

# Utjecaj usmjerenosti strukture na tvrdoću drva ariša

---

**Pendić, Dražen**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:856456>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-10-14**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Dražen Pendić**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

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

Student:

Dražen Pendić

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se svojoj mentorici, dr. sc. Veri Rede, na pristupačnosti, izdvojenom vremenu i savjetima tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se svojoj obitelji koja me je bezuvjetno podržavala tijekom cijelog mog školovanja.

Zahvaljujem se svom prijatelju Ivanu Mikuliću koji je osigurao kvalitetan uzorak sibirskog ariša.

Dražen Pendić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Dražen Pendić** JMBAG: **0035219974**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj usmjerenosti strukture na tvrdoću drva ariša**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Effect of structural orientation on the hardness of larch wood**

Opis zadatka:

Svi tehnički materijali s usmjerenom mikrostrukturom imaju različita mehanička svojstva u različitim presjecima. Osobito je to izraženo kod svih vrsta drva koje se koriste u tehničke svrhe. 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 u ranom dijelu goda dosta se razlikuju od stanica koje nastaju u kasnom dijelu goda. Sve navedeno utječe na velike razlike u vrijednostima tvrdoće mehaničkih svojstava u tri karakteristična presjeka – logitudinalnom, radijalnom i tangencijalnom.

U završnom radu potrebno je utvrditi kako se mijenja tvrdoća drva sibirskog ariša (*Larix sibirica*) s promjenom orijentacije od poprečnog prema radijalnom te od poprečnog prema tangencijalnom presjeku, u sekvencama od po 15°. Za mjerenje tvrdoće koristiti Brinellovu metodu. 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. 11. 2021.

Datum predaje rada:

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

Predviđeni datumi obrane:

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

Zadatak zadala:

Prof. dr. sc. Vera Rede

*Rede*

Predsjednik Povjerenstva:

*Brankó Bauer*  
Prof. dr. sc. Brankó Bauer

## SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD.....	1
2. STRUKTURA DRVA.....	2
2.1. Botanička podjela .....	2
2.2. Karakteristični presjeci.....	3
2.3. Mikrostruktura drva .....	5
2.3.1. Mikrostruktura četinjača .....	5
2.3.2. Mikrostruktura listača.....	6
2.4. Kemijski sastav drva .....	7
3. SVOJSTVA DRVA .....	9
3.1. Voda u drvu .....	9
3.2. Mehanička svojstva.....	10
3.2.1. Modul elastičnosti (E) .....	11
3.2.2. Čvrstoća drva .....	12
3.3. Žilavost.....	14
3.4. Tvrdoća drva .....	15
4. EKSPERIMENTALNI DIO .....	19
4.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja .....	19
4.2. Materijal za ispitivanje.....	19
4.3. Mjerenje tvrdoće .....	25
4.3.1. Rezultati mjerenja tvrdoće .....	27
4.4. Određivanje srednje širine goda i udjela kasnog dijela goda.....	28
4.5. Mjerenje gustoće .....	29
5. ANALIZA REZULTATA .....	30
5.1. Promjena tvrdoće prelaskom iz poprečnog u tangencijalni presjek .....	30
5.2. Promjena tvrdoće prelaskom iz poprečnog u radijalni presjek.....	37
6. ZAKLJUČAK .....	44
LITERATURA.....	45

## 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) [8] .....	2
Slika 2.2	Karakteristični presjeci (lijevo) i osi drvene građe (desno) [1] .....	3
Slika 2.3	Poprečni presjek kroz A-četinjače ( <i>Pinus resinosa</i> ) i B-listače ( <i>Quercus rubra</i> ) [8].....	4
Slika 2.4	Poprečni presjek drva četinjače ( <i>Picea glauca</i> ) [8] .....	5
Slika 2.5	Mikrostruktura drva listača [10].....	7
Slika 3.1	Utezanje i distorzija drva pri sušenju [8] .....	10
Slika 3.2	Određivanje savojnog modula elastičnosti metodom u tri točke [1].....	11
Slika 3.3	Položaj godova u odnosu na smjer savojne sile [1].....	12
Slika 3.4	Shematski prikaz ispitivanja tlačne čvrstoće [1].....	13
Slika 3.5	Shematski prikaz smičnog naprezanja [1] .....	14
Slika 3.6	Uređaj za ispitivanje tvrdoće drva metodom po Janki [1].....	16
Slika 3.7	Mjerenje tvrdoće Brinellovom metodom [16].....	17
Slika 4.1	Sibirski ariš.....	20
Slika 4.2	Tračna pila .....	20
Slika 4.3	Shematski prikaz pozicija za mjerenje tvrdoće na uzorcima .....	21
Slika 4.4	Uzorak s oznakom 0°R .....	21
Slika 4.5	Uzorak s oznakom 15°R.....	22
Slika 4.6	Uzorak s oznakom 30°R.....	22
Slika 4.7	Uzorak s oznakom 45°R.....	23
Slika 4.8	Uzorak s oznakom 60°R.....	23
Slika 4.9	Uzorak s oznakom 75°R.....	24
Slika 4.10	Uzorak s oznakom 90°R.....	24
Slika 4.11	Tvrdomjer VEB WPM HP 250.....	25
Slika 4.12	Uređaj za precizno mjerenje promjera otiska.....	26
Slika 4.13	Otisci mjerenja tvrdoće .....	26
Slika 4.14	Određivanje srednje širine goda i udjela kasnog dijela goda .....	28
Slika 4.15	Analitička vaga .....	29
Slika 5.1	Rezultati mjerenja tvrdoće HB na uzorku oznake 0°T .....	30
Slika 5.2	Rezultati mjerenja tvrdoće HB na uzorku oznake 15°T .....	31
Slika 5.3	Rezultati mjerenja tvrdoće HB na uzorku oznake 30°T .....	31
Slika 5.4	Rezultati mjerenja tvrdoće HB na uzorku oznake 45°T .....	32
Slika 5.5	Rezultati mjerenja tvrdoće HB na uzorku oznake 60°T .....	32
Slika 5.6	Rezultati mjerenja tvrdoće HB na uzorku oznake 75°T .....	33
Slika 5.7	Rezultati mjerenja tvrdoće HB na uzorku oznake 90°T .....	33
Slika 5.8	Ovisnost tvrdoće o promjeni kuta između smjera sile utiskivanja kuglice i smjera traheida (iz poprečnog u tangencijalni presjek) .....	34
Slika 5.9	Ovisnost tvrdoće izračunate po Hankinsonovoj formuli o promjeni kuta između smjera sile utiskivanja i smjera traheida .....	36
Slika 5.10	Izmjerene i izračunate promjene tvrdoće HB .....	36
Slika 5.11	Rezultati mjerenja tvrdoće HB na uzorku oznake 0°R.....	37
Slika 5.12	Rezultati mjerenja tvrdoće HB na uzorku oznake 15°R .....	38
Slika 5.13	Rezultati mjerenja tvrdoće HB na uzorku oznake 30°R .....	38
Slika 5.14	Rezultati mjerenja tvrdoće HB na uzorku oznake 45°R .....	39

---

Slika 5.15 Rezultati mjerenja tvrdoće HB na uzorku oznake 60°R .....	39
Slika 5.16 Rezultati mjerenja tvrdoće HB na uzorku oznake 75°R .....	40
Slika 5.17 Rezultati mjerenja tvrdoće HB na uzorku oznake 90°R .....	40
Slika 5.18 Ovisnost tvrdoće o promjeni kuta između smjera sile utiskivanja kuglice i smjera traheida (iz poprečnog u radijalni presjek).....	41
Slika 5.19 Ovisnost tvrdoće izračunate po Hankinsonovoj formuli o promjeni kuta između smjera sile utiskivanja i smjera traheida .....	42
Slika 5.20 Izmjerene i izračunate promjene tvrdoće HB .....	43



## POPIS TABLICA

Tablica 3.1	Tvrdoće različitih vrsta drva [1] .....	15
Tablica 4.1	Rezultati mjerenja tvrdoće za promjenu iz poprečnog u radijalni presjek .....	27
Tablica 4.2	Rezultati mjerenja tvrdoće za promjenu iz poprečnog u tangencijalni presjek .....	27
Tablica 4.3	Gustoće uzoraka .....	29
Tablica 5.1	Rezultati statističke analize vrijednosti tvrdoće HB .....	34
Tablica 5.2	Vrijednosti izmjerene i izračunate tvrdoće HB .....	35
Tablica 5.3	Rezultati statističke analize vrijednosti tvrdoće HB .....	41
Tablica 5.4	Vrijednosti izmjerene i izračunate tvrdoće HB .....	42

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$\rho$	$\text{g/cm}^3$	gustoća
$m$	g	masa uzorka
$V$	$\text{cm}^3$	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
$E$	$\text{N/mm}^2$	modul elastičnosti
$L$	mm	razmak između oslonaca
$b$	mm	širina uzorka
$h$	mm	visina uzorka
$F_1$	N	sila
$F_2$	N	sila
$F_{\max}$	N	maksimalna sila
$a_1$	mm	progib
$a_2$	mm	progib
$R_{\text{ms}}$	$\text{N/mm}^2$	svojna čvrstoća
$R_{\text{m}}$	$\text{N/mm}^2$	tlačna čvrstoća
$R_{\text{m}\tau}$	$\text{N/mm}^2$	smična čvrstoća
$A$	$\text{mm}^2$	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	$\text{N/mm}^2$	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
$s_{\bar{x}}$	-	standardna devijacija aritmetičkih sredina
$\rho$	%	indeks preciznosti testa
$HB(\varphi)$	N/mm <sup>2</sup>	tvrdoća prema Hankinsonovoj formuli
$HB_0$	N/mm <sup>2</sup>	vrijednost tvrdoće izmjerena na uzorku 0°
$HB_{90}$	N/mm <sup>2</sup>	vrijednost tvrdoće izmjerena na uzorku 90°
$\varphi$	°	kut smjera opterećenja
$n$	-	faktor koji je izračunat primjenom metode najmanjih kvadrata

## SAŽETAK

U završnom radu istražen je utjecaj usmjerenosti strukture drva sibirskog ariša (*Larix sibirica*) na njegovu tvrdoću.

Teorijski dio rada opisuje strukturu drva te osnovna mehanička svojstva drva.

Eksperimentalni dio prikazuje rezultate ispitivanja dobivene mjerenjem tvrdoće po Brinellu u ovisnosti o usmjerenosti strukture. Tvrdoća je mjerena od poprečnog prema radijalnom presjeku te od poprečnog prema tangencijalnom presjeku u sekvencama od po 15°. Zbog očekivanog velikog rasipanja za svaki presjek napravljeno je po deset mjerenja. Rezultati su pokazali da usmjerenost strukture ima značajan utjecaj na tvrdoću drva. Najveća vrijednost tvrdoće dobivena je u poprečnom presjeku (51,91 HB), a najniže u tangencijalnom presjeku (32,43 HB) i radijalnom presjeku (32,19 HB). Iako je rasipanje rezultata relativno veliko, koeficijent varijacije je ispod dopuštene granice.

**Ključne riječi:** drvo, usmjerenost strukture, tvrdoća

## SUMMARY

This study deals with the influence of structural orientation on the hardness of siberian larch (*Larix sibirica*) wood.

Theoretical part of the study describes the structure of wood and main mechanical properties of wood.

Experimental part shows us the results obtained by measuring Brinell hardness as a function of the orientation of the structure. Hardness is measured from transverse to radial cross-section and from transverse to tangential cross-section in sequences of 15° each. Due to expected dissipation ten measurements were made for each angle. The results have showed that structural orientation has large influence on hardness of a wood. The highest value of hardness was obtained in the transverse cross-section (51.91 HB) and the lowest in the tangential cross-section (32.43 HB) and in radial cross-section (32.19 HB). Coefficient of variation for all tested angles is below upper limit even though the scatter of the results is large.

Key words: wood, structural orientation, hardness

## 1. UVOD

Drvo je prirodni tehnički materijal koji je u upotrebi još od početka civilizacije. Njegova svojstva omogućavaju mu vrlo široku primjenu. Drvo je korišteno za izradu prvih oružja, a i dan danas postoje oružja sačinjena od drva. Osim što služi za gradnju kuća i kao ogrjevni energent, drvo možemo pronaći i kao ukrasne elemente u luksuznim automobilima što daje uvid u njegovu široku primjenu.

Drvo je iznimno važno za industriju, ali nikako ne smije biti zanemaren ni njegov veliki značaj u pogledu zaštite ekosustava, podizanja kvalitete života i stvaranju kisika. Potvrđeno je da bi s više drveća u gradovima prosječna temperatura bila niža i do 5°C što bi svakako doprinijelo kvaliteti života. U Hrvatskoj šume i šumska zemljišta pokrivaju otprilike 47 % kopnene površine i kao takva, Hrvatska ima dugu tradiciju u gospodarenju šumama te drvo predstavlja naš vrlo važan izvor resursa. Međutim, sa šumama se mora postupati pažljivo jer prekomjerna sječa može dovesti do velikih neugodnih posljedica. Šume osim kao prirodni resurs služe za proizvodnju kisika, sprječavaju eroziju tla, smanjuju emisiju ugljičnog dioksida, povoljno utječu na klimu i sl.

Drvo svoju važnu ulogu u industriji može zahvaliti svojstvima koja drugi materijali nemaju. Drvo je prirodan materijal, može se reciklirati te ga relativno puno ima trenutno dostupnog što je u današnje vrijeme iznimno bitno. Zbog svojih specifičnih svojstava kao na primjer akustičnih (sprječava jeku i upija buku) nezamjenjiv je pri izradi glazbenih instrumenata, a koristi se i u koncertnim dvoranama. Zbog svoje estetike može se pronaći i u najluksuznije uređenim interijerima.

Staro se drvo može lako obnoviti što nije slučaj s većinom materijala, a ako se tretira na odgovarajući način drvo može u uporabi izdržati dugi niz godina. U kombinaciji s dobrim mehaničkim svojstvima drvo je neizostavan materijal u građevinarstvu.

Drvo ima i neka lošija svojstva u odnosu na druge materijale (zapaljivost, osjetljivost na vlagu, osjetljivost na bio razgrađivače i sl.). Ti se nedostaci pravilnim tretiranjem mogu svesti na minimum. Zbog heterogene i usmjerene mikrostrukture svojstva drva su također usmjerena. Tvrdoća je jedno od važnijih svojstava drva osobito u nekim primjerima primjene. [1, 2, 3, 4, 5, 6]

Ovaj rad se bavi utjecajem usmjerenosti strukture na tvrdoću drva ariša.

