Utjecaj orijentacije goda na tvrdoću drva obične smreke

Gagulić, Antonio

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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:235:937651

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Antonio Gagulić

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

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

Student:
Antonio Gagulić

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se svojoj mentorici prof. dr. sc. Veri Rede na pomoći pri odabiru teme završnog rada, na dostupnosti i razumijevanju te stručnim savjetima koji su mi uvelike pomogli u izradi ovog rada.

Zahvaljujem se svim svojim kolegama i prijateljima, a posebice obitelji koja je otpočetka vjerovala u mene te mi davala stalnu podršku i motivaciju.

Antonio Gagulić

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: **602 - 04 / 21 - 6 / 1**	
Ur.broj: **15 - 1703 - 21 -**	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Antonio Gagulić** Mat. br.: 0035209586

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj orijentacije goda na tvrdoću drva obične smreke**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Annual ring orientation effect on hardness of European spruce**

Opis zadatka:

Svojstva tehničkih materijala određena su kemijskim sastavom, ali u najvećoj mjeri određena su njihovom mikrostrukturom. Ako materijali imaju usmjerenu mikrostrukturu i njihova svojstva će biti usmjerena, tj. anizotropna. Drvo je visokovrijedan prirodni tehnički materijal s izrazito usmjerenom mikrostrukturom i sa usmjerenim svojstvima. Svojstva drva ovise o puno različitih čimbenika, a jedan od njih je položaj ispitnih uzoraka u odnosu na tri karakteristična smjera u deblu: longitudinalni (L), radijalni (R) i tangencijalni (T).
U teorijskom dijelu završnog rada potrebno je opisati strukturu drva i osnovna svojstva koja su posljedica takve strukture. U eksperimentalnom dijelu treba istražiti kako orijentacija s obzirom na godove utječe na vrijednosti tvrdoće drva obične smreke (*Picea abies*) u longitudinalnom smjeru (L). Površinu na kojoj se ispituje tvrdoća treba, u odnosu na liniju goda, zakretati od 0° (tangencijalni presjek - LT) do 90° (radijalni presjek - LR). Tvrdoću je potrebno izmjeriti Brinellovom metodom.
Dobivene rezultate potrebno je statistički obraditi, analizirati i na temelju provedene analize donijeti odgovarajuće zaključke.

Zadatak zadan:

30. studenoga 2020.

Zadatak zadala:

Rede

Prof. dr. sc. Vera Rede

Datum predaje rada:
1. rok: 18 veljače 2021.
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.
3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 22.2. – 26.2.2021.
2. rok (izvanredni): 9.7.2021.
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ I

POPIS SLIKA III

POPIS TABLICA V

POPIS OZNAKA VI

SAŽETAK VII

SUMMARY VIII

1. UVOD 1

2. STRUKTURA DRVA 1

2.1. STANIČNA MIKROSTRUKTURA DRVA 1

2.1.1. STANIČNA STRUKTURA ČETINJAČA 2

2.1.2. STANIČNA STRUKTURA LISTAČA 3

2.2. KEMIJSKI SASTAV DRVA 4

2.3. GRAĐA DRVA 5

2.4. DEBLO I GODOVI 6

2.5. KARAKTERISTIČNI PRESJECI DEBLA 7

3. SVOJSTVA DRVA 9

3.1. FIZIKALNA I KEMIJSKA SVOJSTVA DRVA 9

3.2. MODUL ELASTIČNOSTI 11

3.3. ČVRSTOĆA 13

3.4. ŽILAVOST 20

3.5. OTPORNOST NA ABRAZIJSKO TROŠENJE 21

3.6. TVRDOĆA DRVA 22

3.7. TOPLINSKA SVOJSTVA 25

3.8. PROCJENA KVALITETE DRVA 26

3.9. RASIPANJE I STATISTIČKA OBRADA REZULTATA 27

4. SVOJSTVA I KARAKTERISTIKE SMREKE 28

5. EKSPERIMENTALNI DIO 31

5.1. CILJ RADA 31

5.2. MATERIJALI ZA ISPITIVANJE 31

5.3. ISPITIVANJE TVRDOĆE PO BRINELLU 34

5.4. REZULTATI ISPITIVANJA 38

5.5. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA 44

6. ZAKLJUČAK 50

LITERATURA 51

POPIS SLIKA

Slika 1. Oblik drva četinjače (lijevo) i drva listače (desno) [1] 1
Slika 2. Mrtva biljna stanica [2] 2
Slika 3. Karkateristični presjeci kroz četinjaču: A-poprečni, B-radijalni, C-tangencijalni [3] 3
Slika 4. Mikrostruktura listača [4] 4
Slika 5. Kemijski sastav četinjača i listača na razini spojeva [5] 5
Slika 6. Osnovni dijelovi stabla 5
Slika 7. Poprečni presjek debla [6] 6
Slika 8. Poprečni presjek običnog bora (Pinus sylvestris) s naznačenim dijelovima goda [8] 7
Slika 9. Karakteristični presjeci u deblu [9] 8
Slika 10. Utjecaj vlage na bubrenje u karakterističnim osima drva [10] 10
Slika 11. Usporedba modula elastičnosti drva s drugim materijalima [14] 13
Slika 12. Ispitivanje tlačne čvrstoće [15] 15
Slika 13. Ispitivanje savojne čvrstoće metodom savijanja u tri točke [16] 17
Slika 14. Metoda ispitivanja smične čvrstoće 19
Slika 15. Metoda ispitivanja žilavosti Charpyjevim batom [17] 20
Slika 16. Uređaj za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje Taber Abraser 1700 [18] 21
Slika 17. Shematski prikaz metode "suhi pijesak – gumeni kotač" [19] 22
Slika 18. Mikrostruktura najtvrđe vrste drva, poprečni presjek [22] 24
Slika 19. Mikrostruktura drva masline, tangencijalni presjek [23] 24
Slika 20. Shematski prikaz ispitivanja tvrdoće Brinellovom metodom 25
Slika 21. Poprečni presjek debla smreke [27] 28
Slika 22. Mikrostruktura drva smreke u poprečnom presjeku [28] 29
Slika 23. Jedna od najskupljih "Stradivari" violina načinjena od drva smreke [29] 30
Slika 24. Raspored uzoraka na poprečnom presjeku debla 31
Slika 25. Izrezivanje uzoraka 32
Slika 26. Pripremljeni i označeni uzorci 32
Slika 27. Shematski prikaz označivanja uzorka 33
Slika 28. Pozicije mjerenja s obzirom na tragove ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje. 33
Slika 29. Uređaj za mjerenje tvrdoće Brinellovom metodom 34

Slika 30. Položaj ispitnog uzorka pod opterećenjem 35
Slika 31. Mjerenje otisaka na uzorku 36
Slika 32. Otisci na uzorku nakon mjerenja tvrdoće 36
Slika 33. Oblik godova na uzorku 37
Slika 34. Shematski prikaz mjerenja kuta 37
Slika 35. Ovisnost tvrdoće HB o kutu α 44
Slika 36. Ovisnost tvrdoće HB (srednja vrijednost) o kutu α 45
Slika 37. Rasipanje vrijednosti tvrdoće za kut 0° 46
Slika 38. Rasipanje vrijednosti tvrdoće za kut 30° 46
Slika 39. Rasipanje vrijednosti tvrdoće za kut 45° 47
Slika 40. Rasipanje vrijednosti tvrdoće za kut 60° 47
Slika 41. Rasipanje vrijednosti tvrdoće za kut 90° 48
Slika 42. Broj mjerenja tvrdoće HB u intervalima od po 10° 49

POPIS TABLICA

Tablica 1. Udio vlage u pojedinim vrstama drva [12] 10
Tablica 2. Modul elastičnosti poznatijih vrsta drva pri 12 % vlage [13] 12
Tablica 3. Odnos između vlačne čvrstoće okomito na smjer i u smjeru vlakana [7] 14
Tablica 4. Vlačna čvrstoća poznatijih vrsta drva pri 12 do 15% vlage [11] 14
Tablica 5. Tlačna čvrstoća poznatijih vrsta drva pri 12 do 15% vlage [11] 16
Tablica 6. Savojna čvrstoća poznatijih vrsta drva pri 12 do 15% vlage [11] 17
Tablica 7. Smična čvrstoća poznatijih vrsta drva pri 12 do 15% vlage [11] 19
Tablica 8. Utjecaj smjera vlakanaca i modifikacije drva na tvrdoću [20] 23
Tablica 9. Podjela tvrdoće drva prema Janki [7] 23
Tablica 10. Toplinska vodljivost nekih materijala [5] 26
Tablica 11. Koeficijent varijacije mehaničkih svojstava [24] 27
Tablica 12. Rezultati mjerenja kutova i izračunate tvrdoće uzoraka 1. retka (I) 38
Tablica 13. Rezultati mjerenja kutova i izračunate tvrdoće uzoraka 2. retka (II) 39
Tablica 14. Rezultati mjerenja kutova i izračunate tvrdoće uzoraka 3. retka (III) 40
Tablica 15. Rezultati mjerenja kutova i izračunate tvrdoće uzoraka 4. retka (IV) 41
Tablica 16. Rezultati mjerenja kutova i izračunate tvrdoće uzoraka 5. retka (V) 42
Tablica 17. Rezultati mjerenja kutova i izračunate tvrdoće uzoraka 6. retka (VI) 42
Tablica 18. Prosječne vrijednosti tvrdoće za pripadajuće kutove 43
Tablica 19. Srednje vrijednosti tvrdoće HB za karakteristične kutove 48

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
W	%	Relativna vlaga drva
m_1	kg	Masa vlažnog drva
m_2	kg	Masa suhog drva
ρ	g/cm^3	Gustoća drva
V	cm^3	Volumen drva
E	GPa	Modul elastičnosti
R_m	N/mm^2	Čvrstoća
R_τ	N/mm^2	Smična čvrstoća
F_{max}	N	Maksimalna sila
A_0	mm^2	Površina poprečnog presjeka
L	mm	Razmak između oslonaca
b	mm	Širina uzorka
h	mm	Visina uzorka
KU	J	Žilavost uzorka
G	N	Težina uzroka
h_1	mm	Početna visina bata
h_2	mm	Visinabata nakon loma uzorka
tvrdoća	HB	Tvrdoća po Brinellu
D	mm	Promjer kuglice
d	mm	Promjer otiska

SAŽETAK

Osnovni zadatak ovog rada bio je istražiti kako promjena presjeka od radijalnog (LR) do tangencijalnog (LT) utječe na tvrdoću drva obične smreke (*Picea abies*) u longitudinalnom smjeru (L).

U teorijskom dijelu rada navedene su osnovne karakteristike građe te mehanička i fizikalna svojstva drva s osobitim naglaskom na ispitivanje tvrdoće Brinellovom metodom.

U eksperimentalnom dijelu rada utvrđeno je da se tvrdoća drva u longitudinalnom smjeru smanjuje s promjenom presjeka od radijalnog prema tangencijalnom. Najveća srednja vrijednost tvrdoće u iznosu od 59 HB izmjerena je u radijalnom presjeku, a najmanja vrijednost tvrdoće u iznosu od 38 HB izmjerena je u tangencijalnom presjeku. Ukupno smanjenje tvrdoće iznosi oko 36 %. Rasipanje rezultata pri mjerenju tvrdoće bilo je relativno veliko, ali je koeficijent varijacije manji od 7 % što je dosta manje od dopuštenog (20 %).

Ključne riječi: drvo, tvrdoća, orijentacija

SUMMARY

The main task of this paper was to examine how the change of section from radial (LR) to tangential (LT) affects the hardness of spruce wood (*Picea abies*) in the longitudinal direction (L).

The theoretical part of the paper gives the basic characteristics of structure as well as mechanical and physical properties of wood with emphasis on the Brinell hardness test.

In the experimental part of the paper, it was determined that the hardness of wood in the longitudinal direction decreases with the change of section from radial to tangential. The highest mean hardness value of 59 HB was measured in radial section and the lowest mean hardness value of 38 HB was measured in tangential section. Total reduction of hardness is about 36%. The scattering of the hardness measurement was relatively large, but the coefficient of variation was less than 7% which is much less than allowed (20%).

Key words: wood, hardness, orientation

1. UVOD

Drvo je najrasprostranjenija biomasa odnosno živuća tvar na Zemlji te je samim time jedan od najbitnijih pojmova za ljudski život, ali i sveopći život. Osim što se može promatrati kao živi organizam, drvo je i važan tehnički materijal. U prirodnom ekosustavu, drvo proizvodi kisik, smanjuje količinu ugljikovog dioksida, stanište je mnogim biljkama i životinjama stoga je izuzetno bitan za održavanje ekološke ravnoteže. Drvo je kao materijal, poznat ljudima od samih početaka civilizacije, a i dan danas je u širokom polju primjene zbog svojih ekološki prihvatljivih karakteristika. Kao građevni materijal ima visoku specifičnu čvrstoću, relativno dobru žilavost, vrlo je dobar izolator i ima niz drugih vrlo dobrih svojstava. U industriji se značajna količina drva koristi za izradu namještaja zbog svojih povoljnih svojstava odnosno dobre postojanosti i rezljivosti te zadovoljavajuće mehaničke otpornosti. Također, ima gotovo neograničene mogućnosti obrade što ga uz pristupačne cijene stavlja u sami vrh uporabe. Bitno je spomenuti i papir, koji se u prvom redu najviše proizvodi od celuloznih vlakana čija je najvažnija sirovina drvo. Oko 90% ukupno proizvedene celuloze dobije se preradom drva. U ovom radu promatrat će se drvo kao tehnički materijal čiji će sastav i struktura imati ključan utjecaj na njegova svojstva, a pogotovo na tvrdoću. Tvrdoća drva je osobito važna kod nekih vrsta proizvoda (podovi i parketi), a usko je povezana s abrazijskom otpornošću drva.

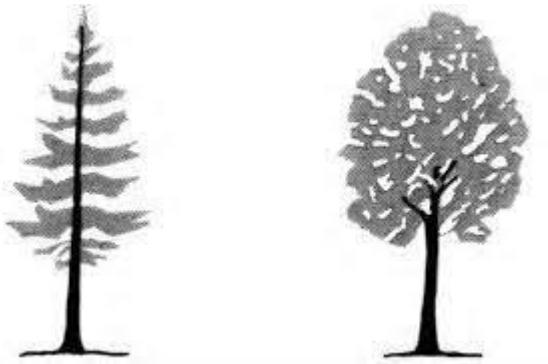
Drvo je specifičan tehnički materijal čija su svojstva povezana s njegovim biološkim funkcijama, a direktna su posljedica složene anizotropne strukture. Drvo se može promatrati i kao prirodni kompozitni materijal čija je matrica sastavljena od lignina (polifenolni polimer) koji može činiti do 30%, dok ojačalo u najvećoj mjeri (do 50%) čine celulozna vlakna. Upravo celulozna vlakna čine anizotropnu strukturu zbog koje je kod drva vrlo izražena i anizotropnost gotovo svih svojstava. Osim anizotropnosti, vrlo bitan utjecaj na svojstva ima i sadržaj vlage u drvu. Zbog vrlo dobrog poznavanja svojstava drva lako je navesti prednosti drva, a to su: niska cijena, laka obradivost, dobra izolacija, širok opseg ponude, visok omjer čvrstoće i gustoće, estetska vrijednost itd. Drvo ima i određene nedostatke, a to su prije svega: visoka ovisnost svojstava o umjerenosti strukture kao i o sadržaju vlage, sklonost bubrenju i utezanju, podložnost gorenju, prisustvo grešaka u građi te osjetljivost na vanjske utjecaja i razgrađivače. Različitim metodama obrade većina nedostataka drva se relativno uspješno dade otkloniti ili barem svesti na najmanju moguću mjeru.

U ovom radu promatrat će se utjecaj usmjerenosti strukture na tvrdoće drva obične smreke (lat. *Picea abies*). Ova vrsta drva dosta se koristi u izradi namještaja te gudačkih instrumenata, a posebno je poznata kao optimalan materijal pri izradi košnica. Vrlo je kvalitetno drvo, ima lijep oblik godova, a nakon pravilne obrade može se postići vrlo visok stupanj glatkoće.

