

# Savojni modul elastičnosti drva hrasta u longitudinalnom smjeru

---

**Strunje, Karlo**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2018**

*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:235:120550>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-08**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Karlo Strunje**

Zagreb, 2018.godina

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTETE STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor :

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

Student:

Karlo Strunje

Zagreb, 2018.godina

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

Zahvaljujem se prof.dr.sc. Janošu Kodvanju dipl. ing. i dr.sc. Martinu Surjaku mag. ing. na pomoći pri laboratorijskom ispitivanju uzoraka.

Pogotovo se zahvaljujem prof.dr.sc. Veri Rede dipl. ing. na dostupnosti i pomaganju svojim znanjem i iskustvom pri izradi ovog završnog rada.

Također se zahvaljujem svim profesorima FSB-a na prenesenom znanju.

Zahvaljujem se svojoj obitelji na strpljivosti i podršci tijekom moga studija.

Karlo Strunje



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne 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:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Karlo Strunje** Mat. br.: 0035200143

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Savojni modul elastičnosti drva hrasta u longitudinalnom smjeru**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Bending modulus of elasticity of oak wood in the longitudinal direction**

Opis zadatka:


Mehanička svojstva tehničkih materijala određena su njihovim kemijskim sastavom i mikrostrukturnim stanjem. Uz isti kemijski sastav moguća su različita mikrostrukturna stanja, a onda i različita mehanička svojstva. Za mnoge tehničke materijale karakteristična je anizotropnost ili usmjerenost strukture u pojedinim osima, što za posljedicu ima razliku u vrijednostima istog svojstva u različitim pravcima. Prirodni biokompozit drvo ima izrazito usmjerenu mikrostrukturu i vrlo različita svojstva u tri osnovna presjeka: longitudinalnom, radijalnom i tangencionalnom. Za drvo su također karakteristične velike razlike u svojstvima između pojedinih vrsta, kao i velika rasipanja rezultata unutar iste vrste pa čak i unutar istog debla.

U završnom radu potrebno je odrediti savojni modul elastičnosti za drvo hrasta u longitudinalnom smjeru. Ispitivanje treba provesti metodom savijanja u tri točke, a dobivene rezultate statistički obraditi. Na temelju dobivenih rezultata donijeti odgovarajuće zaključke.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

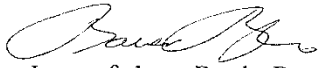
Zadatak zadan:  
30. studenog 2017.

Zadatak zadala:

  
Izv. prof. dr. sc. Vera Rede

Rok predaje rada:  
1. rok: 23. veljače 2018.  
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.  
3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:  
1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.  
2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.  
3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Predsjednik Povjerenstva:  
  
Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ .....	I
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
1. UVOD .....	3
2. STRUKTURA DRVA.....	4
2.1. Makrostruktura i mikrostruktura drva .....	5
2.2. Kemijski sastav stanične stijenke .....	13
3. SVOJSTVA DRVA.....	15
3.1. Fizikalna i kemijska svojstva drva .....	15
3.2.1. Modul elastičnosti .....	19
3.2.2. Vlačna čvrstoća .....	21
3.2.3. Tlačna čvrstoća.....	22
3.2.4. Smična čvrstoća.....	23
3.2.5. Savojna čvrstoća.....	24
3.2.6. Tvrdća drva .....	25
3.2.7. Otpornost na trošenje .....	27
3.2.8. Žilavost drva.....	28
6. EKSPERIMENTALNI DIO.....	30
6.1. Cilj rada .....	30
6.2. Materijal za ispitivanje. ....	30
6.3. Priprema uzoraka.....	33
6.4. Rezultati savojnog modula elastičnosti .....	35
6.4.1. Rezultati ispitivanje A skupine uzoraka.....	37
6.4.2. Rezultati uzoraka druge skupine – B skupine .....	39
6.4.3. Rezultati uzoraka treće skupine – C skupine.....	41
5. ANALIZA REZULTATA.....	43
6. ZAKLJUČAK .....	48

## POPIS SLIKA

Slika 1. Drvena crkva Sv. Barbare, [1] .....	3
Slika 2. Četinjače i listače, [2].....	4
Slika 3. Tri karakteristična presjeka u drva, [2] .....	5
Slika 4. Poprečni presjek kroz deblo, [3] .....	5
Slika 5. Uzdužni presjek kroz deblo, [2].....	6
Slika 6. Poprečni presjek četinjače (lijevo) i listače (desno), [2] .....	7
Slika 7. Razlika godova u boji i širini, [2] .....	7
Slika 8. Tri karakteristična tipa godova kod četinjača i listača, [2] .....	8
Slika 9. Poprečni presjek kroz drvo četinjače (A) i listače (B), [2] .....	9
Slika 10. Građa stanične stijenke, [2].....	9
Slika 11. Struktura jednostavnih i omeđenih jažica, [4] .....	10
Slika 12. Mikrostruktura četinjača, [5].....	10
Slika 13. Poprečni presjek kroz drvo četinjače, [2]– oblik traheida .....	11
Slika 14. Smolenice kod vrste <i>Pseudotsuga mensiezii</i> , [2] .....	11
Slika 15. Mikrostruktura drva listača, [6] .....	12
Slika 16. Struktura celuloze, [7].....	13
Slika 17. Struktura hemiceluloze, [8].....	13
Slika 18. Struktura lignina, [9] .....	14
Slika 19. Utezanje i distorzija drva pri sušenju, [2] .....	16
Slika 20. Gljivice na poprečnom presjeku drva, [10].....	17
Slika 21. Slojevi nastali pri izgaranju drva, [11].....	18
Slika 22. Tri osnovne osi drva, [12] .....	19
Slika 23. Vrijednosti modula elastičnosti za osnovne skupine tehničkih materijala u GPa, [13] .....	20
Slika 24. Određivanje savojnog modula elastičnosti metodom u tri točke, [12].....	20
Slika 25. Linearno područje krivulje sila-progib, [12].....	21
Slika 26. Uzorci za ispitivanje vlačne čvrstoće, [14] .....	22
Slika 27. Uzorak i naprava za ispitivanje čvrstoće na smicanje prema DIN-u, [14] .....	23
Slika 28. Uzorak za ispitivanje čvrstoće na savijanje prema UNI-u [14] .....	24
Slika 29. Položaj godova u odnosu na smjer savojne sile, [12] .....	25
Slika 30. Metoda za određivanje tvrdoće prema Chalais – Meudon-u, [15].....	25
Slika 31. Prikaz metode mjerenja tvrdoće po Brinellu, [16].....	26
Slika 32. Uređaj za ispitivanje tvrdoće drva metodom po Janki, [17] .....	27
Slika 33. Abrazijsko trošenje, [18].....	27
Slika 35. Ispitivanje žilavosti Charpyjevim batom, [20].....	29
Slika 36. Tri osnovna načina otvaranja pukotine prema Irwinu (a) i šest mogućih sustava otvaranja pukotine u drvu (b) [21] .....	29
Slika 37. Položaj godova u odnosu na savojnu silu, [12].....	30
Slika 38. Poprečni presjek hrasta lužnjaka iz kojeg su izrezani uzorci.....	31
Slika 39. Mikrostruktura poprečnog presjeka hrasta lužnjaka, [22] .....	31
Slika 40. Mikrostruktura tangencijalnog presjeka hrasta lužnjaka, [22].....	32
Slika 41. Mikrostruktura radijalnog presjeka hrasta lužnjaka, [22] .....	32

---

Slika 42. 3 skupine izrezanih uzoraka .....	33
Slika 43. Kidalica MESSPHYSIK BETA 50-5 u laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku	35
Slika 44. Metoda savijanja u tri točke, [12] .....	36
Slika 45. Metoda savijanja u tri točke na kidalici .....	36
Slika 46. Prva skupina (skupina A) uzoraka nakon ispitivanja.....	37
Slika 47. Dijagram naprezanje – progib za prvu skupinu uzoraka.....	38
Slika 48. Druga skupina ( skupina B) uzoraka nakon ispitivanja .....	39
Slika 49. Dijagram za naprezanje- progib za drugu skupinu uzoraka ( skupina B) .....	40
Slika 50. Treća skupina (skupina C) uzoraka nakon ispitivanja .....	41
Slika 51. Dijagram za naprezanje- progib za treću skupinu uzoraka (skupina C) .....	42
Slika 52. Ovisnost Weibullove razdiobe čvrstoće o faktoru oblika, [23].....	43
Slika 53. Prikaz komulativne razdiobe podataka za normalizirani modul elastičnosti A skupine uzoraka.....	44
Slika 54. Prikaz regresijske jednadžbe modula elastičnosti za A skupinu uzoraka .....	44
Slika 55. Prikaz komulativne razdiobe podataka za normalizirani modul elastičnosti B skupine uzoraka .....	45
Slika 56. Prikaz regresijske jednadžbe modula elastičnosti za B skupinu uzoraka .....	45
Slika 57. Prikaz komulativne razdiobe podataka za normalizirani modul elastičnosti C skupine uzoraka .....	46
Slika 58. Prikaz regresijske jednadžbe modula elastičnosti za treću skupinu uzoraka .....	46



---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Usporedne vrijednosti toplinske vodljivosti drva i drugih materijala .....	18
Tablica 2. Odnos između vlačne čvrstoće okomito na smjer i u smjeru vlaknaca .....	22
Tablica 3. Dimenzije poprečnih presjeka svih skupina uzoraka .....	34
Tablica 4. Oznake veličina i mjernih jedinica .....	37
Tablica 5. Rezultati ispitivanja prve skupine uzoraka (skupina A).....	38
Tablica 6. Rezultati ispitivanje druge skupine uzoraka (skupina B).....	40
Tablica 7. Rezultati ispitivanje treće skupine uzoraka (skupina C) .....	42
Tablica 8. Statistički podaci za rezultate mjerenja sve tri skupine uzoraka .....	47
Tablica 9. Vrijednosti savojnog modula elastičnosti recentnog hrasta lužnjaka iz literature , [24] .....	47

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$\rho$	g/cm <sup>3</sup>	gustoća
$\rho_w$	g/cm <sup>3</sup>	gustoća drva pri određenom stupnju vlage
$\rho_0$	g/cm <sup>3</sup>	gustoća drva u apsolutno suhom stanju
V	cm <sup>3</sup>	volumen uzorka
m	g	masa uzorka
$m_1$	g	masa drva kod nekog sadržaja vlage
$m_2$	g	masa drva u apsolutno suhom stanju
F	N	sila
$F_{\max}$	N	maksimalna sila
$R_m$	N/mm <sup>2</sup>	vlačna čvrstoća
$R_{m\tau}$	N/mm <sup>2</sup>	smična čvrstoća
$R_{ms}$	N/mm <sup>2</sup>	savojna čvrstoća
$\sigma_{pm}$	N/mm <sup>2</sup>	tlačna čvrstoća
$A_0$	mm <sup>2</sup>	površina presjeka
E	N/mm <sup>2</sup>	modul elastičnosti
L	mm	razmak između oslonaca
b	mm	širina uzorka
h	mm	visina uzorka
$H_b$	N/mm <sup>2</sup>	tvrdoća po Brinellu
$H_j$	N	tvrdoća po Janki
D	mm	promjer kuglice
d	mm	promjer otiska
G	N	težina
smax	mm	maksimalni progib grede

## SAŽETAK

Drvo u usporedbi s ostalim materijalima ima karakteristično veliki raspon vrijednosti svojstava. Ti veliki rasponi mogu biti unutar iste vrste, pa čak i samog stabla gdje mogu imati i po desetak puta manju gustoću u nekim dijelovima ili po nekoliko puta veću savojnu čvrstoću, tvrdoću ili krutost.

U radu je određen savojni modul elastičnosti za drvo hrasta lužnjaka u longitudinalnom smjeru metodom savijanja u tri točke. Smjer savojne sile bio je okomit na vlakanca kod svih ispitanih uzoraka, a variran je smjer sile u odnosu na tijek godova ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  i  $90^\circ$ ). Savojni modul elastičnosti hrasta lužnjaka u longitudinalnom smjeru vrlo malo ovisi o položaju savojne sile u odnosu na tijek godova. Srednja vrijednost savojnog modula elastičnosti iznosi 17,48 GPa za  $0^\circ$ , 15,82 GPa za  $45^\circ$  i 15,62 GPa za  $90^\circ$ . Vrijednosti i rasipanja rezultata savojnog modula elastičnosti ponašaju se po zakonu Weibullove razdiobe, kojom su statistički analizirani rezultati. Weibullovi dijagrami pokazuju što je veći parametar oblika ili Weibullov modul, to je veća homogenost strukture. Za prvu skupinu Weibullov modul iznosi 8,02, za drugu skupinu 12,56, a za treću skupinu 8,50.

Dobivene vrijednosti savojnog modula elastičnosti hrasta lužnjaka nešto su više od vrijednosti koje se za istu vrstu mogu naći u literaturi.

**Ključne riječi:** savojni modul elastičnosti, hrast lužnjak, Weibullova razdioba

## SUMMARY

Compared to other materials and characteristic to itself, wood has a wide range of property values. Those large ranges can be between the species itself, or even a single tree where they can have a ten times smaller density, bending strenghts, stiffnes or hardness in certain parts.

In this paper a flexural modulus of elasticity for the tree of red oak in the longitudinal direction is determined by three - point bending. The direction of the bending force was perpendicular to the fibers in all the tested samples, and the direction of force was varied in relation to the flow of gods. The flexural modulus of the red oak in the longitudinal direction depends very little on the position of the bending force relative to the course of the gods ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  and  $90^\circ$ ). The mean value of the flexural modulus of elasticity is 17.48 GPa for  $0^\circ$ , 15.62 GPa for  $45^\circ$ , 15.82 GPa for  $90^\circ$ . Values and dissipations of the bend modulus of elasticity behave according to the Weibull distribution law, which we also use to statistically analyze the results. Weibull diagrams show us that, the bigger the perimeter of a shape or the Weibull modulus, the more homogenic the structure. For the first group Weibull's modulus is 8,02, for the second group 12,56, and for the third group 8,50.

By comparing the results of our experiment to the values in the literature we can observe that our experimental samples have a slightly larger elasticity modulus.

**Key words:** flexural modulus of elasticity, the tree of red oak, Weibull distribution

## 1.UVOD

Šume se smatraju ekološkom tvornicom, idealnim staništem za brojni životni svijet i blagodat za čovjeka. Najznačajniji proizvod šume je drvo. Drvo je prirodni, ekološki i biorazgradivi materijal, anizotropne strukture. Od izuzetno velike je važnosti jer procesom fotosinteze proizvodi kisik koji je neophodan za život na zemlji. Također njegovi plodovi, listovi i kora postali su hrana za životinje i ljude. Drvo se koristi od početka ljudske civilizacije pa sve do danas u različitim oblicima proizvoda. Od prvih oruđa i oružja, paljenja vatre i grijanja pomoću drva do kompleksnijih proizvoda poput: koliba, kuća, mostovi, čamci, brodovi, namještaj, obuća i dr.

U ovom radu na drvo se gleda kao tehnički materijal. Osnovni cilj je iskoristiti kod svakog materijala njegove dobre kvalitete, a što je više moguće eliminirati slabosti. Neki nedostaci drva su: usmjerenost građe i svojstava, ovisnost mehaničkih osobina o sadržaju vlage u drvu, skupljanje i bubrenje te zapaljivost. Drvo ima mnogobrojne prednosti kao što je: mala masa i gustoća, laka obrada, velika čvrstoća paralelno s vlaknima, mala osjetljivost na temperaturne promjene, velike mogućnosti oblikovanja, dobre mogućnosti montaže i transporta konstrukcijskih elemenata. Možda najvažnije svojstvo drva je recikličnost više puta. Tako se iz njegove sirovine može dobiti celuloza i papir. Trajnost drva se može poboljšati različitim kemijskim i fizikalnim postupcima, pa tako drvne konstrukcije mogu trajati i više stotina godina.

Na slici 1. nalazi se primjer drvne konstrukcije koja traje više stotina godina. Prikazana je crkva Sv. Barbare koja se nalazi u mjestu Velika Mlaka, a podignuta je 1642.godine.



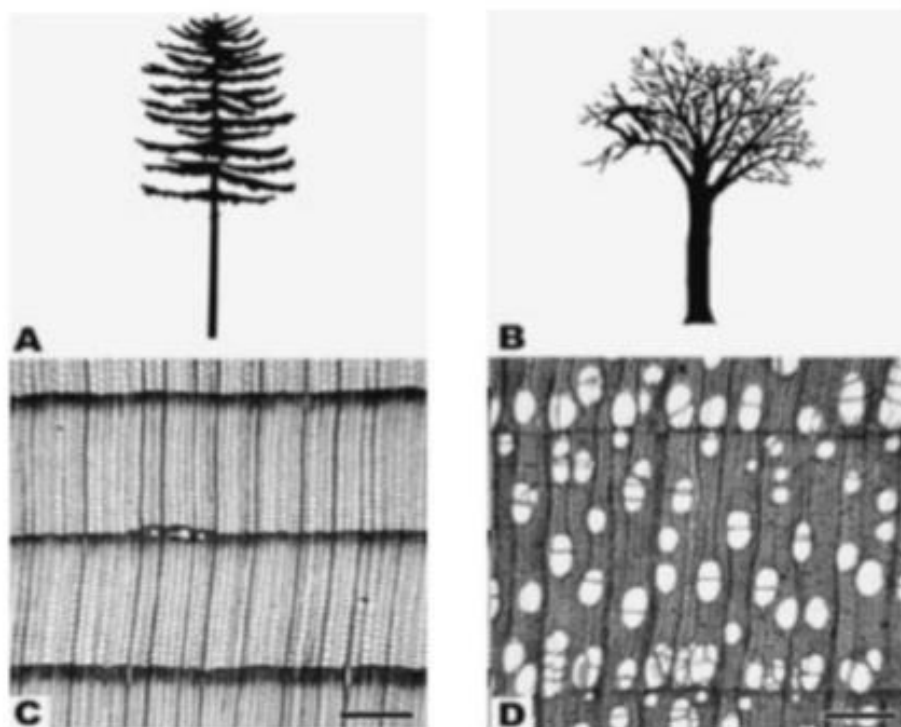
**Slika 1. Drvena crkva Sv. Barbare, [1]**

## 2. STRUKTURA DRVA

Drvo je prirodni materijal koji se dobiva od drvenastih biljaka, uglavnom od debla stabala, iako se za neke primjene koriste i drva grana. Da bi znali kako će se drvo ponašati pri ispitivanju u primjeni, trebamo znati njegovu osnovnu podjelu i građu jer svojstva svakog materijala ovise o njegovoj strukturi. Struktura drva može se promatrati na nekoliko razina. Proučavanjem makro, mikro i submikroskopske razine bavi se znanstvena disciplina Anatomija drva.