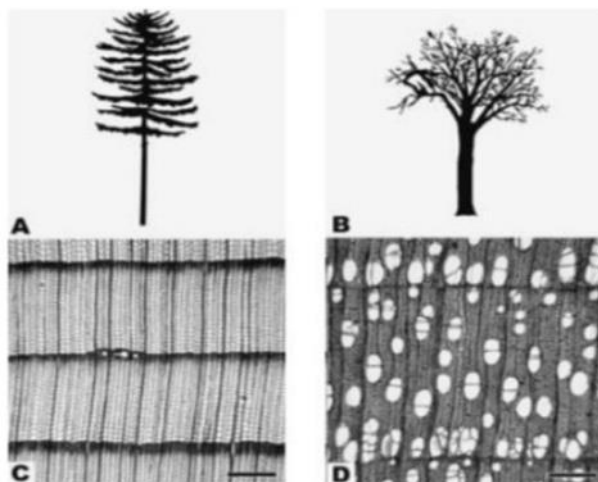
## 2. STRUKTURA DRVA

Drvo je prirodni kompozitni materijal. Izrazito je heterogen i anizotropan materijal s visokom specifičnom čvrstoćom i specifičnom krutošću. Uz niz prednosti drvo ima i određene mane. Da bi se te mane uspješno izbjegle potrebno je dobro poznavati njegovu građu jer su svojstva materijala uvijek posljedica strukture materijala. Struktura drva može se promatrati s više razina. Na elementarnoj razini drvo se sastoji od ugljika, kisika i vodika, a na razini spojeva sastoji se od celuloze, hemiceluloze i lignina. Drveno tkivo sastoji se od različitih drvnih stanica koje su osnovni element strukturne građe. Drva stanica se sastoji od lumena i stanične stijenke. Zbog specifične usmjerenosti drva, za opisivanje makrostrukture i mikrostrukture drva važno je uvijek navesti u kojem se karakterističnom presjeku drva promatra struktura. [1, 7]

### 2.1. Botanička podjela

Komercijalno zanimljive vrste drva pripadaju skupini cvjetnica ili sjemenjača koje se dijele na listače i četinjače. Drvo listača naziva se i tvrdo drvo, a drvo četinjača meko drvo premda to nema uvijek korelaciju s njihovom stvarnom tvrdoćom.

Na slici 2.1 je prikazan opći oblik stabla četinjača i listača te poprečni presjek kroz deblo četinjača i listača.



**Slika 2.1 Četinjače i listače, opći oblik stabla četinjače (A) i listače (B), poprečni presjek kroz deblo četinjače (C) i listače (D) [8]**

Četinjača po vrstama ima znatno manje od listača i one spadaju u skupinu golosjemenjača. Ime su dobile po obliku listova, a rastu na sjevernoj hemisferi i pretežito su zimzelene. Naše najpoznatije četinjače su jela (*Abies*), smreka (*Picea*) i bor (*Pinus*).

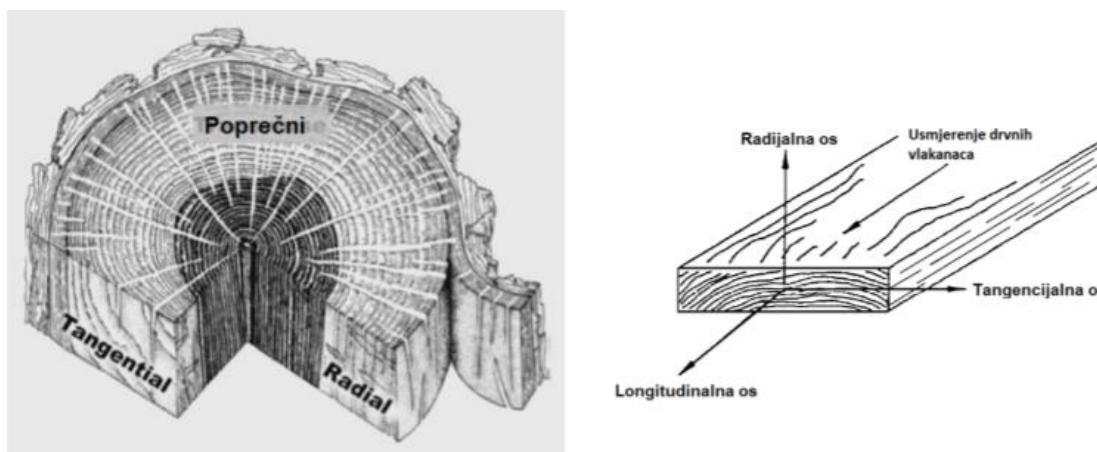
Listače, poznate i pod nazivom bjelogorica, pripadaju skupini kritosjemenjača, a najpoznatiji predstavnici su hrast (*Quercus*), bukva (*Fagus*), javor (*Acer*) i dr. Po broju vrsta znatno su brojnije od četinjača. [1, 2]

## 2.2. Karakteristični presjeci

Drvo se zbog usmjerene i ortotropne građe te svoje orijentiranosti u aksijalnom te radijalnom smjeru treba promatrati u tri presjeka.

- poprečnom (transverzalnom) – okomitom na longitudinalnu os debla
- radijalnom – paralelnom s longitudinalnom osi i okomit na tangencijalnu
- tangencijalnom – paralelan s longitudinalnom osi i okomit na radijalnu

Slika 2.2 prikazuje tri osnovna presjeka i tri karakteristične osi drva.



**Slika 2.2 Karakteristični presjeci (lijevo) i osi drvne građe (desno) [1]**

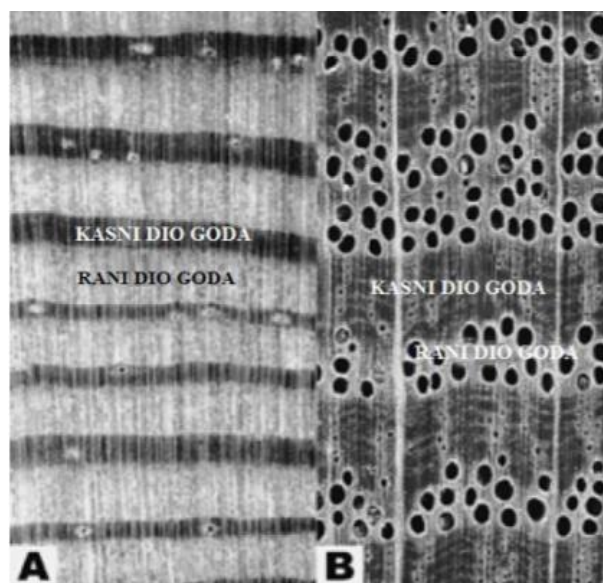
Poprečni presjek predstavlja okomicu na drvena vlakna te longitudinalnu os. U njemu se vidi raspored struktura od srčike do kore. Poprečni presjek daje najbolji prikaz godova koji su raspoređeni koncentrično oko središta ili srčike.



Radijalni presjek prolazi kroz srčiku i usporedan je s uzdužnom osi. Radijalni presjek prolazi okomito na godove koji se zbog toga vide kao usporedne linije.

Tangencijalni je presjek također paralelan s uzdužnom osi, ali umjesto po radijusu prolazi po tangenti na godove. I u tangencijalnom presjeku mogu se vidjeti godovi, ali ih je teže razlučiti nego što je to slučaj kod radijalnog presjeka.

Godovi su uglavnom koncentrični krugovi i oni predstavljaju godišnji drveni prirast. Takva vrsta rasta naziva se i sekundarni rast odnosno rast drva u debljinu. Primarni rast predstavlja rast drva u visinu. Godovi nastaju djelovanjem tankog sloja kambija koji može djelovati kontinuirano ili diskontinuirano. Kambij može djelovati tijekom listanja, nakon listanja, ili prije listanja ovisno o kojoj se vrsti drva radi. Diskontinuirano djelovanje kambija tipično je za umjereni zemljopisni pojas s pravilnom smjenom godišnjih doba. Kontinuirano djelovanje kambija uobičajeno je kod onih vrsta koje rastu u vlažnim tropskim klimama. Te vrste nemaju godove ili ako imaju oni nisu istovjetni godovima drva koja prevladavaju u kontinentalnoj klimi.



**Slika 2.3** Poprečni presjek kroz A-četinjače (*Pinus resinosa*) i B-listače (*Quercus rubra*) [8]

Na slici 2.3 vidi se razlika u godovima s obzirom kada je pojedini god nastao (početak vegetacijske sezone ili pak kasnije) pa se tako razlikuje, rani dio (rano drvo) i kasni dio goda (kasno drvo). Godovi se razlikuju i po izražajnosti, mogu biti jače odnosno slabije izraženi. Razlikuju se i po boji, po širini te tijekom granične linije.

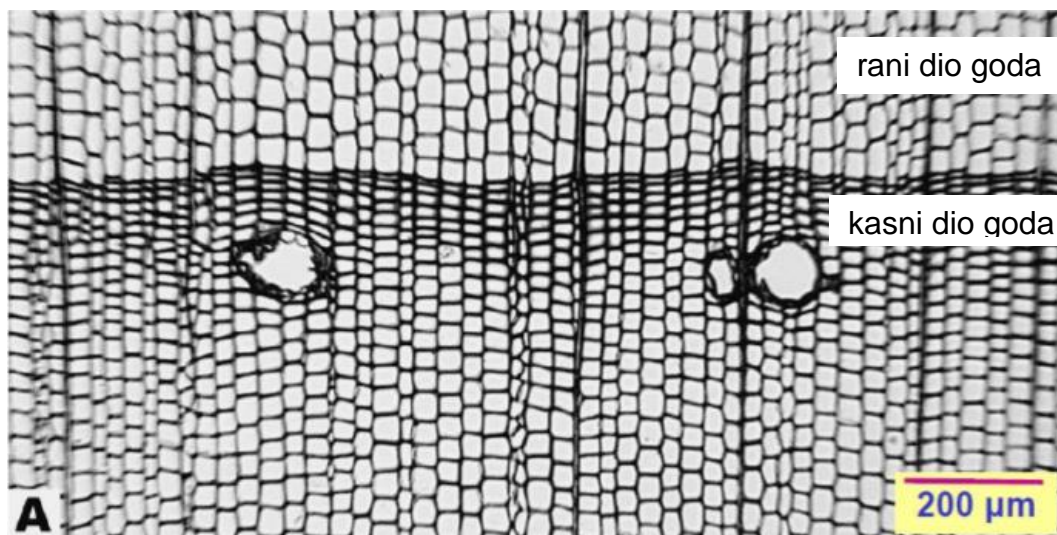
Kora predstavlja kompleksni heterogeni materijal. Njena formacija počinje diobom stanica kambija. Kora se sastoji od vanjskog i unutarnjeg sloja. Vanjska kora služi unutarnjoj kori i cijelom deblu kao zaštita od isušivanja. Ispod nje se nalazi unutarnja kora kojom se transportiraju produkti fotosinteze od listova do ostalih struktura. Tanki se sloj vaskularnog kambija nalazi između drvnog tkiva i unutarnje kore. Iz tog kambija raste prema unutra novi sloj koji se naziva sekundarni ksilem, a prema van dolazi do stvaranja novog sloja sekundarnog floema odnosno unutarnje kore. [1, 9]

## 2.3. Mikrostruktura drva

### 2.3.1. Mikrostruktura četinjača

Mikrostrukture četinjača znatno je jednostavnija nego mikrostruktura listača. Sastoji se od traheida aksijalno (vertikalno) usmjerenih i parenhimnih stanica koje se nalaze u drvnim trcima i usmjerene su radijalno, od srčike prema kori.

Traheide predstavljaju izdužene stanice s duljinom i širinom u odnosu 100:1. Njihov volumni udio u drvu četinjača je iznad 90 %, a služe za provođenje ili kondukciju vodu te pružaju mehaničku potporu. Njihova je mikrostruktura u poprečnom presjeku prikaza na slici 2.4. [1, 5]



Slika 2.4 Poprečni presjek drva četinjače (*Picea glauca*) [8]

Traheide ranog te traheide kasnog dijela goda imaju različitu debljinu stijenke te veličinu lumena. Traheide ranog dijela goda imaju tanju staničnu stijenku te povećan

lumen u odnosu na kasni dio goda. Prvi dio godine biljka ima dosta vode koju je potrebno provesti iz korijena do viših dijelova drva stoga stanice u ranom dijelu goda imaju veći lumen i tanju stijenku. Kroz godinu dostupna voda se smanjuje te stanice imaju manji lumen i deblju stijenku. Takve su stanice čvršće i više doprinose mehaničkoj stabilnosti drva nego što je to slučaj kod ranog dijela goda.

Kod nekih vrsta (smreka, ariš) prisutni su i smolni kanali koji mogu biti aksijalno i radijalno usmjereni. Čine ih šupljine koje su okružene parenhimskim stanicama za proizvodnju smole. Kod nekih vrsta mogu se vidjeti golim okom dok su kod ostalih vrsta puno sitniji. Neke vrste drva mogu imati velike klastere smolnih kanala koji su reakcija na nekakva mehanička oštećenja ili na neke bolesti.

Građu drvnih traka čine parenhimske stanice. Drvni traci su usmjereni radijalno od srčike prema kori debla. Prizmatičnog su oblika s visinom oko 15  $\mu\text{m}$ , širine 10  $\mu\text{m}$  te duljine od 150 do 250  $\mu\text{m}$ . Primarna im je uloga sinteza i skladištenje te lateralni transport biokemijskih tvari i vode. [1, 8, 10]

### **2.3.2. Mikrostruktura listača**

Za razliku od četinjača građa listača je znatno složenija. Uzdužni odnosno aksijalni sustav sačinjavaju vlaknasti elementi (drvena vlakanca), traheje (pore) te traheide različitog rasporeda i veličina. Svojom veličinom, rasporedom i oblikom utječu na fizikalna, preradbena, mehanička i druga svojstva. Radijalni je sustav također kompleksan. Njegovu građu čine parenhimske stanice koje se razlikuju ponajprije u obliku i veličini, ali i u drugim svojstvima.

