

Utjecaj orijentacije drvnih stanica na tvrdoću drva

Klanac, Josip

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:923745>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-12**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Josip Klanac

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

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

Student:

Josip Klanac

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se profesorici i mentorici, dr. sc. Veri Rede, na utrošenom vremenu i trudu, pruženoj pomoći i smjernicama.

Zahvaljujem se svojoj obitelji koja mi je omogućila ovaj studij i neprekidno me podržavala tijekom cijelog studija.

Zahvaljujem se svim svojim prijateljima i kolegama na pruženoj podršci tijekom cijelog studija.

Josip Klanac



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomatske 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: **Josip Klanac** Mat. br.: 0035217868

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj orijentacije drvnih stanica na tvrdoću drva**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of wood cell orientation on hardness of wood**

Opis zadatka:

Drvo je prirodan tehnički materijal sa izrazito usmjerenom mikrostrukturom i isto tako usmjerenim mehaničkim svojstvima. Drvno tkivo čine izdužene drvene stanice koje su u najvećoj mjeri uzdužno orijentirane u smjeru primarnog rasta debla i koncentrično su raspoređene oko središta debla. Drvene stanice sastoje se od stanične stijenke i lumena – praznog prostora koji je omeđen staničnom stijenkom. Drvene stanice koje nastaju na početku vegetacijskog ciklusa i čine rani dio goda, imaju tanju staničnu stijenku i veći lumen od stanica koje nastaju poslije i čine kasni dio goda. Sve navedeno utječe na velike razlike u vrijednosti mehaničkih svojstava u tri karakteristična smjera – logitudinalnom, radijalnom i tangencijalnom.

U završnom radu potrebno je utvrditi kako se mijenja tvrdoća drva obične smreke (*Picea abies*) s promjenom orijentacije uzdužnih drvnih stanica – traheida. Za mjerenje tvrdoće koristiti Brinellovu metodu, a kut između sile utiskivanja kuglice i smjera traheida varirati od 0° (longitudinalni smjer - L) do 90° (radijalni smjer - R). Zbog očekivanog velikog rasipanja rezultata, za svaki kut ponoviti mjerenje najmanje deset puta.

Dobivene rezultate potrebno je analizirati i na temelju provedene analize donijeti odgovarajuće zaključke.

Zadatak zadan:
30. studenoga 2020.

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.

Zadatak zadala:

Prof. dr. sc. Vera Rede

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD.....	1
2. STRUKTURA DRVA	2
2.1. Botanička podjela.....	2
2.2. Karakteristični presjeci u drvu	3
2.3. Mikrostruktura drva	6
2.3.1. Mikrostruktra četinjača	6
2.3.2. Mikrostruktura listača	7
2.4. Kemijski sastav drva	8
3. SVOJSTVA DRVA	10
3.1. Voda u drvu	10
3.2. Mehanička svojstva.....	11
3.2.1. Modul elastičnosti (E)	12
3.2.2. Čvrstoća drva.....	13
3.3. Žilavost.....	16
3.4. Tvrdoća drva	16
4. EKSPERIMENTALNI DIO	21
4.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja	21
4.2. Materijal za ispitivanje.....	21
4.3. Mjerenje tvrdoće	23
4.3.1. Rezultati mjerenja tvrdoće	26
4.4. Određivanje srednje širine goda i srednjeg udjela kasnog dijela goda	29
4.5. Mjerenje gustoće	29
5. ANALIZA REZULTATA	31
6. ZAKLJUČAK.....	39
LITERATURA.....	40

POPIS SLIKA

Slika.2.1	Četinjače i listače, opći oblik stabla četinjače (A) i listače (B), poprečni presjek kroz deblo četinjače (C) i listače (D) [5].....	2
Slika 2.2.	Karakteristični presjeci (lijevo) i osi drvene građe (desno) [6].....	3
Slika 2.3	Poprečni presjek kroz A-četinjače (<i>Pinus resinosa</i>) i B-listače (<i>Quercus rubra</i>) [5].....	5
Slika 2.4	Poprečni presjek polovice debla [8].....	5
Slika 2.5	Poprečni presjek drva četinjače (<i>Picea glauca</i>) [5].....	6
Slika 2.6	Mikrostruktura drva listača [1].....	8
Slika 2.7	Prosječni udjeli celuloze, hemiceluloze i lignina u drvu listača i četinjača [1].....	9
Slika 3.1	Utezanje i distorzija drva pri sušenju [5].....	11
Slika 3.2	Određivanje savojnog modula metodom u tri točke [1].....	12
Slika 3.3	Elastično područje krivulje sila-progib.....	12
Slika 3.4	Položaj godova u odnosu na smjer savojne sile [1].....	14
Slika 3.5	Shematski prikaz ispitivanja tlačne čvrstoće [1].....	14
Slika 3.6	Shematski prikaz smičnog naprežanja [1].....	15
Slika 3.7	Uređaj za ispitivanje tvrdoće drva metodom po Janki [14].....	18
Slika 3.8	Mjerenje tvrdoće Brinellovom metodom [18].....	19
Slika 4.1	Položaj ispitnih uzoraka u odnosu na tri karakteristične osi.....	22
Slika 4.2	Smjer rezanja ispitnih uzoraka.....	22
Slika 4.3	Shematski prikaz pozicija za mjerenje tvrdoće na ispitnim uzorcima.....	22
Slika 4.4	Prikaz jedne od dvije površine na kojoj se provodilo ispitivanje.....	23
Slika 4.5	Prikaz ispitnih uzoraka.....	23
Slika 4.6	Tvrdomjer VEB WPM HP 250.....	24
Slika 4.7	Mjerenje tvrdoće.....	25
Slika 4.8	Uređaj za precizno mjerenje promjera otiska.....	25
Slika 4.9	Ispitni uzorak s oznakom 0°.....	26
Slika 4.10	Ispitni uzorak s oznakom 15°.....	27
Slika 4.11	Ispitni uzorak s oznakom 45°.....	27
Slika 4.12	Ispitni uzorak s oznakom 60°.....	28
Slika 4.13	Ispitni uzorak s oznakom 75°.....	28
Slika 4.14	Prikaz određivanja srednje širine goda i srednjeg udjela kasnog dijela goda.....	29
Slika 4.15	Mjerenje mase uzorka na vagi.....	30
Slika 5.1	Vrijednosti tvrdoće HB za uzorak s oznakom 0°.....	31
Slika 5.2	Vrijednosti tvrdoće HB za uzorak s oznakom 15°.....	32
Slika 5.3	Vrijednosti tvrdoće HB za uzorak s oznakom 30°.....	32
Slika 5.4	Vrijednosti tvrdoće HB za uzorak s oznakom 45°.....	33
Slika 5.5	Vrijednosti tvrdoće HB za uzorak s oznakom 60°.....	33
Slika 5.6	Vrijednosti tvrdoće HB za uzorak s oznakom 75°.....	34
Slika 5.7	Vrijednosti tvrdoće HB za uzorak s oznakom 90°.....	34
Slika 5.8	Utjecaj usmjerenosti strukture na tvrdoću HB.....	36
Slika 5.9	„Idealizirana“ promjena tvrdoće HB.....	37
Slika 5.10	Utjecaj usmjerenosti strukture na promjenu tvrdoće HB (izmjerene i izračunate vrijednosti).....	38

POPIS TABLICA

Tablica 3.1 Tvrdoće pojedinih domaćih vrsta drva	17
Tablica 4.1 Rezultati mjerenja tvrdoće.....	26
Tablica 5.1 Rezultati statističke analize vrijednosti dobivenih pri mjerenju tvrdoće HB	35
Tablica 5.2 Vrijednosti izmjerene i izračunate tvrdoće HB	37

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
ρ	g/cm ³	gustoća
m	g	masa uzorka
V	cm ³	volumen uzorka
w	%	standardni sadržaj vlage u drvu
m_1	g	masa drva kod nekog sadržaja vlage
m_2	g	masa drva u apsolutno suhom stanju
w	%	tehnički sadržaj vlage
E	N/mm ²	modul elastičnosti
L	mm	razmak između oslonaca
b	mm	širina uzorka
h	mm	visina uzorka
$F_2 - F_1$	N	prirast sile
F_{\max}	N	maksimalna sila
$a_2 - a_1$	mm	prirast progiba
R_{ms}	N/mm ²	savojna čvrstoća
R_m	N/mm ²	tlačna čvrstoća
$R_{m\tau}$	N/mm ²	smična čvrstoća
A	mm ²	dimenzije početne površine
b, l	mm	dimenzije smicajne površine
$KU (KV)$	J	žilavost
G	N	težina bata
h_1	m	početna visina bata
h_2	m	visina bata nakon loma epruvete
H_J	N	tvrdoća po Janki
K	-	koeficijent ovisan o dubini prodora kuglice
F	N	sila utiskivanja na propisanu dubinu
HB	N/mm ²	tvrdoća po Brinellu
D	mm	promjer kuglice u mm
d	mm	promjer baze kuglice kalote
\bar{x}	-	aritmetička sredina vrijednosti tvrdoća izračunatih metodom po Brinellu
x_i	-	vrijednost tvrdoća izračunatih metodom po Brinellu
n	-	broj članova niza
s	-	standardna devijacija
C_v	%	koeficijent varijacije

$\frac{s}{\bar{x}}$	-	standardna devijacija aritmetičkih sredina
p	%	indeks preciznosti testa
$HB(\varphi)$	N/mm ²	tvrdća prema Hankinsonovoj formuli
HB_0	N/mm ²	vrijednost tvrdoće izmjerena na uzorku 0°
HB_{90}	N/mm ²	vrijednost tvrdoće izmjerena na uzorku 90°
φ	°	kut smjera opterećenja
n	-	faktor koji je izračunat primjenom metode najmanjih kvadrata

SAŽETAK

Osnovni cilj rada bio je istražiti utjecaj usmjerenosti strukture na tvrdoću drva obične smreke (*Picea abies*).

U teorijskom dijelu rada opisana je struktura drva, od makrostrukture do mikrostrukture te osnovna mehanička svojstva drva.

U eksperimentalnom dijelu prikazani su rezultati dobiveni mjerenjem tvrdoće po Brinellu u ovisnosti o usmjerenosti strukture. Površina na kojoj je izmjerena tvrdoća zakretala se od poprečnog (RT) do tangencijalnog (LT) presjeka u intervalima od po 15°. Za svaki kut napravljeno je deset mjerenja. Utvrđeno je da usmjerenost strukture ima veliki utjecaj na tvrdoću drva. Najviše vrijednosti tvrdoće dobivene su u poprečnom (50,0 HB), a najniže u tangencijalnom presjeku (26,1 HB). Rasipanja rezultata su relativno velika, a koeficijent varijacije za sve kutove ispitivanja kreće se u rasponu od 10,55 % do 19,85 %, što je manje od dopuštenog (20%).

Ključne riječi: drvo, usmjerenost strukture, tvrdoća

SUMMARY

The main aim of the study was to investigate the influence of the orientation of the structure on the hardness of spruce (*Picea abies*) wood.

The theoretical part of the paper describes the structure of wood, from macrostructure to microstructure and the basic mechanical properties of wood.

In the experimental part, the results obtained by measuring Brinell hardness as a function of the orientation of the structure are presented. The surface on which the hardness was measured rotated from the transverse (RT) to the tangential (LT) cross-section at 15° intervals. Ten measurements were made for each angle. The orientation of the structure was found to have a large influence on the hardness of the wood. The highest hardness values were obtained in the cross section (50.0 HB) and the lowest in the tangential cross section (26.1 HB). The scatter of the results is relatively large, and the coefficient of variation for all test angles ranges from 10.55 % to 19.85 %, which is less than allowed (20 %).

Keywords: wood, structure orientation, hardness

1. UVOD

Drvo je tehnički materijal koji se koristi od samih početaka čovječanstva pa do današnjeg dana. Tijekom ranih civilizacija najviše se primjenjivalo kod izrade prvih oružja i oruđa te je takva primjena ostala i do danas. Osim za izradu oružja, drvo se koristilo kao materijal za izradu nastambi, naravno uz druge materijale, te za ogrjev. Većina primjena je ostala nepromijenjena sve do danas, a s razvojem civilizacije drvo ostaje i dalje vrlo zanimljiv i prisutan materijal.

Osim što je važno za industrijsku primjenu, drvo i šume su važni s puno drugih aspekata. Skoro polovinu teritorija Republike Hrvatske prekrivaju šume, odnosno 47 %. Šume imaju utjecaj na kvalitetu ljudskog života i ekosustava pa se može reći da je pohvalno što u tolikom postotku šume čine površinu Republike Hrvatske. Osim što proizvode kisik koji je neophodan za život, zadržavaju vodu u tlu, imaju povoljan utjecaj na klimu, vezuju CO_2 za sebe što smanjuje njegovu emisiju u atmosferi pa samim time poboljšavaju kvalitetu zraka i života.

Pored svih navedenih prednosti za ljudski rod i ekosustav, drvo kao materijal se i dalje koristi zbog svojstava koji neki drugi materijali ne posjeduju. Drvo je u potpunosti reciklabilan materijal, prirodan je i obnovljiv te se njegova primjena širi izvan klasičnih industrija kao što je građevinska pa se često koristi u brodogradnji, izgradnji željezničkih pruga i drugim industrijama. Nadalje, drvo u modernoj primjeni iskorištava i svoje estetske, prirodne i tehničke prednosti te je i to jedan od razloga i dalje velike primjene „staromodnog“ materijala. Kao i svaki materijal, tako i drvo ima svoje nedostatke naspram drugih materijala (bubrenje, zapaljivost,...). Međutim, ti se nedostaci uspješno mogu svesti na minimum različitim postupcima pa se tako različitim fizikalnim ili kemijskim postupcima može postići dugovječnost drvenih konstrukcija. [1, 2, 3, 4]

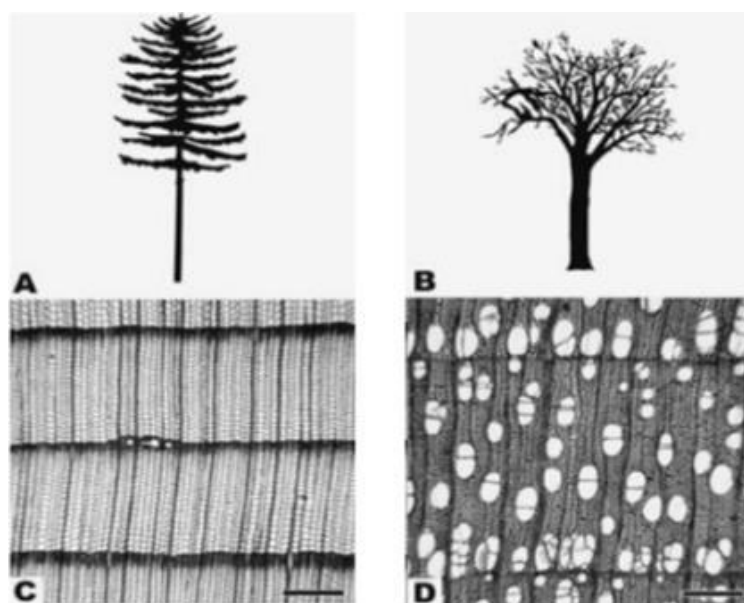
2. STRUKTURA DRVA

Drvo je anizotropan, kompozitan i prirodan materijal. Dobiva se od vaskularnih, drvenastih, višegodišnjih biljaka koje imaju razvijeno trajno stablo. Za drvo je karakteristično veliko rasipanje vrijednosti svojstava pa se svojstva razlikuju po vrstama, a moguće su i vrlo velike razlike unutar iste botaničke vrste pa čak unutar istog debla. Postoji nekoliko razina s kojih možemo promatrati građu drva. Osnovna razina s koje se drvo može promatrati je molekularna razina gdje se drvo promatra kao skup različitih biopolimera, koji su čine umrežene lance celuloze i hemiceluloze, koji su povezani ligninom.