Proizvodi od drva koji u današnje vrijeme imaju praktičko značenje pripadaju skupini cvjetnica ili sjemenjača, a dijele se na četinjače i listače, slika 2. Četinjače pripadaju skupini golosjemenjača i ima ih oko 630 vrsta. Imaju listove u obliku iglica, dok neke u obliku ljuskica. Uglavnom rastu na sjevernoj polutki kao šumsko drveće ili grmlje. Njihova najveća važnost je proizvodnja mekog drva. Kod nas su najpoznatije jela, smreka, bor.

Listače pripadaju skupini kritosjemenjača, kojima listovi imaju široke ravne površine različitih oblika. Poznate su još pod nazivom bjelogorica, a kod nas su poznate vrste bukva, hrast, breza, javor.



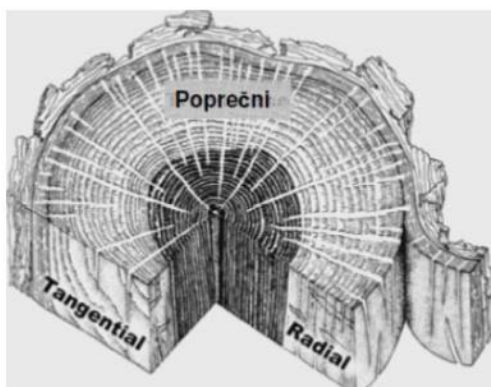
**Slika 2. Četinjače i listače, [2]**

Opći oblik stabla četinjača (A) i listača (B)

Poprečni presjek kroz deblo četinjača (C) i listača (D)

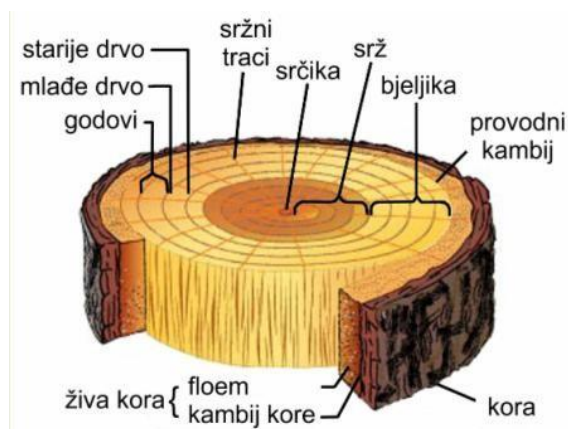
## 2.1. Makrostruktura i mikrostruktura drva

Svako stablo se sastoji od tri dijela: korijena, debla, krošnje. Deblo je u biološkom smislu većinom neaktivno osim relativno tankog dijela neposredno ispod kore koji ima fiziološku funkciju rasta i transporta hranjivih tvari prema krošnji gdje se odvija većina biološke aktivnosti. Ostatak debla ima mehaničku funkciju nošenja cijelog stabla. Da bi se dobila cjelovita predodžba potrebno je drvo promatrati u tri različita presjeka: poprečni, radijalni i tangencijalni, slika 3. Poprečni presjek je okomit na uzdužnu os biljnog valjka. Radijalni presjek je u ravnini određenoj polumjerom i osi valjka debla. Tangencijalni presjek je okomit na radijalni.



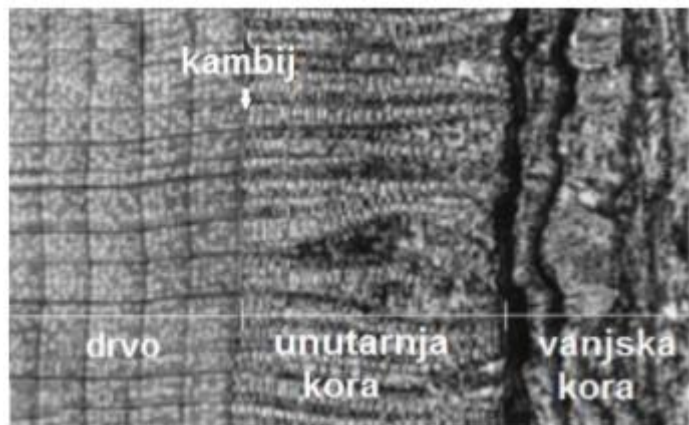
Slika 3. Tri karakteristična presjeka u drva, [2]

Makroskopska građa drva može se uočiti na svakom njegovom presjeku bez obzira na orijentaciju reza i način obradbe. Kod poprečnog presjeka kroz deblo razlikuje se nekoliko makroskopskih elemenata: vanjska kora, unutrašnja kora, kambij, bjeljika, srž ili srževina i srčika, slika 4.



Slika 4. Poprečni presjek kroz deblo, [3]

Na slici 5, na uzdužnom presjeku možemo vidjeti makroskopske elemente debla.

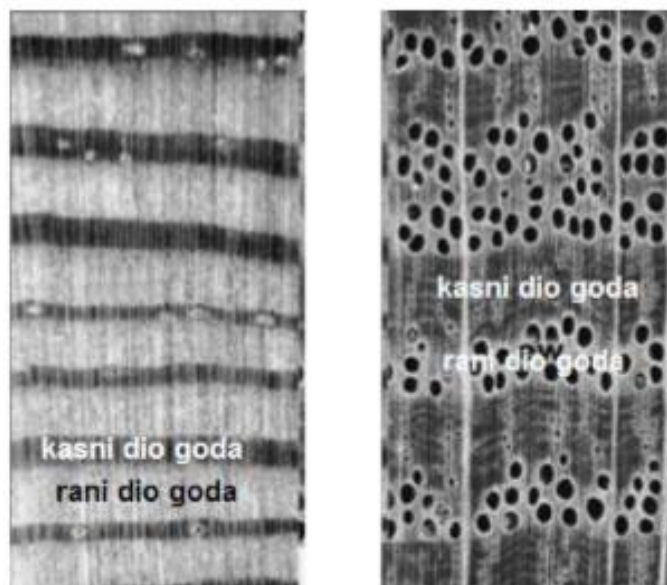


**Slika 5. Uzdužni presjek kroz deblo, [2]**

Vanjska kora štiti deblo od vanjskih utjecala te gubitka vode, dok unutarnja kora provodi produkte fotosinteze od listova do korijena. Između kore i bjeljike nalazi se kambij, tvorno tkivo iz kojeg svake godine nastaje novi sloj ksilema (novi god) i floema (kora). Bjeljika ima funkciju transporta vode i mineralnih tvari od korijena prema gore i skladištenja produkata fotosinteze. Ispod nje se nalazi srževina gdje se nalaze odumrle stanice te različite biokemijska tvari koje se zovu ekstraktivi. O količini i vrsti ekstrahiranih tvari ovise mehanička i tehnološka svojstva te trajnost drva.

Stabla tijekom svog života rastu u visinu i debljinu. Rast u visinu je primarni rast i ograničen je na vegetacijske vrhove, dok je rast u debljinu sekundarni rast za koji je zadužen tanki sloj kambija. God ili godišnji prsten je naziv za prirast drva u debljinu. Oni su najuočljivija nehomogenost građe na poprečnom presjeku, gdje se skupine stanica u obliku prstena koncentrično slažu oko srca drva. Brojanje godova je metoda kojom se određuje starost drva, iako nije uvijek pouzdano jer postoje vanjski utjecaji koji mogu poremetiti rast godova. Stanice koje nastanu na početku vegetacijske sezone zovu se rani dio goda ili rano drvo, a stanice koje nastanu kasnije čine kasni dio goda ili kasno drvo, slika 6. U radijalnom presjeku godovi se vide kao uže, a u tangencijalnom kao šire svjetlije trake paralelne sa srcem, međusobno odvojene tamnijom prugom koja odvaja god tekuće godine od goda naredne godine.



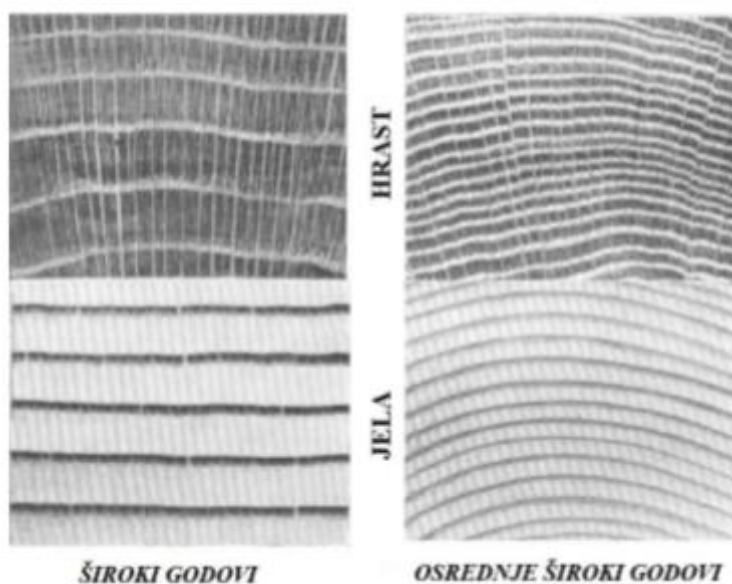


**Slika 6. Poprečni presjek četinjače (lijevo) i listače (desno), [2]**

Godovi mogu biti jače i slabije izraženi. Po boji mogu biti svjetliji i tamniji. Po širini mogu biti fini ili uski, polu-fini ili srednje široki, grubi ili široki.

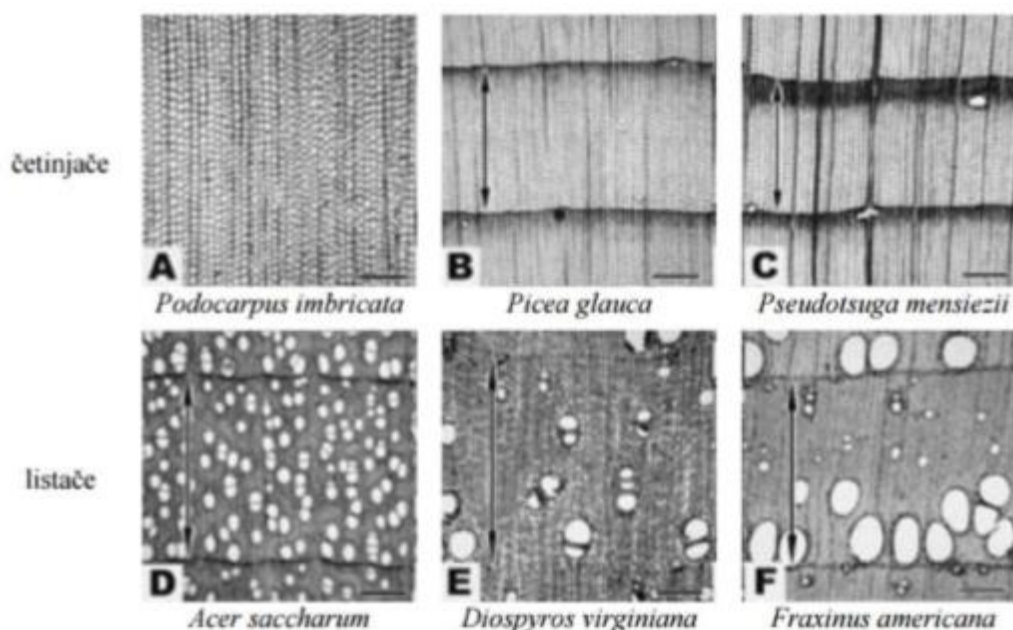
Po tijeku granične linije mogu biti paralelni s periferijom poprečnog presjeka debla, valoviti i uleknuti. Po stupnju markantnosti, markantniji su kod četinjača nego kod listača.

na slici 7. prikazani su široki godovi i osrednje široki godovi.



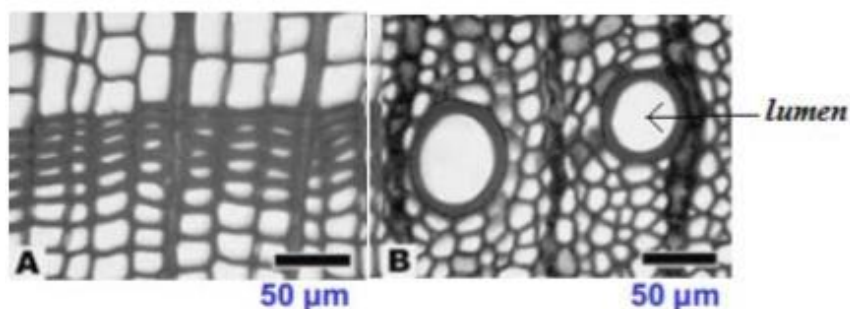
**Slika 7. Razlika godova u boji i širini, [2]**

Slika 8. prikazuje kako se prema načinu rasporeda pora sve vrste drva mogu rasporediti u tri različite skupine.



**Slika 8. Tri karakteristična tipa godova kod četinjača i listača, [2]**  
 A-nema izraženih godova, B-postupan prijelaz iz ranog u kasni dio goda,  
 C-nagli prijelaz iz ranog u kasni dio goda, D-nema izraženih godova,  
 E- semi-difuzno porozno drvo, F-prstenasto porozno drvo

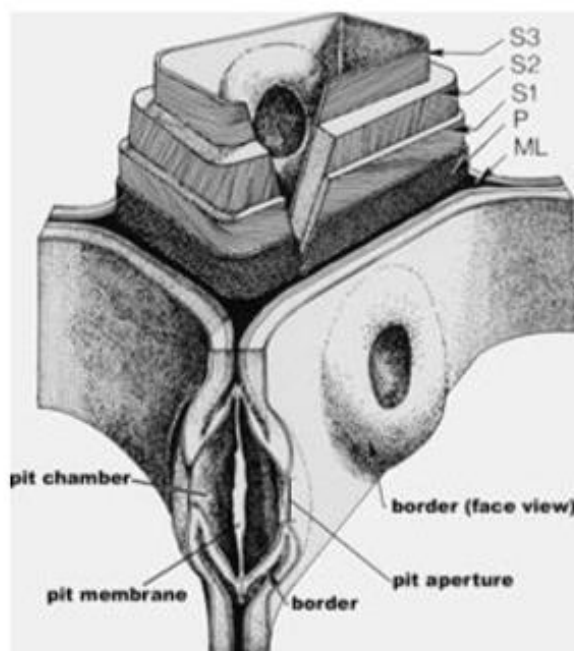
Osnovni građevni element drva je drva stanica- traheida. Staničnu strukturu drva definira posebna vrsta biljnih stanica. Biljna stanica sastoji se od protoplasta (žive tvari okružene staničnom membranom) i stanična stijenka (neživa tvar izgrađena uglavnom od ugljikohidrata). Drvna stanica je mrtva biljna stanica bez plazmatskog sadržaja. Prostor gdje su se prije nalazili protoplasti naziva se lumen. Glavna uloga lumena je provođenje vode. Slika 9. prikazuje razlike u obliku stanice, veličini lumena i debljini stijenke kod četinjača i listača.



Slika 9. Poprečni presjek kroz drvo četinjače (A) i listače (B), [2]

Stanice četinjača su pravokutne, sve su istog oblika i zovu se traheide. Mogu biti stanice većeg lumena i tanje stijenke te stanice manjeg lumena i veće stijenke. Listače imaju velike okrugle stanice (pore) koje se sastoje od debela stanične stijenke i velikog lumena. Dok su ostale stanice tanjom stijenkom i manjim lumenom.

Na slici 10. prikazana je građa stanične drvene stanice. Sastoji se od središnje lamele, primarnog i sekundarnog dijela stijenke.

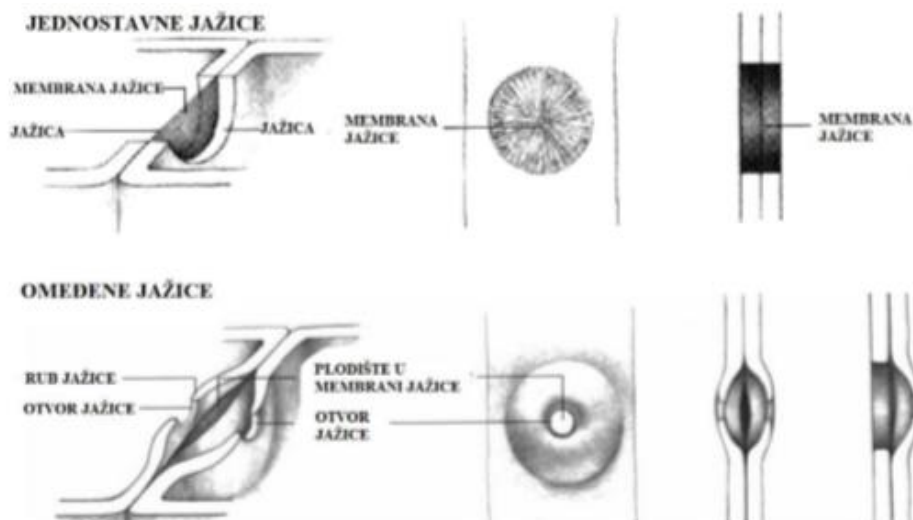


Slika 10. Građa stanične stijenke, [2]

Struktura svih dijelova je kompozitna, izgrađena od mikrovlakana celuloze i hemiceluloze okruženih matricom od lignina. Stanice su međusobno povezane središnjom lamelom. Na središnju lamelu nastavlja se primarni dio stijenke koja se sastoji od dugih mikro-vlakana celuloze koja omataju stanicu pod kutom od 0 do 90° u odnosu na uzdužnu os drveta. U srednjem sloju, ujedno i najdebljem, mikrovlakna celuloze položena su pod kutem od 5 do

30°, a udio lignina je manji nego u središnjoj lameli i primarnoj stijenci. Posljednji, unutarnji sloj sadrži još manje lignina, relativno je tanak, a mikrovlakna su omotana pod kutem većim od 70°. Lignin je hidrofobna tvar. Od središnje lamele prema lumenu njegov sadržaj se postupno smanjuje da bi se u drvu olakšao protok vode. Međustanična komunikacija omogućena je pomoću jažica. Jažice se razlikuju se po tipu, broju, veličini i proporciji.

Slika 11. prikazuje jednostavne i omeđene jažice. Jednostavne jažice imaju šupljinu gotov stalne širine, dok kod omeđenih šupljina se sužava prema staničnom lumenu.



