

# Utjecaj veličine abrazivnog zrna i usmjerenosti strukture na abrazivsku otpornost hrasta kitnjaka (*Quercus petraea*)

---

Bratić, Lucia

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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:235:551717>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-10**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Lucia Bratić**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentorica:

Prof. dr. sc. Vera Rede

Studentica:

Lucia Bratić

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem svojim roditeljima, Ivoni i Vitomiru, i sestri Antei na neizmjenoj podršci tijekom čitavog studija te ostatku obitelji, dečku i prijateljima.

Posebno zahvaljujem mentorici Veri Rede, prof. dr. sc. i asistentici Heleni Lukšić, mag. ing. mech. na ideji te uloženom trudu i vremenu tijekom izrade ovog rada.

Lucia Bratić



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 / 23 – 6 / 1	
Ur. broj: 15 - 1703 - 23 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **LUCIA BRATIĆ** Mat. br.: 0035213330

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj veličine abrazivnog zrna i usmjerenosti strukture na abrazijsku otpornost hrasta kitnjaka (*Quercus petraea*)**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Effect of abrasive grain size and structural direction on the abrasion resistance of the sessile oak (*Quercus petraea*)**

Opis zadatka:

Svi tehnički materijali s usmjerenom strukturom imaju usmjerena svojstva, odnosno, različite vrijednosti mehaničkih i ostalih svojstava u karakterističnim smjerovima. Usmjerenost strukture i svojstava osobito je izražena kod drva, prirodnog i visokovrijednog tehničkog materijala. S obzirom na usmjerenost drvene strukture razlikuju se tri karakteristična presjeka - poprečni, radijalni i tangencijalni. Kod navođenja rezultata ispitivanja bilo kojeg mehaničkog ili tribološkog svojstva mora se navesti smjer u kojem su uzeti uzorci za ispitivanje. U teorijskom dijelu diplomskog rada potrebno je obraditi recentna istraživanja koja se bave ponašanjem različitih vrsta drva u uvjetima abrazivnog trošenja.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je analizirati mikrostrukturu te izmjeriti tvrdoću i otpornost na abrazivno trošenje hrasta kitnjaka (*Quercus petraea*) u poprečnom, radijalnom i tangencijalnom presjeku. Tvrdoću izmjeriti standardnom metodom po Brinellu, a otpornost na abraziju odrediti na uređaju Taber abrader. Pri ispitivanju na Taber abraderu koristiti različite kvalitete brusnog papira. Dobivene rezultate analizirati i na temelju analize donijeti odgovarajuće zaključke o utjecaju usmjerenosti strukture i veličine abrazivnih zrna na abrazivnu otpornost hrasta kitnjaka. Također je potrebno usporediti dobivene rezultate s rezultatima dobivenim na drugim vrstama drva.

Zadatak zadan:  
19. siječnja 2023.

Rok predaje rada:  
23. ožujka 2023.

Predviđeni datum obrane:  
27. ožujka do 31. ožujka 2023.

Zadatak zadao:  
prof. dr. sc. Vera Rede

Predsjednica Povjerenstva:  
  
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. STRUKTURA DRVA .....	2
2.1. Elementi makrostrukture drva.....	5
2.2. Elementi stanične strukture drva.....	6
3. SVOJSTVA DRVA .....	9
3.1. Higroskopnost drva .....	9
3.2. Gustoća.....	11
3.3. Toplinska svojstva.....	13
3.4. Tvrdća .....	13
3.5. Tribološka otpornost .....	16
3.5.1. Kritična veličina abrazivnog zrna .....	17
3.6. Anizotropija svojstava drva .....	19
3.7. Modifikacija drva u cilju poboljšanja mehaničkih svojstava.....	22
4. PRIMJENA I SVOJSTVA HRASTA KITNJAKA.....	26
5. EKSPERIMENTALNI DIO .....	28
5.1. Cilj rada i provedena ispitivanja .....	28
5.1.1. Materijal za ispitivanje.....	28
5.1.2. Određivanje gustoće i udjela vlage .....	29
5.1.3. Analiza mikrostrukture ispitnih uzoraka.....	30
5.1.4. Ispitivanje abrazijske otpornosti .....	33
5.1.5. Ispitivanje tvrdoće.....	34
5.2. Rezultati provedenih ispitivanja.....	36
5.2.1. Rezultati ispitivanja abrazijske otpornosti .....	36
5.2.2. Rezultati ispitivanja tvrdoće .....	39

---

5.3. Analiza rezultata provedenih ispitivanja.....	40
5.3.1. Utjecaj veličine abrazivnog zrna na abrazijsku otpornost hrasta kitnjaka .....	40
5.3.2. Utjecaj usmjerenosti strukture na abrazijsku otpornost hrasta kitnjaka.....	41
5.3.3. Utjecaj usmjerenosti strukture na tvrdoću hrasta kitnjaka .....	44
6. ZAKLJUČAK.....	46
LITERATURA.....	47

---

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Hijerarhijska struktura drva [1] .....	3
Slika 2.	Tri karakteristična presjeka drva [6] .....	4
Slika 3.	Poprečni presjek kroz deblo [3].....	5
Slika 4.	Stanična stijenka drvne stanice [9].....	6
Slika 5.	Mikrostruktura četinjača (lijevo) i listača (desno) [5].....	8
Slika 6.	Izoterma sorpcije vlage za bor pri temperaturi 22,5 °C [9].....	10
Slika 7.	Korelacija gustoće i Brinellove tvrdoće [12] .....	11
Slika 8.	Primjeri otisaka kalote prilikom ispitivanja Brinellove tvrdoće pri različitim opterećenjima na tri karakteristična presjeka drvne vrste Iroko [14].....	14
Slika 9.	Geometrija otiska kuglice; ispitivanje tvrdoće Brinellovom metodom [14].....	15
Slika 10.	Korelacija gubitka volumena pri abraziji i gustoće uzoraka drva hrasta [17].....	17
Slika 11.	Kritična veličina abrazivnog zrna [19].....	18
Slika 12.	Ovisnost gubitka volumena o srednjoj veličini abrazivnog zrna za drvo hrasta lužnjaka [15].....	19
Slika 13.	Volumno utezanje drva hrasta kitnjaka pri 0 % i 12 % vlage na tri karakteristična presjeka [11].....	20
Slika 14.	Ovisnost Brinellove tvrdoće i gustoće različitih vrsta drva na tri karakteristična presjeka pri opterećenju a) 294,2 N i b) 980,7 N [14].....	21
Slika 15.	Ovisnost gubitka volumena o srednjoj veličini abrazivnog zrna subfosilnog drva hrasta na tri karakteristična presjeka [15].....	22
Slika 16.	Fotografije mikrostrukture drva topole prije i nakon kompresije pri različitim stupnjevima kompresije a) 0 % b) 50 % c) 60 % d) 70 % e) 75 % [24] .....	24
Slika 17.	Porast tvrdoće nakon denzifikacije te nakon denzifikacije i kemijske modifikacije drva topole i breze [25] .....	25
Slika 18.	Rasprostranjenost hrasta kitnjaka [26] .....	26
Slika 19.	Tekstura hrasta kitnjaka u tangencijalnom presjeku [27].....	27
Slika 20.	Uzorci za ispitivanje abrazijske otpornosti tri karakteristična presjeka (P - poprečni, R - radijalni, T - tangencijalni presjek) .....	28
Slika 21.	Određivanje mase ispitnih uzoraka na analitičkoj vagi Ohaus Analytical Plus ....	29
Slika 22.	Mikrostruktura poprečnog presjeka hrasta kitnjaka .....	31
Slika 23.	Mikrostruktura radijalnog presjeka hrasta kitnjaka.....	31