2. STRUKTURA DRVA

Drvo je prirodan i nehomogen materijal koji se sastoji od niza cilindričnih elemenata grupiranih u koncentričnim krugovima odnosno godovima formiranim oko središta presjeka.

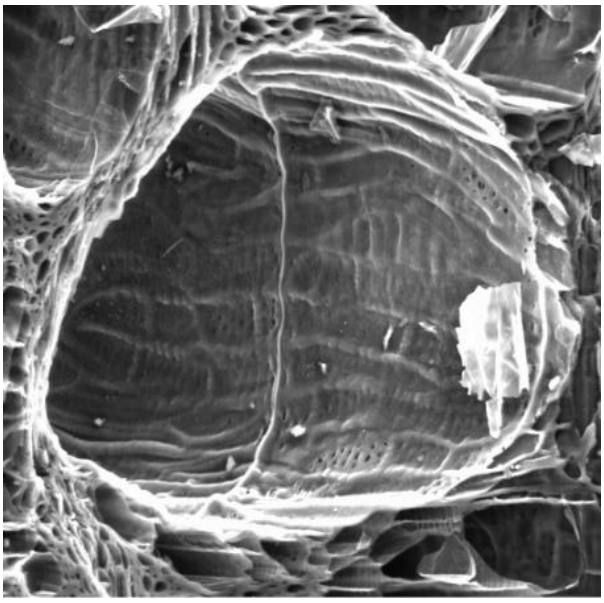
Glavna botanička podjela svih vrsta drva je na listače i četinjače. Na slici 1. prikazani su obrisi osnovnih oblika drva-četinjača i listača. [1]



Slika 1. Oblik drva četinjače (lijevo) i drva listače (desno) [1]

2.1. Stanična mikrostruktura drva

Drvno tkivo sastavljeno je od izduženih biljnih stanica koje su osnovne organizacijske jedinice svih biljaka pa tako i drva. Sastoji se od protoplasti i stanične stijenke. Protoplasti su živi sadržaj unutar membrane dok je stijenka mrtva tvar sastavljena uglavnom od ugljikohidrata. Tijekom vremena protoplasti odumiru, a prostor unutar drvne stijenke ostaje prazan. Prazni prostor omeđen staničnom stijenkom u kojem su se ranije nalazile protoplasti i čija je osnovna funkcija provođenje vode naziva se lumen. Može se zaključiti da je drvna stanica zapravo mrtva biljna stanica čija je uloga provođenje vode. Uloga stanične stijenke je mehanička potpora stanice te zaštita od previsokog osmotskog tlaka. Na slici 2. prikazan je poprečni presjek kroz mrtvu drvnu stanicu bez plazmatskog sadržaja. [2]



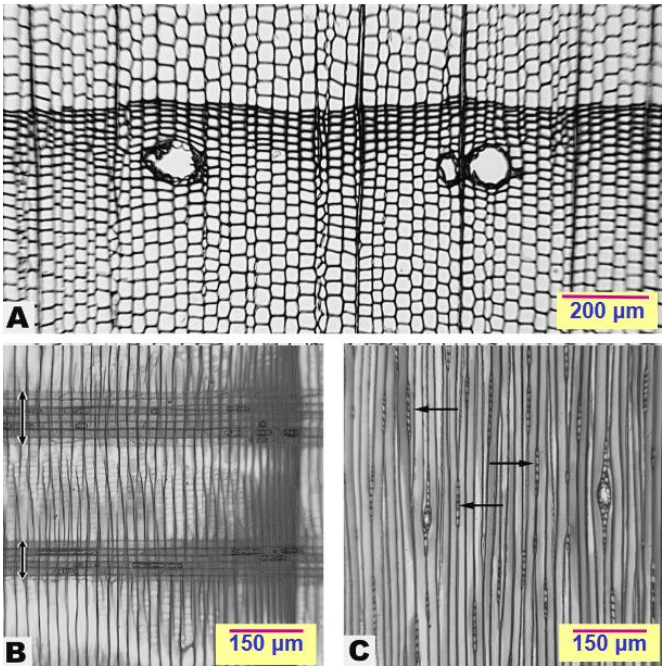
Slika 2. Mrtva biljna stanica [2]

2.1.1. Stanična struktura četinjača

Četinjače tvore dvije vrste stanica – traheide i parenhimske stanice. Traheide su uzdužno orijentirane stanice čiji je omjer duljine i širine u pravilu oko 100:1, a volumni udio traheida u drvu četinjača iznosi preko 90 %. Poprečni presjek traheida je uglavnom pravokutan sa sužavanjima pri gornjem i donjem vrhu stanice gdje se nalaze jažice preko kojih voda prelazi iz jedne u drugu stanicu. Debljina stijenke i veličina lumena ovise o potrebi drva za vodom u određenom vremenskom razdoblju. Početkom godine kada je drvu potrebno više vode lumen je veći, a stijenka tanja. Tijekom godine lumen se smanjuje, a stanična stijenka postaje deblja te drvo postaje čvršće i mehanički otpornije. Osim uzdužnih traheida postoje i radijalne, koje obavljaju funkciju radijalnog transporta vode.

Parenhimske stanice također mogu biti radijalne ili aksijalne, a od traheida se razlikuju po tamnije obojenom lumenu. Aksijalne parenhimske stanice zauzimaju svega 1 % volumena dok se radijalne grupiraju u drvne trake i povezuju središte debla s periferijom. Prizmatičnog su oblika i služe sintezi, skladištenju i lateralnom transportu biokemijskih tvari između ksilema i sekundarnog floema. [2]

Na slici 3. prikazani su karakteristični presjeci kroz drvo četinjače: poprečni, radijalni i tangencijalni.[3]

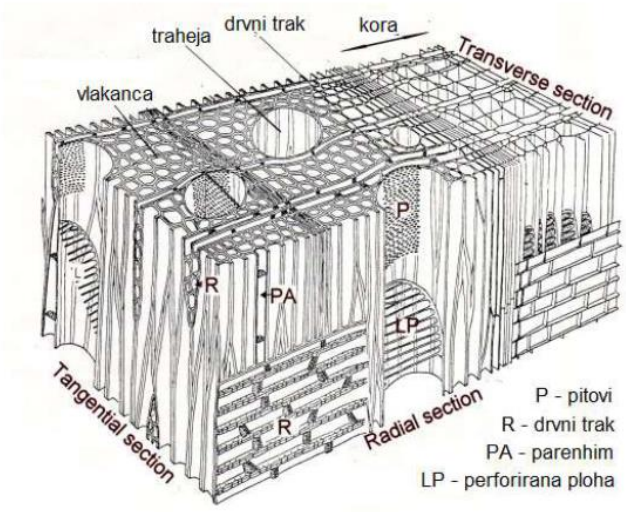


Slika 3. Karkateristični presjeci kroz četinjaču: A-poprečni, B-radijalni, C-tangencijalni [3]

2.1.2. Stanična struktura listača

Stanična struktura listača znatno je složenija od strukture četinjača. Osnovne vrste stanica listača su traheje (pore). To su velike provodne stanice, međusobno spojene u jednu veliku cjelinu za provođenje vode od korijena prema gore. Traheje različitih vrsta drva međusobno se razlikuju po veličini i rasporedu unutar goda. Uz traheje, aksijalni sustav listača čine još i drvna vlakanca, traheide i aksijalne parenhimske stanice. Drvna vlakanca su izdužene stanice s vrlo debelom staničnom stjenkom i uskim lumenom. Dulja su od traheja, a kraća od traheida. Aksijalne parenhimske stanice imaju tanku stjenku i veliku lumen. Puno češće se pojavljuju kod listača, najčešće uz pore. Bitne su za identifikaciju vrsta drva. [2][4]

Na slici 4. prikazana je mikrostruktura listača u različitim presjecima. [4]



Slika 4. Mikrostruktura listača [4]

2.2. Kemijski sastav drva

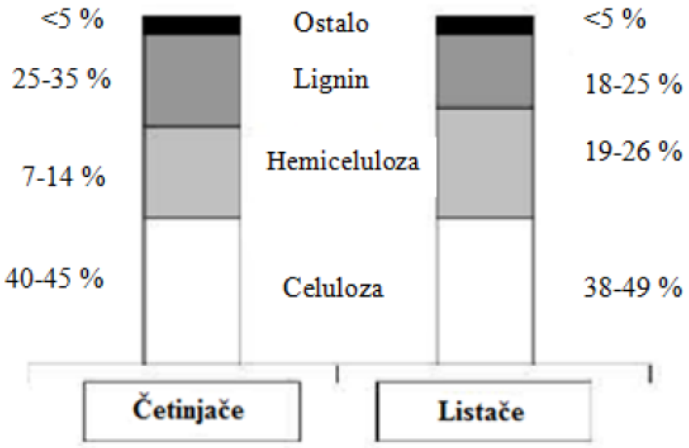
Drvo je kemijski sastavljeno od međusobno umreženih lanaca celuloze, hemiceluloze i lignina. Celuloze i hemiceluloze ima između 60 i 75 %, lignina od 18 do 35 % dok drugih spojeva u tragovima može biti od 4 do 10 % suhe tvari.

Celuloza je u prirodi najrasprostranjeniji ugljikov spoj - polisaharid. To je bijela vlaknasta tvar bez okusa i mirisa, netopiva je u vodi i organskim otapalima, a sastavljena je od dugih nizova međusobno povezanih molekula glukoze. U drvu se najčešće nalazi visokokristalična celuloza sa stupnjem polimerizacije do čak 15 tisuća.

Hemiceluloza je heterogena skupina dugolančanih polisaharida koji se razlikuju od celuloze. Obično je građena od različitih tipova monomernih šećera i za razliku od celuloze, ona je razgranati polimer. Amorfne je strukture i puno manjeg stupnja polimerizacije, od 100 do 200. Lako se otapa u lužinama.

Lignin je amorfni, visokokompleksni, najčešće aromatski trodimenzionalni polimer izgrađenih od fenilpropanskih jedinica, a njegova osnovna uloga je povećanje krutosti i stabilnosti stanične stijenke. Ostali spojevi koji se mogu naći u drvu su najčešće polimerni ugljikohidrati (pektin, škrob i proteini) te ekstrahirane i anorganske tvari (biljni sokovi).

Na slici 5. vide se udjeli celuloze, hemiceluloze, lignina i ostalih tvari u kemijskom sastavu četinjača i listača. [5]

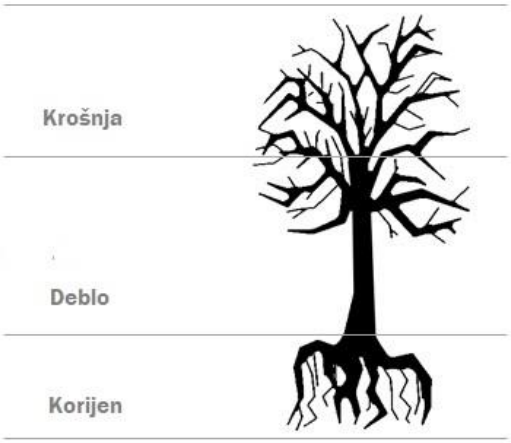


Slika 5. Kemijski sastav četinjača i listača na razini spojeva [5]

2.3. Građa drva

Osnovni dijelovi svakog drva odnosno stabla jesu korijen, deblo i krošnja. Korijen služi za učvršćivanje stabla odnosno pruža stabilnost za nadzemni dio drva, upija vodu i mineralne tvari potrebne za život drva. Raste u različitim smjerovima, a najčešće prema dolje. Deblo čini oko 60 % mase drva i njime je određena glavna os rasta drva. Deblo nosi krošnju, a osim toga služi i kao poveznica između korijena i krošnje. Prekriveno je korom koja ga štiti od vanjskih štetnih utjecaja. Iako se tehničko drvo može dobiti i iz grana, većina se ipak dobiva iz debla. Krošnju stabla čine deblje i tanje grane te lišće (ili iglice) koje je ključno za obavljanje fotosinteze.

Na slici 6. prikazani su osnovni dijelovi stabla.



Slika 6. Osnovni dijelovi stabla

2.4. Deblo i godovi

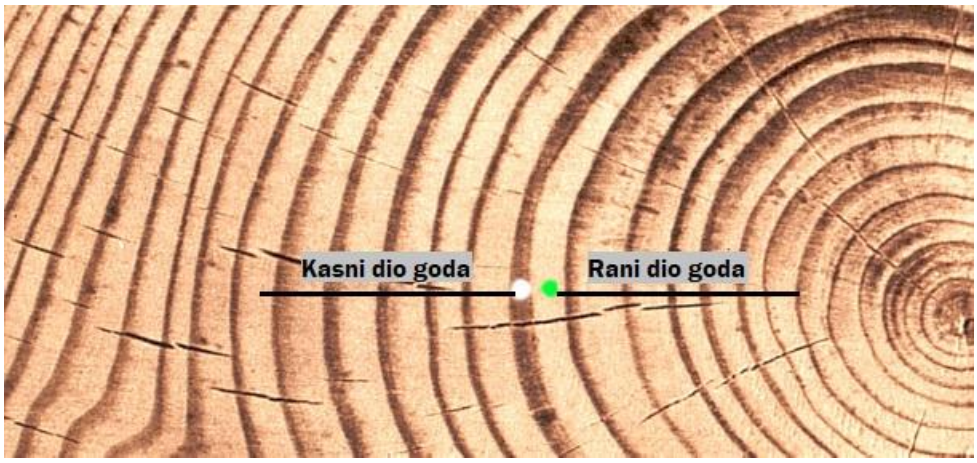


Slika 7. Poprečni presjek debla [6]

Na slici 7. prikazan je poprečni presjek debla s makroskopskom podjelom elemenata od kojih svaki ima značajnu ulogu u rastu i zaštiti drva. Srčika drva predstavlja anatomsku os debla, a sačinjena je od tkiva nastalog u ranoj fazi rasta stabla. Srževina okružuje srčiku, sačinjena je od mrtvih stanica i predstavlja tehnički najkvalitetniji dio debla. Dok je drvo živo, ima funkciju nošenja stabla. Bjeljika se nastavlja na srževinu. To je dio debla u kojem se još odvija proces izmjene tvari, odnosno sintetiziranje lipida i škroba te prijenos vode od korijena prema gore. Između kore i bjeljike nalazi se kambij, tanki sloj živih stanica odnosno tvorno tkivo iz kojeg svake godine nastaje novi sloj drva, odnosno novi god. To drvno tkivo zove se sekundarni ksilem. Iz sloja kambija prema vani istodobno s novim godom nastaje i sekundarni floem, odnosno novi sloj unutarnje kore. Kora je sačinjena od unutarnjeg i vanjskog sloja. Uloga unutarnje kore je prijenos produkata fotosinteze od listova prema korijenu. Vanjska kora štiti drvo od vanjskih utjecaja, ima mehaničku ulogu zaštite cijelog debla od isušivanja i uglavnom nije upotrebljiva kao tehnički materijal. [6] [7]

God ili godišnji prirast u debljini je cjelokupna masa sekundarnog tkiva nastala tijekom jednoga vegetacijskog razdoblja. Kambij proizvodi godove i aktivan je tijekom cijelog životnog vijeka biljke. Može imati periodičan rad u područjima gdje postoji smjena kišnog i sušnog razdoblja. Stoga će u pojedinim razdobljima nastanak sekundarnog drva i kore biti intenzivniji. Kod vrsta koje rastu u

krajevima gdje su uvjeti uglavnom ujednačeni, godovi se ne mogu razgraničiti. Stanice koje nastaju na početku vegetacijske sezone zovu se rani dio goda ili rano drvo, a stanice koje nastaju kasnije čine kasni dio goda ili kasno drvo.



Slika 8. Poprečni presjek običnog bora (*Pinus sylvestris*) s naznačenim dijelovima goda [8]

Na slici 8. prikazana je razlika u boji i širini ranog i kasnog dijela goda s obzirom na razdoblje vegetacijske sezone. Početkom sezone odnosno u proljeće, drvne stanice se šire, a stanična stjenka je uža jer je potrebna velika količina vode za provođenje radi rasta novih izdanaka drva. U kasno ljeto, prestaje nastanak novih grana i listova, a drvne stanice koje tada nastaju imaju deblju staničnu stijenku i uži lumen. Rani dio goda je zbog svoje građe uvijek svijetliji, a kasni dio goda je tamniji. Uloga ranog dijela goda je provođenje vode i mineralnih tvari, a kasni dio goda ima mehaničku ulogu.

