

Utjecaj usmjerenosti strukture na tvrdoću i abrazijsku otpornost drva masline

Klanac, Josip

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:609186>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-11**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Josip Klanac

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

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

Student:

Josip Klanac

Zagreb, 2022.

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

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

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

Zahvaljujem se djevojci Ani, svim svojim prijateljima i kolegama na pruženoj podršci i pomoći tijekom cijelog studija.

Josip Klanac



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:	602-14/22-6/1
Ur. broj:	15-1703-22-

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **JOSIP KLANAC** Mat. br.: 0035217868

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

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

Opis zadatka:

Tehnički materijali s usmjerenom mikrostrukturom imaju usmjerena svojstva. Kod metala je usmjerenost uglavnom posljedica intenzivne plastične deformacije. Kod prirodnih materijala, kao što je drvo, usmjerenost mikrostrukture i svojstava određena je njihovim biološkim funkcijama.

U teorijskom dijelu rada potrebno je detaljno opisati mikrostrukturu drva te navesti rezultate recentnih istraživanja koja se bave utjecajem usmjerenosti strukture na mehanička i tribološka svojstva.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je odrediti kako se mijenjaju tvrdoća i otpornost na abrazijsko trošenje drva masline u longitudinalnom smjeru, s postupnom promjenom ravnine ispitivanja od radijalnog (LR) do tangencijalnog presjeka (LT). Ispitivanje tvrdoće provesti metodom po Brinellu, a ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje standardnom metodom „suhi pijesak - gumeni kotač“. Dobivene rezultate analizirati i na temelju provedene analize donijeti odgovarajuće zaključke o utjecaju usmjerenosti mikrostrukture na ispitana svojstva.

Zadatak zadan:
5. svibnja 2022.

Rok predaje rada:
7. srpnja 2022.

Predviđeni datum obrane:
18. srpnja do 22. srpnja 2022.

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

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

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. MAKROSTRUKTURA DRVA	2
2.1 Botanička podjela.....	2
2.2 Struktura debla i karakteristični presjeci u drvu	2
2.2.1 Poprečni presjek.....	3
2.3 Radijalni i tangencijalni presjek.....	5
3. MIKROSTRUKTURA DRVA.....	7
3.1 Molekularna struktura drva.....	7
3.2 Struktura stanične stijenke	8
3.3 Mikrostruktura četinjača	9
3.4 Mikrostruktura listača	11
3.5 Mikrostruktura masline	15
4. SVOJSTVA DRVA	17
4.1 Voda u drvu.....	17
4.2 Abrazija.....	18
4.2.1 Metoda „suhi pijesak – gumeni kotač“ ASTM G65	20
4.3 Tvrdća drva	22
5. EKSPERIMENTALNI DIO	25
5.1 Cilj rada i provođenje ispitivanja	25
5.2 Materijali za ispitivanje i priprema uzoraka	25
5.3 Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje.....	30

5.4	Ispitivanje tvrdoće	31
5.5	Rezultati mjerenja udjela vlage i gustoće uzoraka	34
5.6	Rezultati mjerenja gubitka mase pri abrazijskom trošenju	34
5.7	Rezultati mjerenja tvrdoće	40
6.	ANALIZA REZULTATA	44
6.1	Analiza utjecaja kuta između abradirane površine i tangente na god na gubitak volumena pri abraziji	44
6.2	Analiza utjecaja gustoće na gubitak volumena pri abraziji.....	45
6.3	Analiza utjecaja kuta između tangente na god i abradirane površine na tvrdoću	46
6.4	Analiza utjecaja gustoće na tvrdoću.....	48
6.5	Analiza utjecaja tvrdoće na gubitak volumena pri abrazijskom trošenju	49
6.6	Statistička analiza podataka pomoću Weibullove raspodjele	50
7.	ZAKLJUČAK.....	53
	LITERATURA.....	54

POPIS SLIKA

Slika 1	Karakteristični presjeci (deblo) i osi drvene građe (kocka) [7].....	3
Slika 2	Poprečni presjek debla gdje se vide: srčika (s), srževina, bjeljika, kambij (k), unutarnja kora (uk), vanjska kora (vk) [4]	3
Slika 3	Prikaz prstenasto poroznih (A), polu – prstenasto poroznih (B) i difuzno poroznih (C) vrsta godova listača [10]	5
Slika 4	Tangencijalni presjek drva masline [11]	6
Slika 5	Prikaz drvnih vlakana (A), traheida (B), traheja (C), parenhimskih aksijalnih stanica (D), traheida u drvnim trcima (E), parenhimskih stanica drvnih traka (F) [12]	7
Slika 6	Slojeviti prikaz građe drvene stanične stijenke [14]	8
Slika 7	Prikaz strukture u poprečnom presjeku sekvoje bez smolnih kanala (a) i smreke sa smolnim kanalima (b) [8]	10
Slika 8	Prikaz drvnih traka sačinjene od parenhimskih stanica (RP) i od traheida (RT) [10]	11
Slika 9	SEM prikaz glavnih tipova perforiracijskih ploča na trahejama: (A) radijalni presjek koji pokazuje skaliformne perforacijske; (B) jednostavna perforacijska ploča. (C i D) pokazuju skariformne ploče s vrlo malo cjevčica i s brojnim cjevčicama [10]	12
Slika 10	Usporedba duljine drvnog vlakanca i traheide	13
Slika 11	Prikaz drvnih traka: jednorednog (A), dvorednog (B) i višerednog (C) [15].....	14
Slika 12	Prikaz heterogenih drvnih traka koji su građeni od parenhimskih stanica uspravnog (A) i izduženog (B) oblika [15]	14
Slika 13	Mikrostruktura masline u poprečnom, radijalnom i tangencijalnom presjeku [16]	15
Slika 14	Prikaz abrazije pri dodiru dva tijela (a) i tri tijela (b) [19]	19
Slika 15	Prikaz mikromehanizama abrazijskog trošenja nekog materijala [19].....	19
Slika 16	Uređaj na kojem se provodi ispitivanje abrazijskog trošenja metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“ [21].....	21
Slika 17	Skica i uređaj koji se koriste za mjerenje tvrdoće drva Jankinom metodom [23].	23
Slika 18	Mjerenje tvrdoće upotrebom metode po Brinellu [27].....	24
Slika 19	Maslina prije rezanja	26
Slika 20	Deblo masline nakon rezanja	26

Slika 21	Poprečni presjek prije (lijevo) i nakon pozicioniranja uzoraka (desno).....	27
Slika 22	Prikaz procesa rezanja uzoraka	27
Slika 23	Određivanje kuta površine pomoću tangente na god	28
Slika 24	Vaganje uzoraka prije ispitivanja na abrazijsko trošenje	29
Slika 25	Prikaz sušionika (lijevo) i eksikatora (desno)	30
Slika 26	Uređaj na kojem je provedeno ispitivanje na abraziju	31
Slika 27	Tvrdomjer na kojem je ispitivana tvrdoća metodom po Brinellu	32
Slika 28	Proces mjerenja tvrdoće na tvrdomjeru.....	33
Slika 29	Uređaj na kojem se precizno mjeri promjer koji ostavi kuglica.....	33
Slika 30	Prikaz gubitka volumena u ovisnosti o pripadajućem kutu.....	44
Slika 31	Srednji gubitak volumena u ovisnosti o pripadajućem kutu	45
Slika 32	Korelacija između ukupnog gubitka volumena i gustoće za svaki uzorak.....	46
Slika 33	Vrijednost tvrdoće u ovisnosti o pripadajućem kutu.....	47
Slika 34	Korelacija između prosječne tvrdoće po ispitnim plohamu u ovisnosti i pripadajućeg kuta	47
Slika 35	Vrijednosti ukupne prosječne tvrdoće u ovisnosti o pripadajućem kutu.....	48
Slika 36	Korelacija između tvrdoće i gustoće za svaki uzorak	48
Slika 37	Korelacija gubitka volumena i prosječne tvrdoće za svaku ispitanu plohu	49
Slika 38	Korelacija gubitka volumena i tvrdoće za svaki ispitni uzorak.....	50
Slika 39	Weibullova raspodjela za vrijednosti gustoće	51
Slika 40	Weibullova raspodjela za vrijednosti gubitka volumena pri abraziji	51
Slika 41	Weibullova raspodjela za vrijednosti tvrdoće	52

POPIS TABLICA

Tablica 1	Sadržaj različitih kemijskih tvari koji su prisutni u drvu [13].....	8
Tablica 2	Orijentacija glavnih vrsta stanica četinjača [10]	9
Tablica 3	Duljina i promjer vlakana te promjer lumena i debljina stanične stijenke vlakana [16]	15
Tablica 4	Prikaz promjene dimenzija vlakana, lumena i stanične stijenke od dna prema vrhu grane [16]	16
Tablica 5	Promjene kemijskog sastava od dna do vrha grane [16]	16
Tablica 6	Tvrdoće određenih domaćih vrsta mekog i tvrdog drva [4]	22
Tablica 7	Izmjerene i izračunate vrijednosti volumena i gustoće ispitnih uzoraka.....	34
Tablica 8	Gubitak mase za pojedinačne plohe i ukupni gubitak mase za uzorke	35
Tablica 9	Prikaz prosječnog gubitka mase (Δm) za pripadajuće kutove (α).....	38
Tablica 10	Prikaz prosječnog gubitka volumena (ΔV) za pripadajuće kutove (α)	39
Tablica 11	Dobivene vrijednosti tvrdoće HB za sve uzorke	40
Tablica 12	Izračunate ukupne srednje vrijednosti tvrdoće za pripadajuće kutove.....	43
Tablica 13	Prikaz statističkih podataka izračunatih iz izmjerenih vrijednosti	52

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
w	%	Standardni sadržaj vlage u drvu
m	g	Masa uzorka
Δm	g	Masa drva kod nekog sadržaja vlage
V	cm ³	Volumen uzorka
ΔV	cm ³	Gubitak volumena uzorka
ρ	g/cm ³	Gustoća uzorka
ρ_{12}	g/cm ³	Gustoća uzorka pri udjelu vlage od 12 %

SAŽETAK

Cilj ovog rada bio je odrediti kako usmjerenost strukture utječe na tvrdoću i gubitak volumena pri abrazijskom trošenju drva masline (lat. *Olea europea*).

Ispitivanje trošenja na abraziju provedeno je metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“, a tvrdoća je mjerena Brinellovom metodom.

U radu je utvrđeno kako postoji vrlo niska linearna korelacija između usmjerenosti strukture i vrijednosti tvrdoće te gubitka volumena pri abraziji. Porastom kuta između abradirane površine i tangente na god, odnosno postupnim prelaskom iz tangencijalnog u radijalni presjek, blago se povećava gubitak volumena pri abraziji te blago pada tvrdoća. Između tvrdoće i gustoće postoji značajna pozitivna linearna korelacija dok je između gubitka volumena pri abraziji i gustoće linearna korelacija vrlo slaba i pozitivna. Između tvrdoće i gubitka volumena pri abraziji postoji vrlo slaba negativna linearna korelacija.

Vrijednosti i rasipanja rezultata statistički su analizirani pomoću Weibullove razdiobe te je utvrđeno da se vrijednosti za gustoću, gubitak volumena pri abrazijskom trošenju i tvrdoću ponašaju u skladu s razdiobom.

Ključne riječi: abrazijsko trošenje, tvrdoća, gustoća, maslina

SUMMARY

The aim of this work was to determine how the orientation of the structure affects the hardness and loss of volume during abrasive wear of olive wood (lat. *Olea europea*).

Abrasion wear testing was performed using the "dry sand - rubber wheel" method, and hardness was measured using the Brinell method.

The paper found that there is a very low linear correlation between the directionality of the structure and the value of hardness and volume loss during abrasion. With the increase in the angle between the abraded surface and the tangent to the tree ring, i.e. with the gradual transition from the tangential to the radial section, the loss of volume during abrasion increases slightly and the hardness decreases slightly. There is a significant positive linear correlation between hardness and density, while between volume loss during abrasion and density, the linear correlation is very weak and positive. There is a very weak negative linear correlation between hardness and volume loss during abrasion.

The values and dispersion of the results were statistically analyzed using the Weibull distribution, and it was determined that the values for density, volume loss during abrasive wear and hardness behave in accordance with the distribution.

Keywords: abrasive wear, hardness, density, olive tree

1. UVOD

Maslina se smatra jednom od prvih uzgojenih stabala u ljudskoj povijesti, a to se može vidjeti u Starom zavjetu i grčkoj mitologiji. Osim zapisanih primjera, starosti maslina svjedoče i arheološki nalazi koji su stariji više od 9000 godina. Primjerice, biljka masline je simbol mira i prijateljstva još od stare Grčke, kada su pobjednici Olimpijskih igara bili počašćeni vijencem od grančica masline. Važnost maslina kroz povijest svjedoči i Solonov zakonik prema kojem je bilo zabranjeno posjeći više od dva stabla u masliniku, a svatko tko je prekršio ovaj zakon bio je kažnjen oduzimanjem imovine, protjerivanjem ili smrću. Iako je poznato više od 30 vrsta maslina, samo je jedna jestiva [1–3].

Vjeruje se da se moderno stablo masline pojavilo prije oko 5000 godina u Mezopotamiji. Feničani su bili odgovorni za njihovo početno širenje duž obale Sredozemnog mora, a kasnije su masline po Europi širili Grci i Rimljani. Prva maslina je donesena u Meksiko nakon što je otkrivena Amerika te je i danas moguće vidjeti kako tamo rastu šume maslina. Tijekom sljedećih stoljeća, značaj i važnost masline je nastavila biti značajnija pa je tako jednako važna i bitna i danas. Rast nasada maslina, industrijalizacija poljoprivrede i postupci ekstrakcije značajno su povećali proizvodnju maslina diljem svijeta u posljednjih nekoliko desetljeća. Na području samo devet zemalja članica Europske Unije (Španjolska, Italija, Grčka, Portugal, Francuska, Slovenija, Hrvatska, Cipar i Malta) na oko 5 milijuna hektara uzgajaju se masline. Stabla masline mogu preživjeti dugi niz godina, međutim, identifikacija godova je problematična pa se stari nalazi maslina rijetko koriste u svrhe istraživanja [1,2].

U ovom radu će se analizirati utjecaj usmjerenosti drvene građe, u longitudinalnom smjeru, od radijalnog do tangencijalnog presjeka, na abrazijsku otpornost i tvrdoću domaće masline, sorte oblica (lat. *Olea europea*).

2. MAKROSTRUKTURA DRVA

Drvo je složena biološka struktura, sastavljena od različitih tipova stanica koje zajedno djeluju kako bi zadovoljile potrebe žive biljke. Pokušavajući razumjeti drvo u kontekstu tehnologije drva, često se previđa ključna i osnovna činjenica da se drvo razvijalo tijekom milijuna godina kako bi služilo trima glavnim funkcijama - provođenje vode od korijena do lišća, mehanička potpora biljnog tijela i skladištenje biokemijskih tvari.

Da bi se postigla bilo koja od ovih funkcija, drvo mora imati ćelije koje su konstruirane i međusobno povezane na način koji osigurava obavljanje tih funkcija. Ove tri funkcije utjecale su na evoluciju približno dvadeset tisuća različitih vrsta drvenastih biljaka, od kojih svaka ima jedinstvena svojstva, namjene i mogućnosti, kako u biljnom tako i u ljudskom kontekstu. Anatomija drva je znanstvena disciplina koja proučava značajke strukture drva na makroskopskoj, mikroskopskoj i sub-mikroskopskoj razini [4].

2.1 Botanička podjela

Vrlo često se vrste drva dijele na meko i tvrdo drvo. Klasifikacija drva svodi se na njegovu fizičku strukturu i sastav, pa je previše jednostavno misliti o tvrdom drvu kao tvrdom i izdržljivom u usporedbi s mekim i obradivim, mekim drvom. To je općenito točno, ali postoje iznimke, kao što su slučajevi obične tise (lat. *Taxus baccata*), mekog drva koje je relativno tvrdo i balsa ili balzovine (drvo iz porodice simalovki lat. *Bombacaceae*), tvrdog drva koje je mekše od mekog drva.

Tvrdo drvo dolazi od kritosjemenjača ili cvjetnica poput hrasta (lat. *Quercus*), javora (lat. *Acer*) ili oraha (lat. *Juglans*). Meko drvo dolazi od golosjemenjača, obično zimzelenih četinjača, poput bora (lat. *Pinus*) ili smreke (lat. *Picea*).

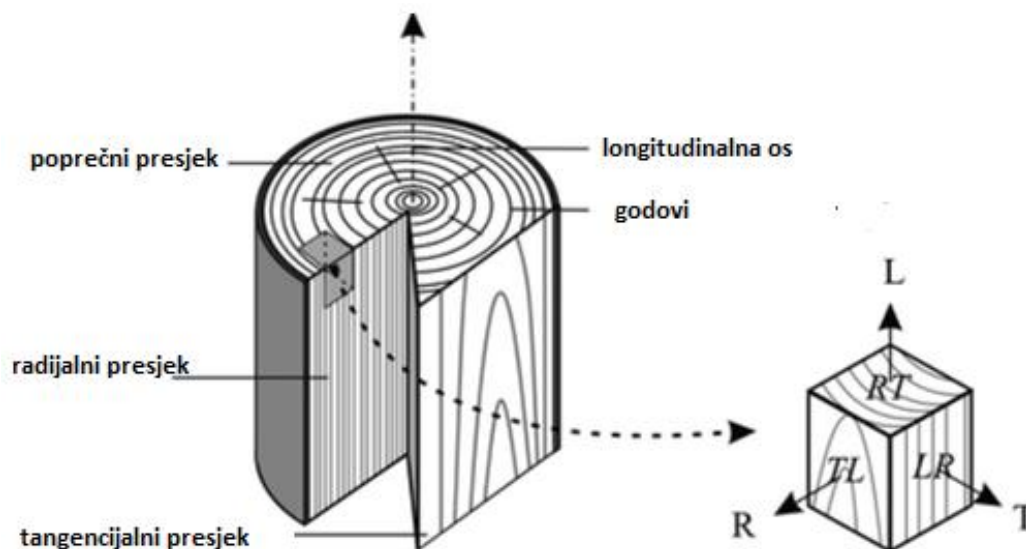
Puno ispravnija podjela drvnih vrsta je na listače i četinjače. Osim što se razlikuju po izgledu lišća, navedene dvije skupine se razlikuju i pogledu strukture. Listače u usporedbi sa četinjačama imaju veću strukturnu složenost jer imaju veći stupanj varijabilnosti unutar tipova stanica i imaju značajno veću količinu osnovnih tipova stanica [5].

2.2 Struktura debla i karakteristični presjeci u drvu

Radi usmjerene građe drva i njegove orijentiranosti u aksijalnom odnosno radijalnom smjeru, drvo je nužno promatrati u tri osnovna presjeka točnije u radijalnom, tangencijalnom te

poprečnom (transverzalnom). Kao bi se došlo do cjelovitog i točnog razumijevanja strukture drva, potrebno je promatrati sve tri ravnine presjeka.