---

Slika 24.	Mikrostruktura tangencijalnog presjeka hrasta kitnjaka .....	32
Slika 25.	Ispitivanje abrazijske otpornosti na uređaju Taber abrader.....	33
Slika 26.	Uređaj za ispitivanje tvrdoće uzoraka Brinellovom metodom .....	35
Slika 27.	Ovisnost gubitka volumena o srednjoj veličini abrazivnog zrna .....	40
Slika 28.	Ovisnost intenziteta trošenja o srednjoj veličini abrazivnog zrna.....	41
Slika 29.	Gubitak volumena pri abraziji na tri karakteristična presjeka za različite kvalitete brusnih papira .....	42
Slika 30.	Intenzitet abrazijskog trošenja za različite kvalitete brusnih papira.....	43
Slika 31.	Izmjerene vrijednosti tvrdoće na tri karakteristična presjeka.....	44
Slika 32.	Prosječne vrijednosti tvrdoće na tri karakteristična presjeka .....	45

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Udio vlage i gustoća ispitnih uzoraka .....	30
Tablica 2. Korištene kvalitete brusnih papira.....	34
Tablica 3. Gubitak mase pri abrazijskom trošenju pri udjelu vlage 7,97 %.....	36
Tablica 4. Gubitak volumena pri abrazijskom trošenju pri udjelu vlage 7,97 %.....	37
Tablica 5. Intenzitet abrazijskog trošenja pri udjelu vlage 7,97 % .....	38
Tablica 6. Rezultati ispitivanja tvrdoće .....	39
Tablica 7. Omjeri srednjeg gubitka volumena na karakterističnim presjecima .....	43

---

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Mjerna jedinica</b>	<b>Opis oznake</b>
$m_w$	g	Masa drva
$V_w$	cm <sup>3</sup>	Volumen drva
$\Delta m$	g	Gubitak mase
$\Delta V$	mm <sup>3</sup>	Gubitak volumena
$\Delta V/A$	mm <sup>3</sup> /mm <sup>2</sup>	Intenzitet trošenja
HB	N/mm <sup>2</sup>	Brinellova tvrdoća
$F$	N	Primijenjena sila utiskivanja
$h$	mm	Dubina utiskivanja kuglice
$D$	mm	Promjer kuglice
$d$	mm	Promjer otiska kalote
$H$	mm	Dubina prodiranja kuglice prije opterećenja
$x$	mm	Elastični oporavak materijala
$w$	%	Udio vlage u drvu
$\rho_w$	g/cm <sup>3</sup>	Gustoća drva

---

## SAŽETAK

Cilj ovog diplomskog rada bio je utvrditi kako usmjerenost strukture i veličina abrazivnog zrna utječu na abrazijsku otpornost hrasta kitnjaka (*Quercus petraea*) u tri karakteristična presjeka – poprečnom, radijalnom i tangencijalnom. Ispitivanje abrazijske otpornosti provedeno je na uređaju Taber abrader na različitim kvalitetama brusnog papira od P80 do P800. Na karakterističnim presjecima izmjerena je i tvrdoća Brinellovom metodom.

Analizom dobivenih rezultata utvrđeno je da usmjerenost strukture i veličina abrazivnog zrna utječu na abrazijsku otpornost hrasta kitnjaka. Najveća abrazijska otpornost izmjerena je na poprečnom presjeku, dok je abrazijska otpornost radijalnog i tangencijalnog presjeka podjednaka. Na sva tri presjeka uočen je efekt „kritične veličine abrazivnog zrna“ i njezina vrijednost iznosi oko 125  $\mu\text{m}$ . Najviša prosječna tvrdoća izmjerena je na poprečnom presjeku (16,19 HB), a niže vrijednosti prosječne tvrdoće izmjerene su na radijalnom (14,15 HB) i tangencijalnom presjeku (15,14 HB).

**Ključne riječi:** usmjerenost strukture, abrazijska otpornost, tvrdoća, hrast kitnjak

---

## SUMMARY

This thesis aimed to determine how the orientation of the structure and size of the abrasive grain affect the abrasion resistance of sessile oak (*Quercus petraea*) in three characteristic sections - cross, radial, and tangential. The abrasion resistance test was carried out using a Taber abrader device with different grades of abrasive papers from P80 to P800. The Brinell hardness was also measured in three characteristic sections.

Analysis of the results showed that the orientation of the structure and size of the abrasive grain affect the abrasion resistance of sessile oak. The highest abrasion resistance was measured in the cross section, while the abrasion resistance of the radial and tangential sections was equal. The "critical size of the abrasive grain" effect was observed in all three characteristic sections, with a value of approximately 125  $\mu\text{m}$ . The highest average Brinell hardness was measured in the cross section (16.19 HB), with lower average hardness values measured in the radial (14.15 HB) and tangential sections (15.14 HB).

**Key words:** orientation of the structure, abrasion resistance, hardness, sessile oak

## 1. UVOD

Interes za drvo i druge materijale koji sadrže celulozu, značajno se povećao početkom 21. stoljeća iz nekoliko razloga. Mineralni resursi se kontinuirano iscrpljuju, a prisutne su i sve veće količine industrijskog i kućnog otpada. Samo dio proizvedenih materijala se reciklira i ponovno koristi. To predstavlja prijetnju biosferi zbog onečišćenja okoliša i povećanja koncentracije ugljičnog dioksida u atmosferi. Drvo, biljni materijali koji sadrže celulozu i biokompoziti su stoga sve privlačniji tehničkih materijali zbog svojih svojstava kao što su visoka ekološka prihvatljivost, biorazgradivost i sposobnost modificiranja [1].

Drvo je kompleksan materijal složene biološke strukture. Prije svega, drvo je materijal iz prirode, čija uporaba i područje primjene unatoč razvoju niza modernih sintetičkih materijala i dalje raste. To je posljedica neprestanog istraživanja strukture te povezanosti strukture i svojstava drva. Drvo kao materijal karakterizira visoka varijabilnost strukture i svojstava, zbog čega je važno kontinuirano istraživanje svojstava različitih vrsta drva. U novije vrijeme sve se više istraživanja provodi i na različitim vrstama modificiranog drva [2].

U ovom diplomskom radu, tema istraživanja je abrazijska otpornost hrasta kitnjaka. Abrazijska otpornost jedno je od najvažnijih svojstava u različitim primjenama drva, primjerice u podnim konstrukcijama.

U teorijskom dijelu ovog diplomskog rada opisana je struktura i svojstva drva kroz recentna istraživanja različitih vrsta drva. U eksperimentalnom dijelu ovog diplomskog rada opisane su metode ispitivanja svojstava abrazijske otpornosti i tvrdoće uzoraka hrasta kitnjaka u tri karakteristična presjeka. Prikazani su rezultati navedenih ispitivanja, provedena je analiza dobivenih rezultata i na kraju su prikazani najvažniji zaključci ovog diplomskog rada.

## 2. STRUKTURA DRVA

Drvo je jedan od najznačajnijih tehničkih materijala, prirodni kompozit kojeg karakterizira kompleksna biološka struktura, heterogenost te anizotropija svojstava i sposobnost regeneracije. Iz literature je poznato da karakteristike strukture drva npr. poroznost strukture, odnosno veličina i raspodjela pora određuju fizikalna i mehanička svojstva. Istraživanje strukture i korelacije strukture i svojstava drva izuzetno je važno s gledišta inženjerstva materijala [3].