Ako se drvo promatra na razini mikrostrukture, njegova osnovna jedinica je drvena stanica. Svaka drva stanica sastoji se od lumena i stanične stijenke. S druge strane, kada je u pitanju makrostruktura drva, razlikuju se različiti slojevi na karakterističnim presjecima kao što su kora, bjeljika, srževina, srčika, godovi i sl. [1]

2.1. Botanička podjela

Sve vrste drva koje služe u komercijalne svrhe pripadaju skupini sjemenjača ili cvjetnica, a dijele se na četinjače i listače. Osnovni oblik stabla četinjače i listače te pripadajuća mikrostruktura u poprečnom presjeku prikazane na slici 2.1.



Slika.2.1 Četinjače i listače, opći oblik stabla četinjače (A) i listače (B), poprečni presjek kroz deblo četinjače (C) i listače (D) [5]

Četinjače pripadaju skupini golosjemenjača i ime su dobile po obliku listova te se još nazivaju i mekim drvom. Većinom su zimzelene odnosno lišće im ne otpada u hladnom dijelu godine i uglavnom rastu na sjevernoj hemisferi. U odnosu na listače puno su malobrojnije po vrstama, a kod nas su najpoznatije četinjače smreka (*Picea*), jela (*Abies*) i bor (*Pinus*).

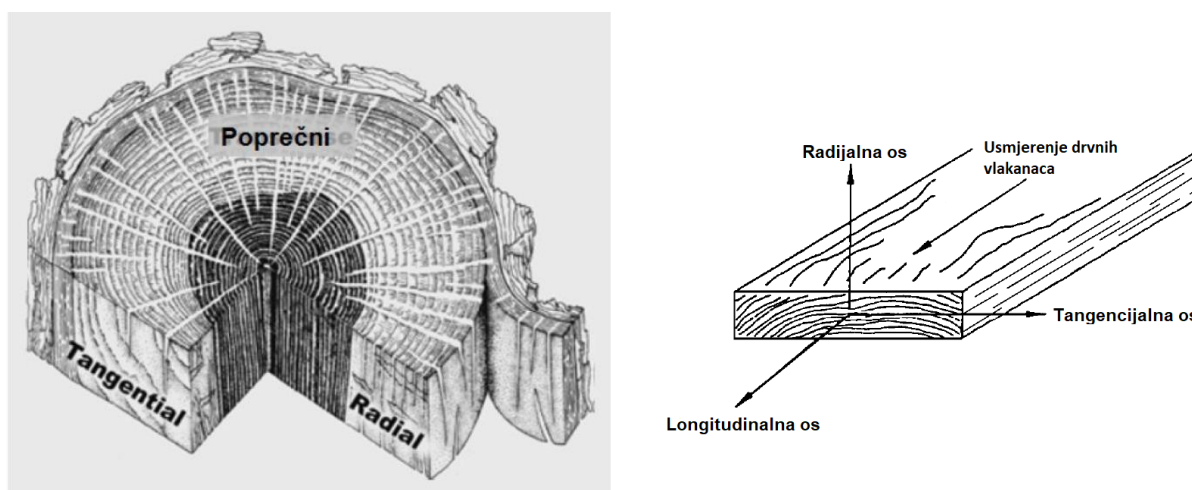
Listače pripadaju skupini kritosjemenjača, a poznate su i pod nazivom bjelogorica kao i tvrdo drvo. Za razliku od četinjača, lišće im opada u jesen i broje oko 2000 vrsta, najviše zahvaljujući činjenici što većina vrsta pripada egzotičnim vrstama drva. U Republici Hrvatskoj najpoznatije listače su hrast (*Quercus*), bukva (*Fagus*) i jasen (*Fraxinus*). [1, 2]

2.2. Karakteristični presjeci u drvu

Usljed usmjerene, ortotropne građe drva te orijentiranosti u radijalnom i aksijalnom smjeru, nužno je promatrati drvo u tri osnovna presjeka:

- radijalnom
- tangencijalnom
- poprečnom (transferzalnom).

Na slici 2.2 lijevo prikazana su tri karakteristična presjeka, a na istoj slici desno prikazane su tri karakteristične osi drvne građe.



Slika 2.2. Karakteristični presjeci (lijevo) i osi drvne građe (desno) [6]

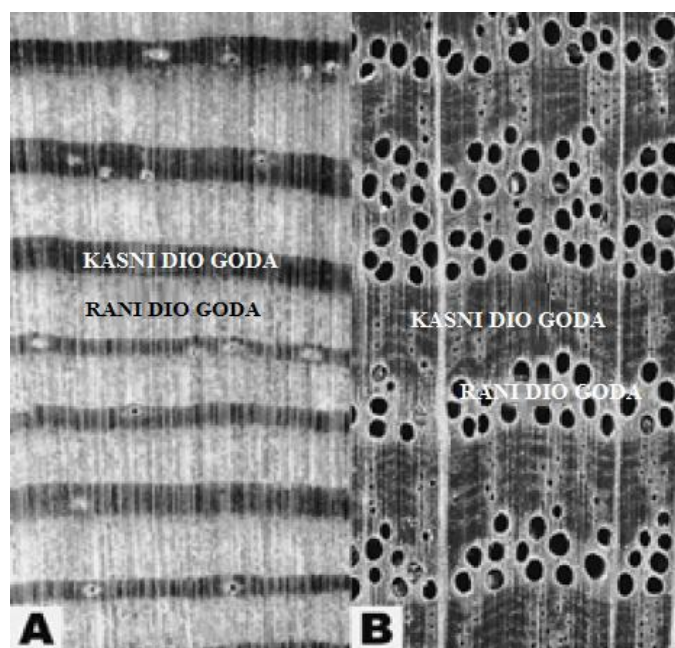
Presjek okomit na drvena vlakanca i longitudinalnu os debla naziva se poprečni presjek. U poprečnom presjeku vidi se raspored drvnih elemenata od srčike prema kori. U ovom presjeku najbolje se vide godovi koji su koncentrično raspoređeni oko središta drvnog valjka.

Radijalni presjek je presjek usporedan s osi debla te prolazi kroz središte drvnog valjka, po radijusu. Također, to je presjek koji prolazi okomito kroz godove koji se u ovom presjeku vide kao više ili manje istaknute usporedne linije.

Tangencijalni presjek je paralelan s uzdužnom osi debla kao i radijalni, ali ne prolazi po radijusu već po tangenti na god. I na ovom presjeku mogu se vidjeti godovi, ali se teže mogu razlučiti nego u radijalnom presjeku.

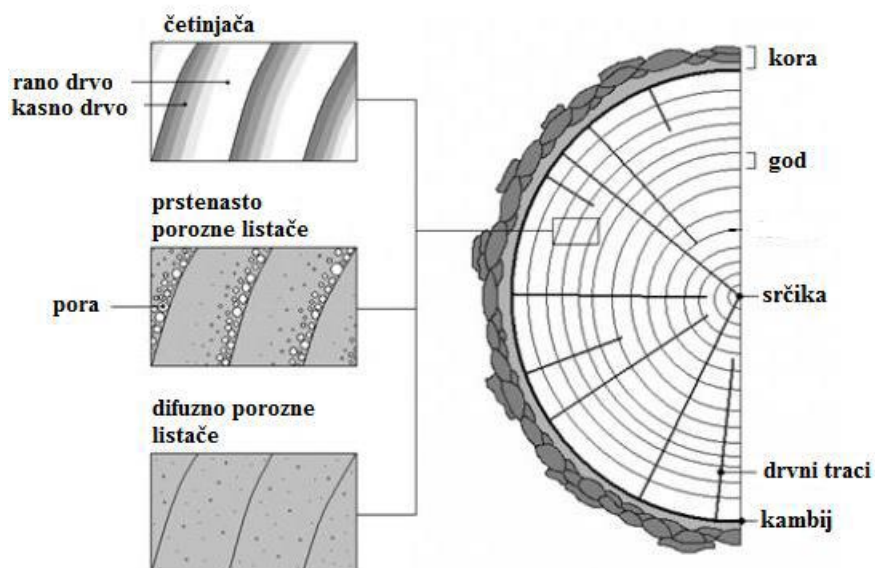
Kora je složeni heterogeni materijal čija formacija započinje procesom diobe stanica kambija, a sastoji se od unutarnjeg i vanjskog dijela te obuhvaća deblo. Vanjska kora ili mrtvi sloj (lub) štiti deblo i unutarnju koru od isušivanja dok unutarnji sloj (lika) služi prilikom fotosinteze te njene produkte (drvni sok) provodi od lišća niz stablo. Ispod kore se nalazi tanki sloj tvornog kambija čije stanice imaju sposobnost razmnožavanja. Iz navedenog dijela početkom proljeća nastaje novi god prema unutra te novi sloj kore prema vani (u našem klimatskom području).

Godovi su većinom koncentrični krugovi koji predstavljaju godišnji prirast drva. Takav prirast naziva se još i sekundarni rast (rast u debljinu) dok se primarni rast odnosi na rast u visinu. Za nastajanje godova zadužen je tanki sloj kambija čije djelovanje može biti kontinuirano i diskontinuirano. Ovisno o vrsti drva, kambij djeluje tijekom listanja, prije listanja ili nakon listanja. Kod vrsta koje se nalaze u umjerenom zemljopisnom pojasu, kambij djeluje diskontinuirano dok kod vrsta koje rastu u tropskoj vlažnoj klimi kambij djeluje kontinuirano (takve vrste nemaju godove koji se mogu poistovjetiti s godovima kod vrsta koje rastu u kontinentalnoj klimi). S obzirom na vrijeme nastanka goda (na početku vegetacijske sezone ili kasnije) razlikujemo rani dio goda ili rano drvo te kasni dio goda ili kasno drvo koji su prikazani na slici 2.3. Osim navedenih razlika, godove još možemo razlikovati po boji, po širini, po tijeku granične linije te po markantnosti. [1, 7]



Slika 2.3 Poprečni presjek kroz A-četinjače (*Pinus resinosa*) i B-listače (*Quercus rubra*) [5]

Na sljedećoj slici 2.4 prikazan je poprečni presjek debla s rasporedom provodnih sudova kod četinjača i listača.



Slika 2.4 Poprečni presjek polovice debla [8]

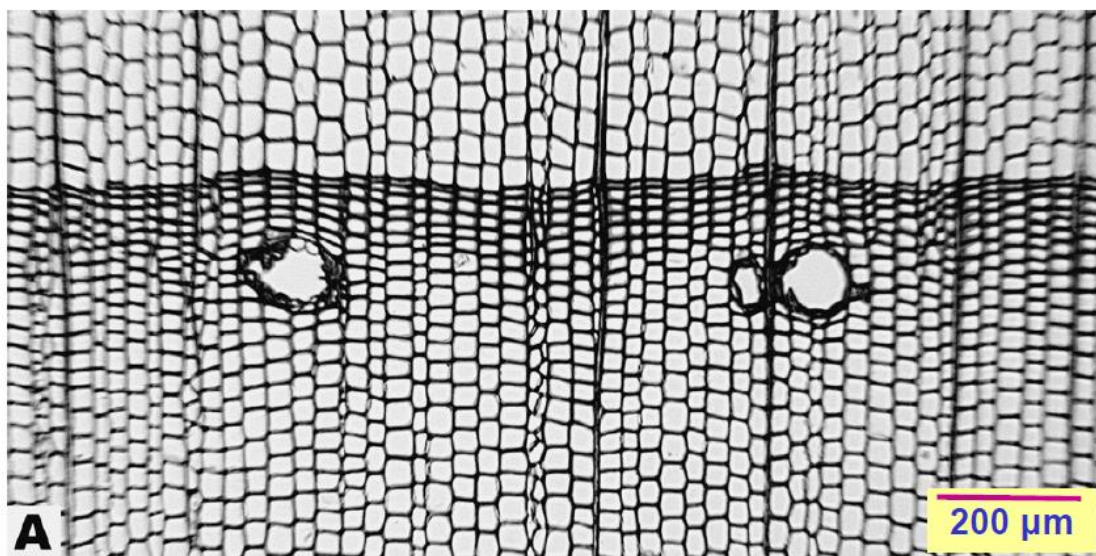
2.3. Mikrostruktura drva

2.3.1. Mikrostruktura četinjača

Mikrostruktura četinjača sastoji se većinom od traheida koje su usmjerene vertikalno (aksijalno) i parenhimnih stanica u drvnim trcima koje su usmjerene radijalno, od srčike prema kori debla. Mikrostruktura četinjača podosta je jednostavnija nego mikrostruktura listača.

Traheide su izdužene stanice s omjerom između duljine i širine od oko 100:1. U drvu četinjača volumni udio traheida iznosi više od 90%, a njihova uloga je provođenje ili kondukcija vode te mehanička potpora. [1, 5]

Na slici 2.5 prikazana je mikrostruktura četinjača u poprečnom presjeku.



Slika 2.5 Poprečni presjek drva četinjače (*Picea glauca*) [5]

Iz slike je vidljivo da su u poprečnom presjeku debla traheide poprečno presječene. Nadalje, traheide kasnog i ranog dijela goda razlikuju se po debljini stijenke i veličini lumena. U ranom dijelu goda traheide imaju tanju staničnu stijenku i veći lumen, a u kasnom dijelu goda manji lumen i deblju stijenku. Sve imaju sličan oblik poprečnog presjeka koji izgleda kao kvadrat ili pravokutnik. U prvim proljetnim mjesecima biljka ima na raspolaganju veće količine vode koju je potrebno provesti od korijena do viših dijelova biljke te zbog toga

stanice imaju veliki lumen i tanku stijenku. S druge strane, količina vode tijekom ostalih mjeseci u godini smanjuje se pa stanice imaju sve manji lumen i sve deblju stijenku. Takvi dijelovi biljke više pridonose mehaničkoj otpornosti drva te drvo na tim dijelovima ima veću tvrdoću nego na dijelu gdje prevladava rani dio goda.

Osim navedenih drvnih stanica (traheida i parenhimskih stanica), u mikrostrukturi nekih četinjača prisutni su i smolni kanali koji mogu biti usmjereni radijalno i aksijalno. Smolni kanali su šupljine koje su okružene parenhimskim stanicama koje proizvode smolu. Ovisno o vrsti četinjače, kod nekih je moguće vidjeti smolne kanale golim okom dok su kod ostalih puno sitniji.