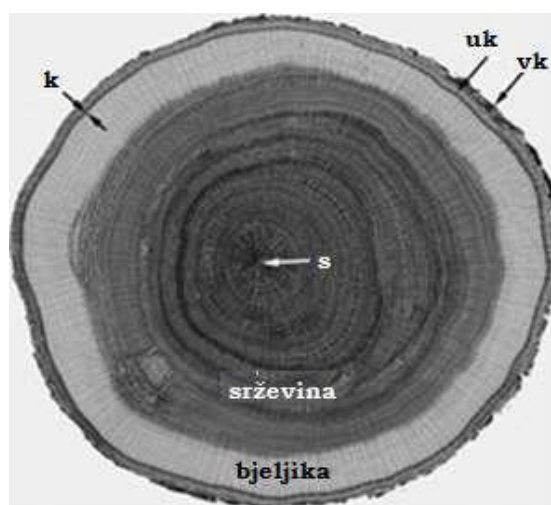
Slika 1 prikazuje tri karakteristične osi drvene građe [6].



Slika 1 Karakteristični presjeci (deblo) i osi drvene građe (kocka) [7]

2.2.1 Poprečni presjek

Poprečni presjek je presjek koji se dobije kada se drvo posiječe. Gledajući dolje u panj vidi se poprečni presjek, kao što prikazuje slika 2. Poprečni presjek pruža informacije o značajkama koje se rasprostiru u smjeru od unutra prema vani kao što je prikazuje slika 2.



Slika 2 Poprečni presjek debla gdje se vide: srčika (s), srževina, bjeljika, kambij (k), unutarnja kora (uk), vanjska kora (vk) [4]

Vanjska kora služi kao štit unutarnjoj kori i sprječava gubljenje vode iz stabla. Daljnjim kretanjem prema unutarnjem dijelu debla se nalazi unutarnja kora koja služi za transport produkata fotosinteze od listova do korijena. Sljedeći sloj je tanki sloj vaskularnog kambija koji se smjestio između unutarnje kore i bjeljike. Iz kambija svake godine u proljeće (u našoj klimatskoj zoni) započinje rast novog goda prema unutrašnjem dijelu debla (sekundarni ksilem) dok s vanjske strane nastaje novi sloj unutarnje kore (sekundarni floem). Širina floema i ksilema, unutar jedne vegetacijske sezone, je u približnom odnosu 1:10. Bjeljika je sloj koji se nalazi između kambija i srčevine. To je živi sloj drva čija je uloga transport mineralnih tvari i vode od korijena sve do lišća. U ovom sloju pohranjuju se i sintetiziraju lipidi i škrob, a to može utjecati na obradivost i trajnost drva. Bjeljiku se može prepoznati jer je svjetlije boje od srčevine koja se nalazi nakon nje. Srčevina je sljedeći sloj koji se nalazi nakon bjeljike. Srčevina je tamnije obojani sloj zbog taloženja različitih tvari koji se još nazivaju ekstraktivima. Osim što je tamnije obojena, zbog ekstraktiva je onemogućena kondukcija mineralnih tvari i vode. Nadalje, mehanička i tehnološka svojstva ovise o vrsti i količini ekstrahiranih tvari. Na kraju, odnosno u samoj sredini debla nalazi se srčika. To je ostatak tkiva još iz rane faze rasta dok se deblo nije u potpunosti formiralo [4,5,8].

2.2.1.1 Godovi

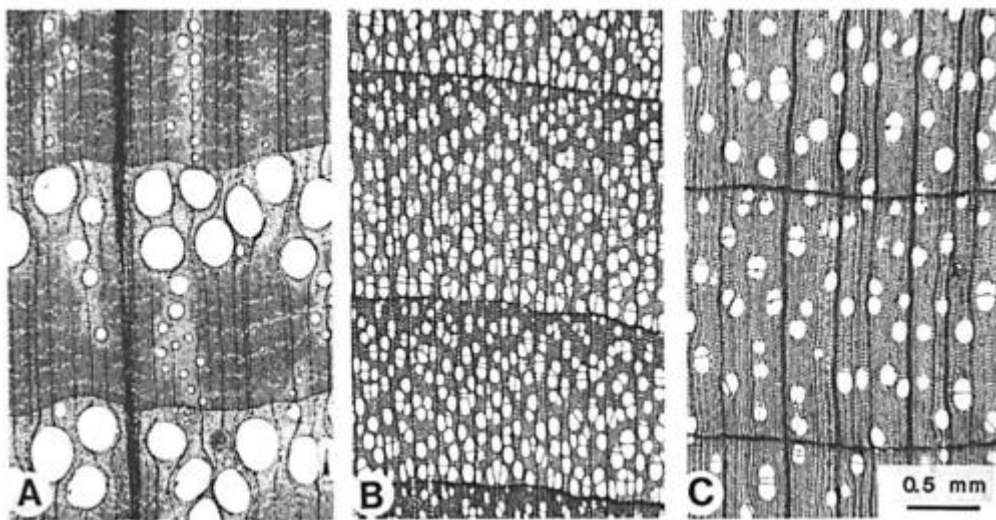
Koncentrični krugovi najbolje vidljivi na poprečnom presjeku predstavljaju godišnji prirast drva i nazivaju se godovima. Takav prirast drva, odnosno rast u debljinu naziva se sekundarni rast. Primarnim rastom naziva se rast u visinu. Godovi nastaju pomoću tankog sloja koji se naziva kambij. Njegovo djelovanje je kontinuirano ili diskontinuirano. Obzirom na vrstu drva (pripada li skupini cvjetača ili listača), kambij može djelovati prije listanja, tijekom listanja ili nakon listanja. Vrste koje se nalaze u tropskoj vlažnoj klimi nemaju godove kao vrste koje rastu u kontinentalnoj klimi. Naime, u kontinentalnoj klimi kambij na drva djeluje diskontinuirano dok na vrste u tropskoj vlažnoj klimi kambij djeluje kontinuirano. Ovisno o vremenu nastajanja goda, odnosno nastaje li na kraju ili na početku vegetacijskog ciklusa, na poprečnom presjeku razlikuje se:

- rani dio goda ili rano drvo te
- kasni dio goda ili kasno drvo.

Na godove utječe starost drva, količina vlage u tlu i zraku, ali i temperatura i količina sunčeve svjetlosti. Široki godovi u pravilu ukazuju na pogodnu godinu rasta dok uski godovi impliciraju na premale količine vode, visoke temperature ili previše odnosno premalo svjetlosti i sl. Godovi

se mogu još podijeliti po markantnosti (slabije ili više izraženi godovi). Općenito su godovi markantniji kod četinjača nego kod listača. Mogu se još podijeliti po boji (svjetliji odnosno tamniji), po širini (fini, polufini i grubi) i po tijeku granične linije (valoviti odnosno uleknuti) [9].

Slika 3 prikazuje podjelu listača prema rasporedu velikih provodnih sudova, odnosno podjelu na difuzno porozno, semi-difuzno porozno i prstenasto porozno drvo.



Slika 3 Prikaz prstenasto poroznih (A), polu – prstenasto poroznih (B) i difuzno poroznih (C) vrsta godova listača [10]

2.3 Radijalni i tangencijalni presjek

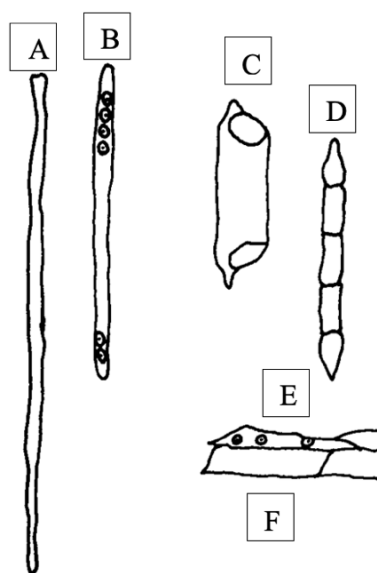
Radijalni presjek je presjek okomit na poprečni presjek te prolazi središtem drvnog valjka. U radijalnom presjeku se godovi vide kao usporedne linije koje mogu biti više odnosno manje istaknute, ovisno o vrsti drva i drugim faktorima. Tangencijalni presjek, kao i radijalni presjek, okomit je na poprečni presjek, no prolazi po tangenti na određeni god, a ne kroz središte drvnog valjka. Također je i na tangencijalnom presjeku moguće vidjeti godove, ali se puno teže mogu razabrati nego u radijalnom presjeku. Za tangencijalni presjek je karakteristična pojava godova u nepravilnim oblicima slova U ili V kao što prikazuje slika 4 [4,5].



Slika 4 Tangencijalni presjek drva masline [11]

3. MIKROSTRUKTURA DRVA

Drvena stanica je osnovna mikrostrukturna drvena jedinica koja je sastavljena od praznog prostora koji se naziva lumen i od stanične stijenke. Za staničnu stijenku se može reći da je to neživa tvar koja je uglavnom izgrađena od ugljikohidrata. Drvne stanice se razlikuju po duljini, promjeru i debljini drvene stijenke, a većina drvnih stanica ima izdužen oblik. Osnovne vrste drvnih stanica prikazuje slika 5. Prikazane vrste drvnih stanica u cjelini čine savršen sustav u kojem su svi dijelovi stabla međusobno povezani. Mikrostruktura listača je puno kompleksnija od mikrostrukture četinjača.



Slika 5 Prikaz drvnih vlakanaca (A), traheida (B), traheja (C), parenhimskih aksijalnih stanica (D), traheida u drvnim trcima (E), parenhimskih stanica drvnih traka (F) [12]

3.1 Molekularna struktura drva

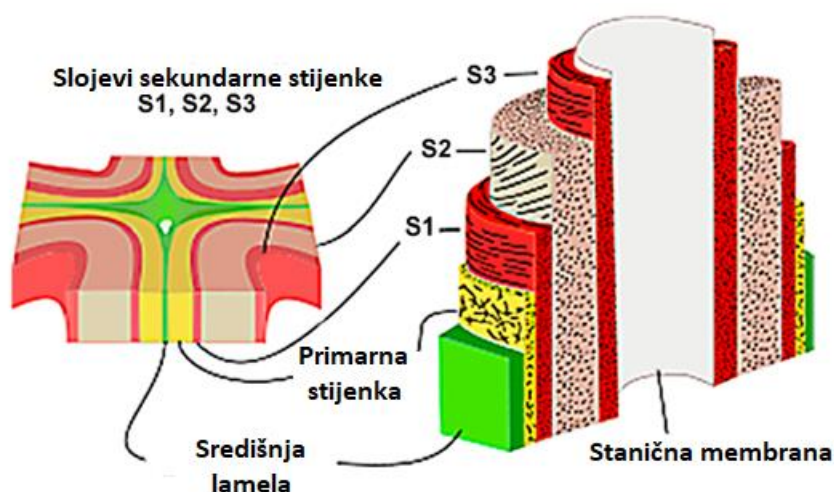
Stanična stijenka drva je višekomponentni sustav, koji se uglavnom sastoji od celuloze, hemiceluloze i lignina, koji se međusobno razlikuju po kemijskoj strukturi i fizikalnim svojstvima. Osim toga, drvo sadrži pektin, škrob i proteine te komponente niske molekularne težine kao što su ekstrakti, organski spojevi topljivi u vodi kao i anorganski spojevi koje prikazuje tablica 1. Sadržaj ovih komponenti također varira u različitim dijelovima istog drva (rano i kasno drvo, kora ili ksilem) [13].

Tablica 1 Sadržaj različitih kemijskih tvari koji su prisutni u drvu [13]

Kemijska tvar	Suha tvar, %
Polisaharidi	65-80
Celuloza	40-45
Hemiceluloza	25-35
Lignin	20-30
Ekstrakti	2-5
Proteini	<0,5
Anorganske tvari	0,1-1

3.2 Struktura stanične stijenke

Stanična stijenka drva je heterogen materijal slojevite konstrukcije koja se općenito sastoji od srednje lamele, primarne stijenke i sekundarne stijenke koje prikazuje slika 6. Sekundarna stijenka obično je podijeljena u tri sloja: vanjski sloj (S1), srednji sloj (S2) i unutarnji sloj (S3), gdje je sloj S2 najdeblji i ima ključnu ulogu u očuvanju čvrstoće drva. Koncentracija komponenti u navedenim slojevima je promjenjiva, što rezultira različitim kemijskim svojstvima od sloja do sloja [14].



Slika 6 Slojeviti prikaz građe drvene stanične stijenke [14]

3.3 Mikrostruktura četinjača

Mikrostruktura četinjača sastoji se većinom od longitudinalnih traheida. Usmjerenje longitudinalnih traheida je aksijalno odnosno vertikalno. Osim traheida, četinjače se sastoje i od parenhimnih stanica drvnih traka te je njihovo usmjerenje radijalno, točnije od srčike ka kori debla kao što prikazuje tablica 2.

Tablica 2 Orijentacija glavnih vrsta stanica četinjača [10]

Stanice orijentirane uzdužno	Stanice orijentirane radijalno
Longitudinalne traheidie	Traheide u drvnim tracima
Aksijalne parenhimske stanice	Parenhimske stanice drvnih traka

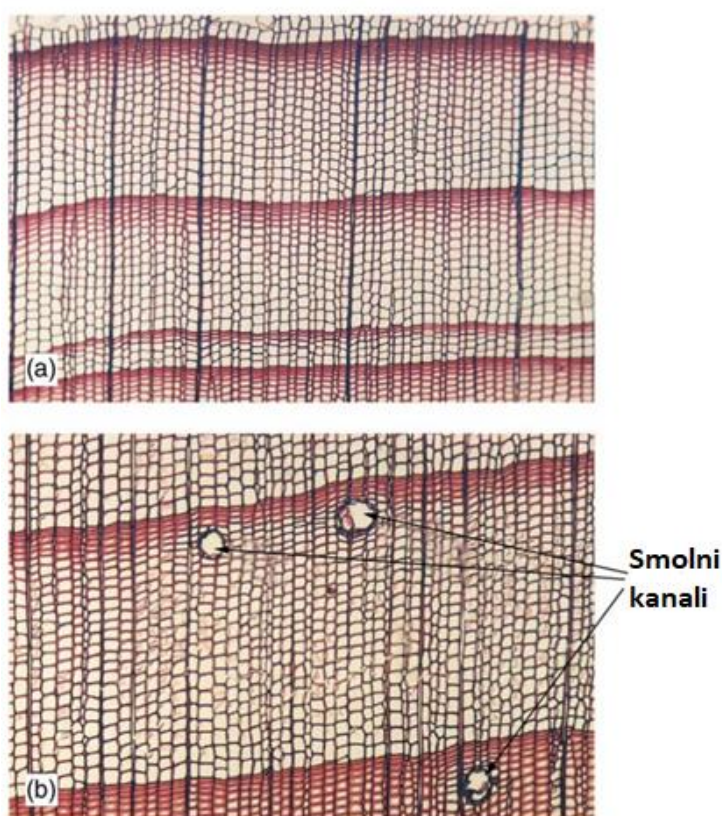
Longitudinalne traheide su stanice koje su izdužene i to u omjeru 100:1 između širine i duljine. Uloga longitudinalnih traheida u drvu četinjača je kondukcija odnosno provođenje vode od dna stabla (korijenja) prema vrhu stabla (krošnji). Osim kondukcije vode, uloga traheida je i mehanička potpora te njegov volumni udio u drvu četinjača iznosi preko 90 % [4,10].

Traheide, u poprečnom presjeku drva, poprečno su presječene. Longitudinalne traheide ranog i kasnog drva različiti su po veličini lumena i po debljini stijenke. Longitudinalne traheide u ranom drva imaju veći lumen i tanju staničnu stijenku. S druge strane, četinjače u kasnom drvu imaju deblju staničnu stijenku i manji lumen. Kod svih vrsta, poprečni presjek izgleda slično i to najčešće u obliku pravokutnika ili kvadrata. Drvo u prvom dijelu godine, točnije u prvim mjesecima proljeća, na raspolaganju ima veću količinu vode. Tu vodu je potrebno provesti do najviših dijelova stabla te zbog toga stanice imaju veći lumen, a manju staničnu stijenku. U kasnijim mjesecima količina vode se smanjuje te je iz toga razloga stanična stijenka deblja, a lumen je manji. Dijelovi goda koji imaju takvu staničnu stijenku i lumen, u većoj mjeri pridonose mehaničkoj otpornosti drva te je iz tog razloga na tim dijelovima tvrdoća drva veća nego na drugom dijelu goda gdje prevladava rano drvo [4,10].

Aksijalne parenhimske stanice su po dimenzijama poprečnog presjeka lumena približno iste kao traheide dok su u radijalnom i tangencijalnom presjeku ove stanice puno kraće od traheida. U uzdužnom presjeku pojavljuju se u nizovima i relativno su kratke. Navedene stanice imaju ulogu spremnika i služe za skladištenje raznih tvari kao što su škrob, masti, ulja, razni šećeri i anorganske tvari.

Smolni kanali su sastavni dio mikrostrukture nekih četinjača. Njihova usmjerenost može biti aksijalna i radijalna. Smolni kanali proizvode smolu koja se nalazi u šupljinama obloženim epitalnim stanicama. Kod nekih vrsta četinjača smolne kanale je moguće vidjeti golim okom dok su smolni kanali kod ostalih vrsta puno sitniji. Smolni kanali se ponekad pojavljuju kao reakcija uslijed nekakve ozljede ili pak traume [4,9,10].

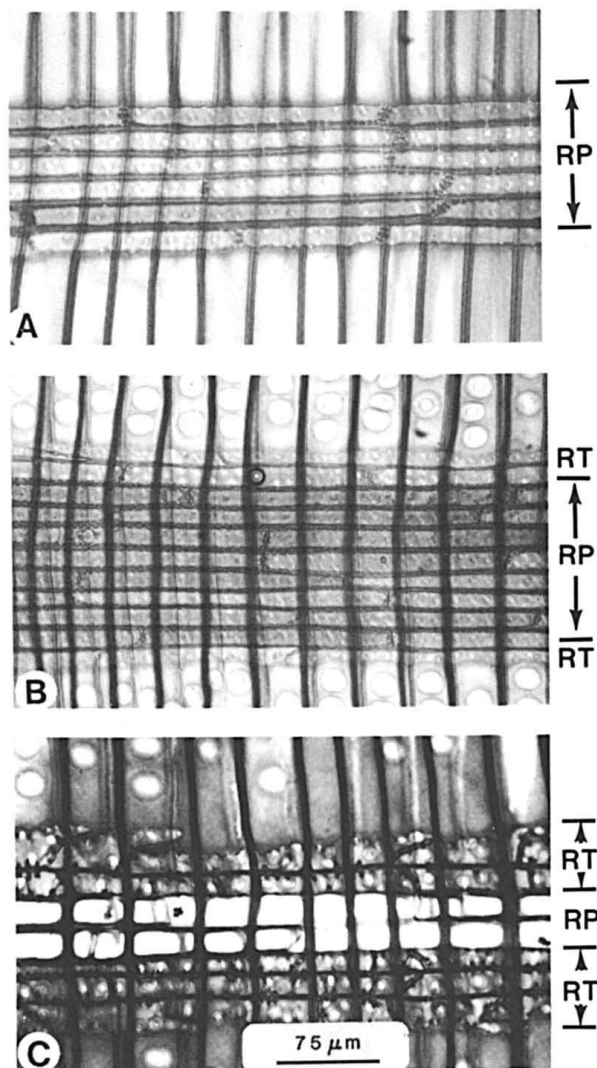
Slika 7 prikazuje smolne kanali kod smreke i prikazuje sekvoju kod koje ne postoje smolni kanali.