U botanici, drvne vrste mogu se podijeliti na [4]:

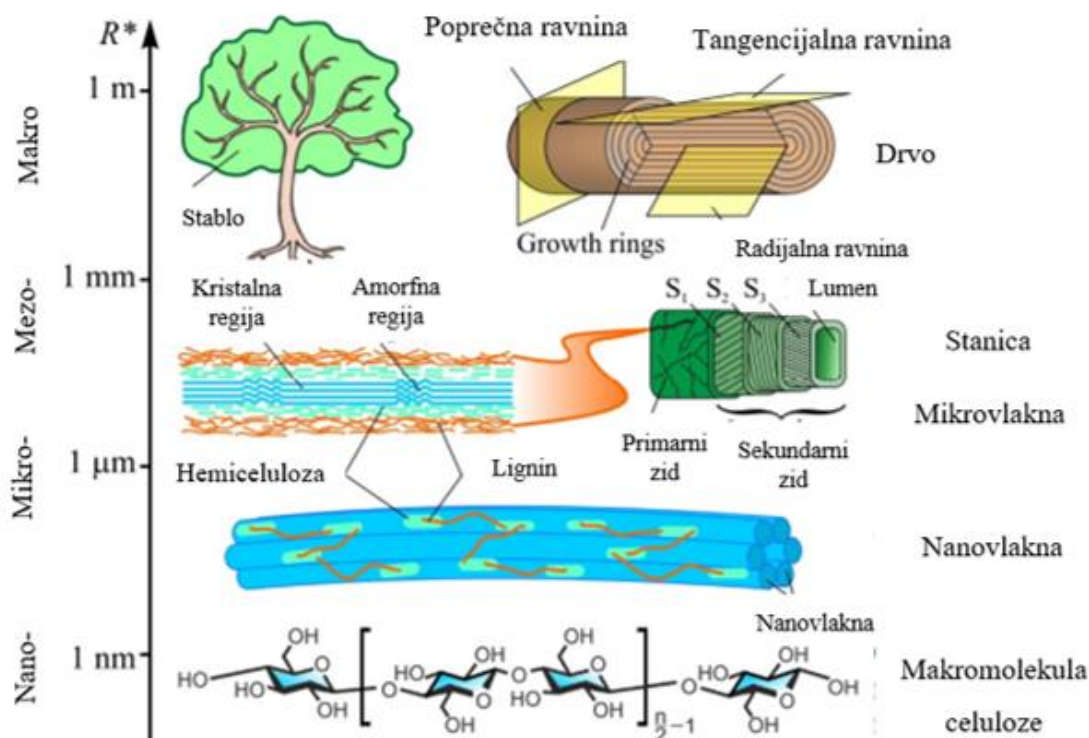
- četinjače ili golosjemenjače (engl. *softwood*)
- listače ili kritosjemenjače (engl. *hardwood*).

Osnovne razlike ovih dviju skupina su [4]:

- prema izgledu listova - četinjače karakteriziraju igličasti zimzeleni listovi, a listače karakteriziraju listovi širokih ravnih površina
- prema položaju sjemena - četinjače karakteriziraju otvoreni sjemeni zameci, a listače karakteriziraju zatvoreni sjemeni zameci unutar tučka.

Osim spomenutih, poznate su i razlike u staničnoj strukturi četinjača i listača koje se očituju kroz različita svojstva i mogućnosti primjene ovih dviju skupina drvnih vrsta [3] [5].

Slika 1 prikazuje hijerarhijsku strukturu drva na nekoliko razina s vodećim elementima makrostrukture, mikrostrukture i molekularne strukture drva koje zajedno određuju fizikalna, kemijska i mehanička svojstva drva [1].



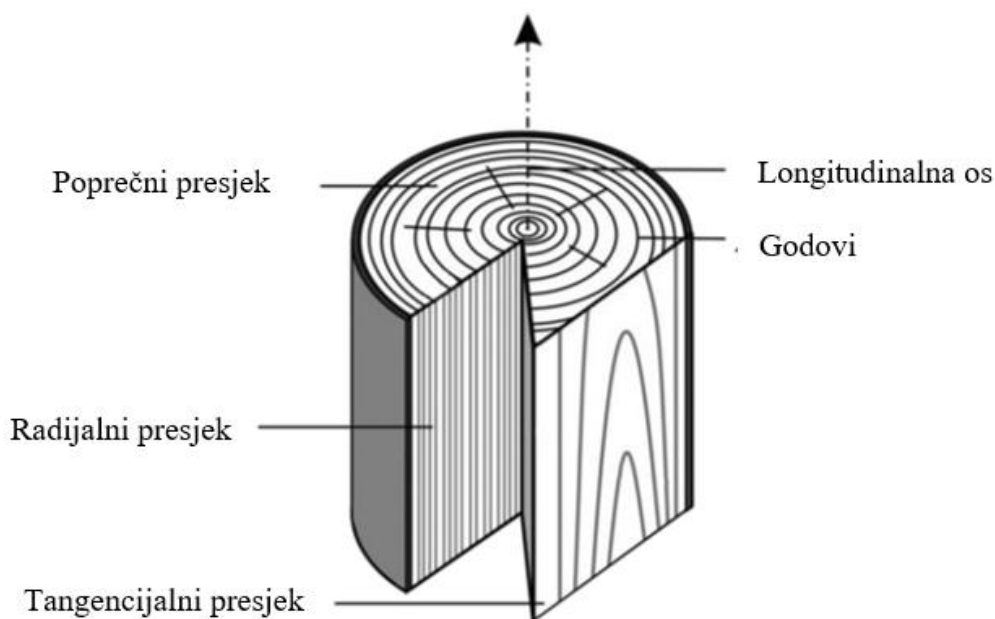
Slika 1. Hijerarhijska struktura drva [1]

Struktura drva formirana je kako bi drvo obavljalo određene funkcije unutar žive biljke: provođenje vode iz korijena u listove biljke, osiguravanje mehaničkog oslonca biljci i pohranjivanje biokemikalija. Jedna od osnovnih karakteristika koja određuje strukturu i posredno svojstva drva je podrijetlo drva. Drvo je anizotropan materijal tj. unutar strukture jedne vrste drva karakteristična je varijabilnost svojstava - poprimanje različitih svojstava u različitim smjerovima strukture. Zato se svojstva drva obično ispituju u tri karakteristična presjeka [3].

Na slici 2 prikazana su tri karakteristična presjeka drva [6]:

- poprečni presjek
- radijalni presjek
- tangencijalni presjek.





**Slika 2. Tri karakteristična presjeka drva [6]**

Razmatranjem karakteristika na sva tri karakteristična presjeka drva postiže se cjelovito razumijevanje trodimenzionalne strukture drva [3].

Radijalni i tangencijalni presjek još se nazivaju longitudinalnim presjecima jer su paralelni s longitudinalnom osi. Poprečni presjek je okomit na uzdužnu os debla te na tangencijalni i radijalni presjek. Na radijalnom presjeku opisuju se karakteristike drva u radijalnom smjeru. Tangencijalni presjek je okomit na radijalni presjek, a na njemu se uočavaju karakteristike drva u tangencijalnom smjeru. Radijalni smjer prolazi kroz srčiku i ide prema kori debla, a tangencijalni smjer tangira liniju goda i okomit je na radijalni smjer. Longitudinalni smjer je paralelan s uzdužnom osi debla i okomit je na radijalni i tangencijalni smjer [3].

Na slici 2 su uz tri karakteristična presjeka prikazani i godovi. Godovi tj. prstenovi koji se formiraju u drvu predstavljaju velike skupine stanica koje se formiraju kroz određeni vremenski period. Godovi čine jedan ciklus godišnjeg rasta stabla. U područjima umjerene i hladne klime brojanjem godova može se odrediti starost drva. Rast stabla je u slojevima, a velike skupine stanica proizvedene zajedno djeluju kao jedinstvena funkcionalna jedinica stabla.

Drvene vrste koje imaju jasno vidljive godove iskazuju tri temeljne vrste:

- vrste kod kojih nema promjena u uzorku stanica kroz god
- vrste kod kojih je vidljivo postupno smanjenje unutarnjeg promjera provodnih elemenata iz ranog prema kasnom dijelu goda

- vrste kod kojih je nagla i jasna promjena unutarnjeg promjera provodnih elemenata iz ranog prema kasnom dijelu goda.