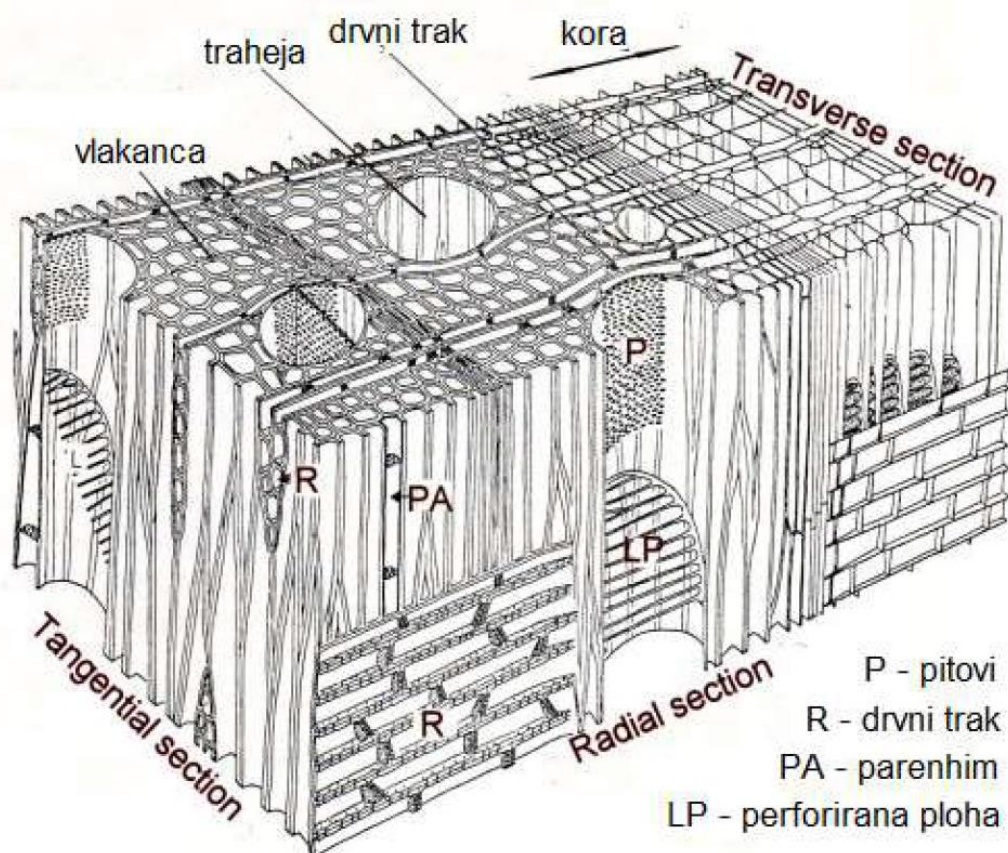
Drvni traci građeni su od parenhimskih stanica i radijalno su usmjereni od srčike prema kori debla. Parenhimske stanice su prizmatičnog oblika, visine oko 15 μm , širine oko 10 μm i duljine od 150 do 250 μm . Njihova primarna uloga je sinteza, skladištenje i lateralni transport biokemijskih tvari i, u puno manjoj mjeri, vode. [1, 5, 9]

2.3.2. Mikrostruktura listača

U usporedbi s četinjačama, listače imaju značajno složeniju građu. Uzdužni (aksijalni) sustav listača izgrađen je od vlaknastih elemenata (drvnih vlaknanaca), traheja (pora) i traheida koje se razlikuju po rasporedu i veličini. Svi oni imaju važnu biološku ulogu. Svojim oblikom, veličinom i rasporedom utječu na mehanička, fizikalna, preradbena i druga svojstva drva. Radijalni sustav je također složeniji, a građen je od parenhimskih stanica koje se mogu jako razlikovati po obliku, veličini i drugim značajkama.

Traheje ili pore su provodne stanice koje provode vodu od korijena prema gore, nastavljaju se jedna na drugu i predstavljaju bitnu razliku između listača i četinjača. Traheje se razlikuju kod različitih vrsta drva po veličini te po rasporedu unutar goda. Duljina im je puno manja od duljine traheida, a promjer im se nalazi između 50 i 200 μm .

Drvena vlaknanca su stanice s uskim lumenom i debelom staničnom stijenkom. Osnovna uloga vlaknanaca jest mehanička potpora. Njihova gustoća i čvrstoća ovise o debljini stijenke i veličini lumena. Nisku gustoću i čvrstoću imaju vrste čija je stijenka tanka, a lumen veliki (lipa, topola) dok vrste s debelom stijenkom i malim lumenom imaju veću gustoću i čvrstoću (bukva, jasen). Osim navedenih karakteristika, drvena vlaknanca imaju manju duljinu od duljine traheida kod četinjača. U odnosu na duljinu traheja kod listača dva do deset puta su dulji. Na slici 2.6 nalazi se prostorni prikaz strukture listača. [2, 10]



Slika 2.6 Mikrostruktura drva listača [1]

Parenhimske stanice imaju veliki lumen i tanku stijenku te im je funkcija i građa ista kao kod četinjača. Razlika je u tome što se kod listača pojavljuju u puno većem broju nego li kod četinjača gdje su navedene stanice iznimno rijetke.

Drvni traci listača postoje u puno više različitih oblika nego li drvni traci četinjača. Njihova širina iznosi između 1 i 5 stanica te može biti i veća, dok visina najčešće iznosi do 1 mm.

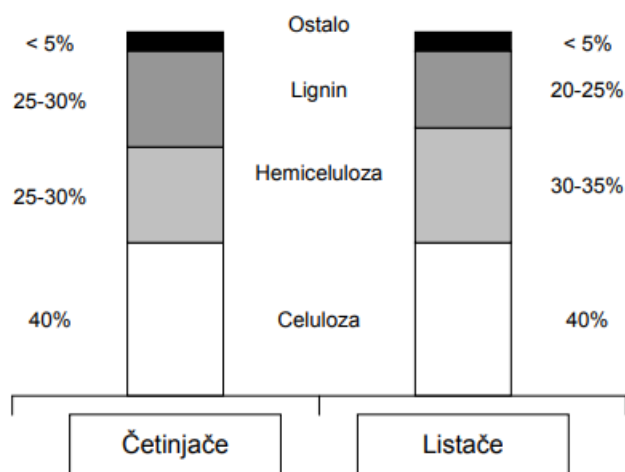
2.4. Kemijski sastav drva

Kao što je već navedeno, drvo možemo promatrati i sa molekularne razine te tada za drvo možemo reći da je biopolimerni kompozit koji je sastavljen od umreženih lanaca celuloze, hemiceluloze i lingina te zanemarivog udjela ekstraktiva i anorganskih tvari. Nema razlike u sastavu drva među različitim vrstama odnosno sastav ne ovisi o tome pripada li drvo

listačama ili četinjačama. Drvna suha tvar u prosjeku gotovo uvijek ima podjednak elementarni sastav te sadrži oko 50% ugljika (C), 43% kisika (O), 6% vodika (H) i 1% dušika (N).

Celuloza je najrasprostranjeniji organski spoj u prirodi. Stupanj polimerizacije kod drvene celuloze može iznositi čak i do 15 tisuća, a najčešće je između 9 i 10 tisuća. Taj iznos odgovara duljini od 5 μm . Listače sadrže između 38 i 49% dok četinjače između 40 i 45% celuloze. Celuloza u prirodi nastaje fotosintezom te čini malo manje od polovice tvari od kojih su građene stijenke stanica u deblima.

Na slici 2.7 prikazani su udjeli celuloze, hemiceluloze i lignina u staničnoj stijenci četinjača i listača. [1, 2]



Slika 2.7 Prosječni udjeli celuloze, hemiceluloze i lignina u drvu listača i četinjača [1]

3. SVOJSTVA DRVA

3.1. Voda u drvu

Živo drvo sadrži dovoljnu količinu vode koliko je potrebno da bi se drvo održalo elastično te da bi moglo izdržati vanjska naprezanja. Tehničko drvo koristi se u suhom stanju. Drvo spada među higroskopne materijale te samim time upija i vlagu iz zraka. Ovisno o količini vlage u drvu postoje različiti nazivi za drvo: provelo, zrakosuho, sobosuho i standradno suho drvo. Vлага u drvu mijenja dimenzije drva, mehanička i druga svojstva. Vлага može biti vezana i ona se nalazi unutar stanične stijenke te slobodna koja se nalazi u lumenu. Sadržaj vlage varira od vrste do vrste drva, a ovisi i o gustoći drva.

Gustoća neke tvari prikazuje kolika je masa tvari u prosjeku sadržana unutar određenog volumena. Što je masa veća, može se reći da je tijelo gušće i obratno.

Gustoća se računa prema sljedećoj formuli:

$$\rho = \frac{m}{V}, \text{ g/cm}^3 \quad (3.1)$$

gdje je:

ρ - gustoća, g/cm³

m – masa uzorka, g

V – volumen uzorka, cm³.

Standardni sadržaj vlage u drvu računa se prema sljedećem izrazu:

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2} * 100, \text{ \%}, \quad (3.2)$$

gdje je:

w – sadržaj vlage u drvu, %

m_1 - masa drva kod nekog sadržaja vlage, g

m_2 - masa drva u apsolutno suhom stanju, g.

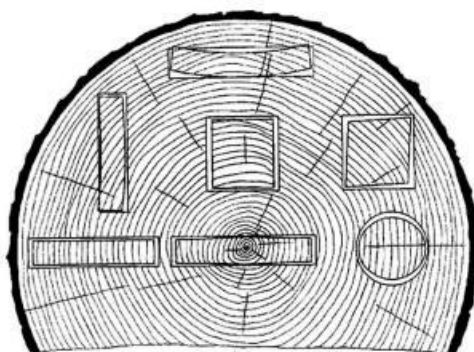
Sadržaj vlage u drvu može izračunati i kao tehnički sadržaj vlage u drvu sljedećim izrazom:

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_1} * 100, \text{ \%}, \quad (3.3)$$

gdje su m_1 i m_2 isti kao u prethodnoj formuli.

Točka zasićenja vlakanaca koje se zove i stanje zasićenosti žice, granica je između vezane i slobodne vode te se definira kao sadržaj vlage u stijenci kada nema prisutne slobodne vode u lumenu dok je stanična stijenka zasićena vodom u potpunosti. Drvo se uteže ako udio vlage padne ispod točke zasićenja vlakanaca odnosno dolazi do smanjenja volumena.

Utezanjem se mijenja veličina i oblik drvne građe pri sušenju, a promjene ovise o položaju unutar debla, kako je prikazano na slici 3.1.



Slika 3.1 Utezanje i distorzija drva pri sušenju [5]

Nasuprot utezanju pri sušenju drva, kod izloženosti suhog drva vlažnom zraku ili vodi dolazi do povećanja volumena drva tj. bubrenja drva. Zbog navedenih procesa utezanja i bubrenja, primjena drva ograničena je u različitim područjima. [1, 5, 11]

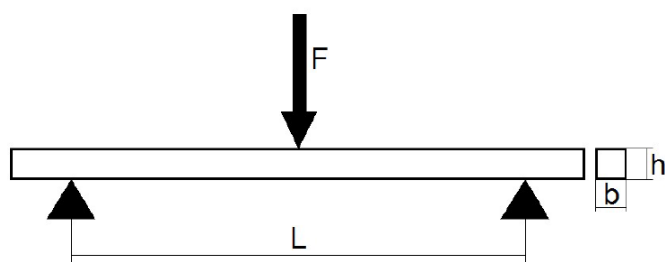
3.2. Mehanička svojstva

Mehanička svojstva drva označavaju skup obilježja koja dolaze do izražaja prilikom primjene mehaničkog opterećenja ili prilikom prerade i uporabe. Kod svih prirodnih materijala karakteristično je veliko rasipanje svojstava. Takav slučaj je i kod drva gdje je varijabilnost toliko velika da su moguća velika odstupanja unutar iste jedinice odnosno stabla. Veliki utjecaj na mehanička svojstva ima presjek u kojem promatramo nekakav uzorak jer nije isto hoće li uzorak biti izrezan paralelno s vlakancima ili okomito na vlakanca (poprečni ili radijalni ili tangencijalni presjek). Također, mehanička svojstva drva ovise i o intenzitetu i trajanju opterećenja, temperaturi i vremenu uporabe te već navedenim svojstvima drva (sadržaj vode, smjer vlakanaca, gustoća te vrsta i građa drveta).

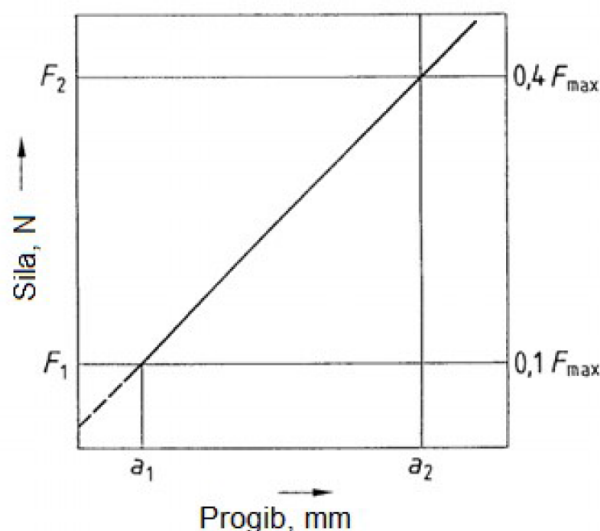
3.2.1. Modul elastičnosti (E)

Modul elastičnosti prikazuje otpor bilo kakvog materijala prema elastičnoj deformaciji te uvelike ovisi o jakosti veza između atoma odnosno o samoj građi materijala. Kao što je već rečeno za sva mehanička svojstva i pri određivanju modula elastičnosti uobičajena su velika rasipanja rezultata. Vrijednost modula elastičnosti ovisi o položaju uzorka u odnosu na tri glavne osi: poprečnu, radijalnu i tangencijalnu. Na vrijednost modula elastičnosti mogu utjecati i vanjski čimbenici poput temperature ili udjela vlage.

U praksi se najčešće savojni modul određuje metodom u tri točke koja je prikazana na slici 3.2. Na slici 3.3 prikazan je elastični dio krivulje sila-progib iz kojeg se može izračunati savojni modul elastičnosti.



Slika 3.2 Određivanje savojnog modula metodom u tri točke [1]



Slika 3.3 Elastično područje krivulje sila-progib

Modul elastičnosti računa se prema sljedećem izrazu:

$$E = \frac{L^3 (F_2 - F_1)}{4b^3 (a_2 - a_1)}, \text{ N/mm}^2 \quad (3.4)$$

gdje je:

L – razmak između oslonaca u mm

b – širina uzorka u mm

h – visina uzorka u mm

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

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

F_{\max} - maksimalna sila u N

$a_2 - a_1$ - prirast progiba (odgovara razlici $F_2 - F_1$).