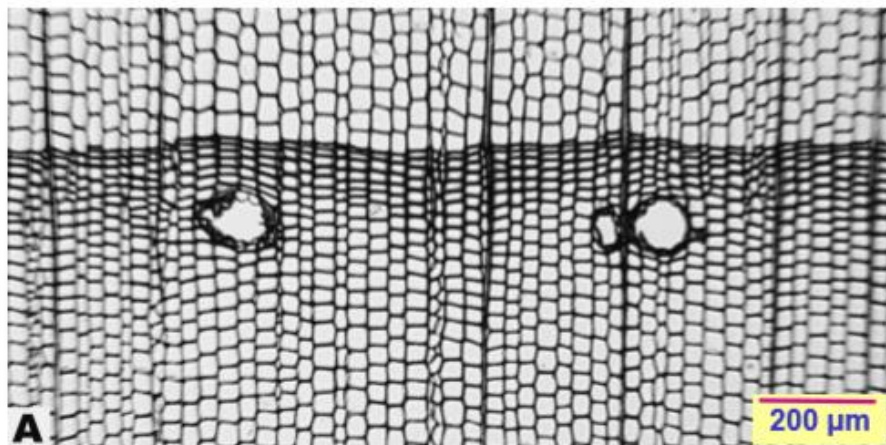
**Slika 11. Struktura jednostavnih i omeđenih jažica, [4]**

Slika 12 prikazuje mikrostruktura četinjača koja se sastoji se od vertikalno usmjerenih traheida i radijalno usmjerenih parenhimnih stanica.



**Slika 12. Mikrostruktura četinjača, [5]**

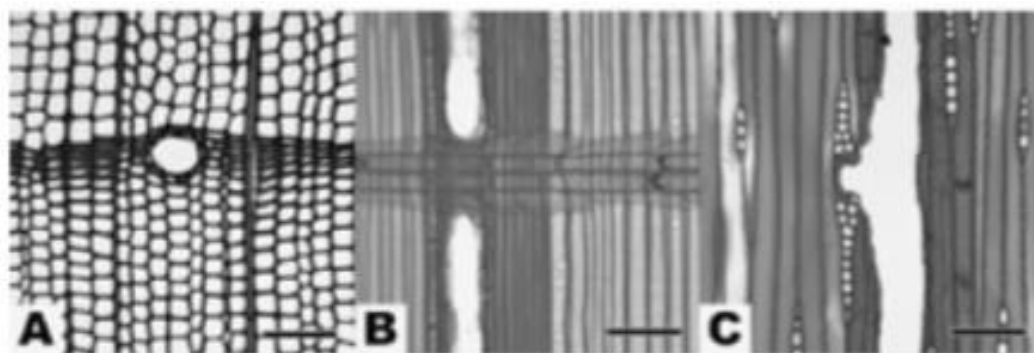
Traheide čine gotovo cijeli volumen u drvu četinjača (preko 90%) jer je njihova uloga provođenje vode. Imaju tanju staničnu stijenku i veći lumen u ranom dijelu goda uspoređujući sa kasnim dijelom goda. Stanice imaju bolju mehaničku otpornost kada su deblje stijenke i manjeg lumena. Većina traheida je istog oblika a u poprečnom presjeku mogu biti kvadratnog ili pravokutnog oblika, slika 13.



**Slika 13. Poprečni presjek kroz drvo četinjače, [2]– oblik traheida**

Udio parenhimskih stanica je gotovo zanemariv i one su spremište organskih tvari. Neke vrste sadrže i smolnice ili smolne kanale. To su šupljine okružene parenhimskih stanicama koje proizvode smolu. Kod nekih vrsta mogu biti vidljive okom, a negdje su jako sitne.

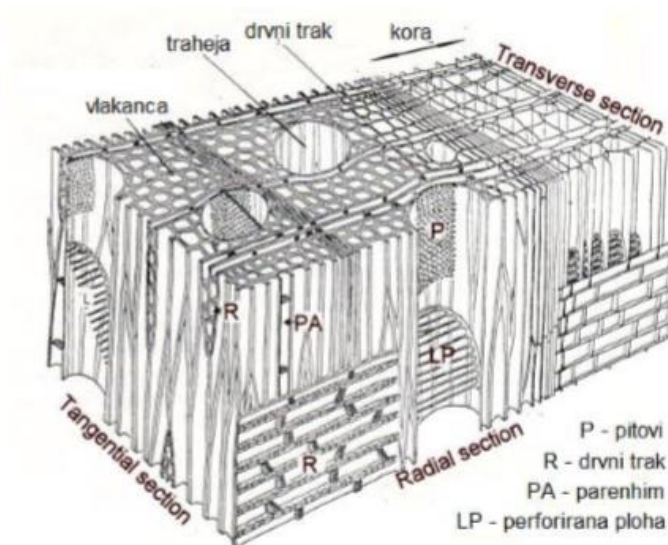
Na slici 14. prikazana je smolnica u aksijalnom, radijalnom i tangencijalnom presjeku kod vrste *Pseudotsuga mensiezii*.



**Slika 14. Smolnice kod vrste *Pseudotsuga mensiezii*, [2]  
A-poprečni presjek, B-radijalni presjek, C-tangencijalni presjek**

Drvni traci su radijalno usmjereni od srčike prema kori debla i sastoje se od parenhimskih stanica. Primarna uloga je skladištenje i transport vode i tvari. Njihova širina u pravilu nije veća od širine jedne stanice.

Za razliku od četinjača, listače imaju puno kompliciraniju mikrostrukturu, slika 15.



**Slika 15. Mikrostruktura drva listača, [6]**

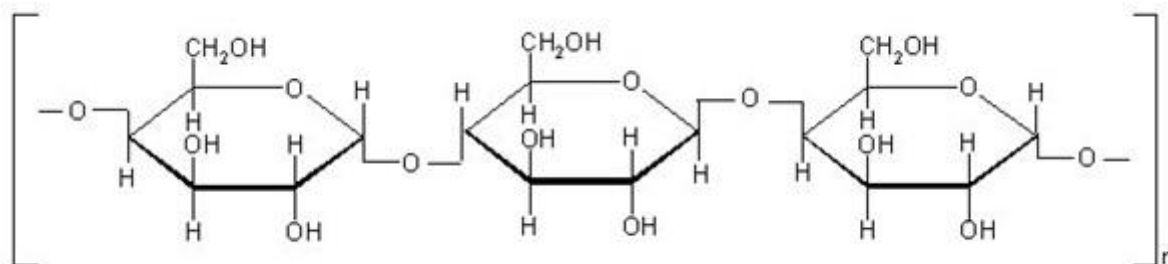
Aksijalni sustav građen je od vlaknastih elemenata (drevnih vlakanaca), traheja (pore) i traheida. Radijalni sustav je građen od međusobno različitih parenhimskih stanica.

Traheje ili pore su velike provodne stanice („cijevi“) kojima se povezuje gornji i donji dio drva vodom. One su glavni pokazatelj da se radi o listačama. Promjera su između 50 do 200  $\mu\text{m}$ , duljine od 100 do 1200  $\mu\text{m}$ , što je puno manje od traheida. Minimalno duplo dulje stanice od traheja su drvena vlakanca, s relativno debelom stijenkom i uskim lumenom. Funkcija drvnih vlakanaca je mehanička potpora. Aksijalne parenhimske stanice građene su od tanke stijenke i širokim lumenom. Njihova značajka je važna kod infekcije vrste drva. U nekim vrstama postoje i traheide. Drvni traci kod listača mogu doći u više oblika.

## 2.2. Kemijski sastav stanične stijenke

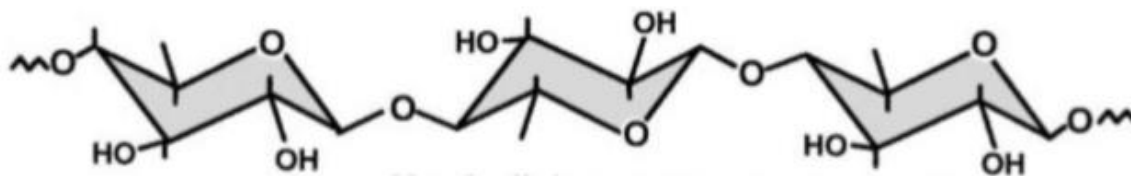
Suha drvena tvar stanične stijenke na elementarnoj razini sastoji se samo od tri kemijska elementa, ugljik ( 50% ), kisik ( 44% ), vodik ( 6% ) te anorganske tvari. Ti elementi spojeni zajedno stvaraju polimerne lance poput celuloze, hemiceluloze i lignina, te spojevi poput pektina i škroba. Upravo su ti lanci međusobno umreženi jako malim sadržajem ekstraktiva i anorganskih tvari tvore trodimenzionalni biopolimerni kompozit drvo.

Celuloza je bijela vlaknasta tvar bez okusa i mirisa, netopljiva u vodi i organskih otapalima. Najrasprostranjeniji je polisaharid i najrašireniji organski spoj na Zemlji. Građena je od dugih nizova međusobno povezanih molekula disaharida celobioze, od koje potpunom hidrolizom nastaje glukoza, slika 16. Ima visok stupanj polimerizacije, najčešće oko 9 do 10 tisuća, uglavnom visokokristalična u drvu te netopiva u većini otapala. U gotovo čistom stanju se nalazi se u pamuku dok je u drvu ima između 40% i 50%.



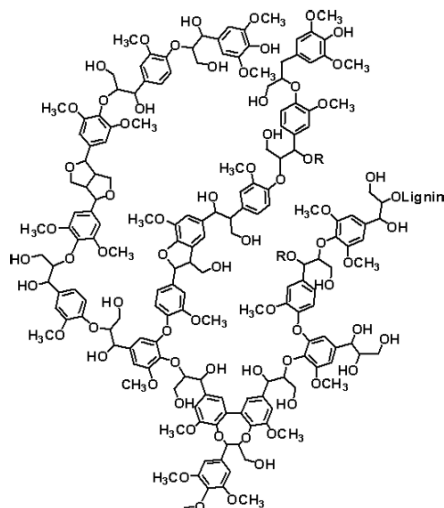
Slika 16. Struktura celuloze, [7]

Na slici 17. prikazana je hemiceluloza, poznata još kao i polioza. Hemiceluloza je razgranati polimer s puno manjim stupnjem polimerizacije, između 100 i 200. Sastoji se od različitih tipova monomernih šećera kao što su glukoza, ksiloza, galaktoza, manoz, ramnoza i arabinoza. Lako su topljive u lužinama. Kod četinjača se nalaze od 7% do 14%, a kod listača od 19 do 26%.



Slika 17. Struktura hemiceluloze, [8]

Slika 18. prikazuje strukturu lignina. Lignin je kompleksni polimer aromatičnih alkohola poznatih kao monolignoli. Njegova osnovna uloga je povećanje krutosti i stabilnosti stanične stijenke. Maseni udio lignina kod četinjača iznosi između 25 i 35%, dok kod listača taj udio varira između 18 i 25%



**Slika 18. Struktura lignina, [9]**

Uz glavne polimerne lance mogu se javljati i pektin, škrob i proteini. Pektin je heterosaharid koji se nalazi u središnjoj lameli i u membrani graničnih tipova. Škrob je jedan od produkata fotosinteze, bjelkasti polisaharid od međusobno povezanih molekula D-glukoze u obliku sitnih zrnaca. Također se mogu javiti i ekstrahirane tvari koje su nastale ekstrakcijom iz biljnih sokova. Imaju primjenu u medicini, farmaciji, kod premazivanja ( smole ) i dr. Sastoje se od masti, masnih kiselina, fenola, terpentina i drugim organskih tvari. Udio anorganskih tvari u drvu se određuje mjerenjem mase pepela koji preostane nakon izgaranja drva na temperaturi od  $575 \pm 25$  °C. Pepeo se sastoji od mineralnih soli i drugih anorganskih tvari, a njihov udio je manji od 0,5% kod većine vrsta. Apsorbirani su u obliku iona iz tla te preko korijena, debla i grana dospjeli u sve dijelove biljke. Neki od njih imaju važnu ulogu tijekom rasta drva.



### 3. SVOJSTVA DRVA

U tehnička svojstva drva ubraja se fizikalna, kemijska, fizikalno-kemijska, termička, električna, akustična, optička i mehanička svojstva drva. Drvo je prirodni građevni materijal koji ima puno prednosti u odnosu na druge materijale.

#### 3.1. Fizikalna i kemijska svojstva drva

Živo drvo ima dovoljno vode da bude elastično i uspije izdržati udarce vjetra i vanjskih utjecaja. Tehničko drvo je mrtvo i primjenjuje se u suhom stanju. Slobodna voda (voda u lumenu) i vezana voda (voda unutar stanične stijenke) zajedno čine ukupnu vlagu u živom drvu. Sadržaj vlage ovisi o vrsti drva i gustoći. Gustoća predstavlja omjer mase i volumena. Računa se prema formuli:

$$\rho = \frac{m}{V}, \text{ g/cm}^3 \quad (1)$$

Gdje je:  $\rho$ - gustoća,  $\text{g/cm}^3$

$m$ - masa uzorka, g

$V$ -volumen uzora,  $\text{cm}^3$

Gustoća drva je obrnuto razmjerna s poroznošću drva. Što je veća gustoća drva, to je manji volumen pora i obratno. Gustoća drva pri nekom udjelu vlage ( $w$ ) računa se prema izrazu (2), dok se gustoća drva u apsolutno suhom stanju određuje prema izrazu (3):

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w}, \text{ g/cm}^3 \quad (2)$$

Gdje je:  $m_w$  – masa kod nekog udjela vlage, g

$V_w$  – volumen kod nekog udjela vlage,  $\text{cm}^3$

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0}, \text{ g/cm}^3 \quad (3)$$

Gdje je:  $m_0$  – masa u apsolutno suhom stanju, g

$V_0$  – volumen u apsolutno suhom stanju,  $\text{cm}^3$

Osim vrste, na gustoću znatno utječe građa drva, pozicija u stablu, stanište, položaj u sastojini, starost stabla, udjeli celuloze, lignina, hemiceluloze idr.

Ako je izmjerena masa uzorka drva u vlažnom stanju ( $m_1$ ) a zatim izmjerena masa istog uzorka nakon sušenja u peći na  $105\text{ }^\circ\text{C}$  ( $m_2$ ), relativna vlažnost drva definirana je izrazom:

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \text{ u } \% \quad (4)$$

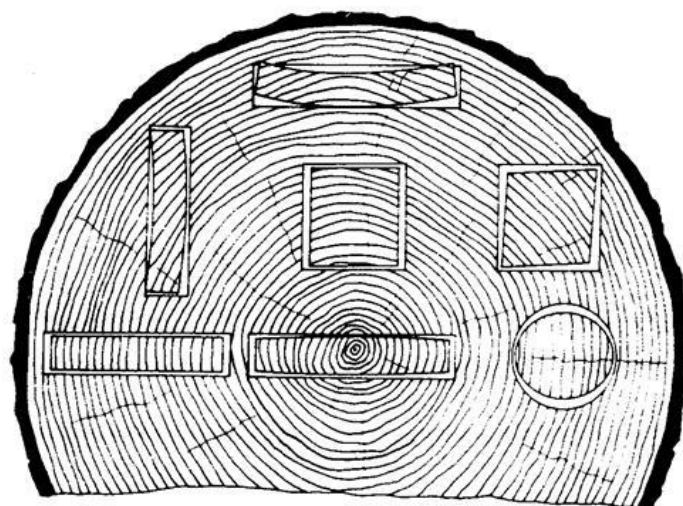
Pri čemu je W-sadržaj vlage u drvetu, %

$m_1$ -masa drva kod nekog sadržaja vlage, g.

$m_2$ - masa drva u apsolutno suhom stanju, g.

Drvo je higroskopan materijal, što znači da će gotovo poput spužve, dobiti ili izgubiti vlagu iz zraka na temelju uvjeta iz okoline. Bubrenje je naziv za pojavu rasta volumena drva uglavnom proporcionalno s dobivenom vodom. Porastom volumena gubi se kvaliteta zvuka, jasnoća i boja tonova. Suprotno toj pojavi je utezanje drva. Utezanje drva je smanjenje volumena, gdje dolazi do smanjenja vlage ispod točke zasićenja vlakanca. Točka zasićenja je granica između slobodne i vezane vode. Utezanje drva pri sušenju ovisi o vrsti drva, gustoći, brzini sušenja, veličini, obliku i položaju u odnosu na godove, slika 19. Bubrenje i utezanje su veliki nedostaci drva koji onemogućavaju širu tehničku primjenu drva.

Općenito udio vlage utječe na biološka svojstva, toplinsku i električnu vodljivost te mehanička svojstva.



**Slika 19. Utezanje i distorzija drva pri sušenju, [2]**

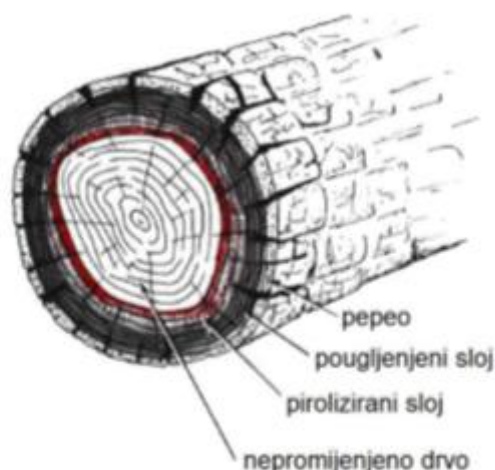
Drvo je organska tvar i zato je izloženo biološkoj razgradnji, koja ograničava njegovu prirodnu trajnost. Najčešći uzročnici propadanja drva su bakterije, plijesni, gljive, kukci i različiti vodeni organizmi. Prema prirodnoj trajnosti, drvo dijelimo u tri skupine: vrlo otporno drvo, otporno drvo i malo otporno drvo. Trajnije je ono drvo, koje se siječe u zimsko doba. Tada je udio vlage u drvu manji, pa je i pohrana hrane manja, a niske temperature onemogućavaju razvoj gljivica i kukaca. Najviše topivih organskih tvari kojima se kukci prehranjuju sadrži ono drvo koje se siječe u kasno ljeto i u jesen. U Hrvatskoj u vrlo otporne vrste možemo smjestiti bagrem, kesten i hrast. U otporne bor, jela, smreka i jasen. A slabo otporne su bukva i lipa.