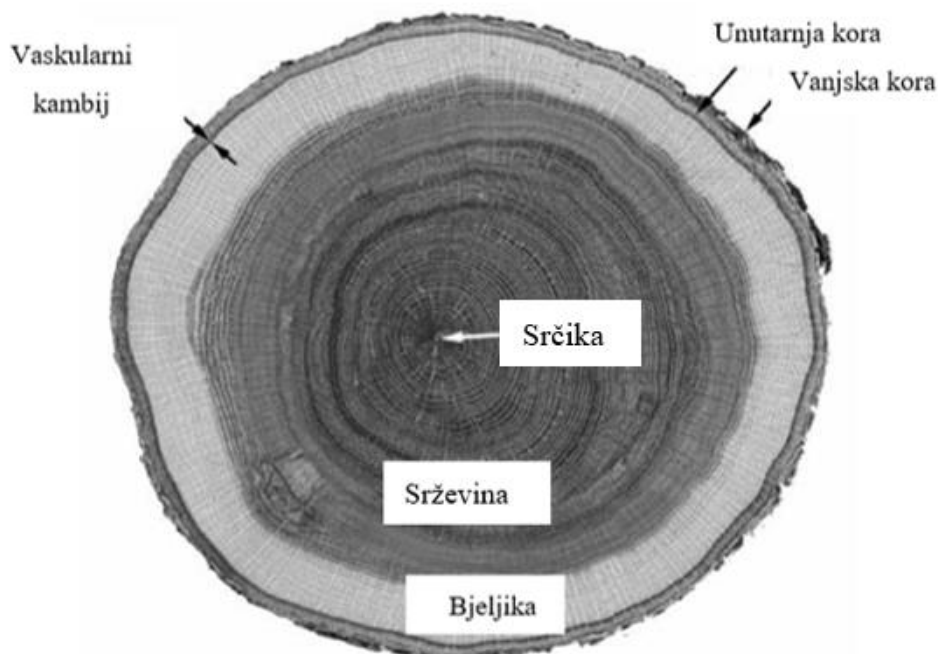
Stanice koje se formiraju na početku rasta goda nazivaju se stanice ranog dijela goda ili stanice ranog drva, a stanice koje se formiraju u kasnijim fazama rasta goda nazivaju se stanice kasnog dijela goda ili stanice kasnog drva [3].

Poznavanje godova je važno s gledišta inženjerstva materijala jer utječu na fizikalna i mehanička svojstva drva. Iako ovisnosti pojedinih svojstava različitih vrsta drva o širini godova nisu jasno i univerzalno definirane, postoji niz istraživanja koja stavljaju u korelaciju širinu goda i određeno fizikalno ili mehaničko svojstvo neke drvene vrste npr. gustoću drva [7] ili tlačnu čvrstoću drva [8].

## 2.1. Elementi makrostrukture drva

Na presjeku debla mogu se uočiti različiti elementi, od vanjskog prema unutrašnjem dijelu debla kako slijede: vanjska kora, unutarnja kora, vaskularni kambij, bjeljika, srževina i središnji dio ili srčika [3].

Na slici 3 prikazan je poprečni presjek kroz deblo naznačenim slojevima.



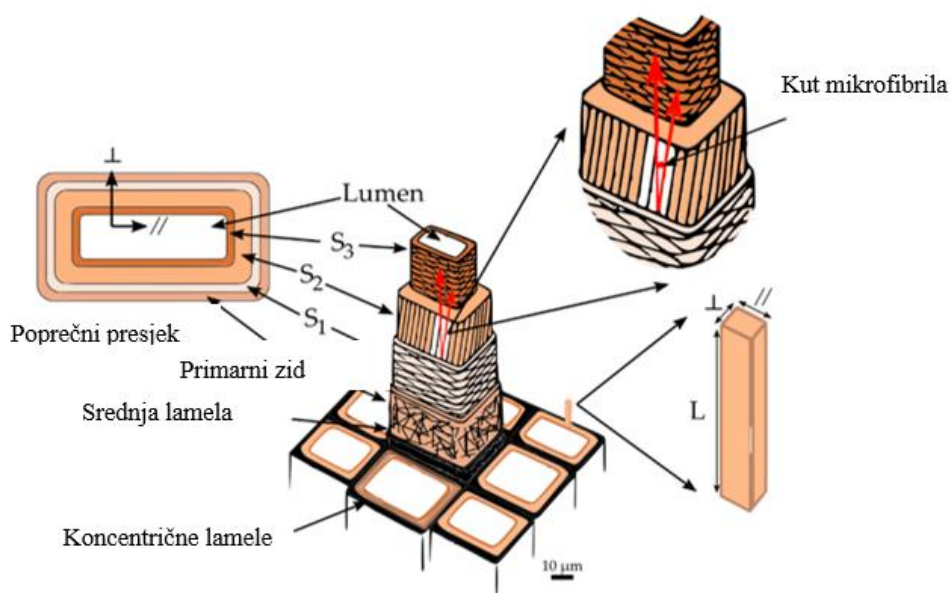
Slika 3. Poprečni presjek kroz deblo [3]

Vanjska kora pruža mehaničku zaštitu mekšoj unutarnjoj kori i također sprječava prekomjerno isparavanje vode. Unutarnja kora je tkivo kroz koje se šećeri proizvedeni fotosintezom prenose iz listova do korijena ili rastućih dijelova stabla. Vaskularni kambij je sloj između kore i bjeljike koji svake godine proizvodi oba ova tkiva. Vaskularni kambij dodaje stanice slojevima drveta i kore oko stabla staničnom diobom te se tako povećava opseg stabla i ukupna površina vaskularnog kambija. Na taj se način tkivo koje provodi vodu, bjeljika, povezuje s tkivom koje provodi vodu bogatu biokemijskim tvarima - unutarnjom korom. Bjeljika je aktivni dio drva kojim se voda provodi od korijena do listova. Srževina je središnji dio stabla koji je tamnije boje zbog akumuliranih tvari i služi samo kao mehanička potpora stablu. Središnji dio, srčika, je ostatak ranog rasta debla prije formacije stabla [3].

## 2.2. Elementi stanične strukture drva

Biljna stanica se sastoji od dva osnovna dijela: protoplasta u kojem se nalazi živa tvar stanice i stanične stijenke - strukture koja štiti protoplast. Međutim, većina drvnih stanica nema protoplast, već je unutar stanične stijenke prazan prostor – lumen. Staničnu stijenku drvene stanice karakterizira izrazito uređena struktura za različite tipove drvnih stanica i različite vrste drva [3].

Na slici 4 prikazani su različiti slojevi stanične stijenke drvene stanice.