Slika 7 Prikaz strukture u poprečnom presjeku sekvoje bez smolnih kanala (a) i smreke sa smolnim kanalima (b) [8]

Drvni traci izgrađeni su od traheida i parenhimskih stanica, a njihova usmjerenost je radijalna odnosno od sredine debla (srčike) prema vanjskom dijelu kore debla. Ukoliko su drvni traci građeni od više vrsta stanica nazivaju se još i heterogenim drvnim tracima. Ako su drvni traci građeni od samo jedne vrste stanica, nazivaju se homogenim drvnim tracima [4,10,12].

Slika 8 prikazuje drvne trake.



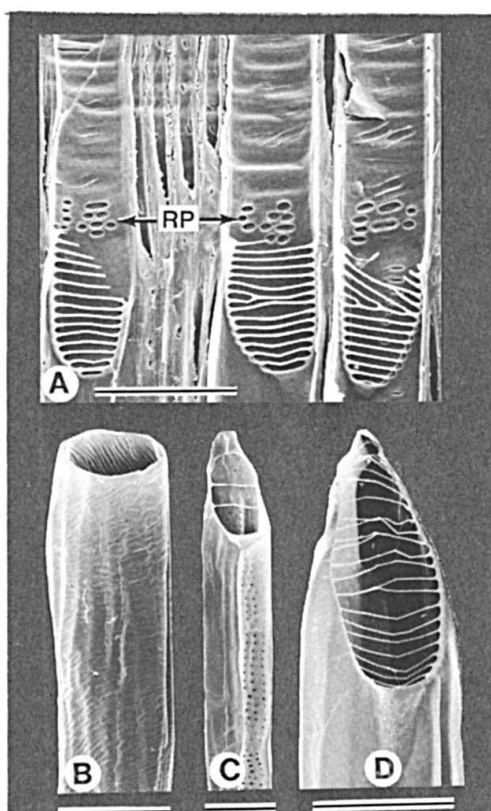
Slika 8 Prikaz drvnih traka sačinjene od parenhimskih stanica (RP) i od traheida (RT) [10]

3.4 Mikrostruktura listača

Usporedi li se mikrostruktura listača s mikrostrukturom četinjača, vidljivo je kako listače imaju izrazito složeniju građu. Gledano kroz uzdužni sustav listača, vidljivo je kako su izgrađene od drvnih vlaknaca, traheida, parenhimskih stanica i traheja odnosno pora. Svaki navedeni element listače ima važnu biološku ulogu i svaki se razlikuje od sljedećeg po veličini i rasporedu. Osim biološke uloge, svojom građom i rasporedom izravno utječu na mnoga svojstva drva (fizikalna, mehanička i ostala). Osim uzdužnog sustava i radijalni sustav je složeniji. Sastoji se od drvnih traka čija se građa može jako razlikovati (po obliku, veličini ili nekim drugim značajkama).

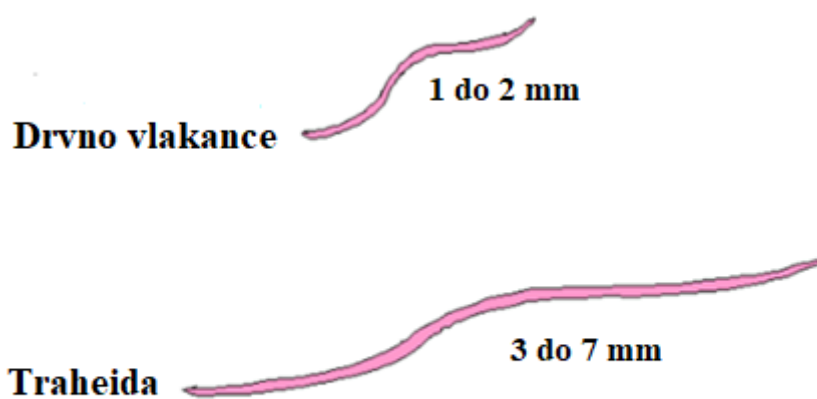
Pojedina traheja ili pora sastoji se od vertikalnog niza kratkih (0,02-0,5 mm) segmenata, koji su međusobno uzdužno spojeni. Pojedine traheje mogu vijugati u ograničenoj mjeri u radijalni ili tangencijalni smjer za spajanje ili završetak druge traheje, ali njihova glavna funkcija je vertikalno provođenje vode s otopljenim mineralnim tvarima, od korijena prema gore. Da bi se olakšao ovaj prijenos, krajevi svih traheja su perforirani; odnosno krajevi su otvoreni za slobodan protok tekućine između stanica. Spiralna zadebljanja su strukture koje su česte u trahejama mnogih listača. Ova zadebljanja su posebno vrijedna za znanstvenike za lakšu identifikaciju vrste. Odsutnost ili prisutnost navedenih struktura nema značajan utjecaj na karakteristike drva. Kod nekih vrsta krajevi traheja su potpuno otvoreni (jednostavni), dok u drugima krajevi sadrže niz paralelnih poprečnih otvora (skaliformni) ili su nekako drugačije dizajnirane (npr. mrežaste). Konkretna vrsta otvora ima značajnu ulogu u identifikaciji drvnih vrsta [10,12,13].

Slika 9 prikazuje perforacijske ploče.



Slika 9 SEM prikaz glavnih tipova perforacijskih ploča na trahejama: (A) radijalni presjek koji pokazuje skaliformne perforacijske; (B) jednostavna perforacijska ploča. (C i D) pokazuju skaliformne ploče s vrlo malo cjevčica i s brojnim cjevčicama [10]

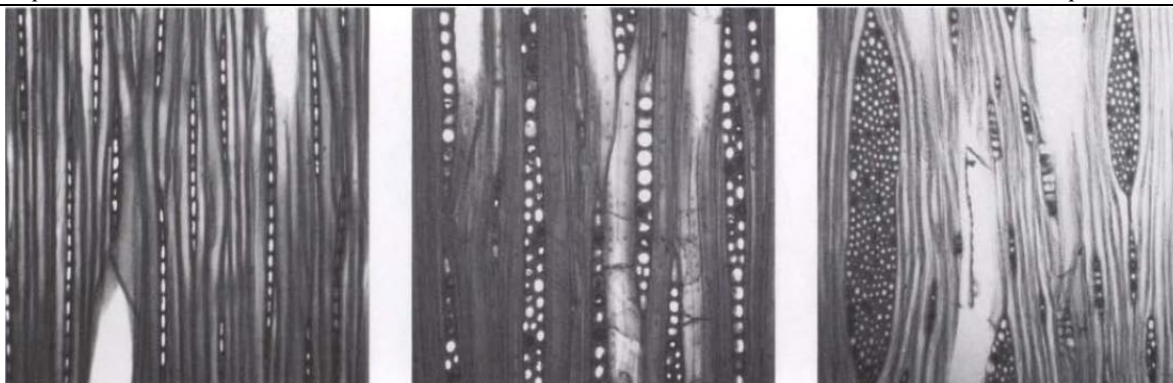
Stanice koje imaju debelu staničnu stijenku i uski lumen nazivaju se drvnim vlakancima. Temeljna uloga drvnih vlakana je mehanička potpora. Čvrstoća i gustoća vlakana određene su veličinom lumena i debljinom stijenke. Manju gustoću i čvrstoću posjeduju vrste kod kojih je stanična stijenka tanka, a lumen veći. Vrste s debljom staničnom stijenkom i malim dimenzijama lumena posjeduju gustoću i čvrstoću većih vrijednosti. Osim spomenutih karakteristika, drvena vlakana posjeduju manju duljinu nego li je duljina traheida kod četinjača, kao što prikazuje slika 10 [10].



Slika 10 Usporedba duljine drvnog vlakanca i traheide

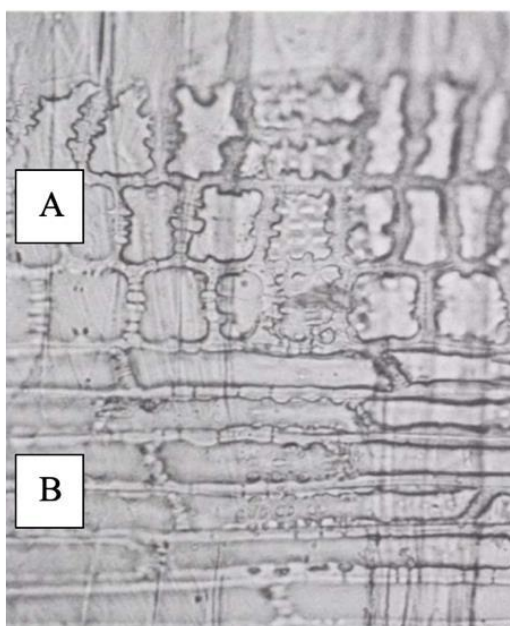
Građa i funkcija parenhimskih stanica je identična kao i kod četinjača. Posjeduju veliki lumen i tanku stijenku, a razlika između navedenih stanica kod listača i četinjača je u količini u kojoj se pojavljuju te je veći broj parenhimskih stanica kod listača nego kod četinjača.

Drvni traci listača egzistiraju u mnogo većem broju različitih oblika nego li je to slučaj drvnih traka kod četinjača. Drvni traci mogu se sastojati od jednog okomitog niza stanica, od dva niza stanica ili od tri ili više nizova stanica kao što je prikazuje slika 11 [4,5,12].



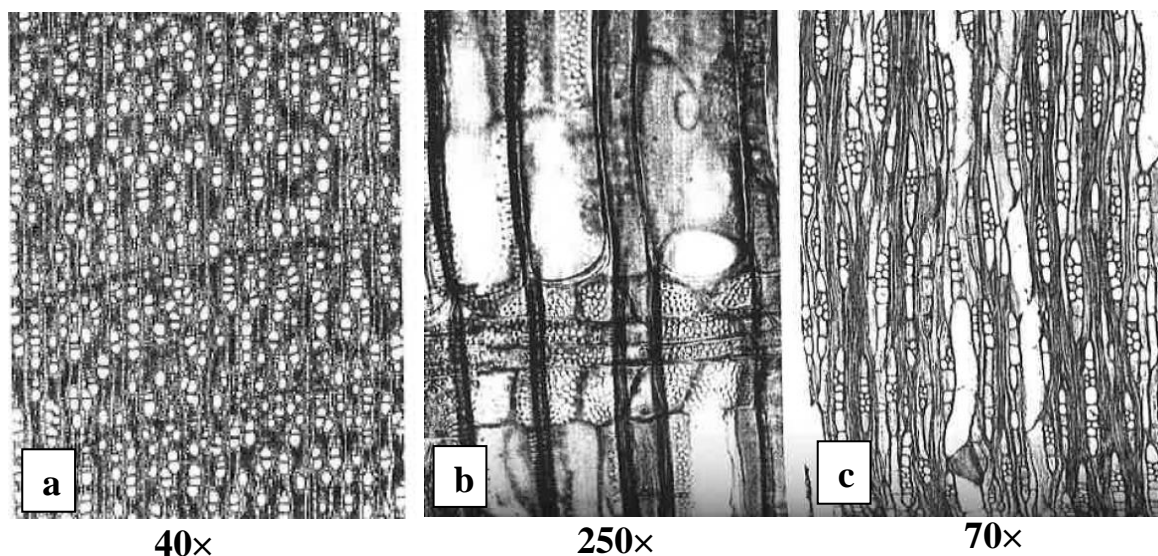
Slika 11 Prikaz drvnih traka: jednorednog (A), dvorednog (B) i višerednog (C) [15]

Parenhimske stanice se u drvnim trcima mogu pojaviti u uspravnom ili izduženom obliku kao što je prikazuje slika 12. Heterogenim drvnim trcima nazivamo drvene trake koji sadrže obje vrste stanica. Uspravno orijentirane parenhimske stanice se u većini slučajeva nalaze na rubovima drvnih traka, a izdužene parenhimske stanice se uglavnom nalaze u sredini. Izdužene parenhimske stanice većinom sačinjavaju homogene drvene trake.



Slika 12 Prikaz heterogenih drvnih traka koji su građeni od parenhimskih stanica uspravnog (A) i izduženog (B) oblika [15]

3.5 Mikrostruktura masline



Slika 13 Mikrostruktura masline u poprečnom, radijalnom i tangencijalnom presjeku [16]

Slika 13 prikazuje mikrostrukturu masline u poprečnom (a), radijalnom (b) i tangencijalnom presjeku (c). Na poprečnom presjeku jasno se vidi homogeni raspored velikih provodnih sudova, traheida. To znači da se maslina može svrstati u difuzno porozne listače. Pore se nalaze u kratkim, radijalno nanizanim grupama od dvije do četiri pore. Rijetko se mogu vidjeti pojedinačne pore. Prijelazi iz jednog u drugi god teško se razabiru. U radijalnom presjeku vide se stanice drvnog traka nanizane horizontalno. U tangencijalnom presjeku drvni traci su prerezani poprečno, a traheje i vlakanca uzdužno [16].

U znanstvenom radu *Fiber dimensions, lignin and cellulose content of various plant materials and their suitability for paper production*, autora Ververis i dr., istražen je udio lignina i celuloze te duljina vlakancaca, njihov promjer, promjer lumena i debljina stanične stijenke u drvu masline. Sve navedeno intezivno utječe na mehanička i neka druga svojstva ove vrste drva. Tablica 3 prikazuje dobivene rezultate za duljinu i promjer vlakancaca te promjer lumena i debljina stanične stijenke vlakancaca. Prikazuje srednje vrijednosti od 375 mjerenja [16].

Tablica 3 Duljina i promjer vlakancaca te promjer lumena i debljina stanične stijenke vlakancaca [16]

Vrsta drva	Duljina vlakancaca (mm)	Promjer vlakancaca (μm)	Promjer lumena (μm)	Debljina stanične stijenke (μm)
Maslina	$0,85 \pm 0,07$	$15,1 \pm 2,0$	$6,2 \pm 1,9$	$4,5 \pm 0,8$

Tablica 4 prikazuje kako se mijenjaju duljina i promjer drvnih vlaknaca te promjer lumena i debljina stanične stijenke vlaknaca o ovisnosti o položaju, od dna prema vrhu grane [16].

Tablica 4 Prikaz promjene dimenzija vlaknaca, lumena i stanične stijenke od dna prema vrhu grane [16]

Vrsta drva	Duljina grane (%)	Duljina vlaknaca (mm)	Promjer vlaknaca (μm)	Promjer lumena (μm)	Debljina stanične stijenke (μm)
Maslina	10	0,90	15,21	6,23	4,49
	50	0,87	15,15	6,29	4,44
	90	0,82	14,96	6,09	4,43

Prema dobivenim podacima može se zaključiti kako duljina vlaknaca i promjer vlaknaca, promjer lumena i debljina stanične stijenke imaju veće vrijednosti pri dnu nego pri vrhu grane. Navedeno se može objasniti činjenicom da rast stanične stijenke ovisi o akumulaciji produkata metabolizma (celuloza, hemiceluloza, lignin, voskovi itd.), koji se povećavaju sa zrelošću stabla [16].

Tablica 5 Promjene kemijskog sastava od dna do vrha grane [16]

Vrsta drva	Dio grane	Udio celuloze (%)	Udio lignina (%)
Maslina	Baza	41,7	40,7
	Sredina	40,7	39,7
	Vrh	38,1	37,1

Tablica 5 prikazuje udio celuloze i lignina u bazi, sredini i na vrhu grane masline.

Postoji tendencija smanjenja celuloze i lignina kako se kreće od baze prema vrhu grane. To je bilo očekivano budući da zrela tkiva u podnožju akumuliraju veće količine metaboličkih proizvoda od mlađih dijelova na vrhu [17].

4. SVOJSTVA DRVA

4.1 Voda u drvu

Živo drvo sadržava dostatnu količinu vode koja je neophodna kako bi se drvo održalo elastičnim i kako bi izdržalo vanjska naprezanja. Drvo u tehničkoj primjeni se upotrebljava u suhom stanju. Drvo se ubraja među higroskopne materijale što znači kako drvo upija vodu i vlagu iz zraka. Ovisno o sadržaju vlage u drvu, u literaturi je moguće pronaći različite nazive za drvo:

- provelo,
- zrakosuho,
- sobosuho i
- standardno suho drvo.

Vlaga u drvu može promijeniti dimenzije drva i njegova mehanička svojstva. Vlaga se može pojaviti u vezanom i slobodnom obliku. Ako je vezana, tada je smještena unutar stanične stijenke dok se slobodna vlaga nalazi u lumenu. Sadržaj vlage ovisi o gustoći drva te njegova vrijednost oscilira obzirom na vrstu drva.

Gustoća određene tvari opisuje kolika je masa određene tvari prosječno sadržana unutar određenog volumena. Ako je masa neke tvari veća, određeno tijelo će biti gušće i obratno [4,18].

Gustoću je moguće izračunati sljedećom formulom:

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

gdje je:

ρ_w – gustoća uzorka pri nekom udjelu vlage, g/cm^3

m_w – masa uzorka pri nekom udjelu vlage, g

V_w – volumen uzorka pri nekom udjelu vlage, cm^3 .

Standardni sadržaj vlage u drvu moguće je izračunati sljedećom formulom:

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100, \% \quad (2)$$

gdje je:

w – količina odnosno sadržaj vlage prisutan u drvu, %

m_1 – masa drva kod pri određenom sadržaju vlage, g

m_2 – masa drva u apsolutno suhom stanju, g.

Sadržaj vlage u drvu moguće je izračunati i kao tehnički sadržaj vlage u drvu sljedećom formulom:

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

gdje m_1 i m_2 imaju isto značenje kao i u prethodnoj formuli.

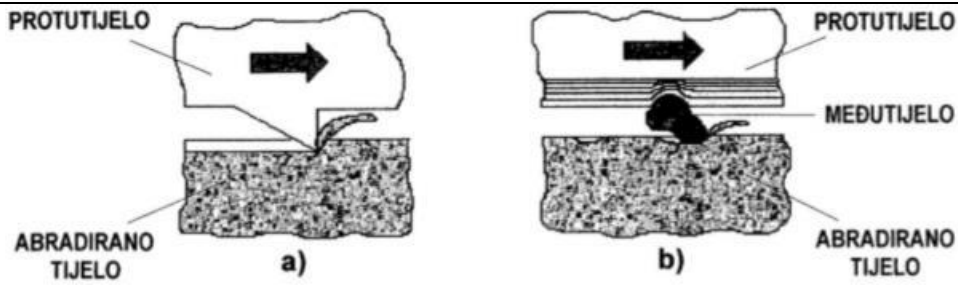
4.2 Abrazija

Istiskivanje materijala koje se događa uslijed djelovanja tvrdih čestica ili tvrdih izbočina naziva se abrazijsko trošenje. Ovo trošenje se još naziva i mineralno trošenje zbog prisustva abrazijskih čestica koje su uglavnom mineralnog podrijetla. Abrazijsko trošenje se može opisati s dvije faze jediničnog događaja kao mikrorezanje abrazivom nedefinirane geometrijske oštrice.