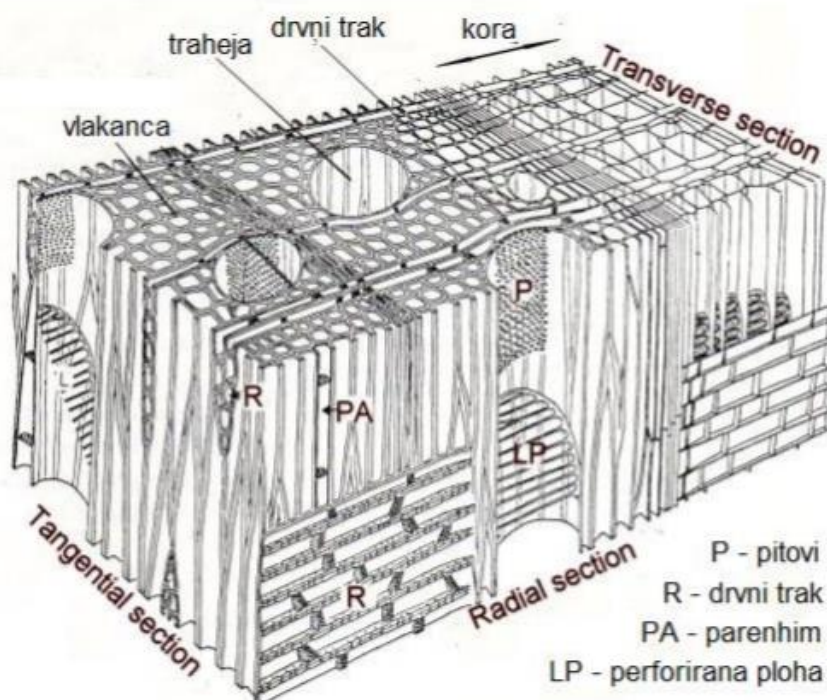
Traheje odnosno pore predstavljaju strukturne elemente po kojima se listače jasno razlikuju od četinjača. One su provodne stanice koje se nižu u uzdužnom smjeru i tako čine provodne kanale sposobne provesti velike količine vode iz korijena u ostatak stabla. Presjek pora iznosi između 50 i 200  $\mu\text{m}$ , a može biti i veći. Duljina im iznosi od 100 do 1200  $\mu\text{m}$  i puno su kraće od traheida.

Drvena su vlakanca stanice izduženog oblika i debele stanične stijenke te uskog lumena. Njihova je uloga mehanička podrška, a gustoća i čvrstoća ovise o debljini stijenke za svaku pojedinu vrstu. Vrste s vlakancima tanke stijenke i velikog lumena (topola, lipa) imaju nižu gustoću i čvrstoću za razliku od vrsta čija vlakanca imaju debelu stijenku i mali lumen (bukva, jasen) te samim time veću gustoću i čvrstoću.

Imaju manju duljinu od traheida kod četinjača, a dva do deset puta su dulja od traheja. Mikrostruktura listača je prikazana na slici 2.5.

Parenhimske su stanice tanje stjenke i velikog lumena. Imaju istu građu i funkciju kao i kod četinjača, ali se puno češće pojavljuju kod listača.

Drvni se traci kod listača pojavljuju u znatno više oblika nego je to slučaj kod četinjača. Većina ih je širine između 1 i 5 stanica, a mogu biti i puno širi. Visine su uglavnom do 1 mm. [1, 7, 10]



Slika 2.5 Mikrostruktura drva listača [10]

#### 2.4. Kemijski sastav drva

Na molekularnoj razini za drvo se može reći kako je to biopolimerni kompozit. Čine ga umreženi lanci celuloze, hemiceluloze i lignina te vrlo mala količina ekstrativa i nekih anorganskih tvari. Uz hemicelulozu i celulozu, u tragovima se mogu naći i škrob te pektin. Suha drvna tvar sačinjena je od ugljika (50 %), kisika (44 %), vodika (6 %) i anorganskih tvari u tragovima.

Celuloza spada u ugljikohidratne polimere i ona je najrasprostranjeniji polisaharid na svijetu. Stupanj polimerizacije kod celuloze može biti i do 15 tisuća, a uglavnom je

oko 9 do 10 tisuća što odgovara duljini od 5  $\mu\text{m}$ . Netopiva je u lužinama i većini otapala, a otapa se u jakim kiselinama.

Hemiceluloza je razgranati ugljikohidratni polimer, ali ima znatno manji stupanj polimerizacije koji iznosi između 100 i 200. Lako se otapa u lužinama.

Lignin je trodimenzionalni polimer izgrađen od fenilpropanskih jedinica. Njegova je osnovna uloga održavanje stabilnosti stanične stijenke i povećanje krutosti.

### 3. SVOJSTVA DRVA

#### 3.1. Voda u drvu

Voda u živom drvu pomaže drvo održati elastičnim i tako sprječava oštećenja zbog vanjskih naprezanja uslijed udara vjetra ili sličnih naprezanja. Tehničko se drvo koristi u suhom stanju. Higroskopan je materijal i lako prima vlagu iz zraka. Promjenom vlage mijenjaju se i svojstva drva kao što su dimenzije, toplinska i mehanička svojstva. Ovisno o količini vlage, postoje provelo, zrakosuho drvo, sobosuho i standardno suho drvo. Sadržaj vlage nikada ne može biti jednak nuli, a vlaga u drvu može biti slobodna i vezana. U lumenu je slobodna, a vezana se vlaga nalazi u staničnoj stijenci. Sadržaj vlage ovisi o vrsti drva i gustoći drva.

Gustoća se računa iz omjera mase i volumena te što je masa veća na isti volumen gustoća će biti veća, a računa se po formuli:

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

gdje je:

$\rho$  - gustoća,  $\text{g/cm}^3$

$m$  – masa uzorka, g

$V$  – volumen uzorka,  $\text{cm}^3$

Standardni sadržaj vlage dobiva se iz sljedećeg izraza:

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

gdje je:

$w$  – sadržaj vlage u drvu, %

$m_1$  – masa drva nekog sadržaja vlage, g

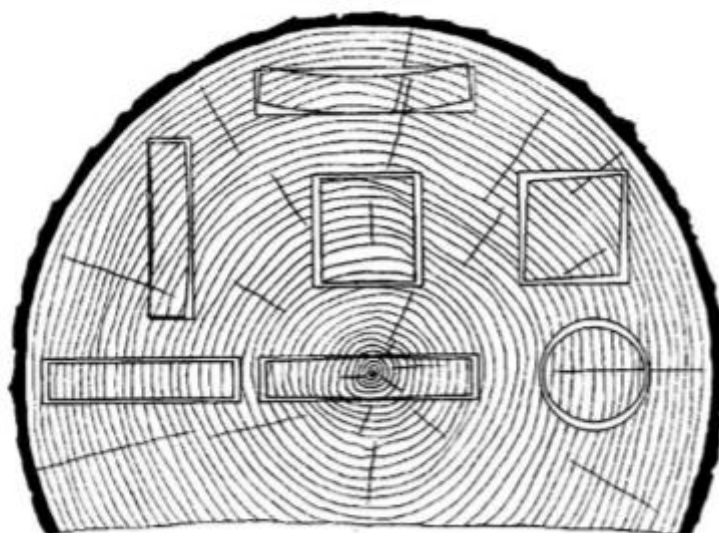
$m_2$  – masa drva u apsolutno suhom stanju, g

Tehnički sadržaj vlage može se dobiti sljedećim izrazom:

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

gdje su  $m_1$  i  $m_2$  isti iz prethodnog izraza.

Sušenjem i smanjenjem postotka vlage ne dolazi do promjene volumena dok se ne postigne točka zasićenja vlakanaca odnosno stanje zasićenosti žice. Ta točka predstavlja granicu slobodne i vezane vode, a definirana je kao sadržaj vlage unutar stanične stijenke pri kojem nema slobodne vode u lumenu dok je stanična stijenka zasićena vodom. Ispod te točke dolazi do utezanja drva odnosno smanjenja volumena. S obzirom na anizotropnost drva to utezanje neće biti isto za tri osnovna smjera. Do najmanjeg utezanja dolazi u longitudinalnom smjeru, a najveće utezanje se javlja u tangencijalnom smjeru. Na slici 3.1 vidi se poprečni presjek i do kojih promjena oblika te dimenzija dolazi kod sušenja ispod točke zasićenja vlakanaca.



**Slika 3.1 Utezanje i distorzija drva pri sušenju [8]**

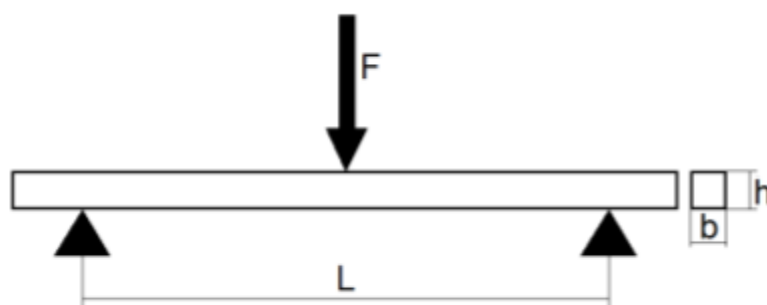
Zbog svoje higroskopnosti drvo lako upija vlagu, ako ga se stavi u vodu ili izloži vlažnom zraku. Time dolazi do porasta volumena i ta se pojava naziva bubrenjem drva. To svojstvo ograničava upotrebu tehničkog drva u raznim područjima. [1, 5, 11]

### **3.2. Mehanička svojstva**

Poznavanje mehaničkih svojstava izrazito je bitno kako prilikom eksploatacije ne bi došlo do katastrofe. Drvo je prirodan materijal i shodno tome njegova svojstva jako variraju ovisno o vrsti drva, a i unutar iste vrste moguće su velike razlike u svojstvima. S obzirom na anizotropnost drvo ima jedinstvena svojstva u sva tri smjera - longitudinalnom, tangencijalnom i radijalnom. [1, 9]

### 3.2.1. Modul elastičnosti (E)

Modul elastičnosti jedno je od najvažnijih mehaničkih svojstava drva, ujedno i najčešće određivano svojstvo. Predstavlja otpor materijala prema elastičnoj deformaciji. Ovisi o građi materijala odnosno vezama između atoma te o temperaturi, sadržaju vlage, načinu opterećenja i dr. Bitno je uzeti u obzir i usmjerenost mikrostrukture. Tako su vrijednosti modula elastičnosti 10 do 20 puta veće u longitudinalnom smjeru nego u radijalnom ili tangencijalnom. Modul elastičnosti drastično varira između vrsta pa čak i unutar iste vrste drva. Određivanje modula elastičnosti propisano je normama, a u praksi se najčešće određuje savojni modul metodom u tri točke što je vidljivo iz slike 3.2.



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

Modul elastičnosti izračunava se iz sljedećeg izraza:

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

gdje je:

$L$  – razmak između oslonaca, mm

$b$  – širina uzorka, mm

$h$  – visina uzorka, mm

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

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

$F_{\max}$  – maksimalna sila, N



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

### 3.2.2. Čvrstoća drva

Čvrstoća drva predstavlja otpor drva prema sili koja na njega djeluje stlačivanjem, savijanjem, razvlačenjem ili slamanjem. Predstavlja iznimno bitno svojstvo drva jer određuje uporabne mogućnosti drva. Postoji više vrsta čvrstoća, a to su vlačna, tlačna, smična i savojna.

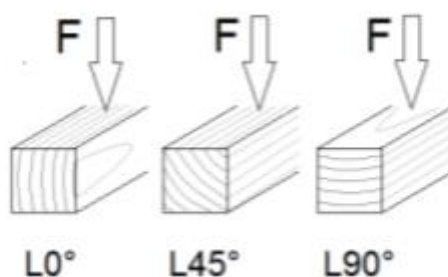
Savojna se čvrstoća određuje uglavnom metodom u tri točke, ali ima i drugih metoda. Savojna se čvrstoća uz tlačnu i smičnu najčešće određuje. Norma propisuje detalje ispitivanja čvrstoće kao na primjer prirast sile u vremenu, dimenzije uzorka i sl. Savojna čvrstoća određuje se iz jednadžbe:

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

$F_{max}$ ,  $L$ ,  $b$  i  $h$  su isti kao u jednadžbi (3.4).

I za savojnu čvrstoću vrijedi da jako ovisi o usmjerenosti strukture pa je tako njena vrijednost najveća u uzdužnom (longitudinalnom) smjeru. Neke vrste drva imaju različitu savojnu čvrstoću u longitudinalnom smjeru ovisno o kutu koji zatvaraju tangenta na god i savojna sila.

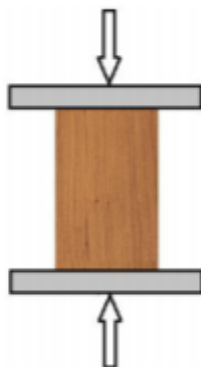
Savojna se čvrstoća određuje najčešće za tri karakteristična kuta vidljiva na slici 3.3.



**Slika 3.3 Položaj godova u odnosu na smjer savojne sile [1]**

Tlačna čvrstoća predstavlja maksimalnu vrijednost naprezanja koju materijal može izdržati prilikom djelovanja tlačnog naprezanja.

Shematski prikaz tlačne čvrstoće je prikazan na slici 3.4.



**Slika 3.4 Shematski prikaz ispitivanja tlačne čvrstoće [1]**

Kao i ostale vrste čvrstoće tako i tlačna najviše ovisi o tome kako tlačna sila djeluje s obzirom na smjer vlaknaca (paralelno ili okomito). Ako sila djeluje paralelno čvrstoća je veća od 3 do 10 puta nego što je to slučaj kada djeluje okomito.

Vlačna se čvrstoća određuje kao omjer maksimalne sile i poprečnog presjeka ispitivanog uzorka i računa se sljedećim izrazom:

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

pri čemu su:

$F_{max}$  – maksimalna sila, N

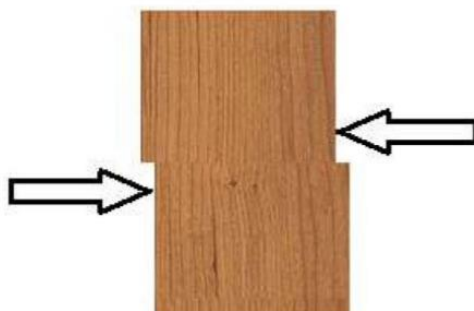
$A$  – dimenzije početne površine,  $\text{mm}^2$

U praksi se često koristi i smična čvrstoća. Eksperimentalno je dokazano da smična čvrstoća iznosi 6 do 10 % vrijednosti vlačne čvrstoće.

Vlačna čvrstoća znatno opada s nepravilnostima strukture kao što su kvрге. Do pucanja drvenih konstrukcija najčešće dolazi uslijed cijepanja i smicanja.

Smična čvrstoća predstavlja maksimalnu vrijednost naprezanja koju materijal može izdržati prilikom djelovanja naprezanja na smik (odrez).

Na slici 3.5 vidi se način djelovanja smičnog naprezanja.