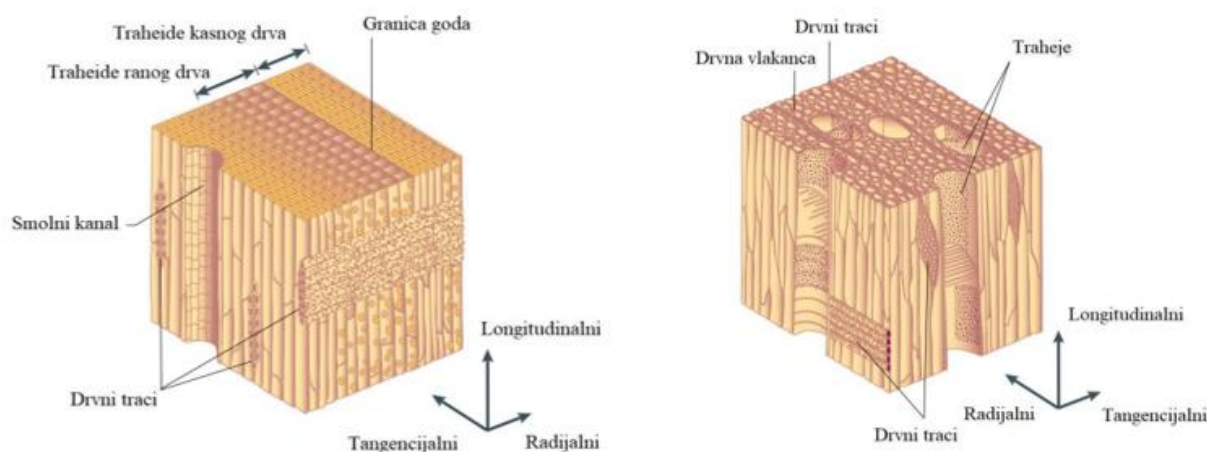
Slika 4. Stanična stijenka drvene stanice [9]

Stanična stijenka se sastoji od tri glavne regije: srednja lamela, primarni zid i sekundarni zid sa slojevima  $S_1$ ,  $S_2$  i  $S_3$ . Na molekularnoj razini, u svakoj regiji, stanična stijenka ima tri glavne komponente [3]:

- celulozne mikrofibrile, s karakterističnim raspodjelama i organizacijom, koji osiguravaju čvrstoću i krutost stanične stijenke
- hemiceluloza koja osigurava fleksibilnost stanične stijenke
- matrica - obično pektin u primarnom zidu koji osigurava stabilnost strukture stanične stijenke i lignin u sekundarnom zidu koji osigurava čvrstoću i krutost stanične stijenke.

Središnja lamela povezuje više stanica kako bi mogle zajedno obavljati svoju funkciju, a moraju biti povezane tako da je osiguran prijenos biokemijskih tvari i vode. Sljedeći sloj stanične stijenke je primarni zid. Primarni zid se sastoji od niza slučajno usmjerenih mikrovlakana celuloze te ga je teško čak i pod mikroskopom razlikovati od središnje lamele budući da je iznimno tanak. Sekundarni zid stanične stijenke sastavljen je od tri sloja:  $S_1$ ,  $S_2$  i  $S_3$ . Najvažniji sloj sekundarnog zida stanične stijenke je  $S_2$  sloj kojim su određene karakteristike drvne stanice i posredno svojstva drva na makroskopskoj razini. Ujedno,  $S_2$  sloj je najdeblji sloj sekundarnog zida stanične stijenke. Jažice su modifikacije u staničnim stijenkama između dvije stanice kojima se omogućuje prijenos između stanica. Vrsta, broj i veličina jažica može biti karakteristična za određene vrste drva i može izravno utjecati na to kako drvo reagira u različitim situacijama, primjerice na interakciju drva s površinskim premazima. Temeljne razlike između različitih vrsta drva utemeljene su na različitim vrstama, veličinama i rasporedima drvnih stanica [3].

Stanična struktura četinjača prikazana je na slici 5 lijevo, a stanična struktura listača prikazana je na slici 5 desno.



**Slika 5. Mikrostruktura četinjača (lijevo) i listača (desno) [5]**

Struktura četinjača je relativno jednostavna. Aksijalni sustav strukture četinjača sačinjavaju provodne stanice, traheide, čija je osnovna karakteristika znatno veća dužina od širine (čak do 100 puta). Razlikuju se traheide kasnog dijela goda i traheide ranog dijela goda. Traheide ranog dijela goda karakterizira znatno veći promjer u usporedbi s traheidama u kasnom dijelu goda. Osnovna funkcija traheida ranog dijela goda je provođenje vode i biokemikalija iz korijena prema ostalim dijelovima biljke. Osnovna funkcija traheida kasnog dijela goda je osiguravanje čvrstoće i stabilnosti drva. Radijalni sustav četinjača čine drvni traci i kod nekih vrsta smolni kanali. Drvni traci se kod četinjača sastoje od parenhimskih stanica i traheida koje su kraće i šire nego traheide aksijalnog sustava. Njihova je primarna funkcija osiguravanje strukturne stabilnosti, ali ujedno služe za pohranjivanje i transport biokemijskih tvari. Smolni kanali su specijalizirane strukture koje se nalaze u strukturi samo nekih vrsta četinjača, a služe za proizvodnju i pohranjivanje smole koja služi kao obrambeni mehanizam npr. kod oštećenja drva [3].

Struktura listača je puno složenija od strukture četinjača. Aksijalni sustav sastoji se uglavnom od drvnih vlakanca različitih vrsta koji osiguravaju mehaničku potporu i traheja koje osiguravaju provođenje vode i biokemijskih tvari. Kao i kod četinjača, drvni traci čine radijalni sustav. U strukturi listača, drvni traci sastoje se od parenhimskih stanica i različitost veličine i oblika izraženija je nego u strukturi listača [3].

### 3. SVOJSTVA DRVA

#### 3.1. Higroskopnost drva

Drvo je higroskopan materijal, odnosno materijal koji upija vlagu te je udio vlage u drvu jedan od najvažnijih čimbenika koji utječe na fizikalna i mehanička svojstva drva. Iz tog razloga, izuzetno je važno razumjeti ponašanje vlage u drvu i njezin utjecaj na svojstva drva, budući da ta znanja mogu poslužiti u razvoju naprednih drvnih materijala [10].

Udio vlage u drvu određuje se prema sljedećem izrazu [10]:

$$w = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100, \% \quad (1)$$

gdje je:

$m_2$  – masa drva pri udjelu vlage od  $w$  %, g

$m_1$  – masa drva u apsolutno suhom stanju, g.

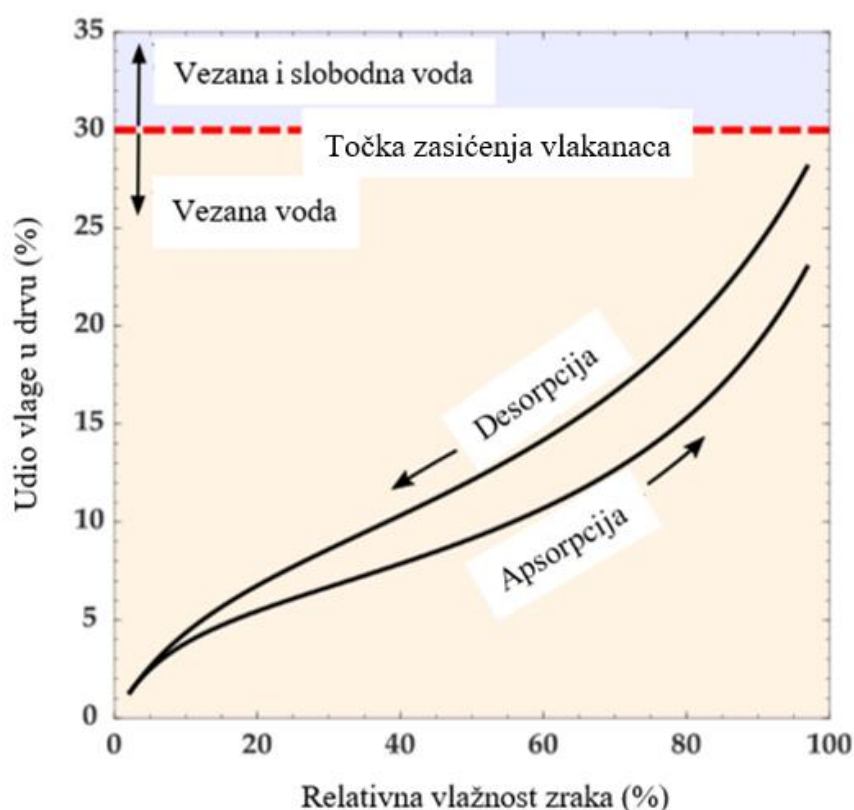
Količina upijene vlage ovisi o relativnoj vlažnosti i temperaturi zraka te o količini vode u drvu. U zelenom (svježe posječenom) drvu sadržaj vlage može varirati između 30 % pa do preko 200 %. Obično se veći sadržaj vlage mjeri u području bjeljike nego u području srčevine (izuzetak su neke od drvnih vrsta listača) [10][11].