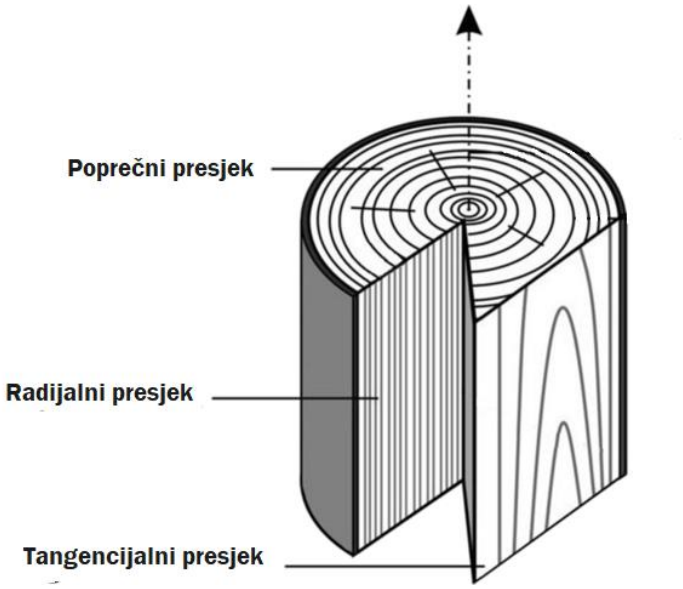
Širina godova i udio kasnog dijela goda imaju vrlo važan utjecaj na svojstva drva. Ovakva makrostruktura drva čini drvo materijalom sa izrazito anizotropnim i nehomogenim svojstvima. Dokaz tomu je činjenica da iznos vlačne čvrstoće može biti i nekoliko desetaka puta veći u smjeru godova nego u smjeru okomitom na godove.

2.5. Karakteristični presjeci debla

Kao što je već navedeno, drvo ima usmjerenu građu te kao posljedicu toga i usmjerena te neujednačena svojstva u različitim prejsecima. S obzirom na građu drva, moguće je razlikovati tri osnovna presjeka: poprečni, radijalni i tangencijalni. U svakom presjeku drvo će imati vrlo različita svojstva i teksturu. Poprečni presjek je okomit na uzdužnu os debla i na uzdužnu os drvnih vlakanaca. Na ovom presjeku

najlakše se uočavaju godovi i slojevi debla od srčike prema kori. Radijalni presjek je u ravnini koju određuju radijus i uzdužna os debla. U pravilu je to presjek koji nastaje kad se deblo rascijepi točno po polovici, preko srčike. U njemu se mogu promatrati značajke od srčike prema kori i uzduž osi debla. Tangencijalni presjek je okomit na radijalni, paralelan je s uzdužnom osi debla i okomit na poprečni presjek debla.

Sva tri presjeka prikazana su i označena na slici 9.[7] [9]



Slika 9. Karakteristični presjeci u deblu [9]

3. SVOJSTVA DRVA

Svojstva drva kao tehničkog materijala mogu biti vrlo pogodna za široku namjenu. Radi se o prirodnom materijalu koji je ekološki izuzetno prihvatljiv, ima vrlo dobra mehanička i toplinska svojstva te se ističe po svojim estetskim karakteristikama. S obzirom da je ekonomski isplativ materijal, čest je izbor u industriji, građevini itd. Drvo se može opisati kao ortotropan materijal što znači da ima međusobno nezavisna svojstva u smjeru triju međusobno okomitih osi: uzdužne (longitudinalne), radijalne i tangencijalne. Stoga je vrlo bitno prilikom ispitivanja drva označiti i navesti kako su izrezani uzorci te kako je provedeno ispitvanje s obzirom na tri spomenute osi.

3.1. Fizikalna i kemijska svojstva drva

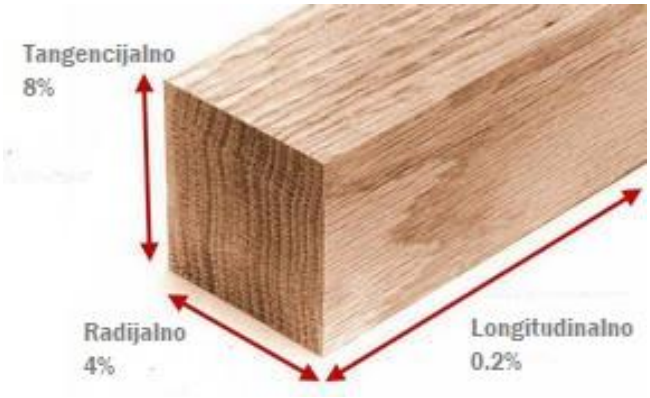
Udio vode u drvu jedna je od najvažnijih karakteristika drva. Drvo je higroskopan materijal što znači da ovisno o stanju i uvjetima u okolišu, može upiti ili otpustiti vlagu što rezultira promjenom dimenzija drva (bubrenje ili utezanje drva). Bubrenje i utezanje drva odgovorno je za mnoge nepravilnosti i greške u krajnjim produktima drva. Vlaga u drvu može biti **s**lobodna ili vezana. Slobodna vlaga nalazi se u lumenu, a vezana vlaga nalazi se unutar stanične stijenke.

Udio vlage ili relativna vlaga u drvu (w) određena je masom vlažnog drva (m_1) i masom istog drva u apsolutnom suhom stanju (m_0) te zapisana u postotku prema izrazu:

$$w = \frac{m_1 - m_0}{m_1} \times 100, \quad \% \tag{3.1}$$

Na slici 10. prikazan je utjecaj vlage na dimenzije drva. Jasno se vidi da s povećanjem vlage u drvu dolazi do povećanja dimenzija u svim smjerovima proporcionalno, doduše u longitudinalnom smjeru znatno manje nego u druga dva smjera. [10]

Kada se govori o otpornosti drva na vlagu, bitno je naglasiti da drvu u pravilu ne smeta ako je u stalnom prisustvu suhog zraka ili stalnom prisustvu vlažnog zraka (čak i u vodi), drvu najviše smeta izmjena vlažnog i suhog zraka što u konačnici dovodi do degradacije drvne građe.



Slika 10. Utjecaj vlage na bubrenje u karakterističnim osima drva [10]

Ovisno o području primjene, sadržaj vlage u drvu može iznositi:

- građevinsko drvo oko 20 do 25 %
- stolarsko drvo oko 15 %
- drvo za namještaj oko 12 %
- drvo za parkete oko 8 %
- drvo za ploče od ukočenog drva oko 6 %. [11]

U tablici 1. je prikazani su udjeli vlage za poznatije vrste drva u normalnim vanjskim uvjetima. [12]

Tablica 1. Udio vlage u pojedinim vrstama drva [12]

Vrsta drva	Udio vlage, %
Jasen - bijeli	24
Breza - žuta	27
Kesten - američki	24
Douglas jela	24
Kukuta - zapadna	28
Ariš - zapadni	28
Bor - gusti	21
Bor - dugolisti	21
Bor - crven	24
Smreka - crvena	27
Smreka - Sitka	27
Ariš - američki (Tamarack)	24

Gustoća drva je obrnuto proporcionalna s poroznošću drva. Što je veća gustoća drva, to je manji volumen pora i obratno**.** Općenito za gustoću drva vrijedi izraz:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad \mathrm{g/cm^3} \tag{3.2}$$

gdje je:

m – masa drva, g

V - volumen drva, $\mathrm{cm^3}$.

Gustoća nekog drva pri određenom udjelu vlage (w) računa se prema izrazu:

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w}, \ \mathrm{g/cm^3} \tag{3.3}$$

gdje je:

m_w – masa drva pri nekom udjelu vlage, g

V_w - volumen drva pri nekom udjelu vlage, $\mathrm{cm^3}$.

Gustoća drva pri apsolutnom suhom stanju drva računa se prema izrazu:

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0}, \ \mathrm{g/cm^3} \tag{3.4}$$

gdje je:

m_0 – masa drva u apsolutnom suhom stanju, g

V_0 - volumen drva u apsolutnom suhom stanju, $\mathrm{cm^3}$.

3.2. Modul elastičnosti

Modul elastičnosti predstavlja mjeru krutosti materijala i jednak je omjeru vlačnog naprezanja i linijske vlačne deformacije. Jedan je od najvažnijih i najčešće određivanih mehaničkih svojstava drva. Svojstvo elastičnosti podrazumijeva deformacije koje prestaju nakon što prestaje opterećenje na konstrukciju, a konstrukcija se vraća u početni oblik prije opterećenja. Kada iznos opterećenja dosegne više vrijednosti, može doći do trajne (plastične) deformacije.

Vrijednosti modula elastičnosti za pojedine vrste drva jako se razlikuju, a i unutar jedne iste vrste može doći do velikih rasipanja vrijednosti.

Ispitivanje modula elastičnosti uglavnom se provodi na univerzalnoj kidalici sa standardnim uzorcima. Prilikom mjerenja važno je koristiti uzorke drva sa konvencionalnim udjelima vlage (0 %, 10 – 15 %) te poznavati temperaturu prostorije. Treba napomenuti da modul elastičnosti, kao i ostala svojstva drva, bitno ovise o gustoći ispitivane vrste drva te o smjeru u kojem je modul ispitivan. S obzirom na tri karakteristična presjeka drva razlikuju se:

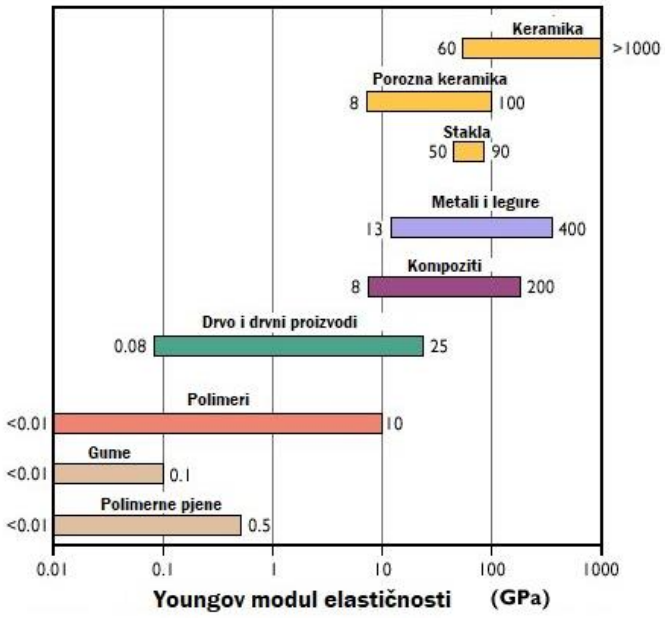
- modul elastičnosti u longitudinalnom smjeru - E_L
- modul elastičnosti u radijalnom smjeru - E_R
- modul elastičnosti u tangencijalnom smjeru - E_T

Najveće vrijednosti modula elastičnosti kod iste vrste drva su u longitudinalnom smjeru (E_L) i mogu biti čak do 20-ak puta veće u odnosu na vrijednosti za E_R i E_T. Vrijednosti modula elastičnosti u radijalnom smjeru (E_R) su u prosjeku oko 2 puta veće od vrijednosti u tangencijalnom smjeru (E_T).

U tablici 2. prikazane su vrijednosti modula elastičnosti za neke vrste drva, a na slici 11. prikazane su vrijednosti modula elastičnosti za drvo u usporedbi s drugim tehničkim materijalima. [13] [14]

Tablica 2. Modul elastičnosti poznatijih vrsta drva pri 12 % vlage [13]

Vrsta drva	Modul elastičnosti E (GPa)
Jasen - bijeli	9.4 - 12
Bukva - američka	11.9
Breza	11 - 15
Cedar - atlanski	5.5 - 11.7
Trešnja - crna	10.3
Kesten - američki	8.5
Brijest – engleski	11.8
Brijest - nizozemski	7.7
Mahagoni	8.7
Hrast - crveni	10.3 - 13.1
Bor - američki	8.5 - 13.7
Smreka - crna	7.9 - 11



Slika 11. Usporedba modula elastičnosti drva s drugim materijalima [14]

3.3. Čvrstoća

Definicija čvrstoće materijala općenito glasi da je to onaj iznos naprezanja koje odgovara najvećemu opterećenju koje uzorak materijala može izdržati prije nego dođe do loma, odnosno otpor materijala vanjskoj sili.

Ovisno o vrsti naprezanja razlikujemo i različite vrste čvrstoće:

- vlačna čvrstoća
- tlačna čvrstoća
- savojna čvrstoća
- smična čvrstoća.

Vlačna čvrstoća je najveći otpor koji pruža materijal uslijed djelovanja sila istog pravca, ali suprotnog smjera. Ispituje se na kidalicama gdje se probna epruveta izlaže kontinuiranom porastu opterećenja. Formula kojom se računa vlačna čvrstoća glasi:

$$R_m = \frac{F_{max}}{A_o}\ , \text{N/mm}^2 \qquad (3.5)$$

gdje je:

F_{max} - maksimalna vlačna sila pri kojoj dolazi do loma, N

A_0 - površina poprečnog presjeka uzorka, mm^2.

Odnos vlačne čvrstoće u smjeru vlakanaca i vlačne čvrstoće okomite na smjer vlakanaca za skupinu četinjača i listača prikazan je u tablici 3. [7]

Tablica 3. Odnos između vlačne čvrstoće okomito na smjer i u smjeru vlakana [7]

	Tangencijalno	Radijalno
Četinjače	0,025... 0,030	0,040... 0.050
Listače	0,040... 0,065	0,070... 0.100

U tablici 4. prikazane su okvirne vrijednosti vlačne čvrstoće domaćih vrsta za udio vlage 12 - 15 %.

Tablica 4. Vlačna čvrstoća poznatijih vrsta drva pri 12 do 15% vlage [11]

Vrsta drva	Vlačna čvrstoća , N/mm^2	
	paralelno na vlakanca	okomito na vlakanca
Brijest	60 do 12	4
Bukva	60 do 180	7
Grab	50 do 200	6
Jasen	30 do 220	7
Hrast	50 do 180	5
Orah	100	4
Bor	40 do 190	3
Jela	50 do 120	2
Smreka	40 do 240	3

Tlačna čvrstoća predstavlja najveće naprezanje koje se javlja na uzorku smještenom na čvrstoj horizontalnoj podlozi kad na njega djeluje sila okomita na podlogu i nastoji ga stlačiti kako je prikazano da slici 12. [15]



Slika 12. Ispitivanje tlačne čvrstoće [15]

Tlačna čvrstoća računa se prema izrazu:

$$R_m = \frac{F_{max}}{A_o}\ , \text{N/mm}^2 \qquad (3.6)$$

gdje je:

F_{max} - maksimalna vlačna sila pri kojoj dolazi do loma, N

A_0 - površina poprečnog presjeka uzorka, mm^2.

Tlačna čvrstoća u smjeru vlakanaca također se razlikuje od tlačne čvrstoće okomito na smjer vlakanaca te je 3 do 10 puta veća. Tlačna čvrstoća dosiže samo 50 % od vrijednosti vlačne čvrstoće u smjeru vlakanaca. Tlačna čvrstoća u praksi se najčešće primjenjuje kod proračuna željezničkih pragova. U praksi je mnogo važnija čvrstoća na tlak okomito na vlakanca.

Prilikom uspostavljanja kritične sile kod nekih vrsta drva dolazi do pucketanja. Svojstvo pucketanja važno je u praksi za sigurnost radnika jer upozorava na opasnost od loma. Vrste drva koje imaju izraženo svojstvo pucketanja su: smreka, jela, ariš, bor, bukva, grab, breza, hrast, brijest i bagrem. Svojstvo pucketanja ovisi o vlažnosti i temperaturi drva i jače je ukoliko je vlažnost manja, a temperatura veća. [7]

Vrijednosti tlačne čvrstoće za domaće vrste drva prikazane se u tablici 5. [11]

Tablica 5. Tlačna čvrstoća poznatijih vrsta drva pri 12 do 15% vlage [11]

Vrsta drva	Tlačna čvrstoća , N/mm^2	
	paralelno na vlakanca	okomito na vlakanca
Brijest	30 do 60	10
Bukva	40 do 80	10
Grab	40 do 80	10
Jasen	30 do 60	10
Hrast	40 do 60	5
Orah	40 do 70	10
Bor	30 do 80	10
Jela	30 do 50	4
Smreka	30 do 70	50 do 70

Savojna čvrstoća je najveće unutrašnje naprezanje koje se javlja ako na uzorak djeluje sila koja ga nastoji slomiti ili saviti prilikom čega je uzorak poduprt na krajevima.