Analiziranje mehanizma abrazije moguće je s više različitih gledišta:

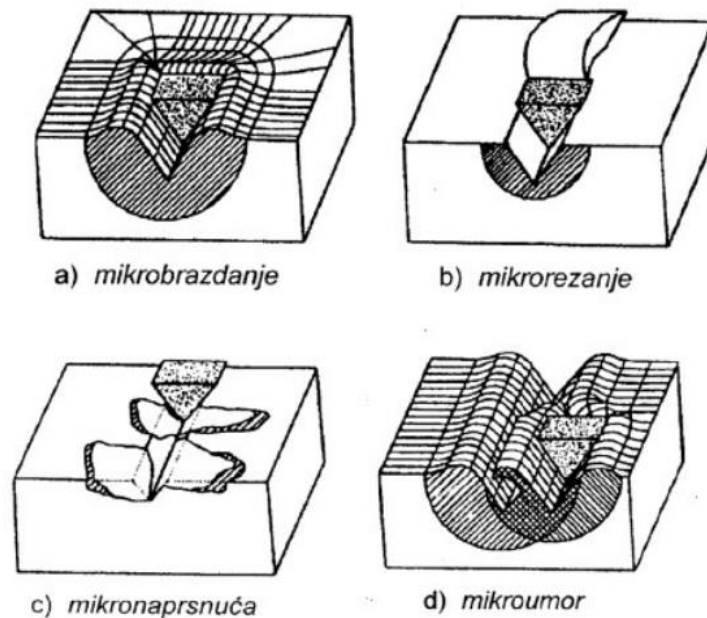
- ovisno o strukturi tribosustava u kojem se odvija abrazija (odnosno prema broju tijela koji sudjeluju u trošenju)
- ovisno o uzajamnom djelovanju između čestica abrazije i površine koja se troši.

Abrazijsko trošenje u ovisnosti o broju tijela koji sudjeluju u trošenju dijeli se na abraziju u dodiru dva tijela i na abraziju u dodiru tri tijela kao što je prikazuje slika 14. Kod abrazije u dodiru dva tijela tribosustav se sastoji od abrazijskog tijela i abrazijskog protutijela. Razlika kod abrazije u dodiru tri tijela je što se tribosustav još sastoji i od međutijela odnosno čestice koje se mogu slobodno gibati između abrazijskog tijela i abrazijskog protutijela [19].



Slika 14 Prikaz abrazije pri dodiru dva tijela (a) i tri tijela (b) [19]

Abrazijsko trošenje u ovisnosti o uzajamnom djelovanju između čestica abrazije i površine koja se troši dijeli se na mikrobrazdanje, mikrorezanje, mikronaprnuća i mikroumor kao što prikazuje slika 15. Mikrobrazdanje je postupak odnošenja materijala koje je proporcionalno volumene nastale brazde uslijed plastične deformacije uzrokovane prolaskom jedne abrazivne čestice. Mikrorezanje je postupak odnošenja materijala koje je jednako volumenu zarez nastalog uslijed prolaska abrazivne čestice. Mikronaprnuće je postupak odnošenja materijala s krhke površine mehanizmom nastanka i širenja mikropukotina. Mikroumor je postupak odnošenja materijala mehanizmom umora površine koje je nastalo uslijed učestalih izmjeničnih opterećenja [19].



Slika 15 Prikaz mikromehanizama abrazijskog trošenja nekog materijala [19]

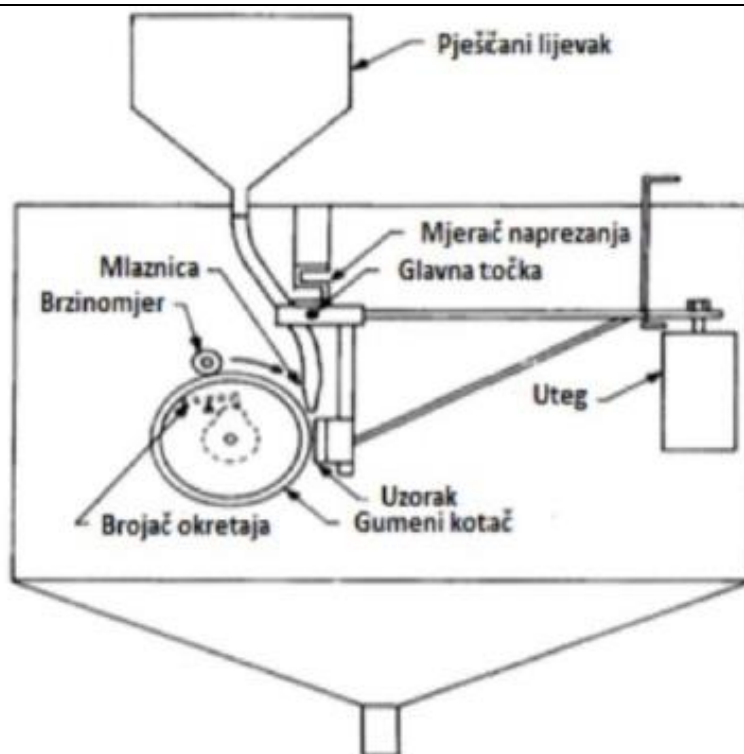
Kada se razmatra abrazija između tri tijela, a među njima su drvo i neka druga površina u kontaktu, potrebno je istaknuti važnost svojstava navedene druge površine koja direktno utječu na stupanj kojim će se drvo abrazivno trošiti [19].

Brzina trošenja materijala kod abrazijskog trošenja između triju tijela niža je od onog između dvaju tijela. Uslijed toga što čestice koje se nalaze u prostoru između površina 90 % vremena provode u slobodnom gibanju, a samo 10 % vremena abradiraju površinu dolazi do smanjenje brzine trošenja. Većina problema koja uzrokuju abrazijska trošenja na industrijskoj i poljoprivrednoj opremi su abrazijska trošenja s tri tijela. S druge strane se abrazijska trošenja s dva tijela najčešće susreću u zahvatima uklanjanja materijala. Metoda za ispitivanje abrazijskog trošenja između triju tijela je metoda „suhi pijesak – gumeni kotač“ temeljena na parametrima opisanim normom ASTM G65.

4.2.1 Metoda „suhi pijesak – gumeni kotač“ ASTM G65

Ispitivanje abrazije metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“ simulira abrazivno trošenje s niskim naprezanjem s tri tijela. Ova metoda ispitivanja abrazije je brza i daje jasnu korelaciju s testiranjima koja se obavljaju na terenu. Kao što prikazuje slika 16, uređaj za ispitivanje abrazijskog trošenja se sastoji od:

- čeličnog kotača s gumenim obručem,
- pješčanog lijevka koje je povezan s mlaznicom,
- brzinomjera,
- brojača okretaja i
- utegnute poluge koja drži uzorak i proizvodi horizontalnu silu prema kotaču gdje pijesak teče [20].



Slika 16 Uređaj na kojem se provodi ispitivanje abrazivnog trošenja metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“ [21]

Metoda se sastoji od osam koraka, a to su redom sljedeći:

1. Vaganje i čišćenje uzorka
2. Postavljanje uzorka i učvršćivanje istog u čeljust
3. Pokretanje protoka pijeska kroz mlaznicu
4. Pokretanje gumenog kotača
5. Dovođenje uzorka u kontakt s kotačem
6. Zaustavljanje motora i curenje pijeska
7. Skidanje uzorka
8. Vaganje i čišćenje uzorka da bi se utvrdio gubitak mase

Kako bi se izračunao gubitak volumena potrebno je odrediti gustoću ispitivanog uzorka prije samog ispitivanja. Ispitivanje se uglavnom ponavlja jednom ili više puta te se iz gustoće materijala i gubitka mase nakon ispitivanja izračunava gubitak volumena. Kako bi se zadovoljile ASTM specifikacije, koeficijent varijacije između dva ili više ispitivanja materijala ne smije biti veći od 7 % [20,21].

4.3 Tvrdća drva

Tvrdoća je iznimno bitno mehaničko svojstvo, a ono po definiciji označava otpornost materijala prema prodiranju nekog drugog materijala veće tvrdoće. Tvrdoću je moguće odrediti u svim smjerovima drva, a ovisi o smjeru djelovanja sile naspram smjera vlaknaca pa je tako moguće odrediti tvrdoću u poprečnom, radijalnom i tangencijalnom smjeru [4].

Kada se raspravlja o metodama ispitivanja tvrdoće drva, najčešće korištene metode koje se koriste su metoda po Janki i metoda po Brinellu koje su u daljnjem tekstu detaljnije opisane.

Tablica 6 predstavlja raspone u kojima se rasprostiru vrijednosti tvrdoće određenih domaćih vrsta mekog i tvrdog drva.

Tablica 6 Tvrdoće određenih domaćih vrsta mekog i tvrdog drva [4]

Vrsta drva	Tvrdoća
Hrast	28,0... 65,0... 101,0
Bukva	54,0... 78,0... 110,0
Lipa	26,0... 33,0... 39,0
Bor (obični)	19,0... 30,0... 50,0

Metoda koja se najčešće koristi za mjerenje tvrdoće drva je metoda po Janki. Navedenu metodu je prvi implementirao austrijski znanstvenik Gabrijel Janka već 1906. godine, a metoda je 1927. godine standardizirana. Metoda je trenutno važeća prema američkoj normi ASTM D 1037-12 prema kojoj ispitivani uzorak mora biti dimenzija $50 \times 50 \times 30$ mm. Rezultat tvrdoće izravno ovisi o sili kojom se čelična kuglica, čiji promjer iznosi 11,28 mm, utiskuje u površinu drva sve dok ne dođe do polovine svog promjera točnije do 5,64 mm. Brzina kojom se utiskuje kuglica je konstanta te poprima iznos u rasponu od 0,05 do 0,1 mm/s [22].

Izraz pomoću kojeg se računa vrijednost tvrdoće po Janki je sljedeća:

$$H_J = K \cdot F, N \quad (4)$$

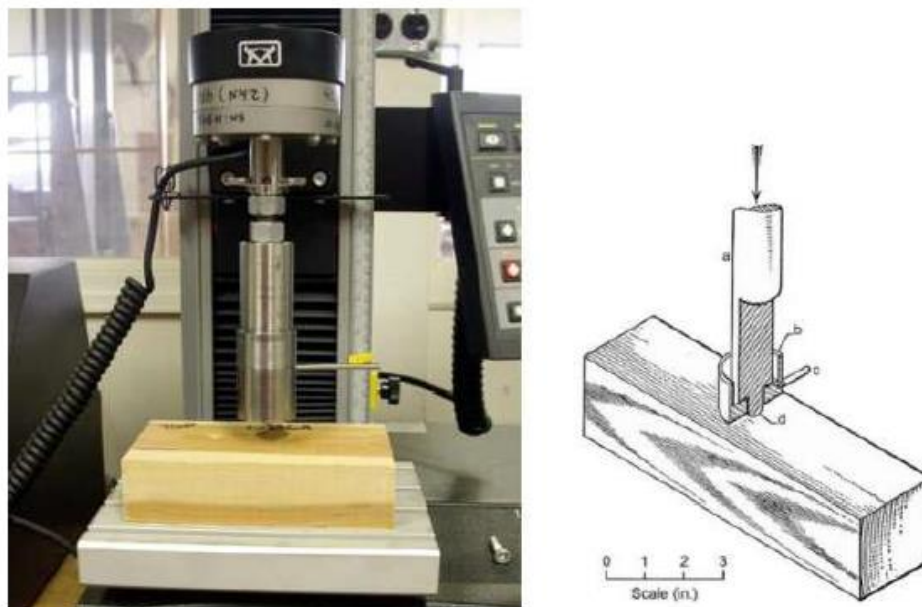
gdje su:

H_J – tvrdoća po Janki u N

K – koeficijent koji ovisi o dubini prodiranja čelične kuglice

F – sila kojom se utiskuje kuglica na definiranu dubinu u N.

Slika 17 prikazuje uređaj i skicu ispitivanja tvrdoće metodom po Janki.



Slika 17 Skica i uređaj koji se koriste za mjerenje tvrdoće drva Jankinom metodom [23]

Sljedeća metoda koja se koristi za ispitivanje tvrdoće drva, a ujedno i metoda kojom je provedeno ispitivanje u ovom radu, je metoda po Brinellu. Navedena metoda je propisana normom HRN EN 1534:2010. Postupak mjerenja tvrdoće navedenom metodom se odvija pomoću kuglice koja je izrađena od kaljenog čelika. Kuglica se utiskuje u materijal na kojem se provodi ispitivanje tvrdoće. Navedena metoda se najčešće koristi prilikom ispitivanja tvrdoće metala, a moguće je navedenu metodu koristiti i za ispitivanje tvrdoće drva. Promjer kuglice se kreće u intervalu od 1 do 10 mm, a sila kojom se pritišće kuglica u materijal iznosi približno 500 ili 1000 N. Izračun tvrdoće se vrši tako što se uzima promjer baze kalote (d) koji je vidljiv nakon što se kuglica ukloni s površine materijala. Promjer je potrebno izmjeriti korištenjem mjernog povećala kako bi se dobiveni podaci mogli uvrstiti u sljedeći izraz [24]:

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \text{ N/mm}^2 \quad (5)$$

gdje su:

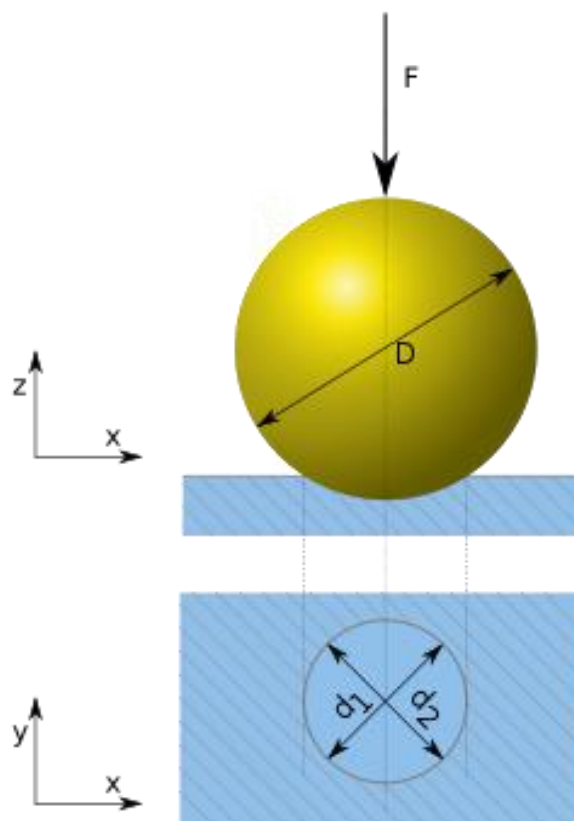
F – sila kojom kuglica prodire u materijal u N

D – promjer kuglice u mm

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

Navedenom metodom nije lako izmjeriti tvrdoću jer je otisak koji ostavi kuglica malen te promjer koji je ostavila kuglica nakon rasterećenja nije lako izmjeriti. Osim toga, prisutno je ogromno rasipanje rezultata u ovisnosti o mjestu na kojem je kuglica napravila otisak (rani ili kasni dio goda).

Slika 18 prikazuje način na koji se mjeri tvrdoća metodom po Brinellu [25,26].



Slika 18 Mjerenje tvrdoće upotrebom metode po Brinellu [27]

5. EKSPERIMENTALNI DIO

5.1 Cilj rada i provođenje ispitivanja

Osnovni cilj rada je odrediti kako se mijenjaju tvrdoća i otpornost na abrazijsko trošenje drva masline (*Olea europaea*) u longitudinalnom smjeru, u ovisnosti o kutu koji zatvara abradirana površina s tangentom na god. Kut se mijenjao od 0°, što odgovara tangencijalnom presjeku, do 90°, što odgovara radijalnom presjeku.

Ispitivanje tvrdoće provedeno je metodom po Brinellu dok je ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje provedeno metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“ prema normi ASTM G65. Na uzorcima su određeni udjeli vlage i izračunata je gustoća.

5.2 Materijali za ispitivanje i priprema uzoraka

Uzorci su pripremljeni na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, gdje su provedena i navedena ispitivanja. Uzorci su izrezani iz debla masline oblice koja se nalazila u masliniku u zaleđu Zadarske županije, točnije u mjestu Posedarju kao što prikazuje slika 19. Nakon što je maslina ispiljena, dijelovi debla sušeni su u natkrivenom prostoru oko 2 mjeseca. Dijelovi debla iz kojih su izrezani svi uzorci za planirana ispitivanja prikazuje slika 20. Na poprečnom presjeku debla nije bilo moguće izbrojati godove kao što prikazuje slika 21 lijevo. Naime, određivanje starosti i broj godina jedan je od izazovnijih zadataka kod masline te su na tu temu napisani mnogi znanstveni radovi [28,29]. Na poprečnom presjeku jasno se mogla razlučiti bjeljika od srčevine, prema boji drvnog tkiva. Nakon utvrđivanja osnovnih informacija o makrostrukтури drva, na površini poprečnog presjeka debla označeni su kvadrati dimenzija 25 × 25 mm.

Slika 21 desno prikazuje raspored svih uzoraka na poprečnom presjeku debla.



Slika 19 Maslina prije rezanja



Slika 20 Deblo masline nakon rezanja



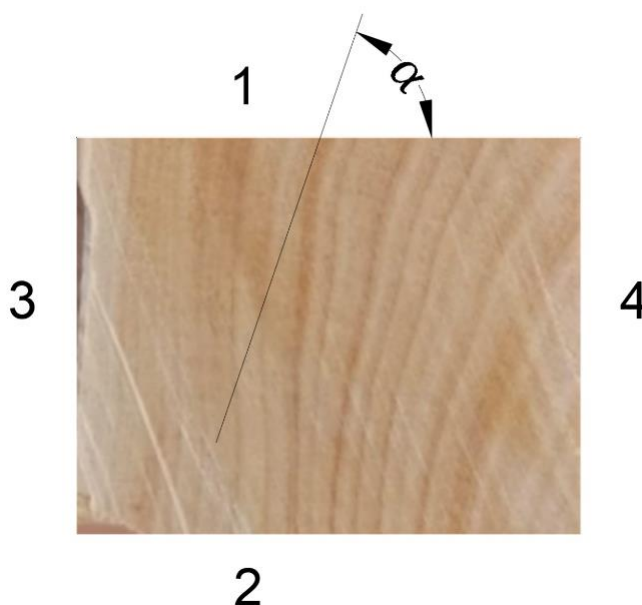
Slika 21 Poprečni presjek prije (lijevo) i nakon pozicioniranja uzoraka (desno)

Nakon što je završeno označavanje uzoraka, obavljeno je rezanje uzoraka na strojnoj pili CY210A, Farrox u Laboratoriju za alatne strojeve Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Prikaz procesa rezanja uzoraka prikazuje slika 22. Svi uzorci su imali oblik pravilne četverostrane prizme dimenzija 25 mm × 25 mm × 76 mm. Ukupno je pripremljeno 57 uzoraka.