Drvo u suhoj okolini i skroz uronjeno u vodu ima životni vijek trajanja. Najmanju otpornost ima drvo u površinskim slojevima zemlje ili malo iznad nje. Razlog toga je velika aktivnost zraka i vlage što ubrzava razvoj gljivica i ostalih bakterija, slika 20. Zato je potrebno primijeniti odgovarajuću zaštitu da bi produljili vijek trajanja drva. Konstrukcijska zaštita govori o tome da proizvod treba pravilno konstruirati i ugraditi da bi se osiguralo brzo i nesmetano otjecanje vode. Dubinska zaštita se ostvaruje različitim premazima kako bi se osigurala površina.



**Slika 20. Gljivice na poprečnom presjeku drva, [10]**

Kad na drvo djeluje visoka temperatura, vodena para i ostali plinovi isparavaju i u dodiru s otvorenim plamenom gore. Grijanjem se drvo prvo isušuje, a vlaga izlazi van. Nakon toga nastaju nezapaljivi ugljični dioksid (70%) i zapaljivi ugljični monoksid (oko 30%). Iznad 250 °C raste količina zapaljivih plinova te pri svi višim temperaturama dolazi do njihovog samozapaljenja. Izgaranjem se na površini stvara pougljeni sloj koji štiti unutarnju masu drva od toplinskog razaranja, slika 21. Nesagorjeli ostatak, koji u sebi sadrži različite mineralne sastojke, nazivamo pepelom.



**Slika 21. Slojevi nastali pri izgaranju drva, [11]**

Drvo je u odnosu na druge materijale slab vodič topline. To ga čini izvrsnim izolacijskim materijalom. Poroznost drva značajno utječe na izolacijska svojstva drva. Što je drvo poroznije to je koeficijent toplinske vodljivosti manji. Koeficijent toplinske vodljivosti ovisi smjeru vlaknaca. Toplinska vodljivost drva u smjeru vlaknaca je oko dva puta veća od one što je okomita na vlaknaca.

U tablici 1. prikazana je vrijednost toplinske vodljivosti za različite vrste tehničkih materijala.

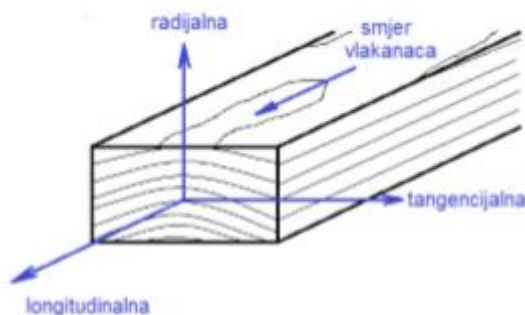
**Tablica 1. Usporedne vrijednosti toplinske vodljivosti drva i drugih materijala**

MATERIJAL	četinjače	listače	opeka	beton	čelik	aluminij
KOEF. TOPL.VODLJIVOSTI, W/ (m×K)	0,13	0,17	0,75	1,5	45	237

### 3.2. Mehanička svojstva materijala

Drvo je ortotropan materijal i za njega je karakteristično da ima veliku varijabilnost svojstava. Mehanička svojstva ovise od anatomskoj građi drva, pa je tako moguće imati različita svojstva unutar iste vrste, čak i unutar istog debla ili goda. Zato je kod ispitivanja uvijek potrebno je navesti položaj ispitnih u odnosu na karakteristične presjeke drva (longitudinalno, radijalno, tangencijalno). Udio vode također utječe na mehanička svojstva. Mehanička svojstva drva najviše ovise o: vrsti i građi drva, gustoći drva, smjeru vlaknaca, sadržaju vode u drvu, trajanju opterećenja, temperaturi i vremenu uporabe.

Slika 22. prikazuje karakteristične presjeke drva i tri osnovne osi drva



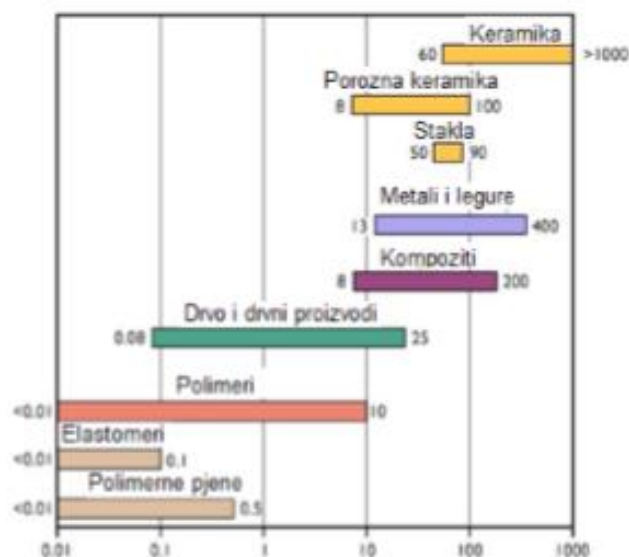
**Slika 22. Tri osnovne osi drva, [12]**

### 3.2.1. Modul elastičnosti

Youngov modul elastičnosti ili samo modul elastičnosti predstavlja mjeru krutosti materijala i jednak je omjeru vlačnog naprezanja i linijske vlačne deformacije. Jedan je od najvažnijih i najviše određenih mehaničkih svojstava drva. Ovisi o građi materijala (strukтури), vanjskim uvjetima (udio vlage, temperatura, kemijski tretman, način opterećenja) i usmjerenosti mikrostrukture (longitudinalno, radijalno i tangencijalno).

Prosječna vrijednost modula elastičnosti za drvo iznosi od 3 do 25 GPa. Ako se određuje modul elastičnosti u longitudinalnom pravcu (EL), vrijednosti su 10 do 20 puta više od modula elastičnosti u radijalnoj (ER) i tangencijalnoj osi (ET)

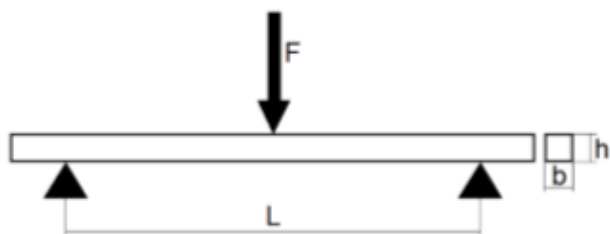
Na slici 23. su prikazane vrijednosti modula elastičnosti za drvo, u odnosu na druge tehničke materijale.



**Slika 23. Vrijednosti modula elastičnosti za osnovne skupine tehničkih materijala u GPa, [13]**

Ako su uzorci opterećeni na savijanje, govori se o savojnom modulu elastičnosti. Najčešće se ispitivanja provode na univerzalnoj kidalici prema ISO ili EN normama. Savojna sila može djelovati u jednoj ili dvije točke, pa se govori o ispitivanju na savijanje u tri ili četiri točke.

Na slici 24. prikazana je metoda savijanja u tri točke.



**Slika 24. Određivanje savojnog modula elastičnosti metodom u tri točke, [12]**

Vrijednost modula elastičnosti računa se prema izrazu:

$$E = \frac{L^3(F_2 - F_1)}{4bt^3(a_2 - a_1)}, \text{ N/mm}^2 \quad (5)$$

Gdje je : L- razmak između oslonaca

b- širina uzorka, mm

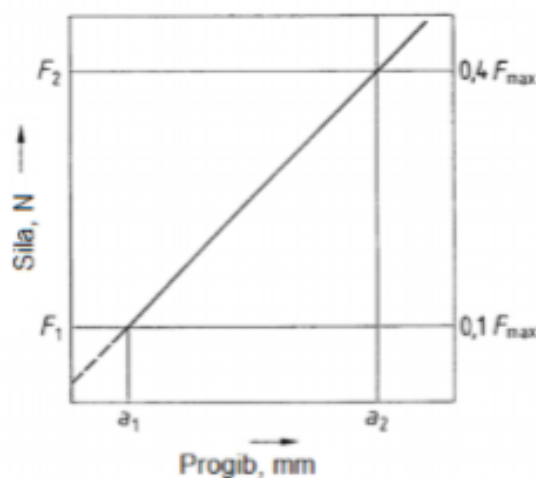
t- visina uzorka, mm

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

$$F_1 \approx 0.1F_{max} \text{ i } F_2 \approx 0.4F_{max}$$

$F_{max}$ - maksimalna sila, N

$a_2 - a_1$  – prirast progiba ( odgovara razlici  $F_2 - F_1$ ), slika 25.



Slika 25. Linearno područje krivulje sila-progib, [12]

### 3.2.2. Vlačna čvrstoća

Čvrstoća drva na vlak je najveći otpor nastao uslijed djelovanja sile istog pravca ali suprotnog smjera kojeg nastoje razvući paralelno ili okomito na smjer vlakanca. Jednadžba vlačne čvrstoće:

$$R_m = \frac{F_{max}}{A_0}, \text{ N/mm}^2 \quad (6)$$

Gdje je:  $F_{max}$ - maksimalna sila loma, N

$A_0$ - površina presjeka na mjestu loma, mm<sup>2</sup>

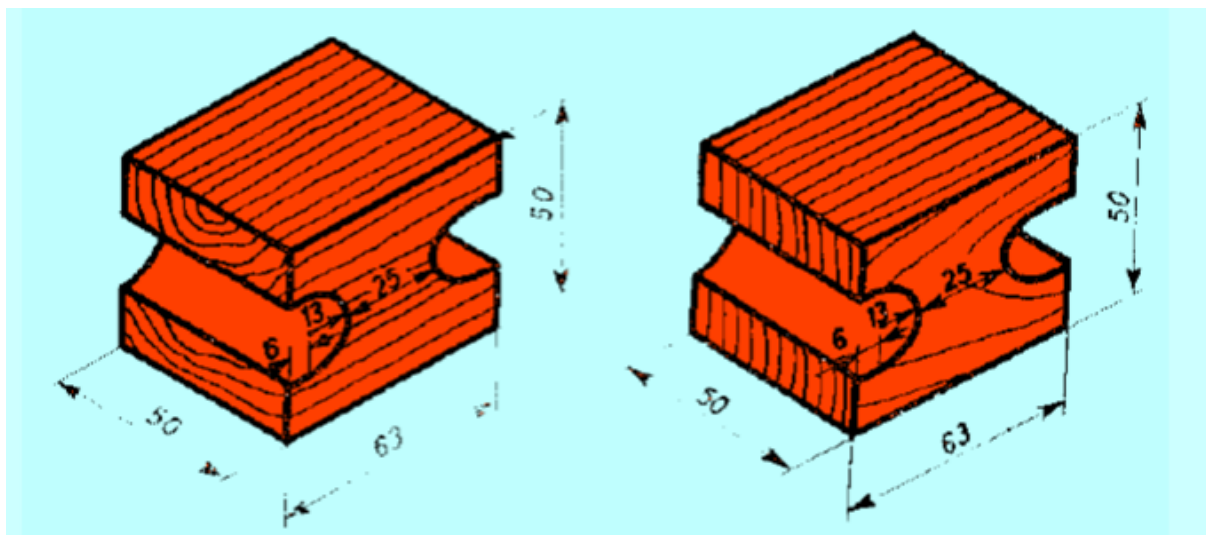
Vlačna čvrstoća drva se razlikuje ovisno o djelovanju sile pa može biti paralelna i okomita na vlakanca. Čvrstoća na vlak u smjeru vlakanca znatno je veća od one okomita na vlakanca.

Čvrstoća na vlak okomito na vlakanca u odnosu na čvrstoću na vlak u smjeru vlakanca kreće se u granicama, prikazani u tablici 2.

**Tablica 2. Odnos između vlačne čvrstoće okomito na smjer i u smjeru vlakanaca**

	tangencijalno	radijalno
Za četinjače	0,025... 0,030	0,040... 0.050
Za listače	0,040... 0,065	0,070... 0.100

Na slici 26. možemo vidjeti uzorke za ispitivanje otpornosti vlačne čvrstoće.



**Slika 26. Uzorci za ispitivanje vlačne čvrstoće, [14]**

### 3.2.3. Tlačna čvrstoća

Čvrstoća na tlak je najveće naprezanje koje se javlja ako na tijelo, smješteno na horizontalnoj podlozi, djeluje sila okomito na podlogu koja ga nastoji stlačiti, smrviti ili zgnječiti. Tlačna čvrstoća računa se prema izrazu:

$$\sigma_{pm} = \frac{F_{pm}}{A_0}, \text{ N/mm}^2 \quad (7)$$

Gdje je:  $F_{pm}$ - maksimalna tlačna sila, N

$A_0$ - površina presjeka na mjestu loma, mm<sup>2</sup>

Čvrstoća na tlak u smjeru vlakanaca dostiže samo do 50% vrijednosti čvrstoće na tlak u smjeru vlakanca. Čvrstoća na tlak drva u smjeru vlakanaca minimalno je 3 puta veća od čvrstoće na tlak okomito na vlakanca. Slične se dimenzije i oblici epruveta za ispitivanje tlačne čvrstoće u smjeru vlakanaca i ispitivanje tlačne čvrstoće okomito na vlakanca.

Kod čvrstoće na tlak neke vrsta drva prije granica izvijanja pucketaju te tako upozoravaju na predstojeću opasnost. Pucketanje je jače što je drvo suhlje i temperatura viša. Ovo svojstvo je važno u rudarstvu, građevini te kod željezničkih pragova.



### 3.2.4. Smična čvrstoća

Čvrstoća na smicanje je otpor kojim se drvo opire vanjskoj sili koja nastoji pomaknuti (kliznuti) njegove dijelove paralelno s vlakancima ili okomito na taj smjer. Smična čvrstoća računa se prema izrazu:

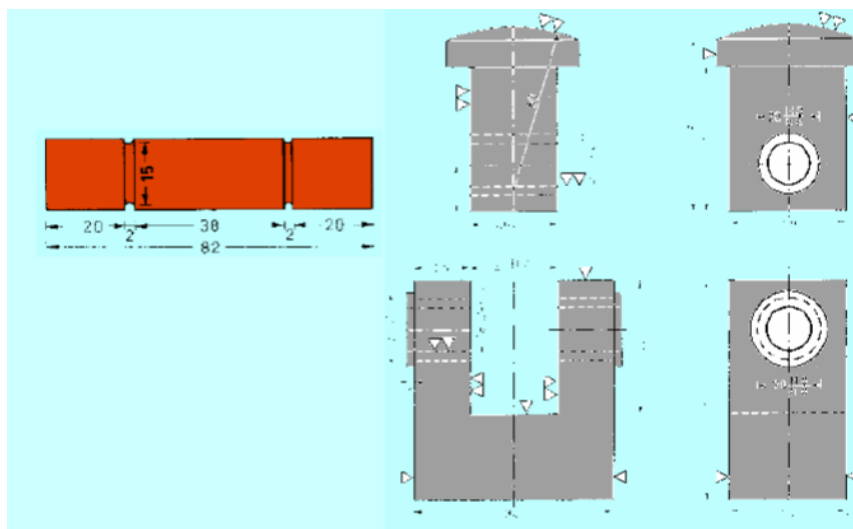
$$R_{m\tau} = \frac{F_{max}}{b \times l}, \text{ N/mm}^2 \quad (8)$$

Gdje je :  $F_{max}$ - maksimalna sila, N

$b$ ,  $l$ - širina i duljina uzoraka, mm

Naprezanje smicanja nastaje ako u ravnini smicanja djeluju posmične sile. Površina smicanja može biti uzdužna, poprečna i dijagonalna. Smjer djelovanja posmičnih sila kod uzdužnih površina smicanja može biti u smjeru vlakanaca ili okomito na vlakanca, a kod frontalne površine smicanja taj smjer može biti paralelno s godovima ili okomito na godove.

Na slici 27. prikazani su uzorak i naprava za ispitivanje smične čvrstoće prema DIN normi



**Slika 27. Uzorak i naprava za ispitivanje čvrstoće na smicanje prema DIN-u, [14]**

Potrebno je razlikovati čvrstoću na smicanje u smjeru vlakanaca, kod koje je površina smicanja tangencijalna (kut između vlakanaca i ravnine smicanja je  $0^\circ$ ) ili radijalna (kut između vlakanaca i ravnine smicanja je  $90^\circ$ ) i čvrstoća za smicanje okomito na vlakanca, kod koje je ravnina smicanja paralelna s poprečnim presjekom. Smična čvrstoća okomita na vlakanca puno je veća od smične čvrstoće u smjeru vlakanaca.

### 3.2.5. Savojna čvrstoća

Čvrstoća na savijanje je najveće unutarnje naprezanje nekog produženog tijela, poduprtog na oba kraja ili učvršćenog samo na jednom kraju, koje se javlja ako na tijelo djeluje vanjska sila koja ga nastoji saviti i prelomiti. Savojna čvrstoća računa se prema:

$$R_{ms} = \frac{3F_{max} \times L}{2b \times h^2}, \text{ N/mm}^2 \quad (9)$$

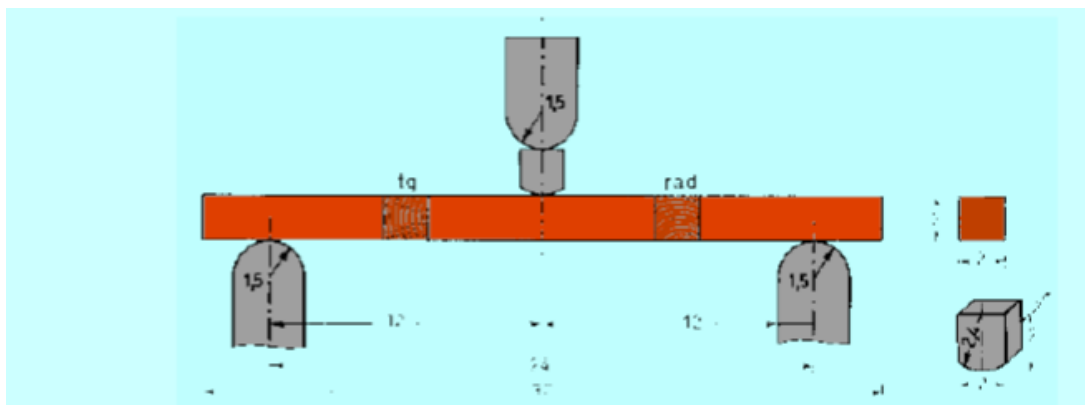
Gdje su: L- razmak između oslonca, mm

b- širina uzorka, mm

h- visina uzorka, mm

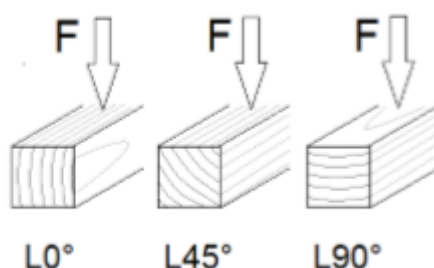
$F_{max}$  - maksimalna sila, N

Gornja polovica uzorka opterećena je tlačno, donja vlačno, a sredina uzorka je neutralna. Čvrstoća za savijanje ispituje se na malim gredicama pravokutnog presjeka, dužina gredice jednaka ili veća od  $18 \times h$  ( $h$ = visina uzorka). uzorci trebaju biti posve čisti, bez ikakvih grešaka. Gredica je poduprta na dva kraja, a razmak oslonaca je jednak ili veći od  $15 \times h$  ( $h$ =visina gredice), slika 28. Kod anizotropnih materijala poput drva, linearna raspodjela naprezanja vrijede samo do granice proporcionalnost.