Slika 3.5 Shematski prikaz smičnog naprezanja [1]

Površina smicanja prilikom određivanja smične čvrstoće može biti uzdužna, poprečna ili dijagonalna. S obzirom na površinu na kojoj djeluje naprezanje sile mogu djelovati okomito na vlakanca ili u smjeru vlakanaca. Vrijednosti smične čvrstoće u poprečnoj površini će se razlikovati ovisno o smjeru djelovanja sile u odnosu na godove (paralelno ili okomito na godove). Smična čvrstoća drva ovisi i o samoj vrsti drva. Izraz za smičnu čvrstoću je;

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

pri čemu su:

$F_{max}$  – maksimalna sila, N

$b, l$  – dimenzije smicajne površine, mm

### 3.3. Žilavost

Žilavost je mehaničko svojstvo koje određuje ponašanje materijala u uvjetima udarnog opterećenja. Određuje se na Charpyjevu batu, a izračunava po formuli:

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

pri čemu su:

$G$  – težina bata, N

$h_1$  – početna visina bata, m

$h_2$  – visina bata nakon loma epruvete, m

Žilavost također značajno ovisi o usmjerenosti strukture i najbolja se žilavost postiže kada bat pada u radijalnom smjeru, a najmanja se vrijednost postiže padom bata tangencijalno na godove. Pad žilavosti se događa i uslijed degradiranosti mikrostrukture drva. [1, 12]

### 3.4. Tvrdća drva

Tvrdoća je jedno od osnovnih mehaničkih svojstava koja se moraju poznavati kako bi se materijalu odredila uporabna svojstva. Tvrdoća je otpornost materijala na prodiranje drugog tvrdog tijela u njegovu površinu odnosno strukturu. I tvrdoća se određuje u tri karakteristična smjera (radijalni, tangencijalni te poprečni smjer). [1]

Tablica 3.1 prikazuje vrijednosti tvrdoće za različite vrste drva.

**Tablica 3.1 Tvrdoće različitih vrsta drva [1]**

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

Postoji više metoda za mjerenje tvrdoće, a dvije najčešće korištene su metoda po Janki i Brinellova metoda.

Metodu po Janki osmislio je znanstvenik Gabriel Janka 1906. godine, a 1927. je standardizirana. Provodi se po normi ASTM D 1037-12 [13]. Uzorak za mjerenje je veličine 50×50×30 mm. Tvrdoća se mjeri utiskivanjem čelične kuglice promjera 11,28 mm u dubinu od 5,64 mm odnosno pola promjera kuglice. Brzina utiskivanja je

konstantna i u intervalu je od 0,05 do 0,1 mm/s. Direktna poveznica s tvrdoćom je sila utiskivanja, a formula za određivanje tvrdoće glasi:

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

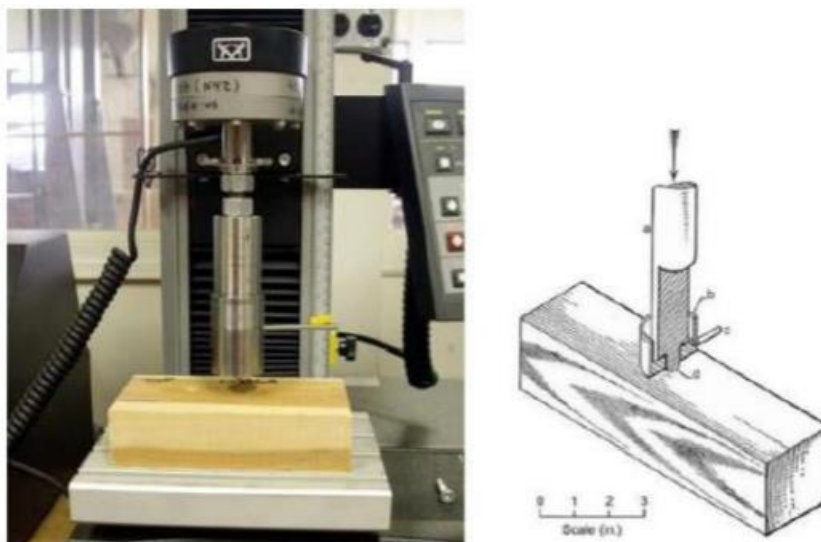
pri čemu su:

$H_J$  – tvrdoća po Janki, N

$K$  – koeficijent ovisan o dubini prodora kuglice

$F$  – sila utiskivanja, N

Slika 3.6 prikazuje uređaj za mjerenje tvrdoće metodom po Janki. [14]



**Slika 3.6 Uređaj za ispitivanje tvrdoće drva metodom po Janki [1]**

Druga značajna metoda jest Brinellova metoda određivanje tvrdoće. Opisuje ju norma HRN EN 1534:2010 [15]. Kuglica od kaljenog čelika se utiskuje u materijal. Uobičajeni promjer kuglice je od 1 do 10 mm. Sila utiskivanja je oko 500 N ili 1000 N. Tvrdoća se izračunava pomoću promjera baze kalote ( $d$ ) nakon rasterećenja. Za određivanje promjera koristi se mjerno povećalo, a dobivene vrijednosti se uvrštavaju u sljedeći izraz:

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

gdje su:

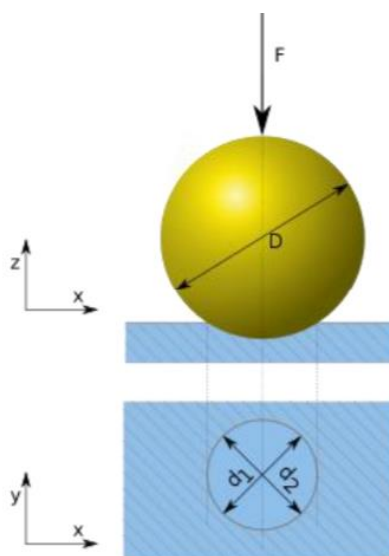
$F$  – Sila, N

$D$  – promjer kuglice, mm

$d$  – promjer baze kuglice kalote (otiska), mm

Problem Brinellove metode je mali otisak penetratora te zbog toga nije jednostavno izmjeriti promjer otiska. Prisutno je i veliko rasipanje rezultata zbog heterogenosti strukture.

Slika 3.7 prikazuje mjerenje tvrdoće korištenjem Brinellove metode. [1, 16, 17]



**Slika 3.7 Mjerenje tvrdoće Brinellovom metodom [16]**

Zbog velikog rasipanja nužno je rezultate obraditi statistički. Statističkom se obradom provjerava jesu li rezultati mjerenja unutar normama zadanih granica.

Standard ISO 13061 [18] opisuje dobivanje aritmetičke sredine ili srednje vrijednosti zbrajanjem vrijednosti rezultata i dijeljenjem zbroja s ukupnim brojem mjerenja. Izraz za srednju vrijednost je sljedeći.

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

gdje je:

$\bar{x}$  - aritmetička sredina vrijednosti tvrdoće

$x_i$  – pojedinačne vrijednosti tvrdoće

$n$  – broj mjerenja

Nakon izračuna srednje vrijednosti određuje se standardna devijacija po sljedećoj formuli:

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

gdje su  $n$ ,  $x_i$  i  $\bar{x}$  isti kao u prethodnom izrazu.

Koeficijent varijacije računa se prema izrazu:

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

pri čemu su:

$C_v$  – koeficijent varijacije

$s$  – standardna devijacija

$\bar{x}$  - aritmetička sredina

Koeficijent varijacije ne smije biti preko 17% prema spomenutom standardu, ali neki literaturni navodi dopuštaju do 20 %. [19, 20]

Standardna se devijacija aritmetičkih sredina dobiva iz sljedećeg izraza:

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

pri čemu su:

$s_{\bar{x}}$  - standardna devijacija aritmetičkih sredina

$n$  – broj mjerenja

$s$  – standardna devijacija

Indeks preciznosti izračunava se prema sljedećem izrazu:

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

pri čemu su:

$p$  – indeks preciznosti

$s_{\bar{x}}$  - standardna devijacija aritmetičkih sredina

$\bar{x}$  - aritmetička sredina

## 4. EKSPERIMENTALNI DIO

### 4.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja

Cilj ovog završnog rada je istražiti kako orijentacija drvnih stanica utječe na tvrdoću drva sibirskog ariša (*Larix sibirica*). Kao i ostala svojstva tako i tvrdoća drva varira ovisno o tome u kojem su smjeru orijentirane drvene stanice (traheide).

Zbog iznimno heterogene građe drva i velikog utjecaja ranog i kasnog dijela goda neizbježno je veliko rasipanje rezultata pa je potrebno napraviti veći broj mjerenja. Za mjerenje tvrdoće korištena je metoda ispitivanja tvrdoće po Brinellu, a kut između smjera izduženih traheida i sile utiskivanja je u rasponu od 0° do 90°, odnosno površina na kojoj se mjeri tvrdoća postupno se zakreće od poprečnog do tangencijalnog presjeka te od poprečnog do radijalnog presjeka, u sekvencama od po 15°.

U okviru predviđenog ispitivanja napravljeno je sljedeće:

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

### 4.2. Materijal za ispitivanje

Iz velikog komada sibirskog ariša, predočenog na slici 4.1, izrezani su uzorci za ispitivanje u obliku kvadra dimenzija 50×50×25 mm. Uzorci su izrezani tako da prate uzdužnu os debla kako bi se maksimalno izbjegle razlike u širini godova te gustoći među uzorcima. Za izrezivanje uzoraka korištena je tračna pila u Laboratoriju za alatne strojeve, vidljiva na slici 4.2. Ukupno je izrezano 7 uzoraka za mjerenje promjene tvrdoće iz poprečnog u tangencijalni presjek i 7 uzoraka za mjerenje promjene tvrdoće iz poprečnog u radijalni presjek. Površina prvog uzorka oznake 0° poklapa se s poprečnim presjekom, a površina zadnjih uzoraka s oznakama 90°R i 90°T poklapa se s tangencijalnim odnosno radijalnim presjekom. Na svakom uzorku napravljeno je po 10 mjerenja, na površinama dimenzija 50×50 mm. Shematski prikaz pozicija za mjerenje tvrdoće vidljiv je na slici 4.3.



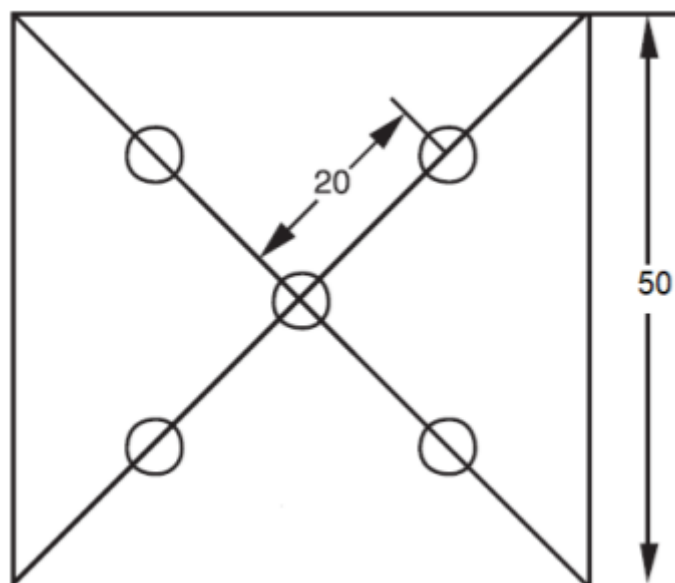
Uzorci su pažljivo pregledani kako bi se izbjegle moguće nepravilnosti koje bi utjecale na tijek i rezultate mjerenja.



**Slika 4.1 Sibirski ariš**



**Slika 4.2 Tračna pila**



**Slika 4.3** Shematski prikaz pozicija za mjerenje tvrdoće na uzorcima

Na slikama od 4.4 do 4.10 vidi se promjena kuta goda u tangencijalnoj ravnini od  $0^\circ$  do  $90^\circ$  na uzorcima za mjerenje tvrdoće iz poprečnog prema radijalnom presjeku.



**Slika 4.4** Uzorak s oznakom  $0^\circ R$



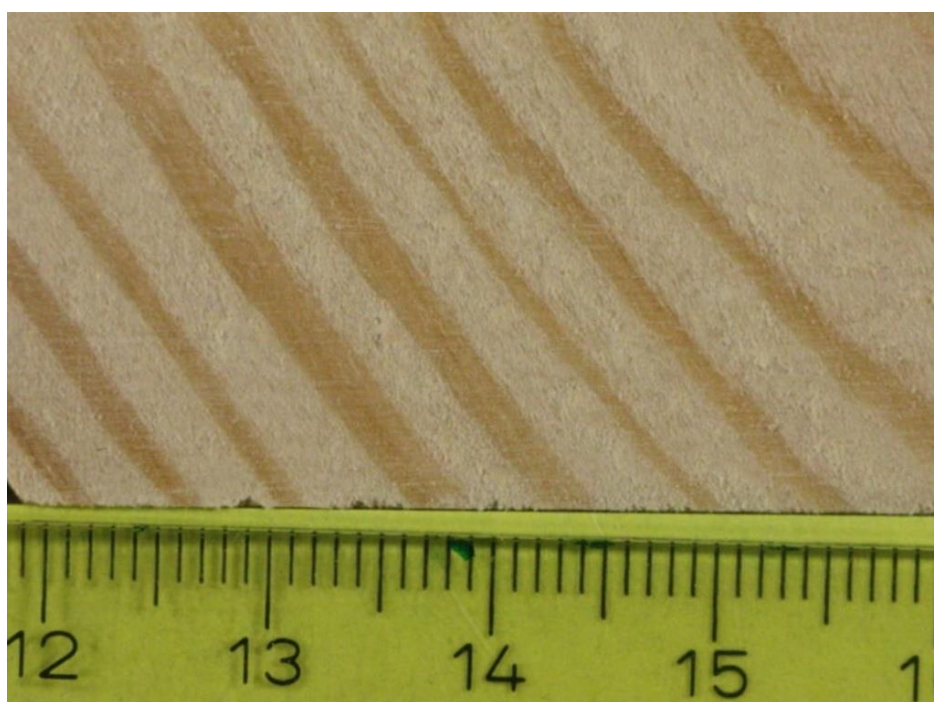
**Slika 4.5** Uzorak s oznakom 15°R



**Slika 4.6** Uzorak s oznakom 30°R



**Slika 4.7 Uzorak s oznakom 45°R**



**Slika 4.8 Uzorak s oznakom 60°R**



Slika 4.9 Uzorak s oznakom 75°R



Slika 4.10 Uzorak s oznakom 90°R

### 4.3. Mjerenje tvrdoće

Tvrdoća uzoraka izmjerena je u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Ispitni uređaj marke VEB WPM HP 250 prikazan je na slici 4.11. Korištena je Brinellova metoda. Parametri koji su korišteni za ispitivanje tvrdoće su sljedeći:

promjer čelične kuglice – 5 mm

sila utiskivanja – 490,5 N.

Maksimalna vrijednost sile postiže se unutar  $15 \pm 3$  sekunde dok je djelovanje maksimalnog opterećenja trajalo 30 sekundi. Kako bi očitavanje promjera otiska bilo preciznije između čelične kuglice i površine uzorka stavlja se indigo papir koji nema utjecaj na rezultate. Promjer otiska se očitava uređajem za precizno mjerenje, prikazanom na slici 4.12.

Slika 4.13 prikazuje jedan od ispitnih uzoraka na kojem se vide otisci mjerenja tvrdoće.