Vlaga u drvu se može kategorizirati kao slobodna ili vezana voda. Slobodna voda je voda prisutna u makroskopskim prazninama drveta, poput lumena i može biti u sva tri agregatna stanja. Vezana voda je voda koja se apsorbira u polimere stanične stijenke. Ispod točke zasićenja vlaknanaca, koja je obično oko 30 % vlažnosti, vlaga postoji kao vodena para u makroskopskim prazninama u staničnoj strukturi drva i to je vezana voda. Iznad točke zasićenja vlaknanaca, vlaga postoji i kao slobodna voda. Promjene u količini vezane vode uzrokuju dimenzijske nestabilnosti drva – utezanje i bubrenje drva [9].

Točka zasićenja vlaknanaca je točka pri kojoj je stanična stijenka u potpunosti zasićena vodom, ali nema slobodne vode u drvu. To je ona vlažnost iznad koje se fizička i mehanička svojstva drva ne mijenjaju kao funkcija vlažnosti. Upijanjem vlage može doći do bubrenja drva, što uzrokuje dimenzijsku nestabilnost i potencijalno razvoj pukotina. Također, postoji opasnost od korozije na konstrukcijskim dijelovima od drva i metala (što se može spriječiti ukoliko sadržaj vlage u drvu ne prelazi 15 %). Odnosno, ako je sadržaj vlage u drvu previsok može se očekivati

narušena dimenzijska stabilnost drva. Prekomjernim gubitkom vlage može doći do degradacije drva. Odnosno, ako je sadržaj vlage u drvu prenizak može se očekivati da će drvo biti krhko i povećana je sklonost drva degradaciji. Kako bi se mogla odrediti količina vlage pri određenoj temperaturi i relativnoj vlažnosti zraka u drvu pri kojoj je drvo stabilno koriste se izoterme sorpcije. Pri konstantnoj temperaturi i relativnoj vlažnosti zraka, drvo će doseći konstantnu količinu vlage - ravnotežna vlažnost drva. Pri određenoj temperaturi, odnos između vlažnosti drva i relativne vlažnosti zraka opisan je izotermom sorpcije vlage. Za svaku vrijednost relativne vlažnosti zraka, izoterma sorpcije vlage označava odgovarajuću vrijednost vlažnosti drva [9][10].

Slika 6 prikazuje ponašanje drva u uvjetima promjene relativne vlažnosti zraka, odnosno izoterme sorpcije vlage za drvenu vrstu bor pri temperaturi 22,5 °C. Na slici se vidi da postoji mala razlika između udjela vlage u drvu kod apsorpcije i desorpcije.



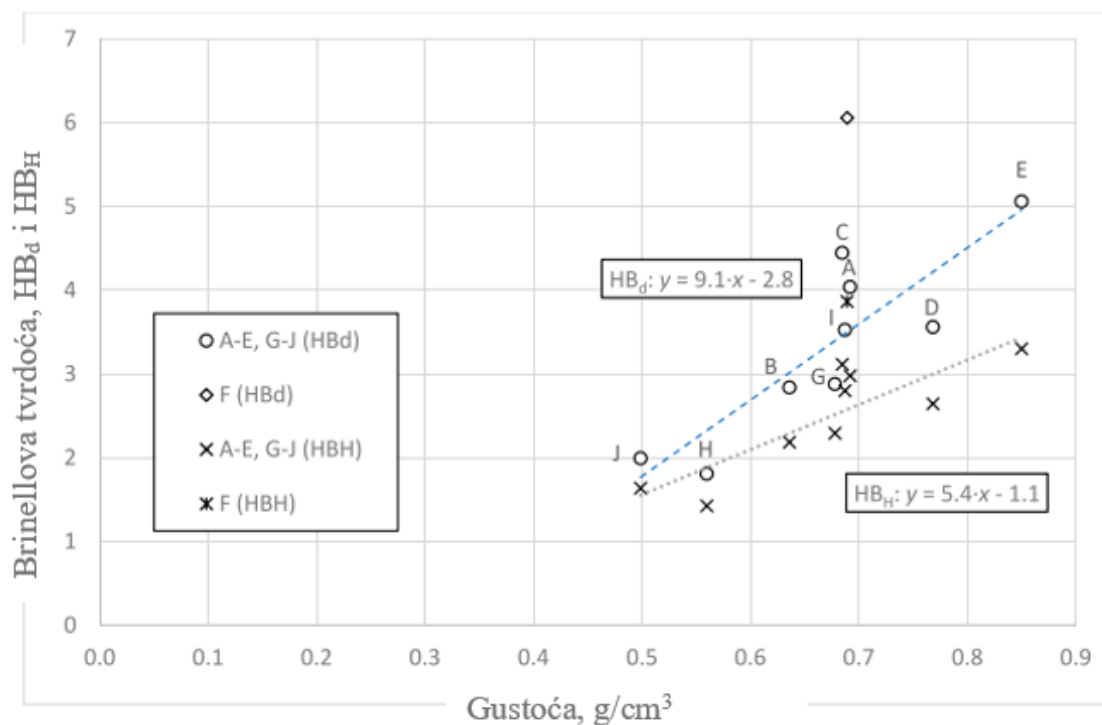
Slika 6. Izoterma sorpcije vlage za bor pri temperaturi 22,5 °C [9]

### 3.2. Gustoća

Gustoća je jedna od najvažnijih karakteristika drva jer korelira s većinom mehaničkih svojstava. Drvo visoke gustoće preferira se u primjenama u kojima je važna visoka čvrstoća, visoka tvrdoća ili otpornost na trošenje [13].

Iz literaturnih izvora poznat je pozitivan linearan odnos između tvrdoće i gustoće drva za različite drvene vrste, odnosno povećanjem gustoće mogu se očekivati veće vrijednosti tvrdoće drva na sva tri karakteristična presjeka [12].

Slika 7 prikazuje grafički prikaz korelacije gustoće i Brinellove tvrdoće iz istraživanja koje je provedeno 2020. godine s ciljem ispitivanja tvrdoće različitih drvnih vrsta koje se koriste u podnim konstrukcijama [12].



Slika 7. Korelacija gustoće i Brinellove tvrdoće [12]

Za materijale koji ne upijaju vlagu gustoća je konstantna pri konstantnoj temperaturi. Za drvo koje je higroskopan materijal, prilikom izračuna gustoće potrebno je uzeti u obzir udio vlage u drvu. Gustoća drva pri nekom udjeli vlage ( $w$ ) računa se prema izrazu [10]:

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w}, g/cm^3 \quad (2)$$



gdje je:

$m_w$  – masa drva pri udjelu vlage  $w$  %, g

$V_w$  – volumen drva pri udjelu vlage od  $w$  %,  $\text{cm}^3$ .

Budući da gustoća drva izuzetno varira među različitim drvnim vrstama i uvjetovana je udjelom vlage u drvu, prilikom uspoređivanja vrijednosti gustoće među vrstama, gustoća drva se opisuje kroz tri različite vrijednosti [10]:

- gustoća zelenog drva
- gustoća u apsolutno suhom stanju
- gustoća pri 12 % vlage.

Modifikacijom izraza (2) slijedi formula za izračun gustoće u apsolutno suhom stanju:

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0}, g/cm^3 \quad (3)$$

gdje je:

$m_0$  – masa drva u apsolutno suhom stanju, g

$V_0$  – volumen drva u apsolutno suhom stanju,  $\text{cm}^3$ .