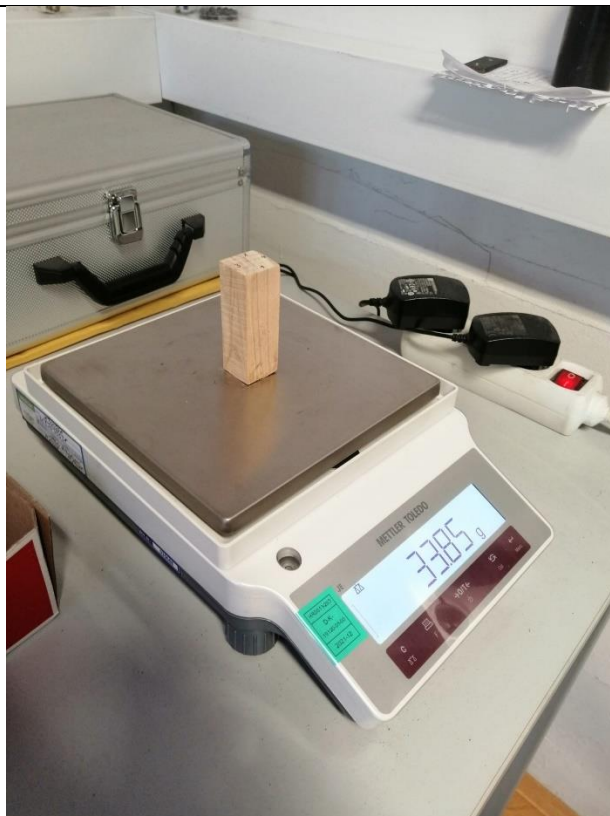
Slika 22 Prikaz procesa rezanja uzoraka

Nakon što su uzorci izrezani, uslijedilo je određivanje kutova između ispitivane površine i tangente na god. Slika 23 prikazuje način na koji su određeni navedeni kutovi. Na istoj slici prikazan je i način na koji su označene abradirane plohe kod svih uzoraka.



Slika 23 Određivanje kuta površine pomoću tangente na god

Kako se otpornost na abrazijsko trošenje određuje preko gubitka mase ili gubitka volumena, uzorcima prije abradiranja treba izmjeriti masu. Prije vaganja uzoraka bočne plohe su izbrušene i očetkane te su se na taj način uklonile sve čestice koje bi na bilo koji način mogle utjecati na vrijednost izmjerene mase prije i nakon procesa abradiranja. Mjerenje mase obavljeno je u Laboratoriju za mehatroniku transportnih sustava Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, na analitičkoj vagi Mettler Toledo koju prikazuje slika 24.



Slika 24 Vaganje uzoraka prije ispitivanja na abrazijsko trošenje

Nakon što su uzorci izvagani, pomičnim mjerilom su izmjerene dimenzije stranica radi izračunavanja volumena i gustoće uzoraka prema normi ISO 13061 [30]. Zatim je uslijedilo sušenje uzoraka u peći na temperaturi od 103 ± 2 °C. Uzorci su sušeni u peći tako dugo dok 2 uzastopna mjerenja mase nisu pokazala istu vrijednost. To znači da u drvu više nije bilo vlage. Na temelju dobivenih podataka određen je udio vlage u uzorcima te gustoća u apsolutnom suhom stanju.

Slika 25 lijevo prikazuje sušionik u kojem je provedeno sušenje uzoraka dok je na istoj slici desno prikazan eksikator u kojem su se prenosili uzorci od peći do vage kako bi se spriječilo upijanje vlage prije mjerenja mase.



Slika 25 Prikaz sušionika (lijevo) i eksikatora (desno)

5.3 Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje

Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje je provedeno metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“ na uređaju koji prikazuje slika 26. Ispitivanja su se provodila u Laboratoriju za tribologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Svi uzorci su postavljeni i pričvršćeni na odgovarajuće mjesto, odnosno u nosač. Sustavom poluga, koji je opisan u teorijskom dijelu, uzorak se pritišće uz gumeni kotač. Gumeni kotač rotira u smjeru kazaljke na satu i to brzinom od 100 min^{-1} . Između uzorka i kotača kroz sapnicu curi pijesak (silicijev dioksid) koji troši, odnosno abradira površinu uzorka. Uzorci su cijelo vrijeme pritisnuti uz kotač silom u iznosu od 45 N, a trošenje svake pojedinačne površine trajalo je 30 sekundi. Ukupno je ispitano 228 ploha.



Slika 26 Uređaj na kojem je provedeno ispitivanje na abraziju

Masa uzoraka je izmjerena prije i nakon trošenja te se na temelju tih vrijednosti računao gubitak mase. Taj postupak se ponavljao pri ispitivanju sve četiri plohe uzoraka. Prije nego li su uzorci stavljeni na vagu, očišćeni su pomoću pneumatskog kompresora, kako bi se uklonile moguće nečistoće koje bi mogle utjecati na dobivene rezultate mjerenja.

5.4 Ispitivanje tvrdoće

Ispitivanje tvrdoće uzoraka Brinellovom metodom izvršeno je u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu (LIMS). Ispitivanje se provodilo na tvrdomjeru oznake VEB WPM HP 250 koji prikazuje slika 27.

Iznos promjera čelične kuglice, koja se utiskivala u drvo, je 5 mm, dok je sila utiskivanja iznosila 490,5 N. Maksimalnu vrijednost sile moguće je postići kroz period od 15 ± 3 sekunde, dok je maksimalna vrijednost opterećenja iznosila 30 sekundi. Kako bi se promjer koji ostavi

kuglica utiskivanjem mogao lakše i preciznije očitati, između kuglice i mjerene površine postavlja se indigo papir, kao što prikazuje slika 28.

Slika 29 prikazuje uređaj kojim je moguće precizno izmjeriti promjer otiska kuglice koji nastaje nakon rasterećenja. Tvrdoća je mjerena na istim plohama na kojima je provedeno ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje. Na svakoj plohi su provedena dva mjerenja tvrdoće odnosno 8 mjerenja po svakom uzorku. Ukupno je provedeno 456 mjerenja tvrdoće.



Slika 27 Tvrdomjer na kojem je ispitivana tvrdoća metodom po Brinellu



Slika 28 Proces mjerenja tvrdoće na tvrdomjeru



Slika 29 Uređaj na kojem se precizno mjeri promjer koji ostavi kuglica

5.5 Rezultati mjerenja udjela vlage i gustoće uzoraka

Tablica 7 prikazuje rezultate mjerenja gustoće uzoraka.

Tablica 7 Izmjerene i izračunate vrijednosti volumena i gustoće ispitnih uzoraka

Uzorak	$\rho_w, \text{g/cm}^3$	Uzorak	$\rho_w, \text{g/cm}^3$	Uzorak	$\rho_w, \text{g/cm}^3$
1	0,940	20	0,806	39	0,619
2	0,898	21	0,951	40	0,818
3	0,804	22	0,831	41	0,863
4	0,794	23	0,936	42	0,925
5	0,828	24	0,821	43	0,858
6	0,905	25	0,821	44	0,823
7	0,826	26	0,953	45	0,939
8	0,958	27	1,003	46	0,892
9	0,981	28	0,935	47	0,854
10	0,844	29	0,838	48	0,910
11	0,911	30	0,815	49	0,877
12	0,801	31	0,939	50	0,924
13	0,892	32	0,937	51	0,842
14	0,960	33	0,848	52	0,907
15	0,803	34	0,960	53	0,983
16	0,788	35	0,937	54	0,883
17	0,999	36	0,967	55	0,818
18	0,881	37	0,928	56	0,872
19	0,848	38	0,831	57	0,776

Najmanja vrijednost gustoće iznosila je $0,619 \text{ g/cm}^3$, a najveća je $1,003 \text{ g/cm}^3$. Srednja vrijednost gustoće od svih 57 uzoraka iznosila je $0,879 \text{ g/cm}^3$. Vrijednost standardne devijacije je $0,070$, a koeficijent varijacije iznosi $7,966 \%$ što je manje od dopuštenih vrijednosti prema normi ISO 13061 [30].

Na nekoliko uzoraka izmjeren je udio vlage koji se kretao u rasponu od $6,96 \%$ do $7,20 \%$.

5.6 Rezultati mjerenja gubitka mase pri abrazijskom trošenju

Tablica 8 prikazuje rezultate mjerenja gubitka mase pri abrazijskom trošenju za svaku ispitivanu plohu, na svih 57 uzoraka. Gubitak mase na svakoj plohi (Δm) izračunat je prema sljedećem izrazu:

$$\Delta m = m_0 - m_1 \quad (6)$$

gdje je:

m_0 – masa prije abrazijskog trošenja

m_1 – masa nakon abrazijskog trošenja.

Ukupna abradirana masa svakog uzorka dobivena je zbrajanjem abradiranih masa sa sve 4 ispitne plohe uzorka. Tablica 8 prikazuje i vrijednosti kutova koje pojedine plohe zatvaraju s tangentom na god.

Tablica 8 Gubitak mase za pojedinačne plohe i ukupni gubitak mase za uzorke

Uzorak	$\alpha, ^\circ$	$\Delta m, g$	$\Delta m_{uk}, g$	Uzorak	$\alpha, ^\circ$	$\Delta m, g$	$\Delta m_{uk}, g$
1	60	0,18	0,9	30	79	0,17	0,88
	85	0,33			81	0,33	
	15	0,19			17	0,17	
	30	0,20			26	0,21	
2	44	0,16	0,86	31	75	0,17	0,96
	51	0,28			84	0,38	
	56	0,20			15	0,21	
	30	0,22			15	0,20	
3	58	0,17	0,86	32	72	0,15	0,91
	65	0,29			89	0,36	
	38	0,19			3	0,22	
	41	0,21			11	0,18	
4	60	0,18	0,82	33	90	0,16	0,95
	87	0,28			71	0,37	
	18	0,17			0	0,22	
	35	0,19			35	0,20	
5	64	0,20	0,91	34	45	0,18	0,89
	78	0,31			45	0,31	
	26	0,20			45	0,21	
	50	0,20			45	0,19	
6	88	0,18	0,9	35	85	0,09	0,64
	72	0,34			85	0,34	
	11	0,17			9	0,21	
	15	0,21			3	0,00	
7	89	0,18	0,86	36	70	0,19	0,87
	56	0,29			60	0,31	
	34	0,20			11	0,17	
	27	0,19			30	0,2	
8	68	0,20	0,91	37	70	0,19	0,96
	60	0,32			70	0,33	
	40	0,18			20	0,22	
	22	0,21			25	0,22	

9	90	0,18	0,94	38	90	0,19	0,94
	60	0,35			69	0,33	
	8	0,20			22	0,20	
	25	0,21			28	0,22	
10	37	0,18	0,7	39	68	0,17	0,84
	89	0,32			89	0,27	
	28	0,00			29	0,18	
	70	0,20			16	0,22	
11	8	0,20	0,72	40	66	0,16	0,88
	87	0,30			66	0,33	
	25	0,00			24	0,21	
	19	0,22			26	0,18	
12	27	0,18	0,92	41	60	0,19	0,85
	90	0,33			87	0,30	
	34	0,21			30	0,17	
	70	0,20			10	0,19	
13	47	0,20	0,9	42	85	0,14	0,98
	45	0,30			69	0,43	
	43	0,19			0	0,21	
	45	0,21			21	0,20	
14	56	0,17	0,87	43	88	0,17	0,99
	63	0,31			61	0,41	
	34	0,21			29	0,20	
	30	0,18			32	0,21	
15	68	0,17	0,48	44	54	0,16	0,7
	59	0,31			42	0,34	
	14	0,00			31	0,00	
	12	0,00			36	0,20	
16	66	0,18	0,84	45	86	0,19	0,92
	47	0,28			62	0,32	
	44	0,18			28	0,20	
	24	0,20			13	0,21	
17	53	0,18	0,66	46	69	0,19	0,89
	74	0,31			44	0,31	
	11	0,17			37	0,20	
	51	0,00			53	0,19	
18	88	0,16	0,95	47	58	0,20	0,92
	59	0,41			80	0,30	
	16	0,20			21	0,18	
	34	0,18			20	0,24	
19	78	0,21	0,97	48	62	0,19	0,86
	80	0,35			51	0,30	
	30	0,18			38	0,17	
	8	0,23			47	0,20	
20	65	0,16	0,67	49	81	0,20	0,91
	83	0,34			79	0,33	
	20	0,17			11	0,19	

	5	0,00			9	0,19	
21	82	0,17	0,92	50	45	0,19	0,75
	90	0,36			72	0,36	
	7	0,21			28	0,20	
	4	0,18			34	0,00	
22	60	0,17	0,9	51	60	0,18	0,9
	80	0,33			64	0,35	
	34	0,20			26	0,17	
	17	0,20			30	0,20	
23	38	0,17	0,9	52	46	0,18	0,88
	29	0,35			60	0,31	
	51	0,19			44	0,20	
	44	0,19			47	0,19	
24	66	0,18	0,71	53	56	0,17	0,96
	82	0,30			87	0,37	
	10	0,00			21	0,21	
	27	0,23			49	0,21	
25	59	0,16	0,83	54	67	0,18	0,92
	60	0,29			75	0,34	
	31	0,19			17	0,17	
	30	0,19			22	0,23	
26	81	0,12	0,86	55	38	0,17	0,96
	85	0,33			83	0,34	
	4	0,21			65	0,22	
	12	0,20			31	0,23	
27	90	0,16	0,82	56	72	0,2	0,99
	35	0,31			84	0,38	
	40	0,17			19	0,19	
	9	0,18			16	0,22	
28	71	0,14	0,86	57	66	0,18	0,88
	82	0,32			89	0,30	
	15	0,19			13	0,20	
	20	0,21			17	0,20	
29	55	0,16	0,93				
	55	0,33					
	35	0,24					
	57	0,20					

Tablica 9 prikazuje vrijednosti gubitaka mase za određene kutove. Cilj rada je dovesti u korelaciju otpornost na abrazijsko trošenje s kutom koji zatvara površina koja se troši i tangenta na god. Kod nekih kutova je provedeno više od jednog mjerenja pa su zbog toga izračunate i prikazane srednje vrijednosti gubitka mase. U tablici je uz svaki kut naveden i pripadajući broj mjerenja.

Tablica 9 Prikaz prosječnog gubitka mase (Δm) za pripadajuće kutove (α)

α , ° (broj mjerenja)	Δm , g	α , ° (broj mjerenja)	Δm , g	α , ° (broj mjerenja)	Δm , g
0 (2)	0,22	32 (1)	0,21	62 (2)	0,26
3 (1)	0,22	34 (5)	0,20	63 (1)	0,31
4 (2)	0,20	35 (4)	0,24	64 (2)	0,28
7 (1)	0,21	36 (1)	0,20	65 (3)	0,22
8 (3)	0,21	37 (2)	0,19	66 (4)	0,21
9 (3)	0,19	38 (4)	0,18	67 (1)	0,18
10 (1)	0,19	40 (2)	0,18	68 (3)	0,18
11 (5)	0,18	41 (1)	0,21	69 (3)	0,32
12 (1)	0,20	42 (1)	0,34	70 (4)	0,22
13 (2)	0,21	43 (1)	0,19	71 (2)	0,26
15 (4)	0,20	44 (5)	0,21	72 (4)	0,26
16 (3)	0,21	45 (3)	0,23	74 (1)	0,31
17 (4)	0,19	46 (1)	0,18	75 (2)	0,26
18 (1)	0,17	47 (4)	0,22	78 (2)	0,26
19 (2)	0,21	49 (1)	0,21	79 (2)	0,25
20 (4)	0,21	50 (1)	0,20	80 (3)	0,33
21 (3)	0,20	51 (3)	0,26	81 (3)	0,22
22 (3)	0,21	53 (2)	0,19	82 (3)	0,26
24 (2)	0,21	54 (1)	0,16	83 (2)	0,34
25 (2)	0,22	55 (1)	0,25	84 (2)	0,38
26 (4)	0,19	56 (4)	0,21	85 (4)	0,25
27 (3)	0,20	57 (1)	0,20	86 (1)	0,19
28 (3)	0,21	58 (2)	0,19	87 (4)	0,31
29 (3)	0,24	59 (3)	0,29	88 (3)	0,17
30 (8)	0,19	60 (10)	0,25	89 (5)	0,29
31 (2)	0,21	61 (1)	0,41	90 (6)	0,23

Prema normi ASTM G65, propisano je da se svi rezultati mjerenja, zbog njihove razlike u gustoći, iskazuju kao potrošeni volumen u mm³. Potrošeni volumen računa se dijeljenjem abradirane mase na svakoj plohi uzorka s pripadajućom gustoćom za taj uzorak.

Tablica 10 prikazuje prosječni gubitak volumena za pripadajuće kutove.

Tablica 10 Prikaz prosječnog gubitka volumena (ΔV) za pripadajuće kutove (α)

$\alpha, ^\circ$	$\Delta V, \text{mm}^3$	$\alpha, ^\circ$	$\Delta V, \text{mm}^3$	$\alpha, ^\circ$	$\Delta V, \text{mm}^3$
0	217,60	32	212,54	62	258,09
3	222,66	34	202,42	63	313,75
4	197,36	35	237,84	64	278,33
7	212,54	36	202,42	65	226,04
8	212,54	37	192,30	66	208,49
9	195,67	38	177,12	67	182,18
10	192,30	40	177,12	68	182,18
11	178,13	41	212,54	69	320,50
12	202,42	42	344,11	70	224,69
13	207,48	43	192,30	71	258,09
15	202,42	44	210,52	72	265,68
16	215,91	45	229,89	74	313,75
17	187,24	46	182,18	75	258,09
18	172,06	47	220,13	78	263,15
19	207,48	49	212,54	79	253,02
20	212,54	50	202,42	80	330,62
21	199,05	51	259,77	81	219,29
22	215,91	53	187,24	82	266,52
24	207,48	54	161,94	83	344,11
25	217,60	55	247,96	84	384,60
26	192,30	56	210,01	85	248,98
27	202,42	57	202,42	86	192,30
28	209,17	58	187,24	87	316,28
29	246,28	59	296,88	88	172,06
30	194,83	60	251,00	89	289,46
31	212,54	61	414,96	90	232,78

Najmanja izmjerena srednja vrijednost prosječnog gubitka volumena pri abrazijskoj izmjerenoj je kod kuta od 54° i iznosila je $161,94 \text{ mm}^3$. Najveća srednja vrijednost izmjerena je pri kutu od 61° i iznosi $414,96 \text{ mm}^3$. Prosječna vrijednost gubitka volumena za sva mjerenja i sve uzorke iznosi $230,32 \text{ mm}^3$, standardna devijacija od aritmetičke sredine je $50,44 \%$, a koeficijent varijacije iznosi $21,90 \%$.