3.2.2. Čvrstoća drva

Čvrstoća drva je otpor kojim drvo savladava silu koja na njega djeluje na način da ga stlačuje, savija, razvlači ili slama. Osim što je jedno od najvažnijih svojstava koje se određuje unutar svake konstrukcije, čvrstoća određuje i uporabna svojstva. S obzirom na način opterećenja, razlikujemo vlačnu, tlačnu, smičnu i savojnu čvrstoću.

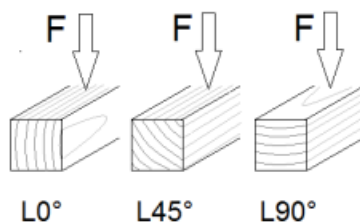
Savojna čvrstoća najčešće se određuje već spomenutom metodom u tri točke ili nekom drugom metodom. Uz tlačnu i smičnu čvrstoću, savojna čvrstoća je svojstvo koje se najčešće određuje kod drvnih materijala. Ispitivanje na uzorcima provodi se do loma, a normama su propisani svi potrebni detalji ispitivanja kao što je prirast sile u jedinici vremena i slično. Savojna čvrstoća izračunava se prema jednadžbi:

$$R_{ms} = \frac{3F_{\max} \cdot L}{2b \cdot h^2}, \text{ N/mm}^2 \quad (3.5)$$

gdje su F_{\max} , L , b i h isto kao u izrazu (3.4).

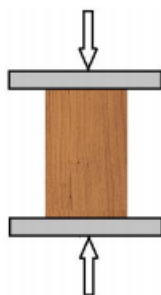
Kao i kod modula elastičnosti, jako je bitna usmjerenost strukture jer je vrijednost savojne čvrstoće najviša u uzdužnom (longitudinalnom) smjeru. Kod nekih drvnih vrsta savojna čvrstoća u longitudinalnom smjeru ovisi i o kutu koju zatvaraju linija goda i savojna sila.

Najčešće se određuje čvrstoća za tri karakteristična kuta prikazana na slici 3.4.



Slika 3.4 Položaj godova u odnosu na smjer savojne sile [1]

Tlačnom čvrstoćom određujemo najveće naprezanje koje se postiže kada sila koja je okomita na podlogu djeluje na uzorak koji je smješten na horizontalnoj podlozi kao što je prikazano na slici 3.5.



Slika 3.5 Shematski prikaz ispitivanja tlačne čvrstoće [1]

Tlačna čvrstoća kao i sve ostale čvrstoće ponajviše ovisi o usmjerenosti strukture odnosno o tome djeluje li tlačna sila okomito ili paralelno s vlakancima. Tako je čvrstoća 3 do 10 puta veća ako sila djeluje u smjeru vlakanaca od čvrstoće kada tlačna sila djeluje okomito na vlakanca.

Vlačna čvrstoća predstavlja omjer maksimalne sile koja se postiže prilikom vlačnog opterećenja te poprečnog presjeka ispitnog uzorka, a računa se prema sljedećem izrazu:

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

gdje su:

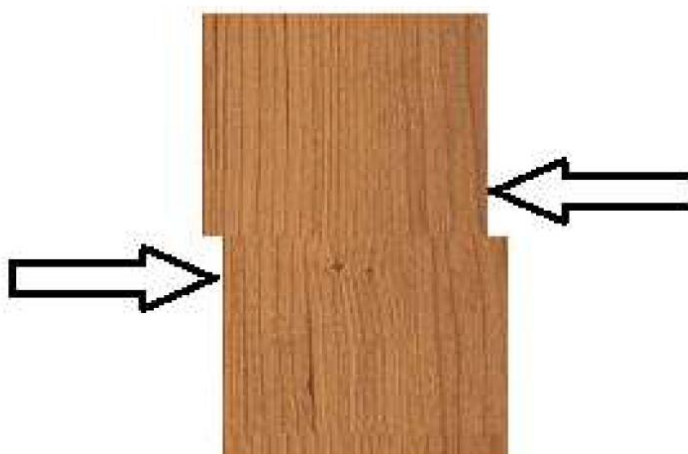
F_{\max} - maksimalna sila u N,

A – dimenzije početne površine u mm².

U praksi je važna i često se određuje i smična čvrstoća. Iz iskustva se zna da ona iznosi od 6 do 10 % od vrijednosti vlačne čvrstoće.

Kvrge, usukanost i slične nepravilnosti u strukturi drva jako loše djeluju na vlačnu čvrstoću. Do puknuća i lomova drvenih konstrukcija ponajviše dolazi zbog cijepanja i smicanja. Bitno je napomenuti kako na iznos vlačne čvrstoće utječe smjer vlaknaca te je vlačna čvrstoća puno veća ako se računa u smjeru vlaknaca.

Smična čvrstoća je otpor koji drvo pruža djelovanju dviju paralelnih, suprotnih sila koje mogu biti i vlačne i tlačne, kao što je prikazano na slici 3.5.



Slika 3.6 Shematski prikaz smičnog naprezanja [1]

Prilikom određivanja smične čvrstoće, površina smicanja može biti dijagonalna, uzdužna te poprečna. Ovisno na kojoj površini djeluju poprečne sile moguće je da sile djeluju u smjeru ili okomito na vlakanca. Postoji mogućnost da u poprečnoj površini sile djeluju okomito ili paralelno s godovima, a ovisno o položaju smične sile u odnosu na godove, vrijednosti smične čvrstoće će varirati. Osim što na vrijednost smične čvrstoće utječe položaj vlaknaca i godova, ona ovisi i o vrsti drva.

Smična čvrstoća računa se prema sljedećoj formuli:

$$R_{m\tau} = \frac{F_{\max}}{b \cdot l}, \text{ N/mm}^2 \quad (3.7)$$

gdje su:

F_{\max} - maksimalna sila u N,

b, l – dimenzije smicajne površine u mm.

3.3. Žilavost

Žilavost ili udarni rad loma je mehaničko svojstvo drva koje određuje kako će se drvo ponašati pri uvjetima udarnog opterećenja.

Određivanje žilavosti provodi se, kao i kod ostalih tehničkih materijala, na Charpyjevu batu.

Žilavost se izračunava prema formuli:

$$KU(KV) = G(h_1 - h_2), J \quad (3.8)$$

gdje su:

G – težina bata u N

h_1 - početna visina bata u m

h_2 - visina bata nakon loma epruvete u m.

Žilavost je mehaničko svojstvo koje je također ovisno o usmjerenosti strukture te najveću vrijednost postiže kada bat pada u radijalnom smjeru dok najmanju vrijednost postiže prilikom pada bata tangencijalno na godove. Žilavost je jako važno svojstvo pogotovo kod dijelova koji se koriste pri izrazitom dinamičkom opterećenju kao na primjer dijelovi aviona, dijelovi automobila i slično. Također je iznimno važno da mikrostruktura drva nije degradirana jer takve promjene znatno utječu na pad žilavosti. [1, 12]

3.4. Tvrdoća drva

Tvrdoća je jako bitno mehaničko svojstvo i po definiciji predstavlja otpornost nekog materijala prema prodiranju drugog znatno tvrđeg materijala. Ovisno o pravcu po kojem djeluje sila u odnosu na smjer vlaknaca tvrdoća se može odrediti u radijalnom, poprečnom i tangencijalnom smjeru.

U tablici 3.1 prikazani su intervali u kojima se kreću vrijednosti tvrdoće pojedinih domaćih vrsta drva.

Postoje i vremenom su se razvile mnoge metode ispitivanja tvrdoće, a valjalo bi spomenuti dvije koje se najčešće koriste, kako kod nas tako i u Europi, a to su metoda po Janki i metoda po Brinellu. Svaka od njih ima svoje prednosti i nedostatke.

Tablica 3.1 Tvrdoće pojedinih domaćih vrsta drva

Vrsta drva	Tvrdoća
Hrast	28,0... 65,0... 101,0
Jasen	41,0... 76,0... 115,0
Bukva	54,0... 78,0... 110,0
Lipa	26,0... 33,0... 39,0
Breza	37,0... 49,0... 63,0
Bagrem	45,0... 59,0... 77,0
Ariš	22,0... 38,0... 70,0
Bor (obični)	19,0... 30,0... 50,0
Smreka	14,0... 27,0... 46,0
Jela (obična)	18,0... 34,0... 53,0

Najčešće se za mjerenje tvrdoće koristi metoda po Janki koju je osmislio austrijski znanstvenik Gabriel Janka 1906. godine. 1927. godine metoda je standardizirana te je trenutno važeća američka norma ASTM D 1037-12 [13]. Uzorak na kojem se mjeri tvrdoća mora biti dimenzija $50 \times 50 \times 30$ mm. Tvrdoća direktno ovisi o sili koja je potrebna da se čelična kuglica promjera 11,28 mm utisne u površinu drva do polovice svojeg promjera u iznosu od 5,64 mm. Brzina utiskivanja kuglice je konstantna i iznosi od 0,05 do 0,1 mm/s.

Formula za izračunavanje vrijednosti tvrdoće glasi:

$$H_j = K \cdot F, \text{ N} \quad (3.9)$$

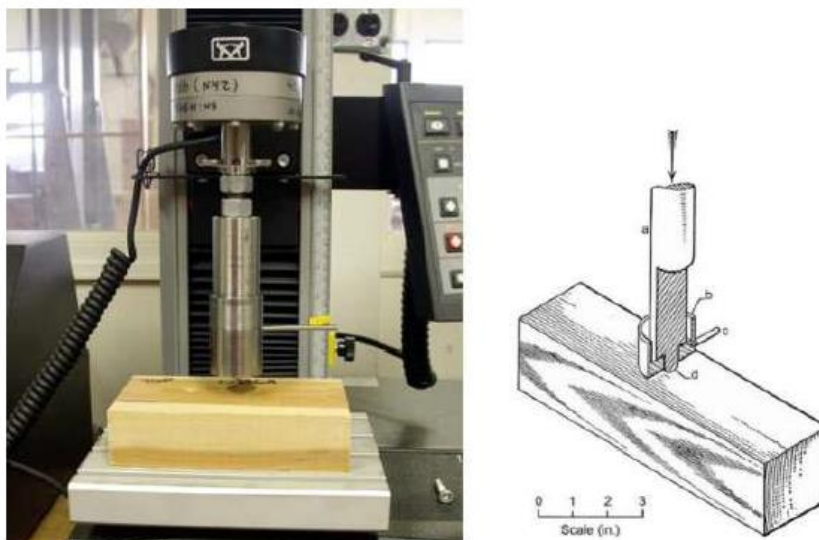
gdje su:

H_j - tvrdoća po Janki u N

K – koeficijent ovisan o dubini prodora kuglice

F – sila utiskivanja na propisanu dubinu u N.

Na slici 3.6 prikazan je uređaj za ispitivanje tvrdoće navedenom metodom:



Slika 3.7 Uređaj za ispitivanje tvrdoće drva metodom po Janki [14]

Druga metoda koja se primjenjuje za mjerenje tvrdoće jest metoda po Brinellu. Sve što se odnosi na ovu metodu propisano je normom HRN EN 1534:2010 [15]. Mjerenjem tvrdoće pomoću Brinellove metode kuglica od kaljenog čelika utiskuje se u materijal kojem je potrebno izmjeriti tvrdoću. Ova metoda se većinom primjenjuje kod mjerenja tvrdoće metala dok je moguće koristiti navedenu metodu i prilikom mjerenja tvrdoće drva. Standardni promjeri kuglice su od 1 do 10 mm dok sila iznosi oko 500 ili 1000 N. Tvrdoća se računa tako da se izmjeri promjer baze kalote (d) koja ostaje nakon rasterećenja. Promjer se mjeri pomoću mjernog povećala i dobiveni podaci se uvrste u jednadžbu :

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \text{ N/mm}^2, \quad (3.10)$$

gdje su :

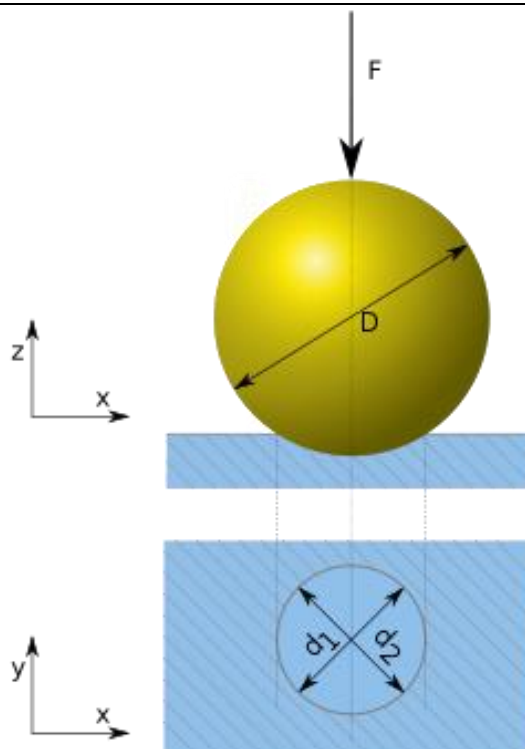
F – sila u N

D – promjer kuglice u mm

d – promjer baze kuglice kalote (otiska) u mm.

Opisanom metodom teško se mjeri tvrdoća jer je otisak penetratora malen te promjer otiska nije jednostavno izmjeriti. Nadalje, prisutno je veliko rasipanje rezultata ovisno na koje mjesto kuglica ostavi otisak (kasni ili rani dio goda).

Na slici 3.7 prikazano je mjerenje tvrdoće Brinellovom metodom. [1, 16, 17]



Slika 3.8 Mjerenje tvrdoće Brinellovom metodom [18]

Zbog heterogene građe drva neizbježno je veliko rasipanje rezultata pri mjerenju tvrdoće i drugih mehaničkih te fizikalnih svojstava. Kako bi se prikazala odstupanja, rezultate mjerenja potrebno je statistički obraditi. Statistička obrada je neophodna kako bi se provjerilo prelaze li rezultati mjerenja granice zadane normama.

Prema standardu ISO 13061 [19] aritmetička sredina ili srednja vrijednost dobiva se zbrajanjem vrijednosti članova (u ovom slučaju vrijednosti tvrdoće izračunatih metodom po Brinellu) i dijeljenjem zbroja s brojem pribrojnika ili općenitije:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (3.11)$$

gdje je:

\bar{x} - aritmetička sredina vrijednosti tvrdoće izmjerene metodom po Brinellu

x_i - pojedinačne vrijednosti tvrdoće izmjerene metodom po Brinellu

n - broj mjerenja.

Nakon što se izračuna srednja vrijednost moguće je odrediti standardnu devijaciju pomoću formule:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (3.12)$$

gdje vrijednosti n , x_i i \bar{x} označavaju iste vrijednosti kao i kod prethodnog izraza.

Koeficijent varijacije računa se prema izrazu:

$$C_v = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100, \quad (3.13)$$

gdje vrijednost s označava standardnu devijaciju, a vrijednost \bar{x} aritmetičku sredinu vrijednosti tvrdoće izmjerene metodom po Brinellu. Prema prije spomenutom standardu, koeficijent varijacije ne bi smio biti veći 17 %. Prema nekim drugim literaturnim navodima postotak ne bi smio prelaziti 20 %.[6]

Standardna devijacija aritmetičkih sredina računa se prema sljedećem izrazu:

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}}, \quad (3.14)$$

gdje s označava standardnu devijaciju, a n broj mjerenja.