**Slika 28. Uzorak za ispitivanje čvrstoće na savijanje prema UNI-u [14]**

Vrijednost savojne čvrstoće ovisi o usmjerenosti strukture. Najviša vrijednost je u longitudinalnom smjeru. Kod nekih vrsta drva savojne čvrstoće ovisi i o kutu koji zatvaraju savojna sila i linije goda. Vrijednosti savojne čvrstoće mjere se pod kutem od  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ , slika 29.



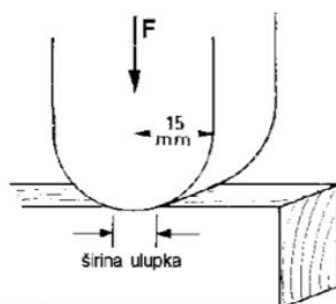
**Slika 29. Položaj godova u odnosu na smjer savojne sile, [12]**

### 3.2.6. Tvrdoća drva

Tvrdoća drva je otpor, što ga drvo suprostavlja prodiranju nekog drugog tvrdog tijela u njegovu površinu. Drvo je anizotropno tijelo, treba razlikovati poprečnu, tangencijalnu i radijalnu čvrstoću. Tvrdoća uglavnom ovisi o vrsti drva, gustoći, omjeru ranog i kasnog drva u svakom pojedinom godu i udjelu vlage u drvu. Razlike u tvrdoći između vrsta, ali i unutar vrste čak i unutar istog debla mogu biti velike. Tvrdoća drva veća je na poprečnom presjeku nego na radijalnom i tangencijalnom presjeku. Tvrdoća je jedan od važnijih pokazatelja kvalitete drva.

Postoji više različitih metoda za ispitivanja tvrdoće gdje tvrdi materijal prodire posrednim posredstvom djelovanja sile ili trenutnim posredstvom udarca.

Metodom Chalais - Meudon u drvo se utiskuje metalni nagaravljeni cilindar promjera 30 mm silom od 1000N PO 1cm širine probe, slika 30.



**Slika 30. Metoda za određivanje tvrdoće prema Chalais – Meudon-u, [15]**

Prilikom ispitivanja europskih vrsta najviše se primjenjuje Brinell-ov način ispitivanja, slika 31. Metodom Brinell mjeri se utiskivanjem čelične kuglice promjera 10 mm u drvo konstantnom silom od 500 N (mekša drva) ili 1000 N (tvrđa drva), te se po djelovanju sile od

30 s mjeri srednji promjer ulupka nastalog u površini drva s točnošću od 0,1 mm. Tvrdoća se računa jednadžbom :

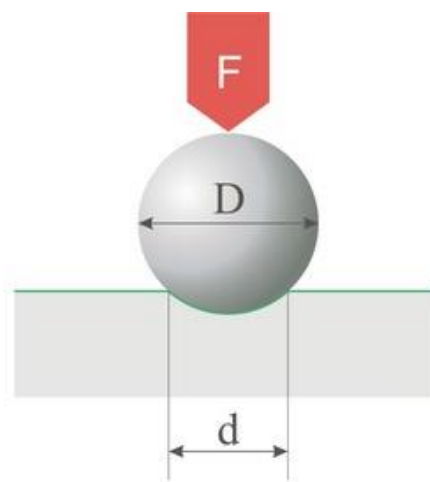
$$H_B = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (10)$$

Gdje je:  $H_B$ - tvrdoća po Brinellu, N/mm<sup>2</sup>

F- sila od 500 N ili 1000 N

D- promjer kuglice- 10mm

d- promjer otiska, mm



**Slika 31. Prikaz metode mjerenja tvrdoće po Brinellu, [16]**

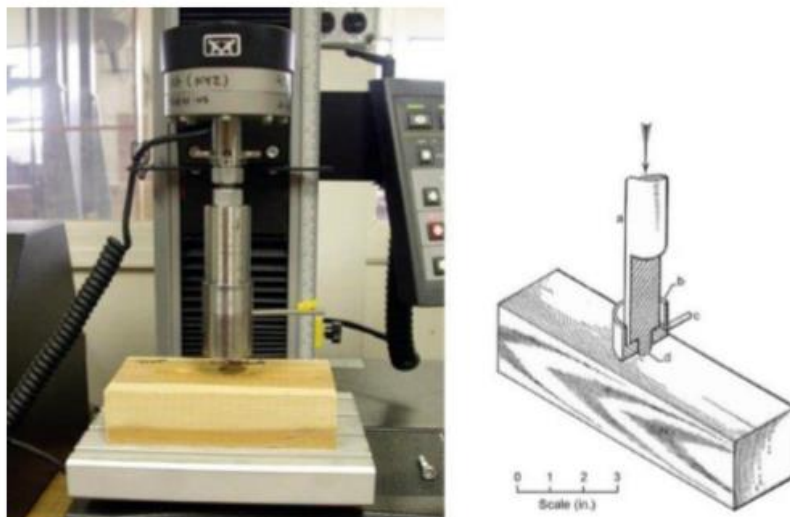
Austrijski znanstvenik Gabriel Janka modificirao je Brinell-ovu metodu ispitivanja tvrdoće drva, slika 32. Mjerenje tvrdoće po Janki pouzdaniji je kod težih vrsta drva. U drvo se utiskuje čelična kuglica promjera 11,284mm, a broj tvrdoće određen je silom potrebnom da se ta kuglica utisne u drvo do polovice promjera 5,624 mm jer je u tom trenutku tlocrtna površina kalote 1 cm<sup>2</sup>. Vrijednost tvrdoće po Janki računa se prema izrazu:

$$H_j = K \times F, N \quad (11)$$

Gdje je:  $H_j$  - tvrdoća po Janki, N

K – koeficijent ovisan o dubini prodora kuglice

F – sila utiskivanja na propisanu dubinu, N

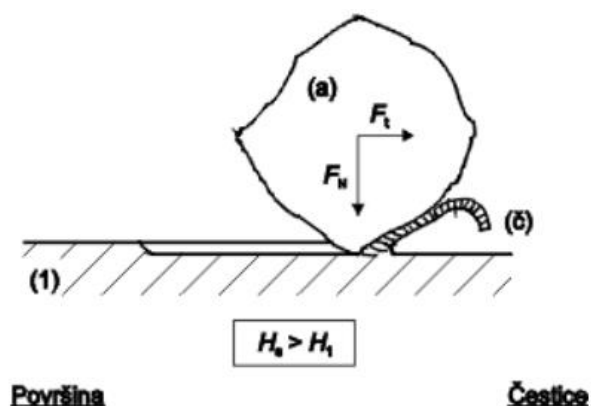


Slika 32. Uređaj za ispitivanje tvrdoće drva metodom po Janki, [17]

### 3.2.7. Otpornost na trošenje

Otpornost na trošenje ovisi o: vrsti drva, građi drva, gustoći drva, presjeku, kemizmu, sadržaju vode, načinu obrade površine drva. Što je veći udio celuloze, hemiceluloze i lignina, to je veća tvrdoća drva. Otpornost na trošenje i tvrdoća u uskoj su vezi. Otpornost protiv trošenja je svojstvo drva da se opire postepenom narušavanju svoje površine uslijed djelovanja vanjskih mehaničkih sila. Najbolja metoda za ispitivanje otpornosti je otpornost na abraziju. Abrazijsko trošenje je trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Najčešće se ispituje na taber abrader uređaju.

Na slici 33. je prikazano mikrorezanje materijala tvrdom abrazivnom česticom.



Slika 33. Abrazijsko trošenje, [18]

Poprečni presjek (P) ima najveću otpornost na abraziju, dok se radijalni presjek (R) troši malo više od tangencijalnog (T).

### 3.2.8. Žilavost drva

Žilavost je mjera za duktilnost. Žilavost je sposobnost materijala da plastičnom deformacijom razgradi naprezanja i na taj način povisi otpornost materijala na krhki lom.

Čimbenici koji utječu na žilavost su: temperatura, kemijski sastav, mikrostruktura i lomna žilavost. Mjera za žilavost materijala je udarni rad loma a ispituje se Charpyjevim batom, koji se računa prema izrazu:

$$KU (KV) = G (h_1 - h_2), J \quad (12)$$

Gdje su: G – težina, N

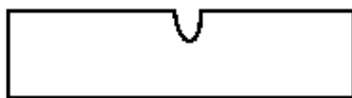
$h_1$ - početna visina bata, m

$h_2$ - visina bata nakon loma epruvete, m

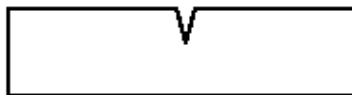
Da bi se moglo ispitivati tom metodom potrebna je izrada uzoraka određenog oblika i veličine propisane standardom. Ispitni uzorak može biti sa U ili V zarezom, slika 34. Ispitni se uzorak ispituje jednim udarcem brzinom od 5 do 5,5 m/s, slika 35.

Žilavost je važna kod dijelova koji su izloženi izrazito dinamičkom (udarnom) opterećenju.

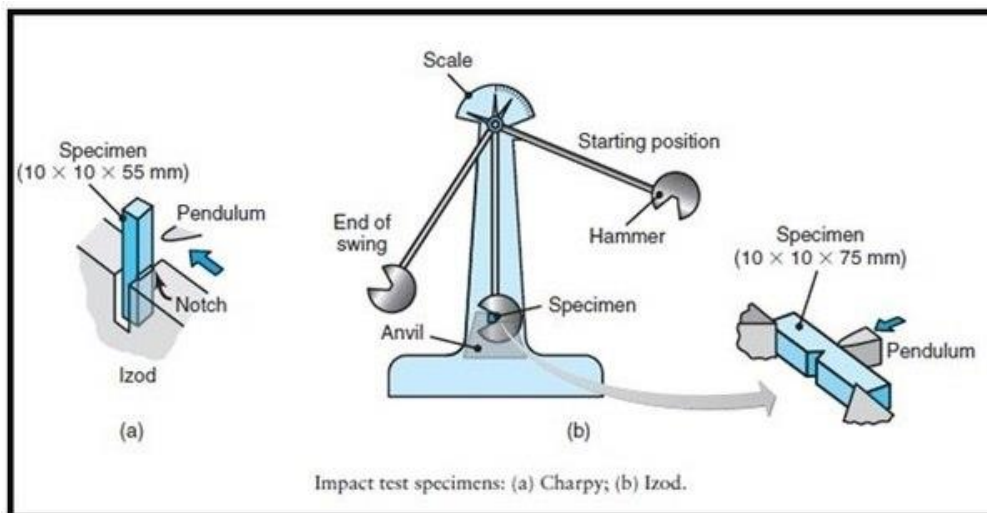
Uzorak s U-zarezom



Uzorak s V-zarezom



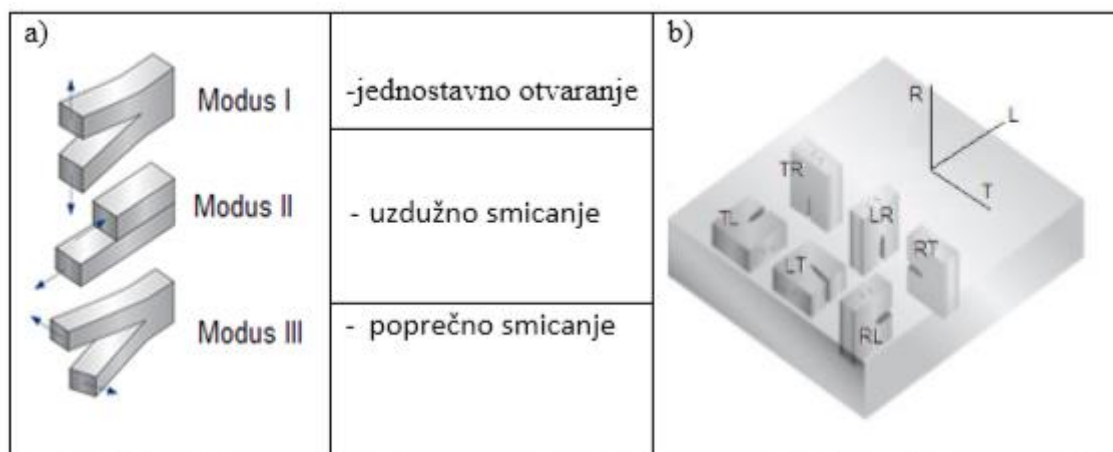
Slika 34. Ispitni uzoraci sa U i V zarezom



Slika 35. Ispitivanje žilavosti Charpyjevim batom, [20]

Lomna ili pukotinska žilavost je kritična veličina faktora intezivnosti naprezanja na vrhu već postojeće pukotine, koja izaziva daljnje širenje te iste pukotine. Ona se uvodi jer udarni rad loma nije uvijek dovoljno dobar pokazatelj žilavosti materijala. Pomoću lomne žilavosti možemo odrediti koliko je konstrukcija statički opterećena sigurna od loma.

Općenito pukotina se može otvoriti na tri načina: jednostavno pucanje, uzdužno pucanje i poprečno pucanje. Kod drva pukotina se može otvoriti, za svaku od tri karakteristične osi u dvije ravnine što daje 6 tipova pukotine, slika 36.



Slika 36. Tri osnovna načina otvaranja pukotine prema Irwinu (a) i šest mogućih sustava otvaranja pukotine u drvu (b) [21]

## 6. EKSPERIMENTALNI DIO

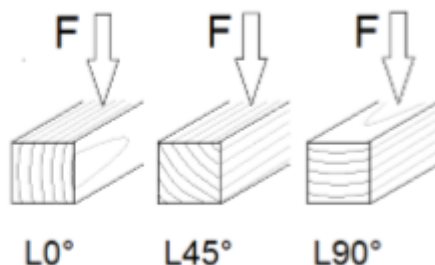
### 6.1. Cilj rada

Cilj rada je odrediti savojni modul elastičnosti za drvo hrasta lužnjaka u longitudinalnom smjeru. Kako je kod nekih vrsta drva modul elastičnosti u longitudinalnom smjeru ovisan o kutu između savojne sile i linije goda, ispitivanje je provedeno za tri različita kuta -  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ . Ispitivanje je provedeno metodom savijanja u tri točke, a dobiveni rezultati statistički obrađeni.

Na temelju dobivenih rezultata donijeti odgovarajuće zaključke.

### 6.2. Materijal za ispitivanje.

Uzorci za ispitivanje savojnog modula elastičnosti izrezani su iz drva hrasta lužnjaka. Uzorci su bili dimenzija  $6 \times 6 \times 86 \text{ mm}$ . Svi uzorci su izrezani u longitudinalnom smjeru iz vanjskog dijela srčevine, gdje je bila najmanja zakrivljenost godova. Na slici 37. prikazan je položaj godova u odnosu na savojnu silu.

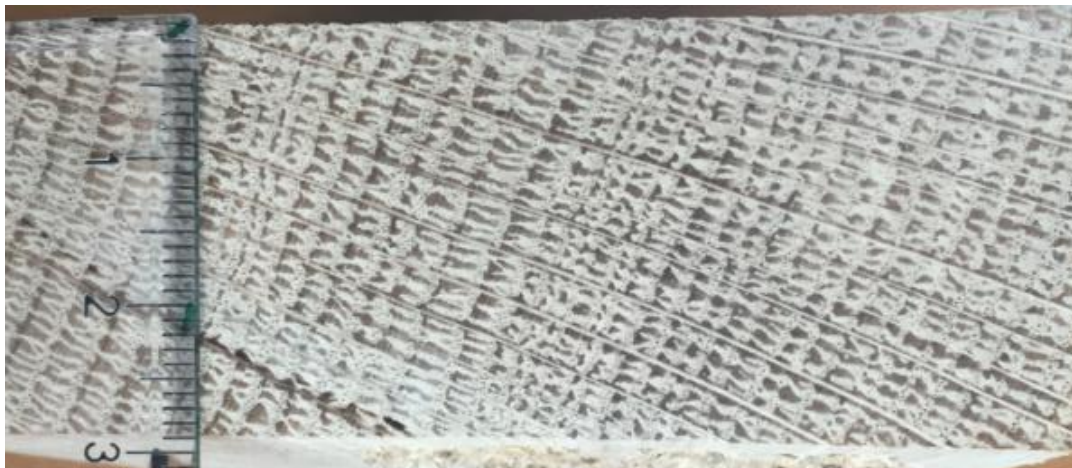


Slika 37. Položaj godova u odnosu na savojnu silu, [12]

Na uzorcima nije bilo vidljivih nepravilnosti niti grešaka u strukturi, a srednja širina godova je iznosila 2,1 mm.

Na slici 38. prikazan je poprečni presjek drva hrasta iz kojeg su izrezani uzorci i na kojem se jasno vide godovi i drvni traci.

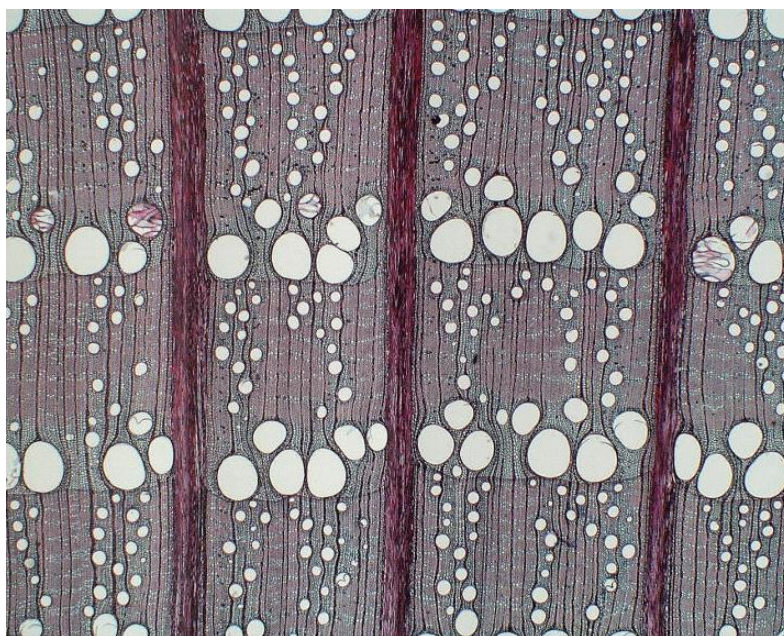




**Slika 38. Poprečni presjek hrasta lužnjaka iz kojeg su izrezani uzorci**

Na slikama 39, 40 i 41 vide se mikrostrukture karakterističnih poprečnih presjeka hrasta lužnjaka preuzete iz literature, [22].