5.7 Rezultati mjerenja tvrdoće

Tablica 11 prikazuje vrijednosti izmjerene tvrdoće za sve uzorke. Mjerenje tvrdoće napravljeno je dva puta na svakoj abradiranoj plohi uzorka, odnosno ukupno 8 mjerenja po svakom uzorku. U tablici su još navedeni i pripadajući kutovi ploha na kojima je mjerena tvrdoća.

Tablica 11 Dobivene vrijednosti tvrdoće HB za sve uzorke

Uzorak	Kut, α	HB		Uzorak	Kut, α	HB	
		1. mj.	2. mj.			1. mj.	2. mj.
1	60°	62,5	-	30	79°	46,8	40,8
	85°	72,9	72,9		81°	38,2	46,8
	15°	58,0	67,4		17°	58,0	58,0
	30°	58,0	78,9		26°	50,2	54,0
2	44°	78,9	72,9	31	75°	-	-
	51°	54,0	67,4		84°	-	-
	56°	78,9	72,9		15°	-	43,7
	30°	93,3	85,7		15°	-	-
3	58°	62,5	62,5	32	72°	62,5	72,9
	65°	72,9	72,9		89°	54,0	62,5
	38°	58,0	62,5		3°	58,0	72,9
	41°	72,9	67,4		11°	85,7	62,5
4	60°	62,5	72,9	33	90°	62,5	67,4
	87°	58,0	62,5		71°	58,0	50,2
	18°	67,4	62,5		0°	67,4	78,9
	35°	58,0	54,0		35°	43,7	62,5
5	64°	62,5	72,9	34	45°	72,9	72,9
	78°	67,4	72,9		45°	67,4	85,7
	26°	78,9	67,4		45°	67,4	62,5
	50°	58,0	54,0		45°	93,3	78,9
6	88°	62,5	58,0	35	85°	67,4	72,9
	72°	43,7	67,4		85°	43,7	62,5
	11°	62,5	72,9		9°	67,4	72,9
	15°	72,9	67,4		3°	-	-
7	89°	62,5	62,5	36	70°	58,0	62,5
	56°	67,4	62,5		60°	78,9	85,7
	34°	72,9	78,9		11°	58,0	62,5
	27°	72,9	58,0		30°	58,0	67,4
8	68°	62,5	78,9	37	70°	67,4	58,0
	60°	58,0	54,0		70°	62,5	50,2
	40°	72,9	78,9		20°	72,9	67,4
	22°	62,5	67,4		25°	54,0	72,9
9	90°	67,4	62,5	38	90°	62,5	58,0
	60°	62,5	67,4		69°	62,5	67,4
	8°	62,5	67,4		22°	46,8	46,8
	25°	58,0	62,5		28°	43,7	46,8

10	37°	62,5	62,5	39	68°	46,8	50,2
	89°	58,0	62,5		89°	58,0	54,0
	28°	-	-		29°	62,5	54,0
	70°	54,0	67,4		16°	43,7	33,4
11	8°	93,3	72,9	40	66°	54,0	50,2
	87°	67,4	58,0		66°	46,8	54,0
	25°	-	-		24°	35,7	43,7
	19°	62,5	54,0		26°	54,0	58,0
12	27°	62,5	62,5	41	60°	67,4	62,5
	90°	46,8	72,9		87°	93,3	85,7
	34°	67,4	62,5		30°	58,0	58,0
	70°	62,5	43,7		10°	46,8	40,8
13	47°	62,5	58,0	42	85°	62,5	62,5
	45°	78,9	85,7		69°	72,9	46,8
	43°	50,2	62,5		0°	-	50,2
	45°	54,0	58,0		21°	46,8	58,0
14	56°	67,4	93,3	43	88°	46,8	72,9
	63°	58,0	72,9		61°	62,5	50,2
	34°	62,5	93,3		29°	40,8	62,5
	30°	78,9	67,4		32°	62,5	58,0
15	68°	54,0	67,4	44	54°	43,7	40,8
	59°	43,7	46,8		42°	38,2	35,7
	14°	-	-		31°	-	-
	12°	-	-		36°	62,5	50,2
16	66°	54,0	67,4	45	86°	62,5	62,5
	47°	54,0	58,0		62°	67,4	72,9
	44°	54,0	62,5		28°	46,8	62,5
	24°	31,2	58,0		13°	54,0	50,2
17	53°	62,5	72,9	46	69°	72,9	72,9
	74°	72,9	78,9		44°	46,8	58,0
	11°	72,9	93,3		37°	67,4	54,0
	51°	-	-		53°	46,8	33,4
18	88°	43,7	43,7	47	58°	58,0	50,2
	59°	72,9	62,5		80°	72,9	78,9
	16°	62,5	58,0		21°	46,8	50,2
	34°	50,2	62,5		20°	50,2	35,7
19	78°	62,5	50,2	48	62°	62,5	58,0
	80°	67,4	50,2		51°	78,9	85,7
	30°	43,7	40,8		38°	72,9	46,8
	8°	46,8	62,5		47°	54,0	46,8
20	65°	46,8	72,9	49	81°	46,8	67,4
	83°	54,0	62,5		79°	67,4	85,7
	20°	50,2	78,9		11°	62,5	54,0
	5°	-	-		9°	31,2	54,0
21	82°	62,5	72,9	50	45°	58,0	67,4
	90°	67,4	67,4		72°	93,3	54,0
	7°	62,5	62,5		28°	62,5	54,0
	4°	62,5	78,9		34°	-	-

22	60°	62,5	62,5	51	60°	62,5	54,0
	80°	62,5	62,5		64°	62,5	62,5
	34°	46,8	67,4		26°	62,5	46,8
	17°	62,5	43,7		30°	72,9	54,0
23	38°	58,0	67,4	52	46°	43,7	46,8
	29°	67,4	62,5		60°	62,5	72,9
	51°	54,0	62,5		44°	72,9	58,0
	44°	62,5	62,5		47°	46,8	58,0
24	66°	58,0	62,5	53	56°	46,8	40,8
	82°	40,8	38,2		87°	46,8	58,0
	10°	-	-		21°	50,2	67,4
	27°	54,0	67,4		49°	58,0	40,8
25	59°	62,5	54,0	54	67°	62,5	50,2
	60°	54,0	62,5		75°	58,0	46,8
	31°	62,5	54,0		17°	62,5	58,0
	30°	43,7	54,0		22°	67,4	78,9
26	81°	58,0	62,5	55	38°	62,5	50,2
	85°	72,9	72,9		83°	50,2	50,2
	4°	58,0	78,9		65°	46,8	58,0
	12°	58,0	62,5		31°	58,0	62,5
27	90°	54,0	54,0	56	72°	50,2	62,5
	35°	62,5	62,5		84°	46,8	43,7
	40°	62,5	72,9		19°	67,4	67,4
	9°	78,9	72,9		16°	46,8	46,8
28	71°	54,0	62,5	57	66°	40,8	38,2
	82°	40,8	62,5		89°	46,8	50,2
	15°	43,7	62,5		13°	58,0	62,5
	20°	72,9	62,5		17°	78,9	67,4
29	55°	54,0	62,5				
	55°	29,2	46,8				
	35°	50,2	62,5				
	57°	43,7	67,4				

Tablica 12 prikazuje srednje vrijednosti tvrdoće HB za sve pripadajuće kutove bez obzira na ispitne uzorke.

Najmanja izmjerena srednja vrijednost tvrdoće za određeni kut iznosila je 36,9 HB, najveća 75,9 HB, a prosječna 59,2 HB. Standardna devijacija od aritmetičke sredine iznosila je 7,38 %, a koeficijent varijacije 12,45 %, što je u dopuštenim granicama prema normi ISO 13061 [30].

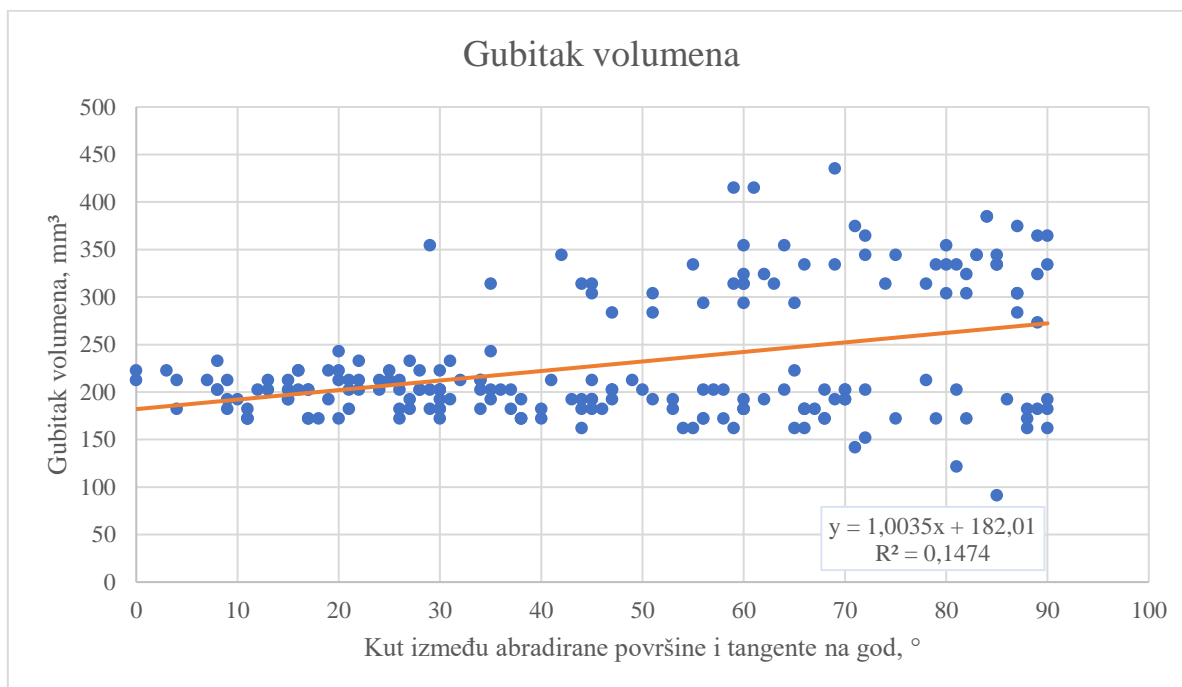
Tablica 12 Izračunate ukupne srednje vrijednosti tvrdoće za pripadajuće kutove

Kut	Tvrdoća HB (sred. vrijed.)	Kut	Tvrdoća HB (sred. vrijed.)	Kut	Tvrdoća HB (sred. vrijed.)
0°	65,5	32°	60,3	62°	65,2
3°	65,4	34°	66,4	63°	65,4
4°	69,6	35°	57,0	64°	65,1
7°	62,5	36°	56,4	65°	61,7
8°	67,6	37°	61,6	66°	52,6
9°	62,9	38°	59,8	67°	56,4
10°	43,8	40°	71,8	68°	60,0
11°	68,7	41°	70,1	69°	65,9
12°	60,3	42°	36,9	70°	58,6
13°	56,2	43°	56,4	71°	56,2
15°	59,4	44°	62,9	72°	63,3
16°	48,5	45°	71,6	74°	75,9
17°	61,1	46°	45,3	75°	52,4
18°	64,9	47°	54,8	78°	63,3
19°	62,8	49°	49,4	79°	60,2
20°	61,3	50°	56,0	80°	65,7
21°	53,3	51°	67,1	81°	53,3
22°	61,7	53°	53,9	82°	52,9
24°	42,2	54°	42,3	83°	54,2
25°	61,8	55°	48,1	84°	45,3
26°	59,0	56°	66,3	85°	66,3
27°	62,9	57°	55,6	86°	62,5
28°	50,0	58°	58,3	87°	66,2
29°	58,3	59°	57,1	88°	54,6
30°	63,3	60°	64,6	89°	57,1
31°	59,2	61°	56,4	90°	61,9

6. ANALIZA REZULTATA

6.1 Analiza utjecaja kuta između abradirane površine i tangente na god na gubitak volumena pri abraziji

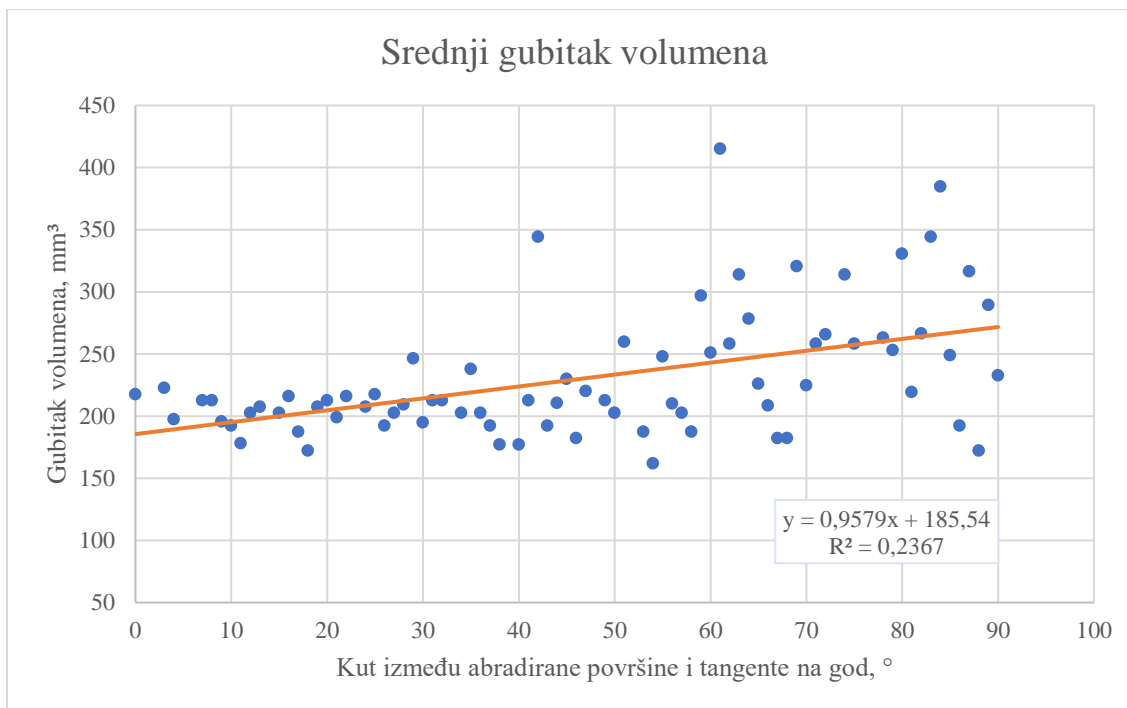
Slika 30 prikazuje dijagram na kojem je vidljiv gubitak volumena svih uzoraka u ovisnosti o kutu između površine na kojoj se provodilo abrazijsko trošenje i tangente na god. Provedeno je ukupno 228 mjerenja na 57 uzoraka. Najviše mjerenja provedeno je za kut od 30° i 60° dok je za ostale kutove proveden manji broj mjerenja. Kao što je i očekivano za drvo, rasipanja rezultata su bila vrlo velika. Na temelju dobivenih rezultata može se uočiti da se gubitak volumena pri abraziji povećava s porastom kuta između abradirane površine i tangente na god. Povećanjem kuta od 0° do 90°, točnije prelaskom iz tangencijalnog u radijalni presjek, povećava se i iznos abrazijskog trošenja. Također, vidi se da s povećanjem navedenog kuta raste rasipanje rezultata. Između gubitka volumena pri abraziji i kuta koji čine tangenta na god i abradirana površina postoji slaba pozitivna linearna korelacija s koeficijentom $R = 0,38$.



Slika 30 Prikaz gubitka volumena u ovisnosti o pripadajućem kutu

Kako je za neke kutove napravljeno više mjerenja, slika 31 prikazuje dijagram gdje su vidljive srednje vrijednosti gubitka volumena za određene kutove. Na ovom dijagramu još jasnije se

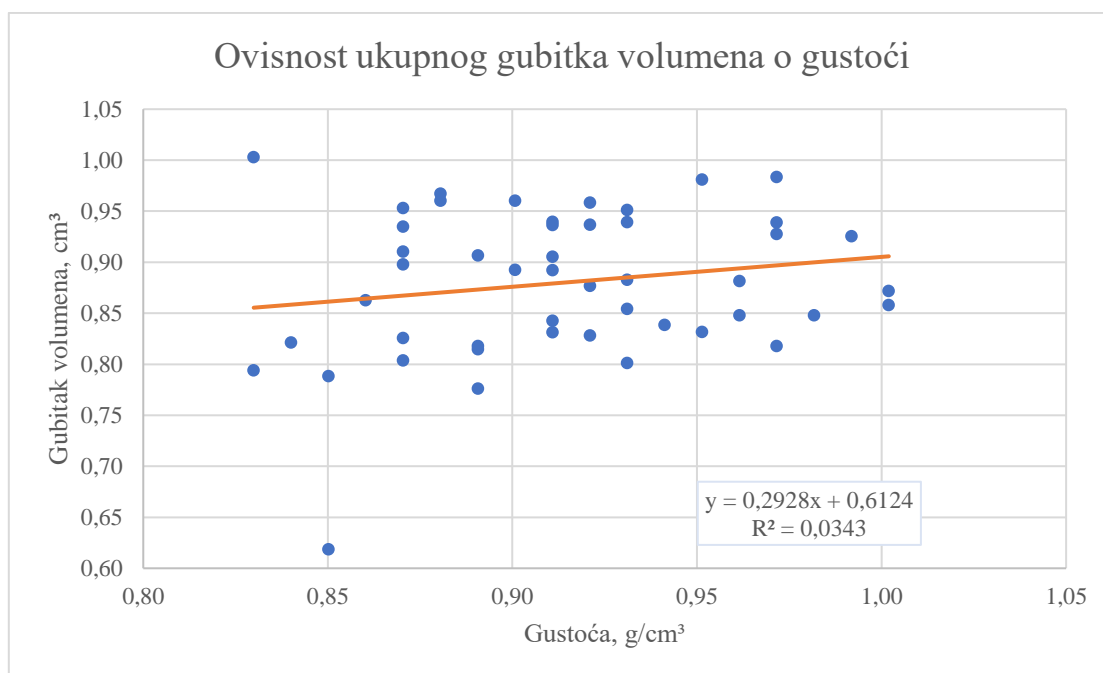
vidi kako s povećanjem kuta raste i gubitak volumena pri abrazijskom trošenju. Za ovako prikazane rezultate gubitka volumena pri abraziji koeficijent linearne korelacije je još viši, pozitivan je i iznosi $R = 0,49$. I ovdje je prisutno relativno visoko rasipanje rezultata koje se povećava s povećanjem kuta od 0° do 90° .