Slika 4.11 Tvrdomjer VEB WPM HP 250



Slika 4.12 Uređaj za precizno mjerenje promjera otiska



Slika 4.13 Otisci mjerenja tvrdoće

### 4.3.1. Rezultati mjerenja tvrdoće

Tablica 4.1 prikazuje rezultate dobivene mjerenjem tvrdoće Brinellovom metodom za promjenu iz poprečnog u radijalni presjek, a tablica 4.2 rezultate za promjenu iz poprečnog u tangencijalni presjek.

**Tablica 4.1 Rezultati mjerenja tvrdoće za promjenu iz poprečnog u radijalni presjek**

Uzorak	Tvrdoća HB										
	mjerenje										$\bar{x}$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0°R	53,9	53,9	53,9	50,2	58,0	46,8	53,9	58,0	43,7	46,8	51,9
15°R	46,8	53,9	50,2	40,8	46,8	53,9	58	50,2	50,2	46,8	49,8
30°R	46,8	35,7	43,7	40,8	43,7	38,2	43,7	50,2	46,8	43,7	43,3
45°R	40,8	50,2	46,8	43,7	31,2	40,8	38,1	40,8	38,2	43,7	41,4
60°R	50,2	35,7	31,2	35,7	31,2	31,2	33,4	31,2	35,7	31,2	34,7
75°R	38,2	38,9	40,8	31,2	31,2	35,7	35,7	23,8	29,7	35,5	34,1
90°R	33,4	31,2	27,3	25,5	35,7	35,7	25,5	38,2	31,2	38,2	32,2

**Tablica 4.2 Rezultati mjerenja tvrdoće za promjenu iz poprečnog u tangencijalni presjek**

Uzorak	Tvrdoća HB										
	mjerenje										$\bar{x}$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0°T	53,9	53,9	53,9	50,2	58,0	46,8	53,9	58,0	43,7	46,8	51,9
15°T	46,8	43,7	46,8	43,7	38,2	46,8	31,2	43,7	46,8	53,9	44,2
30°T	43,7	38,2	33,4	38,2	33,4	38,2	43,7	43,7	43,7	43,7	40,0
45°T	43,7	40,8	33,4	31,2	31,2	38,2	46,8	29,2	38,2	38,2	37,1
60°T	31,2	43,7	25,5	38,2	27,3	35,7	35,7	31,2	43,7	43,7	35,6
75°T	31,2	43,7	46,8	31,2	27,3	31,2	31,2	35,7	35,7	27,3	34,1
90°T	31,2	35,7	31,2	35,7	35,7	31,2	35,7	31,2	25,5	31,2	32,4

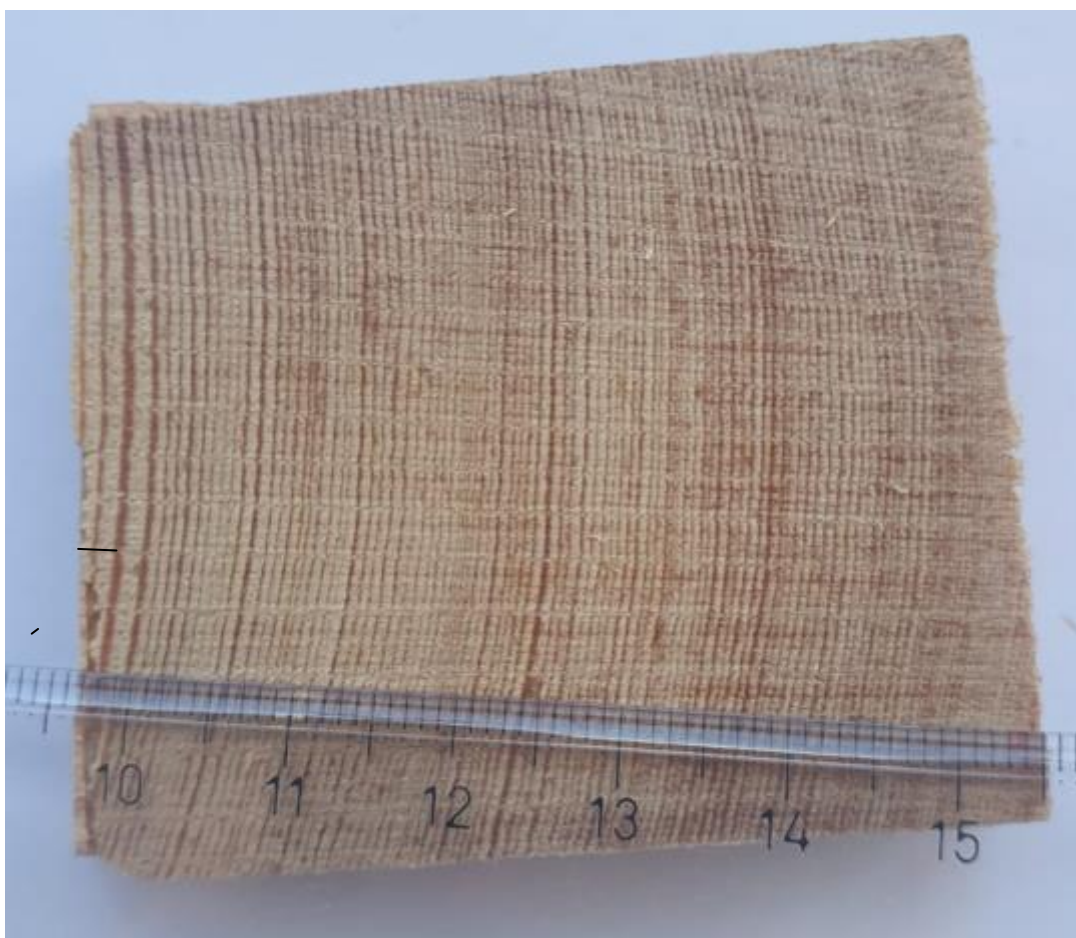


#### 4.4. Određivanje srednje širine goda i udjela kasnog dijela goda

Određivanje srednje širine goda i udjela kasnog dijela goda provedeno je na dijelu poprečnog presjeka iz kojeg su izrezani svi uzorci za mjerenje tvrdoće.

Za određivanje srednje širine goda na poprečnom presjeku izbrojani su godovi na duljini od 50 mm. Bilo ih je ukupno 87 pa je srednja širina goda 0,57 mm.

Na istom dijelu poprečnog presjeka izmjerena je i udio kasnog dijela goda i iznosio je 37 %.



Slika 4.14 Određivanje srednje širine goda i udjela kasnog dijela goda

#### 4.5. Mjerenje gustoće

Gustoća je određena prema normi ISO – 13061 – 2:2014 [21]. Gustoća je izmjerena na pet uzoraka, a iz dobivenih rezultata izračunata je srednja vrijednost.

Masa je izmjerena analitičkom vagom prikazanoj na slici 4.15. U tablici su prikazani rezultati mjerenja gustoće za svaki uzorak te aritmetička sredina svih pet gustoća.

**Tablica 4.3** Gustoće uzoraka

uzorak	dimenzije, mm	masa, g	gustoća, g/cm <sup>3</sup>	$\bar{x}$ , g/cm <sup>3</sup>
uzorak 1	47,76×49,56×24,65	38,4	0,658	0,657
uzorak 2	49,73×49,78×47,67	77,4	0,656	
uzorak 3	47,64×48,72×49,11	78,3	0,687	
uzorak 4	48,69×47,71×49,55	73,9	0,642	
uzorak 5	91,11×93,73×47,85	265,5	0,650	



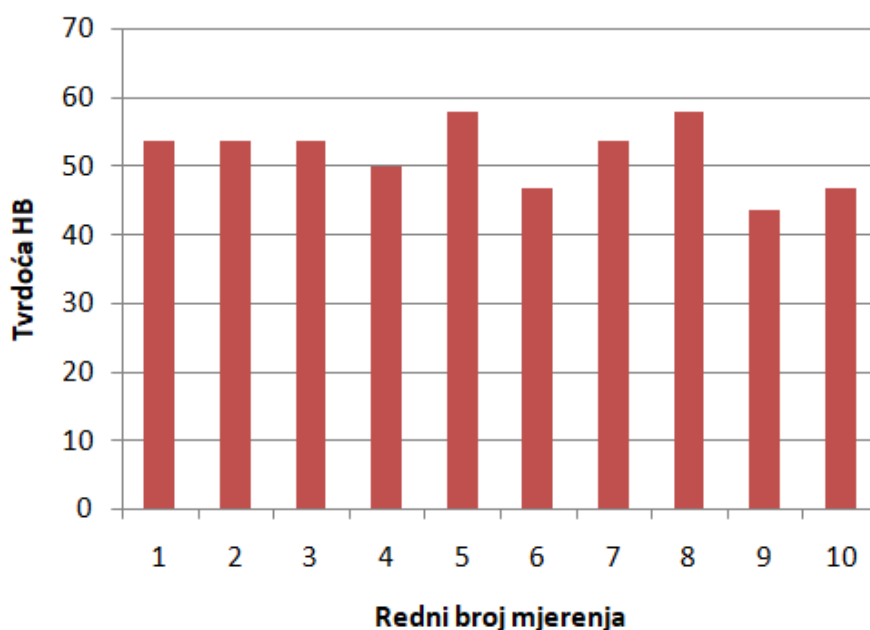
**Slika 4.15** Analitička vaga

## 5. ANALIZA REZULTATA

### 5.1. Promjena tvrdoće prelaskom iz poprečnog u tangencijalni presjek

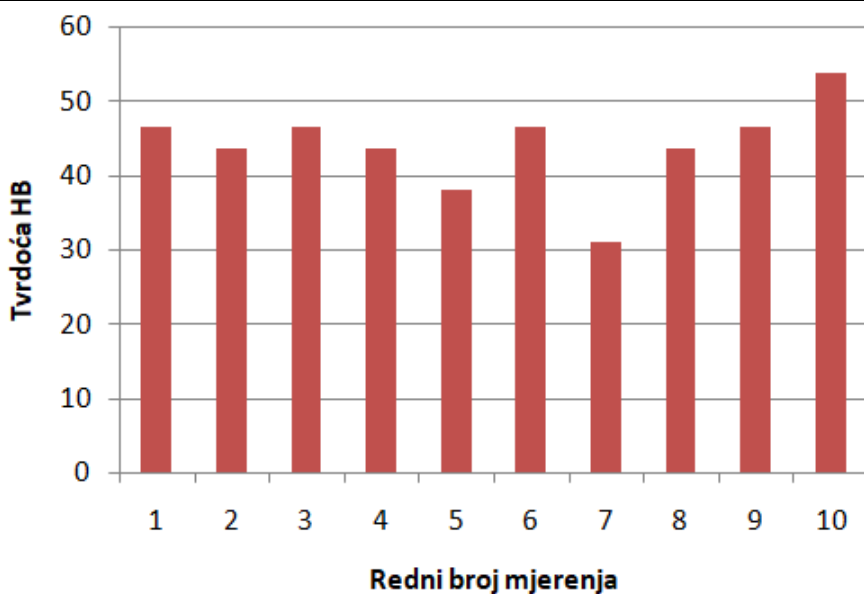
Na slikama od 5.1 do 5.7 prikazani su rezultati mjerenja tvrdoće za postupni prijelaz iz poprečnog u tangencijalni presjek. Na svakom se grafu vide pojedinačne tvrdoće za svako mjerenje. Na taj se način najbolje vidi koliko tvrdoća varira na istom uzorku. Rasipanje je prisutno kod svih uzoraka kako se i očekivalo zbog heterogene strukture drva.

Na uzorku oznake 0°T čija se površina poklapa s poprečnim presjekom ima najveću srednju vrijednost tvrdoće u iznosu od 51,9 HB. Maksimalna vrijednost tvrdoće iznosi 58,0 HB, a minimalna 46,8 HB, slika 5.1.



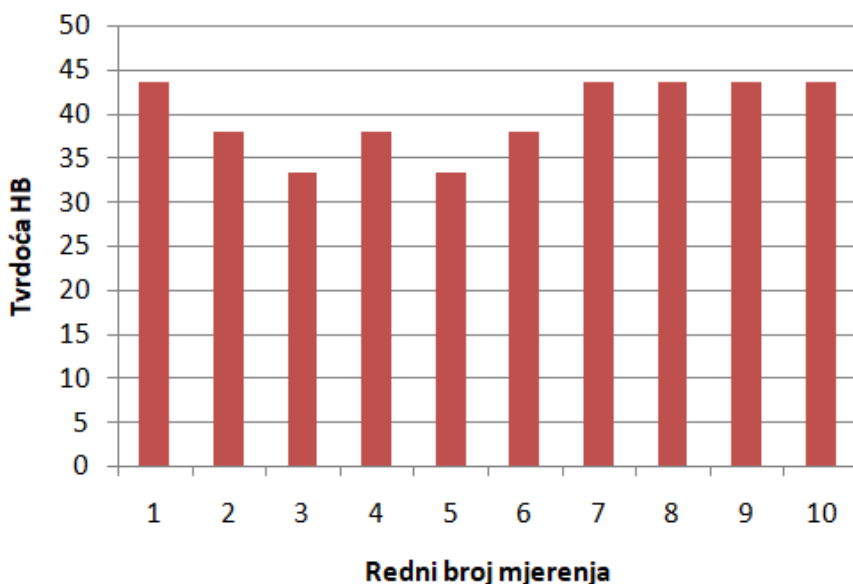
Slika 5.1 Rezultati mjerenja tvrdoće HB na uzorku oznake 0°T

Na uzorku oznake 15°T kod kojeg je mjerena površina zakrenuta za 15° prema tangencijalnom presjeku u odnosu na poprečni presjek, očitana je niža tvrdoća. Aritmetička vrijednost tvrdoće za ovaj uzorak iznosi 44,2 HB. Maksimalna vrijednost iznosi 53,9 HB, a minimalna 31,2 HB, slika 5.2.



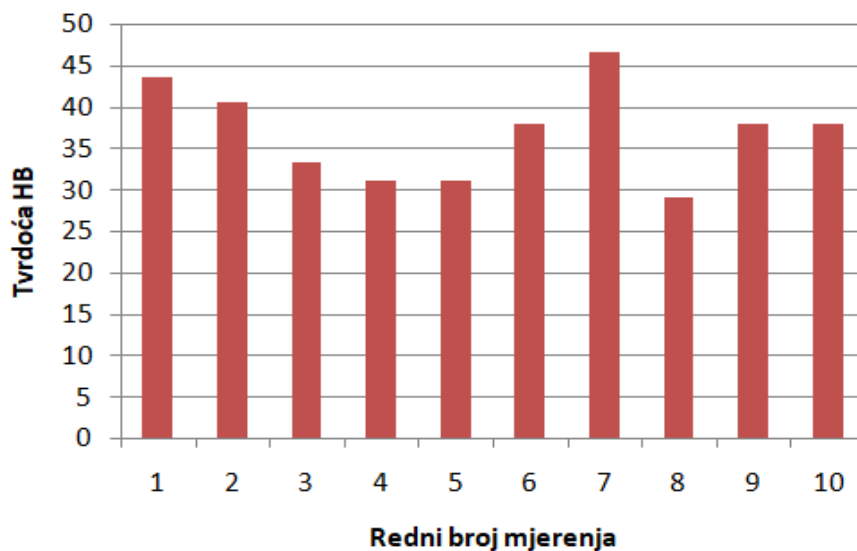
Slika 5.2 Rezultati mjerenja tvrdoće HB na uzorku oznake 15°T

Na uzorku oznake 30°T koji je dodatno zakrenut za 15° u odnosu na uzorak oznake 15°T odnosno 30° u odnosu na poprečni presjek vrijednosti tvrdoće su još niže pa tako aritmetička vrijednost tvrdoće iznosi 40,0 HB dok su maksimalna vrijednost 43,7 HB i minimalna 33,4 HB, slika 5.3.



