°

Weibullovi moduli su:

- za ispitivanje pod 0°: $m = 12,52$
- za ispitivanje pod 45°: $m = 5,72$
- za ispitivanje pod 90°: $m = 7,95$

Isto kao i za savojnu čvrstoću, najveći Weibullov modul dobiven je za uzorke koji su ispitivani pod kutom od 0° , dok je za 90° modul nešto veći u odnosu na 45° . Najveća homogenost mikrostrukture je pod kutom od 0° .

U tablici 9. nalaze se rezultati modula elastičnosti za sve tri grupe uzoraka.

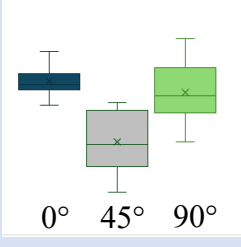
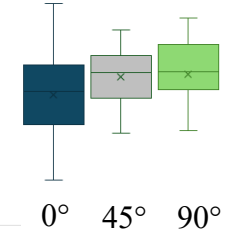
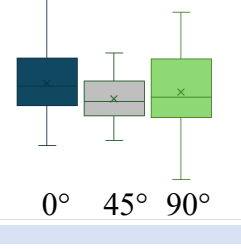
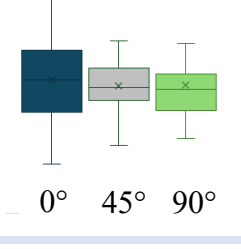
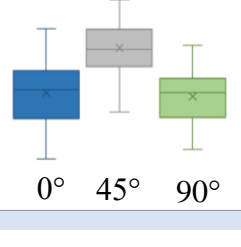
Tablica 9. Statistički podaci savojnog modula elastičnosti

Grupa uzoraka	Savojni modul elastičnosti, MPa			Standardna devijacija	Weibullov modul	Koefficient varijacije, %
	min	max	srednja			
0°	6,26	9,26	7,77	7,36	12,52	9,47
45°	3,23	6,84	5,33	1,11	5,72	20,77
90°	5,05	9,91	7,35	1,11	7,95	15,17

Prema normi ISO 13061-5:2020, koefficient varijacije za savojni modul elastičnosti treba biti ispod 22 %. Savojni modul elastičnosti za sve tri grupe uzoraka zadovoljava ovaj uvjet [26].

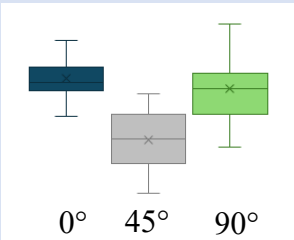
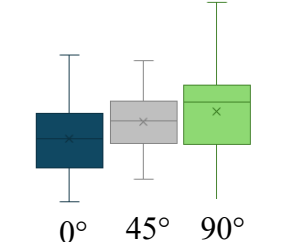
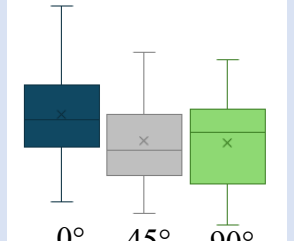
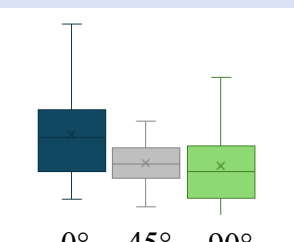
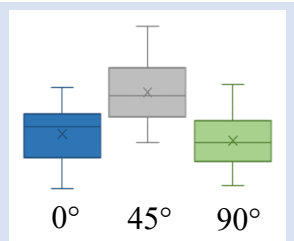
U tablici 10. prikazani su rezultati savojne čvrstoće dobiveni na Zavodu za materijale na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Isto kao i u ovom radu, ispitivala se ovisnost o kutu između savojne sile i tangente na godove. Ispitivanja su također provedena za kutove od 0° , 45° i 90° .

Tablica 10. Shematski prikaz vrijednosti savojne čvrstoće u ovisnosti o kutu između savojne sile i tangente na godove

Drvo	Literatura	Vrsta opterećenja	Shematski prikaz savojne čvrstoće
Subfossilni jasen	ovaj rad	savojno	
Tikovina	[28], 2023	savojno	
Jela	[29], 2022	savojno	
Hrast lužnjak	[30], 2018	savojno	
Subfossilni brijest	[6], 2016	savojno	

U tablici 11. prikazani su rezultati savojnog modula elastičnosti za različite vrste drva dobiveni na Zavodu za materijalu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

Tablica 11. Shematski prikaz vrijednosti modula elastičnosti u ovisnosti o kutu između savojne sile i tangente na godove

Drvo	Literatura	Vrsta opterećenja	Shematski prikaz modula elastičnosti
Subfossilni jasen	ovaj rad	savojno	
Tikovina	[28], 2023	savojno	
Jela	[31], 2022	savojno	
Hrast lužnjak	[32], 2018	savojno	
Subfossilni brijest	[6], 2016	savojno	

Pregledom radova s istim ispitivanjem, ali za različite vrste drva, uočene su neke sličnosti i razlike u odnosu na ovaj rad. Potpuno isti trend može se uočiti u ponašanju drva jele gdje su vrijednosti savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti najmanji za kut od 45°. Kod

subfosilnog brijesta trend je potpuno suprotan, vrijednosti navedenih svojstava su za kut od 45° najveće. Druge ispitivane vrste ne pokazuju puno sličnosti sa subfosilnim drvom jasena.