Slika 31 Srednji gubitak volumena u ovisnosti o pripadajućem kutu

6.2 Analiza utjecaja gustoće na gubitak volumena pri abraziji

Slika 32 prikazuje ovisnost ukupnog gubitka volumena (za sve 4 plohe) o gustoći za svaki ispitni uzorak pojedinačno. Može se uočiti blagi trend porasta abradiranog volumena s porastom gustoće, što je poprilično neočekivano. Rasipanja rezultata su dosta velika, a koeficijent linearne korelacije je vrlo nizak i iznosi $R = 0,19$.



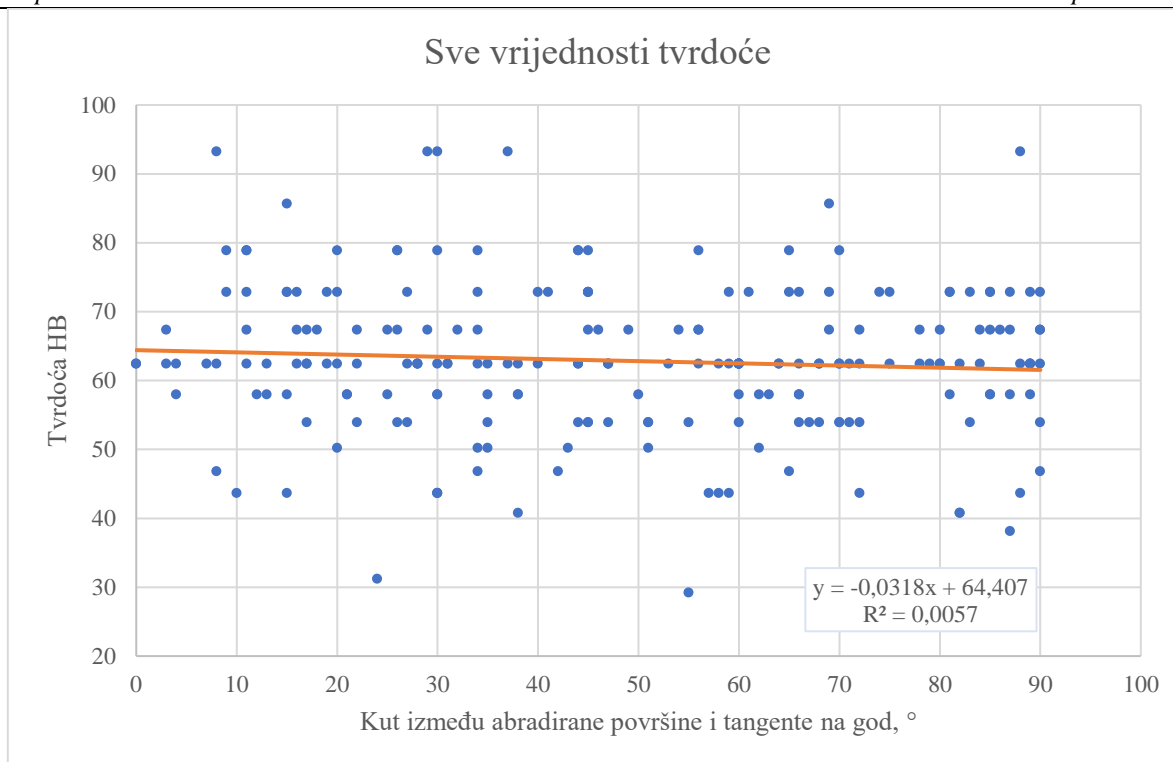
Slika 32 Korelacija između ukupnog gubitka volumena i gustoće za svaki uzorak

6.3 Analiza utjecaja kuta između tangente na god i abradirane površine na tvrdoću

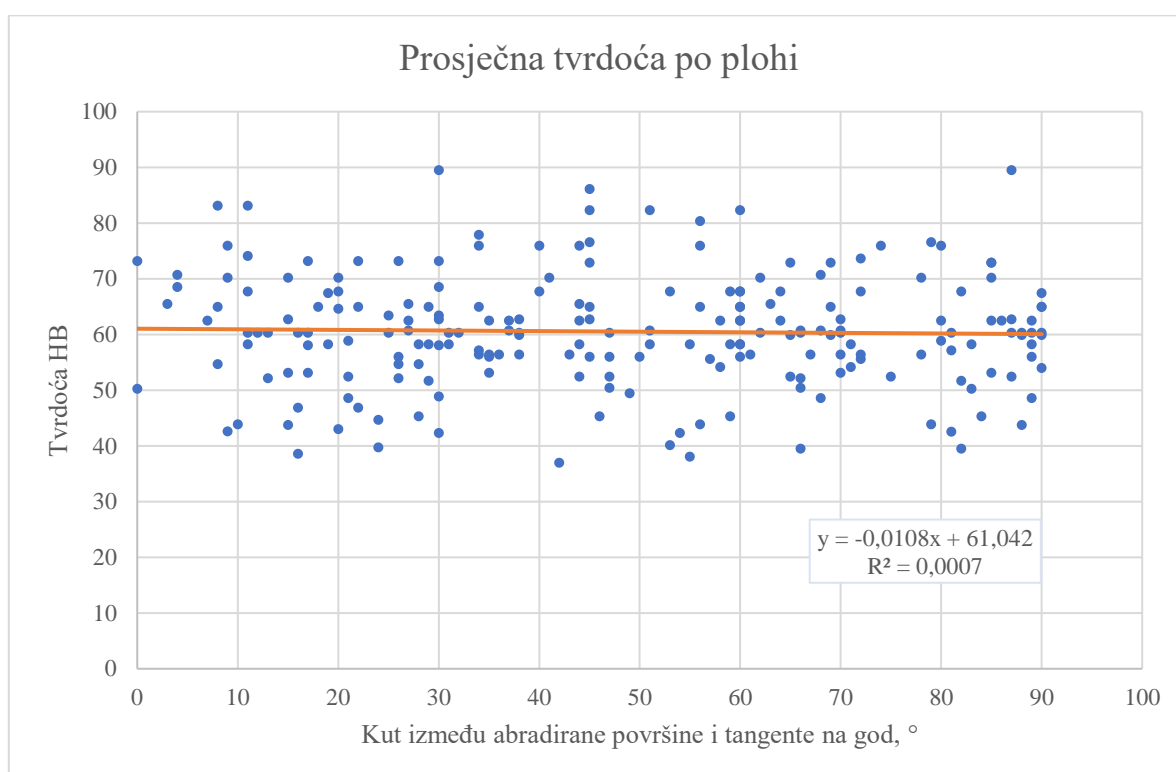
Slika 33 prikazuje sve izmjerene vrijednosti tvrdoće za različite kutove između tangente na god i abradirane površine. Provedeno je ukupno 456 mjerenja koja su prikazana na dijagramu. Rasipanje je kao i u prethodnim dijagramima iznimno veliko. Vrijednosti tvrdoće nalaze se u širokom intervalu od 29,2 HB do 93,3 HB. Prosječna vrijednost tvrdoće svih mjerenja iznosi 60,6 HB. Linearna korelacija između tvrdoće i kuta koji zatvara tangenta na god s abradiranom površinom je vrlo niska, koeficijent linearne korelacije je negativan i iznosi svega $R = -0,08$.

Slika 34 prikazuje srednje vrijednosti tvrdoće na stranicama na kojima je provedeno ispitivanje abrazijskog trošenja, dok slika 35 prikazuje srednje vrijednosti tvrdoće za sve kutove.

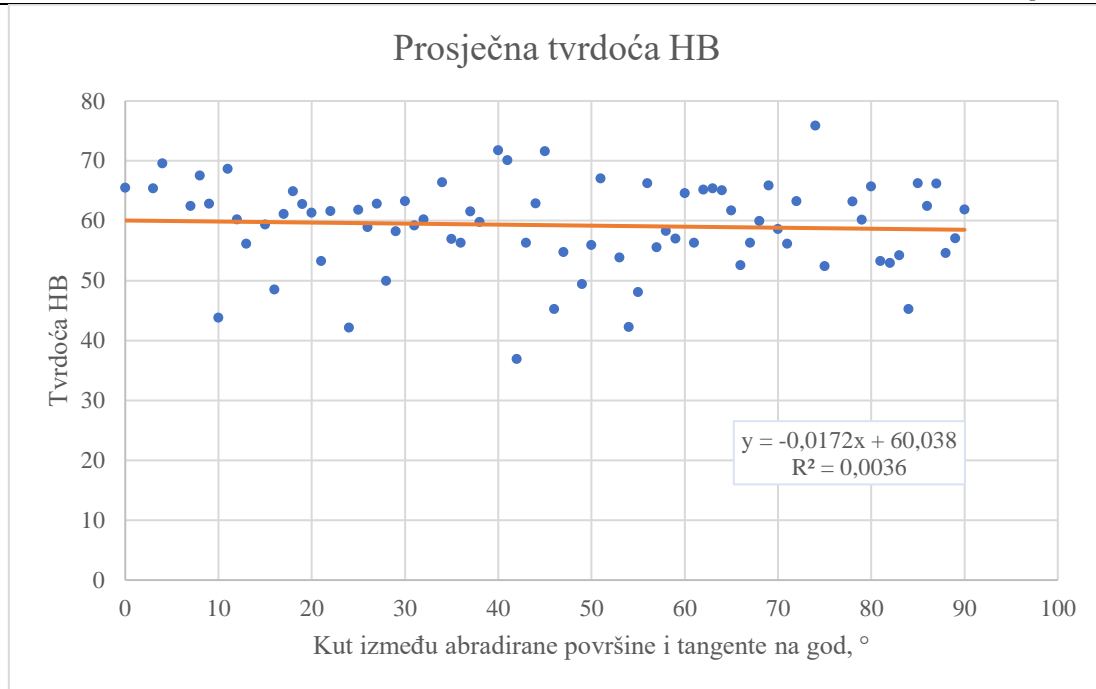
Na sva 3 dijagrama može se uočiti jedva zamjetni pad tvrdoće s povećanjem kuta između abradirane površine i tangente na god, što znači da dolazi do vrlo blagog pada tvrdoće postupnim prelaskom iz tangencijalnog u radialni presjek. Koeficijenti linearne korelacije su negativni i vrlo niski.



Slika 33 Vrijednost tvrdoće u ovisnosti o pripadajućem kutu



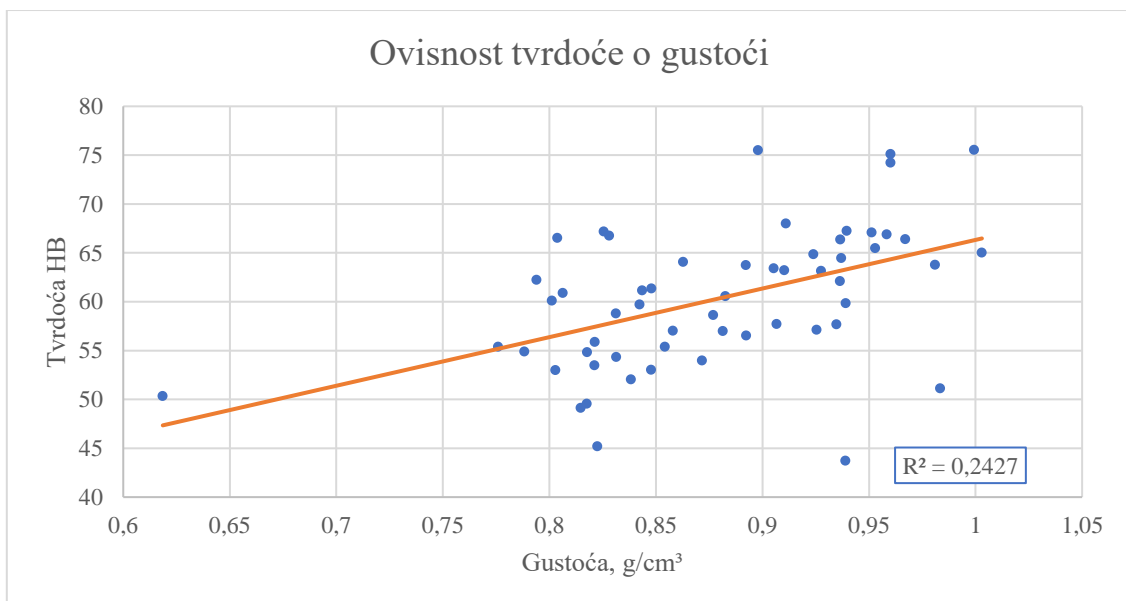
Slika 34 Korelacija između prosječne tvrdoće po ispitnim ploham u ovisnosti i pripadajućeg kuta



Slika 35 Vrijednosti ukupne prosječne tvrdoće u ovisnosti o pripadajućem kutu

6.4 Analiza utjecaja gustoće na tvrdoću

Slika 36 prikazuje dijagram ovisnosti tvrdoće o gustoći svih ispitnih uzoraka. Rasipanje rezultata je i dalje poprilično veliko, ali može se vidjeti kako rastom vrijednosti gustoće dolazi do porasta vrijednosti tvrdoće. Koeficijent linearne korelacije je pozitivan i iznosi $R = 0,49$.

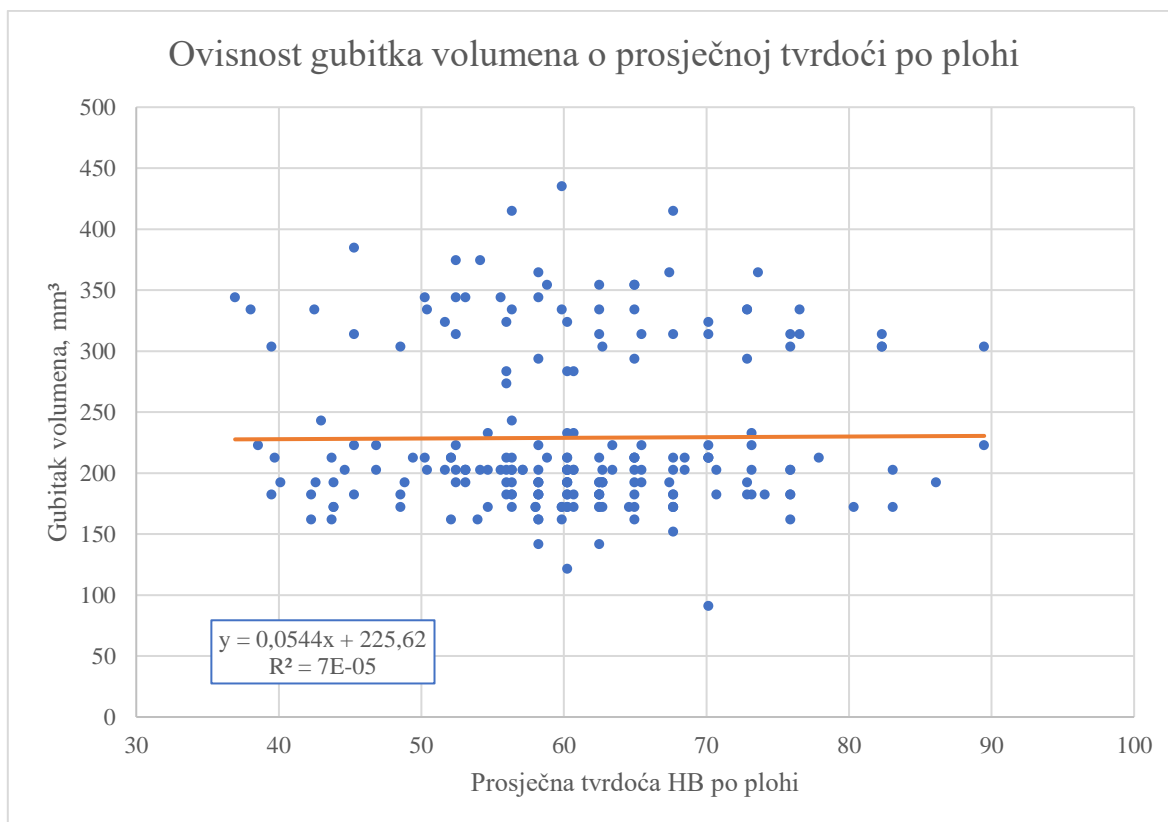


Slika 36 Korelacija između tvrdoće i gustoće za svaki uzorak

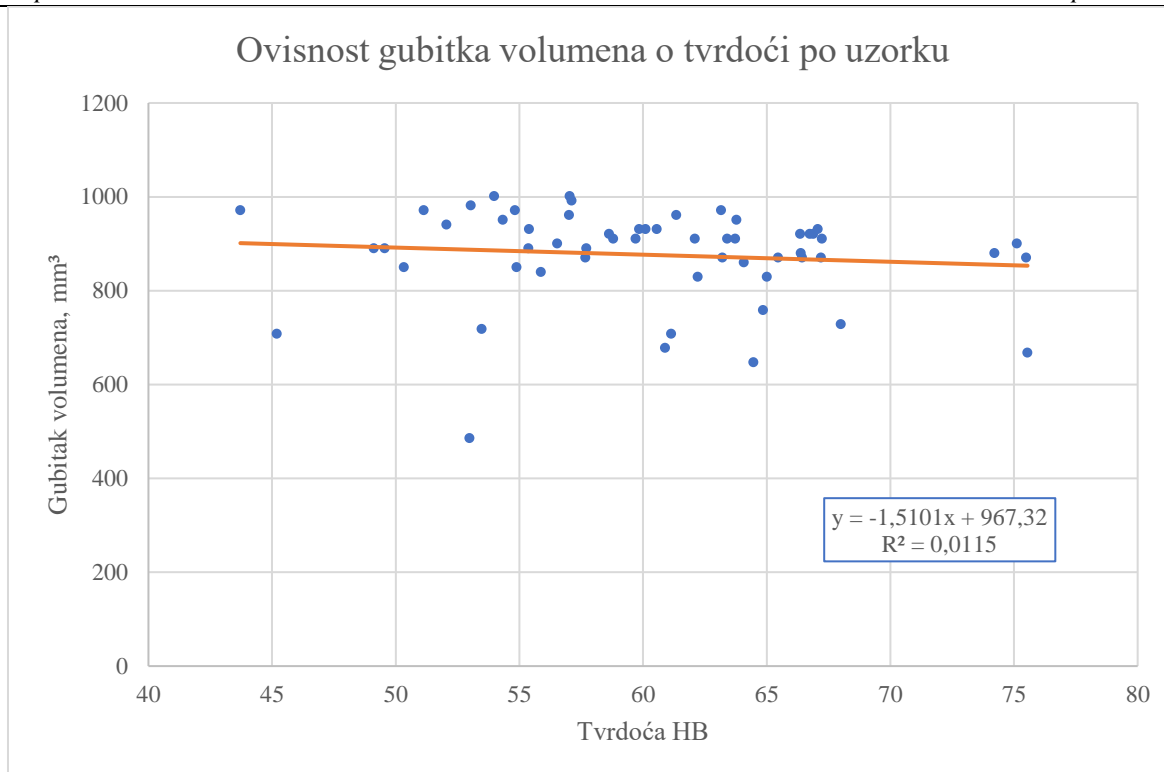
6.5 Analiza utjecaja tvrdoće na gubitak volumena pri abrazijskom trošenju

Slika 37 prikazuje dijagram koji u korelaciju dovodi gubitak volumena i prosječnu tvrdoću za svaku plohu pojedinačno. U dijagramu je prikazano 228 parova vrijednosti. Kao i u svim prethodnim dijagramima, rasipanje je poprilično veliko. Iz priloženog regresijskog pravca proizlazi da tvrdoća nema nikakav utjecaj na vrijednost gubitka volumena.