Indeks preciznosti testa računa se prema jednadžbi:

$$p = \frac{2 \cdot s_{\bar{x}}}{\bar{x}} \cdot 100, \quad (3.15)$$

gdje $s_{\bar{x}}$ i \bar{x} označavaju iste vrijednosti kao i u izrazima (3.13) i (3.14).

4. EKSPERIMENTALNI DIO

4.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja

Osnovni cilj rada je istražiti utjecaj orijentacije drvnih stanica na tvrdoću drva obične smreke (*Picea abies*). Vrijednost tvrdoće, kao i ostala mehanička svojstva, varira ovisno o smjeru u kojem su orijentirane drvene stanice (traheide).

Zbog razlike u građi između traheida ranog i kasnog dijela goda potrebno je napraviti veliki broj mjerenja jer su rasipanja rezultata vrlo velika. Tvrdoća je izmjerena metodom po Brinellu, a kut između sile utiskivanja i smjera izduženih traheida variran je u rasponu od 0° do 90° . Za kut od 0° površina kojoj se mjeri tvrdoća poklapa se s poprečnim presjekom, a za kut od 90° površina se poklapa s tangencijalnim presjekom.

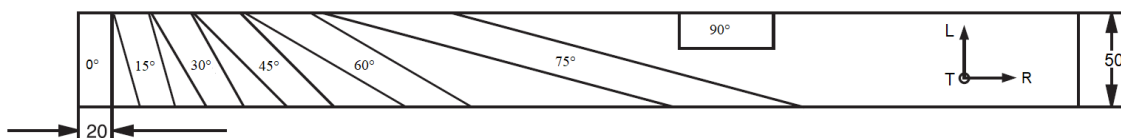
U okviru planiranog istraživanja provedeno je:

- mjerenje tvrdoće metodom po Brinellu (HB)
- mjerenje srednje širine goda
- mjerenje prosječnog udjela kasnog dijela goda
- mjerenje gustoće.

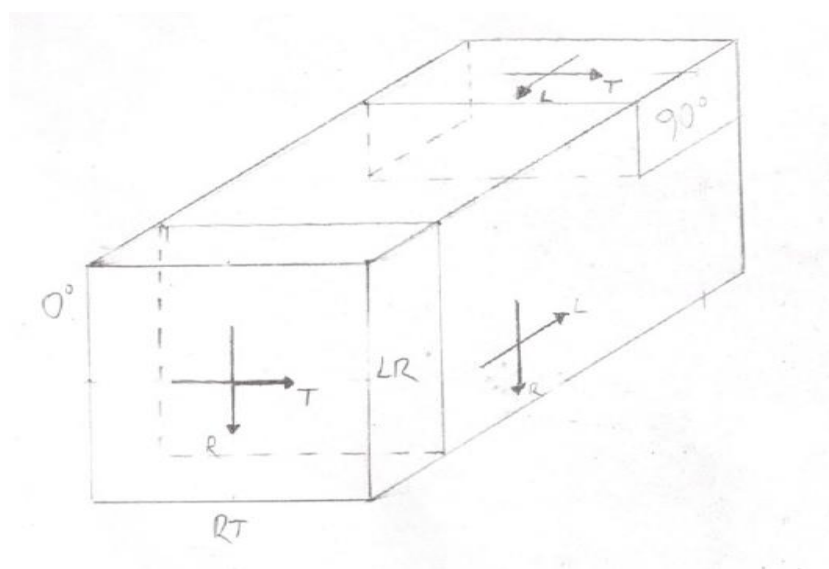
4.2. Materijal za ispitivanje

Iz velikog komada smreke izrezani su uzorci za ispitivanje u obliku kvadra. Dimenzije uzoraka iznosile su $50 \times 50 \times 25$ mm. Uzorci su rezani jedan ispod drugoga s obzirom na uzdužnu os debla kako bi se što više izbjegle razlike u gustoći i širini godova među uzorcima. Površina na kojoj se mjeri tvrdoća kod prvog uzorka poklapa se s poprečnim presjekom, a svakom sljedećem uzorku ista površina je zakrenuta za 15° u odnosu na prethodni uzorak. Tako se na zadnjem uzorku površina na kojoj se mjeri tvrdoća poklapa s tangencijalnim presjekom. Na ovaj način dobiveno je ukupno 7 uzoraka. Svi uzorci su pažljivo pregledani da se izbjegnu eventualno prisutne nepravilnosti u građi drva koje bi mogle utjecati na rezultate mjerenja.

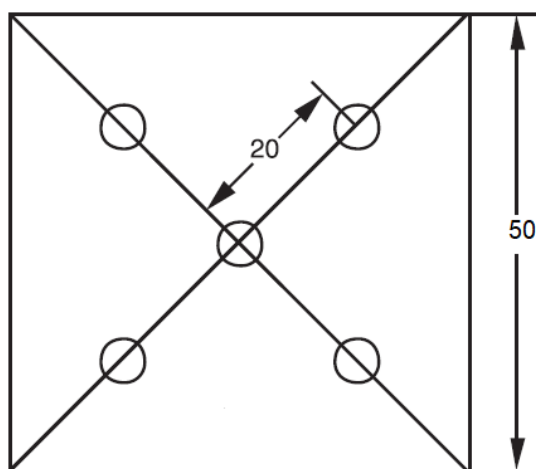
Na slikama 4.1 i 4.2 prikazan je položaj uzoraka pri izrezivanju. Na svakom uzorku napravljeno je ukupno 10 mjerenja, po 5 na svakoj površini dimenzija 50×50 mm, kao što je prikazano na slici 4.3.



Slika 4.1 Položaj ispitnih uzoraka u odnosu na tri karakteristične osi



Slika 4.2 Smjer rezanja ispitnih uzoraka



Slika 4.3 Shematski prikaz pozicija za mjerenje tvrdoće na ispitnim uzorcima

Na slikama 4.4 i 4.5 prikazani su ispitni uzorci prije mjerenja tvrdoće. Na prvoj slici vidi se promjena teksture od poprečnog (uzorak s oznakom 0°) do tangencijalnog presjeka na površini na kojoj će se mjeriti tvrdoća. Na slici 4.4 vide se bočne stranice uzoraka i položaj godova na njima.



Slika 4.4 Prikaz jedne od dvije površine na kojoj se provodilo ispitivanje



Slika 4.5 Prikaz ispitnih uzoraka

4.3. Mjerenje tvrdoće

Mjerenje tvrdoće uzoraka provedeno je u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Mjerenje je provedeno na tvrdomjeru VEB WPM HP 250 koji je prikazan na slici 4.6. Primjenjena je metoda po Brinellu. Promjer čelične kuglice iznosio je 5 mm, a sila utiskivanja iznosila je 490,5 N. Maksimalna vrijednost sile postiže se unutar 15 ± 3 sekunde, a djelovanje maksimalnog opterećenja iznosilo je 30 sekundi. Radi preciznijeg očitavanja promjera otiska između kuglice i površine uzorka postavlja se indigo papir, kako je prikazano na slici 4.7.

Promjer otiska, što ga u površini ispitnog uzorka nakon rasterećenja ostavlja kuglica, očitava se pomoću uređaja za precizno mjerenje prikazano na slici 4.8.



Slika 4.6 Tvrdomjer VEB WPM HP 250



Slika 4.7 Mjerenje tvrdoće



Slika 4.8 Uredaj za precizno mjerenje promjera otiska

4.3.1. Rezultati mjerenja tvrdoće

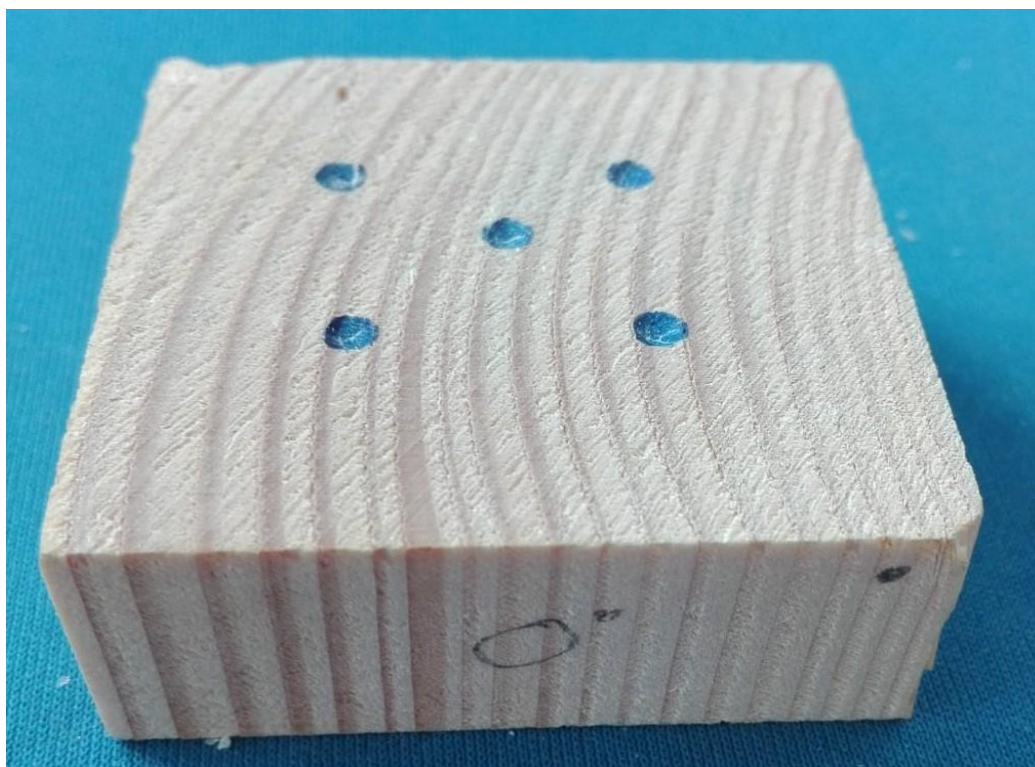
U tablici 4.1 prikazani su rezultati dobiveni mjerenjem tvrdoće po Brinellu.

Na svakom uzorku provedeno je 10 mjerenja kao što je prethodno opisano, a u zadnjem stupcu prikazana je srednja vrijednost tvrdoće.

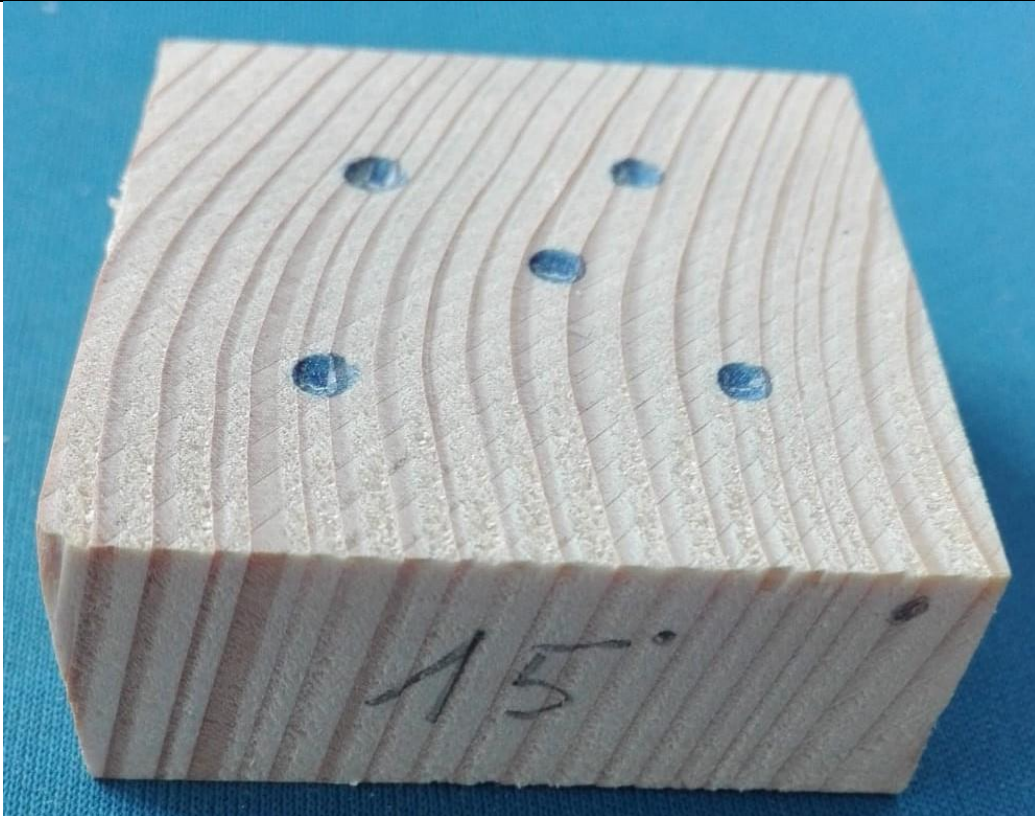
Tablica 4.1 Rezultati mjerenja tvrdoće

Kut	Tvrdoća HB										
	Mjerenje										\bar{x}
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0°	48,5	54,0	49,4	48,5	46,0	62,5	55,9	51,1	49,4	35,1	50,0
15°	43,0	28,3	41,5	53,0	42,3	46,8	34,0	35,7	39,5	43,7	40,8
30°	36,3	32,3	35,1	35,7	45,3	41,5	26,9	34,0	42,3	43,0	37,2
45°	28,3	29,7	32,3	40,2	42,3	35,7	34,0	33,4	31,8	38,8	34,6
60°	39,5	31,8	34,5	31,2	26,4	30,7	30,2	52,1	39,5	32,3	34,8
75°	23,8	24,7	29,2	35,1	26,4	26,4	28,7	26,4	31,2	34,5	28,7
90°	23,8	26,4	23,4	31,2	30,2	26,0	28,3	23,0	24,7	24,2	26,1

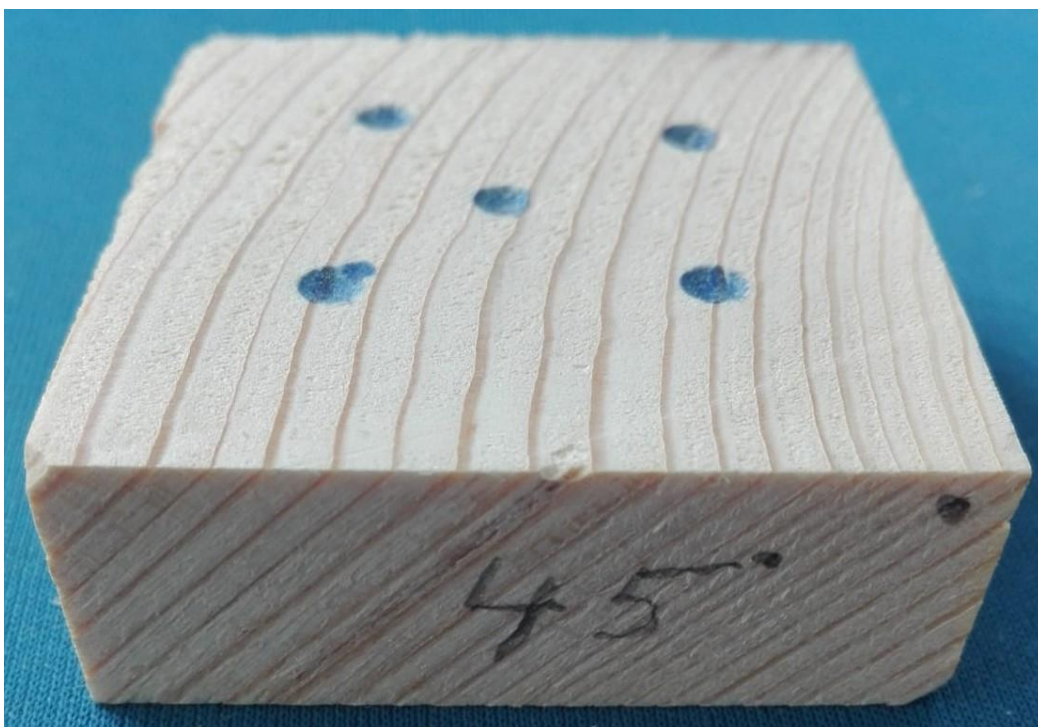
Na slikama od 4.9 do 4.13 prikazani su neki od ispitnih uzoraka na kojima se vide otisci mjerenja tvrdoće.