Savojna čvrstoća računa se prema izrazu:

$$R_{ms}=\frac{3F_{max}\,x\,L}{2b\,x\,h^2}\ ,\ \mathrm{N/mm^2} \qquad (3.7)$$

gdje je:

F_{max} - maksimalna vlačna sila pri kojoj dolazi do loma, N

b - širina uzorka, mm

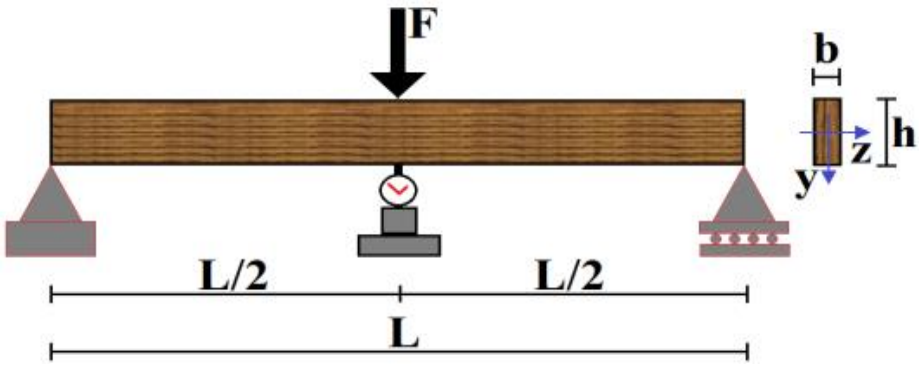
h - visina uzorka, mm

L - razmak između oslonaca, mm.

Tijekom ispitivanja gornja polovica uzorka opterećena je tlačno, donja vlačno, a sredina uzorka je neutralna. Ispitivanje se najčešće obavlja na uzorcima pravokutnog presjeka. Dužina uzorka je prema

normi jednaka ili veća od 18×*h* (*h* = visina uzorka). Uzorak je poduprt na dva oslonca, s međusobnim razmakom od 15×*h*.

Shematski prikaz mjerenja savojne čvrstoće prikazan je na slici 13. [16]



Slika 13. Ispitivanje savojne čvrstoće metodom savijanja u tri točke [16]

Vrijednosti savojne čvrstoće za neke domaće vrste drva prikazane se u tablici 6. [11]

Tablica 6. Savojna čvrstoća poznatijih vrsta drva pri 12 do 15% vlage [11]

Vrsta drva	Savojna čvrstoća , N/mm^2	
	paralelno na vlakanca	okomito na vlakanca
Brijest	50 do 160	-
Bukva	60 do 180	-
Grab	450 do 140	-
Jasen	50 do 180	-
Hrast	70 do 100	-
Orah	80 do 140	-
Bor	40 do 200	-
Jela	40 do 100	-
Smreka	40 do 120	-

Kao i kod većine svojstava drva, i savojna čvrstoća ovisi o usmjerenosti strukture. Najvišu vrijednost savojna čvrstoća ima u longitudinalnom smjeru.

Kod nekih vrsta savojna čvrstoća ovisi i o kutu koji zatvaraju sila i tangenta na god. Pritom se, kod nekih vrsta, najviša vrijednost postiže pri kutu od 0°, a kod drugih pri kutu od 45° ili 90°.

Smična čvrstoća je otpor drva prema vanjskoj sili koja nastoji pomaknuti njegove dijelove paralelno s vlaknima ili okomito na smjer vlakana.

Smična čvrstoće R_τ računa se prema izrazu:

$$R_\tau = \frac{F_{max}}{b \times l} \text{ , N/mm}^2 \qquad (3.8)$$

gdje je:

F_{max} - maksimalna vlačna sila pri kojoj dolazi do loma, N

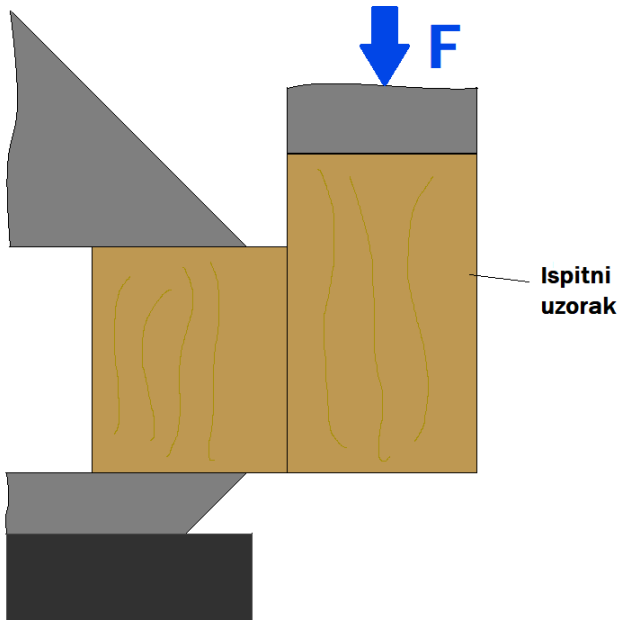
b - širina uzorka, mm

l - duljina uzorka, 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 poprečne površine smicanja taj smjer može biti paralelno s godovima ili okomito na godove. Smična čvrstoća u smjeru vlakanaca u tangencijalnoj ravnini veća je za oko 15 do 35 % nego u radijalnoj, dok je u poprečnoj ravnini čvrstoća okomito na vlakanca znatno veća od one u smjeru vlakanaca.

Na slici 14. prikazana je metoda ispitivanja smične čvrstoće.

U tablici 7 prikazane su vrijednosti smične čvrstoće za neke domaće vrste drva. [11]



Slika 14. Metoda ispitivanja smične čvrstoće

Tablica 7. Smična čvrstoća poznatijih vrsta drva pri 12 do 15% vlage [11]

Vrsta drva	Smična čvrstoća , N/mm^2	
	paralelno na vlakanca	okomito na vlakanca
Brijest	7	25
Bukva	5 do 20	35
Grab	10	30
Jasen	7	-
Hrast	5 do 15	30
Orah	-	-
Bor	50 do 15	20
Jela	5	25
Smreka	5 do 10	25

3.4. Žilavost

Žilavost je sposobnost materijala da plastičnom deformacijom razgradi naprezanja i na taj način povisi otpornost materijala na krhki lom. Ispitivanje žilavosti drva provodi se na Charpyjevu batu, a računa se prema jednadžbi:

$$KU\,(KV) = G\,(h_1 - h_2)\,,\ J \tag{3.8}$$

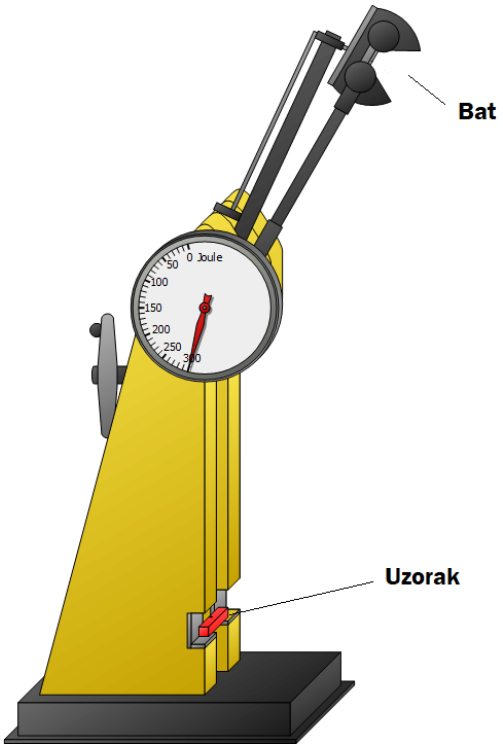
gdje je

G - težina bata, N

h_1 - početna visina bata, m

h_2 - visina bata nakon loma epruvete, m.

Za ispitivanje žilavosti potrebno je prethodno pripremiti uzorak prema propisanim normama. Uzorak mora imati U ili V zarez na plohi koja je nasuprot onoj u koju udara bat. Bat se pušta da u slobodnom padu udari u epruvetu brzinom od 5 do 5,5 m/s. Dio kinetičke energije potroši se na trganje epruvete, a preostali dio podigne bat na visinu h_2. Uređaj za ispitivanje žilavosti prikazan je na slici 15. [17]



Slika 15. Metoda ispitivanja žilavosti Charpyjevim batom [17]

3.5. Otpornost na abrazijsko trošenje

Otpornost na trošenje je svojstvo drva da se opire postupnom trošenju površine uslijed djelovanja vanjskih mehaničkih sila. S obzirom na primjenu drva, najveću važnost ima abrazijski mehanizam trošenja. Otpornost na abrazijsko trošenje ovisi o vrsti drva, građi, gustoći, presjeku, sadržaju vode te načinu obrade površine drva. Što je veći udio celuloze to je veća tvrdoća drva. Najčešće je tvrdoća drva direktno povezana s otpornošću na abrazijsko trošenje, ali ne mora uvijek biti tako.

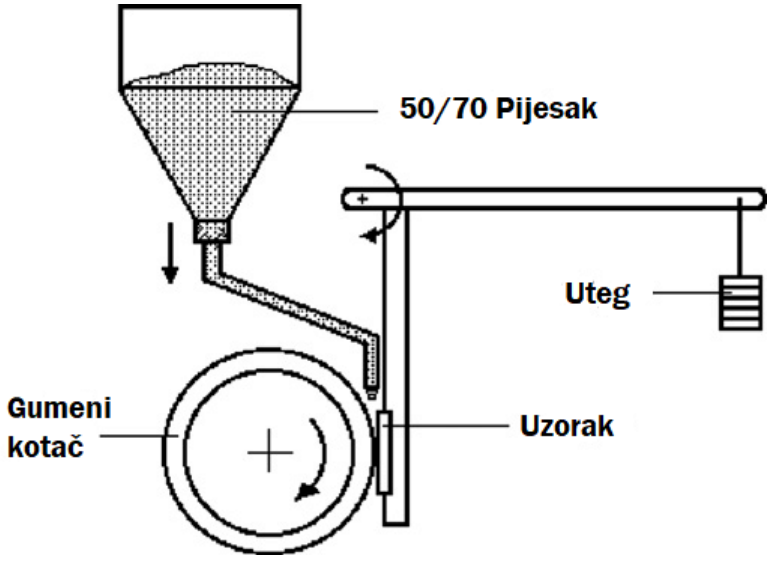
Postoji nekoliko standardnih uređaja za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje od kojih s dva najčešće korištena Taber abraser i standardni uređaj za ispitivanje trošenja metodom "suhi pijesak – gumeni kotač" .

Mehanički proces trošenja u svakodnevici najviše se uočava kod drvenih podova odnosno drvenih stepenica, pragova, skija, parketa itd.

Na slici 16. prikazan je uređaj kojim se ispituje otpornost na abrazijsko trošenje, a na slici 17. je shematski prikaz ispitivanja metodom "suhi pijesak – gumeni kotač". [18] [19]



Slika 16. Uređaj za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje Taber Abraser 1700 [18]



Slika 17. Shematski prikaz metode "suhi pijesak – gumeni kotač" [19]

3.6. Tvrdoća drva

Tvrdoća je svojstvo materijala koje se protivi prodiranju stranog tijela u njegovu strukturu ili površinu. Kod drva se tvrdoća može odrediti u poprečnom, radijalnom i tangencijalnom presjeku ovisno o pravcu djelovanja sile u odnosu na smjer vlakana.

Tvrdoća kod drva ovisi o gustoći, udjelu vlage, građi, a ponajviše o vrsti drva. Tvrdoća među vrstama se dosta razlikuje, ali je nerijetko slučaj da se i unutar iste vrste tvrdoća, ali i druga svojstva razlikuju. Razlike mogu biti velike i unutar istog debla zbog nehomogene strukture i grešaka nastalih vanjskim ili unutarnjim čimbenicima. Kako tvrdoća znatno ovisi o gustoći drva, donji dijelovi debla s većom gustoćom imaju veću tvrdoću od viših dijelova debla koji su u pravilu manje gustoće. Osim gustoće, tvrdoća ovisi i o udjelu ranog i kasnog drva u godovima. Primjerice četinjače s uskim godovima i većim udjelom kasnog drva su tvrđe od četinjača sa širokim godovima. Kod listača udio kasnog drva raste sa širinom goda stoga su listače sa širim godovima tvrđe od listača s užim godovima.

Zbog ortotropnosti odnosno usmjerene strukture drva nužno je razlikovati poprečnu, tangencijalnu i radijalnu tvrdoću. Tvrdoća na poprečnom presjeku veća je nego na tangencijalnom i radijalnom presjeku i to približno 1,6 do 2,5 puta. Kod tangencijalnog i radijalnog presjeka tvrdoća je u pravilu vrlo slična. [7]

U tablici 8. prikazani su rezultati ispitivanja tvrdoće u različitim presjecima, iz literaturnog izvora [20]. Vidi se da je tvrdoća u presjeku okomitom na vlakanca manja od tvrdoće u poprečnom presjeku. U istom radu vidi se i kako na tvrdoću drva utječe modifikacija drva anorganskim zaštitnim sredstvom

na bazi bakra. U oba presjeka je tvrdoća modificiranog drva niža u odnosu na netretirano drvo. U oba slučaja je vidljivo da je tvrdoća veća kada je sila paralelna s godovima drva.

Tablica 8. Utjecaj smjera vlakanaca i modifikacije drva na tvrdoću [20]

TVRDOĆA, MPa			
okomito na vlakanca		**paralelno s vlakancima**	
netretirano drvo	modificirano drvo	netretirano drvo	modificirano drvo
15,83	**13,66**	**27,55**	**19,60**

U drugom primjeru provedeno je ispitivanje tvrdoće metodom prema Janki na drvu crnog graba. Rezultati tog istraživanja pokazuju da je ponovno veća tvrdoća u smjeru paralelnom s vlakancima (6,89 kN) nego u smjeru okomitom na vlakanca (5,64 kN). [21]

Poznato je da promjena udjela vlage može dosta utjecati na tvrdoću drva. Iz iskustva se zna da povećanjem udjela vlage u drvu u iznosu od 1%, tvrdoća u poprečnom smjeru se smanjuje za oko 4% dok se u radijalnom i tangencijalnom presjeku tvrdoća smanjuje za 1%. Primjerice suho drvo četinjača ima oko 50% veću tvrdoću od mokrog drva, a suho drvo listača oko 30% veću tvrdoću od mokrog drva. U tablici 9. prikazani su razredi tvrdoće prema Janki s pripadajućim vrstama. [7]

Tablica 9. Podjela tvrdoće drva prema Janki [7]

Razred tvrdoće	Tvrdoća prema Janki	Vrsta drva
Vrlo meko drvo	Do 35	Lipa, bor, vrba, kesten divlji
Meko drvo	35,1 do 50	Breza, ariš, borovica, joha
Srednje tvrdo drvo	50,1 do 65	Brijest, dud, kesten pitomi
Tvrdo drvo	65,1 do 100	Hrast, jasen, javor, bukva, grab
Vrlo tvrdo drvo	100,1 do 150	Maslina, crnika, svib, žutika
Iznimno tvrdo drvo	Veći od 150,1	Ebanovina, gvajak

Na slici 18. prikazana je mikrostruktura poprečnog presjeka drva s najvišom izmjerenom tvrdoćom (*Schinopsis balansae*), koja prema Janki iznosi 20,34 N. [22]

Na slici 19. vidi se tangencijalni presjek jedne od najtvrđih domaćih vrsta drva (*Olea europaea*). [23]



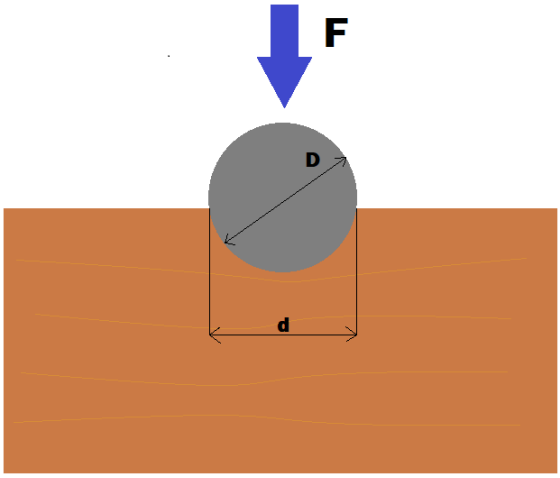
Slika 18. Mikrostruktura najtvrđe vrste drva, poprečni presjek [22]



Slika 19. Mikrostruktura drva masline, tangencijalni presjek [23]

Za mjerenje tvroće drva često se koristi i Brinellova metoda. Oznaka tvrdoće po Brinellu jest HB, a ovisi o primijenjenoj sili i veličini otiska. Kod mjerenja Brinellovom metodom, u površinu ispitnog uzorka utiskuje se čelična kuglica. Bitno je istaknuti da postoje normirane dimenzije kuglica, standardne vrijednosti sile utiskivanja kao i točno određeni prirast i trajanje opterećenja.