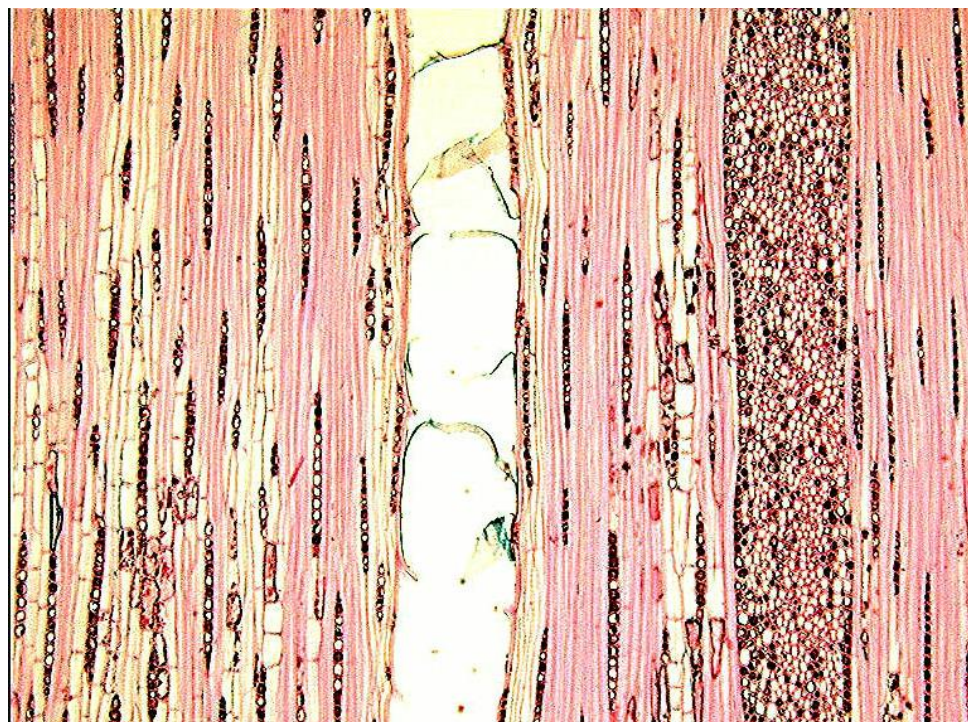
Na slici 39. prikazana je mikrostruktura hrasta u poprečnom presjeku, gdje se uočavaju velike okrugle stanice s debelom staničnom stijenkom i vrlo velikim lumenom, tzv. traheje. Traheje se nalaze u ranom dijelu goda. Na slici se vide 3 drvena traka koji se radijalno šire preko poprečnog presjeka.



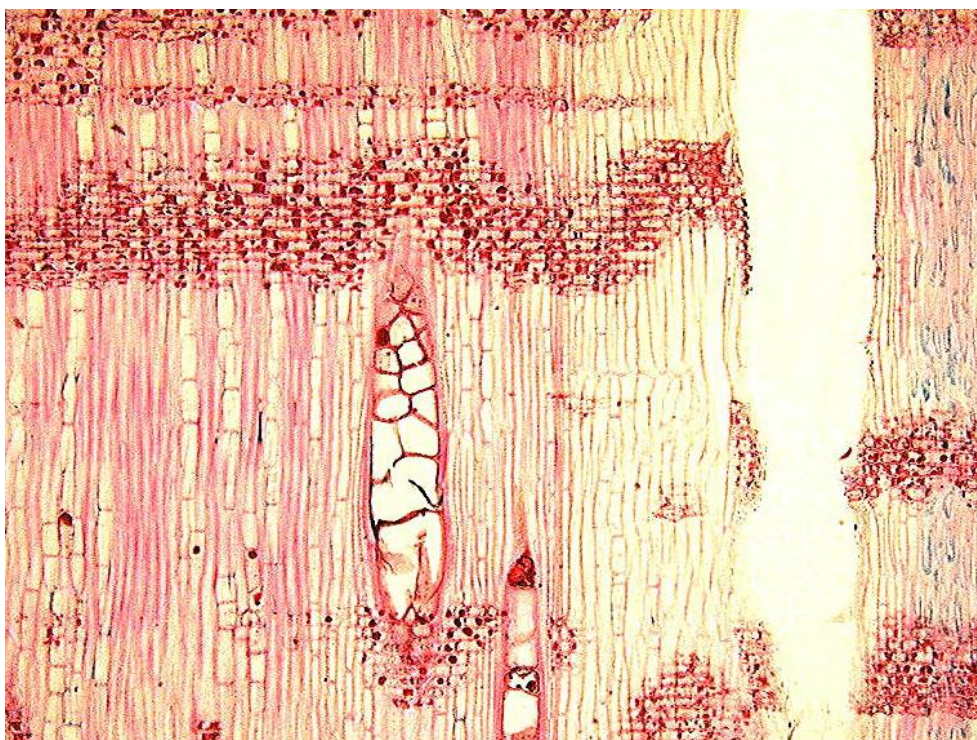
**Slika 39. Mikrostruktura poprečnog presjeka hrasta lužnjaka, [22]**

Na slici 40. prikazana je mikrostruktura tangencijalnog presjeka drva hrasta.

Slika 41. prikazuje mikrostrukturu radijalnog presjeka



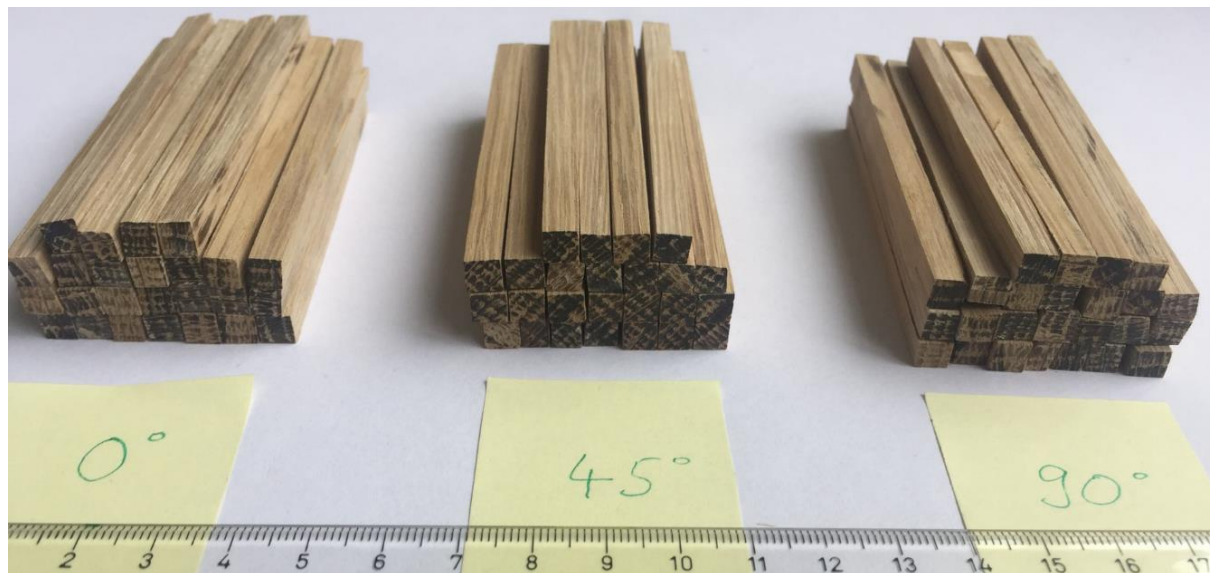
**Slika 40. Mikrostruktura tangencijalnog presjeka hrasta lužnjaka, [22]**



**Slika 41. Mikrostruktura radialnog presjeka hrasta lužnjaka, [22]**

### 6.3. Priprema uzoraka

Na slici 42. prikazani su uzorci prije provođenja ispitivanja. Uzorci su podijeljeni u 3 skupine prema položaju savojne sile u odnosu na liniju godova.



**Slika 42. 3 skupine izrezanih uzoraka**

A skupina- savojna sila je paralelna sa linijom godova ( $0^\circ$ ), B skupina- savojna sila okomita na godove ( $90^\circ$ ), C skupina- kut između sile i godova je  $45^\circ$

Uzorci su nakon rezanja brušeni na finom brusnom papiru da se s površine uklone eventualni tragovi rezne pile. Nakon toga su pomičnim mjerilom izmjerene dimenzije poprečnih presjeka svih uzoraka. Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 3.

**Tablica 3. Dimenzije poprečnih presjeka svih skupina uzoraka**

BROJ UZORAKA	A SKUPINA		B SKUPINA		C SKUPINA	
	h-visina uzorka,mm	b-širina uzorka,mm	h-visina uzorka,mm	b-širina uzorka,mm	h-visina uzorka,mm	b-širina uzorka,mm
1	5,23	5,44	5,5,7	5,49	6,15	5,96
2	5,64	5,49	5,86	5,55	5,95	5,90
3	5,87	5,96	5,82	5,81	5,93	5,78
4	5,89	5,61	5,44	5,87	5,97	5,51
5	5,14	5,69	5,80	5,63	5,77	6,12
6	5,27	5,97	5,82	5,89	5,93	5,57
7	5,39	5,44	5,57	5,96	6,01	5,88
8	5,73	5,93	5,58	5,87	5,77	5,92
9	5,58	5,85	5,90	5,50	5,65	5,80
10	5,21	5,66	5,99	5,61	5,96	5,90
11	5,72	5,71	5,61	5,24	5,66	5,74
12	5,57	5,98	6,14	5,74	5,81	5,72
13	5,91	5,47	5,80	5,76	5,74	5,53
14	5,60	5,93	6,06	5,96	6,00	5,71
15	5,36	5,87	5,87	5,93	6,02	6,00
16	5,87	6,28	5,96	5,33	5,74	6,02
17	5,77	5,97	5,41	5,87	6,11	6,10
18	5,54	5,89	5,59	5,29	5,88	6,09
19	5,69	5,77	5,53	5,90	5,76	5,73
20	5,88	5,93	5,72	5,73	6,04	5,96
21	5,74	5,97	5,35	5,55	5,60	5,48
22	5,48	5,64	5,48	5,12	6,04	6,03
23	5,41	5,82	5,61	5,59	6,03	5,97
24	5,80	5,47	5,52	5,67	5,92	5,75
25					5,53	5,78
26					5,46	5,37
27					5,45	5,86
8					5,67	5,37

#### 6.4. Rezultati savojnog modula elastičnosti

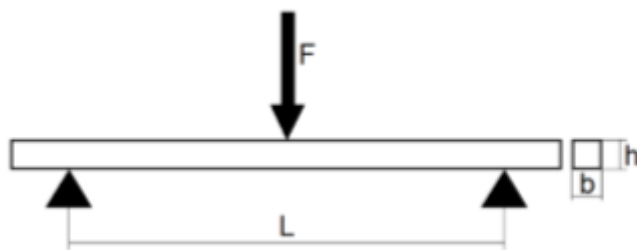
Ispitivanja su provedena u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, pomoću kidalice MESSPHYSIK BETA 50-5, prikazano je na slici 43. Tijekom ispitivanja mjerio se progib pomoću video ekstenzometra ME 46, MESSPHYSIK i savojna sila. Njihov odnos dobili smo iz dijagrama naprezanje - progib. Ispitivanje savojnog modula elastičnosti provodilo se na uzorcima metodom savijanja u tri točke. Metoda je shematski prikazana na slici 44. Na slici 45. vidi se ispitni uzorak na kidalici neposredno prije opterećenja.

Ukupno je ispitano 76 uzoraka, podijeljeno u tri skupine. Prva skupina (skupina A) bili su uzorci gdje je sila opterećenja paralelna s linijom godova. Druga skupina (skupina B) su uzorci gdje je sila opterećenja okomita na godove. Treća skupina (skupina C) je skupina uzoraka gdje je sila u odnosu na smjer godova pod kutem od  $45^\circ$ . Razmak između oslonaca mora biti 74 mm, promjer valjkastih oslonaca i valjka kojim se opterećuju uzorci je 10 mm, sila opterećenja od 6,3 kN te brzina 2,8 mm/min. Temperatura okoline bila je  $22\text{ }^\circ\text{C}$ , a vlažnost zraka 48%.

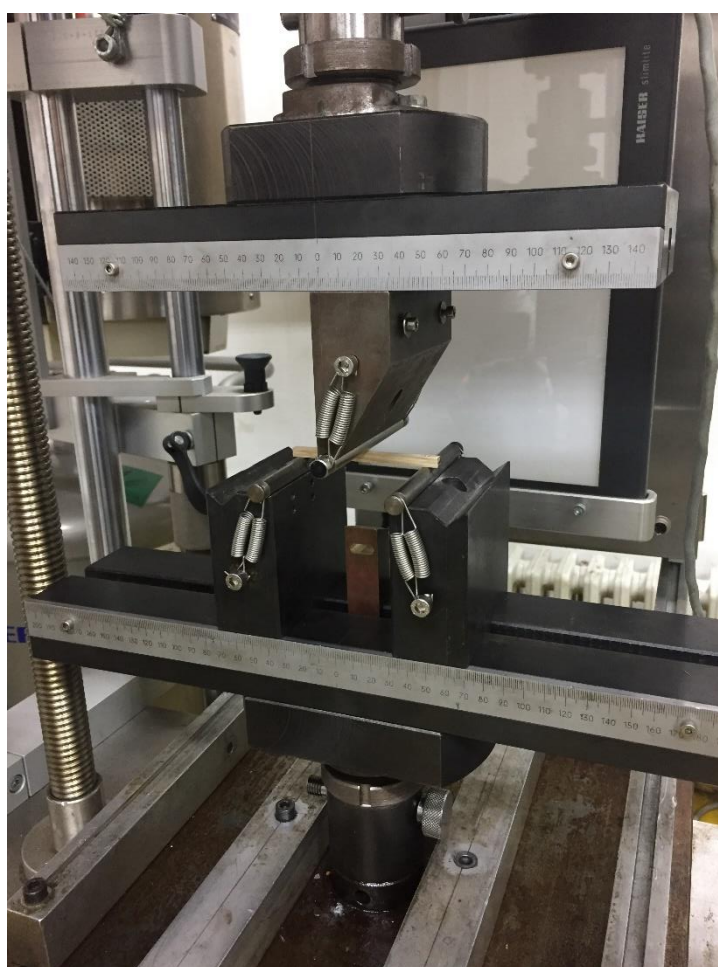
Ispitivao se svaki uzorak posebno, opterećenjem sve do loma. Rezultati ispitivanja su prikazani za svaku skupinu posebno.



**Slika 43. Kidalica MESSPHYSIK BETA 50-5 u laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku**



**Slika 44. Metoda savijanja u tri točke, [12]**



**Slika 45. Metoda savijanja u tri točke na kidalici**

### 6.4.1. Rezultati ispitivanja A skupine uzoraka

U ovoj seriji ispitivali su se uzorci gdje je sila opterećenja paralelna s tijekom godova. Iako je zakrivljenost godova dosta mala ipak to nisu ravne linije pa se može reći da ih sila tangira. Uz određenu rezervu može se reći da je kut između sile i smjera godova je  $0^\circ$ .

Na slici 46. prikazani su svi uzorci iz serije A nakon provedenog ispitivanja.



**Slika 46. Prva skupina (skupina A) uzoraka nakon ispitivanja**

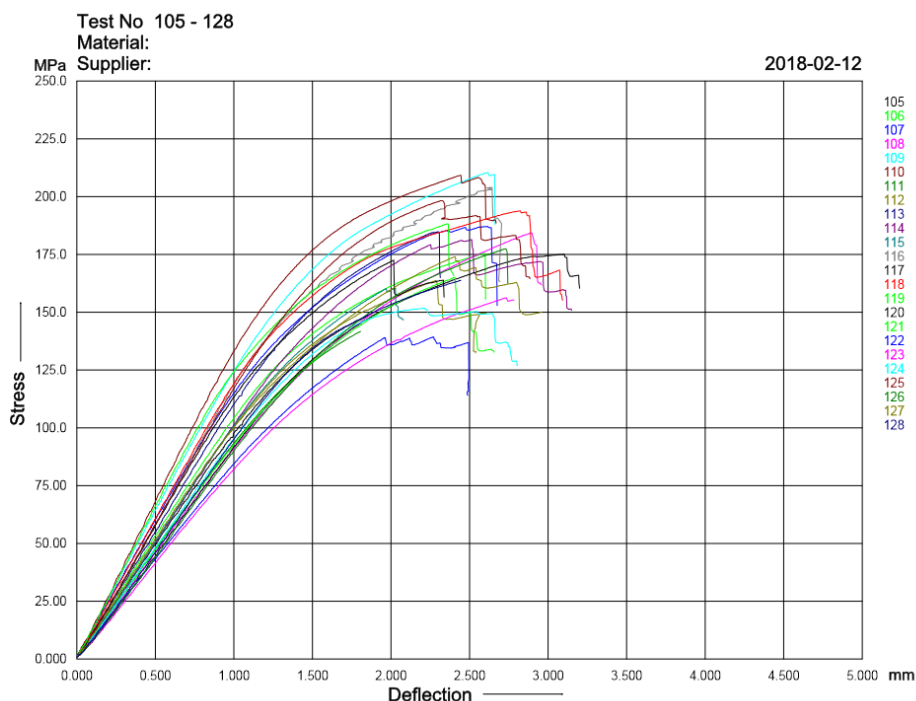
U sljedećim tablicama i dijagramima prikazani su rezultati ispitivanja. Oznake u tablicama i slikama su prikazani legendom u tablici 4.