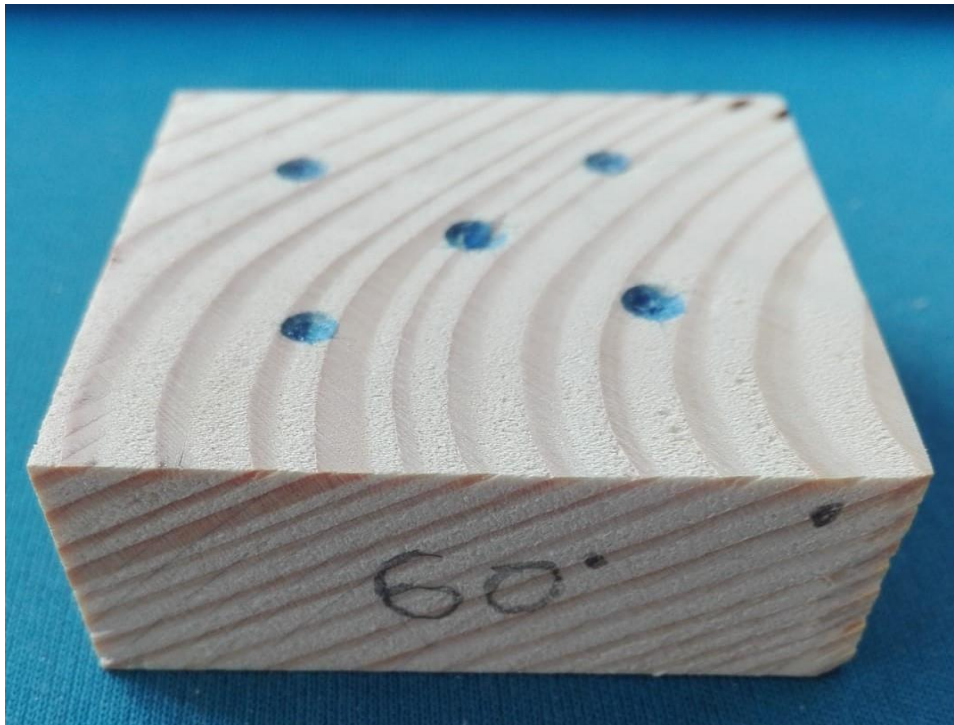
Slika 4.9 Ispitni uzorak s oznakom 0°



Slika 4.10 Ispitni uzorak s oznakom 15°



Slika 4.11 Ispitni uzorak s oznakom 45°



Slika 4.12 Ispitni uzorak s oznakom 60°

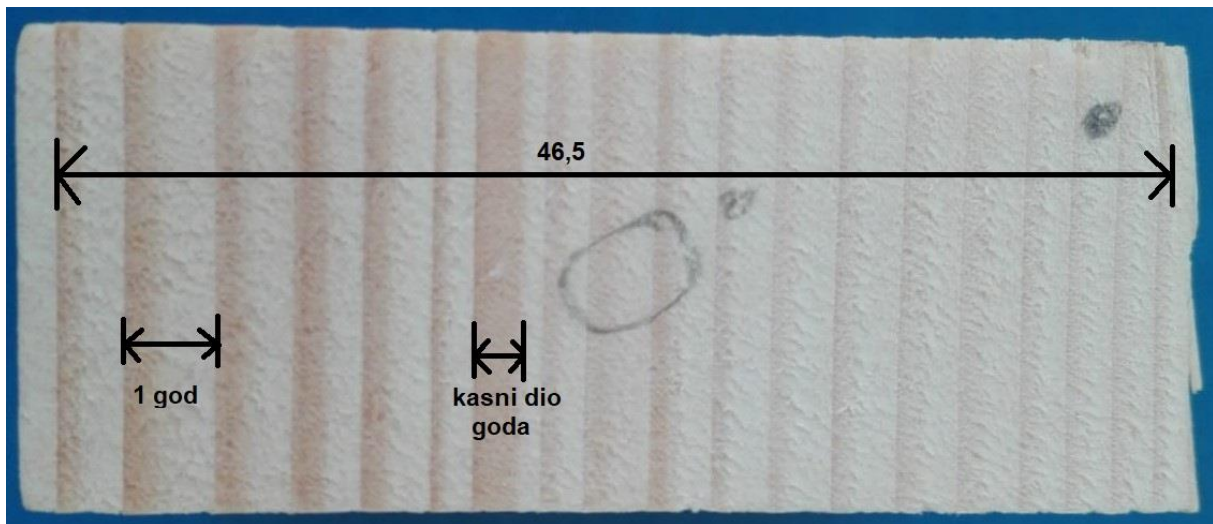


Slika 4.13 Ispitni uzorak s oznakom 75°

4.4. Određivanje srednje širine goda i srednjeg udjela kasnog dijela goda

Srednja širina goda određena je na bočnoj stranici uzorka čija se površina 50×50 mm poklapa s poprečnim presjekom (uzorak s oznakom 0°). Prvo se izbroje cijeli godovi na stranici (18), a zatim se izmjeri njihova ukupna širina (46,5 mm) i podijeli s brojem godova kao što je prikazano na slici 4.14. Na taj način se odredi srednja širina goda koja približno iznosi 2,6 mm.

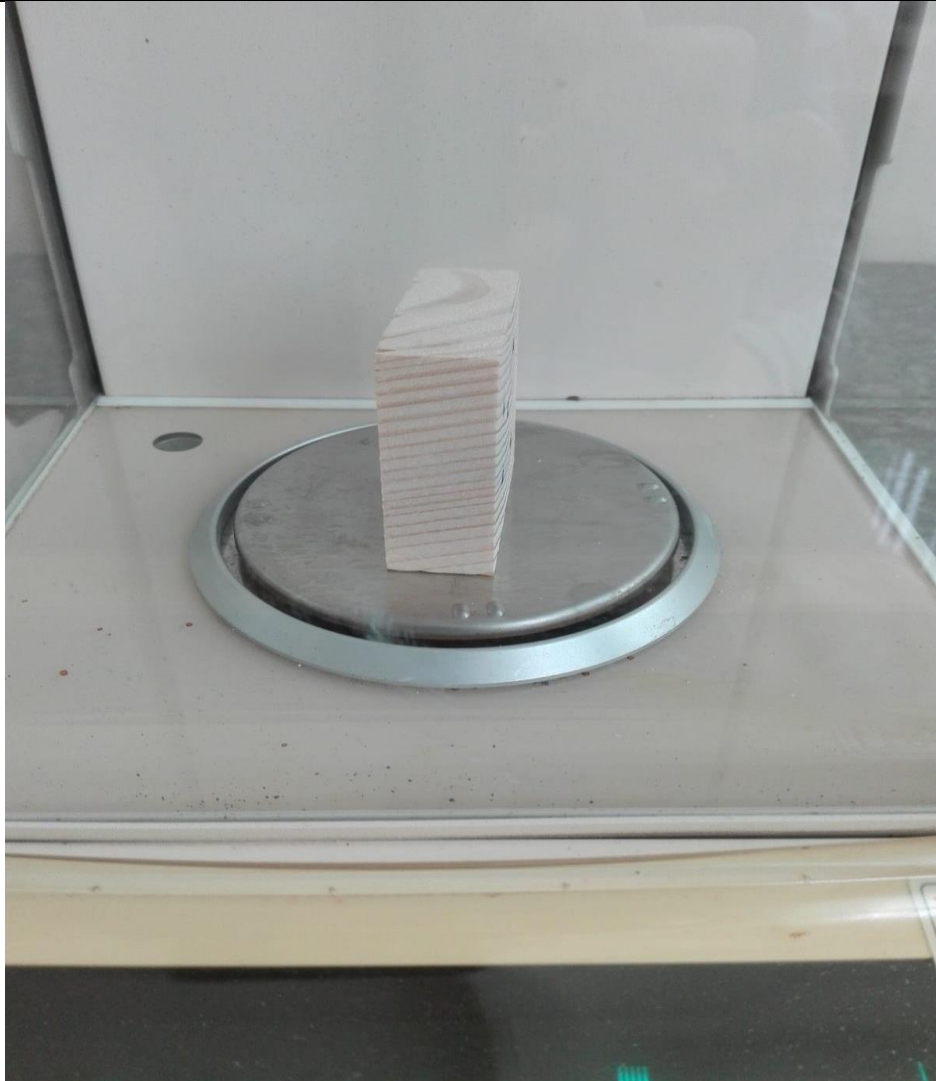
Srednji udjel kasnog dijela goda određuje se zbrajanjem širine svih kasnih dijelova goda (tamnije obojenih) i dijeljenjem s ukupnom duljinom koja iznosi 46,5 mm, prema slici 4.14. Prosječna vrijednost udjela kasnog dijela goda iznosi 47,3 %.



Slika 4.14 Prikaz određivanja srednje širine goda i srednjeg udjela kasnog dijela goda

4.5. Mjerenje gustoće

Gustoća uzorka drva određena je prema ISO – 13061 – 2:2014 normi [20]. Prvo je potrebno izmjeriti volumen uzorka te se nakon toga uzorku mjeri masa na mjernoj vagi kao što je prikazano na slici 4.15. Mjerenje je provedeno na jednom uzorku (s oznakom 15°), a s obzirom na način uzimanja svih uzoraka, gustoća svih uzoraka bi trebala biti podjednaka. Dimenzije uzorka iznosile su $49,1 \times 49,2 \times 20,0$ mm, a masa uzorka iznosila je 21,792 g pa prema izrazu (1.1) gustoća iznosi $0,451 \text{ g/cm}^3$.



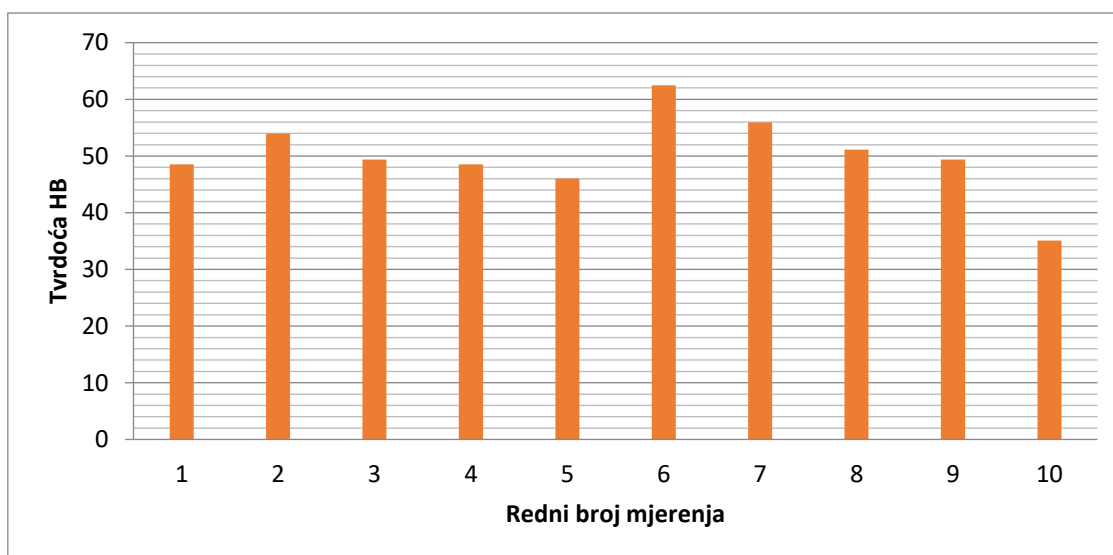
Slika 4.15 Mjerenje mase uzorka na vagi

5. ANALIZA REZULTATA

Na slikama od 5.1 do 5.7 grafički su prikazane vrijednosti tvrdoće za sve uzorke. Na svakom grafu prikazani su pojedinačni rezultati svakog od 10 mjerenja. Ovakvim prikazom rezultata dobije se bolji uvid u rasipanje rezultata na istom uzorku.

Rasipanje rezultata prisutno je kod svih uzoraka, što je i bilo za očekivati, zbog izrazito heterogene građe drva.

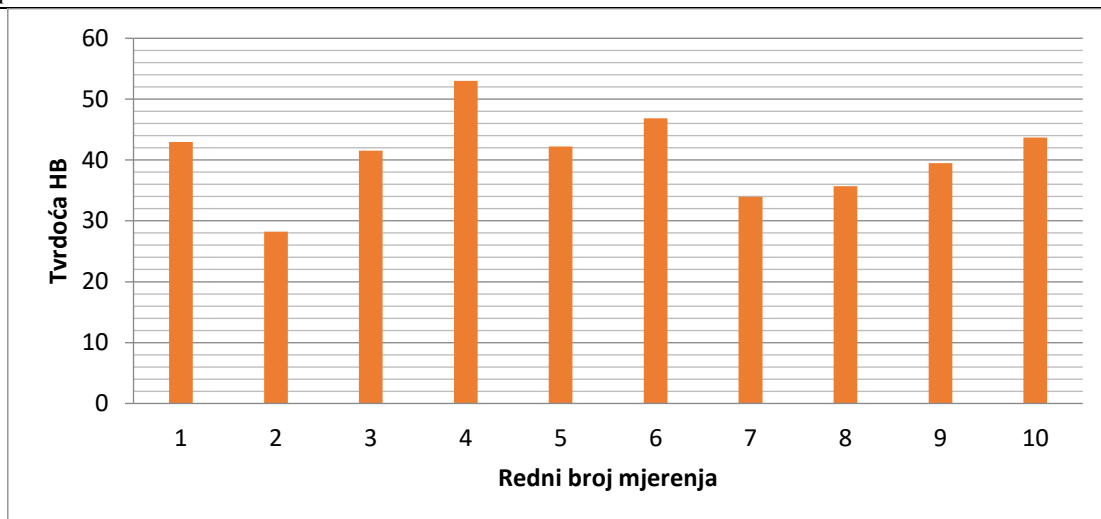
Uzorak s oznakom 0°, kod kojeg je tvrdoća mjerena na poprečnom presjeku, ima najvišu srednju vrijednost tvrdoće od svih uzoraka, 50,0 HB. Maksimalna izmjerena vrijednost kod ovog uzorka iznosi 62,5 HB, a minimalna 35,1 HB.