Kod svih tehničkih materijala, pa tako i kod drva, struktura određuje svojstva materijala. S obzirom na građu drva, drvni traci bi mogli imati najveći utjecaj na navedeni trend. Drvni traci se šire radijalno kroz strukturu i promjenom kuta mijenja se njihov položaj u odnosu na smjer savojne sile. Traheje i drvena vlakanca imaju oblik cjevčica i pretpostavlja se da promjena kuta između savojne sile i tangente na godove ne bi trebala imati značajniji utjecaj na vrijednost savojnih svojstava.

8. ZAKLJUČAK

Temeljem provedenih ispitivanja i dobivenih rezultata može se zaključiti sljedeće:

- Analiza starosti provedena metodom radioaktivnog ugljikovog izotopa ^{14}C pokazala je starost subfosilnog jasena. Intervalom vjerojatnosti 68,2 % određeno starosno razdoblje je od 1217 do 1280 AD, dok je s intervalom vjerojatnosti od 95,4 % određeno starosno razdoblje od 1157 do 1299 AD (94,6 %) ili od 1370 do 1380 AD (0,8 %).
- Analizom mikrostrukture potvrđeno je da analizirana vrsta drva pripada rodu jasena.
- Kut između savojne sile i tangente na godove ima značajan utjecaj na srednje vrijednosti savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti. Najviše vrijednosti s najmanjim rasipanjem dobivene su za kut od 0° , dok su najniže vrijednosti s najvećim rasipanjem dobivene za kut od 45° .
- Srednja vrijednost savojne čvrstoće u longitudinalnom smjeru iznosi 112 MPa za kut od 0° , 73,75 MPa za kut od 45° i 105,25 MPa za kut od 90° . Koeficijent varijacije je unutar dopuštene granice za kutove od 0° i 90° , dok za 45° izvan dopuštene granice.
- Srednje vrijednosti savojnog modula elastičnosti u longitudinalnom smjeru iznose 7,77 GPa za kut od 0° , 5,33 GPa za kut od 45° i 7,35 GPa za kut od 90° . Koeficijent varijacije je unutar dopuštene granice za sva tri kuta.
- Prema literaturnim podacima starost subfosilnog jasena nije značajno utjecala na savojnu čvrstoću, dok je vrijednost savojnog modula elastičnosti znatno niža.
- Sve vrijednosti se mogu dobro opisati Weibullovom distribucijom. Najveći Weibullov modul dobiven je za grupu uzoraka s kutom od 0° između savojne sile i tangente na godove.

LITERATURA

- [1] Chen C, Kuang Y, Zhu S, Burgert I, Keplinger T, Gong A, et al. Structure–property–function relationships of natural and engineered wood. Vol. 5, *Nature Reviews Materials*. Nature Research; 2020. p. 642–66. doi: 10.1038/s41578-020-0195-z
- [2] Kretschmann DE. *Mechanical Properties of Wood*.
- [3] Nilsson T, Rowell R. Historical wood - structure and properties. *J Cult Herit*. 2012;13(3 SUPPL.). doi: 10.1016/j.culher.2012.03.016
- [4] Rede V. DRVO-TEHNIČKI MATERIJAL.
- [5] Wiedenhoef AC, Wiedenhoef AC, Miller RB. Structure and Function of Wood Chapter 2 [Internet]. 2005. Dostupno na: <https://www.researchgate.net/publication/237823123>
- [6] Balaton A. Utjecaj usmjerenosti strukture na savojnu čvrstoću drva.
- [7] de Geus AR, Silva SF da, Gontijo AB, Silva FO, Batista MA, Souza JR. An analysis of timber sections and deep learning for wood species classification. *Multimed Tools Appl*. 2020 Dec 1;79(45–46):34513–29. doi: 10.1007/s11042-020-09212-x
- [8] What Exactly Are Growth Rings? [Internet]. (pristupljeno: 04/17/2024). Dostupno na: <https://extension.psu.edu/what-exactly-are-growth-rings>
- [9] Rowell RM. *Handbook of wood chemistry and wood composites*. CRC Press; 2005. 485 p.
- [10] Cell Wall: Definition, Structure, & Functions with Diagram [Internet]. (pristupljeno: 05/08/2024). Dostupno na: <https://www.sciencefacts.net/cell-wall.html>
- [11] Kumar A, Jyske T, Petrič M. Delignified Wood from Understanding the Hierarchically Aligned Cellulosic Structures to Creating Novel Functional Materials: A Review. Vol. 5, *Advanced Sustainable Systems*. John Wiley and Sons Inc; 2021. doi: 10.1002/adsu.202000251
- [12] Agarana MC, Akinlabi ET, Bishop SA. Statistical analysis of mechanical properties of wood. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*. 2019 Jul 1;6(7):64–7. doi: 10.21833/ijaas.2019.07.008
- [13] Essert S, Rede V, Švagelj Z. The bending modulus of elasticity of subfossil elm wood [Internet]. Dostupno na: <https://www.researchgate.net/publication/325360775>
- [14] Ćurković L, Profile S, Bakić A, Kodvanj J, Haramina T, Bakić A, et al. Flexural strength of alumina ceramics: Weibull analysis. Dostupno na: <https://www.researchgate.net/publication/264713313>