**Tablica 4. Oznake veličina i mjernih jedinica**

Oznaka veličine	Naziv veličine	Mjerna jedinica
Test No	Redni broj ispitivanja	-
BNO	Serijski ispitivanja	-
Fmax	Maksimalna sila	N
$\sigma_M$	Svojna čvrstoća	MPa
smax	Maksimalni progib grede	mm
Ef	Modul elastičnosti	GPa
dFM	Prosječni progib grede	mm
$\epsilon_M$	istezljivost	%
Mean	Aritmetička sredina	-
Std.dev.	Standardno odstupanje	-

Zbir krivulja naprezanja-progib prikazan je na slici 47. Ukupno je ispitano 24 uzorka i svaka krivulja predstavlja ispitivanje jednog uzorka.

U tablici 5. prikazani su rezultati ispitivanja uzoraka iz prve skupine.



Slika 47. Dijagram naprezanje – progib za prvu skupinu uzoraka

Tablica 5. Rezultati ispitivanja prve skupine uzoraka (skupina A)

Test No	BNo	Fmax N	$\sigma_{fM}$ MPa	smax mm	Ef GPa	dFM mm	$\epsilon_{fM}$ %
105	A1	199.2	148.6	2.023	17.17	1.860	1.160
106	A2	276.0	175.4	2.856	17.37	2.591	1.765
107	A3	346.1	187.1	2.936	18.26	2.601	1.889
108	A4	323.2	184.3	3.287	14.40	2.896	2.121
109	A5	284.9	210.4	2.963	22.53	2.613	1.668
110	A6	312.4	209.2	2.728	23.91	2.437	1.575
111	A7	201.7	141.7	1.951	16.11	1.807	1.152
112	A8	287.1	163.7	2.557	16.43	2.286	1.606
113	A9	303.1	184.7	2.533	18.20	2.289	1.549
114	A10	251.2	181.5	2.802	18.11	2.514	1.600
115	A11	270.1	160.5	2.257	16.66	2.028	1.414
116	A12	341.0	204.0	3.118	20.26	2.644	1.903
117	A13	301.3	175.0	3.543	14.65	3.091	2.294
118	A14	324.7	193.8	3.199	19.85	2.819	1.963
119	A15	250.7	165.0	2.655	16.06	2.397	1.559
120	A16	336.4	172.5	2.301	18.41	2.017	1.480
121	A17	337.2	188.3	2.694	20.97	2.357	1.703
122	A18	226.9	139.3	2.485	14.13	2.269	1.509
123	A19	263.0	156.2	3.030	13.69	2.735	1.889
124	A20	280.4	151.8	2.524	15.12	2.211	1.626
125	A21	351.5	198.3	2.568	19.05	2.321	1.615
126	A22	270.8	177.5	3.112	15.40	2.729	1.869
127	A23	267.0	174.0	2.562	17.54	2.409	1.519
128	A24	271.5	163.8	2.703	15.29	2.444	1.718
Mean:		286.6	175.3	2.724	17.48	2.432	1.673
Std.dev.:		42.98	20.06	0.387	2.644	0.317	0.265



### 6.4.2. Rezultati uzoraka druge skupine – B skupine

Ispitana su 24 uzorka. Savojna sile je okomita u odnosu na liniju godova, tj. kut između sile i godova je  $90^\circ$ .

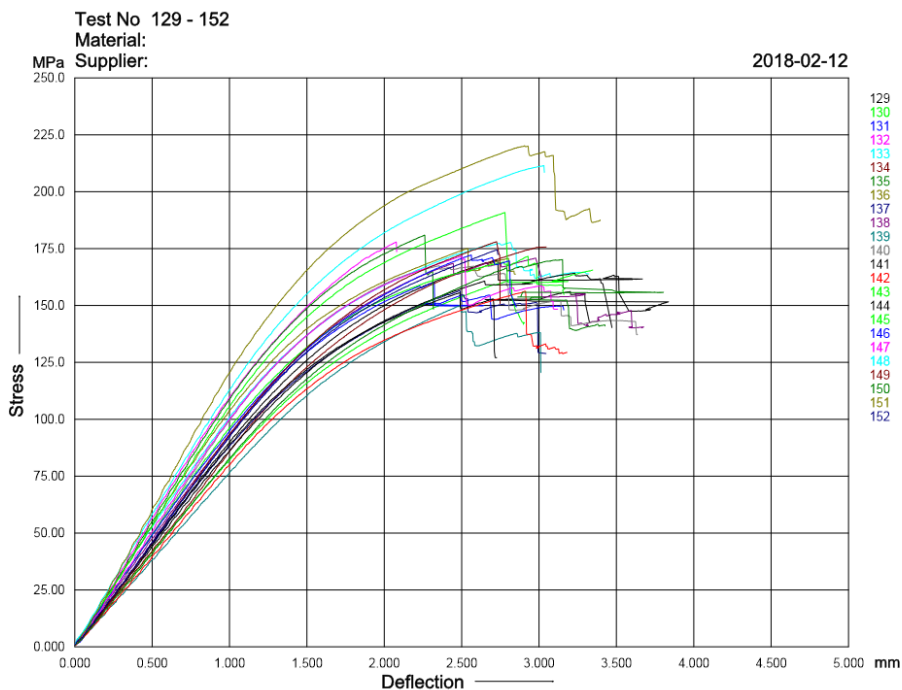
Na slici 48. prikazani su svi uzorci iz serije B nakon provedenog ispitivanja.



**Slika 48. Druga skupina ( skupina B) uzoraka nakon ispitivanja**

Na slici 49. prikazane su naprezanje-progib za sve uzorke iz serije B.

Tablica 6. prikazuje rezultate iz dijagrama za drugu skupinu ispitanih uzoraka.



Slika 49. Dijagram za naprezanje- progib za drugu skupinu uzoraka ( skupina B)

Tablica 6. Rezultati ispitivanje druge skupine uzoraka (skupina B)

Test No	BNo	Fmax N	$\sigma_f$ MPa	smax mm	Ef GPa	dFM mm	$\epsilon_{ff}$ %
129	B1	260.7	169.9	3.116	14.96	2.729	1.902
130	B2	277.6	161.4	3.173	12.83	2.818	2.038
131	B3	283.7	160.0	2.789	15.07	2.323	1.778
132	B4	278.3	177.8	2.335	19.38	2.075	1.392
133	B5	303.2	177.7	3.388	16.16	2.817	2.153
134	B6	315.8	175.7	3.453	13.38	3.047	2.202
135	B7	301.4	180.9	2.614	18.48	2.262	1.596
136	B8	288.1	175.0	2.978	17.67	2.541	1.821
137	B9	269.9	156.5	2.860	14.05	2.489	1.849
138	B10	309.8	170.8	3.390	14.44	2.978	2.225
139	B11	223.0	150.1	2.855	12.49	2.491	1.755
140	B12	272.6	167.5	2.734	16.34	2.354	1.680
141	B13	304.3	155.6	2.868	13.62	2.487	1.929
142	B14	282.3	156.3	3.457	12.85	2.913	2.197
143	B15	374.5	190.9	3.335	16.28	2.780	2.214
144	B16	271.8	164.3	3.362	13.66	3.232	2.162
145	B17	317.6	169.1	3.285	14.95	2.769	2.145
146	B18	240.2	172.2	2.940	16.22	2.559	1.743
147	B19	285.2	171.7	3.006	16.96	2.503	1.841
148	B20	334.0	211.6	3.533	19.00	3.031	2.141
149	B21	291.2	178.0	3.085	15.48	2.726	1.933
150	B22	224.7	170.2	3.534	14.37	3.144	2.072
151	B23	333.0	220.2	3.448	20.77	2.907	2.070
152	B24	271.5	174.4	3.128	15.58	2.729	1.892
Mean:		288.1	173.2	3.111	15.62	2.696	1.947
Std.dev.:		34.30	16.17	0.320	2.213	0.293	0.222

### 6.4.3. Rezultati uzoraka treće skupine – C skupine

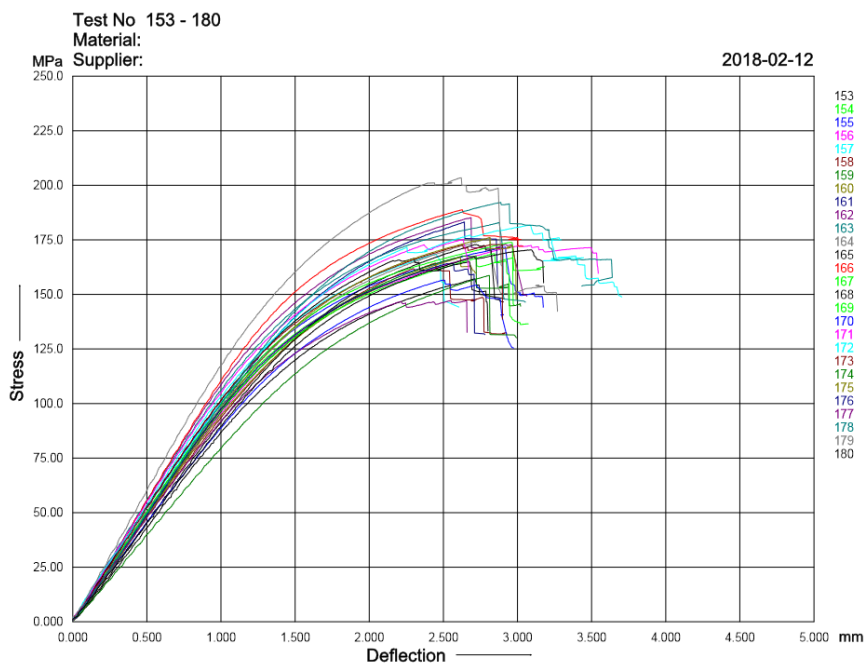
U trećoj skupini je ispitivano 28 uzoraka, gdje je smjer savojne sile u odnosu na godove pod kutom od  $45^\circ$ .

Na slici 50. prikazani su svi uzorci iz serije C nakon provedenog ispitivanja



**Slika 50. Treća skupina (skupina C) uzoraka nakon ispitivanja**

Na slici 51.prikazane su krivulje naprezanje-progib iz koje su rezultati iščitani u tablici 8.



Slika 51. Dijagram za naprezanje- progib za treću skupinu uzoraka (skupina C)

Tablica 7. Rezultati ispitivanja treće skupine uzoraka (skupina C)

Test No	BNo	Fmax N	$\sigma_M$ MPa	smax mm	Ef GPa	dFM mm	$\epsilon_{tFM}$ %
153	C1	319.1	157.1	3.129	13.45	2.708	2.109
154	C2	315.7	167.8	3.106	15.87	2.722	2.025
155	C3	314.5	171.7	3.292	15.86	2.919	2.139
156	C4	305.1	172.4	3.525	14.95	3.093	2.306
157	C5	309.3	168.5	2.841	16.98	2.444	1.796
158	C6	290.1	164.4	2.695	14.69	2.448	1.751
159	C7	320.8	167.6	2.998	15.13	2.626	1.974
160	C8	296.3	166.9	2.955	15.59	2.616	1.868
161	C9	291.8	183.3	3.002	16.58	2.642	1.819
162	C10	308.9	185.2	3.063	18.20	2.681	1.896
163	C11	344.2	182.9	3.291	16.69	2.877	2.146
164	C12	291.5	176.0	3.159	16.10	2.813	1.959
165	C13	300.8	172.9	3.089	14.93	2.722	1.967
166	C14	309.8	188.8	2.927	18.26	2.626	1.841
167	C15	312.4	168.7	3.218	15.36	2.846	2.116
168	C16	326.1	166.4	2.571	15.90	2.297	1.696
169	C17	310.5	173.8	3.410	16.38	2.943	2.145
170	C18	321.3	156.6	2.952	13.48	2.498	1.976
171	C19	332.4	175.2	3.035	16.82	2.635	1.956
172	C20	311.2	181.7	3.380	15.60	3.081	2.133
173	C21	338.8	173.0	3.190	15.89	2.826	2.111
174	C22	245.7	158.7	3.298	13.23	2.811	2.024
175	C23	348.9	176.0	3.259	15.18	2.810	2.157
176	C24	321.3	164.3	2.849	15.30	2.560	1.882
177	C25	267.3	147.3	2.845	14.50	2.552	1.845
178	C26	277.1	192.1	3.113	17.03	2.885	1.862
179	C27	318.9	203.4	2.847	20.30	2.609	1.700
180	C28	265.0	170.4	3.339	14.58	3.067	2.074
Mean:		307.7	172.6	3.085	15.82	2.727	1.974
Std.dev.:		23.69	11.72	0.225	1.523	0.199	0.156

## 5. ANALIZA REZULTATA

Iz dobivenih dijagrama i tablica može se uočiti veliko rasipanje rezultata za savojni modul elastičnosti, što je i karakteristično za drvo jer je anizotropan materijal.

Varijabilnost savojnog modula elastičnosti može se opisati Weibullovom razdiobom. To je dvoparameterska poluempirijska raspodjela dana izrazom:

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

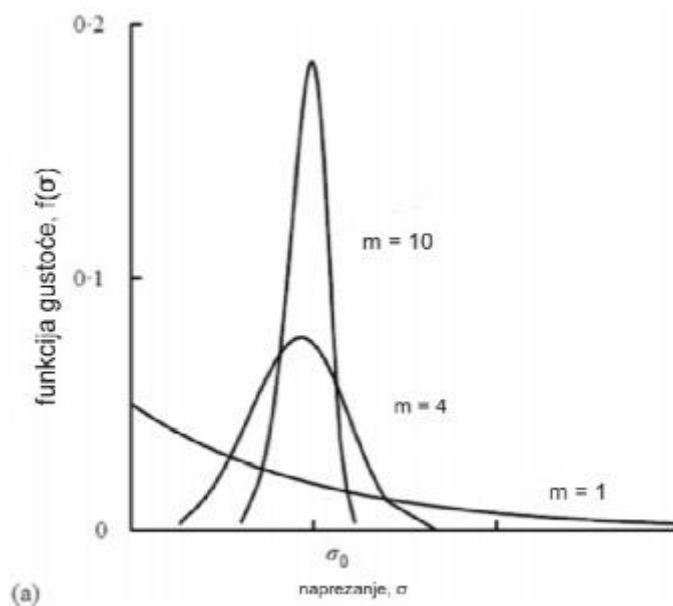
Gdje je:  $f(x)$  – funkcija gustoće vjerojatnosti Weibullove raspodjele

$x$  – promatrana veličina (slučajna varijabla) ( $x = \frac{\sigma}{\sigma_0}$ )

$m$  – parametar oblika ili Weibull modul, mjera rasipanja (modul elastičnosti)

Funkcija gustoće je asimetrična pri sredini i poprima samo pozitivne vrijednosti.

Na slici 52. prikazana je ovisnost raspodjele modula elastičnosti o faktoru oblika za različite vrijednosti Weibullovog modula.

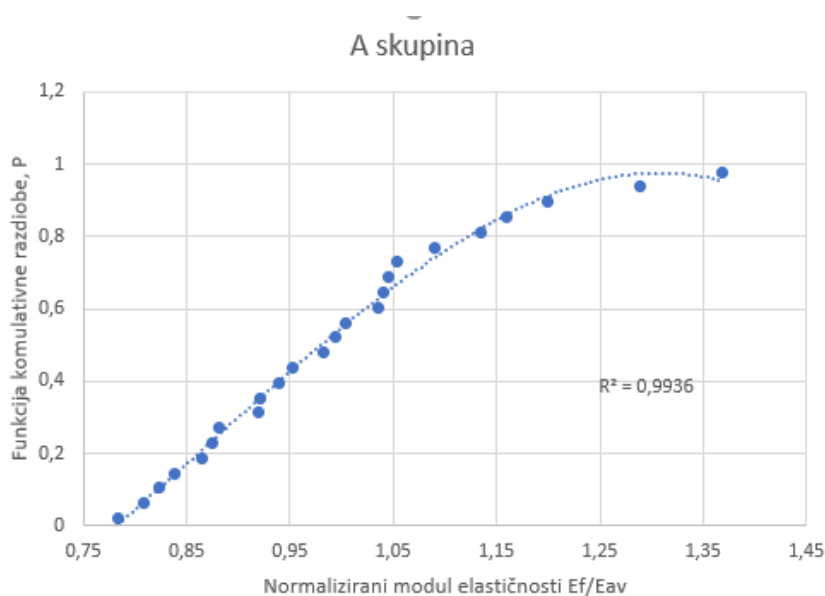


**Slika 52. Ovisnost Weibullove razdiobe čvrstoće o faktoru oblika, [23]**

Weibullov modul ( $m$ ) mjera je za rasipanje modula elastičnosti. Weibullov utječe na širinu krivulje. Što je Weibullov modul veći, to je krivulja uža. Može se reći da je Weibull pokazatelj homogenosti materijala. Što je njegova vrijednost veća to je stupanj homogenosti materijala veći. Uobičajene vrijednosti Weibullova modula su u rasponu  $10 < m < 20$ .

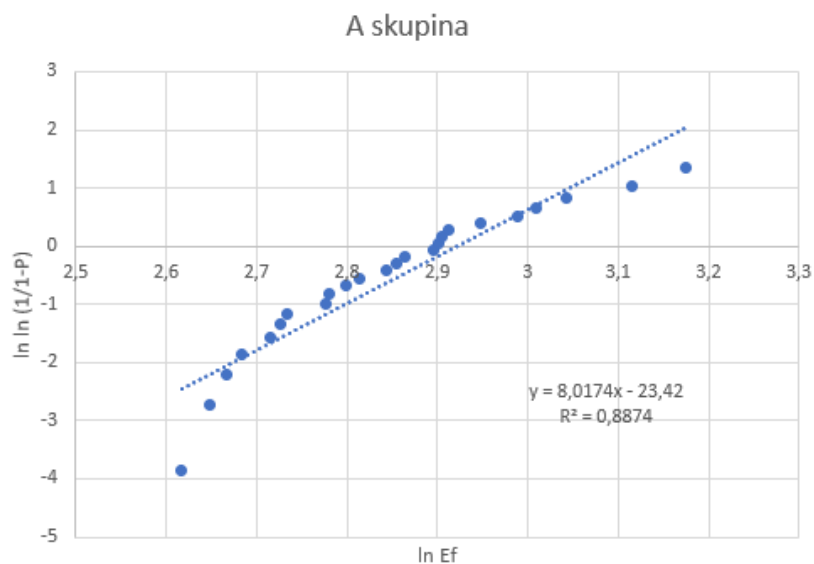
Statička vrijednost rezultata provedena je u Microsoft Excel Worksheet programu, za svaku skupinu posebno.

Graf na slici 53. opisuje komulativnu razdiobu normaliziranog modula elastičnosti za prvu skupinu uzoraka gdje se sila opterećenja paralelna s linijama godova ( $0^\circ$ ).