Na slici 20. shematski je prikazano ispitivanje tvrdoće Brinellovom metodom.



Slika 20. Shematski prikaz ispitivanja tvrdoće Brinellovom metodom

Tvrdoća po Brinellu računa se prema izrazu:

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D-\sqrt{D^2-d^2}} \qquad (5.1)$$

gdje je

HB - tvrdoća po Brinellu,

F - sila utiskivanja, N

D - promjer kuglice, mm

d - promjer otiska, mm.

Prednosti Brinellove metode su lako mjerenje veličine otiska (dovoljno je mjerno povećalo), široko mjerno područje od 0 do 650 HB i jednostavna priprema površine za ispitivanje (dovoljno grubo brušenje). Ipak, nedostaci metode su nemogućnost mjerenja visokih tvrdoća, ovisnost tvrdoće o opterećenju te je estetski nepogodno budući da kuglica ostavlja trag na površini.

3.7. Toplinska svojstva

Jedno od najvažnijih toplinskih svojstava jest toplinska vodljivost. Kada se radi o drvu, toplinska vodljivost ovisi o strukturi, poroznosti, udjelu vlage, temperaturi te naravno usmjerenosti strukture.

Primjerice toplinska vodljivost je niža ukoliko se radi o poroznijem drvu, a ukoliko udio vlage u drvu poraste za 1%, toplinska vodljivost će narasti u prosjeku za 1,25 %.

U tablici 10. prikazane su vrijednosti toplinske vodljivosti za četinjače i listače te ostale tehničke materijale. [5]

Tablica 10. Toplinska vodljivost nekih materijala [5]

Materijal	Koeficijent toplinske vodljivosti, W/mK
Četinjače	0,13
Listače	0,17
Opeka	0,75
Beton	1,5
Čelik	45
Aluminij	237

3.8. Procjena kvalitete drva

Kvaliteta drva jest omjer iznosa nekog mehaničkog svojstva i gustoće, a računa se prema izrazu:

$$k = \frac{\sigma}{\rho} \qquad (3.9)$$

gdje je:

σ - iznos čvrstoće, N/mm^2

ρ - gustoća drva, g/cm^3.

3.9. Rasipanje i statistička obrada rezultata

Svojstva drva vrlo često mogu značajno varirati pa i unutar iste vrste. Velika rasipanja izmjerenih rezultata uzrokovana su usmjerenom strukturom i čestim greškama u strukturi. Zato se kod ispitivanja različitih mehaničkih i fizikalnih svojstava drva propisuje maksimalna vrijednost koeficijenta varijacije.

U tablici 11. prikazan je maksimalni koeficijent varijacije za pojedina mehanička i fizikalna svojstva. [24]

Tablica 11. Koeficijent varijacije mehaničkih svojstava [24]

Svojstvo	Koeficijent varijacije (%)
Modul elastičnosti	22
Savojna čvrstoća	12
Vlačna čvrstoća	34
Čvrstoća na udarac	25
Tlačna čvrstoća paralelno na vlakanca	18
Tlačna čvrstoća okomito na vlakanca	28
Smična čvrstoća	25
Tvrdoća	20
Gustoća	10

4. SVOJSTVA I KARAKTERISTIKE SMREKE

Smreka (lat. *Picea abies*) je vrsta drva iz skupine četinjača. U pravilu raste do 40 metara no nije rijedak slučaj da naraste i do 50 metara. Promjer debla je u prosjeku 1 metar. Oblik joj je vrlo pravilan. Deblo je ravno i punodrvno, krošnja stožasta s ravnomjerno raspoređenim granama. Kora je kod mladih drva glatka i sivozelena do smeđa, a kod starijih drva ljuskasto raspucana i dobiva crkvenkasto-smeđu boju.

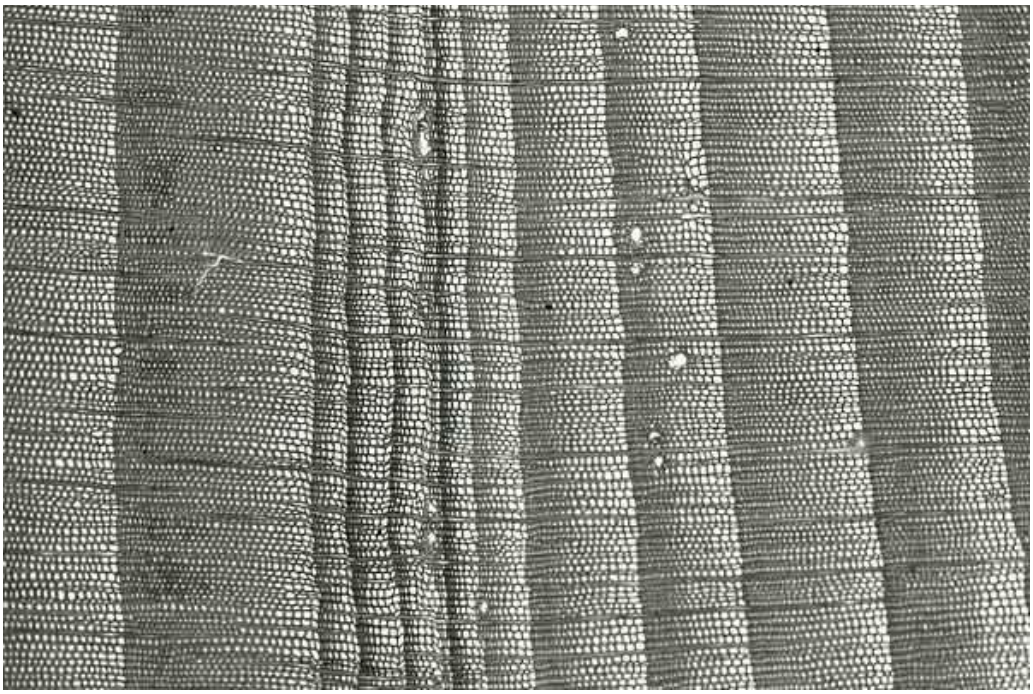
Drvo smreke ima vrlo jednostavnu građu, a osnovnu drvnu masu čine traheide. Ovisno o mjestu rasta, smreka ima različito široke i izrazite godove. Prijelaz iz ranog u kasno drvo je postupan, a središte drva nije obojeno, a samo drvo je žućkastobijele boje i svilenkastog sjaja. Svježe drvo smreka miriše po smoli. [25][26]

Na slici 21. prikazan je poprečni presjek kroz deblo smreke. [27]



Slika 21. Poprečni presjek debla smreke [27]

Mikrostruktura drva smreke prikazana je na slici 22. [28]



Slika 22. Mikrostruktura drva smreke u poprečnom presjeku [28]

Svojstva smreke su u prosjeku vrlo dobra, a drvo smreke je pogodno za korištenje kao tehnički materijal. Smatra se laganim drvom. Gustoća pri 12 do 15 % vlage iznosi 330 do 580 kg/m^3, a u prosjeku oko 450 kg/m^3. Deblo je u pravilu srednje tvrdo, a ukoliko se radi o uskim godovima, znači da će udio kasnog drva biti veći, a samim time će i tvrdoća biti veća. Drvo je elastično, a na otvorenom slabe trajnosti, no u pravilu se lako i dobro suši bez naknadnog savijanja i pucanja te je nakon sušenja dimenzijski vrlo stabilno.[25]

Drvo smreke se vrlo dobro obrađuje. Uz općenito karakteristične greške drva, problem može izazvati velika količina smole koja može izlaziti tijekom obrade i time otežati obradu, a u konačnici utjecati i na estetska svojstva drva. Drvo smreke se ističe među drugim vrstama zbog postizanja vrlo visokog stupnja glatkoće površine.

Zbog dobrih mehaničkih svojstava, niske gustoće i dobre obradivosti, ima vrlo široko područje primjene. Često se primjenjuje u građevini, za izradu konstrukcija, za izradu alata, namještaja, podova, drvenih ploča, šibica, drvene vune itd. U industriji papira, smreka je jedna od najčešćih sirovina. Kako je već navedeno, kod smreke se može postići vrlo visoka glatkoća površine. Stoga je, kao i zbog dobrih akustičnih svojstava, drvo smreke najčešći izbor prilikom izrade gudačkih instrumenata. [26]

Na slici 23. prikazana je violina za koju se smatra da je jedna od najskupljih na svijetu, a izrađena je od drva smreke. [29]



Slika 23. Jedna od najskupljih "Stradivari" violina načinjena od drva smreke [29]

5. EKSPERIMENTALNI DIO

5.1. Cilj rada

Cilj rada je odrediti i analizirati kako orijentacija, s obzirom na godove, utječe na vrijednosti tvrdoće drva obične smreke u longitudinalnom smjeru. Ovisno o linijama goda i sili mjerenja, ispitivana površina zakretala se od 0° do 90°. Ispitivanje je provedeno po svim standardnim normama, Brinellovom metodom. Nakon provođenja ispitivanja, dobiveni rezultati su statistički obrađeni te su na temelju njih doneseni i odgovarajući zaključci.

5.2. Materijali za ispitivanje

Uzorci za ispitivanje tvrdoće izrezani su iz debla drva obične smreke tako da površina na kojoj se određuje tvrdoća bude u longitudinalnom smjeru, odnosno paralelna s uzdužnom osi drva. Uzorci su imali oblik četverostrane prizme, a dimenzije uzoraka bile su 25×25×85mm. Uzorci su izrezani iz polovice debla kako je prikazano na slici 24. Nakon rezanja i obrade uzorci su pregledani, a oštećeni uzorci i uzorci s nepravilnostima su odbačeni. Nakon toga preostalo je 55 uzoraka za nastavak ispitivanja.

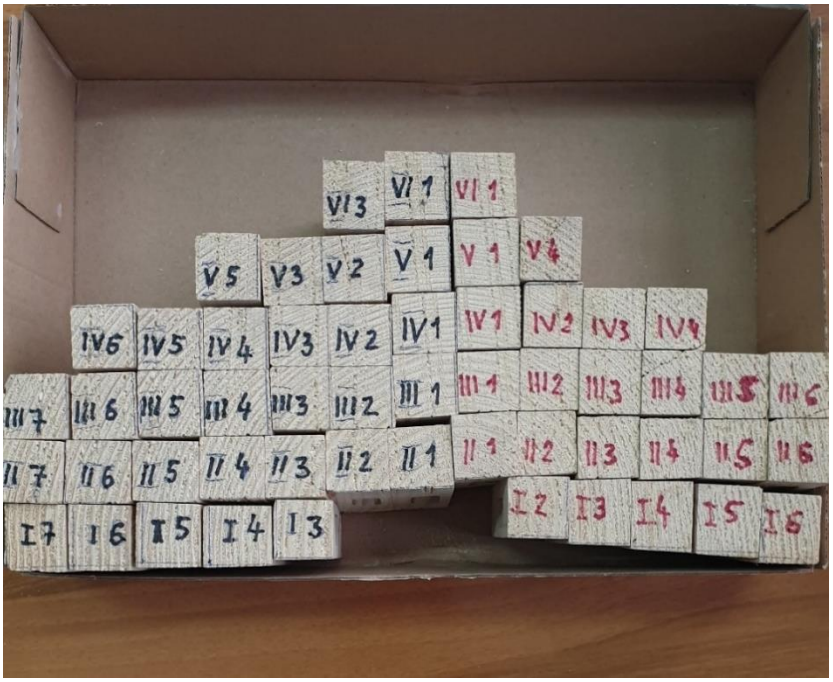
Na slici 25. prikazano je izrezivanje uzoraka na strojnoj pili.



Slika 24. Raspored uzoraka na poprečnom presjeku debla



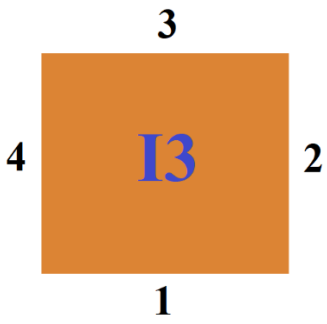
Slika 25. Izrezivanje uzoraka



Slika 26. Pripremljeni i označeni uzorci

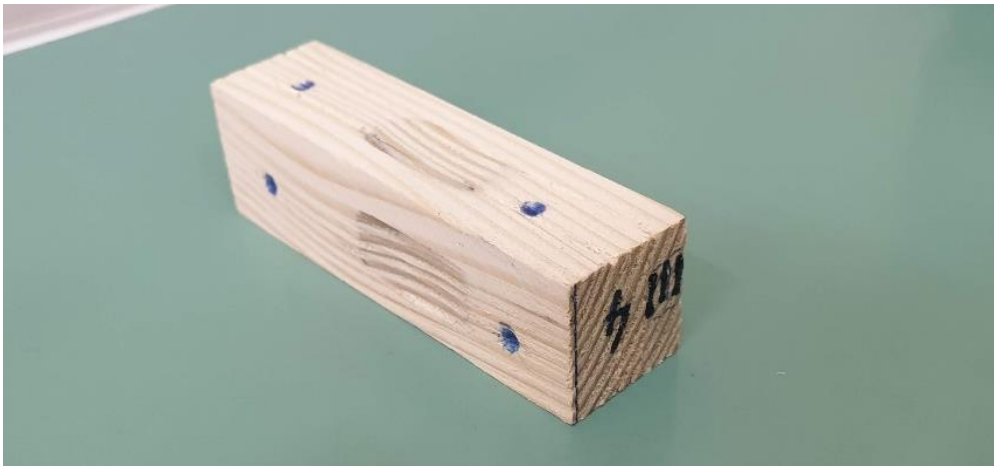
Na slici 26. prikazani su označeni uzorci. Crvene oznake odnose se na desnu četvrtinu debla, a plave oznake na lijevu četvrtinu. Svaki red je označen rimskim brojem, a stupci su označeni arapskim

brojevima. Također su na svim uzorcima brojevima od 1 do 4 označene plohe na kojima su mjerene tvrdoće. Na slici 27. shematski je prikazan raspored ploha u odnosu na oznaku uzorka.



Slika 27. Shematski prikaz označivanja uzorka

Na istim uzorcima se uz tvrdoću u okviru drugog završnog rada mjerila i otpornost na abrazijsko trošenje metodom „Suhi pijesak – gumeni kotač“ i zato se na uzorcima vide tragovi ispitivanja na abraziju. Tvrdoća se mjerila na svakoj stranici 85×25 mm kako je prikazano na slici 28. Na svakoj stranici napravljena su dva mjerenja, dovoljno daleko od ruba uzorka i od abradiranog područja kako bi se potpuno izbjegao utjecaj eventualnog ugnječenja materijala uslijed ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje.



Slika 28. Pozicije mjerenja s obzirom na tragove ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje

5.3. Ispitivanje tvrdoće po Brinellu

Ispitivanje tvrdoće provedeno je u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Zavodu za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Korištena je metoda po Brinellu sukladno normi HRN EN 1534:2010. Uređaj na kojemu je provedeno ispitivanje prikazan je na slici 29. Proizvođač uređaja je njemačka tvrtka VEB WPM, a model ima oznaku HP250.