- [15] Nairn JA. A numerical study of the transverse modulus of wood as a function of grain orientation and properties. *Holzforschung*. 2007 Jun 1;61(4):406–13. doi: 10.1515/HF.2007.079
- [16] Farhan T, Kumar N, Amin F, Mahmood SJ. Exploration of the Customized Fixtures for the Evaluation of Three-point Bending Strength of Dental Resin Composites. *Journal of Dental Materials and Techniques*. 2020 Mar 1;9(1):51–5. doi: 10.22038/JDMT.2020.44057.1320
- [17] Wang T, Wang Y, Crocetti R, Wålinder M. Influence of face grain angle, size, and moisture content on the edgewise bending strength and stiffness of birch plywood. *Mater Des*. 2022 Nov 1;223. doi: 10.1016/j.matdes.2022.111227
- [18] Song J, Chen C, Zhu S, Zhu M, Dai J, Ray U, et al. Processing bulk natural wood into a high-performance structural material. *Nature*. 2018 Feb 7;554(7691):224–8. doi: 10.1038/nature25476
- [19] Christoforo AL, Panzera TH, Lahr FAR. Estimation of tensile strength parallel to grain of wood species. *Engenharia Agricola*. 2019;39(4):533–6. doi: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v39n4p533-536/2019
- [20] ASTM D1037-12 - Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials. 2020.
- [21] Millaniyage K, Kotlarewski N, Wallis L, Taoum A, Nolan G. Janka Hardness Evaluation of Plantation-Grown Eucalyptus nitens for Engineered Flooring Applications. *Buildings*. 2022 Nov 1;12(11). doi: 10.3390/buildings12111862
- [22] Niemz P, Clauss S, Michel F, Hänsch D, Hänsel A. PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF COMMON ASH (FRAXINUS EXCELSIOR L.).
- [23] Bai R, Wang W, Chen M, Wu Y. Study of ternary deep eutectic solvents to enhance the bending properties of ash wood. *RSC Adv*. 2024 Mar 8;14(12):8090–9. doi: 10.1039/d4ra00357h
- [24] Govorčin S, Sinković T, Hrčka R. USPOREDBA TEHNIČKIH SVOJSTAVA TERMIČKI MODIFICIRANOG I RECENTNOG DRVA JASENA (*Fraxinus excelsior* L.) SOME PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF RECENT AND HEAT TREATED ASH-*Fraxinus Excelsior* L.
- [25] Određivanje starosti metodom 14C - Institut Ruđer Bošković [Internet]. (pristupljeno: 05/04/2024). Dostupno na: <https://www.irb.hr/Zavodi/Zavod-za-eksperimentalnu->

- fiziku/Laboratorij-za-mjerenje-niskih-radioaktivnosti/Usluge/Određivanje-starosti-metodom-14C
- [26] ISO 13061-5:2020 Physical and mechanical properties of wood.
- [27] KERAMIKA BETON I DRVO Podloge za vježbe.
- [28] Čondrić E. Varijabilnost savojnih svojstava tikovine u longitudinalnom smjeru. (pristupljeno: 05/04/2024); Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:335546>
- [29] Mrvelj N. Utjecaj usmjerenosti strukture na savojni modul elastičnosti drva jele u longitudinalnom smjeru.
- [30] Strunje K. Savojni modul elastičnosti drva hrasta u longitudinalnom smjeru.
- [31] Branimir E. Utjecaj usmjerenosti strukture na savojnu čvrstoću drva jele u longitudinalnom smjeru [Internet]. Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:904757>
- [32] Špiranec R. Savojna čvrstoća drva hrasta u longitudinalnom smjeru.