Ako se promatraju pojedini uzorci i ako se srednja vrijednost tvrdoće od 8 mjerenja na svakome od njih stavi u korelaciju s ukupnim gubitkom mase na sve 4 plohe na tom istom uzorku, dobije se dijagram koji prikazuje slika 38. Na ovakvom prikazu rezultata vidi se da porastom tvrdoće gubitak volumena postaje manji. Koeficijent linearne korelacije je negativan i vrlo nizak te iznosi $R = -0,11$. Rasipanja rezultata su manja nego na dijagramu koji prikazuje slika 37, ali su i dalje dosta velika.



Slika 37 Korelacija gubitka volumena i prosječne tvrdoće za svaku ispitanu plohu



Slika 38 Korelacija gubitka volumena i tvrdoće za svaki ispitni uzorak

6.6 Statistička analiza podataka pomoću Weibullove raspodjele

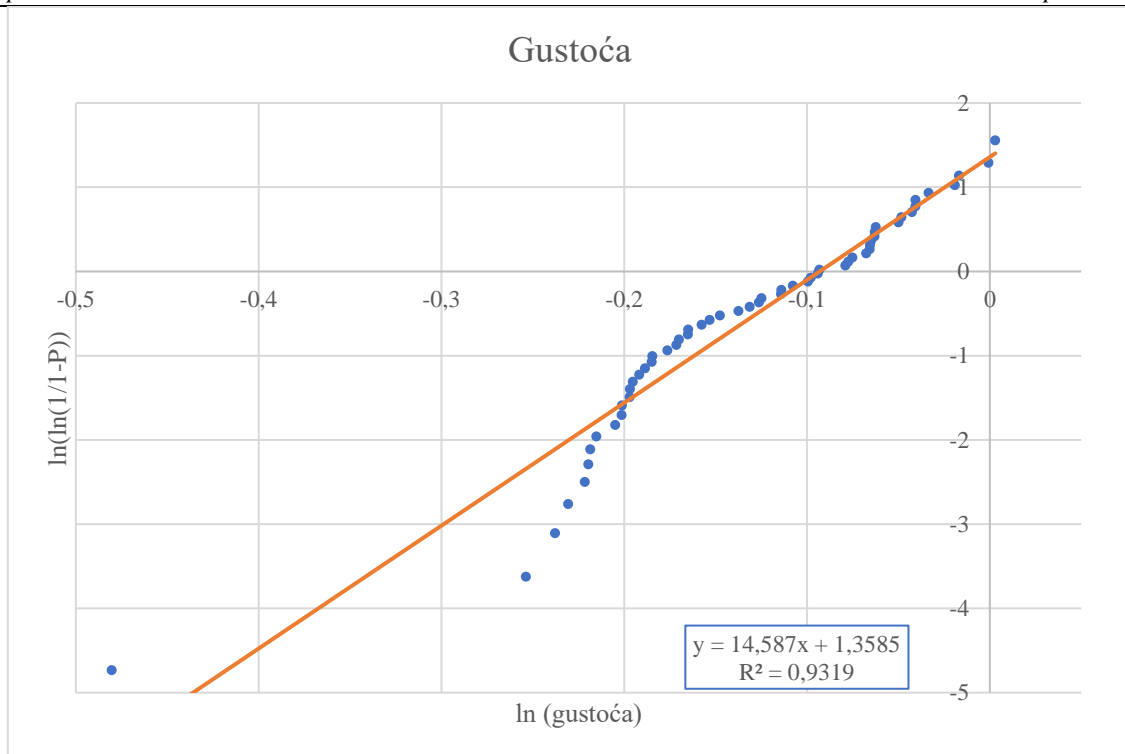
Sve vrijednosti koje su dobivene ispitivanjima analizirane su korištenjem Weibullove raspodjele. Na sljedećim slikama prikazani su dijagrami na kojima su redom vidljive regresijske jednadžbe za gustoću, gubitak volumena uslijed abrazije i tvrdoću. Jednadžbe koje su vidljive na dijagramima općenitog su oblika:

$$y = mx \pm b \quad (7)$$

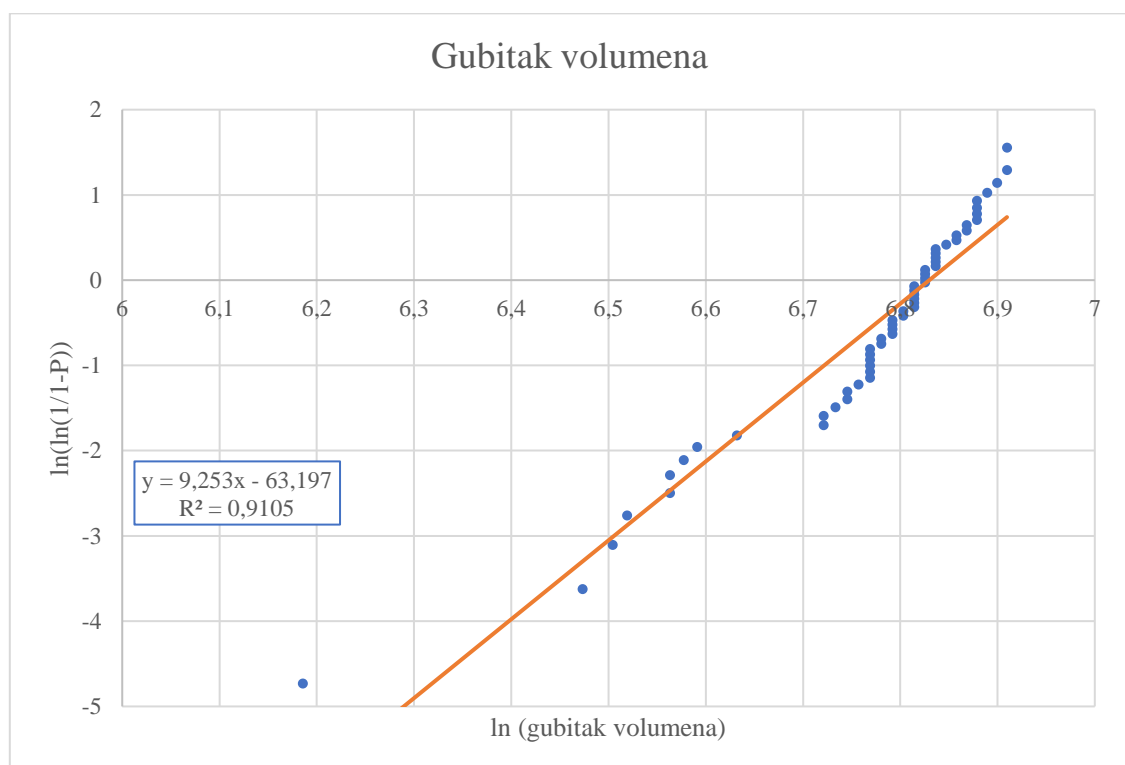
gdje je:

- m – Weibullov modul rasipanja
- b – koeficijent koji predstavlja odsječak na osi y .

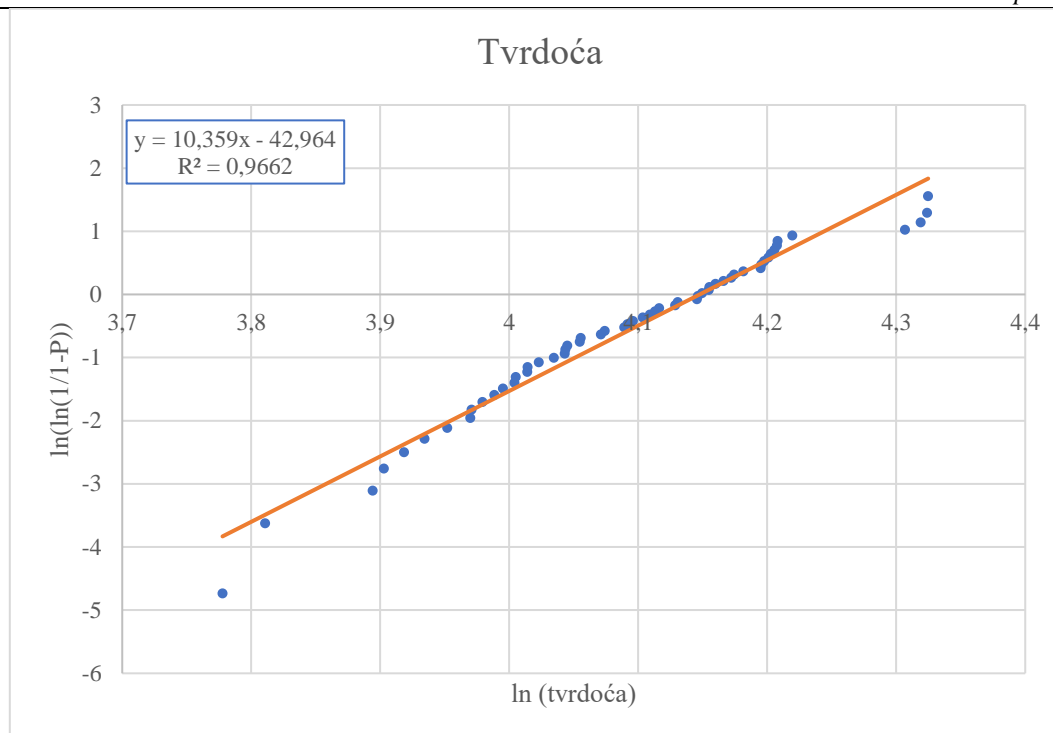
Karakteristične vrijednosti koje poprima Weibullov modul rasipanja m nalaze se u intervalu od $10 < m < 20$. Materijal je homogeniji što je Weibullov modul rasipanja veći.



Slika 39 Weibullova raspodjela za vrijednosti gustoće



Slika 40 Weibullova raspodjela za vrijednosti gubitka volumena pri abraziji



Slika 41 Weibullova raspodjela za vrijednosti tvrdoće

Tablica 13 prikazuje statističke rezultate za provedena mjerenja gustoće, tvrdoće i za gubitak volumena. Weibullovi parametri definirani su pomoću jednadžbe pravca i prethodno prikazanih dijagrama. Visoki koeficijent determinacije ($0,9105 < R^2 < 0,9662$), koji je vidljiv u dijagramima, ukazuje na reprezentativnost modela.

Tablica 13 Prikaz statističkih podataka izračunatih iz izmjerenih vrijednosti

Svojstvo	Min.	Max.	Srednja vrijednost	Standardna devijacija	Weibullovi parametri	
					Weibullov modul m	Parametar skaliranja
Gustoća	0,62	1,003	0,879	0,07	14,587	$\rho_0 = 1,098$
Gubitak volumena	485,81	1001,98	876,26	99,67	9,253	$\Delta V_0 = 925,092$
Tvrdoća	43,7	75,5	60,3	7,1	10,359	$HB_0 = 63,276$

7. ZAKLJUČAK

U diplomskom radu istražena je korelacija između gubitka volumena pri abraziji, tvrdoće, gustoće i kuta koji zatvaraju abradirana površina i tangenta na god.

Na temelju dobivenih rezultata može se zaključiti sljedeće:

- Porastom kuta između abradirane površine i tangente na god, odnosno postupnim prelaskom iz tangencijalnog u radijalni presjek, povećava se gubitak volumena pri abraziji. Korelacija između ove dvije veličine je pozitivna i relativno slaba.
- Izmjerene vrijednosti gustoće kreću se od 0,619 g/cm³ do 1,003 g/cm³. Srednja vrijednost gustoće od svih 57 uzoraka iznosila je 0,879 g/cm³. Vrijednost standardne devijacije je 0,070, a koeficijent varijacije iznosi 7,966 % što je unutar dopuštenih vrijednosti.
- Korelacija između gustoće i gubitka volumena pri abraziji je vrlo slaba i pozitivna, s niskim koeficijentom linearne korelacije $R = 0,19$. Rasipanja rezultata su dosta velika.
- Srednje vrijednosti tvrdoće za određeni kut nalazile su se u intervalu između 36,9 HB i 75,9 HB. Prosječna srednja vrijednost tvrdoće iznosila je 59,2 HB, standardna devijacija od aritmetičke sredine iznosila je 7,38 %, a koeficijent varijacije 12,45 %, što je u dopuštenim granicama.
- Linearna korelacija između tvrdoće i kuta koji zatvara tangenta na god s abradiranom površinom je vrlo niska, koeficijent linearne korelacije je negativan, što znači da dolazi do vrlo blagog pada tvrdoće postupnim prelaskom iz tangencijalnog u radijalni presjek.
- Između tvrdoće i gustoće postoji pozitivna linearna korelacija s koeficijentom korelacije $R = 0,49$, što znači da s porastom gustoće raste i tvrdoća.
- Tvrdoća uzoraka neznatno utječe na vrijednosti gubitka volumena pri abraziji. Koeficijent linearne korelacije je vrlo nizak i negativan.
- Vrijednosti Weibullovog modula i parametara skaliranja dokazuju da je Weibullova razdioba prikladna za opisivanje rezultata dobivenih pri mjerenju gustoće, tvrdoće i gubitka volumena pri abraziji uzoraka drva masline.

LITERATURA

- [1] Fraga H, Moriondo M, Leolini L, Santos JA. Mediterranean olive orchards under climate change: A review of future impacts and adaptation strategies. Vol. 11, *Agronomy*. MDPI AG; 2021. doi: 10.3390/agronomy11010056
- [2] Valvez S, Maceiras A, Santos P, Reis PNB. Olive stones as filler for polymer-based composites: A review. Vol. 14, *Materials*. MDPI AG; 2021. p. 1–32. doi: 10.3390/ma14040845
- [3] Kantoci D. MASLINA “Olea prima omnium arborum est. Columella.”
- [4] Rede V. DRVO-TEHNIČKI MATERIJAL.
- [5] Wiedenhoeft A. Wood Handbook, Chapter 03: Structure and Function of Wood. 2010.
- [6] Plomion C, Leprovost G, Stokes A. Wood formation in trees. Vol. 127, *Plant Physiology*. American Society of Plant Biologists; 2001. p. 1513–23. doi: 10.1104/pp.010816
- [7] Franke B, Quenneville P. Numerical Modeling of the Failure Behavior of Dowel Connections in Wood. *Journal of Engineering Mechanics*. 2011 Mar;137(3):186–95. doi: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000217
- [8] Hislop AM, Palmer HE, Ba G. Assessing woodland shelter on farms. Vol. 38, *New Zealand Journal of Agricultural Research*. China Science and Technology Press; 1999.
- [9] Wheeler EA, Baas P. Wood identification - A review. Vol. 19, *IAWA Journal*. International Association of Wood Anatomists; 1998. p. 241–64. doi: 10.1163/22941932-90001528
- [10] Parham RA, Gray RL. Formation and Structure of Wood [Internet]. 1984. Dostupno na: <https://pubs.acs.org/sharingguidelines>
- [11] The Wood Database [Internet]. (pristupljeno: 06/06/2022). Dostupno na: <https://www.wood-database.com/olive/#pics>
- [12] 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
- [13] Zhou T, Liu H. Research Progress of Wood Cell Wall Modification and Functional Improvement: A Review. Vol. 15, *Materials*. MDPI; 2022. doi: 10.3390/ma15041598
- [14] Zhang X, Li L, Xu F. Chemical Characteristics of Wood Cell Wall with an Emphasis on Ultrastructure: A Mini-Review. Vol. 13, *Forests*. MDPI; 2022. doi: 10.3390/f13030439

- [15] Hoadley R. Identifying Wood. The Taunton press. 1993;
- [16] Fritz Hans Schweingruber. Anatomy of European Woods. 1990.
- [17] Ververis C, Georghiou K, Christodoulakis N, Santas P, Santas R. Fiber dimensions, lignin and cellulose content of various plant materials and their suitability for paper production. *Industrial Crops and Products*. 2004 May;19(3):245–54. doi: 10.1016/j.indcrop.2003.10.006
- [18] 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
- [19] Grilec K, JS, IV, LD. Tribologija, Autorizirana predavanja iz kolegija “Tribologija i inženjerstvo površina.” Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb; 2015.
- [20] Budinski KG, Budinski ST. On replacing three-body abrasion testing with two-body abrasion testing. *Wear*. 2017 Apr;376–377:1859–65. doi: 10.1016/j.wear.2017.01.001
- [21] Hawk JA, Wilson RD, Tylczak JH, Doğan ÖN. Laboratory abrasive wear tests: investigation of test methods and alloy correlation. *Wear*. 1999 Apr;225–229:1031–42. doi: 10.1016/S0043-1648(99)00042-3
- [22] ASTM D1037: Standard Test Method for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials [Internet]. (pristupljeno: 07/06/2022). Dostupno na: <https://www.intertek.com/building/standards/astm-d1037/>
- [23] Janka Wood Hardness Chart [Internet]. (pristupljeno: 06/06/2022). Dostupno na: <https://www.hoskinghardwood.com/Department/Hardwood-Floors/Janka-Wood-Hardness-Chart.aspx?dId=7&pageId=12>
- [24] Hrvatski normativni dokument [Internet]. (pristupljeno: 06/06/2022). Dostupno na: <https://repozitorij.hzn.hr/norm/HRN+EN+1534%3A2010>
- [25] Vörös Á, Németh R. The History of Wood Hardness Tests. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020 Jul 21;505:012020. doi: 10.1088/1755-1315/505/1/012020
- [26] 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 13;67(1):7. doi: 10.1186/s10086-020-01938-4
- [27] Tvrdoća po Brinellu [Internet]. (pristupljeno: 06/06/2022). Dostupno na: https://hr.wikipedia.org/wiki/Tvrdo%C4%87a_po_Brinellu
- [28] Cherubini P, Humbel T, Beeckman H, Gärtner H, Mannes D, Pearson C, et al. Olive Tree-Ring Problematic Dating: A Comparative Analysis on Santorini (Greece). *PLoS ONE*. 2013 Jan 28;8(1). doi: 10.1371/journal.pone.0054730

-
- [29] Ehrlich Y, Regev L, Kerem Z, Boaretto E. Radiocarbon dating of an olive tree cross-section: New insights on growth patterns and implications for age estimation of olive trees. *Frontiers in Plant Science*. 2017 Nov 10;8. doi: 10.3389/fpls.2017.01918
- [30] Green DW, Winandy JE, Kretschmann DE. *Mechanical Properties of Wood*.