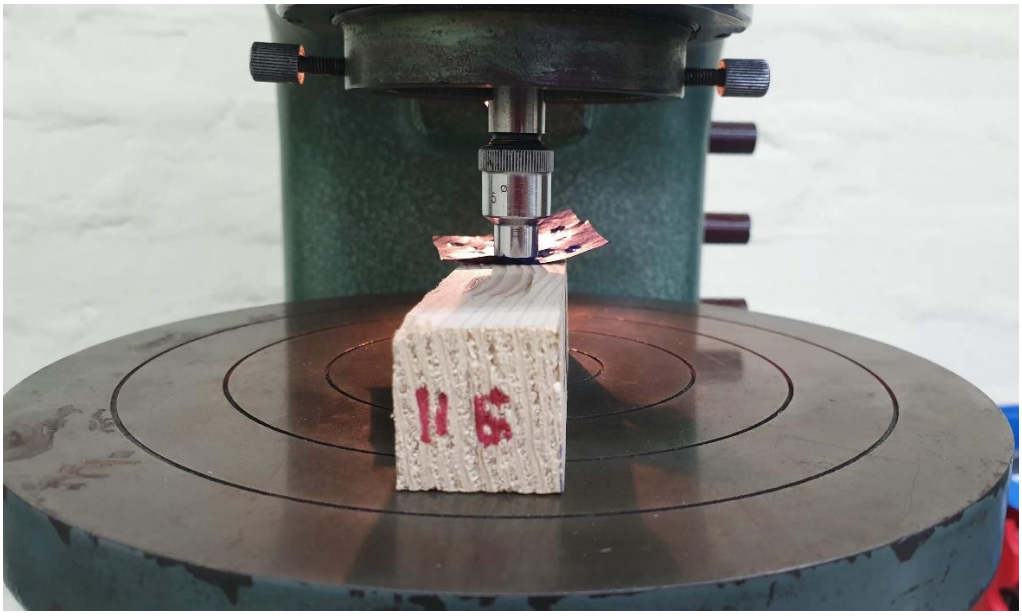


Slika 29. Uređaj za mjerenje tvrdoće Brinellovom metodom

Kod ovog ispitivanja u drvo se utiskivala kuglica od kaljenog čelika promjera 5 mm, a sila kojom se kuglica utiskivala u uzorak iznosila je 490,5 N. Prirast sile bio je postupan, a konačno maksimalno

opterećenje postizalo se za 15 ± 3 sekunde. Nakon što se postiglo maksimalno opterećenje, sila na uzorak djeluje još 30 sekundi nakon čega slijedi rasterećenje. S obzirom da je drvo smreke vrlo svijetlo i granice otiska je teško raspoznati, za preciznije mjerenje koristio se indigo papir koji se postavlja između kuglice i uzorka. Indigo papir oboji otisak, a budući da je vrlo tanak ne utječe na rezultate mjerenja tvrdoće.

Na slici 30. vidi se položaj uzorka na tvrdomjeru tijekom mjerenja.



Slika 30. Položaj ispitnog uzorka pod opterećenjem

Nakon rasterećenja mjeri se promjer otiska u ravnini površine uzorka. Mjerno povećalo kojim se mjeri promjer otiska mora imati minimalnu točnost od ± 0,2 mm. Uređaj za mjerenje otiska prikazan je na slici 31., a na slici 32. vide se utisnuća na površini uzorka nakon mjerenja tvrdoće. Na istoj površini vide se i tragovi ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje koje je prethodno provedeno u okviru drugog istraživanja.



Slika 31. Mjerenje otisaka na uzorku



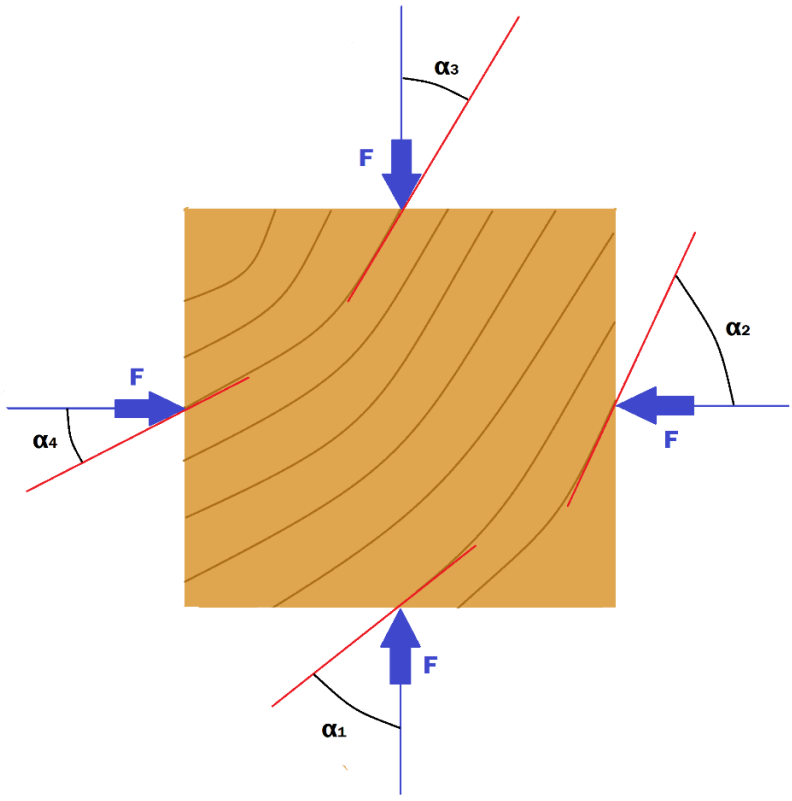
Slika 32. Otisci na uzorku nakon mjerenja tvrdoće

Nakon mjerenja tvrdoća, izmjereni su kutovi između smjera sile utiskivanja pri mjerenju tvrdoće koji je uvijek okomit na površinu uzorka i tangente na liniju goda.

Na slici 33. prikazan je poprečni presjek uzorka na kojemu se vide godovi, a na slici 34. shematski je prikazan način na koji se određuju kutovi na svim mjernim površinama.



Slika 33. Oblik godova na uzorku



Slika 34. Shematski prikaz mjerenja kuta

5.4. Rezultati ispitivanja

U tablicama od 12. do 17. prikazani su svi rezultati mjerenja tvrdoće i pripadajući kutovi uz svako mjerenje. Uz svaki kut navedeni su rezultati dvaju mjerenja tvrdoće po pripadajućoj stranici.

Tablica 12. Rezultati mjerenja kutova i izračunate tvrdoće uzoraka 1. retka (I)

	α_1,°	HB	α_2,°	HB	α_3,°	HB	α_4,°	HB
A I3	90	**40.8**	0	**58.0**	90	**38.2**	0	**54.0**
		38.2		**50.2**		**35.7**		**46.8**
A I4	90	**40.8**	0	**62.5**	90	**38.2**	0	**72.9**
		40.8		**58.0**		**40.8**		**54.0**
A I5	90	**43.7**	0	**67.4**	90	**35.7**	0	**58.0**
		35.7		**58.0**		**38.2**		**58.0**
A I6	90	**40.8**	0	**58.0**	90	**38.2**	0	**62.5**
		33.4		**62.5**		**40.8**		**62.5**
A I7	90	**38.2**	0	**62.5**	90	**43.7**	0	**62.5**
		38.2		**54.0**		**33.4**		**58.0**
B I2	90	**29.2**	0	**72.9**	90	**35.7**	0	**38.2**
		38.2		**58.0**		**43.7**		**35.7**
B I3	90	**31.2**	0	**62.5**	90	**38.2**	0	**67.4**
		43.7		**60.2**		**35.7**		**54.0**
B I4	90	**35.7**	10	**43.7**	90	**40.8**	12	**43.7**
		54.0		**62.5**		**40.8**		**58.0**
B I5	83	**33.4**	15	**58.0**	75	**35.7**	10	**46.8**
		46.8		**62.5**		**35.7**		**72.9**
B I6	82	**38.2**	10	**50.2**	78	**35.7**	8	**67.4**
		38.2		**62.5**		**38.2**		**46.8**

Tablica 13. Rezultati mjerenja kutova i izračunate tvrdoće uzoraka 2. retka (II)

	α_1,°	HB	α_2,°	HB	α_3,°	HB	α_4,°	HB
A II1	18	58.0	72	40.8	22	58.0	68	40.8
		54.0		46.8		62.5		40.8
A II2	45	43.7	45	67.4	65	46.8	35	67.4
		54.0		38.2		43.7		54.0
A II3	65	43.7	33	50.2	55	46.8	25	67.4
		38.2		67.4		46.8		58.0
A II4	72	35.7	25	62.5	68	33.4	23	62.5
		43.7		54.0		40.8		58.0
A II5	80	35.7	30	58.0	73	54.0	20	58.0
		33.4		54.0		35.7		62.5
A II6	78	35.7	22	67.4	70	35.7	20	62.5
		38.2		54.0		33.4		54.0
A II7	82	40.8	19	58.0	75	40.8	20	54.0
		31.2		60.2		35.7		62.5
B II1	28	58.0	51	43.7	20	58.0	80	35.7
		54.0		43.7		62.5		43.7
B II2	61	43.7	36	54.0	47	46.8	40	54.0
		39.5		54.0		38.2		62.5
B II3	72	43.7	25	54.0	61	38.2	23	46.8
		40.8		64.9		40.8		67.4
B II4	81	31.2	20	58.0	68	35.7	13	62.5
		35.7		54.0		38.2		62.5
B II5	83	33.4	11	43.7	79	31.2	9	58.0
		29.2		62.5		40.8		62.5

Tablica 14. Rezultati mjerenja kutova i izračunate tvrdoće uzoraka 3. retka (III)

	α_1,°	HB	α_2,°	HB	α_3,°	HB	α_4,°	HB
A III1	16	**50.2**	85	**50.2**	18	**67.4**	71	**43.7**
		67.4		**35.7**		**43.7**		**46.8**
A III2	32	**54.0**	62	**43.7**	29	**62.5**	60	**43.7**
		50.2		**33.4**		**43.7**		**43.7**
A III3	46	**43.7**	51	**50.2**	36	**58.0**	53	**54.0**
		58.0		**54.0**		**58.0**		**46.8**
A III4	58	**46.8**	45	**72.9**	42	**54.0**	38	**54.0**
		62.5		**43.7**		**58.0**		**58.0**
A III5	65	**40.8**	40	**50.2**	51	**50.2**	35	**54.0**
		36.9		**67.4**		**46.8**		**55.9**
A III6	60	**40.8**	30	**52.1**	55	**54.0**	30	**75.8**
		35.7		**58.0**		**50.2**		**54.0**
A III7	70	**35.7**	27	**62.5**	62	**43.7**	28	**60.2**
		38.2		**54.0**		**42.2**		**54.0**
B III1	10	**54.0**	70	**35.7**	18	**58.0**	82	**33.4**
		62.5		**40.8**		**58.0**		**33.4**
B III2	37	**62.5**	61	**43.7**	31	**46.8**	56	**67.4**
		54.0		**72.9**		**72.9**		**38.2**
B III3	48	**43.7**	45	**46.8**	42	**33.4**	48	**38.2**
		72.9		**58.0**		**67.4**		**43.7**
B III4*	53	**43.7**	35	**46.8**	51	**40.8**	37	**58.0**
		43.7		**62.5**		**72.9**		**54.0**
B III5	68	**38.2**	25	**58.0**	58	**40.8**	22	**62.5**
		39.5		**67.4**		**46.8**		**62.5**

Tablica 15. Rezultati mjerenja kutova i izračunate tvrdoće uzoraka 4. retka (IV)

	α_1,°	HB	α_2,°	HB	α_3,°	HB	α_4,°	HB
A IV1	7	**62.5**	82	**35.7**	10	**67.4**	75	**40.8**
		52.1		**38.2**		**54.0**		**32.3**
A IV2	25	**58.0**	72	**46.8**	28	**46.8**	62	**38.2**
		54.0		**35.7**		**48.5**		**43.7**
A IV3	31	**50.2**	70	**43.7**	21	**62.5**	60	**33.4**
		52.1		**38.2**		**46.8**		**46.8**
A IV4	36	**54.0**	59	**46.8**	28	**58.0**	55	**43.7**
		50.2		**48.5**		**46.8**		**43.7**
A IV5	47	**46.8**	48	**35.7**	48	**58.0**	45	**43.7**
		40.8		**43.7**		**31.2**		**40.8**
A IV6	55	**35.7**	40	**45.2**	50	**43.7**	36	**46.8**
		38.2		**54.0**		**35.7**		**58.0**
B IV1	6	**50.2**	70	**46.8**	16	**50.2**	85	**35.7**
		67.4		**35.7**		**58.0**		**36.9**
B IV2	32	**50.2**	66	**45.2**	30	**58.0**	62	**43.7**
		62.5		**40.8**		**52.1**		**33.4**
B IV3	32	**58.0**	58	**46.8**	29	**67.4**	60	**46.8**
		46.8		**42.2**		**50.2**		**38.2**
B IV4	46	**46.8**	45	**58.0**	47	**35.7**	45	**50.2**
		46.8		**40.8**		**62.5**		**39.5**

Tablica 16. Rezultati mjerenja kutova i izračunate tvrdoće uzoraka 5. retka (V)

	α_1,°	HB	α_2,°	HB	α_3,°	HB	α_4,°	HB
A V1	7	**67.4**	90	**35.7**	8	**58.0**	90	**33.4**
		50.2		**38.2**		**58.0**		**35.7**
A V2	20	**62.5**	77	**40.8**	18	**58.0**	68	**43.7**
		54.0		**33.4**		**58.0**		**35.7**
A V3	24	**50.2**	63	**38.2**	30	**55.9**	60	**43.7**
		62.5		**45.2**		**58.0**		**40.8**
A V5	33	**58.0**	62	**38.2**	30	**54.0**	58	**43.7**
		46.8		**35.7**		**54.0**		**46.8**
B V1	11	**72.9**	71	**54.0**	12	**62.5**	82	**38.2**
		50.2		**40.8**		**58.0**		**43.7**
B V4	35	**58.0**	57	**43.7**	45	**58.0**	60	**33.4**
		54.0		**36.9**		**40.8**		**46.8**

Tablica 17. Rezultati mjerenja kutova i izračunate tvrdoće uzoraka 6. retka (VI)

	α_1,°	HB	α_2,°	HB	α_3,°	HB	α_4,°	HB
A VI1	0	**54.0**	90	**35.7**	0	**67.4**	90	**38.2**
		67.4		**46.8**		**50.2**		**31.2**
A VI3	26	**54.0**	71	**40.8**	22	**58.0**	60	**54.0**
		62.5		**46.8**		**62.5**		**46.8**
B VI1	12	**72.9**	83	**46.8**	10	**62.5**	82	**35.7**
		50.2		**33.4**		**58.0**		**46.8**

Zbog ponavljanja izmjerenih kutova odnosno više izmjerenih tvrdoća za isti kut, izračunata je prosječna tvrdoća za svaki pojedini kut.

U tablici 18. prikazane su prosječne vrijednosti tvrdoće za sve pripadajuće kutove.