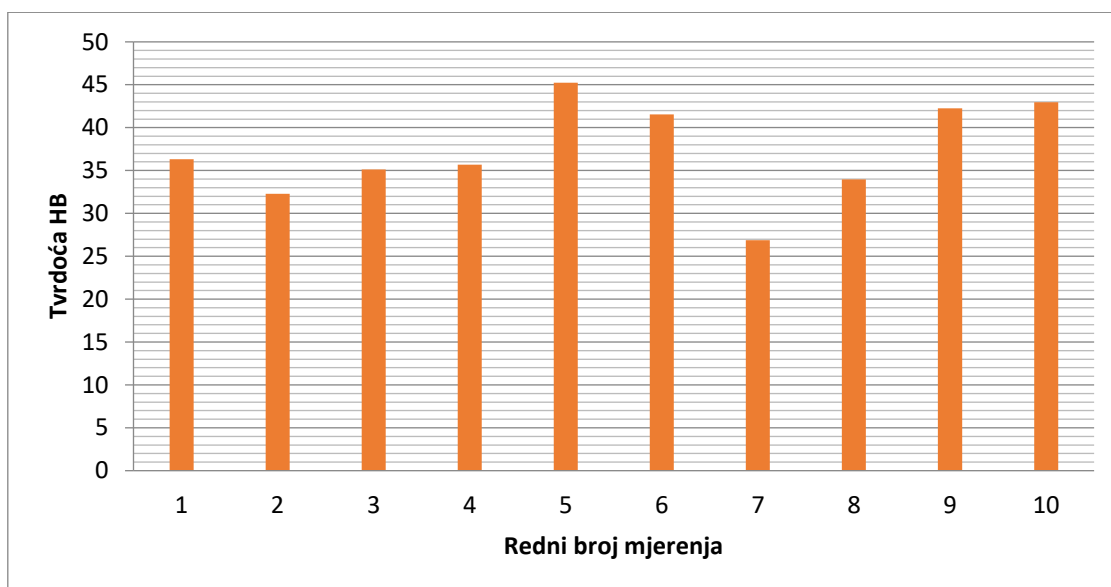
Slika 5.1 Vrijednosti tvrdoće HB za uzorak s oznakom 0°

Kod uzorka s oznakom 15°, kod kojeg je površina na kojoj se mjeri tvrdoća zakrenuta za 15° od radijalne osi u odnosu na prethodni uzorak, srednja vrijednost tvrdoće značajno je niža i iznosi 40,8 HB. Maksimalna izmjerena vrijednost tvrdoće kod ovog uzorka iznosi 53,0 HB, a minimalna 28,3 HB. Rasipanja rezultata su dosta velika.

Na uzorku s oznakom 30°, koji je u istom smjeru zakrenut za dodatnih 15°, dobivena je još niža srednja vrijednost tvrdoće od 37,2 HB. Maksimalna izmjerena vrijednost tvrdoće iznosi 45,3 HB, a minimalna 26,9 HB.



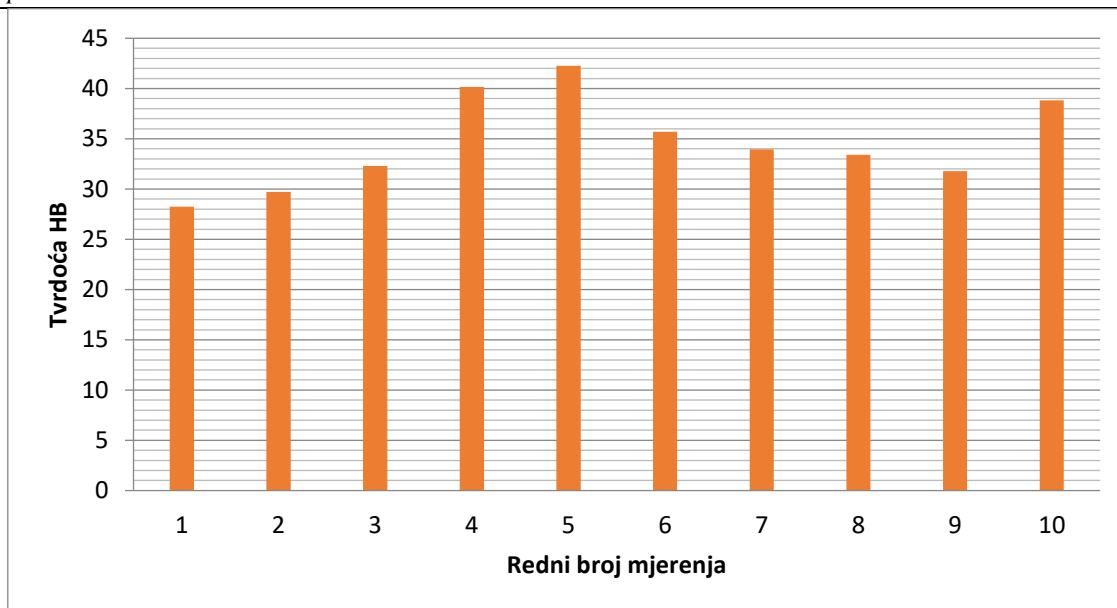
Slika 5.2 Vrijednosti tvrdoće HB za uzorak s oznakom 15°



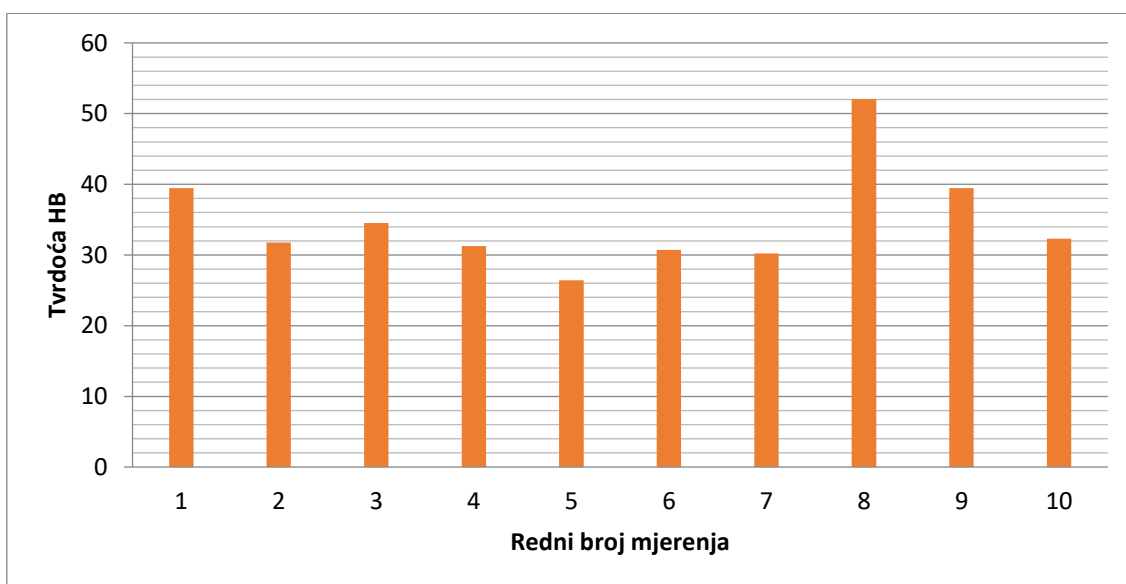
Slika 5.3 Vrijednosti tvrdoće HB za uzorak s oznakom 30°

Kod uzorka s oznakom 45°, kod kojeg je površina na kojoj se mjeri tvrdoća zakrenuta za 45° u odnosu na početni uzorak s oznakom 0°, srednja vrijednost tvrdoće nastavlja padati te iznosi 34,6 HB. Maksimalna izmjerena vrijednost tvrdoće iznosi 42,3 HB, a minimalna 28,3 HB.

Uzorak s oznakom 60° ima skoro istu vrijednost srednje tvrdoće kao prethodi uzorak i iznosi 34,8 HB. Maksimalna izmjerena vrijednost tvrdoće iznosi 52,1 HB, a minimalna 26,4 HB. Rasipanja rezultata su dosta velika.



Slika 5.4 Vrijednosti tvrdoće HB za uzorak s oznakom 45°

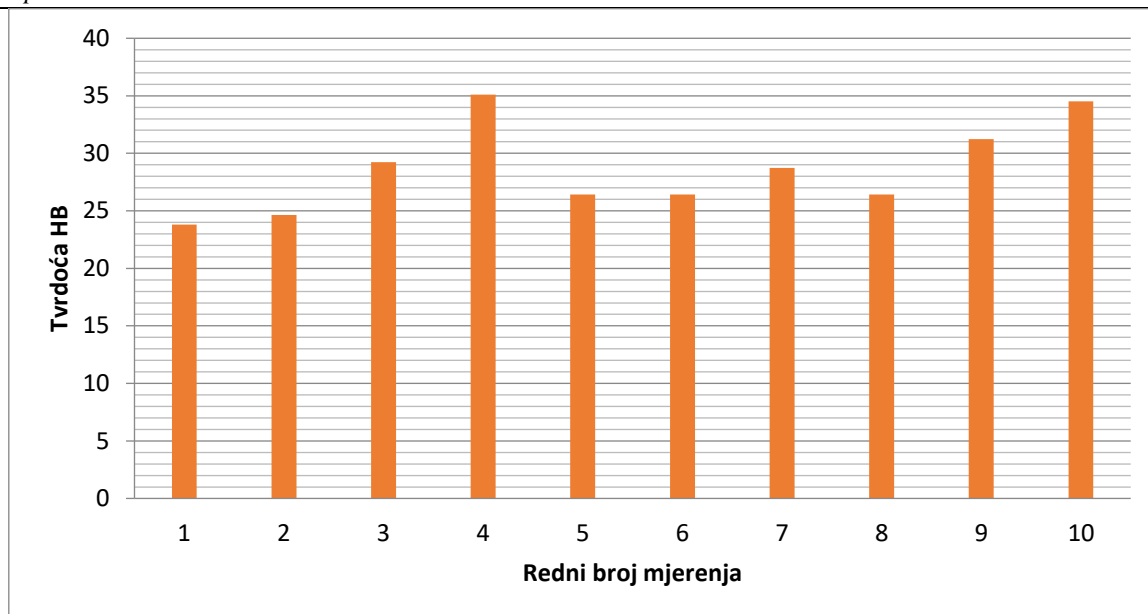


Slika 5.5 Vrijednosti tvrdoće HB za uzorak s oznakom 60°

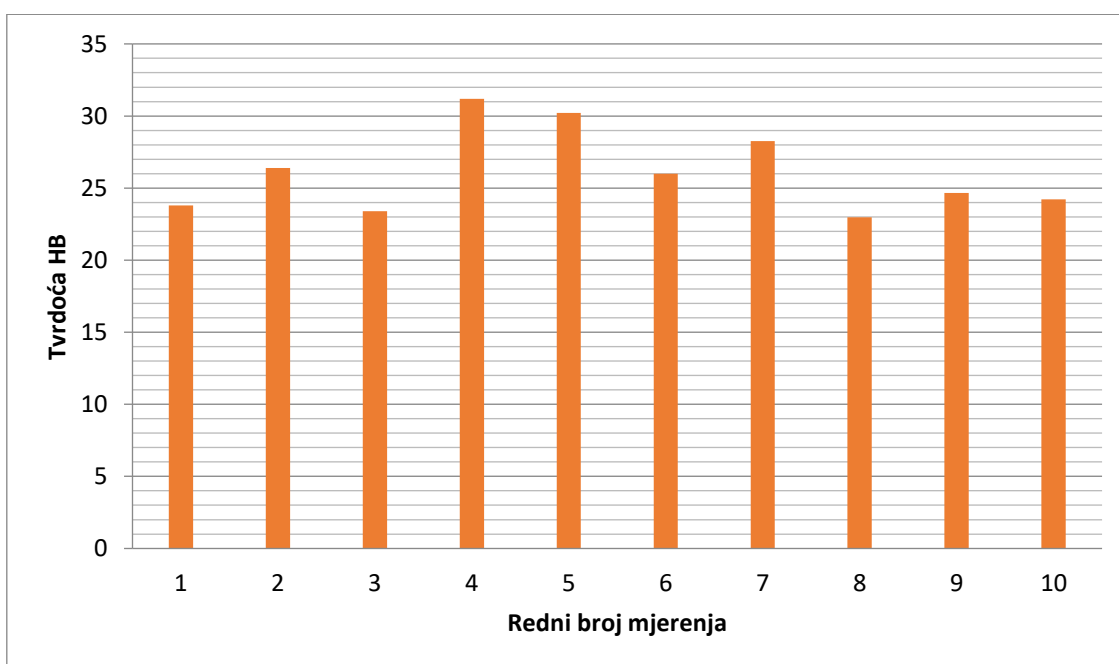
Na uzorku s oznakom 75° srednja vrijednost tvrdoće značajno opada te iznosi 28,7 HB. Maksimalna izmjerena vrijednost tvrdoće iznosi 35,1 HB, a minimalna 23,8 HB.

Kod uzorka s oznakom 90°, kod kojeg se površina na kojoj je izmjerena tvrdoća poklapa s tangencijalnim presjekom, dobivena je najniža srednja vrijednost tvrdoće od 26,1 HB. Maksimalna izmjerena vrijednost tvrdoće iznosi 31,2 HB, a minimalna 23,0 HB.

Kod ovog i prethodnog uzorka rasipanja rezultata su manja nego kod ostalih.



Slika 5.6 Vrijednosti tvrdoće HB za uzorak s oznakom 75°



Slika 5.7 Vrijednosti tvrdoće HB za uzorak s oznakom 90°

Kako bi pobliže objasnili i opisali rezultate, potrebno ih je statistički analizirati. Tablica 5.1 prikazuje rezultate statističke obrade.