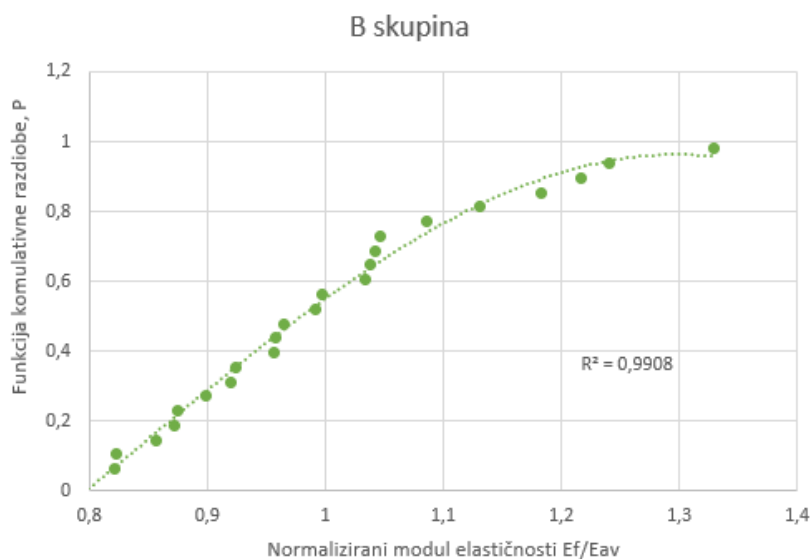
**Slika 53. Prikaz komulativne razdiobe podataka za normalizirani modul elastičnosti A skupine uzoraka**

Graf na slici 54. opisuje regresijsku jednadžbu modula elastičnosti za prvu skupinu uzoraka. Koeficijent  $m$  označava Weibullov modul rasipanja.



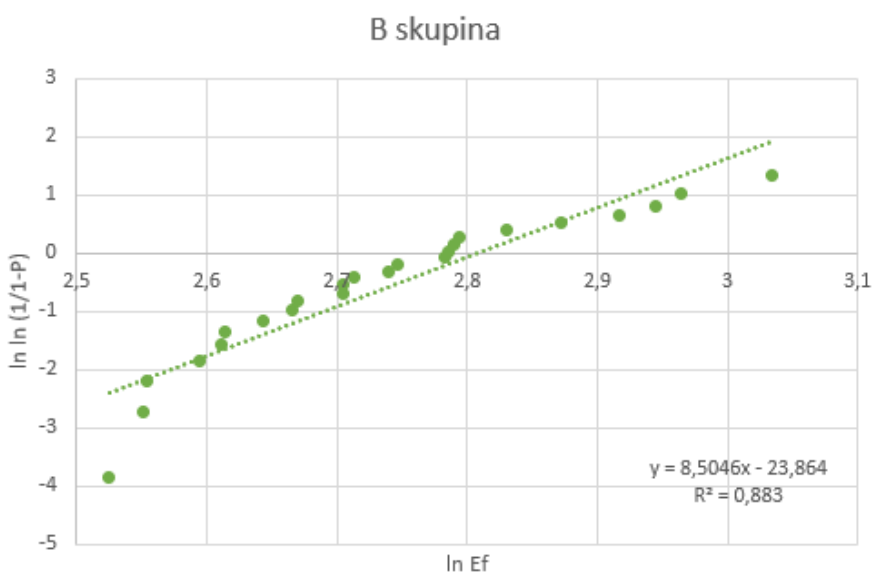
**Slika 54. Prikaz regresijske jednadžbe modula elastičnosti za A skupinu uzoraka**

Na slici 55. prikazana je komulativna razdioba normaliziranog modula elastičnosti za drugu skupinu uzoraka gdje je sila opterećenja okomita na liniju godova.



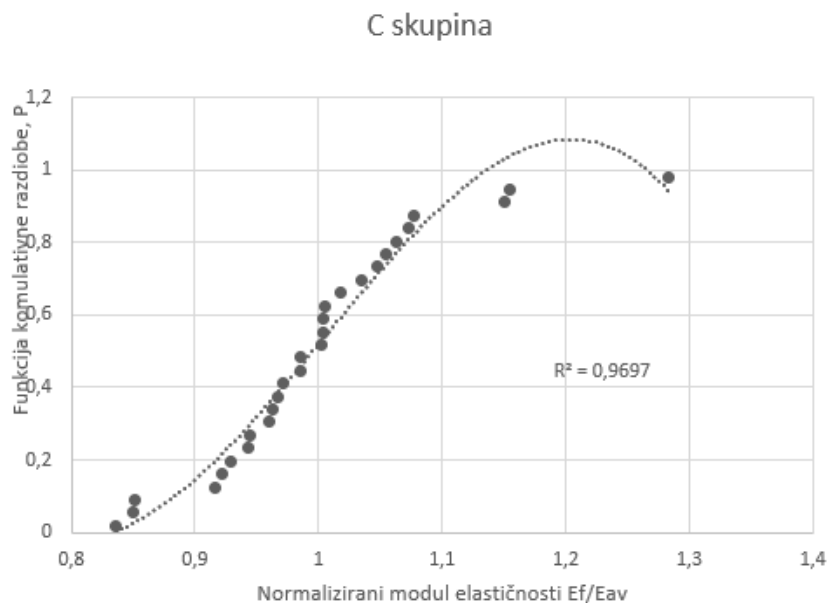
**Slika 55. Prikaz komulativne razdiobe podataka za normalizirani modul elastičnosti B skupine uzoraka**

Na slici 56. prikazan je graf koji opisuje regresijsku jednadžbu modula elastičnosti za drugu skupinu uzoraka. Na slici je prikazana i linearna jednadžba pravca koji je prikazan u grafu, kao i vrijednost koeficijent determinacije.



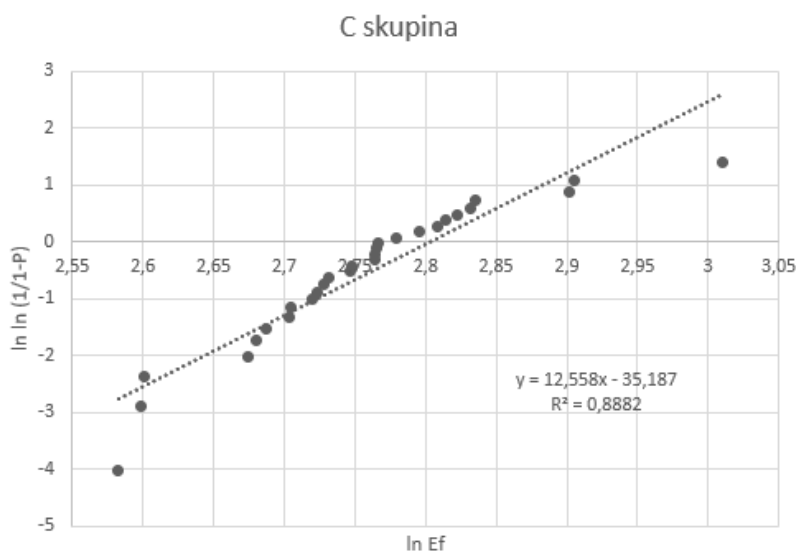
**Slika 56. Prikaz regresijske jednadžbe modula elastičnosti za B skupinu uzoraka**

Na slici 57. je graf koji pokazuje komulativnu razdiobu podataka za normalizirani modul elastičnosti treće skupine uzoraka, gdje je sila opterećenja s obzirom na tijek godova pod kutom od 45°.



**Slika 57. Prikaz komulativne razdiobe podataka za normalizirani modul elastičnosti C skupine uzoraka**

Slika 58. prikazuje graf koji opisuje regresijsku jednadžbu modula elastičnosti za treću skupinu uzoraka.



**Slika 58. Prikaz regresijske jednadžbe modula elastičnosti za treću skupinu uzoraka**



prema dobivenim rezultatima može se reći da je rasipanje vrijednosti kod sve tri skupine približno jednak. Weibullov modul ( koeficijent m) je skoro isti kod prve i druge skupine. Kod treće skupine Weibullov modul je malo veći, što ukazuje na užu raspodjelu, odnosno veću homogenost mikrostrukture. Kod prve skupine, gdje su sila i smjer godova paralelni, raspon vrijednosti savojnog modula elastičnosti je najveći. Dobiveni rezultati statističke obrade za sve skupine mogu se vidjeti u tablici 8.

**Tablica 8. Statistički podaci za rezultate mjerenja svih triju skupina uzoraka**

	min Ef, GPa	max Ef, GPa	Srednja vrijednost, GPa	Standardna devijacija	m- Weibullov modul	$e_0$ - parametar položaja Weibullove razdiobe
Skupina A (0°C)	13,69	23,91	17,48	2,644	8,0174	18,5626
Skupina C (45°C)	13,23	20,30	15,82	1,523	12,558	16,4769
Skupina B (90 °C)	12,49	20,77	15,62	2,213	8,5046	16,5438

Srednja vrijednost savojnog modula elastičnosti 17,48 GPa za 0°, 15,82 GPa za 45°, 15,62 GPa za 90°. Najveća vrijednost iznosi 23,91 GPa, a najmanja vrijednost 13,69 GPa za skupinu A. Najveća vrijednost je 20,77 GPa, a najmanja vrijednost 12,49 GPa za skupinu B. U skupini C najveća vrijednost savojnog modula elastičnosti je 20,30 GPa, a najmanja vrijednost 13,23 GPa. Uspoređujući najmanje i najveće vrijednosti savojnog modula elastičnosti svih triju skupina približno su iste. Standardna devijacija je najveća kod skupine A i iznosi 2,644. Skupina B ima malo nižu standardnu devijaciju 2,213, dok kod skupine C iznosi 1,523.

Tablica 9. prikazuje vrijednosti savojnog modula elastičnosti recentnog hrasta lužnjaka iz literature, [24].

**Tablica 9. Vrijednosti savojnog modula elastičnosti recentnog hrasta lužnjaka iz literature , [24]**

Vrsta drva	Modul elastičnosti u GPa		
Hrast lužnjak	10,0	11,7	13,2

Uspoređujući vrijednosti rezultata savojnog modula elastičnosti ispitanog hrasta lužnjaka sa vrijednostima savojnog modula elastičnosti hrasta lužnjaka iz literature možemo uočiti da ispitanu recentni hrast lužnjak ima čak i malo veće vrijednosti. Vrijednosti modula elastičnosti su približno iste u sve tri skupine uzoraka.

## 6. ZAKLJUČAK

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

1. Vrijednosti savojnog modula elastičnosti hrasta lužnjaka u longitudinalnom smjeru nalaze se između 12,49 GPa i 17,48 GPa. Srednja vrijednost je 16,3 GPa.
2. Savojni modul elastičnosti hrasta lužnjaka u longitudinalnom smjeru vrlo malo ovisi o položaju savojne sile u odnosu na tijek godova. Najveće vrijednosti su dobivene u slučaju kad su sila i godovi paralelni. Srednja vrijednost savojnog modula elastičnosti iznosi 17,48 GPa. Vrijednosti modula elastičnosti za kut između sile i godova od 45° i 90° su skoro jednake i iznose 15,82 GPa i 15,62 GPa.
3. Dobiveni rezultati mogu se kvalitetno opisati Weibullovom razdiobom. Weibullov modul je dovoljno visok za sve skupine i iznosi od 8 do 12,6. Vrijednosti i rasipanja rezultata ponašaju se po principu Weibullove razdiobe koja nam pokazuje što je veći parametar oblika ili Weibullov modul to je veća homogenost strukture, odnosno uža raspodjela. Za prvu skupinu Weibullov modul iznosi 8,0174, za drugu skupinu 8,5046, a za treću skupinu 12,558. Treća skupina ima najveći Weibullov modul, što ukazuje na veću homogenost strukture od prve dvije skupine. Koeficijent determinacije je približno vrijednosti 1.

## 7. POPIS LITERATURE

- [1] [https://www.google.hr/search?q=crkva+sv+barbare+velika+mlaka&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiT6I6gn7DZAhUK1xQKHWGXCf8Q\\_AUICygC&biw=1920&bih=949#imgrc=EbdKHzTaUeQ\\_IM](https://www.google.hr/search?q=crkva+sv+barbare+velika+mlaka&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiT6I6gn7DZAhUK1xQKHWGXCf8Q_AUICygC&biw=1920&bih=949#imgrc=EbdKHzTaUeQ_IM): pristup 15.1.2018.
- [2] Rowell, R. M.: Handbook of wood chemistry and wood composites, CRC Press, 2005. pristup 15.1.2018.
- [3] [https://www.google.hr/search?q=popre%C4%8Dni+presjek+drva&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwi60LSPo7DZAhVGbFAKHUgvAZ0Q\\_AUICigB&biw=1920&bih=949#imgrc=uy7RIGDPNPM\\_hM](https://www.google.hr/search?q=popre%C4%8Dni+presjek+drva&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwi60LSPo7DZAhVGbFAKHUgvAZ0Q_AUICigB&biw=1920&bih=949#imgrc=uy7RIGDPNPM_hM): pristup 15.1.2018.
- [4] Structure and arrangement of pits, [https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz\\_cast.pl?cast=19204](https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=19204) , pristup 15.1.2018.
- [5] 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 15.1.2018.
- [6] <https://steurh.home.xs4all.nl/engloof/elooft.html#grondweefsel> , pristup 16. 1. 2018.
- [7] Celuloza, [https://www.google.hr/search?q=celuloza&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiq\\_KzlsbDZAhVSy6QKHWhoCt8Q\\_AUICigB&biw=1920&bih=949#imgrc=Y4mP8Iwl3vy\\_oM](https://www.google.hr/search?q=celuloza&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiq_KzlsbDZAhVSy6QKHWhoCt8Q_AUICigB&biw=1920&bih=949#imgrc=Y4mP8Iwl3vy_oM): pristup 18.1.2018.
- [8] Hemiceluloza, [https://www.google.hr/search?q=hemiceluloza&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwIU766as7DZAhUDzqQKHZldCjQQ\\_AUICigB&biw=1920&bih=949#imgrc=c2kVqZC4ofRWjM](https://www.google.hr/search?q=hemiceluloza&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwIU766as7DZAhUDzqQKHZldCjQQ_AUICigB&biw=1920&bih=949#imgrc=c2kVqZC4ofRWjM): pristup 18.1.2018.
- [9] Lignin, [https://www.google.hr/search?q=LIGNIN&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiAypjDs7DZAhXB2aQKHVAAbCGAQ\\_AUICigB&biw=1920&bih=949#imgrc=NJkp5KS5NruOfM](https://www.google.hr/search?q=LIGNIN&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiAypjDs7DZAhXB2aQKHVAAbCGAQ_AUICigB&biw=1920&bih=949#imgrc=NJkp5KS5NruOfM): pristup 18.1.2018.
- [10] [https://en.wikipedia.org/wiki/Blue\\_stain\\_fungus](https://en.wikipedia.org/wiki/Blue_stain_fungus) , pristup 20. 1. 2017.
- [11] [https://en.wikisource.org/wiki/HeatIts\\_Role\\_in\\_Wildland\\_Fire/Heat\\_Conduction\\_and\\_Wildland\\_Fire](https://en.wikisource.org/wiki/HeatIts_Role_in_Wildland_Fire/Heat_Conduction_and_Wildland_Fire) , pristup 21. 1. 2018.
- [12] Rede V. : Drvo, [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1496408466-0-drvo-skripta.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1496408466-0-drvo-skripta.pdf) pristup 21.1. 2018.
- [13] <http://www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/properties/non-IE/stiffness.html> pristup 21.1.2018.
- [14] Rede, V. : Mehanička svojstva drva [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1402046311-0-drvo\\_vjeza\\_14.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1402046311-0-drvo_vjeza_14.pdf) 22.1.2018.
- [15] Rede, V.: Autorizirane vježbe iz kolegija „keramika, beton, drvo“, Fakultet Strojarsva i Brodogradnje, Zagreb 2014/2015

- [16] Tvrdoća po Brinellu, [https://www.google.hr/search?q=brinell&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjf4eq\\_wLDZAhXEIVAKHZDaA50Q\\_AUICigB&biw=1920&bih=949#imgrc=Cx1uc2gS8\\_7\\_gM](https://www.google.hr/search?q=brinell&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjf4eq_wLDZAhXEIVAKHZDaA50Q_AUICigB&biw=1920&bih=949#imgrc=Cx1uc2gS8_7_gM); pristup 2.2. 2018.
- [17] <http://www.hoskinghardwood.com/Department/Hardwood-Floors/Janka-WoodHardness-Chart.aspx?dId=7&pageId=12> , pristup 2.2. 2018.
- [18] Abrazijsko trošenje, [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1333523730-0-im5\\_trosenje12.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1333523730-0-im5_trosenje12.pdf) , pristup 6.2.2018.
- [19] Rede, V.; Essert, S.; Šokčević, Z.: Effects of microstructural orientation on the abrasive wear resistance of subfossil elm wood in three orthogonal planes , *Wear*, 380/381; 2017.
- [20] [https://www.google.hr/search?q=charpy&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=aZIJJlb7ItRVkM%253A%252CBMI8EDnRmo-ajM%252C\\_&usg=\\_\\_eFCWZgMBx-9AMVB5IqnUOd3IDxo%3D&sa=X&ved=0ahUKEwiayPOjw7DZAhUO2aQKHXNOBOoQ9QEIQDAD#imgrc=aZIJJlb7ItRVkM](https://www.google.hr/search?q=charpy&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=aZIJJlb7ItRVkM%253A%252CBMI8EDnRmo-ajM%252C_&usg=__eFCWZgMBx-9AMVB5IqnUOd3IDxo%3D&sa=X&ved=0ahUKEwiayPOjw7DZAhUO2aQKHXNOBOoQ9QEIQDAD#imgrc=aZIJJlb7ItRVkM) : pristup 6.2.2018.
- [21] [https://en.wikipedia.org/wiki/Fracture\\_mechanics](https://en.wikipedia.org/wiki/Fracture_mechanics) , pristup 6.2. 2018.
- [22] Mikrostruktura hrasta lužnjaka, <http://delta-intkey.com/wood/de/www/fagqu-re.htm> , pristup 10.2.2018.
- [23] Weibullova razdioba, [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1493908164-0-kbd\\_vj\\_4\\_prezentacija.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1493908164-0-kbd_vj_4_prezentacija.pdf) 15.2.2018.
- [24] I. Horvat, I. Tehnologija drva, Drvnoindustrijski priručnik, Tehnička knjiga, Zagreb