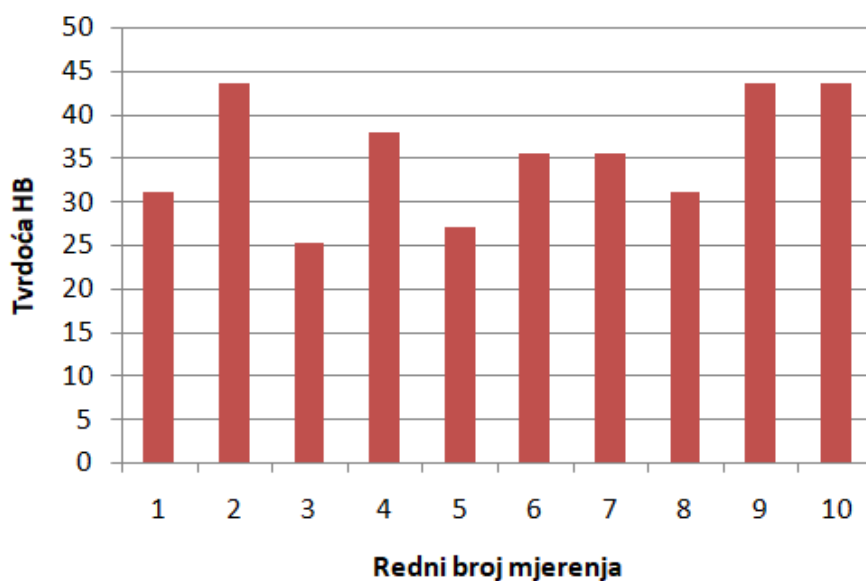
Slika 5.3 Rezultati mjerenja tvrdoće HB na uzorku oznake 30°T

Na uzorku oznake 45°T koji je zakrenut za 45° u odnosu na poprečni presjek i uzorak oznake 0°T tvrdoća se nastavlja snižavati. Srednja vrijednost tvrdoće kod ovog uzorka iznosi 37,1 HB, maksimalna 46,8 HB, a minimalna 29,2 HB, slika 5.4.



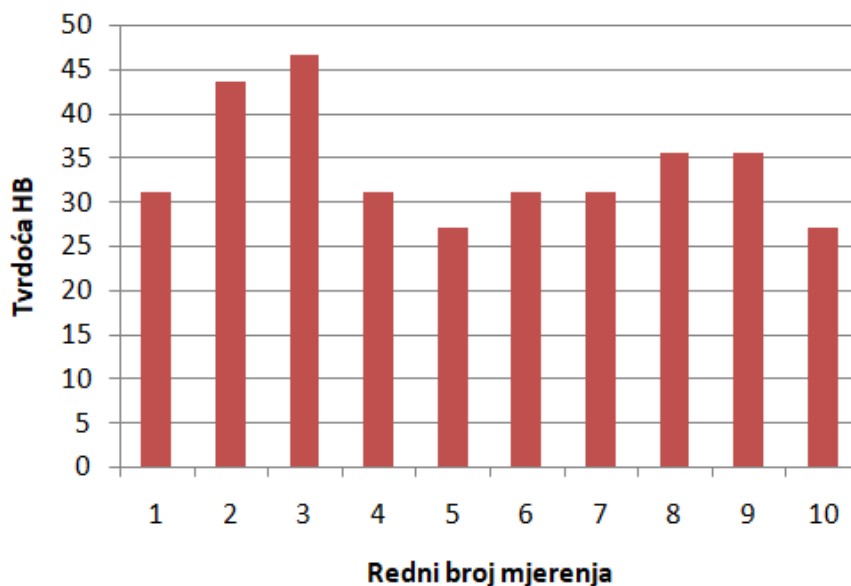
Slika 5.4 Rezultati mjerenja tvrdoće HB na uzorku oznake 45°T

Uzorak oznake 60°T zakrenut za dodatnih 15° u odnosu na prethodni uzorak ima još nižu prosječnu vrijednost tvrdoće i ona iznosi 35,6 HB. Maksimalna vrijednost tvrdoće iznosi 43,7 HB, a minimalna iznosi 25,5 HB, slika 5.5.



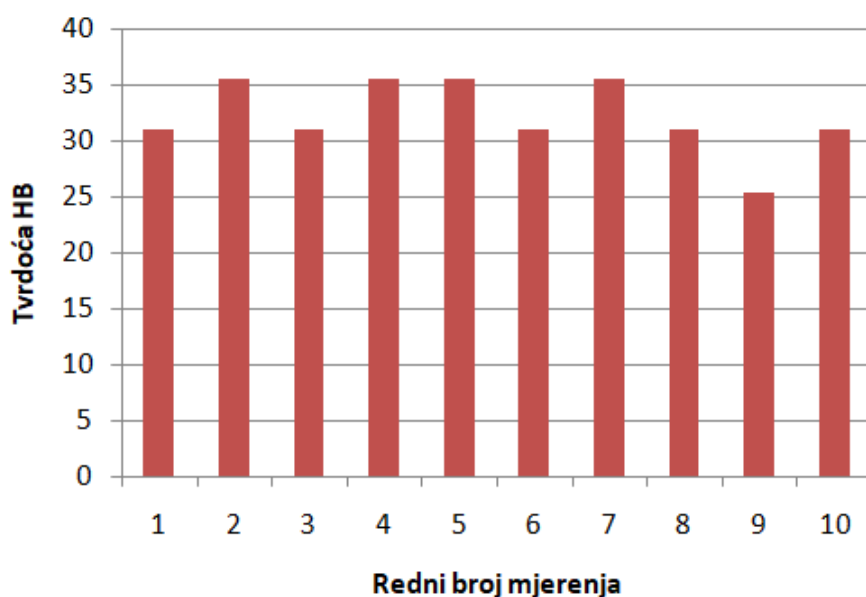
Slika 5.5 Rezultati mjerenja tvrdoće HB na uzorku oznake 60°T

Na uzorku oznake 75°T kod kojeg je mjerena površina zakrenuta za 75° u odnosu na poprečni presjek i uzorak oznake 0°T izmjerena je prosječna vrijednost tvrdoće od 34,1 HB što predstavlja dodatni pad u odnosu na prethodne uzorke. Maksimalna vrijednost iznosi 46,8 HB, a minimalna 27,3 HB, slika 5.6.



Slika 5.6 Rezultati mjerenja tvrdoće HB na uzorku oznake 75°T

Na uzorku oznake 90°T izmjerena je najmanja srednja vrijednost tvrdoće i ona iznosi 32,4 HB. Maksimalna vrijednost iznosi 35,7 HB, a minimalna 25,5 HB, slika 5.7.



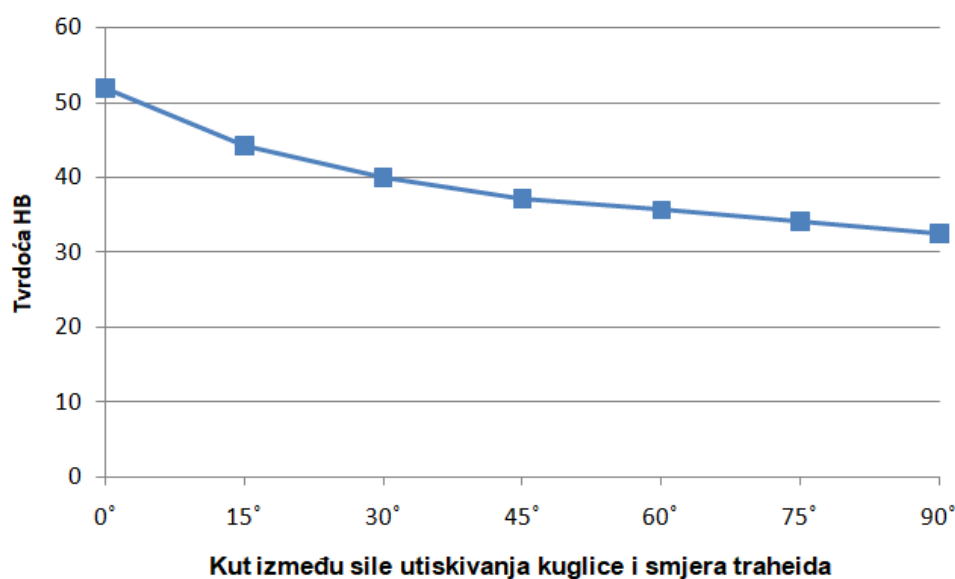
Slika 5.7 Rezultati mjerenja tvrdoće HB na uzorku oznake 90°T

Statistička analiza prethodnih podataka prikazana je u tablici 5.1. S obzirom na heterogenost strukture koeficijent varijacije je nešto veći, ali i dalje unutar dopuštenih granica (do 20 %). Interval pouzdanosti iznosi 95 %. Za još preciznije rezultate mjerenje tvrdoće trebalo bi povećati broj mjerenja.

**Tablica 5.1 Rezultati statističke analize vrijednosti tvrdoće HB**

Uzorak	Aritmetička sredina	Standardna devijacija	Standardna devijacija aritmetičkih sredina	Koeficijent varijacije %	Indeks preciznosti %
0°T	51,9	4,86	1,54	9,36	5,92
15°T	44,2	6,03	1,91	13,65	8,63
30°T	40,0	4,29	1,36	10,72	6,78
45°T	37,1	5,78	1,83	15,58	9,86
60°T	35,6	6,78	2,14	19,04	12,04
75°T	34,1	6,54	2,07	19,16	12,11
90°T	32,4	3,31	1,05	10,19	6,45

Na slici 5.8 prikazana je ovisnost tvrdoće HB o kutu između smjera sile utiskivanja pri mjerenju tvrdoće i smjera traheida. Jasno se vidi da tvrdoća ovisi o navedenom kutu, a njezina se vrijednost smanjuje postupnim prelaskom iz poprečnog u tangencijalni presjek.



**Slika 5.8 Ovisnost tvrdoće o promjeni kuta između smjera sile utiskivanja kuglice i smjera traheida (iz poprečnog u tangencijalni presjek)**

Dobivene vrijednosti tvrdoće uvrštene su u Hankinsonovu formulu:

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

pri čemu su:

$HB_0$  – vrijednost tvrdoće uzorka oznake  $0^\circ T$

$HB_{90}$  – vrijednost tvrdoće uzorka oznake  $90^\circ T$

$\varphi$  - kut smjera opterećenja

$n$  – faktor dobiven primjenom metode najmanjih kvadrata,  $n=1,98$ .

Tablica 5.2 prikazuje vrijednosti tvrdoće HB dobivene mjerenje i vrijednosti izračunate Hankinsonovom formulom.

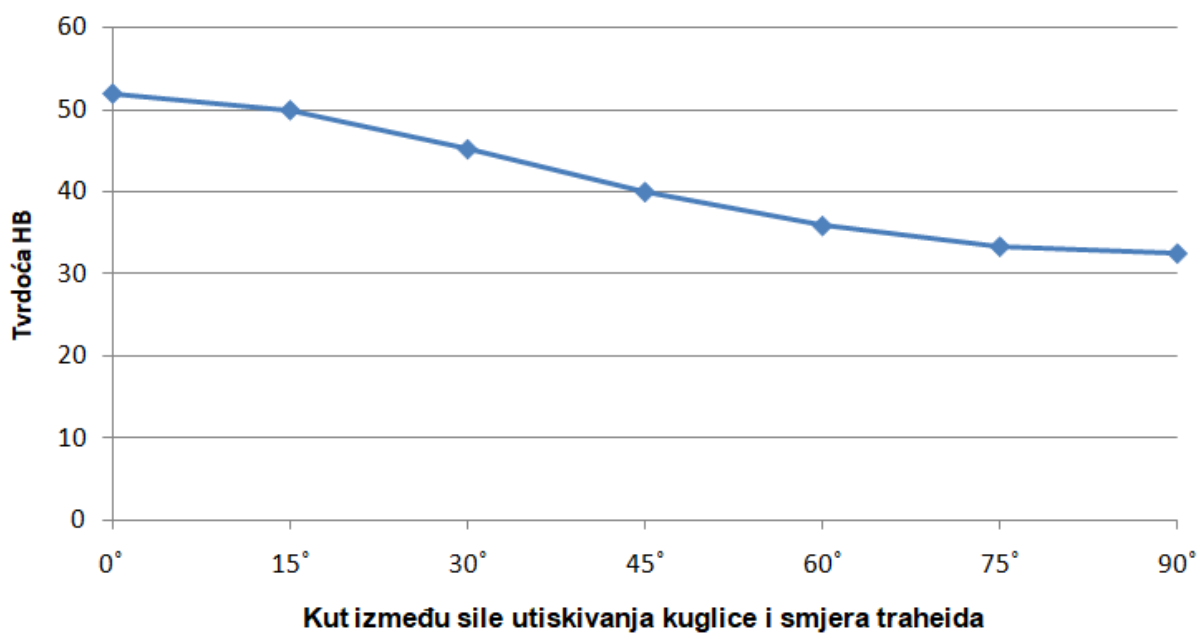
**Tablica 5.2 Vrijednosti izmjerene i izračunate tvrdoće HB**

Uzorak	Tvrdoća HB	
	izmjerene vrijednosti	izračunate vrijednosti
$0^\circ T$	51,9	51,9
$15^\circ T$	44,2	49,9
$30^\circ T$	40,0	45,1
$45^\circ T$	37,1	39,9
$60^\circ T$	35,6	35,8
$75^\circ T$	34,1	33,3
$90^\circ T$	32,4	32,4