Tablica 18. Prosječne vrijednosti tvrdoće za pripadajuće kutove

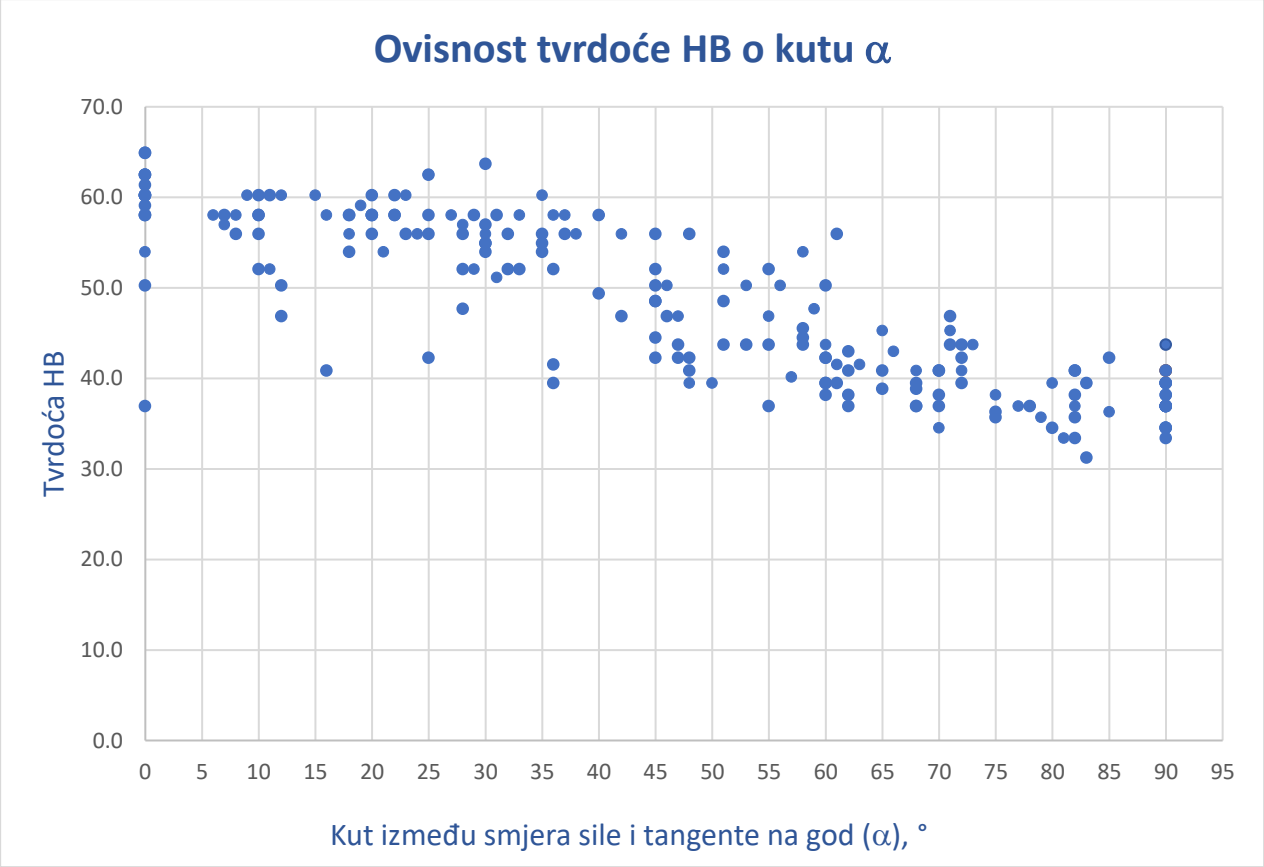
Kut mjerenja, °	Tvrdoća HB	Kut mjerenja, °	Tvrdoća HB	Kut mjerenja, °	Tvrdoća HB
0	**58.5**	31	**54.6**	61	**45.7**
6	**58.0**	32	**53.4**	62	**39.4**
7	**57.5**	33	**55.0**	63	**41.5**
8	**57.0**	35	**56.3**	65	**41.6**
9	**60.2**	36	**47.8**	66	**43.0**
10	**57.4**	37	**57.0**	68	**38.6**
11	**56.1**	38	**55.9**	70	**38.3**
12	**52.4**	40	**55.1**	71	**45.3**
15	**60.2**	42	**51.4**	72	**41.6**
16	**49.4**	45	**48.8**	73	**43.7**
18	**56.5**	46	**48.5**	75	**36.7**
19	**59.1**	47	**44.3**	77	**36.9**
20	**58.4**	48	**44.6**	78	**36.9**
21	**54.0**	50	**39.5**	79	**35.7**
22	**59.1**	51	**49.6**	80	**37.0**
23	**58.1**	53	**47.0**	81	**33.4**
24	**55.9**	55	**44.9**	82	**37.6**
25	**56.2**	56	**50.2**	83	**36.7**
27	**58.0**	57	**40.2**	85	**39.3**
28	**53.2**	58	**46.9**	90	**38.1**
29	**55.0**	59	**47.7**		
30	**56.7**	60	**42.2**		

5.5. Analiza rezultata ispitivanja

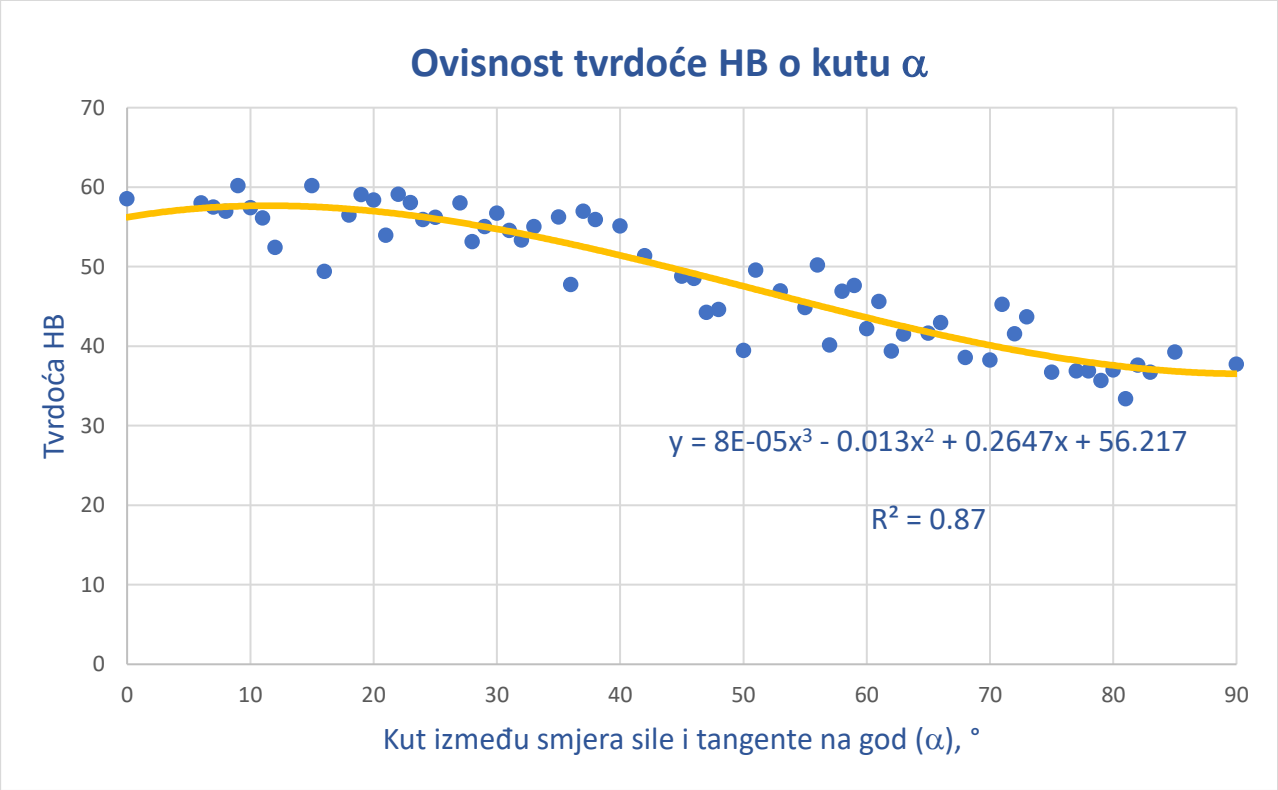
U dijagramu na slici 35. prikazani su svi rezultati mjerenja tvrdoće HB i njihova ovisnost o kutu između smjera sile pri mjerenju tvrdoće i tangente na liniju goda. Navedeni kut se mijenja u rasponu od 0°do 90°. Pri kutu od 0° sila utiskivanja je paralelna s tangentom na godove, a izmjerena tvrdoća odnosi se na tvrdoću radijalnog presjeka. Pri kutu od 90° sila utiskivanja je okomita na tangentu, a izmjerena tvrdoća je tvrdoća u tangencijalnom presjeku.

U dijagramu je vidljivo relativno veliko rasipanje rezultata izmjerene tvrdoće, što je i očekivano s obzirom da se radi o izrazito anizotropnom materijalu.

Zbog velikog broja mjerenja izračunate su srednje vrijednosti tvrdoće HB za pojedine kutove. U dijagramu na slici 36. prikazane su srednje vrijednosti tvrdoće i promjena tvrdoće s kutom između smjera sile i tangente na liniju goda. Dobiveni rezultati mogu se aproksimirati polinomom 3. stupnja uz vrlo visok koeficijent korelacije (R^2=0,87) što se također vidi na navedenoj slici.



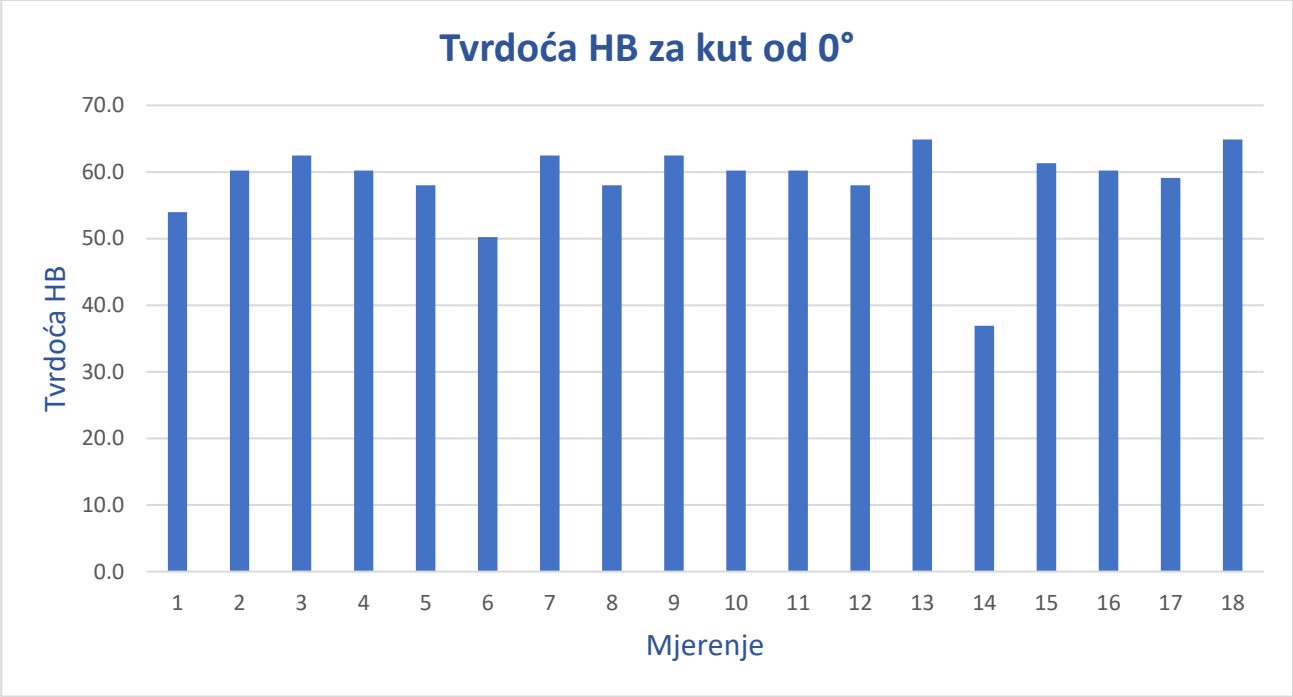
Slika 35. Ovisnost tvrdoće HB o kutu α



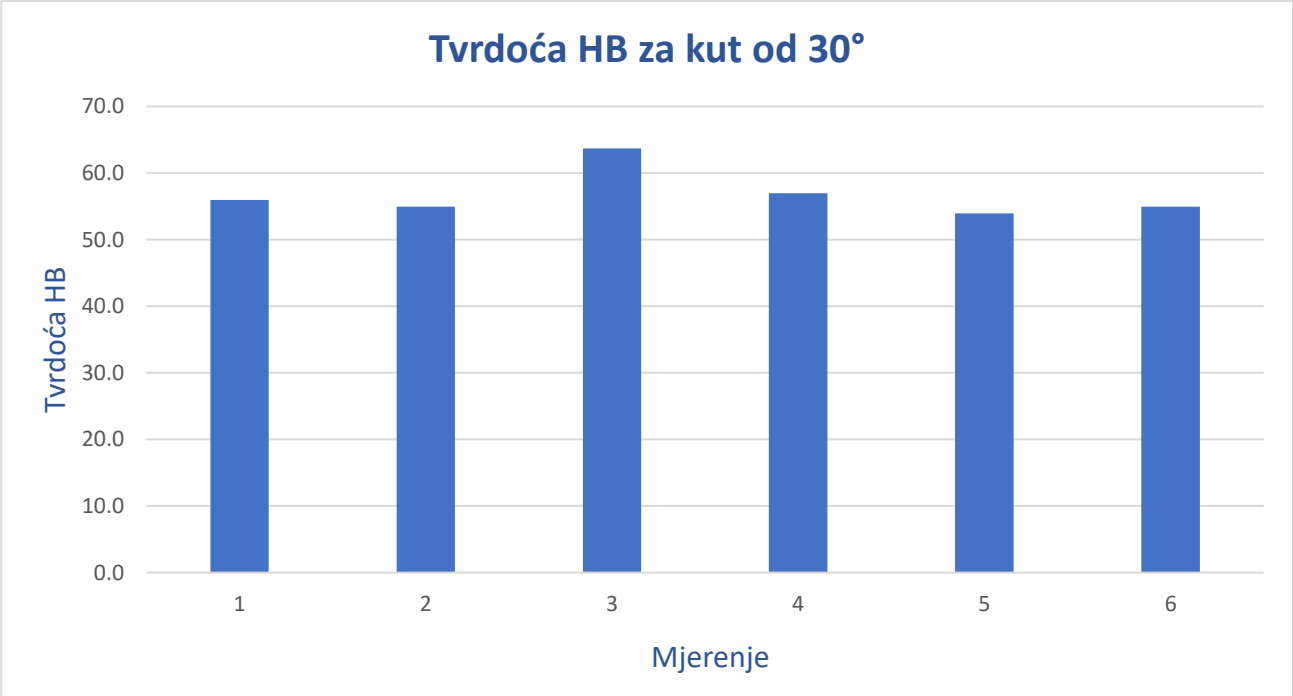
Slika 36. Ovisnost tvrdoće HB (srednja vrijednost) o kutu α

Iz dijagrama je vidljivo da tvrdoća ovisi o kutu između smjera sile i tangente na god. Vrijednost tvrdoće postupno se smanjuje s porastom navedenog kuta. Prosječna izmjerena tvrdoća u radijalnom presjeku (sila paralelna s tangentom na godove) iznosi 58,54 HB, dok je prosječna izmjerena tvrdoća u tangencijalnom presjeku (sila okomita na tangentu) 38,15 HB. Prema tome, došlo je do pada tvrdoće za oko 35 %.