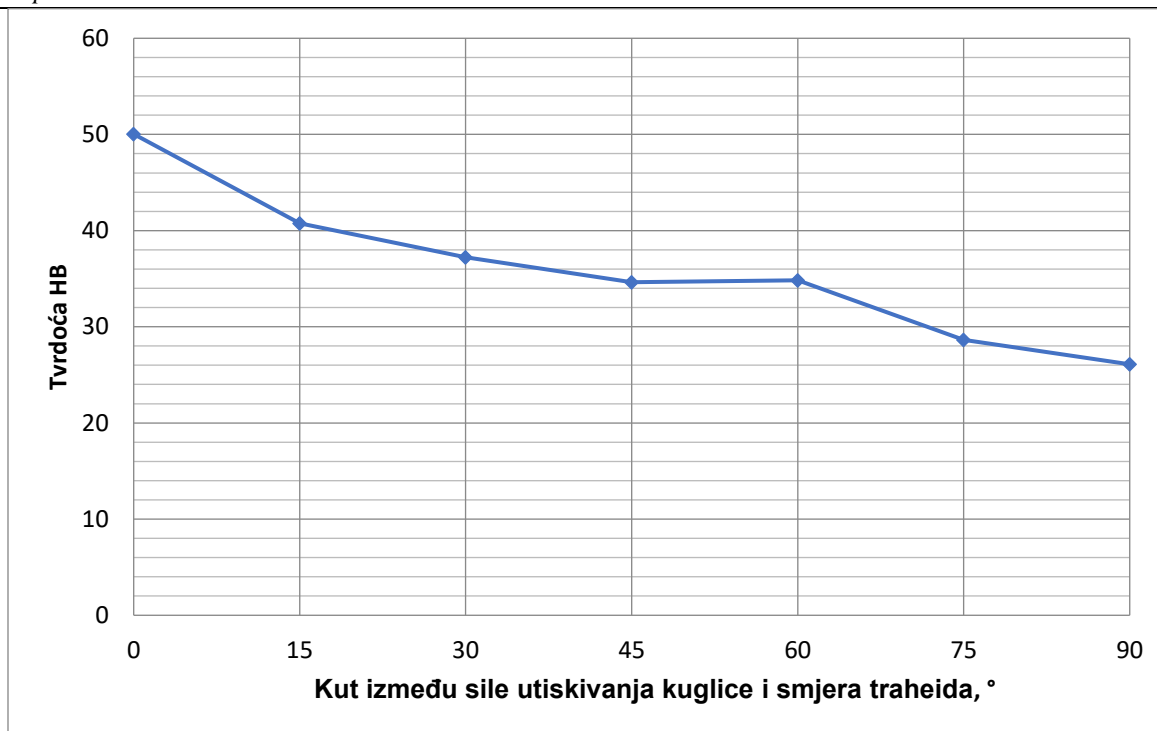
Kao što je u poglavlju 3.4. navedeno, vrijednost koeficijenta varijacije ne bi smjela prelaziti 17 % eventualno 20 %. Rezultati svih uzoraka nalaze se unutar dozvoljenog intervala.

Najniži koeficijent varijacije dobiven je kod uzorka s oznakom 90° (10,55 %), a najviši kod uzorka s oznakom 60° (19,85 %).

Tablica 5.1 Rezultati statističke analize vrijednosti dobivenih pri mjerenju tvrdoće HB

Uzorak	Aritmetička sredina	Standardna devijacija	Standardna devijacija aritmetičkih sredina	Koeficijent varijacije %	Indeks preciznosti %
0°	50,0	7,08	2,24	14,14	8,95
15°	40,8	6,58	2,08	16,13	10,20
30°	37,2	5,40	1,71	14,50	9,17
45°	34,6	4,33	1,37	12,50	7,91
60°	34,8	6,91	2,19	19,85	12,56
75°	28,7	3,71	1,17	12,96	8,20
90°	26,1	2,75	0,87	10,55	6,67

Na slici 5.8 grafički je prikazan utjecaj kuta između smjera sile pri mjerenju tvrdoće i smjera traheida na vrijednost tvrdoće HB. Promjenom navedenog kuta od 0° (longitudinalni smjer – L) do 90° (radijalni smjer – R) tvrdoća drva se smanjuje s početnih 50,0 HB na 26,1 HB. To konkretno znači da je tvrdoća poprečnog presjeka skoro 2 puta veća od tvrdoće tangencijalnog presjeka. Dobivene vrijednosti tvrdoće podudaraju se s vrijednostima tvrdoće drva smreke iz literature.



Slika 5.8 Utjecaj usmjerenosti strukture na tvrdoću HB

Dobiveni rezultati za vrijednosti tvrdoće svih uzoraka uvršteni su u Hankinsonovu formulu:

$$HB(\varphi) = \frac{HB_0 \cdot HB_{90}}{HB_0 \sin^n(\varphi) + HB_{90} \cos^n(\varphi)}, \text{ N/mm}^2 \quad (5.1)$$

gdje su:

HB_0 - vrijednost tvrdoće izmjerena na uzorku 0°

HB_{90} - vrijednost tvrdoće izmjerena na uzorku 90°

φ - kut smjera opterećenja

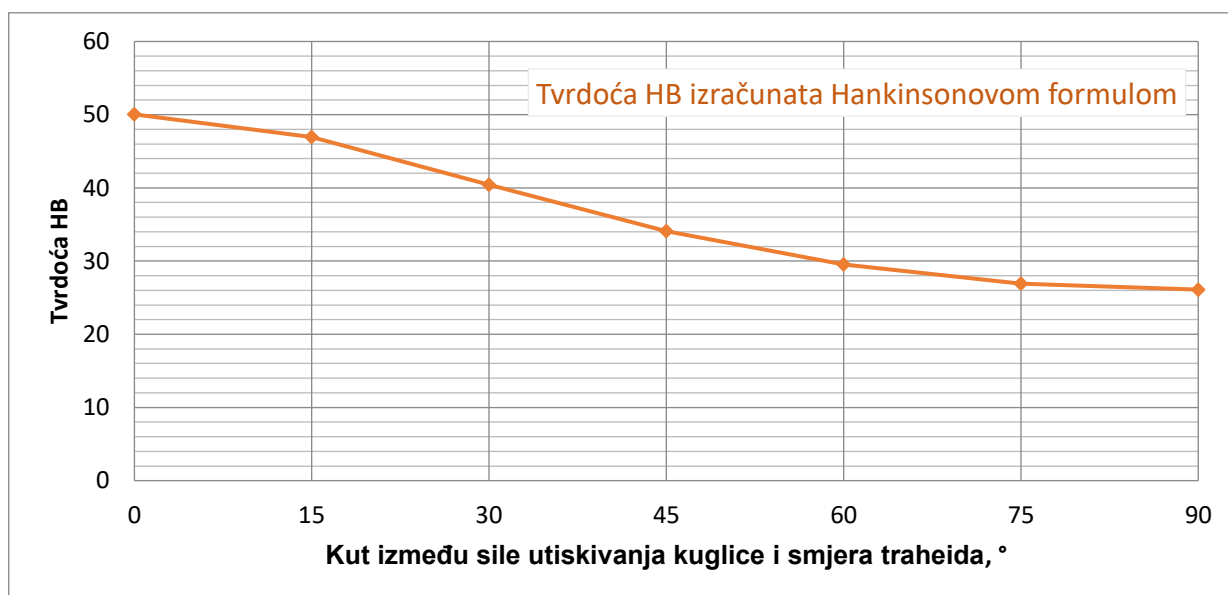
n- faktor koji je izračunat primjenom metode najmanjih kvadrata te iznosi 1,98.

U tablici 5.2 prikazane su vrijednosti tvrdoće HB dobivene mjerenjem i iste vrijednosti izračunate pomoću Hankinsonove formule.

U dijagramu na slici 5.9 prikazana je promjena tvrdoće HB gdje su vrijednosti tvrdoće izračunate Hankinsonovom formulom.

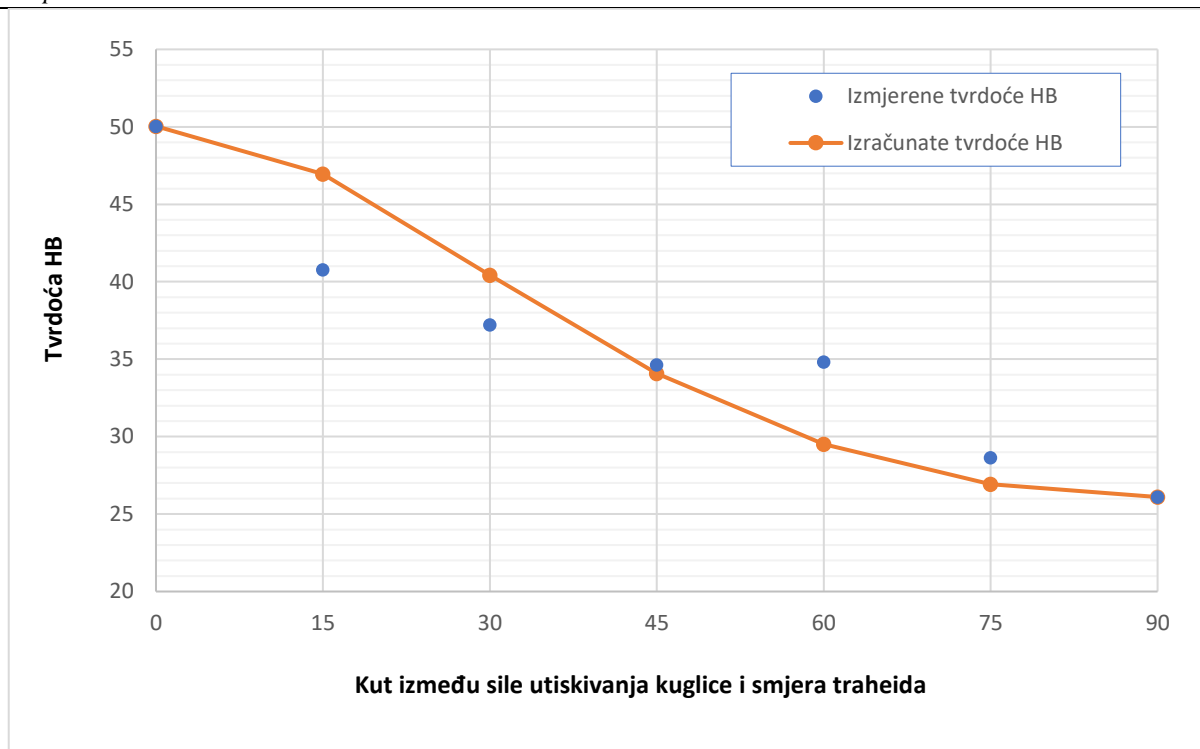
Tablica 5.2 Vrijednosti izmjerene i izračunate tvrdoće HB

Uzorak	Tvrdoća HB	
	dobivena mjerenjem	izračunata Hankinsonovom formulom
0°	50,04	50,04
15°	40,77	46,96
30°	37,22	40,42
45°	34,63	34,08
60°	34,82	29,52
75°	28,65	26,92
90°	26,10	26,10



Slika 5.9 „Idealizirana“ promjena tvrdoće HB

Krivulja na prethodnom grafu pokazuje kako bi se tvrdoća ispitnih uzoraka trebala kretati u idealnim uvjetima dok na sljedećem grafu koji je prikazan na slici 5.10 vidljivo je koliko izračunate vrijednosti odstupaju od onih idealnih.



Slika 5.10 Utjecaj usmjerenosti strukture na promjenu tvrdoće HB (izmjerene i izračunate vrijednosti)

6. ZAKLJUČAK

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

- kut između traheida i smjera sile pri mjerenju tvrdoće ima veliki utjecaj na vrijednost tvrdoće drva obične smreke (*Picea abies*)
- promjenom navedenog kuta od 0° (longitudinalni smjer – L) do 90° (radijalni smjer – R) tvrdoća drva se postupno smanjuje i pri kutu od 90° skoro je 2 puta manja od tvrdoće pri kutu od 0°
- najveća tvrdoća izmjerena je u poprečnom presjeku i iznosi 50,0 HB, a najmanja u tangencijalnom presjeku i iznosi 26,1 HB, što se podudara s vrijednostima tvrdoće za drvo smreke navedenim u literaturi
- zbog izrazito heterogene građe drva prisutno je relativno veliko rasipanje rezultata
- unatoč relativno velikom rasipanju rezultata, dobivene vrijednosti koeficijenta varijacije ne prelaze dopuštenu vrijednost od 20 % i nalaze se u rasponu od 10,55 % do 19,85 %, čime se pokazuje valjanost provedenog ispitivanja i dobivenih rezultata
- vrijednosti indeksa preciznosti testa nalazi se u rasponu od 6,67 % do 12,56 %
- izmjerene vrijednosti tvrdoće relativno dobro se poklapaju s vrijednostima tvrdoće izračunate Hankinsonovom formulom.

Iako se vrijednost koeficijenta varijacije nalazi u granicama dopuštenog, zbog izrazito heterogene građe drva istraživanje bi trebalo provesti s većim brojem ponavljanja kako bi se dobili još precizniji rezultati.

LITERATURA

- [1] Recenzirani materijali za predavanje,
https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1496408466-0-drvo-skripta.pdf
- [2] Wood, <https://www.explainthatstuff.com/wood.html>
- [3] Drvo, https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1401970934-0-drvo_14.pdf
- [4] Užar, J., Drvo materijal u suglasnosti s prirodom, Tehnički glasnik,
<https://hrcak.srce.hr/109570>, pogledano 25.1.2021.
- [5] Roger M. Rowell: Handbook of wood chemistry and wood composites, CRC Press, 2005.
- [6] David W. Green, Jerrold E. Winandy, David E. Kretschmann: Mechanical Properties of Wood, Chapter 4, General Technical Report, 1999.
- [7] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Drvo_\(materijal\)](https://hr.wikipedia.org/wiki/Drvo_(materijal)), pogledano 20.1.2021.
- [8] <https://hrovat.net/o-lesu/teksture-lesa-in-nacini-razreza/prerezi-in-teksture-podrobno/>,
pogledano 28.1.2021.
- [9] <https://steurh.home.xs4all.nl/engloof/elooft.html#grondweefsel>, pogledano 24.01.2021.
- [10] Leksikografski zavod Miroslav Krleža,
<http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=16354>, pogledano 25.01.2021.
- [11] Wood and moisture, <http://www.wood-database.com/wood-articles/wood-and-moisture/>,
20.1.2021.
- [12] <https://hr.wikipedia.org/wiki/%C5%BDilavost>, pogledano 28.1.2021.
- [13] Norma; ASTM D 1037-12, Standard test methods for evaluating properties of wood-base fiber and particle panel materials
- [14] <https://www.hoskinghardwood.com/Department/Hardwood-Floors/Janka-Wood-Hardness-Chart.aspx?dId=7&pageId=12>, pogledano 28.1.2021.
- [15] Norma; HRN EN 1534:2010, Drveni podovi – Određivanje otpornosti na zasijecanje – Metode ispitivanja (EN 1534:2010)
- [16] Autorizirana predavanja, Materijali 1–3. dio, Mladen Franz, školska godina 2005./2006.
- [17] H. Holmberg: Influence of grain angle on Brinell hardness of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), 2000.
- [18] https://hr.wikipedia.org/wiki/Tvrdo%C4%87a_po_Brinellu, pogledano 27.1.2021.
- [19] Norma; ISO 13061, Physical and mechanical properties of wood -- Test methods for small clear wood specimens

[20] Norma; ISO 13061 – 2:2014, Physical and mechanical properties of wood -- Test methods for small clear wood specimens -- Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests