

# Utjecaj usmjerenosti strukture na tvrdoću i abrazijsku otpornost drva hrasta kitnjaka

---

**Soldo, Kata**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2021**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:197334>

*Rights / Prava:* [Attribution-ShareAlike 4.0 International/Imenovanje-Dijeli pod istim uvjetima 4.0 međunarodna](#)

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

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTEU ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Kata Soldo**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentori:

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

Student:

Kata Soldo

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se svojoj mentorici prof. dr. sc. Veri Rede na pruženoj pomoći, trudu i izdvojenom vremenu pri izradi ovog rada. Također se zahvaljujem kolegici Ivi Čavar na pruženoj pomoći tijekom studija.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



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

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

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **KATA SOLDO**

Mat. br.: 0035211266

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj usmjerenosti strukture na tvrdoću i abrazijsku otpornost drva hrasta kitnjaka**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of structure orientation on hardness and abrasion resistance of the sessile oak wood**

Opis zadatka:

Drvo je prirodni kompozitni materijal, a osim toga i vrlo vrijedan tehnički materijal. Ima izrazito usmjerenu strukturu koja je određena njegovim biološkim funkcijama. Zbog toga su i svojstva drva usmjerena i različita u tri karakteristična presjeka – poprečnom, radijalnom i tangencionalnom. Svojstva drva se također razlikuju od vrste do vrste, a velike razlike moguće su i unutar iste vrste pa čak i unutar istog debla.

U diplomskom radu potrebno je odrediti kako usmjerenost strukture utječe na tvrdoću i otpornost na abrazijsko trošenje drva hrasta kitnjaka (*Quercus petraea*). Uzorke za ispitivanje treba izrezati u longitudinalnom smjeru tako da ispitivana površina pokrije cijeli raspon od tangencijalnog (LT) do radijalnog presjeka (LR), odnosno od 0° do 90° u odnosu na liniju goda. Ispitivanje abrazijske otpornosti treba provesti standardnom metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“ prema normi ASTM G 65, a ispitivanje tvrdoće metodom po Brinellu.

Dobivene rezultate potrebno je analizirati i na temelju provedene analize donijeti odgovarajuće zaključke. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i stručnu pomoć.

Zadatak zadan:  
6. svibnja 2021.

Rok predaje rada:  
8. srpnja 2021.

Predvideni datum obrane:  
12. srpnja do 16. srpnja 2021.

Zadatak zadao: *Rede*  
prof. dr. sc. Vera Rede

Predsjednica Povjerenstva:  
*Runje*  
prof. dr. sc. Biserka Runje

# SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA .....	VI
POPIS OZNAKA .....	VII
SAŽETAK .....	VIII
SUMMARY .....	IX
1 UVOD .....	1
2 MAKROSTRUKTURA DRVA .....	2
2.1 Botanička podjela .....	2
2.2 Struktura debla i karakteristični presjeci kroz deblo .....	2
2.2.1 Poprečni presjek .....	3
2.2.2 Radijalni presjek .....	5
2.2.3 Tangencijalni presjek .....	6
3 MIKROSTRUKTURA DRVA .....	8
3.1 Struktura stanične stijenke .....	9
3.2 Mikrostruktura četinjača .....	10
3.2.1 Longitudinalne traheide .....	10
3.2.2 Aksijalne parenhimske stanice .....	10
3.2.3 Drvni traci .....	10
3.2.4 Smolni kanali .....	11
3.3 Mikrostruktura listača .....	12
3.3.1 Traheje .....	12
3.3.2 Drvna vlakanca .....	13
3.3.3 Parenhimske stanice .....	13
3.3.4 Drvni traci .....	14
4 MOLEKULARNA STRUKTURA DRVA .....	15
5 SVOJSTVA I KARAKTERISTIKE DRVA .....	17
5.1 Higroskopnost .....	17
5.2 Gustoća .....	17
5.3 Abrazija .....	18
5.3.1 Metode ispitivanja otpornosti na trošenje .....	20
5.4 Tvrdoća drva .....	24
5.4.1 Brinellova metoda ispitivanja tvrdoće .....	25
6 EKSPERIMENTALNI DIO RADA .....	27
6.1 Cilj rada .....	27
6.2 Materijali za ispitivanje i priprema uzoraka .....	27
6.3 Ispitivanje abrazijskog trošenja .....	32
6.4 Ispitivanje tvrdoće po Brinellu .....	34
6.5 Rezultati mjerenja udjela vlage i gustoće uzoraka .....	36
6.6 Rezultati mjerenja gubitka mase pri abrazijskom trošenju .....	39
6.7 Rezultati mjerenja tvrdoće HB .....	44
6.8 Analiza rezultata .....	50

6.8.1	Analiza rezultata mjerenja gustoće .....	50
6.8.2	Analiza rezultata abrazijskog trošenja.....	51
6.8.3	Analiza rezultata mjerenja tvrdoće.....	54
6.8.4	Analiza utjecaja tvrdoće na otpornost prema abraziji.....	56
6.8.5	Statistička analiza podataka pomoću Weibullove raspodjele .....	60
7	ZAKLJUČAK.....	63
8	LITERATURA .....	64

## POPIS SLIKA

Slika 1. Prikaz poprečnog, radijalnog i tangencijalnog presjeka na deblu [7] .....	3
Slika 2. Prikaz slojeva u poprečnom presjeku debla: E-vanjska kora, D-unutarnja kora, C-kambij, B-bjeljika, A-srževina i srčika [8] .....	3
Slika 3. Prikaz varijabilnosti širine godova iste vrste Douglasove jele [9] .....	4
Slika 4. Prstenasto porozne (lijevo), polu – prstenasto porozne (sredina) i difuzno porozne (desno) vrste godova listača [10].....	5
Slika 5. Karakterističan izgled drvnih traka na radijanom presjeku [10] .....	6
Slika 6. Godovi u tangencijalnom presjeku [10] .....	7
Slika 7. Shematski prikaz glavnih vrsta drvnih stanica: drvena vlakna (A); traheida (B); traheja (C); parenhimske aksijalne stanice (D); traheide u drvnim tracima (E); parenhimske stanice drvnih traka (F) [11] .....	8
Slika 8. Poprečni presjek kroz staničnu stijenkiju dviju susjednih stanica bijele breze: drvena vlakna (F), traheja (V), središnja lamela (ML) i slojevi sekundarne stijenke (S1, S2 i S3) [11].....	9
Slika 9. Prikaz heterogenih drvnih traka koji se sastoje od traheida (RT) i parenhimskih stanica (RP) [10].....	11
Slika 10. SEM prikaz smolnih kanala u drvu smreke [12].....	11
Slika 11. Jednostavne i skaliformne perforacijske ploče na trahejama [10] .....	12
Slika 12. Prikaz vrsta bočnog povezivanja traheja s naizmjeničnim (A); nasuprotnim (B) i izduženim (C) jažicama [10] .....	13
Slika 13. Prikaz parenhimskih stanica (ph) i vlaknaca (v) u drvu hrasta [2].....	13
Slika 14. Jednoredni (A); dvoredni (B) i višeredni (C) drveni traci [10].....	14
Slika 15. Heterogeni drveni traci sastavljeni od uspravnih (A) i izduženih (B) parenhimskih stanica [10] .....	14
Slika 16. Shematski prikaz rasporeda celuloze, hemiceluloze i lignina u staničnoj stijenci [12].....	15
Slika 17. Prikaz vrsta abrazijskog trošenja obzirom na djelovanje abradirane površine i abrazijskih čestica [16] .....	19
Slika 18. Prikaz abrazijskog trošenja prema broju tijela koji sudjeluju u trošenju [17].....	19
Slika 19. Uređaj za ispitivanje abrazijskog trošenja ASTM G174 metodom: ispitni uzorak (A) i pokretna abrazivna traka (B) [19].....	22



Slika 20. Uređaj za ispitivanja abrazijskog trošenja metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“ [21] .....	24
Slika 21. Razlike u tvrdoći i ranom i kasnom dijelu [25].....	25
Slika 22. Dio debla hrasta kitnjaka iz kojeg su izrezani uzorci (A) i označavanje uzoraka (B)	28
Slika 23. Raspored uzoraka na poprečnom presjeku.....	28
Slika 24. Rezanje uzoraka .....	29
Slika 25. Način određivanja kutova i oznake ispitnih ploha na uzorcima.....	29
Slika 26. Brušenje i četkanje uzoraka prije vaganja.....	30
Slika 27. Analitička vaga Ohaus Analytical Plus.....	30
Slika 28. Mjerenje dimenzija uzoraka.....	31
Slika 29. Peć u kojoj je provedeno sušenje uzoraka izvana (A) i iznutra (B); eksikator (C) ..	31
Slika 30. Uređaj za ispitivanje abrazijskog trošenja.....	32
Slika 31. Pričvršćivanje uzorka (A) i njegovo trošenje (B).....	33
Slika 32. Čišćenje uzoraka pneumatskim kompresorom.....	33
Slika 33. Uređaj za ispitivanje tvrdoće Brinellovom metodom .....	34
Slika 34. Prikaz uzorka, indigo papira i kaljene kuglice izbliza .....	35
Slika 35. Prikaz uređaja za očitavanje otiska kuglice (A) i otisak kuglice u drvu kroz uređaj za očitavanje.....	35
Slika 36. Udio vlage u uzorcima .....	50
Slika 37. Vrijednosti gustoće uzoraka za udio vlage od 12% .....	51
Slika 38. Gubitak volumena u ovisnosti o pripadajućem kutu.....	52
Slika 39. Srednji gubitak volumena u ovisnosti o pripadajućem kutu .....	52
Slika 40. Ovisnost ukupnog gubitka volumena pojedinih uzoraka o gustoći ( $w=12\%$ ).....	53
Slika 41. Rezultati svih vrijednosti tvrdoće u ovisnosti o kutu.....	54
Slika 42. Rezultati mjerenja prosječne tvrdoće po plohi u ovisnosti o kutu .....	55
Slika 43. Rezultati mjerenja ukupne prosječne tvrdoće u ovisnosti o kutu.....	55
Slika 44. Ovisnost tvrdoće pojedinih uzoraka o gustoći ( $w=12\%$ ) .....	56
Slika 45. Ovisnost gubitka volumena o tvrdoći po uzorku .....	57
Slika 46. Ovisnost gubitka volumena o prosječnoj tvrdoći po plohi.....	57
Slika 47. Ovisnost gubitka volumena o tvrdoći za kut od $0^\circ$ .....	58
Slika 48. Ovisnost gubitka volumena o tvrdoći za kut od $38^\circ$ .....	58
Slika 49. Ovisnost gubitka volumena o tvrdoći za kut od $49^\circ$ .....	59
Slika 50. Ovisnost gubitka volumena o tvrdoći za kut od $52^\circ$ .....	59
Slika 51. Ovisnost gubitka volumena o tvrdoći za kut od $58^\circ$ .....	59
Slika 52. Ovisnost gubitka volumena o tvrdoći za kut od $63^\circ$ .....	60

Slika 53. Ovisnost gubitka volumena o tvrdoći za kut od 90° .....	60
Slika 54. Weibullova raspodjela za gustoću (w=12%).....	61
Slika 55. Weibullova raspodjela za gubitak volumena .....	61
Slika 56. Weibullova raspodjela za tvrdoću.....	62

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Glavne vrste stanica četinjača [12].....	10
Tablica 2. Glavne vrste stanica listača [12].....	12
Tablica 3. Usporedba molekularnog sastava četinjača i listača [11].....	16
Tablica 4. Usporedba gustoće i vlage hrasta i jasena [15] .....	18
Tablica 5. Usporedba ASTM abrazijskih ispitivanja [19].....	21
Tablica 6. Varijacije parametara sile i broja okretaja kotača [21].....	23
Tablica 7. Tvrdoća hrasta kitnjaka po Brinellu [27].....	26
Tablica 8. Masa prije ( $m_1$ ) i poslije sušenja ( $m_2$ ), udio vlage ( $w$ ), volumen ( $V_w$ ), gustoća pri određenom udjelu vlage ( $\rho_w$ ) i gustoća pri udjelu vlage od 12% ( $\rho_{12}$ ) za red I.....	36
Tablica 9. Masa prije ( $m_1$ ) i poslije sušenja ( $m_2$ ), udio vlage ( $w$ ), volumen ( $V_w$ ), gustoća pri određenom udjelu vlage ( $\rho_w$ ) i gustoća pri udjelu vlage od 12% ( $\rho_{12}$ ) za red II....	37
Tablica 10. Masa prije ( $m_1$ ) i poslije sušenja ( $m_2$ ), udio vlage ( $w$ ), volumen ( $V_w$ ), gustoća pri određenom udjelu vlage ( $\rho_w$ ) i gustoća pri udjelu vlage od 12% ( $\rho_{12}$ ) za red III ..	37
Tablica 11. Masa prije ( $m_1$ ) i poslije sušenja ( $m_2$ ), udio vlage ( $w$ ), volumen ( $V_w$ ), gustoća pri određenom udjelu vlage ( $\rho_w$ ) i gustoća pri udjelu vlage od 12% ( $\rho_{12}$ ) za red IV ..	38
Tablica 12. Masa prije ( $m_1$ ) i poslije sušenja ( $m_2$ ), udio vlage ( $w$ ), volumen ( $V_w$ ), gustoća pri određenom udjelu vlage ( $\rho_w$ ) i gustoća pri udjelu vlage od 12% ( $\rho_{12}$ ) za red V....	38
Tablica 13. Gubitak mase na pojedinim ploham i ukupni gubitak mase uzoraka za red I.....	39
Tablica 14. Gubitak mase na pojedinim ploham i ukupni gubitak mase uzoraka za red II....	40
Tablica 15. Gubitak mase na pojedinim ploham i ukupni gubitak mase uzoraka za red III ..	40
Tablica 16. Gubitak mase na pojedinim ploham i ukupni gubitak mase uzoraka za red IV ..	41
Tablica 17. Gubitak mase na pojedinim ploham i ukupni gubitak mase uzoraka za red V....	41
Tablica 18. Prosječni gubitak mase ( $\Delta m_i$ ) za određeni kut.....	42
Tablica 19. Prosječni gubitak volumena ( $\Delta V$ ) za određeni kut.....	43
Tablica 20. Rezultati mjerenja tvrdoće HB uzoraka za red I .....	44
Tablica 21. Rezultati mjerenja tvrdoće HB uzoraka za red II .....	45
Tablica 22. Rezultati mjerenja tvrdoće HB uzoraka za red III.....	46
Tablica 23. Rezultati mjerenja tvrdoće HB uzoraka za red IV.....	47
Tablica 24. Rezultati mjerenja tvrdoće HB uzoraka za red V .....	48
Tablica 25. Rezultati ukupne prosječne tvrdoće za određeni kut.....	49
Tablica 26. Statistički rezultati za podatke mjerenja.....	62

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$w$	%	Udio vlage
$m$	g	Masa uzorka
$\Delta m$	g	Gubitak mase uzorka
$V$	$\text{cm}^3$	Volumen uzorka
$\Delta V$	$\text{cm}^3$	Gubitak volumena uzorka
$\rho$	$\text{g/cm}^3$	Gustoća uzorka
$\rho_{12}$	$\text{g/cm}^3$	Gustoća uzorka za udio vlage od 12%

## SAŽETAK

Osnovni zadatak ovog rada bio je odrediti kako usmjerenost strukture utječe na tvrdoću i otpornost na abrazijsko trošenje drva hrasta kitnjaka (lat. *Quercus petraea*).

Ispitivanje abrazijske otpornosti provedeno je metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“, a mjerenje tvrdoće metodom po Brinellu.

U radu je utvrđeno da postoji korelacija između usmjerenosti strukture i odnosa tvrdoće i gubitka volumena pri abraziji. Kod manjih kutova (do 52°) s povećanjem tvrdoće smanjuje se gubitak volumena, a kod većih kutova s povećanjem tvrdoće povećava se gubitak volumena. Udio vlage i gustoća ovise o poziciji uzoraka u poprečnom presjeku debla. Također je utvrđeno da se povećanjem gustoće uzoraka povećava tvrdoća, a smanjuje gubitak volumena pri abraziji. Vrijednosti i rasipanja rezultata za gustoću, gubitak volumena pri abraziji i tvrdoću ponašaju se po zakonu Weibullove razdiobe, kojom su statistički analizirani.

**Ključne riječi:** abrazijsko trošenje, tvrdoća, gustoća, hrast kitnjak

## SUMMARY

The main purpose of this thesis was to determine how the orientation of the structure affects the hardness and abrasion resistance of sessile oak wood (lat. *Quercus petraea*).

The abrasion resistance test was conducted by the "dry sand - rubber wheel" method, and the hardness measurement by the Brinell method.

In the thesis is determined that there is a correlation between the orientation of the structure and the relationship between hardness and volume loss during abrasion. At smaller angles (up to 52°) the volume loss decreases with increasing hardness, and at larger angles with increasing hardness the volume loss increases. The moisture content and density depend on the position of the samples in the cross section of the trunk. It has also been found that increasing the density of the specimens increases the hardness and reduces the volume loss on abrasion. The values and scatter of the results for density, volume loss on abrasion and hardness are distributed by the Weibull's distribution law, by which they are statistically analyzed.

**Keywords:** abrasion wear, hardness, density, sessile oak

# 1 UVOD

Drvo je igralo važnu ulogu u povijesti civilizacije. Ljudi su ga koristili za gorivo, građevinski materijal, namještaj, papir, alat, oružje i još mnogo toga. A potražnja za drvom se nastavila povećavati svake godine, potičući sukobe između država zbog želje za povećanjem resursa. Drvo je još uvijek bitno za ljudski život, ali je tijekom vremena evoluiralo od jednostavnog, lako dostupnog prirodnog materijala do modernog industrijskog i inženjerskog materijala.

U svom izmijenjenom (obrađenom) obliku njegova uloga nije toliko očita, ali drvo je ipak tu, pod krinkom papira, tkanine, ljepila, alkohola, gume, lijekova i puno drugih proizvoda. Korištenje drva također je atraktivno zbog njegove jednostavnosti upotrebe. Drveni proizvodi su praktični u pogledu veličine i laganog transporta. Osim toga, drvo ima vrlo bitnu ulogu za ekosistem jer proizvodi kisik, povoljno utječe na klimu, utječe na bio raznolikost, smanjuje emisiju ugljičnog dioksida itd.

Drvo je potrebno razumjeti na više razina – od cijele biljke do pojedinačne stanice. Stoga se struktura drva promatra na makro, mikro i molekularnoj razini. Kao tehnički materijal drvo se odlikuje mnogim prednostima: niska gustoća, visok stupanj čvrstoće i krutosti, niska toplinska i električna vodljivost i kemijska trajnost.

Osim prednosti, drvo ima svoje nedostatke od kojih se najviše izdvajaju greške u drvu, truljenje, anizotropija, utjecaj kukaca i gljiva, ovisnost mehaničkih svojstava o sadržaju vode u drvu, skupljanje i bubrenje te zapaljivost. S obzirom na sve navedeno, važno je razumjeti kako se svojstva drva razlikuju ovisno o njegovoj heterogenosti, orijentaciji uzorka u odnosu na smjerove anizotropije. Suvremene tehnologije omogućavaju smanjenje nedostataka na minimum, čime je drvo postalo još zanimljiviji tehnički materijal. [1-3]

U ovom radu analizirat će se utjecaj usmjerenosti drvne građe u longitudinalnom smjeru na abrazijsku otpornost i tvrdoću hrasta kitnjaka (lat. *Quercus petraea*).

## 2 MAKROSTRUKTURA DRVA

Struktura drva koja se lako može vidjeti golim okom ili s malim povećanjem naziva se makrostruktura drva. Svako stablo sastoji se od tri osnovna dijela – **korijena, debla i krošnje**, bez obzira o kojoj se vrsti drveća radilo. Sustav korijenja stabla izvlači hranjive tvari i vodu iz tla i prenosi ih u deblo i sve druge gornje dijelove stabla. Kroz deblo se ne prenosi samo voda s otopljenim mineralnim tvarima od dolje prema gore. U obrnutom smjeru, od lišća prema korijenju, prenose se produkti fotosinteze koji su potrebni za život i rast stabla. Deblo predstavlja i središnji sustav potpore svemu što se događa na stablu. Iznad debla je krošnja, koju čine sve grane i lišće na stablu. Krošnja ne samo da proizvodi šećere koje drvo treba za preživljavanje, već filtrira prašinu iz zraka, štiti tlo od pretjerane erozije kišom i sl. [4]

### 2.1 Botanička podjela

Sve komercijalno zanimljive vrste drva dijele se na listače (tvrdo drvo) i četinjače (meko drvo). Unatoč onome što bi se moglo pomisliti na temelju imena, nemaju sve četinjače mekano, niti sve listače tvrdo drvo. Razvrstavanje na meko i tvrdo drvo potječe od botaničke podjele na vrste koje pripadaju skupini golosjemenjača (četinjače) i vrste koje pripadaju skupini kritosjemenjača (listače).

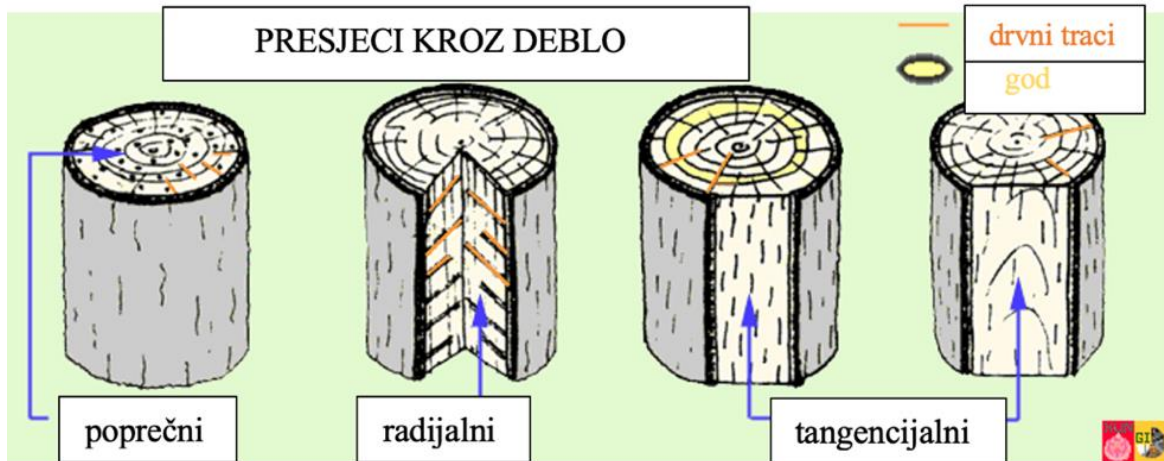
U umjerenom dijelu sjeverne hemisfere, četinjače su obično zimzeleno drveće s iglicama, poput bora (lat. *Pinus*) i smreke (lat. *Picea*), dok su listače obično širokolisno, listopadno drveće poput javora (lat. *Acer*), breze (lat. *Betula*), hrasta (lat. *Quercus*). Četinjače i listače ne razlikuju se samo po izgledu lišća već se razlikuju i u pogledu njihove strukture. Četinjače imaju jednostavniju osnovnu strukturu od listača. Listače imaju veću strukturnu složenost jer imaju veći broj osnovnih tipova stanica i daleko veći stupanj varijabilnosti unutar tipova stanica. [5, 6]

### 2.2 Struktura debla i karakteristični presjeci kroz deblo

Kad se govori o strukturi debla potrebno je naglasiti da se ona uvijek promatra s obzirom na tri karakteristična presjeka: **poprečni, radijalni i tangencijalni**, što je prikazano na slici 1. Sve tri ravnine presjeka važne su za pravilno promatranje drva i samo gledanjem svake od njih može se dobiti cjelovito i točno razumijevanje trodimenzionalne strukture drva.

Tri ravnine presjeka određene su strukturom drva i načinom na koji su raspoređene stanice u drvu.

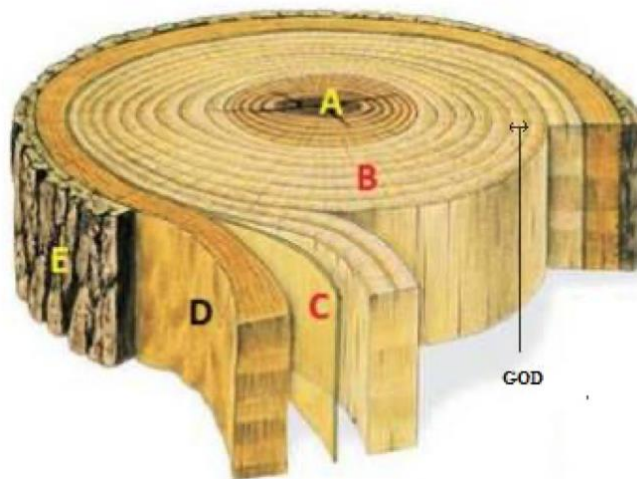




Slika 1. Prikaz poprečnog, radijalnog i tangencijalnog presjeka na deblu [7]

### 2.2.1 Poprečni presjek

Poprečni presjek je okomit na uzdužnu os debla. Gledajući poprečni presjek izvana prema središtu debla, razlikuju se sljedeći slojevi: vanjska kora, unutarnja kora, bjeljika, srževina i srčika, što se vidi na slici 2.



Slika 2. Prikaz slojeva u poprečnom presjeku debla: E-vanjska kora, D-unutarnja kora, C-kambij, B-bjeljika, A-srževina i srčika [8]

Uloga vanjske kore je mehanička zaštita, te sprječavanje gubitka vode iz stabla.

Unutarnja kora provodi tvari koje nastaju tijekom procesa fotosinteze od listova do korijena. Između unutarnje kore i bjeljike nalazi se vaskularni kambij. To je tanki sloj iz kojeg svakog

proljeća, u našoj klimatskoj zoni, kreće rast novog goda prema unutra (sekundarni ksilem), a prema vani novi sloj unutarnje kore (sekundarni floem). Odnos širine floema i ksilema jedne vegetacijske sezone je oko 1:10.

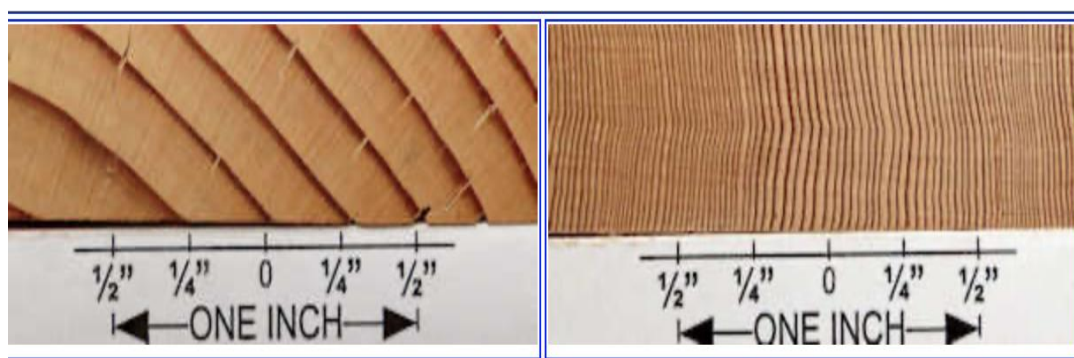
Bjeljika je dio debla svijetlije boje uz koru. Ona je aktivni provodnik vode i mineralnih tvari od korijena prema gore. Na živom drvu ona nije odgovorna samo za provođenje vode i otopljenih tvari, već je odgovorna i za skladištenje te sintezu biokemijskih tvari. Većinu skladištenih tvari čine škrob i lipidi. Veće količine škroba mogu dovesti do rasta anaerobnih bakterija ili gljivica, što ima direktan utjecaj na trajnost drva, a utječe i na obradivost drva u industriji.

Funkcija srževine je dugotrajno skladištenje biokemijskih tvari koje se nazivaju ekstraktivi. Upravo je zbog toga srževina tamnije boje.

U središtu debla nalazi se srčika koja je ostatak tkiva iz rane faze rasta stabla, dok deblo još nije bilo formirano.

### 2.2.1.1 Godovi

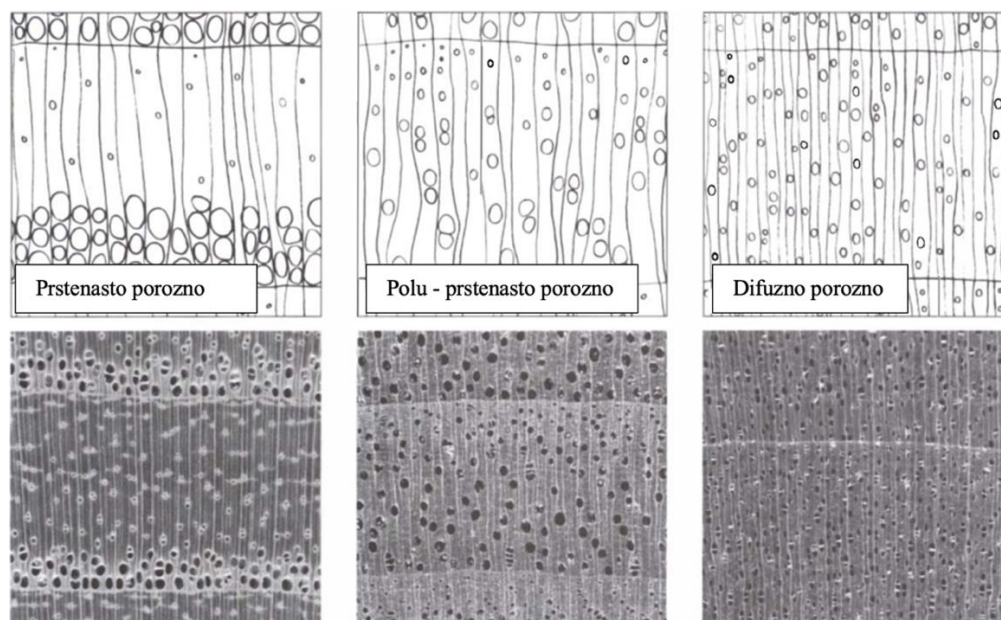
Na poprečnom presjeku debla golim okom su vidljivi godovi ili godišnji prsteni. To je godišnji prirast drva u debljinu, ali samo u umjerenj klimatskoj zoni. Godovi nastaju djelovanjem kambija tijekom jednog vegetacijskog razdoblja. Na poprečnom presjeku godovi izgledaju kao koncentrični krugovi. Takav rast se zove diskontinuirani rast. Neke vrste drveća u tropskim krajevima uopće ne stvaraju godove, jer je zbog jednolične klime prirast kontinuiran, te se takav rast zove kontinuirani rast. U vegetacijskoj sezoni rad kambija nije jednako intenzivan. U rano proljeće brzim diobama nastaju velike stanice drva, dok se tijekom ljeta razvijaju sve manje stanice. U kasnom ljetu, tj. jeseni diobe i stvaranje novih stanica potpuno prestanu. Stanice koje nastaju na početku vegetacijske sezone čine rani dio goda ili rano drvo, a stanice koje nastaju kasnije nazivaju se kasni dio goda ili kasno drvo.



**Slika 3. Prikaz varijabilnosti širine godova iste vrste Douglasove jele [9]**

Godovi pokazuju starost drva, vlagu u tlu i zraku, temperaturu i sunčevu svjetlost. Obično široki godovi ukazuju na dobru godinu rasta. A uski godovi ukazuju na prevelike temperature, premalo vode, previše/premalo svjetlosti i sl. Na slici 3 prikazani su različito široki godovi iste vrste. Godovi mogu biti slabije ili jače izraženi. Više izraženi godovi se zovu markantni godovi i općenito su markantniji godovi kod četinjača nego kod listača. Također, oni se mogu razlikovati i po boji (svjetliji / tamniji), po tijeku granične linije (valoviti / uleknuti) i po širini (fini - do 1/3cm, polufini - do 2/3cm, grubi - širi od 2/3cm).

Za listače je karakteristična podjela u tri osnovne skupine na temelju veličine i rasporeda najvećih provodnih sudova (pora), prema slici 4.



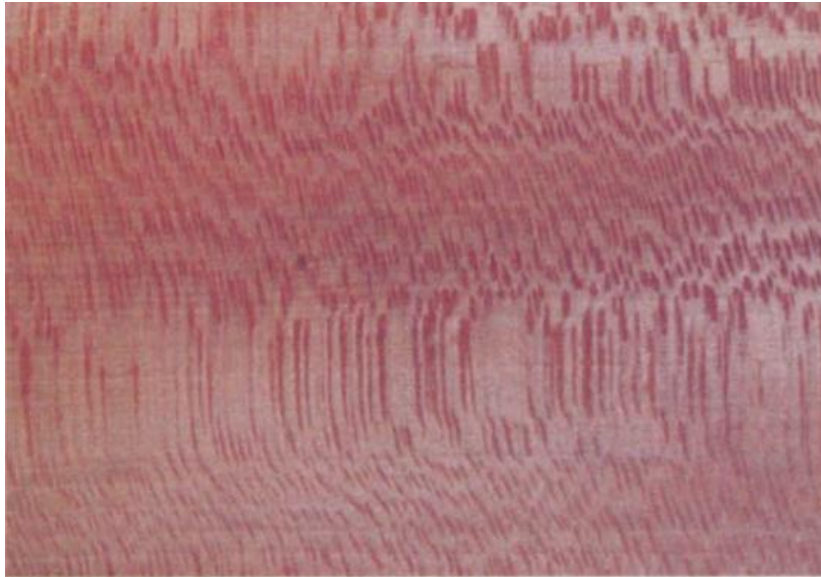
**Slika 4. Prstenasto porozne (lijevo), polu – prstenasto porozne (sredina) i difuzno porozne (desno) vrste godova listača [10]**

U prvoj skupini prstenasto poroznih vrsta, pore su smještene u ranom dijelu goda. Kod polu-difuzno poroznih vrsta pore su većim dijelom smještene u ranom dijelu goda, ali ih ima i u kasnom dijelu goda. Kod difuzno poroznih vrsta nema razlike u rasporedu pora između ranog i kasnog dijela goda. [2, 5, 10]

### 2.2.2 Radijalni presjek

Radijalni presjek je presjek preko kojeg se mogu promatrati značajke od srčike prema kori (radijalno) i uzduž osi debla. U ovom presjeku se mogu uočiti uzdužne promjene u drvu, a godovi se vide kao gotovo paralelne linije. Radijalni presjek se zapravo preklapa s drvnim trcima, koji se šire od srčike prema kori debla. Zbog manjih nepravilnosti u drvu, drvni traci

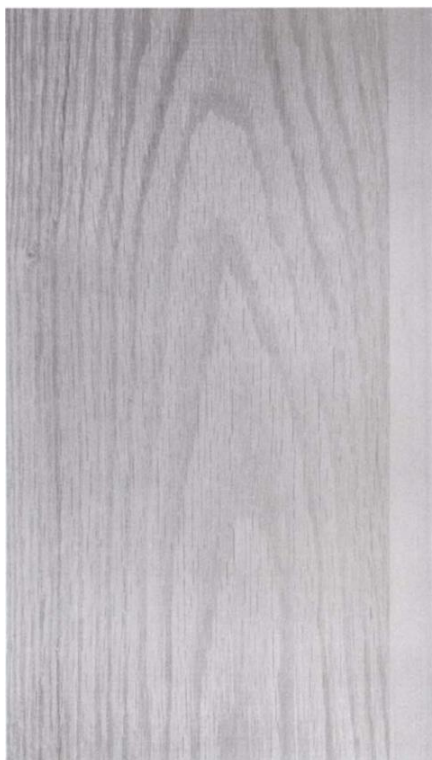
nisu uvijek u potpunosti vidljivi u ovom presjeku. Najmanji drvni traci nisu uopće vidljivi ili se samo vide kao male mrlje ili pruge. Kod nekih vrsta, poput javora, u radijalnom presjeku drvni traci pokazuju se kao tamnije pruge, dok kod drugih vrsta, poput crne trešnje, drvni traci se pokazuju kao svijetlije trake. Za karakterističan izgled drvnih traka na radijalnom presjeku često se koristi naziv „drvene mrlje“ (engl. *ray fleck*), slika 5. [10]



**Slika 5. Karakterističan izgled drvnih traka na radijalnom presjeku [10]**

### **2.2.3 Tangencijalni presjek**

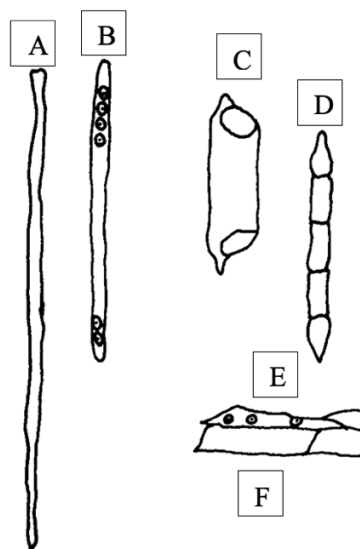
Tangencijalni presjek je uzdužni presjek kroz deblo, okomit na radijalni. U idealnom slučaju tangencijalni presjek tangira liniju goda. U stvarnosti, godovi nikada nisu savršeno okrugli, tj. njihova zakrivljenost varira od mjesta do mjesta. Stoga se godovi u tangencijalnom presjeku obično pojavljuju kao nepravilne oznake u obliku slova V i U, što se jasno vidi na slici 6. Drvni traci se u ovom presjeku obično vide kao tamne, vertikalne linije. Duljina linije označava visinu drvnog traka. [10]



**Slika 6. Godovi u tangencijalnom presjeku [10]**

### 3 MIKROSTRUKTURA DRVA

Osnovna mikrostrukturna jedinica drva jest drvena stanica, sastavljena od lumena (praznog prostora) i stanične stijenke. Drvena stanica podrazumijeva mrtvu biljnu stanicu bez plazmatskog sadržaja. Sve drvene stanice imaju više ili manje izdužen oblik, a razlikuju se po duljini, promjeru, debljini drvene stijenke i odnosu između debljine drvene stijenke i širine lumena. Na slici 7, prikazano je nekoliko osnovnih tipova drvnih stanica. Većina drvnih stanica orijentirana je uzdužno, a manji dio usmjeren je radijalno. Mikrostruktura četinjača je puno jednostavnija od mikrostrukture listača.



**Slika 7. Shematski prikaz glavnih vrsta drvnih stanica: drvena vlakna (A); traheida (B); traheja (C); parenhimske aksijalne stanice (D); traheide u drvnim trcima (E); parenhimske stanice drvnih traka (F) [11]**

Pojedinačne drvene stanice čine savršen sustav u kojem su međusobno povezani svi dijelovi stabla. Sve drvene stanice pripadaju ili uzdužnom ili radijalnom sustavu. Stanice uzdužnog sustava su izdužene u smjeru osi debla ili grana u kojima se nalaze, dok su stanice radijalnog sustava postavljene okomito na os debla ili grana i orijentirane su od srčike prema kori. Funkcija uzdužnog sustava je protok tvari od korijena prema gore i obrnuto i o njemu ovisi čvrstoća stabla. Radijalni sustav je odgovoran za protok biokemijskih tvari od središta debla prema kori i obrnuto. Uzdužni i radijalni sustav su međusobno isprepleteni i povezani i potpuno određuju svojstva drva. [11]



### 3.1 Struktura stanične stijenke

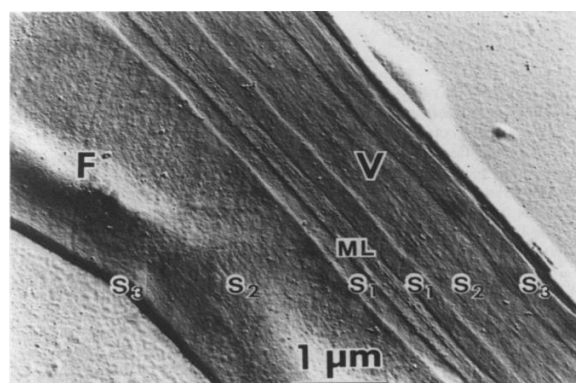
Stanična stijenka ima vrlo pravilnu strukturu i skupa s praznim prostorom koji okružuje, čini drvenu stanicu. Svaka drvena stanica okružena je i povezana s mnoštvom drugih drvnih stanica kako bi mogle djelovati kao jedinstvena cjelina pogotovo u živom stablu, ali i u biološki mrtvom, tehničkom drvu.

Stanična stijenka sastoji se od tri glavna dijela: središnje lamele, primarnog i sekundarnog dijela stijenke, prikazano na slici 8. Središnja lamela je bogata ligninom i povezuje susjedne stanice u jednu cjelinu. Na središnju lamelu nadovezuje se primarna stijenka koja je relativno tanka i teško se razlučuje od središnje lamele. Čak kada se promatra transmisijskim elektronskim mikroskopom često se ne može jednoznačno razdvojiti na svoje sastavne dijelove zbog čega se koristi izraz „spojena središnja lamela“ koji označava primarnu stijenku i središnju lamelu.

Sekundarna stanična stijenka sastoji se tri različito debela sloja. Prvi sloj sekundarne stijenke naslanja se na primarnu stijenku i relativno je tanak. Drugi sloj sekundarne stijenke je najdeblji i najviše doprinosi mehaničkim i drugim svojstvima drvene građe. Sadrži manje lignina od prethodnog sloja. Najmanje lignina sadrži treći sloj sekundarne stijenke koji omeđuje lumen. Postupno smanjivanje udjela lignina od središnje lamele prema lumeni izravno je povezano s fiziologijom živog stabla.

Na Slika 8 vidi se poprečni presjek kroz središnju lamelu i drvenu stijenku dviju susjednih drvnih stanica. Na slici se mogu dosta jasno uočiti primarna stijenka i tri sloja sekundarne stijenke svake stanice.

Prijenos vode i u njoj otopljenih mineralnih tvari između drvnih stanica odvija se preko otvora u staničnoj stijenci koji se nazivaju jažice. [2, 5, 11]



**Slika 8. Poprečni presjek kroz staničnu stijenku dviju susjednih stanica bijele breze: drvena vlakna (F), traheja (V), središnja lamela (ML) i slojevi sekundarne stijenke (S1, S2 i S3)**

[11]

### 3.2 Mikrostruktura četinjača

Mikrostruktura četinjača sastoji se od relativno malo vrsta stanica. Tablica 1 prikazuje glavne vrste stanica četinjača i njihovu usmjerenost.

**Tablica 1. Glavne vrste stanica četinjača [12]**

<b>Uzdužno orijentirane stanice</b>	<b>Radijalno orijentirane stanice</b>
Longitudinalne traheide	Traheide u drvnim tracima
Aksijalne parenhimske stanice	Parenimske stanice drvnih traka

#### 3.2.1 Longitudinalne traheide

U četinjačama prevladavaju uzdužno orijentirane longitudinalne drvene stanice, koje se nazivaju traheidama. One su pravokutnog poprečnog presjeka, te imaju zatvorene i sužavajuće krajeve, koji se preklapaju sa susjednim stanicama. Njihova širina kreće se od 30 do 50  $\mu\text{m}$ , a duljina im je od 3 do 5 mm. Osnovna uloga traheida je mehanička potpora, te protok vode i otopljenih mineralnih tvari od korijenskog sustava stabla prema krošnji.

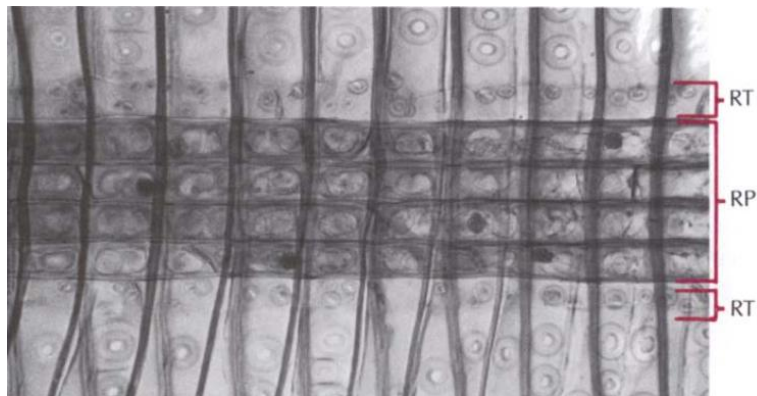
#### 3.2.2 Aksijalne parenhimske stanice

Aksijalne parenhimske stanice imaju približno iste dimenzije poprečnog presjeka kao i traheide. One su u uzdužnom presjeku relativno kratke i javljaju se u uzdužnim nizovima. U radijalnom i tangencijalnom presjeku, stanice parenhima se lako razlikuju zbog manje debljine stanične stijenke, dok su u u poprečnom presjeku približno slične veličine kao i traheide.

#### 3.2.3 Drvni traci

Većina drvnih traka sastoji se od parenhimskih stanica i traheida . Ako drvni trak ima obje vrste stanica naziva se heterogenim drvnim trakom i prikazan je na slici 9. Ukoliko je drvni trak sastavljen samo od traheidnih traka ili samo od parenhimskih traka, tada je on homogen. Drvni traci su kod četinjača uglavnom široki samo jednu stanicu (jednoredni trak), osim u posebnim slučajevima kada mogu biti široki nekoliko stanica (višeredni trak).





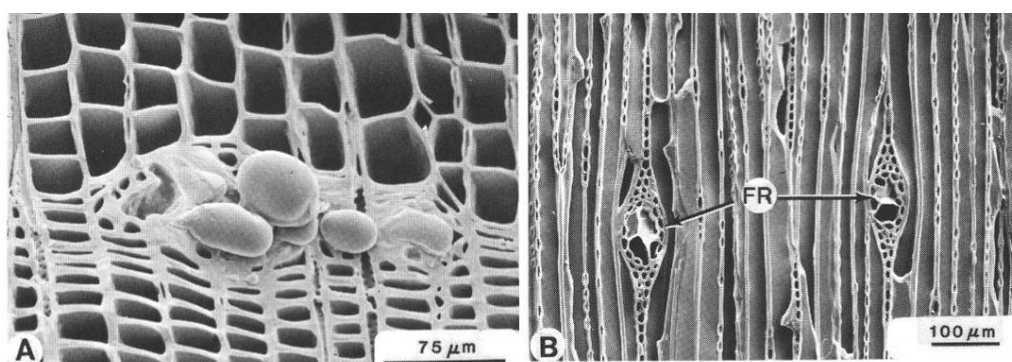
**Slika 9. Prikaz heterogenih drvnih traka koji se sastoje od traheida (RT) i parenhimskih stanica (RP) [10]**

### 3.2.4 Smolni kanali

Smolni kanali su šupljine poput cijevi koje su usmjerene uzdužno ili radijalno kroz koje se izlučuje smola. Oni su obloženi specijaliziranim stanicama koje se zovu epitelne stanice. Na slici 10 - (A) prikazan je smolni kanal u drvu smreke.

Uzdužni i radijalni smolni kanali su prirodna svojstva četiri roda četinjača: borovi (lat. *Pinus*), smreke (lat. *Picea*), ariši (lat. *Larix*) i duglazije (lat. *Pseudotsuga*). Smolni kanali se također mogu pojaviti i kod drugih vrsta kao odgovor na ozljede ili traume.

Radijalni smolni kanali nalaze se u posebnim višerednim tracicima, koji se zbog vretenastog oblika u tangencijalnom presjeku nazivaju vretenastim drvnim tracicima, a prikazani su na slici 10 - (B). [2, 10,12]



**Slika 10. SEM prikaz smolnih kanala u drvu smreke [12]**

**(A) - uzdužni kanal s izlučenim kapljicama smole**

**(B) - radijalni kanali u višerednim drvnim tracicima**

### 3.3 Mikrostruktura listača

Mikrostruktura listača dosta je složenija od mikrostrukture četinjača. Tablica 2 prikazuje glavne vrste drvnih stanica listača i njihovu usmjerenost.

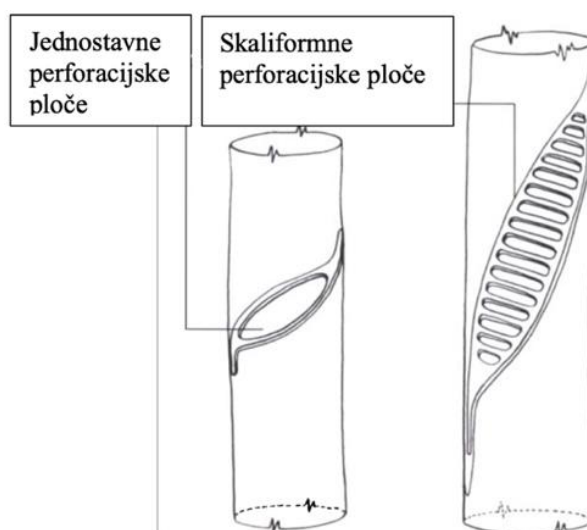
**Tablica 2. Glavne vrste stanica listača [12]**

Uzdužno orijentirane stanice	Radijalno orijentirane stanice
Drvena vlakanca	Drvni traci
Aksijalne parenhimske stanice i traheide	
Traheje	

#### 3.3.1 Traheje

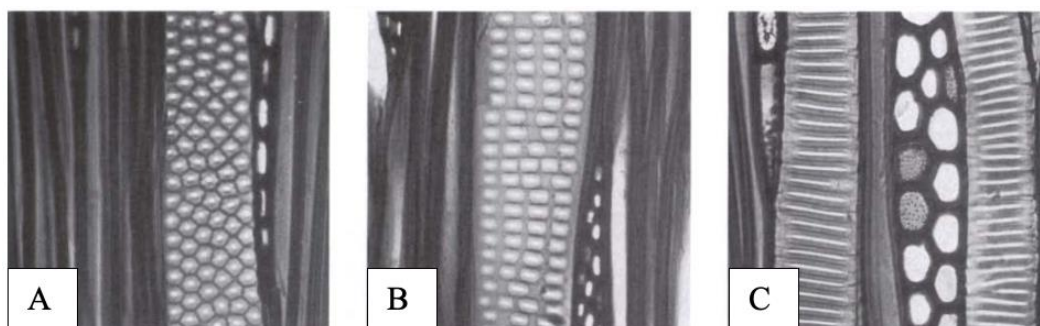
Listače se od četinjača jednostavno razlikuju po trahejama, velikim provodnim stanicama koje služe za transport velike količine vode s otopljenim mineralnim tvarima od korijenskog sustava prema gore. To su najšire stanice kod listača s vrlo velikim lumenom i relativno debelom staničnom stijenkom.

Da bi se provodnost olakšala, krajevi traheja su perforirani, tj. krajevi su otvoreni za slobodan protok vode iz jedne stanice u drugu. Kao što je prikazano na slici 11, u nekih listača su krajevi traheja potpuno otvoreni (jednostavni), dok kod drugih sadrže niz paralelnih poprečnih otvora (skaliformni).



**Slika 11. Jednostavne i skaliformne perforacijske ploče na trahejama [10]**

Osim uzdužnog povezivanja traheja, postoje i različiti načini njihovog bočnog povezivanja preko jažica (engl. *intervessel pitting*), od kojih su najpoznatije naizmjenične, nasuprotnne i izdužene jažice prikazane na slici 12.



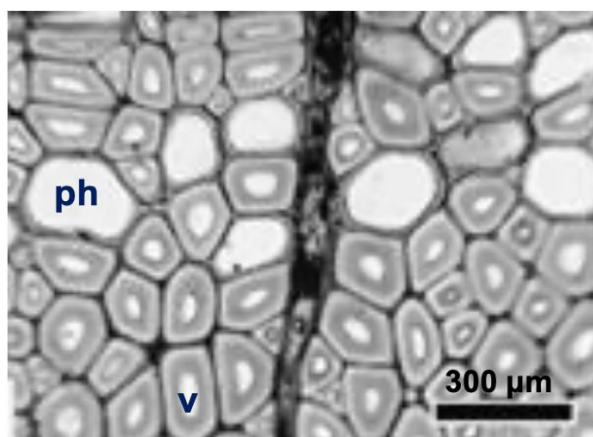
**Slika 12. Prikaz vrsta bočnog povezivanja traheja s naizmjeničnim (A); nasuprotnim (B) i izduženim (C) jažicama [10]**

### 3.3.2 Drvna vlakanca

Drvna vlakanca su među najduljim stanicama kod listača i istodobno stanice s najmanjim promjerom. Zbog malog promjera i debele stanične stijenke, na presjeku se vide kao tamna područja. Puno su dulja su od traheja, ali kraća od traheida. Glavna uloga drvnih vlakanaca je mehanička potpora. O debljini stijenke drvnih vlakanaca ovisi gustoća drva.

### 3.3.3 Parenhimske stanice

Udio parenhimskih stanica je mnogo veći u listačama nego u četinjačama. Za razliku od drvnih vlakanaca, parenhimske stanice imaju tanju stijenku i veći lumen, slika 13.

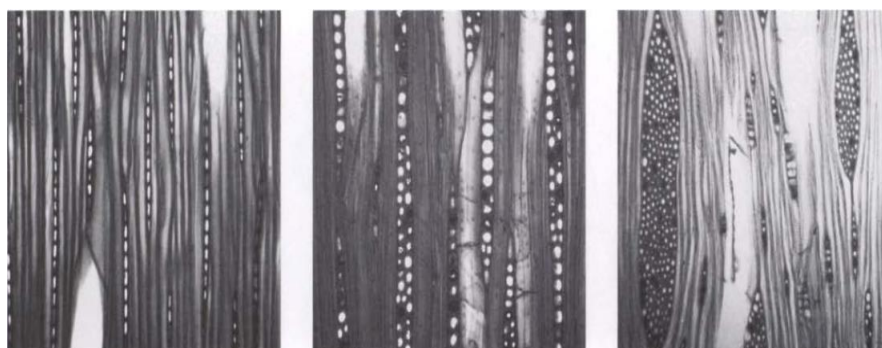


**Slika 13. Prikaz parenhimskih stanica (ph) i vlakanaca (v) u drvu hrasta [2]**

### 3.3.4 Drvni traci

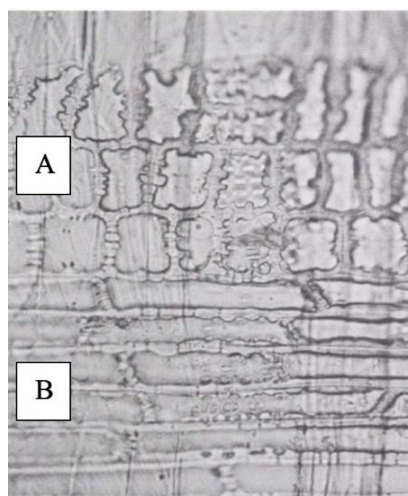
Veličina drvnih traka u listača varira među vrstama ili čak i unutar jedne vrste. Najuži drvni traci su široki samo jednu stanicu (0,1 mm), a najširi mogu imati preko 40 stanica.

Drvni trak koji se sastoji od jednog okomitog niza stanica se zove jednoredni trak, koji se sastoji od dvije stanice zove se dvoredni trak, a ako se sastoji od tri i više stanica zove se višeredni trak, slika 14.



**Slika 14. Jednoredni (A); dvoredni (B) i višeredni (C) drvni traci [10]**

U drvnim tracima parenhimske stanice mogu se pojaviti u dva oblika, kako je prikazano na slici 15. – uspravnom i izduženom obliku. Drvni traci koji sadrže obadvije vrste stanica, nazivaju se heterogeni drvni traci. Parenhimske stanice koje su orijentirane uspravno uglavnom se nalaze na rubovima drvnih traka, dok se u sredini nalaze izdužene parenhimske stanice. Homogeni traci se uglavnom sastoje od izduženih parenhimskih stanica. [2, 10, 12]



**Slika 15. Heterogeni drvni traci sastavljeni od uspravnih (A) i izduženih (B) parenhimskih stanica[10]**

## 4 MOLEKULARNA STRUKTURA DRVA

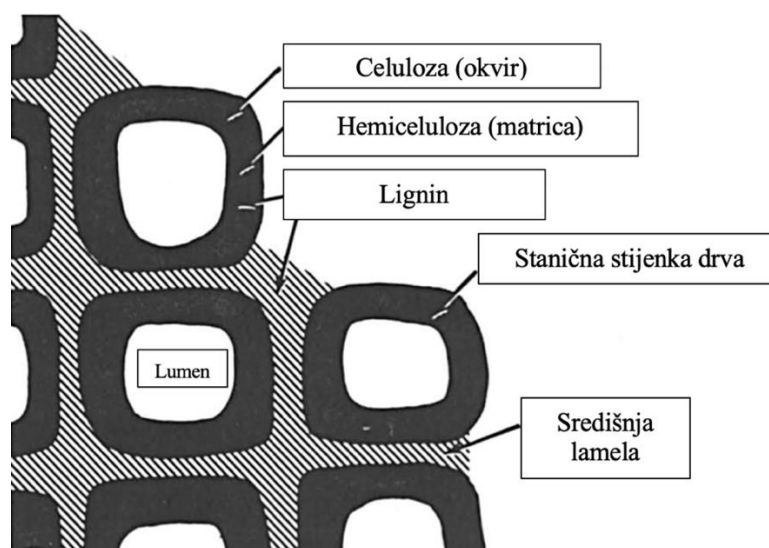
Stanična stijenka drvene stanice sastoji se u najvećoj mjeri od molekula celuloze, hemiceluloze i lignina te nešto pektina, škroba, proteina, ekstrahiranih i anorganskih tvari.

**Celuloza** je složeni ugljikohidrat ili polisaharid, koji se sastoji od 3000 ili više jedinica glukoze. Molekule celuloze su orijentirane nasumično, a povećavanjem gustoće formiraju se uređena područja, odnosno povećava se stupanj kristaliničnosti. U drvu prevladava visoko kristalinična struktura celuloze. Njezino izdvajanje iz drva je teško jer je tijesno povezana s hemicelulozom i ligninom. Celuloza je netopiva u većini otapala.

**Hemiceluloza** je drugi važan sastojak drva i također je ugljikohidratni polimer. Za razliku od celuloze koja se sastoji samo od glukoze, hemiceluloza se sastoji od glukoze i nekoliko drugih monomernih šećera topivih u vodi koji nastaju tijekom fotosinteze. U hemicelulozi je stupanj polimerizacije niži - sastoji se od kraćih molekula.

**Lignin** je trodimenzionalni polimer izgrađen od fenilpropanskih jedinica. On u strukturi drva poboljšava krutost i stabilnost stanične stijenke u odnosu na čistu celulozu. Struktura lignina se jako razlikuje od vrste do vrste drva, kao i njegov udio u suhoj drvnoj tvari.

Na slici 16 prikazan je shematski prikaz rasporeda celuloze, hemiceluloze i lignina u staničnoj stijenci.



Slika 16. Shematski prikaz rasporeda celuloze, hemiceluloze i lignina u staničnoj stijenci [12]

**Pektin, škrob i proteini** su ugljikohidratni polimeri. Pektin se nalazi u središnjoj stijenci i u membrani graničnih jažica. Pektini se nalaze u visokoj koncentraciji u staničnoj stijenci parenhima u unutarnjoj kori gdje mogu djelovati kao vezivno sredstvo. Škrob je glavni rezervni polisaharid u biljkama, ima ga malo i nalazi se u stijenci drvnih stanica.

**Ekstraktivi** su tvari koje se uglavnom sastoje od masti, masnih kiselina, fenola, terpentina, voskova, smola, smolnih kiselina i mnogih drugih organskih spojeva koji se u manjoj mjeri mogu naći u staničnoj stijenci. Uloga određenih ekstraktiva je poznata, a za neke se ne zna čemu služe. O njihovoj vrsti i količini ovisi boja, miris i trajnost drva. Neki ekstraktivi nastaju kao reakcija drva na različita mehanička i druga oštećenja, dok su neki osnova za druge kemijske tvari.

**Anorganske tvari u drvu** ili mineralne tvari su sokovi koji se nalaze u drvu. To su otopine minerala čiji sastav ovisi o tlu na kojem stablo raste. U praksi se ukupni sadržaj anorganskih tvari drva mjeri kao pepeo koji se dobije spaljivanjem organske tvari drva na temperaturi od  $575 \pm 25$  °C. Pepeo uglavnom sadrži metalne okside, a vrijednosti za komercijalne vrste drva za sadržaj pepela iznose oko 0,3-1,5% suhe tvari drva. Oko 80% ukupnog anorganskog sadržaja čine kalij, kalcij i magnezij. Osim njih tu su još i natrij, aluminij i željezo. Svi ti elementi dolaze vezani u obliku karbonata, sulfata, fosfata i silikata. U tragovima se mogu naći i mangan, olovo, cink, bakar, kobalt, nikal, torij i drugi. [2, 13]

Tablica 3 prikazuje usporedbu molekularnog sastava četinjača i listača.

**Tablica 3. Usporedba molekularnog sastava četinjača i listača [11]**

	Četinjače	Listače
Celuloza, %	40-50	45-50
Hemizeluloza:	Ksilan, %	6-10
	Glukomanan, %	5-10
Lignin, %	27-30	20-25
Smola, %	2-5	2
Mineralne tvari, %	0,2-0,5	0,5

## 5 SVOJSTVA I KARAKTERISTIKE DRVA

### 5.1 Higroskopnost

Zbog kemijskog sastava drvnog tkiva, stijenke drva su hidrofilne. Hidroksilne skupine na molekulama celuloze i hemiceluloze odgovorne su za veliki afinitet prema vodi i veliku sklonost prema stvaranju vodikovih veza. S druge strane, lignin ima relativno malo hidroksilnih skupina, što rezultira smanjenjem hidrofilnosti. Zbog svoje hidrofilnosti, drveno tkivo nastoji održati ravnotežni sadržaj vlage s okolnom atmosferom. Ako drvo uzima vodu, stanične stijenke bubre sve dok ne postanu zasićene vodom. Taj sadržaj vlage naziva se točka zasićenja drva. Suprotno tome, gubitak vode ispod točke zasićenja, uslijed difuzije i isparavanja, rezultira skupljanjem ili utezanjem drva. Sadržaj vode u staničnim stijenkama drvnih stanica ima snažan utjecaj na mehanička svojstva drva. Veći sadržaj vlage je obično obrnuto povezan s većinom svojstava čvrstoće. Kada se govori o vlazi, potrebno je definirati apsolutni i relativni udio vlage. Apsolutni udio vlage predstavlja udio vodene pare (vlage) u zraku, nevezano za okolnu temperaturu. Relativna vlažnost također mjeri vodenu paru, ali u ovisnosti o temperaturi okolnog zraka.

### 5.2 Gustoća

Gustoća drva je svojstvo koje je jedan od najkorisnijih pokazatelja predviđenog ponašanja i obradivosti drva. Najčešće se izražava u gramima po kubičnom centimetru ili u kilogramima po kubičnom metru. Gustoća drva varira ovisno o veličini stanica, debljini stanične stijenke i volumnom udjelu stanica određene vrste. Utječe na skupljanje i bubrenje drva, obradivost, teksturu površine, sposobnost lijepljenja, propusnost tekućina i plinova itd. Čvrstoća i krutost drva proporcionalno su povezani s gustoćom drva. U četinjačama gustoća ovisi o volumnom udjelu kasnog goda i prosječnom debljinom stijenke traheida. Kod listača gustoća ovisi i o volumnom omjeru drvnih vlakana i traheja.

Za gustoću drva ( $\rho_w$ ) pri određenom udjelu vlage ( $w$ ) vrijedi izraz:

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w}, \text{ g/cm}^3 \quad (1)$$

gdje je:

$\rho_w$  – gustoća drva pri određenom udjelu vlage,  $\text{g/cm}^3$

$m_w$  – masa drva pri nekom udjelu vlage, g

$V_w$  – volumen drva pri nekom udjelu vlage,  $\text{cm}^3$

Većina svojstava drva preračunava se na udio vlage od 12 %. [12, 14]

Tablica 4 prikazuje usporedbu gustoće i vlage hrasta i jasena.

**Tablica 4. Usporedba gustoće i vlage hrasta i jasena [15]**

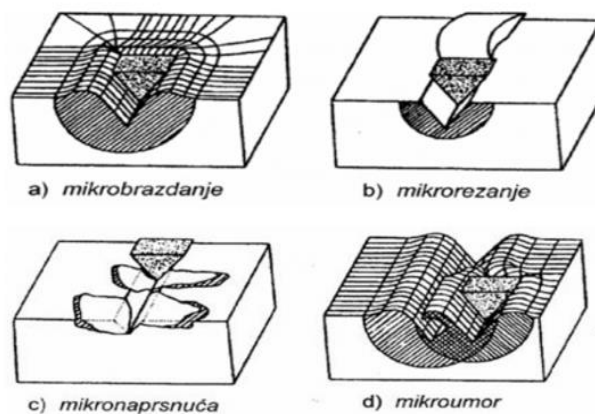
	Hrast kitnjak	Jasen
Gustoća „svježeg“ uzorka, kg/m <sup>3</sup>	1000	860
Gustoća suhog uzorka, kg/m <sup>3</sup>	570	570
Maseni udio vlage, kg	430	290
Volumni udio vlage, %	43	29
Maseni udio vlage, %	75	51

### 5.3 Abrazija

Abrazija je trošenje istiskivanjem materijala, koje je uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Do abrazijskog trošenja brušenjem dolazi kada se neravnine hrapave tvrde površine ili tvrde čestice gibaju po mekšoj površini i na taj način dolazi do oštećenja te površine plastičnom deformacijom ili do loma. Mehanizam abrazijskog trošenja je djelotvoran samo tijekom direktnog fizičkog kontakta između površina. Ako se između površina nalazi kapljeviti film, abrazijski mehanizam trošenja ne djeluje.

Abrazijsko trošenje može se, obzirom na međusobno djelovanje abradirane površine i abrazijskih čestica, podijeliti na mikrobrazdanje, mikrorezanje, mikronaprsnuća i mikroumor. Sve četiri navedene vrste abrazijskog trošenja prikazane su na slici 17. Mikrobrazdanje je odnošenje materijala koje je proporcionalno volumenu brazde koja je nastala plastičnom deformacijom prilikom prolaza jedne abrazijske čestice. Mikrorezanje je odnošenje materijala koje je jednako volumenu zareza nastalog pri prolasku abrazivne čestice. Mikronaprsnuće je odnošenje materijala mehanizmom nastanka i širenja mikropukotina s krhke površine. Mikroumor nastaje kada je materijal izložen trenutnim deformacijama, zbog čega nastaje mikropukotina koja se širi i u konačnici uzrokuje odvajanje dijelova materijala trošene površine. [16]

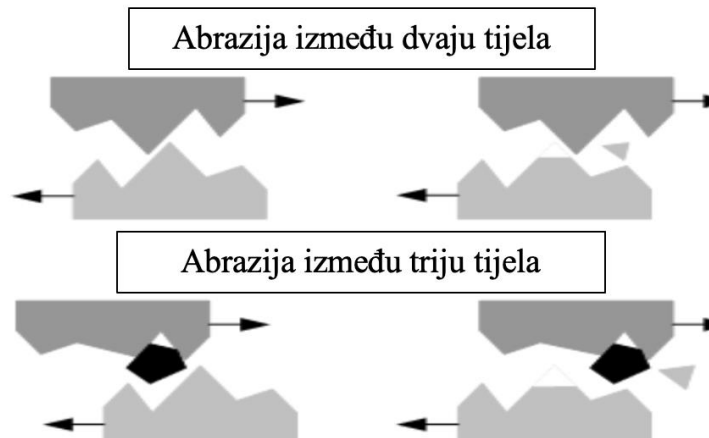




**Slika 17. Prikaz vrsta abrazijskog trošenja obzirom na djelovanje abradirane površine i abrazijskih čestica [16]**

Prema broju tijela koja sudjeluju u trošenju, abrazijsko trošenje može se podijeliti na:

- Abrazijsko trošenje između dvaju tijela - dolazi do trošenja između dvaju tijela koja se gibaju jedan nasuprot drugog, prikazano na slici 18 – gore.
- Abrazijsko trošenje između triju tijela – dolazi do trošenja između dvaju tijela koja se gibaju jedan nasuprot drugog u prisutnosti trećeg tijela između njih, prikazano na slici 18 - dolje.



**Slika 18. Prikaz abrazijskog trošenja prema broju tijela koji sudjeluju u trošenju [17]**

Kada se govori o abraziji između triju tijela, a u kontaktu su drvo i neka druga površina, potrebno je naglasiti važnost svojstava druge površine koja utječu na fiksiranje abrazivnih čestica i stoga utječe na stupanj abrazivnog trošenja drva.

Brzina trošenja materijala kod abrazijskog trošenja između triju tijela niža je od onog između dvaju tijela. Razlog tomu leži u činjenici da kod trošenja između triju tijela, čestice koje se nalaze između površina samo 10% vremena abradiraju površinu, dok 90% vremena provedu u

slobodnom gibanju. Većina problema s abrazijskim trošenjem na poljoprivrednoj i industrijskoj opremi, jesu abrazijska trošenja s tri tijela, dok se abrazijska trošenja s dva tijela prvenstveno susreću u operacijama uklanjanja materijala. Metoda za ispitivanje abrazijskog trošenja između triju tijela je metoda „Suhi pijesak – gumeni kotač“ temeljena na parametrima opisanim normom ASTM G65. [17, 18]

Američka udruga za ispitivanje materijala *American Society for Testing and Materials* (ASTM) identificira četiri vrste abrazije:

1. Abrazija niskog naprezanja (sila nije dovoljno velika za usitnjavanje abrazivnih čestica)
2. Abrazija visokog naprezanja (sila je dovoljno velika za usitnjavanje abrazivnih čestica)
3. Brušenje (abrazija je povezana s tlačnom plastičnom deformacijom)
4. Abrazija poliranja koje karakterizira snižavanje parametara visine teksture površine.

Sve četiri vrste abrazije mogu postojati kod abrazije između dvaju ili triju tijela. [19]

### 5.3.1 Metode ispitivanja otpornosti na trošenje

Da bi rezultati testiranja otpornosti na trošenje bili pouzdani i korisni, potrebno je da ispitna oprema simulira uvjete što sličnije realnim. Upravo zbog složenosti realnih uvjeta u kojima se nalaze predmeti koji se ispituju, za ispitivanje otpornosti na trošenje kaže se da je jedna od složenijih metoda ispitivanja. [20]

Postoje metode za ispitivanje različitih vrsta abrazije. Za procjenu **abrazije poliranja** najčešće se koriste metalografske tehnike i kemijsko mehaničko poliranje (engl. *chemical mechanical polish* - CMP).

Jedna od najpoznatijih metoda koja se koristi za ispitivanja **abrazije niskog naprezanja** je metoda „suhi pijesak – gumeni kotač“ (ASTM G65). Osim te metode, za ispitivanje abrazije niskog naprezanja još se može koristiti i metoda ASTM G105, koja kao abraziv koristi vodenu suspenziju pijeska (isti pijesak kao i za metodu ASTM G65), a umjesto jednog gumenog kotača, koriste se tri gumena kotača različite tvrdoće duromera. Ispitivanje abrazijskog trošenja niskog naprezanja je nedovoljno za određene primjene (npr. ispitivanje cementiranog karbida), pa je izumljena metoda slična metodi „suhi pijesak – gumeni kotač“. U toj metodi se umjesto gumenog kotača koristi čelični kotač (ASTM B 611). To ispitivanje se smatra ispitivanjem abrazije **visokog naprezanja** jer su čelični kotač i navede sile dovoljne za usitnjavanje abraziva aluminijevog oksida. Osim toga, aluminijev oksid koji se koristi u toj metodi je oštar i mnogo agresivniji od okruglog pijeska koji se koristi u metodi „suhi pijesak – gumeni kotač“ (ASTM G65).

Neki od problema s testom ASTM G65, poput varijabilnosti i dostupnosti gume i pijeska i njihovih troškova su značajni i neće nestati. Na primjer, pijesak i guma korišteni u ispitivanjima ASTM G65 i ASTM G105 dolaze isključivo od jednog dobavljača iz SAD-a. To značajno ograničava međunarodnu uporabu ovih ispitivanja. Svako ispitivanje zahtijeva oko 15 kg pijeska, a troškovi dostave mogu biti preveliki. Klorbutilna guma je također dostupna iz samo jednog izvora, a cijena je vrlo visoka. Novi kotač može se uništiti u jednom ispitivanju ako ispitni materijal sadrži tvrde faze.

U tablici 5 navedene su i uspoređene norme za abrazijska ispitivanja.

**Tablica 5. Usporedba ASTM abrazijskih ispitivanja [19]**

<b>ASTM METODE</b>	<b>OGRANIČENJA</b>	<b>PROBLEMI</b>
<b>ASTM G65</b>	Pijesak iz jednog izvora Ne djeluje na tvrde metale Nisko naprezanje	Varijabilnost gume Oštećenje gume Dostupnost pijeska
<b>ASTM G105</b>	Isto kao ASTM G65	Potrebna tri gumena kotača Dostupnost/čišćenje pijeska
<b>ASTM B611</b>	Samo za tvrde metale Visoko naprezanje	Adhezijsko trošenje od kotača
<b>ASTM G174</b>	Zahtijeva fiksnu abrazivnu traku	Ponovna upotreba abraziva

Obzirom na navedene probleme, došlo je do potrebe za razvijanjem nove metode kako bi se riješio problem gumenog kotača, te ispitala prihvatljivost upotrebe neoprena ili drugih guma, u zamjenu za klorbutilni kotač s jednim izvorom. Navedeni projekt je evoluirao u studiju koja je problem gumenog kotača riješila njegovim uklanjanjem iz sustava trošenja, te ispitala abrazijsko trošenje između dva tijela. Rezultat studije je pokazao korelaciju između ASTM G65 i ASTM G174 i omogućio pretvorbu rezultata metode ASTM G65 u ASTM G174 bez gubitka povijesnih podataka. Na slici 19 prikazan je uređaj za ispitivanje abrazijskog trošenja ASTM G174 metodom. [19]



**Slika 19. Uređaj za ispitivanje abrazijskog trošenja ASTM G174 metodom: ispitni uzorak (A) i pokretna abrazivna traka (B) [19]**

#### 5.3.1.1 Metoda „suhi pijesak – gumeni kotač“ ASTM G65

Metoda „suhi pijesak – gumeni kotač“ je metoda ispitivanja abrazijskog trošenja triju tijela. Gumeni kotač je jedno tijelo, ispitni uzorak drugo, a suhi pijesak treće tijelo. Rotirajući gumeni kotač koristi se u ispitivanju za pomicanje pijeska prema nepokretnom uzorku za ispitivanje. Gumeni kotač ne djeluje prevelikom silom koja bi dovela do lomljenja pijeska, stoga se ova metoda smatra metodom niskog naprezanja.

Metoda se sastoji od osam koraka:

1. Čišćenje i vaganje uzoraka
2. Postavljanje uzoraka i njegovo učvršćivanje u čeljust
3. Pokretanje protoka pijeska kroz mlaznicu
4. Pokretanje gumenog kotača
5. Dovođenje uzorka u kontakt s kotačem
6. Zaustavljanje motora i curenja pijeska
7. Skidanje uzoraka
8. Čišćenje i vaganje uzoraka da bi se utvrdila izgubljena masa

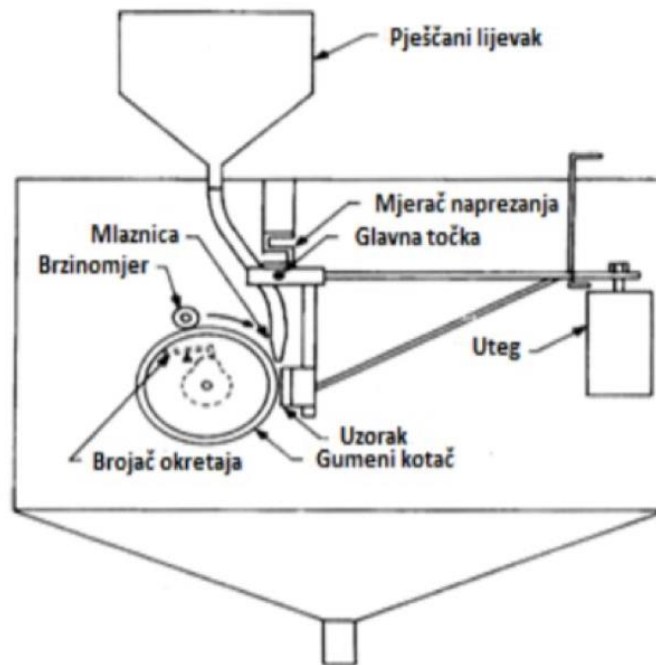
Postoji mogućnost variranja broja okretaja kotača i primijenjenog opterećenja s obzirom na vrstu ispitivanog materijala. S obzirom na to, postoje četiri vrste postupaka, prikazana u tablici 6.

**Tablica 6. Varijacije parametara sile i broja okretaja kotača [21]**

VRSTE POSTUPKA	Sila na uzorak, N	Ukupni broj okretaja kotača	Abradirana duljina, m
<b>A</b>	130	6000	4309
<b>B</b>	130	2000	1436
<b>C</b>	130	100	71,8
<b>D</b>	45	6000	4309

Osnovni uređaj u metodi „suhi pijesak – gumeni kotač“ sastoji se od čeličnog kotača s gumenim obručem dimenzija promjera 228 i širine 12,7 mm, rezervoara za pijesak koji je povezan s mlaznicom koja omogućuje protok pijeska od 250 do 350 g min<sup>-1</sup>, brojača okretaja koji zaustavlja pogonski motor nakon određenog broja okretaja i poluge koja odgovarajućom silom pritišće uzorak na kotač. Pijesak koji se koristi u ispitivanju je kvarcni pijesak oznake ASF 50/70. Tipični ispitni uzorak je pravokutnih dimenzija 25x75 mm, debljine 3 do 13 mm.

Gustoća ispitivanog materijala mora biti poznata kako bi se izračunao volumen materijala izgubljenog tijekom ispitivanja. Iz gubitka mase i gustoće materijala izračunava se gubitak volumena. Ispitivanje se ponavlja jedan ili više puta. Koeficijent varijacije između dva ili više ispitivanja materijala ne smije prelaziti 7%, kako bi se udovoljilo ASTM specifikacijama. Na slici 20 prikazan je uređaj za ispitivanje abrazijskog trošenja metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“. [19, 20]



**Slika 20. Uređaj za ispitivanja abrazijskog trošenja metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“ [21]**

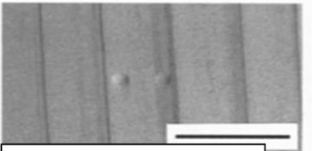
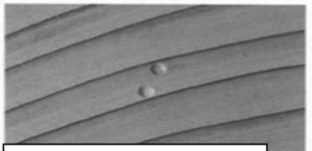
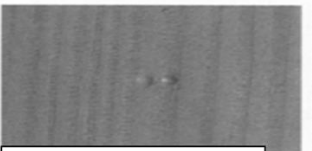
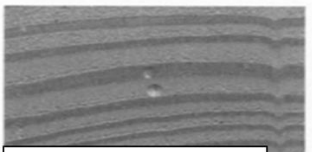
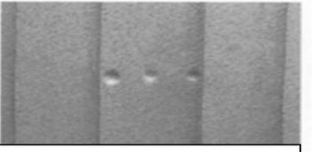
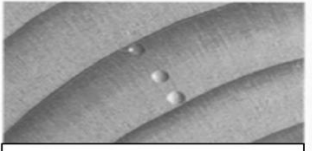
#### 5.4 Tvrdoća drva

Ispitivanje tvrdoće materijala postalo je značajno u posljednjih 300 godina, a ispitivanje tvrdoće drva je započelo u posljednjih 160 godina. Svojstvo tvrdoće materijala nije jednoznačno kao na primjer čvrstoća ili modul elastičnosti. Stoga postoji nekoliko vrsta tvrdoće, kao i mnogi testovi i skale tvrdoće. Ovisno o trajanju opterećenja mogu se razlikovati statičke i dinamičke metode ispitivanja tvrdoće materijala.

Neke od najpoznatijih metoda za ispitivanje tvrdoće za tvrde materijale su Rockwellova, Vickersova i Knoopova metoda. Utiskivač kod Rockwellove metode je dijamantni stožac, kod Vickersove metode dijamantna četverostrana piramida, a kod Knoopove metode proširena, dijamantna piramida. Za ispitivanje tvrdoće drva prikladnije su metode čiji je utiskivač zaobljen, poput kuglice. Za tu namjenu koriste se najčešće metode po Brinellu i Janki.

Svojstva tvrdoće drva direktno ovise o vrsti drva, smjeru vlakanaca i sadržaju vode. Također, na tvrdoću drva utječu nepravilnosti u građi drva poput čvorova, nepravilnog rasta godova i prisutnost smolnih kanala, i sl.

Zbog specifične strukture drva u osnovi razlikujemo tvrdoću na uzdužnim presjecima i znatno veću tvrdoću na poprečnom presjeku. Slika 21 prikazuje vrijednosti tvrdoće u ranom i kasnom dijelu goda različitih vrsta drva izmjerene Brinellovom metodom. [22 - 24]

Japanski cedar	 Rani dio goda: 0,32 Kasni dio goda: 2,49	 Rani dio goda: 1,85 Kasni dio goda: 4,11
Japanski crveni bor	 Rani dio goda: 1,92 Kasni dio goda: 7,02	 Rani dio goda: 3,87 Kasni dio goda: 10,49
Douglas jela	 Rani dio goda: 0,78 Prijelazno drvo: 1,68 Kasni dio goda: 7,58	 Rani dio goda: 2,98 Prijelazno drvo: 4,42 Kasni dio goda: 11,56

**Slika 21. Razlike u tvrdoći i ranom i kasnom dijelu [25]**

#### 5.4.1 Brinellova metoda ispitivanja tvrdoće

Brinellova metoda pripada standardu ASTM E10 iz 1984. godine. Ova metoda ispitivanja sastoji se od primjene konstantnog opterećenja, obično u rasponu od 500 do 3000 N, tijekom određenog vremenskog razdoblja (10 do 30 s) pomoću kuglice od kaljenog čelika ili od volframovog karbida promjera 5 ili 10 mm.

Tvrdoća po Brinellovoj metodi se označava s HB i računa se pomoću jednadžbe:

$$HB = \frac{P}{\pi D [D - (D^2 - d^2)^{1/2}]} \quad (2)$$

gdje je:

$D$  - promjer kuglice, mm

$d$  - promjer otiska kuglice, mm

$P$  - primijenjeno opterećenje, kg.

Treba napomenuti da se tvrdoća po Brinellu dobiva dijeljenjem primijenjenog opterećenja ( $P$ ) s površinom udubljenja (ne s projiciranom površinom). Standardna kuglica za Brinellovo

ispitivanje je promjera 10 mm i ima minimalnu tvrdoću od 850 HV. Kada se koriste kuglice manje veličine, potrebno je zajedno s oznakom navesti opterećenje i veličinu kuglice. Kuglice od kaljenog čelika mogu se koristiti za ispitivanje materijala do 444 HB, dok se kuglice od volframovog karbida preporučuju za mjerenje vrijednosti tvrdoće između 444 do 627 HB. Tipična opterećenja koje se koriste za ispitivanje Brinellovom metodom su 500, 1000, 1500, 2000, 2500 i 3000 N. Opće pravilo je da je kombinacija ispitnog opterećenja i promjera kuglice treba biti takva da je promjer udubljenja (otiska) između 25 – 60 % promjera kuglice.

Brinellova metoda uzrokuje stvaranje relativno velikih udubljenja na ispitnom predmetu, što može utjecati na daljnju upotrebu predmeta. Također, opseg tvrdoće koji se može izmjeriti pomoću ove metode je mnogo uži nego kod Rockwellove ili Vickersove metode mjerenja tvrdoće. [26]

Tablica 7 prikazuje prosječne vrijednosti tvrdoće hrasta kitnjaka koje su izmjerene metodom po Brinellu.

**Tablica 7. Tvrdoća hrasta kitnjaka po Brinellu [27]**

	Poprečni presjek, HB	Uzdužni presjek, HB
Bjeljika	37,9	17,7
Srževina	42,9	20,5



## 6 EKSPERIMENTALNI DIO RADA

### 6.1 Cilj rada

Cilj rada je odrediti kako usmjerenost strukture hrasta kitnjaka u longitudinalnom smjeru utječe na abrazijska svojstva i tvrdoću drva. S obzirom na to koji kut ispitivana površina zatvara s linijom goda, uzorci su se zakretali od 0° do 90°. To znači da su ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje i ispitivanje tvrdoće provedeni od tangencijalnog do radijalnog presjeka.

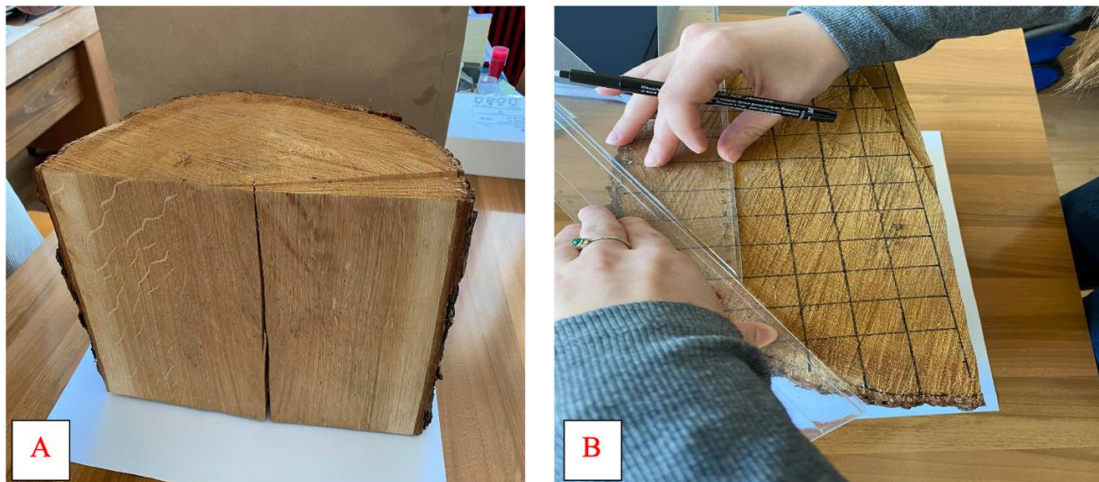
Ispitivanje abrazijskog trošenja provedeno je standardnom metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“ (ASTM G65). Ispitivanje tvrdoće provedeno je Brinellovom metodom. Svim uzorcima izračunata je gustoća i udio vlage pri ispitivanju. Obzirom da se gustoća uzoraka razlikovala, otpornost na abrazijsko trošenje određena je preko gubitka volumena.

### 6.2 Materijali za ispitivanje i priprema uzoraka

Svi potrebni uzorci pripremljeni su na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, gdje su provedena i sva navedena ispitivanja. Svi uzorci izrezani su iz polovice debla hrasta kitnjaka, čiji je promjer iznosio oko 42 cm. Na slici 22 – (A) vidi se dio debla iz kojeg su izrezani svi potrebni uzorci. Na poprečnom presjeku debla izbrojani su godovi. Ustanovljeno je da navedeno drvo ima 54 goda, a prosječna širina goda iznosila je 1,9 mm. Na poprečnom i uzdužnom presjeku, prema boji drvnog tkiva, jasno se mogla razlučiti bjeljika od srževine. Nakon utvrđivanja osnovnih informacija o makrostrukтури drva, na površini poprečnog presjeka polovice debla označeni su kvadrati dimenzija 25×25 mm.

Na slici 22 – (B) vidi se postupak označavanja kvadrata koji su bili baza uzoraka za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje. Svi kvadrati označeni su brojevima koji definiraju položaj uzorka na poprečnom presjeku pri čemu rimski brojevi predstavljaju broj retka, a arapski broj stupca u retku.

Na slici 23 vidi se raspored svih uzoraka na poprečnom presjeku debla.



**Slika 22. Dio debla hrasta kitnjaka iz kojeg su izrezani uzorci (A) i označavanje uzoraka (B)**



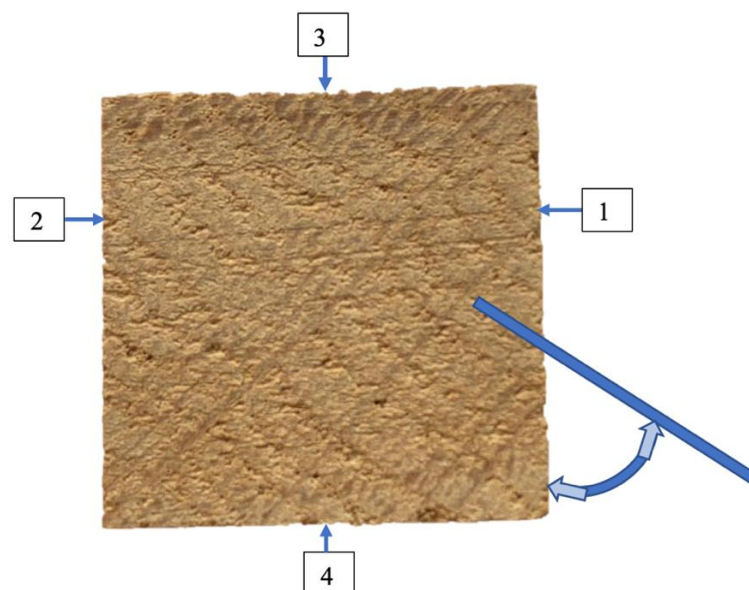
**Slika 23. Raspored uzoraka na poprečnom presjeku**

Nakon što su svi uzorci označeni brojem, uslijedilo je njihovo izrezivanje na strojnoj pili u Laboratoriju za alatne strojeve Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, slika 24. Uzorci su imali oblik pravilne četverostrane prizme dimenzija 25×25×76 mm.



**Slika 24. Rezanje uzoraka**

Na svim izrezanim uzorcima, izmjereni su kutovi koje zatvaraju četiri bočne plohe prizme dimenzija  $25 \times 76$  mm s tangentom na godove. Također je svaka navedena ploha označena brojem od 1 do 4. Na slici 25 vidi se postupak određivanja kuta i oznake ploha.



**Slika 25. Način određivanja kutova i oznake ispitnih ploha na uzorcima**



Prije vaganja, bočne plohe uzoraka izbrušene su i očetkane kako bi se uklonile sve čestice koje bi mogle utjecati na vrijednost izmjerene mase prije i nakon abradiranja, slika 26. Mjerenje mase obavljeno je u Laboratoriju za analizu metala Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, na analitičkoj vagi Ohaus Analytical Plus prikazanoj na slici 27.



**Slika 26. Brušenje i četkanje uzoraka prije vaganja**



**Slika 27. Analitička vaga Ohaus Analytical Plus**

Pobrušenim i očetkanim uzorcima izmjerene su dimenzije stranica pomičnim mjerilom prikazanim na slici 28, kako bi se mogao izračunati volumen i gustoća uzoraka.



Slika 28. Mjerenje dimenzija uzoraka

Nakon toga su svi uzorci stavljeni u peć u kojoj su sušeni 24 h na  $105 \pm 3^\circ\text{C}$  kako bi se odredio udio vlage u uzorcima i gustoća u apsolutnom suhom stanju. Na slici 29 prikazan je sušionik u kojem je provedeno sušenje uzoraka (A), uzorci pri sušenju u peći (B) i eksikator u kojem su se prenosili uzorci od peći do vage kako bi se spriječilo upijanje vlage prije vaganja (C).



Slika 29. Sušionik u kojem je provedeno sušenje uzoraka izvana (A) i iznutra (B); eksikator (C)

### 6.3 Ispitivanje abrazijskog trošenja

Ispitivanje abrazijskog trošenja je provedeno metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“ na uređaju prikazanom na slici 30. Uzorci su postavljeni i pričvršćeni u nosač kako je prikazano na slici 31–(A). Sustavom poluga uzorak je pritisnut uz gumeni kotač koji se okreće u smjeru kazaljke na satu brzinom od  $100 \text{ min}^{-1}$ . Između kotača i uzorka kroz sapnicu curi pijesak (silicijev dioksid) koji abradira površinu uzorka, slika 31 - (B) . Sila kojom su uzorci bili pritisnuti na kotač iznosila je 45 N, a trošenje površine trajalo je 30 s.

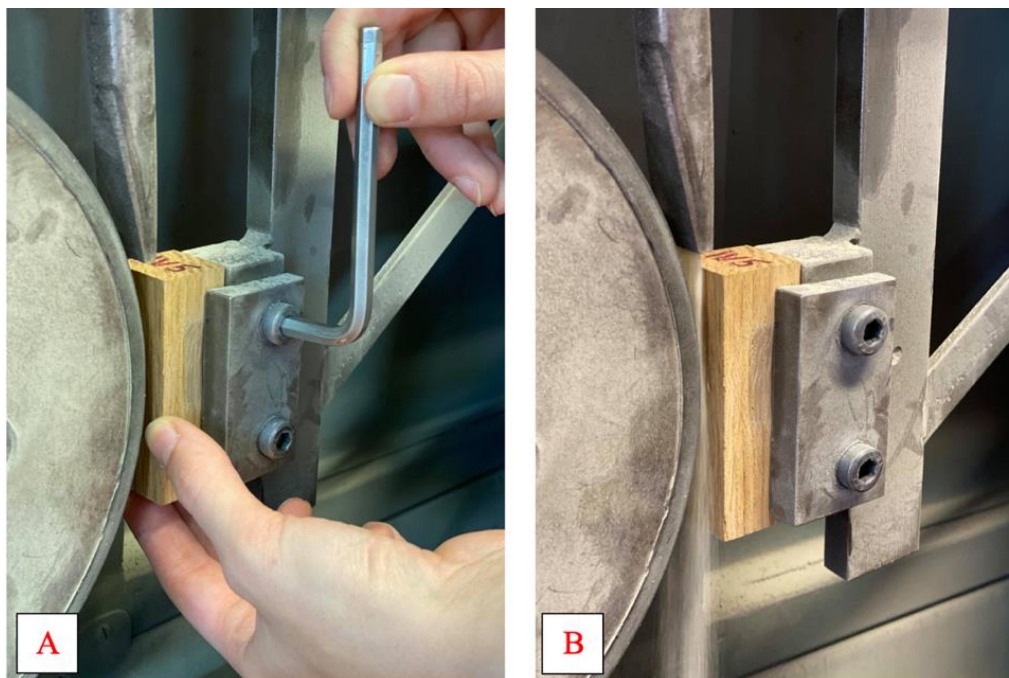
Prije i nakon trošenja izmjerena je masa uzorka i na temelju tih vrijednosti izračunat je gubitak mase pri abraziji. Opisani postupak ponovljen je na svakoj od četiri ispitivane plohe uzorka.

Prije samog vaganja, svaki uzorak je očišćen od potencijalnih čestica pijeska koje su mogle ostati u uzorcima tijekom trošenja. Čišćenje je provedeno pneumatskim kompresorom, slika 32. Na taj način su omogućeni što precizniji rezultati mjerenja mase.



Slika 30. Uređaj za ispitivanje abrazijskog trošenja





**Slika 31. Pričvrščivanje uzorka (A) i njegovo trošenje (B)**



**Slika 32. Čišćenje uzorka pneumatskim kompresorom**

#### 6.4 Ispitivanje tvrdoće po Brinellu

Ispitivanje tvrdoće provedeno je u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu prema normi HRN EN 1534:2010. Slika 33 prikazuje uređaj na kojem je provedeno ispitivanje tvrdoće. Proizvođač uređaja je VEB WPM, a model je HP250.

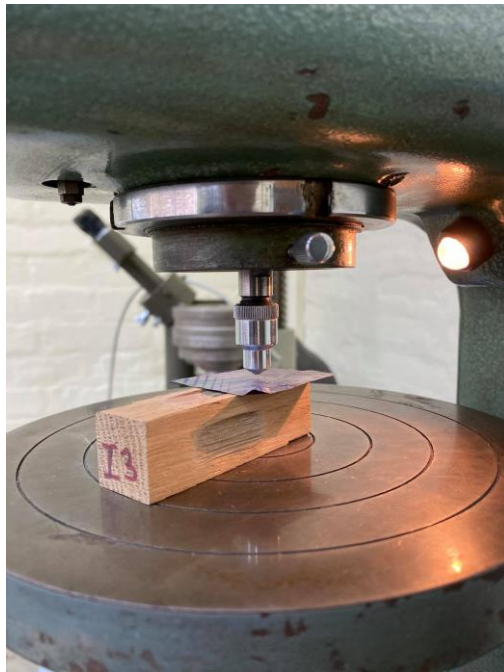
Prilikom ispitivanja, u drvo se utiskivala kuglica od kaljenog čelika, promjera 5 mm. Sila kojom se kuglica utiskivala u drvo iznosila je 490,5 N. Prirast sile je bio postupan, a maksimalna sila postignuta je nakon  $15 \pm 3$  sekunde. Maksimalno opterećenje zadržalo se 30 sekundi, nakon čega je slijedilo rasterećenje. Kao što prikazuje slika 34, prilikom ispitivanja je korišten indigo papir da bi se otisak kuglice bolje vidio. Primjena indigo papira ne utječe na rezultate ispitivanja jer je papir vrlo tanak.

Tvrdoća je mjerena na istim plohama na kojima je ispitana otpornost na abrazijsko trošenje. Na svakoj plohi napravljena su dva mjerenja tvrdoće, ukupno po 8 mjerenja na svakom uzorku.



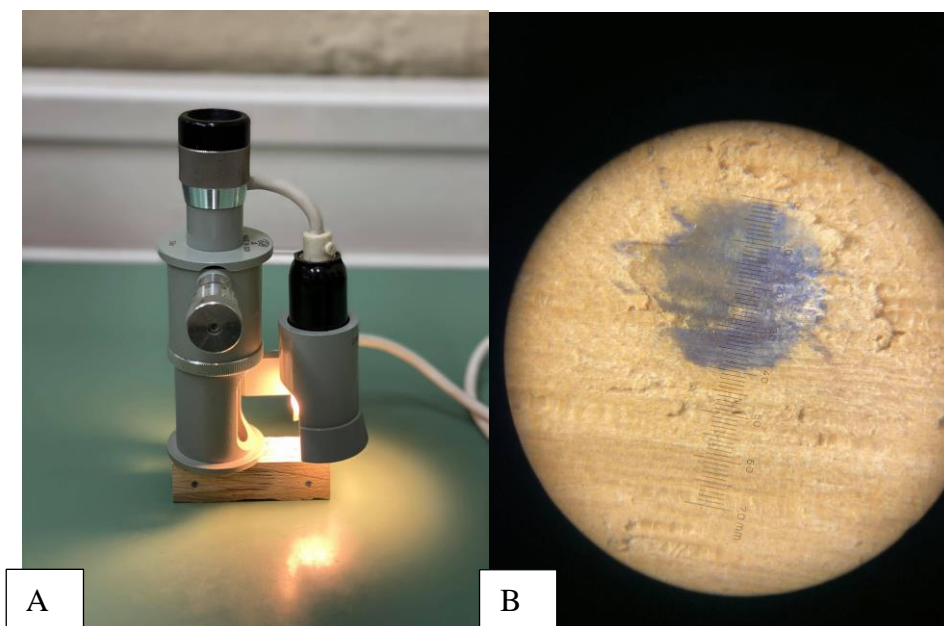
Slika 33. Uređaj za ispitivanje tvrdoće Brinellovom metodom





**Slika 34. Prikaz uzorka, indigo papira i kaljene kuglice izbliza**

Mjerenje promjera otiska kuglice provedeno je pomoću uređaja prikazanim na slici 35 - (A). Na slici 35 - (B) prikazan je otisak kuglice u drvu snimljen kroz okular uređaja za mjerenje promjera.



**Slika 35. Prikaz uređaja za očitavanje otiska kuglice (A) i otisak kuglice u drvu kroz uređaj za očitavanje**

### 6.5 Rezultati mjerenja udjela vlage i gustoće uzoraka

Tablice 8 do 12 prikazuju rezultate mase prije i odmah poslije sušenja. Udio vlage ( $w$ ) izračunat je preko izraza:

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100, \quad \% \quad (3)$$

gdje je:

$m_1$  - masa prije sušenja

$m_2$  – masa poslije sušenja.

Gustoća pri nekom udjelu vlage ( $\rho_w$ ) određuje se prema izrazu:

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w}, \quad \text{g/cm}^3 \quad (4)$$

gdje je:

$m_w$ - masa uzorka pri nekom udjelu vlage

$V_w$ - volumen uzorka pri nekom udjelu vlage

Dobivene vrijednosti za gustoću preračunate su na vrijednost gustoće za udio vlage od 12 % ( $\rho_{12}$ ) prema izrazu:

$$\rho_{12} = \rho_w \times \frac{1 + 0,01 \times (12 - w)}{1 + 0,01 \times (12 - w) \times \frac{\rho_w}{\rho_{H_2O}}}, \quad \text{g/cm}^3 \quad (5)$$

**Tablica 8. Masa prije ( $m_1$ ) i poslije sušenja ( $m_2$ ), udio vlage ( $w$ ), volumen ( $V_w$ ), gustoća pri određenom udjelu vlage ( $\rho_w$ ) i gustoća pri udjelu vlage od 12% ( $\rho_{12}$ ) za red I**

Uzorak	$m_1$ , g	$m_2$ , g	$w$ , %	$V_w$ , cm <sup>3</sup>	$\rho_w$ , g/cm <sup>3</sup>	$\rho_{12}$ , g/cm <sup>3</sup>
I1	29,7631	27,6119	7,228	49	0,602	0,613
I3	33,1480	30,6851	7,430	49	0,678	0,688
I4	34,6615	32,1103	7,360	49	0,709	0,718
I5	35,6568	32,9788	7,510	48	0,740	0,749
I9	35,7532	33,1180	7,371	48	0,748	0,757
I10	32,6868	30,2347	7,502	45	0,721	0,730
I11	31,4158	29,0921	7,397	46	0,683	0,693
I12	29,1076	28,9845	0,423	47	0,620	0,645

**Tablica 9. Masa prije ( $m_1$ ) i poslije sušenja ( $m_2$ ), udio vlage ( $w$ ), volumen ( $V_w$ ), gustoća pri određenom udjelu vlage ( $\rho_w$ ) i gustoća pri udjelu vlage od 12% ( $\rho_{12}$ ) za red II**

Uzorak	$m_1$ , g	$m_2$ , g	$w$ , %	$V_w$ , cm <sup>3</sup>	$\rho_w$ , g/cm <sup>3</sup>	$\rho_{12}$ , g/cm <sup>3</sup>
II1	29,3356	27,1925	7,305	50	0,582	0,593
II3	32,9283	30,4316	7,582	49	0,676	0,686
II4	33,6218	31,0485	7,654	49	0,688	0,697
II5	33,1133	30,5913	7,616	48	0,691	0,700
II6	33,6771	31,1410	7,531	47	0,720	0,729
II7	35,4997	32,8004	7,604	47	0,750	0,758
II8	37,7829	34,9784	7,423	48	0,792	0,799
II9	35,4827	32,8266	7,486	48	0,745	0,753
II10	32,8021	30,4193	7,264	46	0,710	0,719
II11	32,7425	30,3587	7,280	49	0,674	0,684

**Tablica 10. Masa prije ( $m_1$ ) i poslije sušenja ( $m_2$ ), udio vlage ( $w$ ), volumen ( $V_w$ ), gustoća pri određenom udjelu vlage ( $\rho_w$ ) i gustoća pri udjelu vlage od 12% ( $\rho_{12}$ ) za red III**

Uzorak	$m_1$ , g	$m_2$ , g	$w$ , %	$V_w$ , cm <sup>3</sup>	$\rho_w$ , g/cm <sup>3</sup>	$\rho_{12}$ , g/cm <sup>3</sup>
III2	30,3615	28,1318	7,344	49	0,614	0,625
III3	32,8837	30,4603	7,370	49	0,675	0,685
III4	32,2766	29,8605	7,486	48	0,666	0,676
III5	30,6232	28,3521	7,416	47	0,657	0,667
III6	31,0543	28,7240	7,504	47	0,656	0,665
III7	33,4631	30,9830	7,411	47	0,716	0,725
III8	33,7777	31,3366	7,227	47	0,712	0,721
III9	34,2073	31,7491	7,186	48	0,712	0,722
III10	30,8129	28,5755	7,261	47	0,658	0,668
III11	30,7961	28,5935	7,152	49	0,634	0,645
III12	29,3573	27,2312	7,242	50	0,589	0,600

**Tablica 11. Masa prije ( $m_1$ ) i poslije sušenja ( $m_2$ ), udio vlage ( $w$ ), volumen ( $V_w$ ), gustoća pri određenom udjelu vlage ( $\rho_w$ ) i gustoća pri udjelu vlage od 12% ( $\rho_{12}$ ) za red IV**

Uzorak	$m_1$ , g	$m_2$ , g	$w$ , %	$V_w$ , cm <sup>3</sup>	$\rho_w$ , g/cm <sup>3</sup>	$\rho_{12}$ , g/cm <sup>3</sup>
IV2	27,9137	25,8978	7,222	50	0,558	0,570
IV3	31,1693	28,9204	7,215	49	0,634	0,645
IV4	33,2146	30,7596	7,391	49	0,676	0,686
IV5	30,5391	28,2771	7,407	46	0,662	0,672
IV6	32,1003	29,7553	7,305	49	0,661	0,672
IV7	32,1333	29,7691	7,357	48	0,676	0,686
IV8	32,1015	29,7508	7,323	47	0,678	0,688
IV9	31,5210	29,7553	5,602	48	0,652	0,666
IV10	29,3504	27,2047	7,311	46	0,637	0,648
IV11	28,3941	26,3663	7,142	49	0,576	0,587

**Tablica 12. Masa prije ( $m_1$ ) i poslije sušenja ( $m_2$ ), udio vlage ( $w$ ), volumen ( $V_w$ ), gustoća pri određenom udjelu vlage ( $\rho_w$ ) i gustoća pri udjelu vlage od 12% ( $\rho_{12}$ ) za red V**

Uzorak	$m_1$ , g	$m_2$ , g	$w$ , %	$V_w$ , cm <sup>3</sup>	$\rho_w$ , g/cm <sup>3</sup>	$\rho_{12}$ , g/cm <sup>3</sup>
V4	30,0227	27,8260	7,317	49	0,619	0,629
V5	31,4876	29,1594	7,394	46	0,681	0,691
V6	32,3071	29,9228	7,380	49	0,660	0,670
V7	30,2596	28,0260	7,381	48	0,631	0,641
V8	30,2770	28,0295	7,423	47	0,640	0,650
V9	28,3230	26,2423	7,346	48	0,584	0,595

Udio vlage u uzorcima kreće se u rasponu od 7,142% do 7,654%, a srednja vrijednost iznosi 7,369%. Najmanja izmjerena vrijednost gustoće pri udjelu vlage od 12% iznosila je 0,570 g/cm<sup>3</sup>, a najveća 0,758 g/mm<sup>3</sup>. Srednja vrijednost gustoće je pri udjelu vlage od 12% 0,678 g/cm<sup>3</sup>.

### 6.6 Rezultati mjerenja gubitka mase pri abrazijskom trošenju

U tablicama 13 do 17 prikazani su rezultati mjerenja abradirane mase za svaku ispitivanu plohu na svim uzorcima. Gubitak mase ( $\Delta m_1$ ) računao se prema izrazu:

$$\Delta m_1 = m_{ab0} - m_{ab1} \quad (6)$$

gdje je:

$m_{ab0}$  – masa prije abrazijskog trošenja

$m_{ab1}$  – masa nakon abrazijskog trošenja.

Ukupna potrošena masa ( $\Delta m_{uk}$ ) je izračunata prema izrazu:

$$\Delta m_{uk} = \Delta m_1 + \Delta m_2 + \Delta m_3 + \Delta m_4 \quad (7)$$

gdje su:

$\Delta m_1$ ,  $\Delta m_2$ ,  $\Delta m_3$  i  $\Delta m_4$  potrošene mase s ploha ispitnog uzorka.

**Tablica 13. Gubitak mase na pojedinim plohama i ukupni gubitak mase uzoraka za red I**

Uzorak	$\Delta m_1$ , g	$\Delta m_2$ , g	$\Delta m_3$ , g	$\Delta m_4$ , g	$\Delta m_{uk}$ , g
I1	0,1395	0,1442	0,1231	0,1352	0,5420
I3	0,1383	0,1284	0,1313	0,1452	0,5432
I4	0,1318	0,113	0,1289	0,1350	0,5087
I5	0,1155	0,1051	0,1234	0,1340	0,4780
I9	0,1212	0,1193	0,1345	0,1347	0,5097
I10	0,1221	0,1193	0,1333	0,1152	0,4899
I11	0,1244	0,1356	0,1427	0,1432	0,5459
I12	0,1545	0,0992	0,1372	0,1195	0,5104

**Tablica 14. Gubitak mase na pojedinim ploham i ukupni gubitak mase uzoraka za red II**

Uzorak	$\Delta m_1, \text{g}$	$\Delta m_2, \text{g}$	$\Delta m_3, \text{g}$	$\Delta m_4, \text{g}$	$\Delta m_{\text{uk}}, \text{g}$
II1	0,1167	0,1273	0,1091	0,1377	0,4908
II3	0,1377	0,1491	0,1382	0,1475	0,5725
II4	0,1374	0,1266	0,1558	0,1586	0,5784
II5	0,1342	0,1368	0,1324	0,1462	0,5496
II6	0,1357	0,1544	0,1199	0,1232	0,5332
II7	0,1322	0,1249	0,1174	0,1182	0,4927
II8	0,1277	0,1132	0,1325	0,1225	0,4959
II9	0,1279	0,1140	0,1400	0,1364	0,5183
II10	0,1478	0,1268	0,1515	0,1469	0,5730
II11	0,1482	0,1209	0,1467	0,1308	0,5466

**Tablica 15. Gubitak mase na pojedinim ploham i ukupni gubitak mase uzoraka za red III**

Uzorak	$\Delta m_1, \text{g}$	$\Delta m_2, \text{g}$	$\Delta m_3, \text{g}$	$\Delta m_4, \text{g}$	$\Delta m_{\text{uk}}, \text{g}$
III2	0,1388	0,1367	0,1306	0,1532	0,5593
III3	0,1563	0,1337	0,1334	0,1492	0,5726
III4	0,1473	0,1541	0,1384	0,1602	0,6000
III5	0,1584	0,1553	0,1330	0,1466	0,5933
III6	0,1664	0,1340	0,1388	0,1449	0,5841
III7	0,1325	0,1305	0,1063	0,1164	0,4857
III8	0,1511	0,1357	0,1276	0,1295	0,5439
III9	0,1516	0,1546	0,1345	0,1468	0,5875
III10	0,1505	0,1374	0,1581	0,1654	0,6114
III11	0,1507	0,1321	0,1366	0,1408	0,5602
III12	0,1456	0,1361	0,1536	0,1380	0,5733

**Tablica 16. Gubitak mase na pojedinim ploham i ukupni gubitak mase uzoraka za red IV**

Uzorak	$\Delta m_1, \text{g}$	$\Delta m_2, \text{g}$	$\Delta m_3, \text{g}$	$\Delta m_4, \text{g}$	$\Delta m_{\text{uk}}, \text{g}$
IV2	0,1296	0,1183	0,1234	0,1298	0,5011
IV3	0,1469	0,1358	0,1316	0,1402	0,5545
IV4	0,1416	0,1199	0,1253	0,1562	0,5430
IV5	0,1509	0,1539	0,1372	0,1540	0,5960
IV6	0,1653	0,1327	0,1403	0,1443	0,5826
IV7	0,1451	0,1273	0,1602	0,1364	0,5690
IV8	0,1429	0,1217	0,1240	0,1296	0,5182
IV9	0,1627	0,1467	0,1406	0,1509	0,6009
IV10	0,1482	0,1378	0,1268	0,1456	0,5584
IV11	0,1231	0,0971	0,1159	0,1158	0,4519

**Tablica 17. Gubitak mase na pojedinim ploham i ukupni gubitak mase uzoraka za red V**

Uzorak	$\Delta m_1, \text{g}$	$\Delta m_2, \text{g}$	$\Delta m_3, \text{g}$	$\Delta m_4, \text{g}$	$\Delta m_{\text{uk}}, \text{g}$
V4	0,1332	0,1258	0,1017	0,1531	0,5138
V5	0,1734	0,1238	0,1276	0,1457	0,5705
V6	0,1487	0,1359	0,1285	0,1528	0,5659
V7	0,1576	0,1296	0,1392	0,1543	0,5807
V8	0,1506	0,1445	0,1250	0,1358	0,5559
V9	0,1145	0,1444	0,1173	0,1504	0,5266

Kako je cilj ovog rada bio dovesti u korelaciju otpornost na abrazijsko trošenje i kut koji zatvaraju abradirana površina i tangenta na god u longitudinalnom smjeru, u tablici 18 prikazane su vrijednosti gubitka mase za određene kutove. Za neke kutove bilo je više od jednog mjerenja, pa su izračunate i upisane srednje vrijednosti gubitka mase.

**Tablica 18. Prosječni gubitak mase ( $\Delta m_i$ ) za određeni kut**

$\alpha_i, ^\circ$	$\Delta m_i, \text{g}$	$\alpha_i, ^\circ$	$\Delta m_i, \text{g}$	$\alpha_i, ^\circ$	$\Delta m_i, \text{g}$
0	0,1295	33	0,1281	56	0,1454
3	0,1334	34	0,1507	58	0,1454
4	0,1212	35	0,1346	59	0,1411
7	0,1236	36	0,1467	60	0,1366
8	0,1193	37	0,1434	61	0,1364
9	0,1255	38	0,1292	62	0,1363
10	0,1364	39	0,1327	63	0,1416
13	0,1167	41	0,1296	64	0,1456
18	0,1351	42	0,1403	65	0,1349
19	0,1528	43	0,1418	68	0,1501
20	0,1449	44	0,1276	69	0,1417
21	0,1358	45	0,1298	71	0,1445
22	0,1319	46	0,1287	72	0,1367
23	0,1372	47	0,1492	73	0,1345
24	0,1602	48	0,1364	74	0,1475
25	0,1197	49	0,1399	78	0,1333
27	0,1466	50	0,1450	79	0,1384
28	0,1337	51	0,1313	82	0,1308
29	0,1199	52	0,1448	88	0,1343
30	0,1225	53	0,1436	89	0,1361
31	0,1173	54	0,1305	90	0,1315
32	0,1374	55	0,1512		

Kako korištena norma (ASTM G65) propisuje da se rezultati mjerenja zbog razlike u gustoći iskazuju kao potrošeni volumen u  $\text{mm}^3$ , izmjereni gubitak mase za svaki uzorak podijeljen je s pripadajućom gustoćom.

Tablica 19 prikazuje prosječni gubitak volumena za pripadajući kut.



Tablica 19. Prosječni gubitak volumena ( $\Delta V$ ) za određeni kut

$\alpha_i, \bullet$	$\Delta V, \text{mm}^3$	$\alpha_i, \circ$	$\Delta V, \text{mm}^3$	$\alpha_i, \circ$	$\Delta V, \text{mm}^3$
0	196,59	33	195,59	56	218,94
3	196,54	34	237,70	58	211,45
4	161,92	35	196,34	59	241,95
7	170,98	36	238,28	60	215,46
8	159,39	37	217,88	61	183,09
9	196,80	38	193,41	62	214,63
10	201,65	39	201,12	63	207,76
13	200,55	41	222,42	64	247,07
18	206,90	42	212,23	65	203,41
19	231,40	43	205,75	68	228,45
20	220,99	44	179,20	69	218,00
21	212,24	45	195,70	71	225,84
22	191,00	46	204,06	72	205,92
23	207,11	47	220,89	73	179,69
24	236,83	48	210,77	74	218,11
25	169,16	49	205,60	78	191,40
27	223,17	50	200,55	79	191,72
28	202,26	51	222,07	82	194,15
29	166,49	52	220,34	88	189,24
30	171,94	53	200,66	89	230,95
31	200,86	54	182,14	90	201,77
32	208,76	55	226,47		

## 6.7 Rezultati mjerenja tvrdoće HB

U tablicama 20 do 24 prikazane su vrijednosti izmjerenih tvrdoća svih uzoraka. Mjerenje tvrdoće obavljeno je dva puta na svakoj ispitivanoj plohi uzorka, ukupno 8 mjerenja po uzorku. U tablicama su navedeni i pripadajući kutovi ispitivanih ploha.

**Tablica 20. Rezultati mjerenja tvrdoće HB uzoraka za red I**

Uzorak	HB		$\alpha_i, ^\circ$	Uzorak	HB		$\alpha_i, ^\circ$
	1. mj.	2. mj.			1. mj.	2. mj.	
I1	38,2	43,7	0	I9	54,0	54,0	4
I1	43,7	43,7	0	I9	46,8	43,7	8
I1	35,7	38,2	90	I9	40,8	40,8	73
I1	33,4	43,7	90	I9	40,8	43,7	79
I3	54,0	38,2	3	I10	54,0	54,0	0
I3	62,5	46,8	3	I10	33,4	43,7	0
I3	54,0	40,8	78	I10	43,7	67,4	90
I3	35,7	62,5	78	I10	38,2	62,5	90
I4	46,8	43,7	7	I11	50,2	67,4	0
I4	40,8	54,0	9	I11	46,8	46,8	0
I4	43,7	50,2	79	I11	54,0	62,5	90
I4	43,7	54,0	88	I11	46,8	35,7	90
I5	40,8	62,5	7	I12	46,8	43,7	0
I5	54,0	58,0	0	I12	43,7	43,7	0
I5	40,8	46,8	78	I12	35,7	40,8	90
I5	54,0	54,0	18	I12	50,2	29,2	90

Tablica 21. Rezultati mjerenja tvrdoće HB uzoraka za red II

Uzorak	HB		$\alpha_i, ^\circ$	Uzorak	HB		$\alpha_i, ^\circ$
	1. mj.	2. mj.			1. mj.	2. mj.	
II1	38,2	40,8	13	II7	43,7	54,0	45
II1	46,8	50,2	18	II7	62,5	54,0	38
II1	40,8	38,2	63	II7	58,0	78,9	50
II1	43,7	43,7	59	II7	40,8	54,0	58
II2	46,8	46,8	28	II8	54,0	50,2	22
II2	43,7	50,2	18	II8	58,0	50,2	25
II2	23,8	43,7	58	II8	46,8	46,8	42
II2	54,0	58,0	74	II8	38,2	62,5	61
II3	35,7	31,2	43	II9	43,7	38,2	49
II3	38,2	43,7	49	II9	54,0	54,0	35
II3	54,0	50,2	49	II9	40,8	43,7	79
II3	38,2	43,7	58	II9	62,5	58,0	63
II4	40,8	33,4	46	II10	54,0	46,8	50
II4	40,8	58,0	52	II10	54,0	46,8	35
II4	40,8	43,7	52	II10	40,8	33,4	42
II4	33,4	27,3	43	II10	54,0	62,5	82
II5	43,7	35,7	53	II11	46,8	50,2	50
II5	43,7	46,8	50	II11	62,5	31,2	35
II5	50,2	40,8	29	II11	43,7	62,5	42
II5	58,0	43,7	39	II11	43,7	43,7	82
II6	46,8	46,8	63				
II6	43,7	50,2	88				
II6	23,8	43,7	30				
II6	54,0	58,0	0				

Tablica 22. Rezultati mjerenja tvrdoće HB uzoraka za red III

Uzorak	HB		$\alpha_i, ^\circ$	Uzorak	HB		$\alpha_i, ^\circ$
	1. mj.	2. mj.			1. mj.	2. mj.	
III2	33,4	40,8	36	III8	38,2	54,0	49
III2	31,2	33,4	48	III8	43,7	31,2	58
III2	31,2	35,7	49	III8	43,7	38,2	44
III2	33,4	43,7	52	III8	54,0	38,2	56
III3	38,2	35,7	42	III9	38,2	43,7	53
III3	35,7	31,2	49	III9	40,8	46,8	55
III3	31,2	31,2	49	III9	40,8	38,2	38
III3	31,2	43,7	47	III9	40,8	38,2	37
III4	40,8	46,8	45	III10	50,2	43,7	38
III4	54,0	43,7	62	III10	43,7	43,7	32
III4	31,2	33,4	28	III10	43,7	38,2	55
III4	31,2	40,8	39	III10	38,2	58,0	52
III5	43,7	31,2	58	III11	46,8	38,2	34
III5	31,2	40,8	63	III11	35,7	46,8	33
III5	43,7	31,2	37	III11	43,7	38,2	60
III5	38,2	35,7	27	III11	38,2	46,8	55
III6	25,5	40,8	56	III12	40,8	46,8	64
III6	43,7	40,8	72	III12	35,7	58,0	89
III6	35,7	35,7	22	III12	43,7	40,8	18
III6	38,2	50,2	20	III12	43,7	43,7	9
III7	38,2	31,2	63				
III7	38,2	50,2	54				
III7	46,8	38,2	18				
III7	43,7	58,0	22				

Tablica 23. Rezultati mjerenja tvrdoće HB uzoraka za red IV

Uzorak	HB		$\alpha_i, ^\circ$	Uzorak	HB		$\alpha_i, ^\circ$
	1. mj.	2. mj.			1. mj.	2. mj.	
IV2	40,8	54,0	41	IV7	40,8	43,7	65
IV2	43,7	35,7	42	IV7	31,2	40,8	72
IV2	43,7	38,2	41	IV7	43,7	43,7	24
IV2	31,2	35,7	51	IV7	38,2	38,2	10
IV3	40,8	38,2	45	IV8	43,7	46,8	88
IV3	46,8	38,2	41	IV8	38,2	33,4	65
IV3	35,7	31,2	38	IV8	43,7	38,2	33
IV3	58,0	50,2	56	IV8	54,0	50,2	38
IV4	31,2	40,8	58	IV9	31,2	46,8	58
IV4	43,7	38,2	48	IV9	46,8	50,2	48
IV4	38,2	40,8	25	IV9	35,7	40,8	37
IV4	54,0	43,7	35	IV9	40,8	40,8	36
IV5	40,8	43,7	62	IV10	43,7	54,0	51
IV5	50,2	35,7	68	IV10	31,2	38,2	65
IV5	33,4	38,2	23	IV10	58,0	40,8	52
IV5	31,2	38,2	52	IV10	33,4	38,2	39
IV6	38,2	40,8	68	IV11	27,3	43,7	46
IV6	46,8	43,7	69	IV11	27,3	31,2	45
IV6	33,4	40,8	18	IV11	33,4	38,2	38
IV6	38,2	35,7	22	IV11	25,5	31,2	51

Tablica 24. Rezultati mjerenja tvrdoće HB uzoraka za red V

Uzorak	HB		$\alpha_i, ^\circ$	Uzorak	HB		$\alpha_i, ^\circ$
	1. mj.	2. mj.			1. mj.	2. mj.	
<b>V4</b>	<b>43,7</b>	<b>40,8</b>	<b>48</b>	<b>V7</b>	<b>38,2</b>	<b>43,7</b>	<b>68</b>
<b>V4</b>	<b>35,7</b>	<b>40,8</b>	<b>62</b>	<b>V7</b>	<b>40,8</b>	<b>50,2</b>	<b>90</b>
<b>V4</b>	<b>29,2</b>	<b>31,2</b>	<b>39</b>	<b>V7</b>	<b>40,8</b>	<b>58,0</b>	<b>0</b>
<b>V4</b>	<b>43,7</b>	<b>46,8</b>	<b>37</b>	<b>V7</b>	<b>35,7</b>	<b>50,2</b>	<b>0</b>
V5	43,7	62,5	63	V8	31,2	43,7	69
V5	50,2	46,8	68	V8	33,4	31,2	71
V5	43,7	54,0	30	V8	58,0	40,8	28
V5	35,7	50,2	48	V8	43,7	40,8	21
<b>V6</b>	<b>35,7</b>	<b>43,7</b>	<b>72</b>	<b>V9</b>	<b>35,7</b>	<b>46,8</b>	<b>62</b>
<b>V6</b>	<b>31,2</b>	<b>43,7</b>	<b>90</b>	<b>V9</b>	<b>31,2</b>	<b>33,4</b>	<b>59</b>
<b>V6</b>	<b>43,7</b>	<b>33,4</b>	<b>0</b>	<b>V9</b>	<b>35,7</b>	<b>35,7</b>	<b>31</b>
<b>V6</b>	<b>38,2</b>	<b>40,8</b>	<b>19</b>	<b>V9</b>	<b>40,8</b>	<b>38,2</b>	<b>36</b>

U tablici 25 prikazane su srednje vrijednosti tvrdoće za određene kutove.

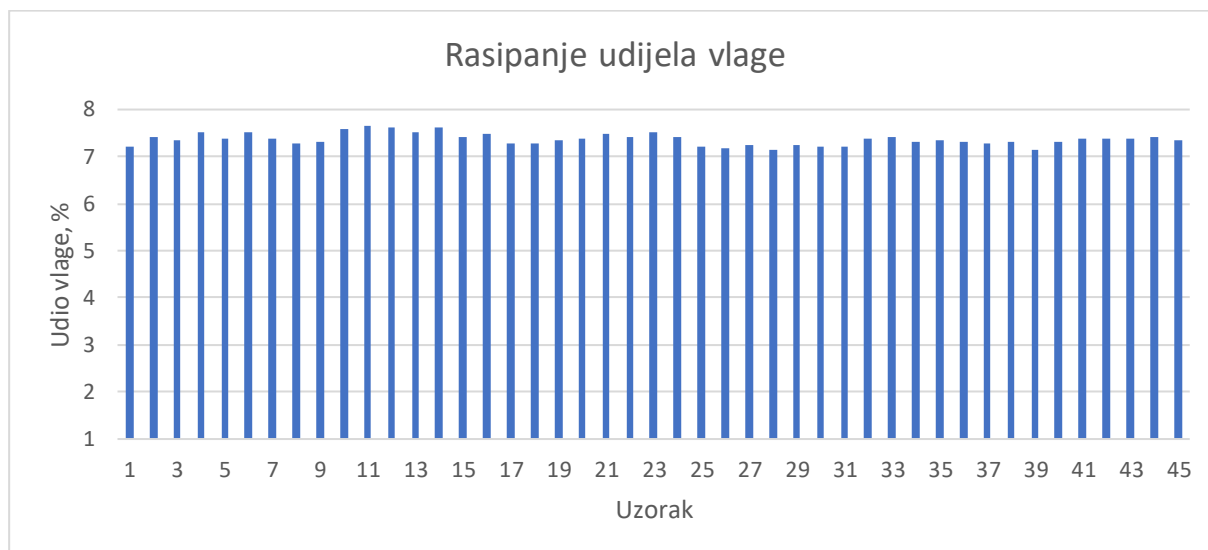
Tablica 25. Rezultati ukupne prosječne tvrdoće za određeni kut

$\alpha_i, ^\circ$	Srednja vrijednost tvrdoće HB	$\alpha_i, ^\circ$	Srednja vrijednost tvrdoće HB	$\alpha_i, ^\circ$	Srednja vrijednost tvrdoće HB
0	46,6	33	41,1	56	44,5
3	50,4	34	42,5	58	39,3
4	54,0	35	48,7	59	38,0
7	48,5	36	39,2	60	40,9
8	45,3	37	40,1	61	60,3
9	45,6	38	43,7	62	42,7
10	38,2	39	38,2	63	45,1
13	39,5	41	43,6	64	43,8
18	45,2	42	43,0	65	37,6
19	39,5	43	31,9	68	43,0
20	44,2	44	40,9	69	41,4
21	42,3	45	41,2	71	32,3
22	41,1	46	36,3	72	39,3
23	35,8	47	37,5	73	40,8
24	43,7	48	41,4	74	56,0
25	46,7	49	41,1	78	46,8
27	36,9	50	46,9	79	42,1
28	42,9	51	36,9	82	43,7
29	45,5	52	43,7	88	50,8
30	58,7	53	40,3	89	46,9
31	35,7	54	44,2	90	44,2
32	43,7	55	42,4		

## 6.8 Analiza rezultata

### 6.8.1 Analiza rezultata mjerenja gustoće

Dijagram na slici 36 prikazuje rasipanje vrijednosti za udio vlage u uzorcima na kojima je ispitana otpornost na abrazijsko trošenje i tvrdoća. Rasipanja rezultata nisu velika. Može se uočiti povezanost udjela vlage s pozicijom uzorka u poprečnom presjeku debla, s obzirom na srževinu i bjeljiku.

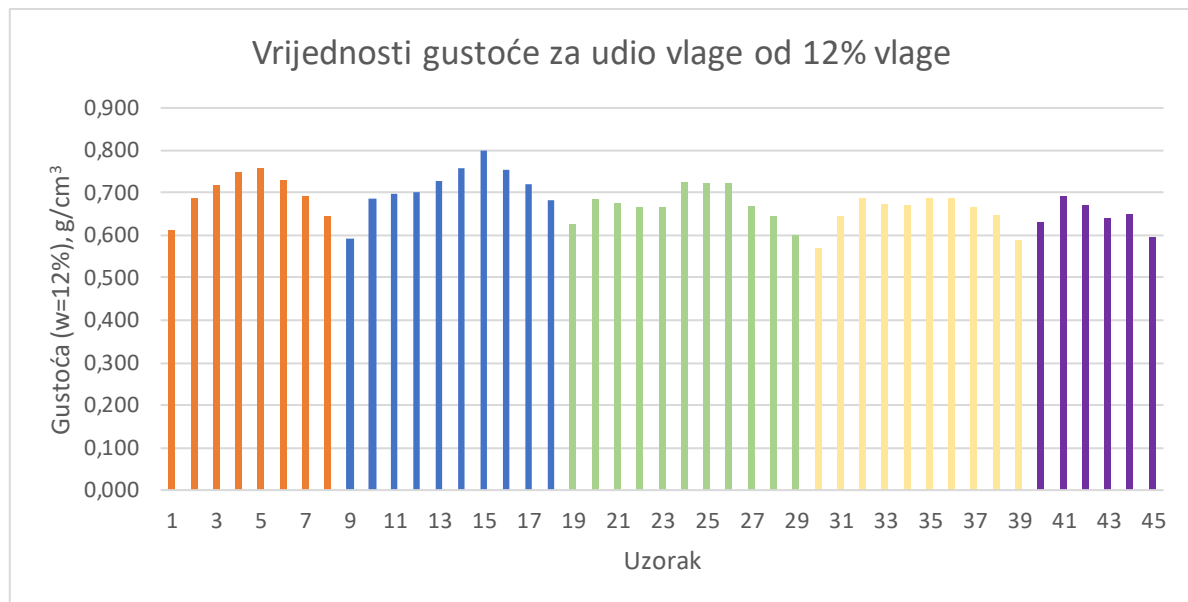


**Slika 36. Udio vlage u uzorcima**

U dijagramu na slici 37 prikazane su vrijednosti izračunate gustoće svih uzoraka za udio vlage od 12%. Svaka boja označava poseban red od I do V. Jasno se vidi sličan trend promjene gustoće uzoraka u svim redovima s promjenom pozicije uzoraka od lijevog ruba preko srčike do desnog ruba poprečnog presjeka. Ovakvi rezultati su potpuno očekivani jer je gustoća srževine u istom deblu uvijek veća od gustoće bjeljike.

Dobivene vrijednosti gustoće nalaze se u rasponu vrijednosti koje se u literaturi navode za gustoću hrasta kitnjaka.



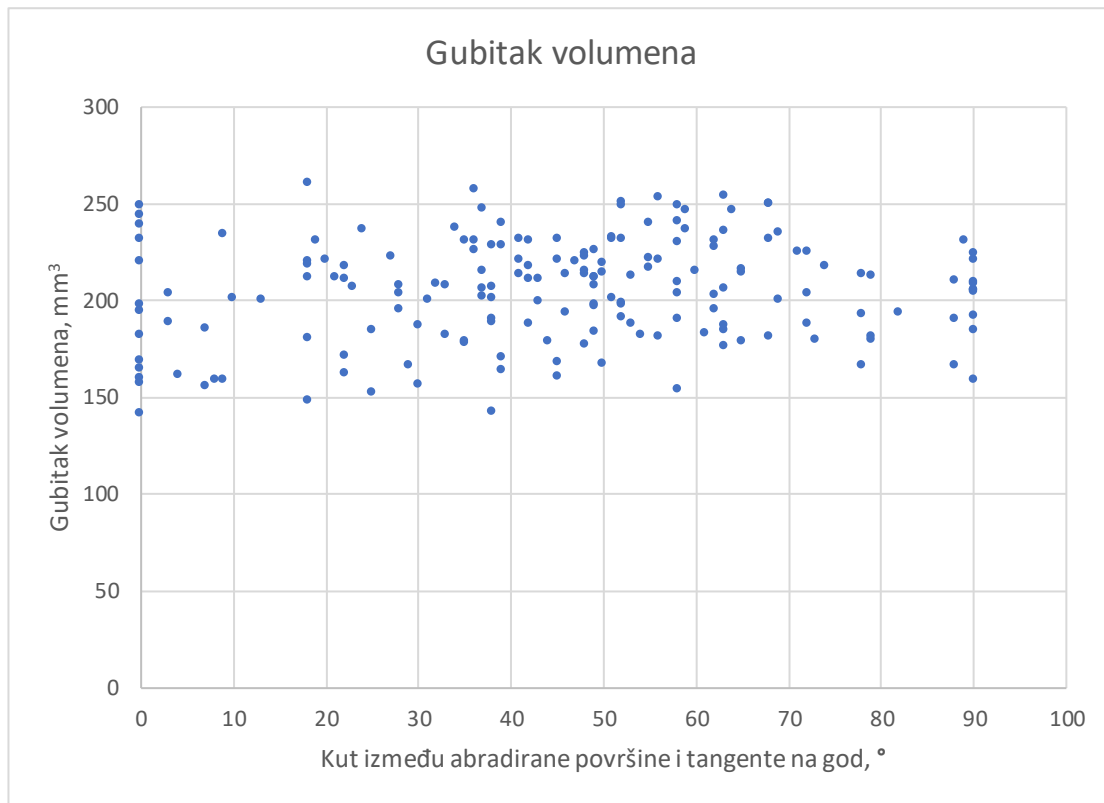


**Slika 37. Vrijednosti gustoće uzoraka za udio vlage od 12%**

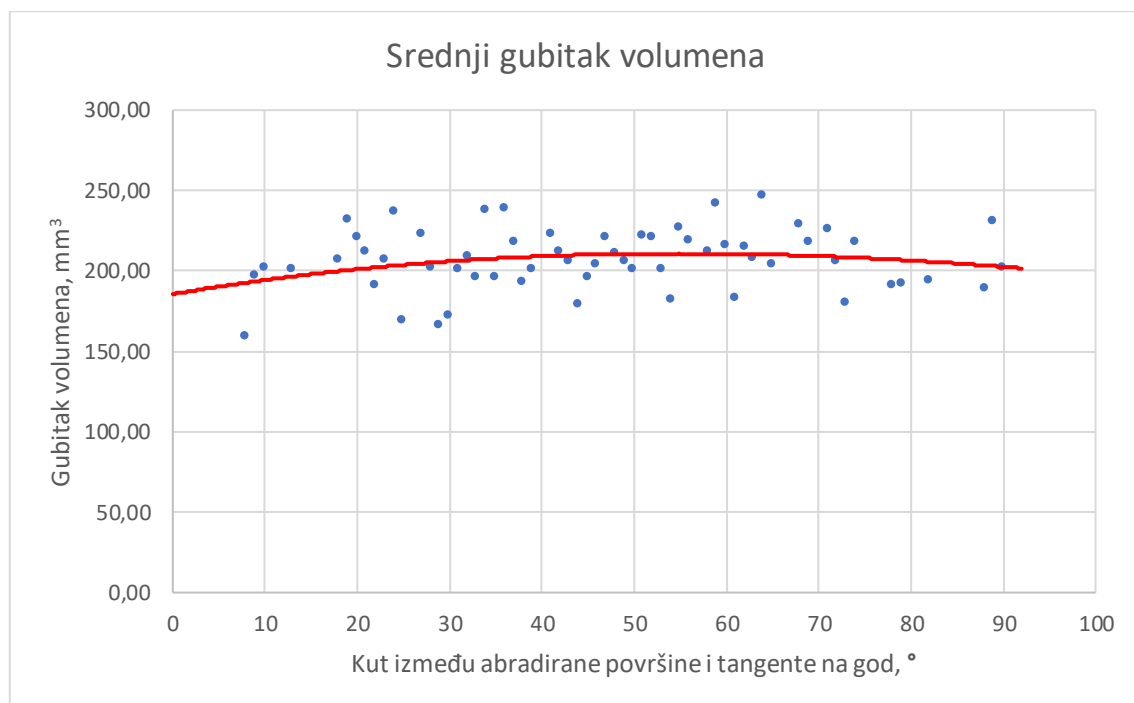
### 6.8.2 Analiza rezultata abrazijskog trošenja

Dijagram na slici 38 prikazuje gubitak volumena svih uzoraka u ovisnosti o pripadajućem kutu između abradirane površine i tangente na god. Ukupno je provedeno 180 mjerenja na 45 uzoraka. Za kut od  $0^\circ$  (tangencijalni presjek) i  $90^\circ$  (radijalni presjek) provedeno je najviše mjerenja (13 i 10), a za druge kutove broj mjerenja je bio manji. Rasipanja rezultata su dosta velika i nije moguće uočiti jasno izraženu ovisnost gubitka volumena s promjenom kuta.

Kako je za neke kutove napravljeno više mjerenja, u dijagramu na slici 39 prikazane su srednje vrijednosti gubitka volumena za određene kutove. Kod ovako prikazanih rezultata može se uočiti blagi porast abrazijskog trošenja s povećanjem kuta od  $0^\circ$  do  $90^\circ$ , odnosno s postupnim prelaskom iz tangencijalnog u radijalni presjek. Relativno veliko rasipanje rezultata je i dalje prisutno.

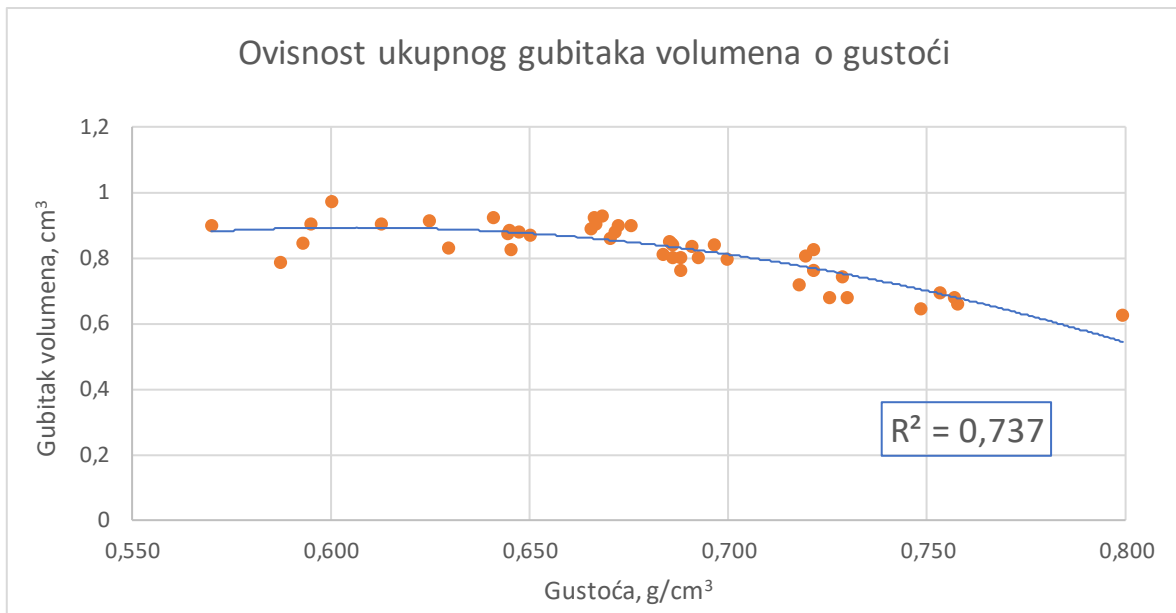


**Slika 38. Gubitak volumena u ovisnosti o pripadajućem kutu**



**Slika 39. Srednji gubitak volumena u ovisnosti o pripadajućem kutu**

Dijagram na slici 40 prikazuje ovisnost gubitka volumena o gustoći za sve uzorke. Može se vidjeti da povećanjem gustoće dolazi do smanjenja gubitka volumena, odnosno do smanjenja intenziteta abrazijskog trošenja.

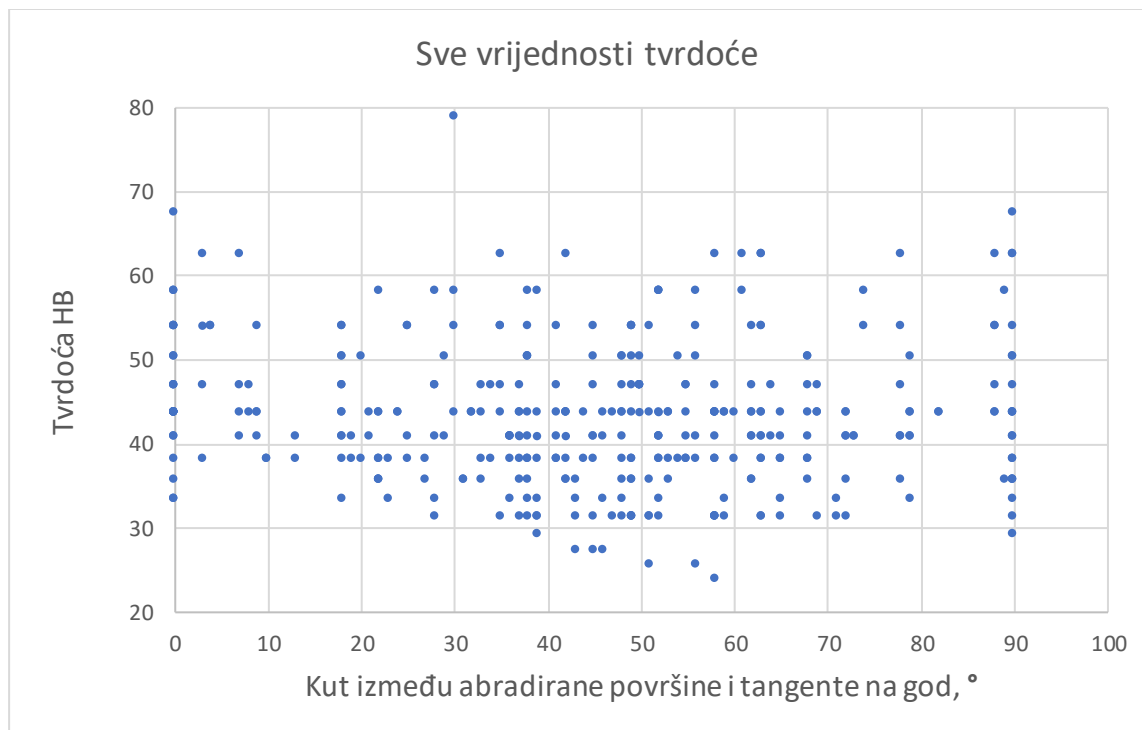


**Slika 40. Ovisnost ukupnog gubitka volumena pojedinih uzoraka o gustoći ( $w=12\%$ )**

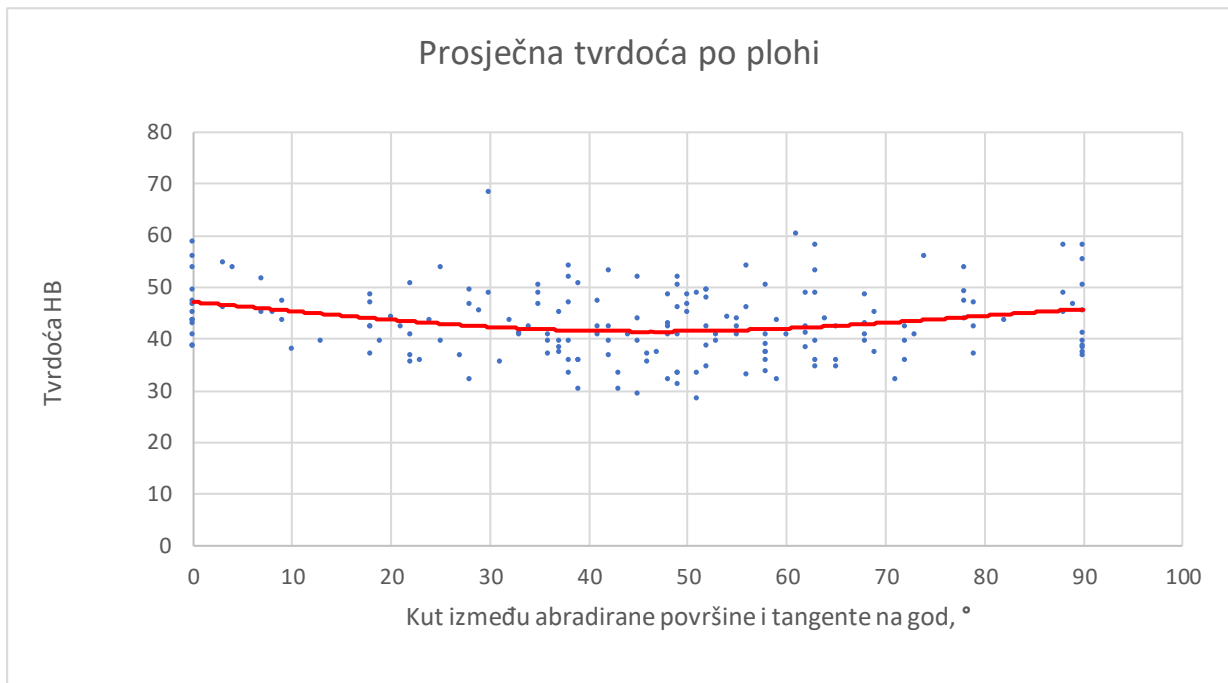
### 6.8.3 Analiza rezultata mjerenja tvrdoće

Dijagram na slici 41 prikazuje sve vrijednosti izmjerene tvrdoće. Ukupno je provedeno 360 mjerenja. Kao što se vidi na dijagramu, rasipanja su dosta velika što je karakteristično za sve vrste drva. Vrijednost tvrdoće se kreće u rasponu od 23,8 do 78,9. Prosječna vrijednost tvrdoće svih mjerenja je 43,1 što se podudara s vrijednostima tvrdoće za hrast kitnjak u literaturi.

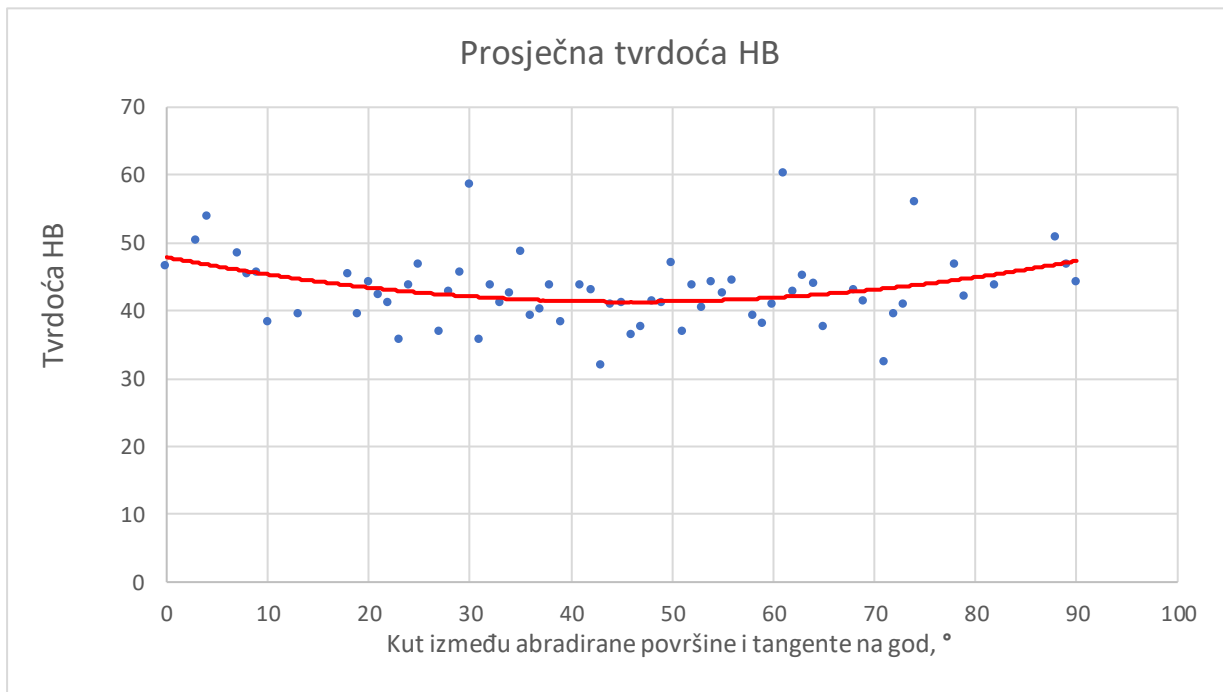
Na slici 42 prikazane su srednje vrijednosti tvrdoće svih abradiranih stranica (ukupno 180), a na slici 43 prikazane su srednje vrijednosti tvrdoće za sve kutove.



**Slika 41. Rezultati svih vrijednosti tvrdoće u ovisnosti o kutu**

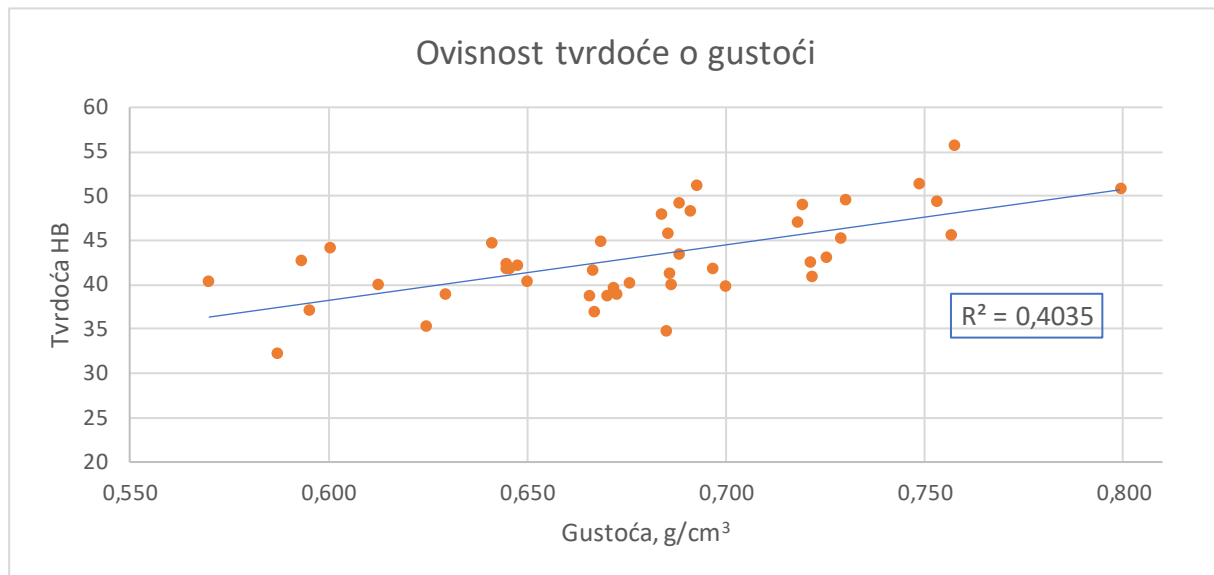


**Slika 42. Rezultati mjerenja prosječne tvrdoće po plohi u ovisnosti o kutu**



**Slika 43. Rezultati mjerenja ukupne prosječne tvrdoće u ovisnosti o kutu**

U dijagramu na slici 44 stavljeni su u korelaciju tvrdoća i gustoća uzoraka. Iako je rasipanje rezultata dosta veliko, jasno se vidi da porastom gustoće uzoraka dolazi do rasta tvrdoće.

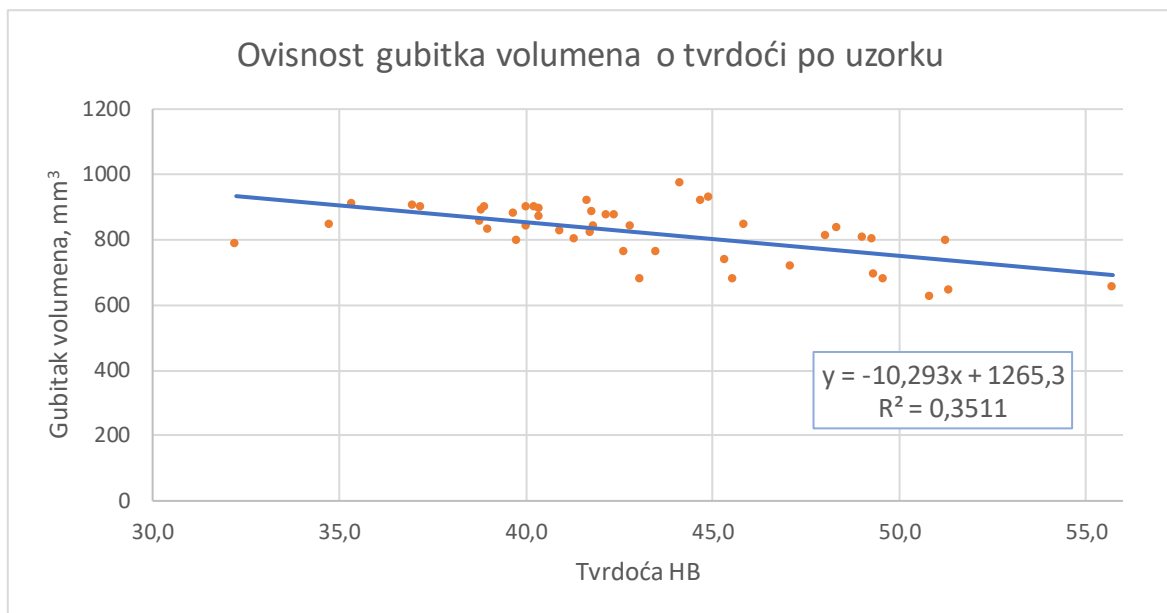


**Slika 44. Ovisnost tvrdoće pojedinih uzoraka o gustoći ( $w=12\%$ )**

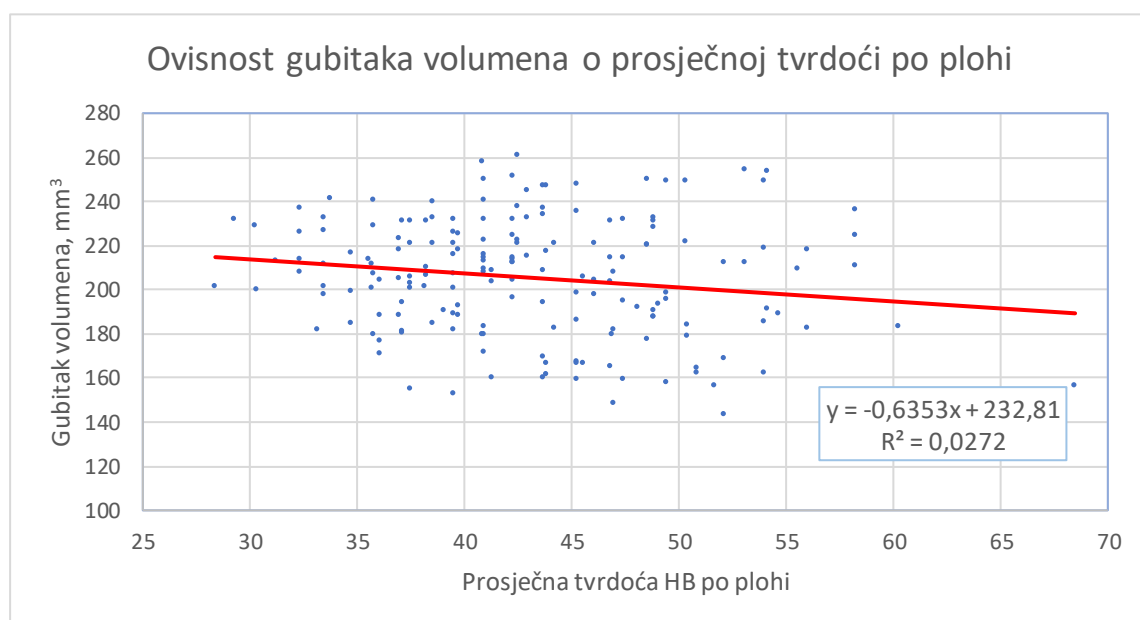
#### 6.8.4 Analiza utjecaja tvrdoće na otpornost prema abraziji

U dijagramu na slici 45 prikazana je korelacija između tvrdoće i gubitka volumena pri abrazijskom trošenju. Prikazani su rezultati srednje vrijednosti od 8 mjerenja tvrdoće po uzorku i ukupni gubitak volumena sa sve 4 plohe istog uzorka, ukupno 45 parova vrijednosti. Jasno se vidi da s povećanjem tvrdoće dolazi do smanjenja gubitka volumena, što govori o određenom stupnju korelacije između ova dva svojstva.

Dijagram na slici 46 prikazuje ovisnost gubitka volumena o prosječnoj tvrdoći za pojedinačne plohe svih uzoraka, ukupno 180 parova vrijednosti. Obzirom na veliku količinu podataka rasipanje je dosta veliko, što je tipično za drvo. Međutim i ovdje se može uočiti da se porastom tvrdoće smanjuje gubitak volumena pri abraziji.



**Slika 45. Ovisnost gubitka volumena o tvrdoći po uzorku**

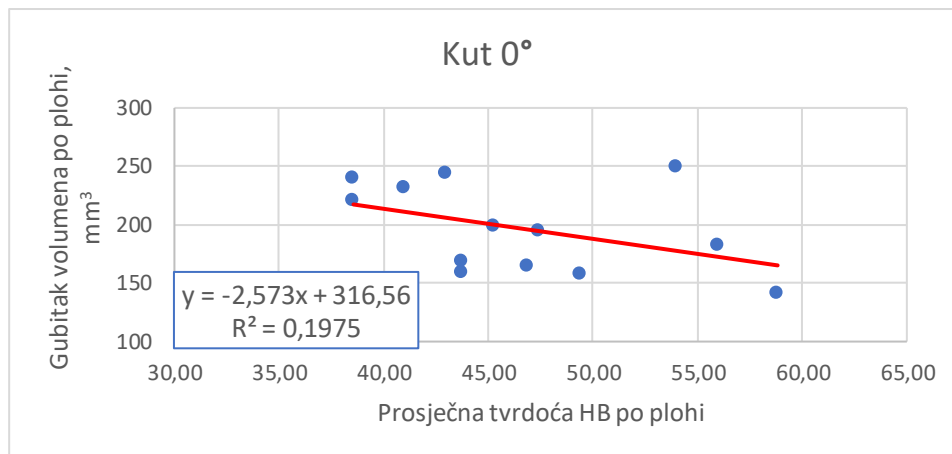


**Slika 46. Ovisnost gubitka volumena o prosječnoj tvrdoći po plohi**

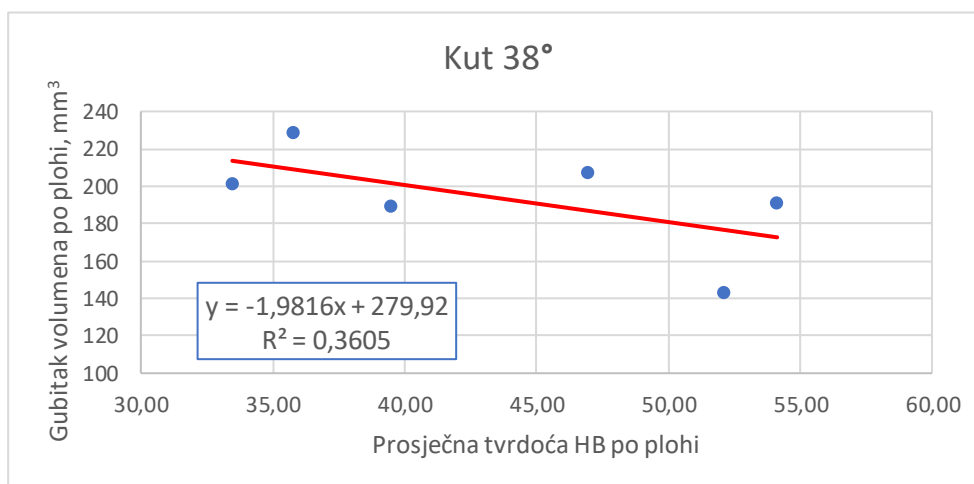
Kako je osnovna ideja rada bila da se utvrdi utjecaj usmjerenosti strukture u longitudinalnom smjeru na tvrdoću i gubitak volumena pri abraziji, u nastavku je prikazana korelacija između tvrdoće i gubitka volumena za plohe koje su bile pod određenim kutom u odnosu na tangentu na god. Prikazani su samo oni rezultati kod kojih je bilo više od 6 ispitivanih ploha pod istim kutom (0°, 38°, 49°, 52°, 58°, 63° i 90°).

Na slikama 47 do 53 prikazani su dijagrami na kojima se vidi kako se mijenja gubitak volumena pri abraziji s promjenom tvrdoće za sve navedene kutove.

Kod manjih kutova, od  $0^\circ$  do  $49^\circ$  s povećanjem tvrdoće smanjuje se gubitak volumena pri abraziji što je u skladu s prethodnim analizama i općenitim shvaćanjem ovisnosti između ova dva svojstva. Potrebno je napomenuti da se povećanjem kuta smanjuje utjecaj tvrdoće na gubitak volumena tako da kod kuta od  $52^\circ$  s povećanjem tvrdoće gubitak volumena ostaje isti. Daljim povećanjem kuta od  $58^\circ$  do  $90^\circ$  ovisnost između gubitka volumena i tvrdoće se ponovo pojavljuje, ali je trend posve drugačiji – s porastom tvrdoće raste i gubitak volumena. Ovakvo ponašanje je dosta neočekivano, a njegov uzrok treba tražiti u usmjerenosti mikrostrukture hrasta kitnjaka.

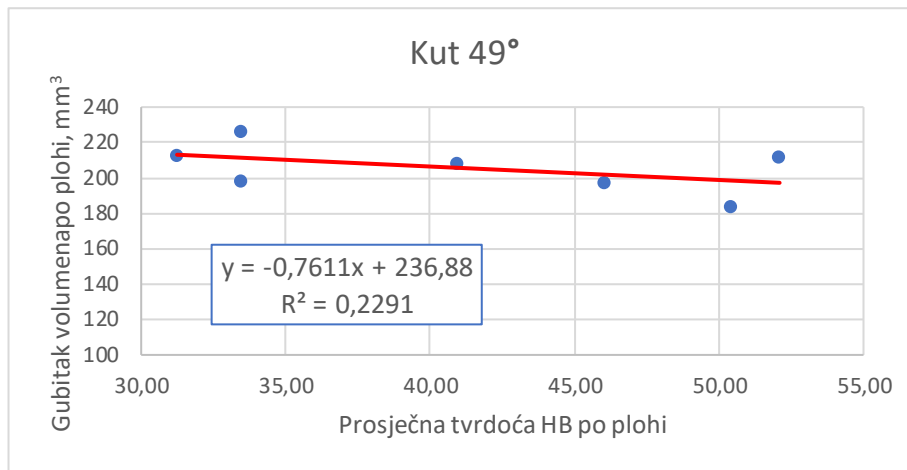


Slika 47. Ovisnost gubitka volumena o tvrdoći za kut od  $0^\circ$

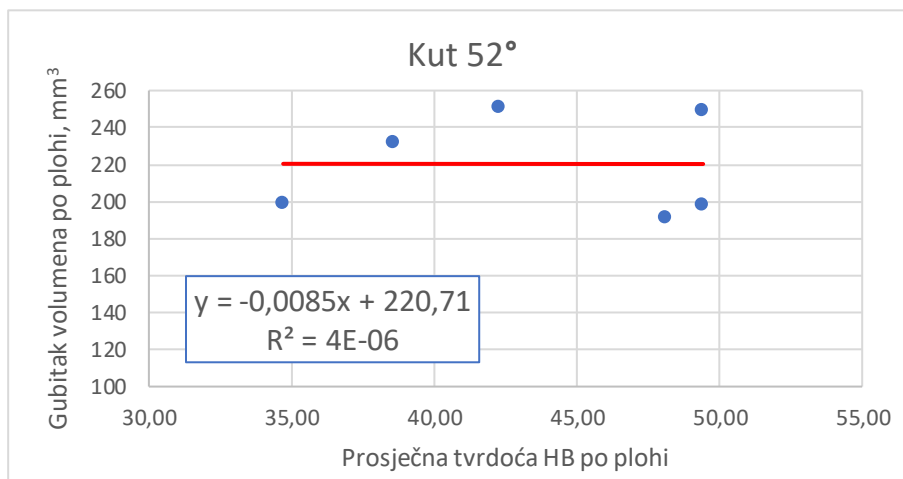


Slika 48. Ovisnost gubitka volumena o tvrdoći za kut od  $38^\circ$

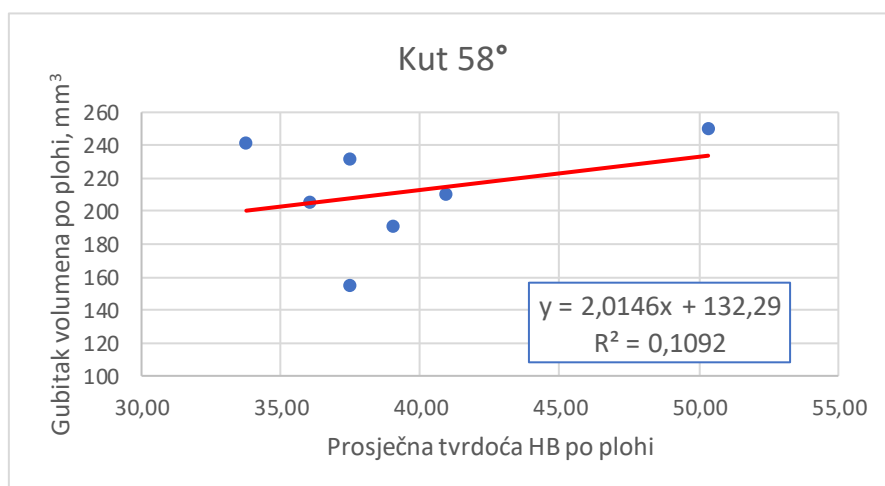




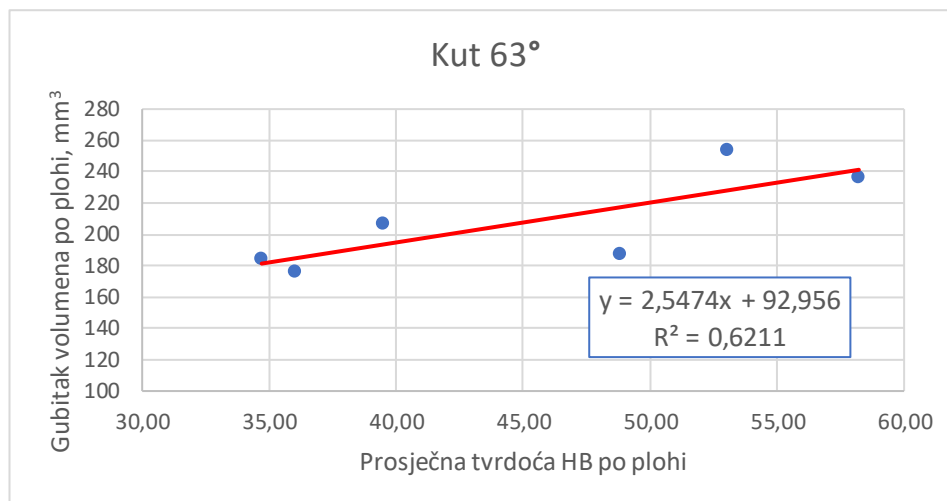
**Slika 49. Ovisnost gubitka volumena o tvrdoći za kut od 49°**



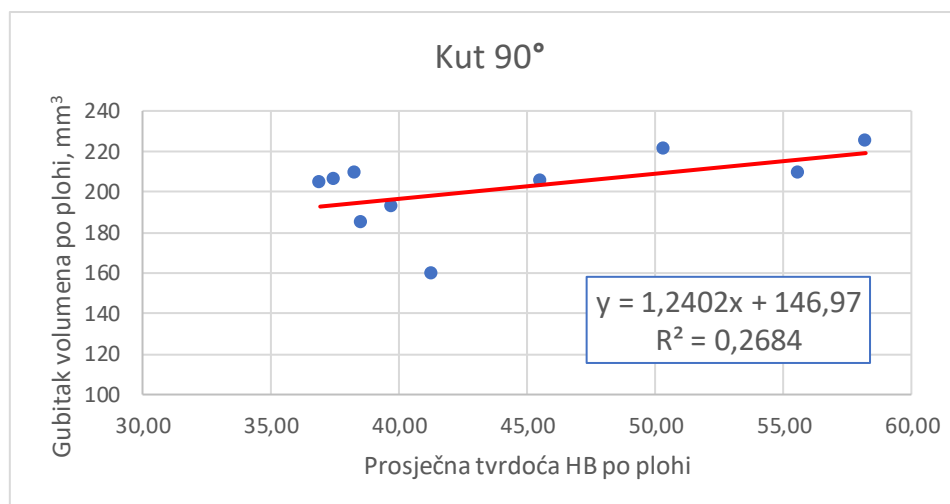
**Slika 50. Ovisnost gubitka volumena o tvrdoći za kut od 52°**



**Slika 51. Ovisnost gubitka volumena o tvrdoći za kut od 58°**



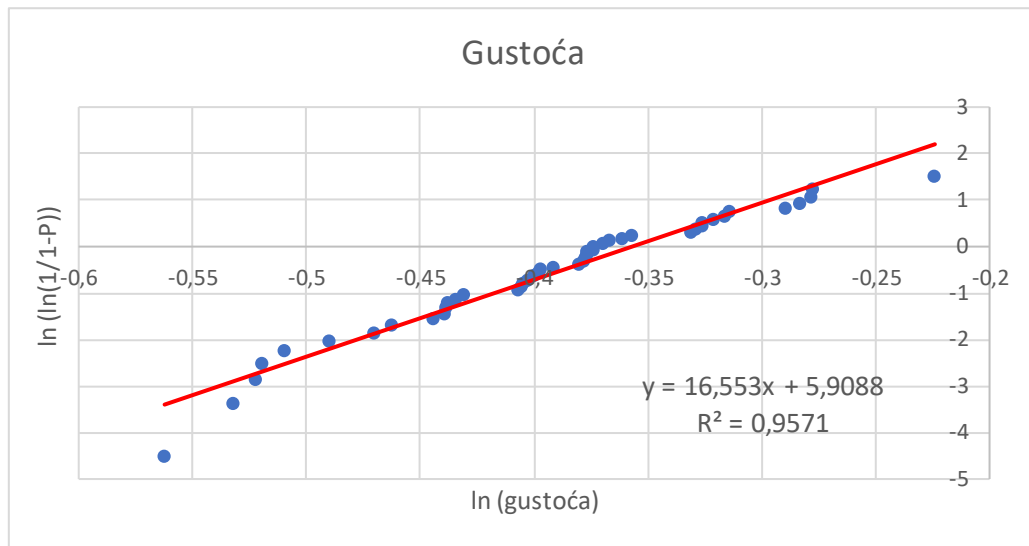
Slika 52. Ovisnost gubitka volumena o tvrdoći za kut od 63°



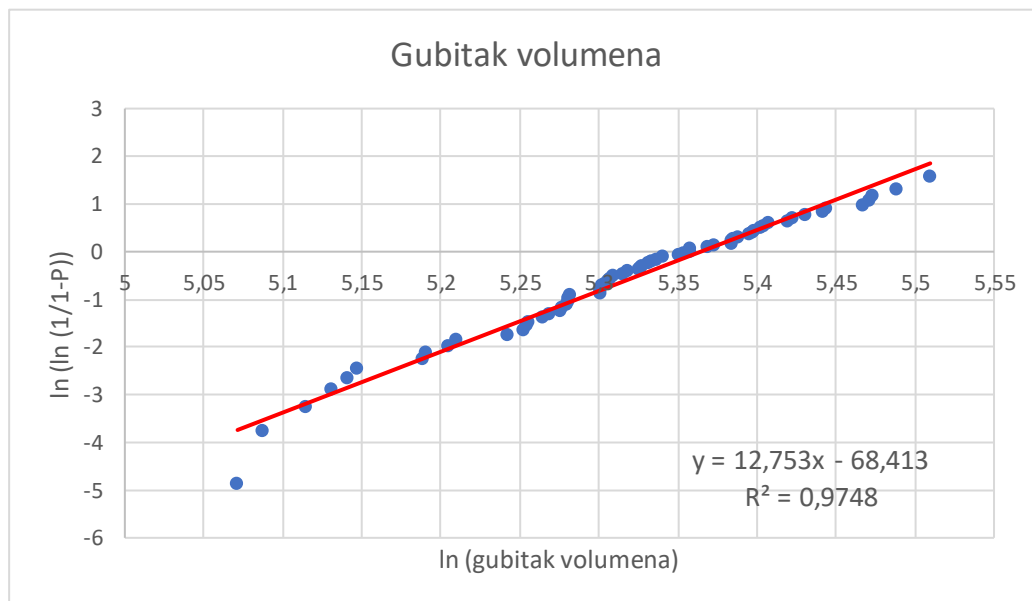
Slika 53. Ovisnost gubitka volumena o tvrdoći za kut od 90°

### 6.8.5 Statistička analiza podataka pomoću Weibullove raspodjele

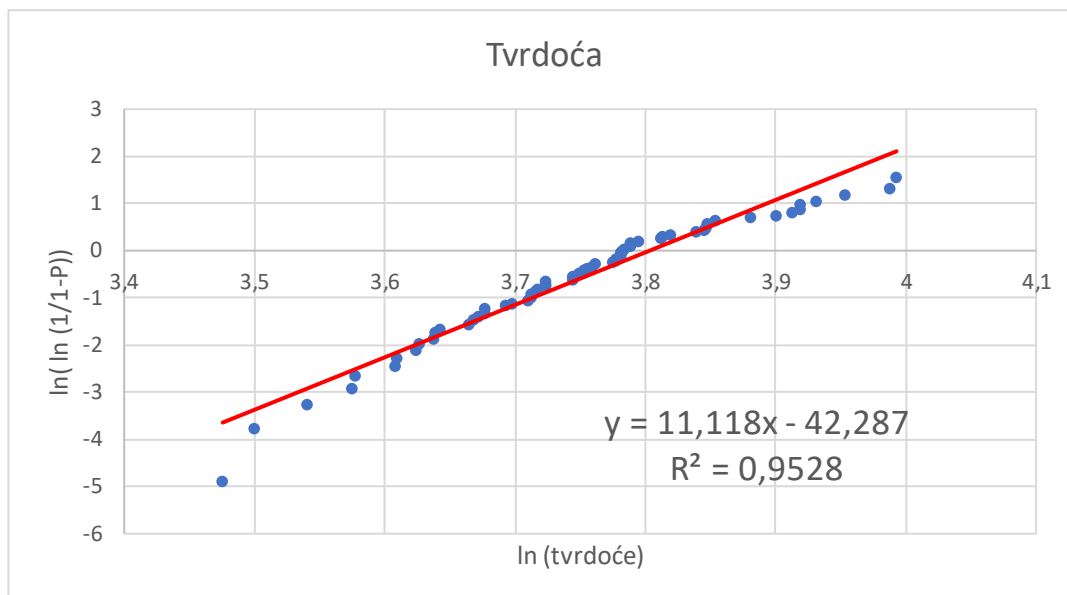
Svi navedeni podaci su analizirani i pomoću Weibullove raspodjele. Dijagrami na slikama od 54 do 56 prikazuju regresijske jednadžbe za gustoću, gubitak volumena i tvrdoću. U jednadžbama  $y = mx \pm b$ , koeficijent  $m$  predstavlja Weibullov modul rasipanja, a koeficijent  $b$  odsječak na osi  $y$ . Uobičajene vrijednosti Weibullovog modula rasipanja  $m$  se kreću od  $10 < m < 20$ . Što je Weibullov modul rasipanja veći, materijal je homogeniji.



**Slika 54. Weibullova raspodjela za gustoću (w=12%)**



**Slika 55. Weibullova raspodjela za gubitak volumena**



**Slika 56. Weibulova raspodjela za tvrdoću**

Tablica 26 prikazuje statističke rezultate za podatke mjerenja gustoće, gubitka volumena i tvrdoće. Weibulovi parametri su određeni i izračunati iz dijagrama pomoću jednadžbe pravca ( $y = mx \pm b$ ). Visok koeficijent determinacije ( $0,9528 < R^2 < 0,9748$ ) svih svojstava potvrđuje reprezentativnost modela.

**Tablica 26. Statistički rezultati za podatke mjerenja**

Svojstvo	Min.	Max.	Srednja vrijednost	Standardna devijacija	Weibulovi parametri	
					Weibullov modul $m$	Parametar skaliranja
Gustoća	0,570	0,799	0,678	0,05	16,553	$\rho_0 = 0,700$
Gubitak volumena	159,39	247,07	205,26	19,69	12,753	$\Delta V_0 = 213,680$
Tvrdoća	32,3	54,2	42,9	4,75	11,118	$HB_0 = 44,9$

## 7 ZAKLJUČAK

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

- Udio vlage i gustoća uzoraka ovise o poziciji uzorka u poprečnom presjeku debla.
- Srednja vrijednost gustoće pri udjelu vlage od 12% je  $0,678 \text{ g/cm}^3$ .
- Porastom gustoće uzoraka smanjuje se gubitak volumena pri abraziji, odnosno intenzitet abrazijskog trošenja.
- Porastom gustoće uzoraka raste njihova tvrdoća.
- Unatoč dosta velikim rasipanjima rezultata, može se uočiti blagi porast intenziteta abrazijskog trošenja s povećanjem kuta od  $0^\circ$  do  $90^\circ$ , odnosno s postupnim prelaskom iz tangencijalnog u radijalni presjek.
- Velika rasipanja prisutna su i kod mjerenja tvrdoće uzoraka. Prosječne vrijednosti tvrdoće ipak pokazuju blagu ovisnost tvrdoće o kutu između abradirane površine i tangente na god. Prosječna vrijednost tvrdoće svih mjerenja je 43,1.
- Kod manjih kutova (do  $52^\circ$ ) s povećanjem tvrdoće smanjuje se gubitak volumena pri abraziji. Daljim povećanjem kuta s porastom tvrdoće raste i gubitak volumena.
- Dobivene vrijednosti za Weibullov modul i parametar skaliranja pokazuju da se Weibullovom razdiobom mogu dobro opisati rezultati dobiveni za gustoću, gubitak volumena pri abraziji i tvrdoću ispitivanih uzoraka hrasta kitnjaka.

## 8 LITERATURA

- [1] <http://www.international-agrophysics.org/Influence-of-wood-anisotropy-on-its-mechanical-properties-in-relation-to-the-scale> , posjećeno u travnju 2021.
- [2] Rede, V.: Drvo – tehnički materijal, [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1496408466-0-drvo-skripta.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1496408466-0-drvo-skripta.pdf).
- [3] Užar, J.: Drvo – materijal u suglasnosti s prirodom. Tehnički glasnik, 2013 ;7(3):258-262. Dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/109570>.
- [4] <https://sciencing.com/spanish-moss-poisonous-5717155.html> , posjećeno u travnju 2021.
- [5] Wiedenhoef, A.: Structure and Function of Wood, Centennial ed. General technical report FPL; GTR-190, Madison, 2010.
- [6] <https://www.horizonwood.com/hardwood-vs-softwood-understanding-the-difference-part-1/> , posjećeno u travnju 2021.
- [7] <https://www.vcbio.science.ru.nl/en/image-gallery/show/labels/print/IL047/> , posjećeno u travnju 2021.
- [8] Trupina, I.: Utjecaj mikrostrukture na abrazijska svojstva drva, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [9] [http://www.hobbitouseinc.com/personal/woodpics/\\_anatomy/growth%20rings/\\_growth%20rings.htm](http://www.hobbitouseinc.com/personal/woodpics/_anatomy/growth%20rings/_growth%20rings.htm) , posjećeno u travnju 2021.
- [10] Hoadley , RB.: Identifying Wood, The Taunton Press, 1993.
- [11] Saka, S.: Structure and Chemical Composition of Wood as a Natural Composite Material. In: Recent Research on Wood and Wood-Based Materials. Elsevier; 1993. p. 1–20. doi: 10.1016/b978-1-4831-7821-9.50007-1
- [12] Parham, RA., Gray, RL.: Formation and Structure of Wood, 1984
- [13] Rowell, R., Pettersen, R., Tshabalala, M.: Cell Wall Chemistry. In: Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites, Second Edition. CRC Press; 2012. p. 33–72. doi: 10.1201/b12487-5
- [14] <https://www.zehnderamerica.com/absolute-vs-relative-humidity-whats-the-difference/> , posjećeno u lipnju 2021.
- [15] Wenzl, HFJ.: Anatomy and Physical Properties of Wood. In: The Chemical Technology of Wood. Elsevier; 1970. p. 32–91. doi: 10.1016/b978-0-12-743450-6.50007-1
- [16] Grilec, K., Jakovljević, S., Ivušić, V., Landek, D.: Tribologija, Autorizirana predavanja iz kolegija “Tribologija i injženjerstvo površina”, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Katedra za materijale, Zagreb, 2015.

- [17] Salot, M., Singh Sain, M., Shah, S., Joshi, M.: Study on wear resistance of Al-Si alloy using 3-body dry abrasive wear testing machine, 2016.
- [18] Ohtani, T., Kamasaki, K., Tanaka, C.: Effect of combinations of wood and counterface materials on three-body abrasive wear. *Journal of Wood Science*. 2003;49(6):543–7. doi: 10.1007/s10086-002-0505-7
- [19] Budinski, KG., Budinski, ST.: On replacing three-body abrasion testing with two-body abrasion testing. *Wear*. 2017;376–377:1859–65. doi: 10.1016/j.wear.2017.01.001
- [20] Grainger, S., Blunt, J.: *Engineering coatings: design and application*, Woodhead Publishing, 1998.
- [21] Hawk, JA., Wilson, RD., Tylczak JH., Dogan, ON.: Laboratory abrasive wear tests: investigation of test methods and alloy correlation
- [22] Vörös, Németh R.: The history of wood hardness tests. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing Ltd; 2020. doi: 10.1088/1755-1315/505/1/012020
- [23] Koczan, G., Karwat, Z., Kozakiewicz, P.: An attempt to unify the Brinell, Janka and Monnin hardness of wood on the basis of Meyer law. *Journal of Wood Science*. 2021 Dec 1;67(1). doi: 10.1186/s10086-020-01938-4
- [24] Ronca, P., Gubana, A.: Mechanical characterisation of wooden structures by means of an in situ penetration test. Vol. 12, *Construction and Building Materials*. 1998.
- [25] Hirata, S., Ohta, M., Homna, Y.: Hardness distribution on wood surface. 2000;1–7.
- [26] Sundararajan, G., Roy, M.: *Hardness Testing*, 2001.
- [27] Merela, M., Čufar, K.: Gustoća i mehanička svojstva drva bjeljike hrasta u usporedbi s drvom srži. *Drvna Industrija*. 2013;64(4):323–34. doi: 10.5552/drind.2013.1325