Prema normi HRN ISO 13061-2:2015 gustoća pri nekom udjelu vlage  $w$  % može se svesti na gustoću pri udjelu vlage od 12 % koristeći sljedeći izraz:

$$\rho_{12} = \rho_w \cdot \frac{1 + 0,01 \cdot (12 - w)}{1 + 0,01 \cdot (12 - w) \cdot \frac{\rho_w}{\rho_{H_2O}}}, g/cm^3 \quad (4)$$

gdje je:

$w$  – udio vlage, %

$\rho_w$  – gustoća pri udjelu vlage od  $w$  %,  $\text{g/cm}^3$

$\rho_{H_2O}$  – gustoća vode koja iznosi  $1000 \text{ g/cm}^3$ .

### 3.3. Toplinska svojstva

Četiri važna toplinska svojstva drva su [10]:

- toplinska vodljivost
- specifični toplinski kapacitet
- toplinska difuznost
- koeficijent toplinskog širenja.

Toplinska vodljivost konstrukcijskih vrsta drva puno je manja od toplinske vodljivosti metalnih dijelova s kojima se drvo često spaja u izgradnji konstrukcijskih elemenata. Toplinska vodljivost drva je dva do četiri puta veća od toplinske vodljivosti uobičajenih izolacijskih materijala. Toplinska vodljivost drva ovisi o nizu faktora kao što su: gustoća, sadržaj vlage te struktura i strukturne nepravilnosti. Toplinska vodljivost drva povećava se s povećanjem gustoće, sadržaja vlage i temperature. Specifični toplinski kapacitet drva ovisi o temperaturi i sadržaju vlage (obrnuto je proporcionalan sa sadržajem vlage u drvu) ali je neovisan o gustoći i vrsti drva. Zbog niske toplinske vodljivosti te umjerene gustoće i specifičnog toplinskog kapaciteta drva, toplinska difuznost drva je mnogo niža nego kod drugih konstrukcijskih materijala poput metala, opeke i kamena. Koeficijent toplinskog širenja potpuno suhog drva pozitivan je u svim smjerovima. U pravilu drvo se širi pri zagrijavanju i skuplja pri hlađenju. Kako drvo reagira na promjene temperature ovisi o sadržaju vlage u drvu. Drvo s umjerenom razinom vlage će se pri zagrijavanju prvotno širiti, a zatim se postupno skupljati na volumen manji od početnog zato što drvo postupno gubi vodu dok je u zagrijanom stanju. Ako je drvo skoro pa potpuno suho, skupljanje uzrokovano gubitkom vlage pri zagrijavanju bit će veće od toplinskog širenja, pa će ukupna dimenzijska promjena pri zagrijavanju biti negativna [10].

### 3.4. Tvrdoća

Tvrdoća je jedno od najvažnijih mehaničkih svojstava drva koje označava otpornost drva prema prodiranju nekog drugog tvrdog tijela. Tvrdoća drva je specifična jer može varirati čak do 50 % unutar iste vrste drva, a ovisi o gustoći, udjelu vlage i orijentaciji drvnih stanica [12].

U Europi, najčešće korištena metoda mjerenja tvrdoće drva u industriji je metoda po Brinellu, iako je ova metoda originalno razvijena za određivanje tvrdoće metalnih materijala [13].

Pri ispitivanju tvrdoće drva metodom po Brinellu, čelična ili kuglica od tvrdog metala određenih dimenzija utiskuje se određeno vrijeme u ispitni uzorak određenom silom. Nakon uklanjanja kuglice odredi se promjer otiska (kalote) preciznim mjerenjem. Parametri ispitivanja odabiru

se ovisno o vrsti materijala koji se ispituje. Nakon određivanja promjera otiska kuglice preciznim mjerenjem, dobiva se vrijednost tvrdoće po Brinellu prema sljedećem izrazu [12]:

$$HB = \frac{0,204 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}, N/mm^2 \quad (5)$$

gdje je:

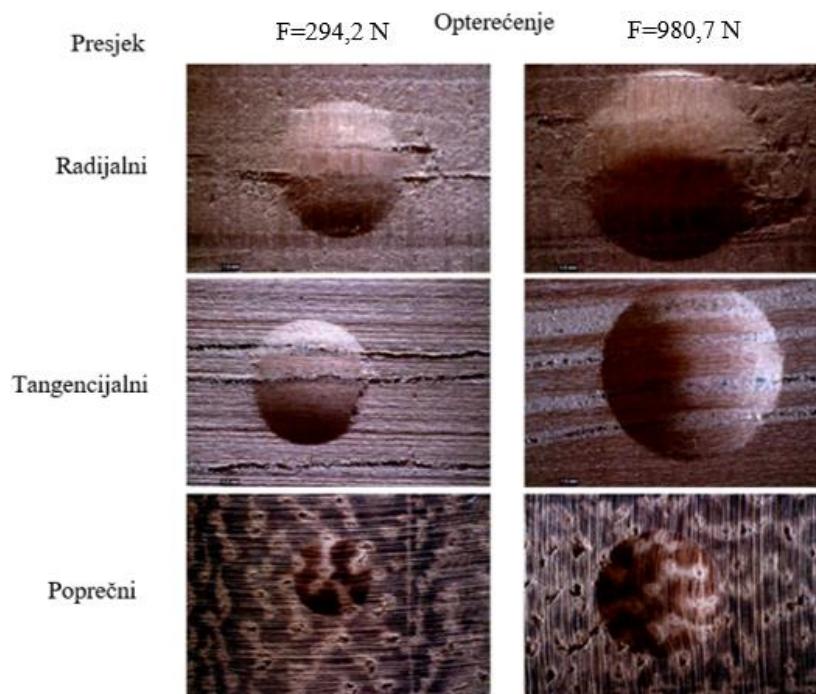
$F$  - primijenjena sila, N

$D$  - promjer indentora odnosno kuglice koja se utiskuje, mm

$d$  - promjer kalote, mm.

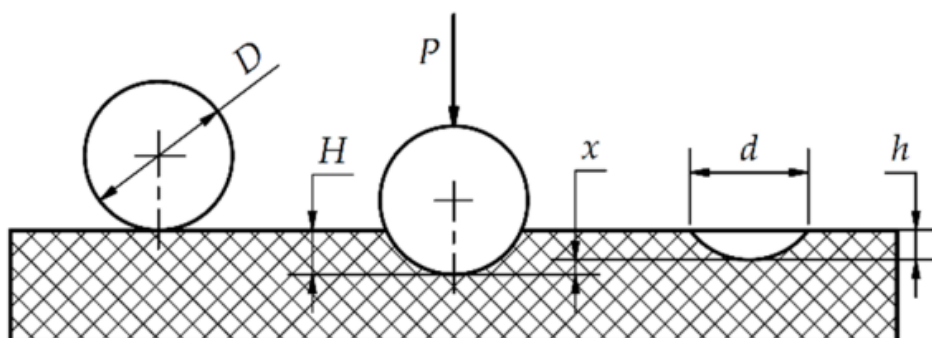
Spomenuta formula standardni je način računanja tvrdoće prema Brinellu za metalne materijale. Pri ispitivanju tvrdoće drva, ovaj pristup ima nekoliko nedostataka. Vodeći nedostatak ovog postupka mjerenja tvrdoće drva je subjektivnost mjerenja jer je granica otiska kuglice često nejasna [12].

Slika 8 prikazuje primjere otisaka kalote pri različitim opterećenjima u tri karakteristična presjeka prilikom ispitivanja Brinellove tvrdoće na uzorcima drvene vrste Iroko. Granica otisaka je nejasna. Može se uočiti da granica postaje jasnija porastom opterećenja.