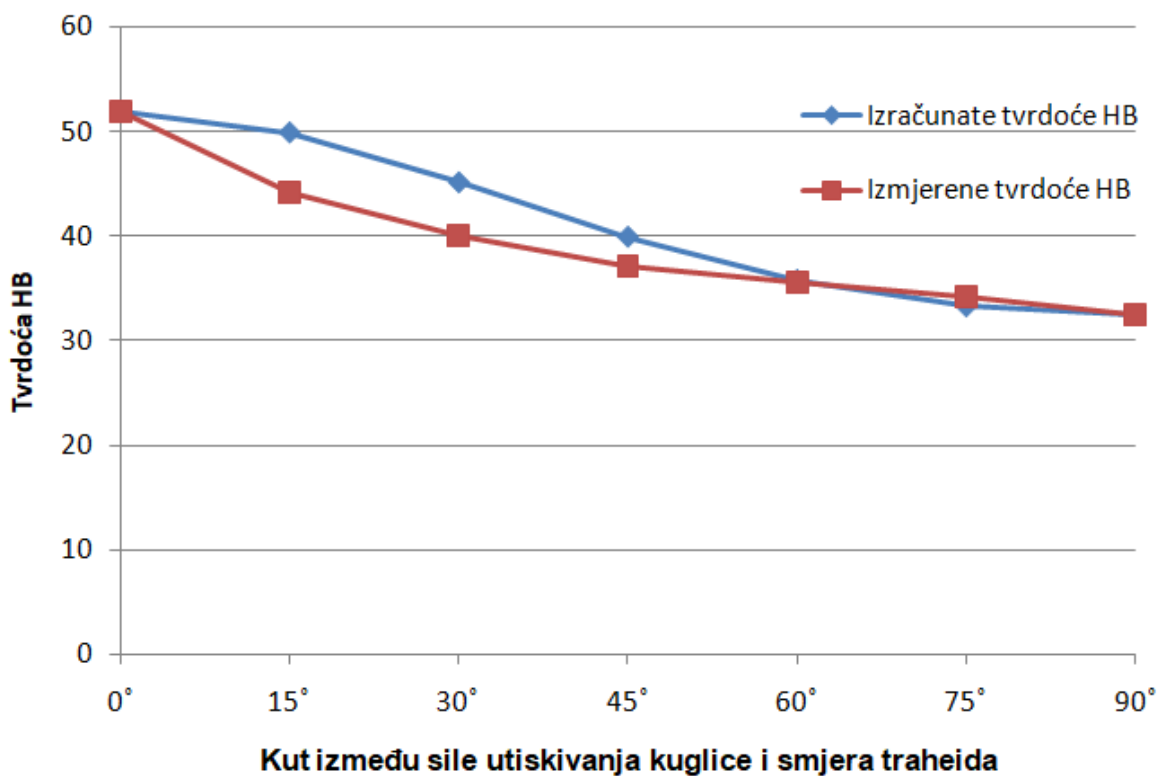
Slika 5.9 prikazuje promjenu tvrdoće izračunatu Hankinsonovom formulom.

Slika 5.10 prikazuje u istom grafu kako se s promjenom kuta između smjera sile utiskivanja i smjera traheida, mijenjaju tvrdoća HB izmjerena na tvrdomjeru i tvrdoća izračunata Hankinsonovom formulom. Uočava se relativno dobro poklapanje rezultata osobito za veće vrijednosti kutova odnosno za presjeke bliže tangencijalnom presjeku.





Slika 5.9 Ovisnost tvrdoće izračunate po Hankinsonovoj formuli o promjeni kuta između smjera sile utiskivanja i smjera traheida



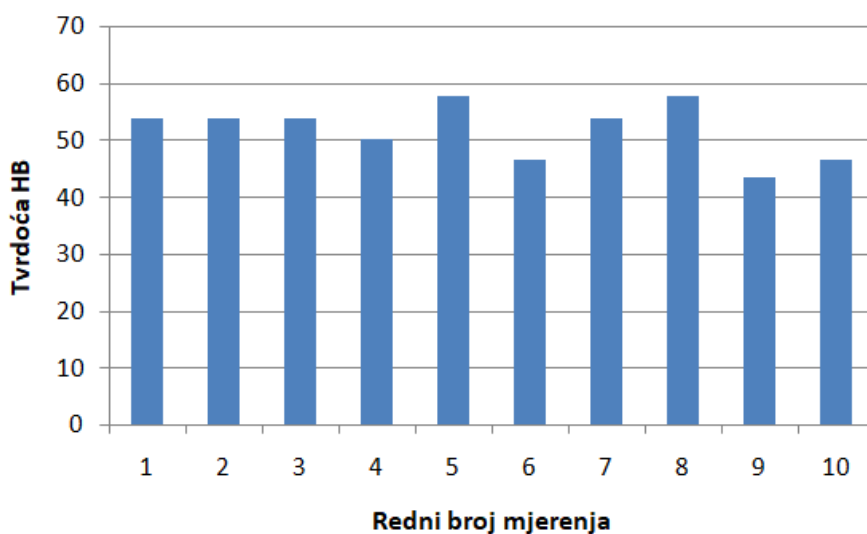
Slika 5.10 Izmjerene i izračunate promjene tvrdoće HB

## 5.2. Promjena tvrdoće prelaskom iz poprečnog u radijalni presjek

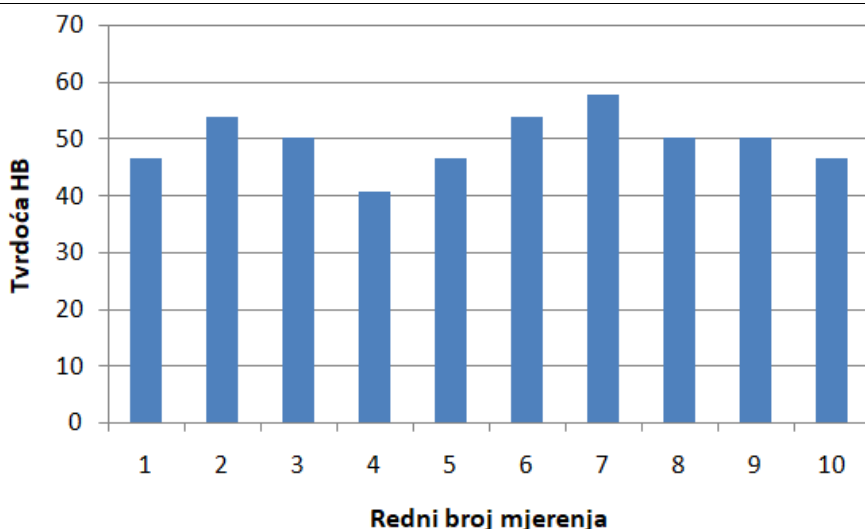
Na slikama od 5.11 do 5.17 prikazani su rezultati mjerenja tvrdoće HB za presjeke koji postupno prelaze iz poprečnog u radijalni. Na svakom se grafu vide dobivene vrijednosti tvrdoće za svako pojedinačno mjerenje. Na taj se način najbolje vidi koliko tvrdoća varira na istom uzorku. I ovdje je rasipanje prisutno kod svih uzoraka.

U prethodnom poglavlju prikazane su vrijednosti tvrdoće na uzorku 0°T koji je identičan uzorku oznake 0°R i predstavlja poprečni presjek. Srednja vrijednost tvrdoće iznosi 51,9 HB, maksimalna vrijednost iznosi 58,0 HB, a minimalna 43,7 HB, slika 5.11.

Na uzorku oznake 15°R, kod kojeg je mjerena površina zakrenuta za 15° u odnosu na poprečni presjek očitana je niža tvrdoća što je i očekivano. Aritmetička vrijednost tvrdoće za ovaj uzorak iznosi 49,8 HB. Maksimalna vrijednost iznosi 58 HB, a minimalna 40,8 HB, slika 5.12.



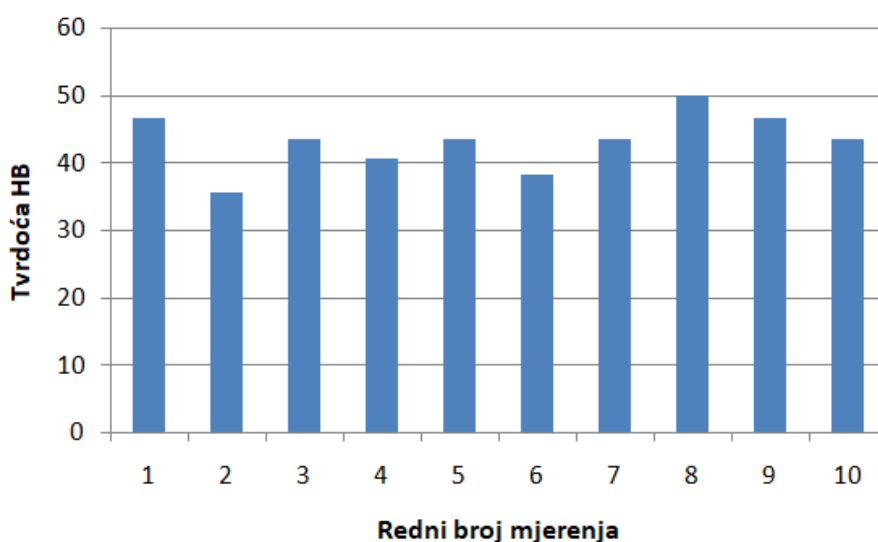
Slika 5.11 Rezultati mjerenja tvrdoće HB na uzorku oznake 0°R



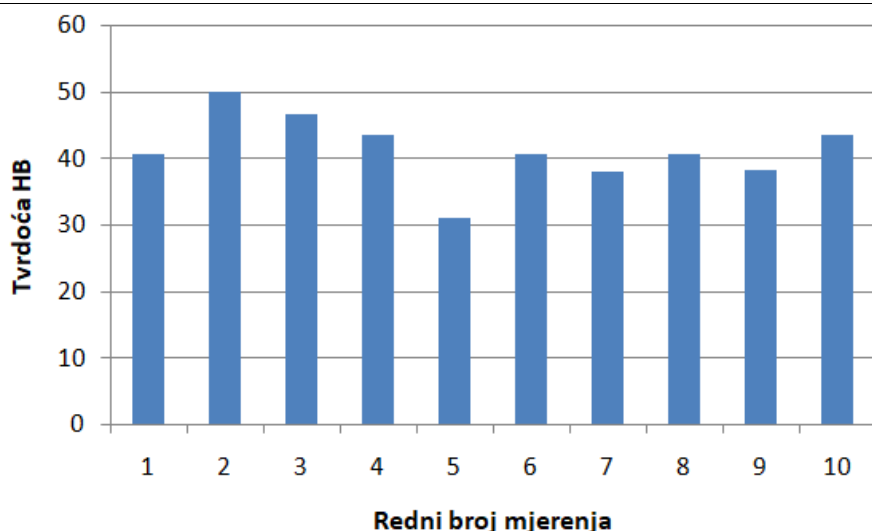
**Slika 5.12** Rezultati mjerenja tvrdoće HB na uzorku oznake 15°R

Na uzorku oznake 30°R, koji je zakrenut za 15° u odnosu na prethodni uzorak, vrijednosti tvrdoće su još niže pa tako srednja vrijednost tvrdoće iznosi 43,3 HB, maksimalna 50,2 HB i minimalna 35,7 HB, slika 5.13.

Na uzorku oznake 45°R, koji je zakrenut za 45° u odnosu na poprečni presjek, tvrdoća se nastavlja snižavati te srednja vrijednost kod ovog uzorka iznosi 41,4 HB, a maksimalna 50,2 HB i minimalna 31,2 HB, slika 5.14.



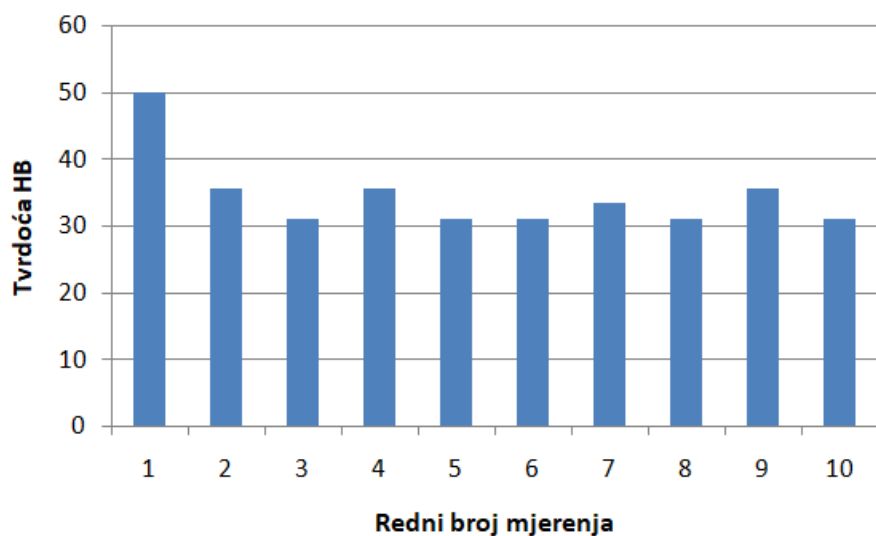
**Slika 5.13** Rezultati mjerenja tvrdoće HB na uzorku oznake 30°R



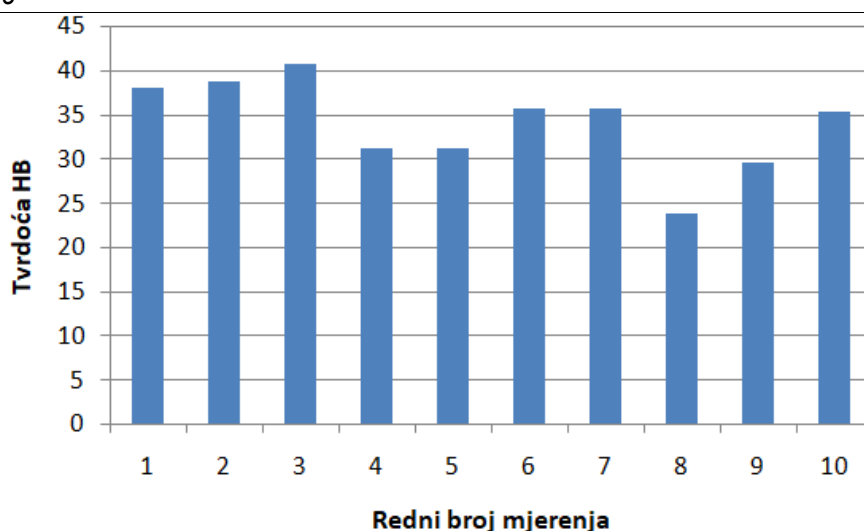
Slika 5.14 Rezultati mjerenja tvrdoće HB na uzorku oznake 45°R

Uzorak oznake 60°R, zakrenut za dodatnih 15° u odnosu na prethodni uzorak, ima još nižu prosječnu vrijednost tvrdoće i ona iznosi 34,7 HB. Maksimalna vrijednost iznosi 50,2 HB, a minimalna 31,2 HB, slika 5.15.

Na uzorku oznake 75°R, kod kojeg je mjerena površina zakrenuta za 75° u odnosu na poprečni presjek, izmjerena je prosječna vrijednost tvrdoće od 34,1 HB što predstavlja dodatni pad u odnosu na prethodne uzorke. Maksimalna vrijednost iznosi 40,8 HB, a minimalna 23,8 HB, slika 5.16.