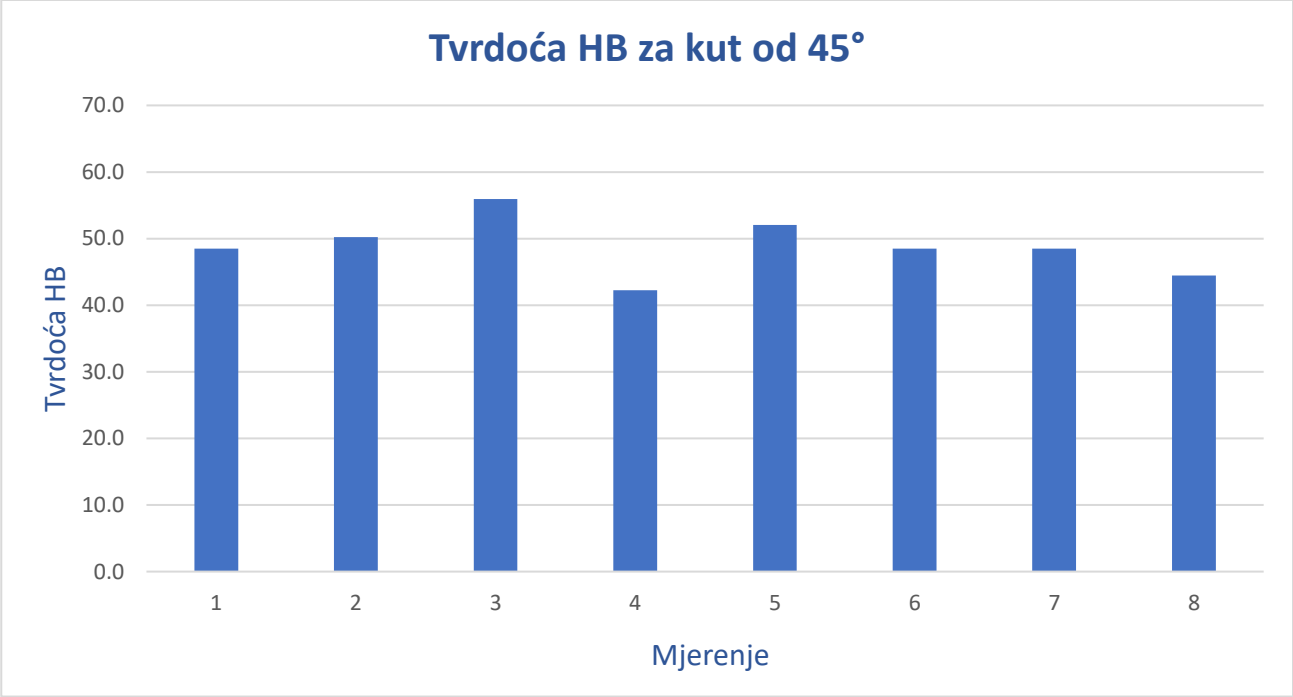
Kako je za drvo karakteristično veliko rasipanje vrijednosti za sva mehanička svojstva pa tako i za tvrdoću potrebno je napraviti što veći broj mjerenja. Zato su na slikama od 37. do 41. prikazane vrijednosti tvrdoće za kutove 0°, 30°, 45°, 60° i 90° za koje je dobiven veći broj mjerenja. Može se vidjeti da rasipanja rezultata nisu velika pogotovo za kutove od 0° i 90° kod kojih je broj mjerenja najveći. Primjerice, za kut od 90° gdje je broj mjerenja najveći, standardna devijacija iznosi 2,58, a standardna devijacija aritmetičke sredine iznosi 0,55. Koeficijent varijacije iznosi 6,77%, a budući da taj iznos mora biti manji od 20% kada je u pitanju tvrdoća (kako je zapisano u literaturi), potvrđuje se prethodno napisana tvrdnja da rasipanja rezultata nisu velika. Indeks preciznosti testa iznosi 2,89.[24]



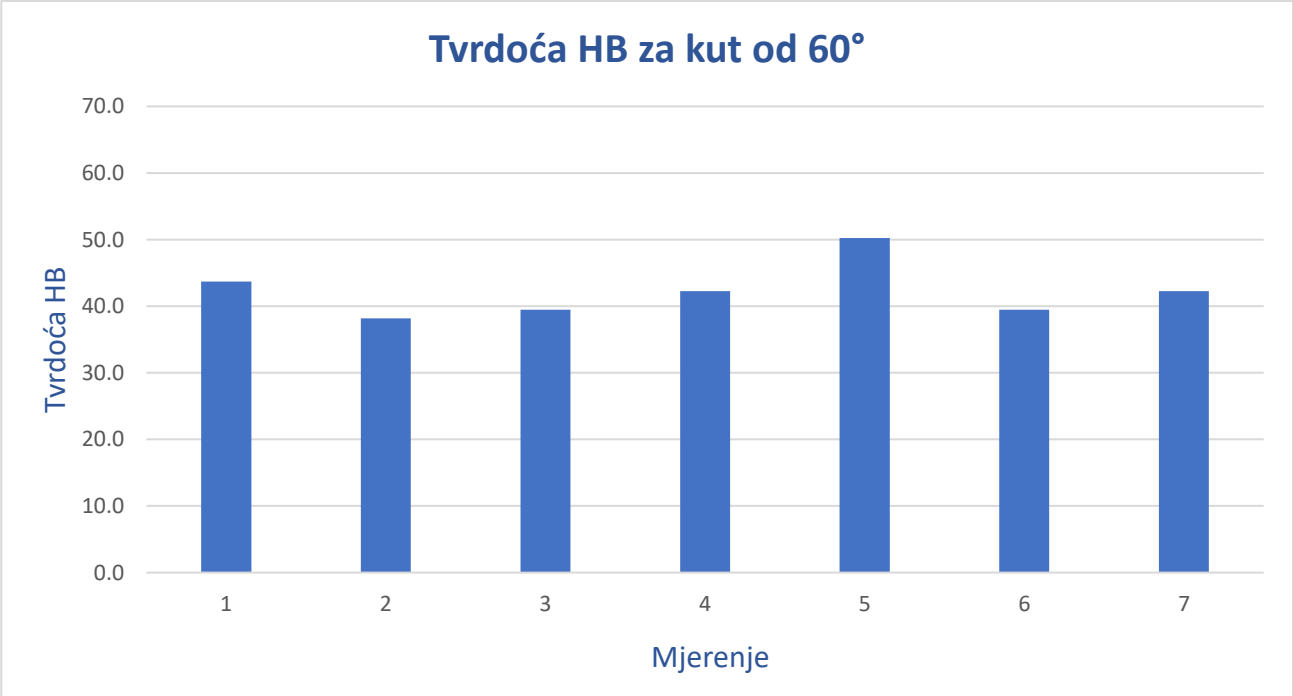
Slika 37. Rasipanje vrijednosti tvrdoće za kut 0°



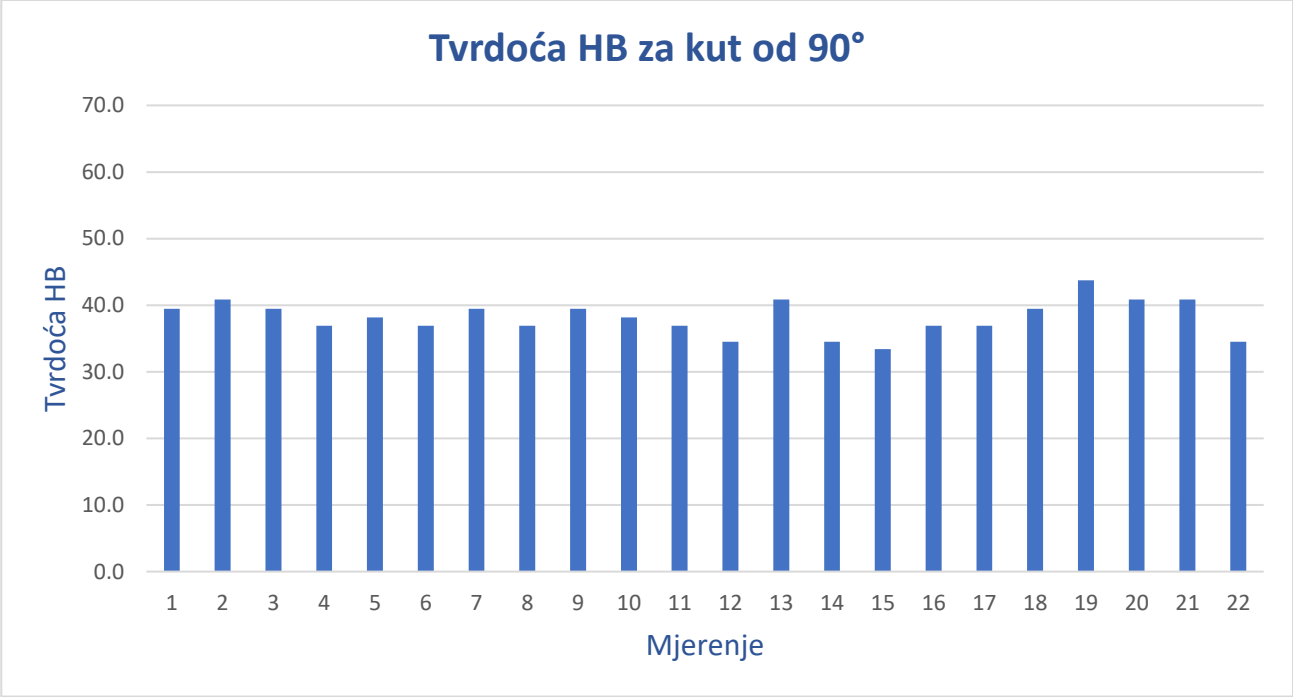
Slika 38. Rasipanje vrijednosti tvrdoće za kut 30°



Slika 39. Rasipanje vrijednosti tvrdoće za kut 45°



Slika 40. Rasipanje vrijednosti tvrdoće za kut 60°



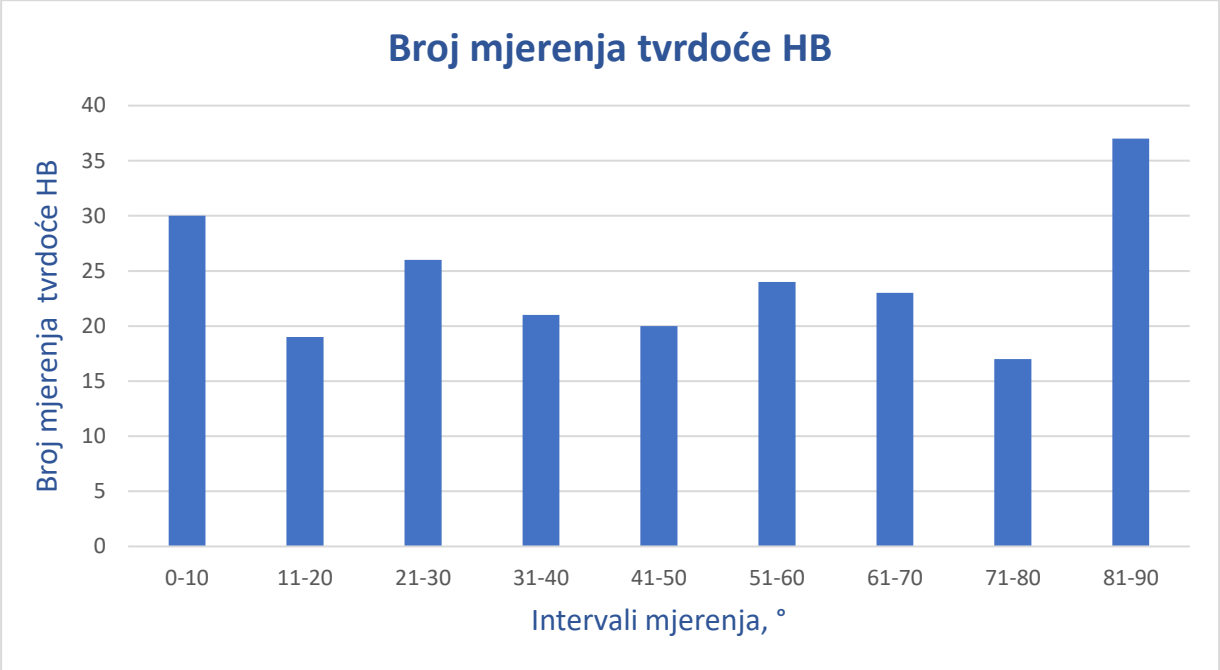
Slika 41. Rasipanje vrijednosti tvrdoće za kut 90°

U tablici 19. prikazane su vrijednosti tvrdoće za kutove od 0°, 30°, 45°, 60° i 90° budući da se u literaturi najčešće koriste ti kutovi.

Tablica 19. Srednje vrijednosti tvrdoće HB za karakteristične kutove

Karakteristični kutovi	Prosječna tvrdoća, HB
0°	58,5
30°	56,7
45°	48,8
60°	42,2
90°	38,1

Na slici 42. prikazan je broj mjerenja tvrdoće HB za cijelo područje od 0° do 90°, u intervalima od po 10°. Ovako prikazani rezultati govore o tome koliko je dobro osmišljen način izrezivanja uzoraka primijenjen u ovom istraživanju. Iako broj mjerenja u pojedinom intervalu varira od 17 do 37, ipak se može zaključiti da je svaki interval zastupljen s dovoljnim brojem mjerenja.



Slika 42. Broj mjerenja tvrdoće HB u intervalima od po 10°

6. ZAKLJUČAK

Na temelju rezultata istraživanja provedenog s ciljem određivanja tvrdoće drva obične smreke u longitudinalnom smjeru (L) i utjecaja orijentacije s obzirom na godove, može se zaključiti sljedeće:

- Tvrdoća drva obične smreke u longitudinalnom smjeru ovisi o orijentaciji presjeka s obzirom na liniju goda
- Najveća srednja vrijednost tvrdoće od oko 59 HB izmjerena je u radijalnom presjeku (LR), gdje kut između smjera sile utiskivanja pri mjerenju tvrdoće i tangente na liniju goda iznosi 0°
- Najmanja srednja vrijednost tvrdoće od oko 38 HB izmjerena je u tangencijalnom presjeku (LT), gdje kut između smjera sile utiskivanja i tangente na liniju goda iznosi 90°
- S porastom kuta između smjera sile utiskivanja i tangente na liniju goda od 0° do 90° vrijednost tvrdoće pada za oko 36 %
- Rasipanja rezultata su prisutna i nalaze se u okviru očekivanog s obzirom na izrazitu heterogenost mikrostrukture ispitivanog materijala

LITERATURA

[1] https://secure.element.hr/wp-content/uploads/2020/06/unutra-12336.pdf (20.12.2020.)

[2] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1583749971-0-mikrostruktura.pdf (20.12.2020.)

[3] Rowell, R. M.: Handbook of wood chemistry and wood composites, CRC Press, 2005. (21.12.2020.)

[4] https://steurh.home.xs4all.nl/engloof/eloofht.html#grondweefsel (21.12.2020.)

[5] Trupina, I., Utjecaj mikrostrukture na abrazijska svojstva drva, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i bordogradnje, Zagreb, 2017. (21.12.2020.)

[6] https://bodell.mtchs.org/OnlineBio/BIOCD/text/chapter20/concept20.4.html (22.12.2020.)

[7] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1526020863-0-drvo-skripta.pdf (22.12.2020.)

[8] http://www.microscopy-uk.org.uk/mag/indexmag.html?http://www.microscopy-uk.org.uk/mag/artjan02/treering.html (22.12.2020.)

[9] https://www.researchgate.net/figure/The-three-principal-planes-of-wood-transverse-radial-and-tangential-Adapted-from-4_fig2_342502735 (22.12.2020.)

[10] https://workshopcompanion.com/KnowHow/Design/Nature_of_Wood/2_Wood_Movement/ (28.12.2020.)

[11] Filetin, T., Kovačićek, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011. (28.12.2020.)

[12] Green, David W., Winandy, Jerrold E., Kretschmann, David E.: Mechanical properties of wood, Forest Products Laboratory, Department of Agriculture, Madison, WI, 1999. (28.12.2020.)

[13] https://www.engineeringtoolbox.com/timber-mechanical-properties-d_1789.html (29.12.2020.)

[14] http://www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/properties/non-IE/stiffness.html (29.12.2020.)

[15] https://www.instron.jp/en/products/testing-accessories/application-specific-accessories/wood (20.12.2020.)

[16] http://article.sapub.org/10.5923.j.ijaf.20120204.06.html (29.12.2020.)

[17] https://www.tec-science.com/material-science/material-testing/charpy-impact-test/ (29.12.2020.)

[18] https://www.taberindustries.com/taber-rotary-abraser (2.1.2021.)

[19] https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-the-ASTM-G-65-dry-sand-rubber-wheel-abrasion-test_fig2_232380196 (2.1.2021.)

[20] http://article.sapub.org/10.5923.j.ijme.20130304.03.html (2.1.2021.)

[21] https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852407008036?via%3Dihub (3.1.2021.)

[22] https://www.wood-database.com/olive/ (3.1.2021.)

[23] https://www.wood-database.com/quebracho/#pics (3.1.2021.)

[24] https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fplgtr113/ch04.pdf (6.1.2021.)

[25] https://korak.com.hr/korak-015-rujan-2006-smreka/ (5.1.2021.)

[26] http://prirodahrvatske.com/2020/03/10/smreka-kraljica-stijena/ (5.1.2021.)

[27] https://www.dreamstime.com/royalty-free-stock-image-cut-spruce-wood-texture-image13857646 (6.1.2021.)

[28] http://www.woodanatomy.ch/schnitt.php?code=PCAB&image=7 (6.1.2021.)

[29] https://edition.cnn.com/style/article/stradivarius-million-dollar-instruments/index.html (6.1.2021.)