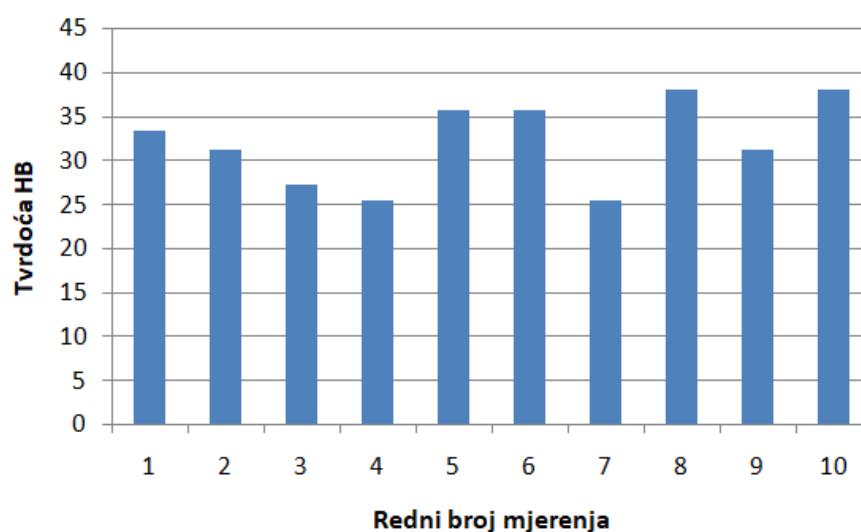


Slika 5.15 Rezultati mjerenja tvrdoće HB na uzorku oznake 60°R



**Slika 5.16** Rezultati mjerenja tvrdoće HB na uzorku oznake 75°R

Na uzorku oznake 90°R, koji predstavlja radijalni presjek, izmjerena je najmanja srednja vrijednost tvrdoće i ona iznosi 32,2 HB. Maksimalna vrijednost iznosi 38,2 HB, a minimalna 25,5 HB, slika 5.17.



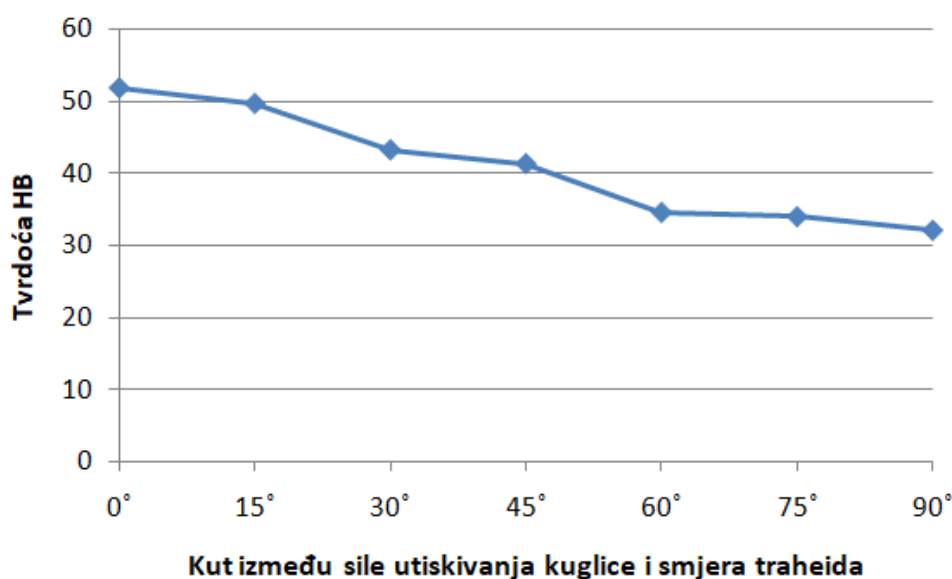
**Slika 5.17** Rezultati mjerenja tvrdoće HB na uzorku oznake 90°R

Statistička analiza rezultata dobivenih pri mjerenju tvrdoće HB prikazana je u tablici 5.3. Zbog heterogenosti strukture drva, koeficijent varijacije je nešto veći, ali i dalje unutar dopuštenih granica (do 20 %). Interval pouzdanosti iznosi 95 %. Za još preciznije rezultate trebalo bi provesti više mjerenja po uzorku.

**Tablica 5.3 Rezultati statističke analize vrijednosti tvrdoće HB**

Uzorak	Aritmetička sredina	Standardna devijacija	Standardna devijacija aritmetičkih sredina	Koeficijent varijacije %	Indeks preciznosti %
0°R	51,9	4,86	1,54	9,36	5,92
15°R	49,8	4,82	1,53	9,69	6,13
30°R	43,3	4,25	1,34	9,81	6,21
45°R	41,4	5,20	1,64	12,55	7,94
60°R	34,7	5,83	1,84	16,82	10,64
75°R	34,1	5,10	1,61	14,97	9,47
90°R	32,2	4,87	1,54	15,14	9,57

Slika 5.18 prikazuje kako se mijenja tvrdoća HB s promjenom kuta između smjera sile utiskivanja kuglice i smjera traheida. I ovdje je jasno izražen pad tvrdoće s povećanjem ovog kuta tj. prelaskom iz poprečnog u radijalni presjek.



**Slika 5.18 Ovisnost tvrdoće o promjeni kuta između smjera sile utiskivanja kuglice i smjera traheida (iz poprečnog u radijalni presjek)**

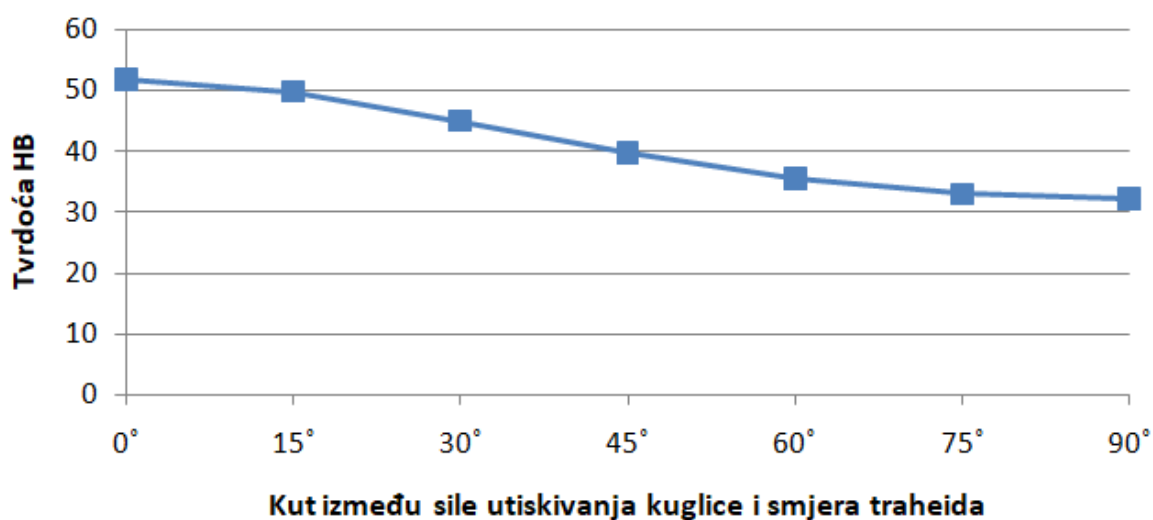
Dobivene vrijednosti tvrdoće uvrštene su u Hankinsonovu formulu. U tablici 5.4 prikazane su izmjerene vrijednosti tvrdoće HB i vrijednosti dobivene uvrštavanjem u Hankinsonovu formulu.

**Tablica 5.4 Vrijednosti izmjerene i izračunate tvrdoće HB**

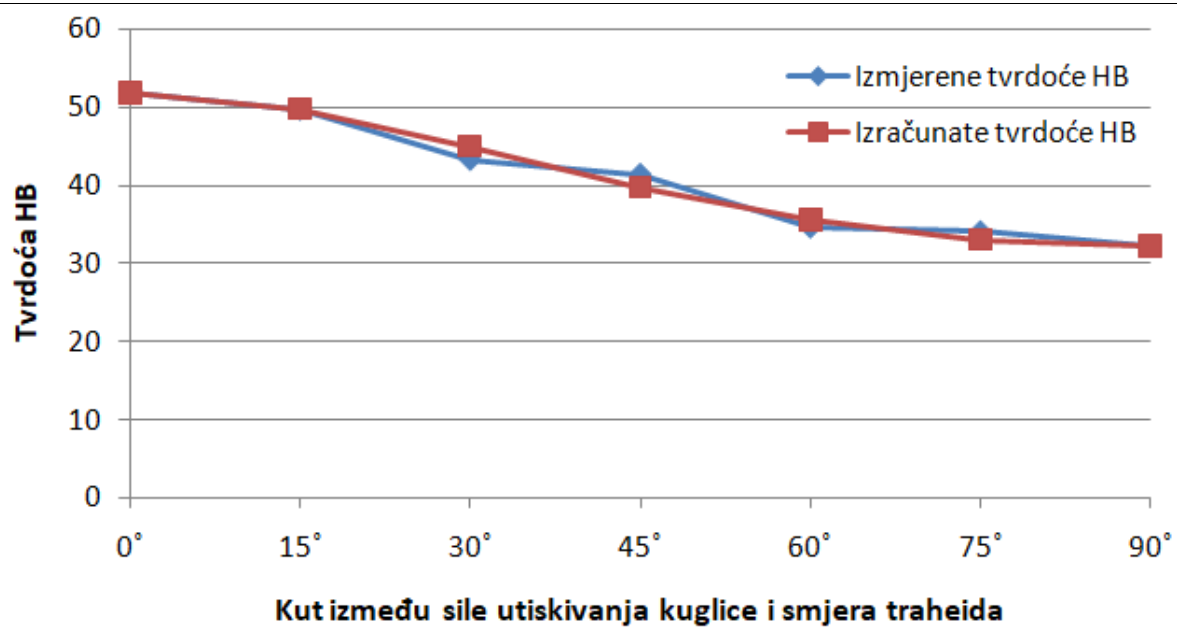
Uzorak	Tvrdoća HB	
	izmjerene vrijednosti	izračunate vrijednosti
0°R	51,9	51,9
15°R	49,8	49,9
30°R	43,3	45,0
45°R	41,4	39,7
60°R	34,7	35,6
75°R	34,1	33,0
90°R	32,2	32,2

Slika 5.19 prikazuje promjenu tvrdoće izračunatu Hankinsonovom formulom.

Na slici 5.20 vide se u istom grafu vrijednosti tvrdoće HB izmjerene na tvrdomjeru i vrijednosti tvrdoće izračunate Hankinsonovom formulom za sve kutove od 0° do 90°. Uočava se jako dobro poklapanje rezultata za sve vrijednosti kutova tj. za sve presjeke od poprečnog do radijalnog. Ovdje je preklapanje rezultata puno bolje nego kod postupnog prelaska iz poprečnog u tangencijalni presjek.



**Slika 5.19** Ovisnost tvrdoće izračunate po Hankinsonovoj formuli o promjeni kuta između smjera sile utiskivanja i smjera traheida



Slika 5.20 Izmjerene i izračunate promjene tvrdoće HB



## 6. ZAKLJUČAK

Temeljem analize rezultata dobivenih pri mjerenju tvrdoće HB na uzorcima drva sibirskog ariša (*Larix sibirica*), mogu se izvesti sljedeći zaključci:

- vrijednost tvrdoće HB značajno ovisi o kutu između smjera sile utiskivanja kuglice i smjera traheida
- najveća srednja vrijednost tvrdoće HB izmjerena je na poprečnom presjeku i iznosi 51,9 HB
- tvrdoća se postupno smanjuje pri prelasku iz poprečnog presjeka u tangencijalni i radijalni presjek
- najmanja tvrdoća izmjerena je za kut od 90° i približno je jednaka i za tangencijalni i za radijalni presjek te iznosi 32,4 HB za tangencijalni odnosno 32,2 HB za radijalni presjek
- tvrdoća poprečnog presjeka veća je za otprilike 60 % od tvrdoće tangencijalnog i radijalnog presjeka
- zbog heterogenosti drvne mikrostrukture rasipanja rezultata na svakom su presjeku relativno visoka, ali koeficijent varijacije ne prelazi dopušteni iznos od 20 %
- izmjerene vrijednosti tvrdoće i izračunate vrijednosti Hankinsonovom formulom imaju relativno dobro podudaranje.

## LITERATURA

- [1] Recenzirani materijali za predavanje, <https://pdfslide.net/documents/drvo-tehnicki-materijal-fsbunizgghr-drvo-raste-da-bi-ispunilo-svoju.html>
- [2] drvo, <https://www.explainthatstuff.com/wood.html>
- [3] drveće, <https://www.eurekalert.org/news-releases/780744>
- [4] drvo, <https://www.americanpoleandtimber.com/5-fascinating-weapons-made-out-of-wood/>
- [5] drvo, <https://stolarskiobrt-juric.hr/zasto-drvo/>
- [6] Užar, J., Drvo materijal u suglasnosti s prirodom, Tehnički glasnik, <https://hrcak.srce.hr/109570>
- [7] drvo, <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=16354>
- [8] Rowell, R. M.: Handbook of wood chemistry and wood composites, CRC Press, 2005.
- [9] drvo, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Drvo\\_\(materijal\)#Svojstva\\_drva](https://hr.wikipedia.org/wiki/Drvo_(materijal)#Svojstva_drva)
- [10] <https://steurh.home.xs4all.nl/engloof/eloofht.html#grondweefsel>
- [11] vlaga, <https://www.wood-database.com/wood-and-moisture/>
- [12] žilavost, <https://hr.wikipedia.org/wiki/%C5%BDilavost>
- [13] Norma; ASTM D 1037-12, Standard test methods for evaluating properties of woodbase fiber and particle panel materials
- [14] <https://www.hoskinghardwood.com/Department/Hardwood-Floors/Janka-Wood-Hardness-Chart.aspx?dId=7&pageId=12>
- [15] Norma; HRN EN 1534:2010, Drveni podovi – Određivanje otpornosti na zasijecanje – Metode ispitivanja (EN 1534:2010)
- [16] Tvrdća, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Tvrdo%C4%87a>
- [17] H. Holmberg: Influence of grain angle on Brinell hardness of Scots pine (Pinus sylvestris L.), 2000.
- [18] Norma; ISO 13061, Physical and mechanical properties of wood -- Test methods for small clear wood specimens
- [19] David W. Green, Jerrold E. Winandy, David E. Kretschmann: Mechanical Properties of Wood, Chapter 4, General Technical Report, 1999.
- [20] koeficijent varijacije, <http://leanmath.com/blog-entry/coefficient-variation>

---

[21] 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