**Slika 8. Primjeri otisaka kalote prilikom ispitivanja Brinellove tvrdoće pri različitim opterećenjima na tri karakteristična presjeka drvene vrste Iroko [14]**

Do najveće dubine indentacije dolazi pri utiskivanju kuglice maksimalnim opterećenjem pri ispitivanju. Nakon uklanjanja kuglice dolazi do djelomičnog elastičnog oporavka materijala. Budući da je drvo materijal koji karakterizira visoka varijabilnost svojstava, među različitim vrstama drva postotci trajne plastične deformacije su vrlo različiti. Zato se, nerijetko, prilikom ispitivanja tvrdoće drva prema Brinellu umjesto promjera otiska kuglice izmjeri dubina prodiranja kuglice  $h$ . Na taj način moguće je dobiti pouzdanije rezultate mjerenja tvrdoće drva Brinellovim postupkom [12].



**Slika 9. Geometrija otiska kuglice; ispitivanje tvrdoće Brinellovom metodom [14]**

Slika 9 prikazuje geometriju otiska kuglice prilikom ispitivanja tvrdoće Brinellovom metodom. Prema slici 9, vrijede sljedeća dva izraza [12]:

$$x = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}, mm \quad (6)$$

$$h = H - x, mm \quad (7)$$

Kombinacijom izraza (6) i (7) formula za izračun dubine otiska glasi [12]:

$$h = \frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}, mm \quad (8)$$

Prilagođavanjem formule, dobiva se vrijednost tvrdoće drva po Brinellu prema sljedećem izrazu [12]:

$$HB = \frac{F \cdot 0,102}{\pi \cdot D \cdot h} \quad (9)$$

gdje je:

$F$  - primijenjena sila, N

$D$  - promjer indentora odnosno kuglice koja se utiskuje, mm

$h$  – dubina prodiranja kuglice, mm

$x$  – elastični oporavak materijala, mm

$d$  – promjer otiska, mm

$H$  – dubina prodiranja kuglice prije opterećenja, mm.

### 3.5. Tribološka otpornost

Tribološka otpornost drva je sposobnost drva da se odupre vanjskim utjecajima koji mogu izazvati mehaničko trošenje na površini drva. Postoje različiti mehanizmi trošenja, ali kada se ispituje otpornost na trošenje drva najvažniji je mehanizam abrazijskog trošenja. Abrazijska otpornost drva ovisi o nizu različitih čimbenika kao što su vrsta drva, molekularna struktura i kemijski sastav, gustoća, usmjerenost mikrostrukture, sadržaj vlage i eventualna modifikacija površine [15].

Abrazijska otpornost drva iskazuje se preko gubitka mase ili češće preko gubitka volumena i intenziteta trošenja koji se definira kao gubitak volumena po abradiranoj površini. Gubitak mase pri ispitivanju abrazijskog trošenja jednostavno se izračuna prema sljedećem izrazu:

$$\Delta m = m_2 - m_1, mm \quad (10)$$

gdje je:

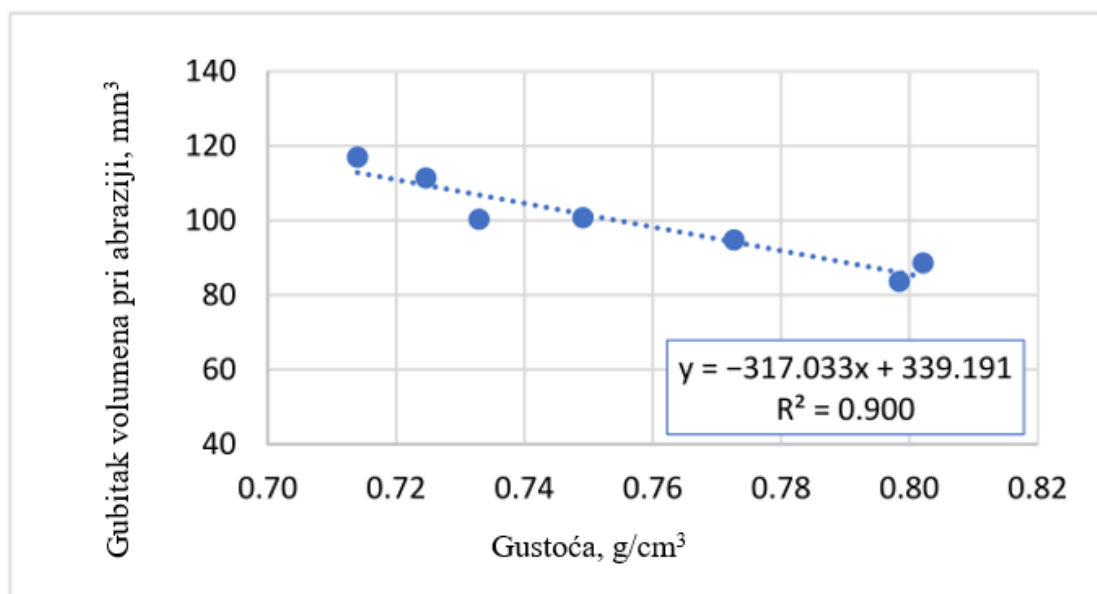
$m_2$  – masa uzorka nakon provedenog ciklusa trošenja, mm

$m_1$  – masa uzorka prije provedenog ciklusa trošenja, mm.

Preko gubitka mase moguće je procjenjivati i uspoređivati abrazijsku otpornost samo onih uzoraka koji imaju istu gustoću, pa se otpornost na abrazijsku uglavnom izražava kao gubitak volumena ili intenzitet abrazijskog trošenja [15].

Iz literature je poznato da se bolja abrazijska otpornost očekuje kod drvnih vrsta koje imaju višu gustoću [16].

Slika 10 prikazuje primjer snažne negativne linearne korelacije gustoće i gubitka volumena pri ispitivanju abrazijskog trošenja recentnih i subfosilnih uzoraka drva hrasta [17].

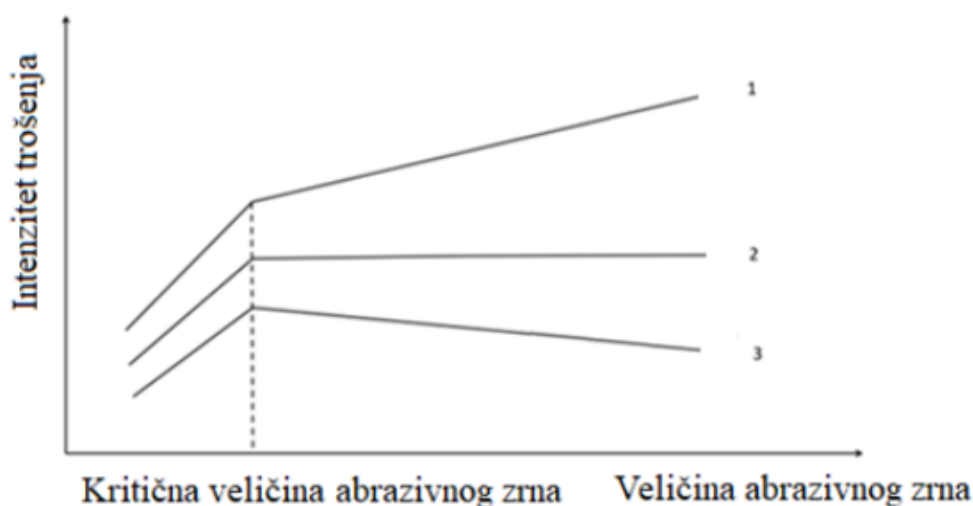


**Slika 10.** Korelacija gubitka volumena pri abraziji i gustoće uzoraka drva hrasta [17]

Abrazijska otpornost drva najčešće se ispituje na uređaju Taber abrader ili metodom „pin on disc“. U obje metode, uzorak je izložen abrazijskom trošenju na abrazivnom papiru. Ove metode su jednostavne i pouzdane, a nedostatak im je ovisnost rezultata ispitivanja abrazijskog trošenja o kvaliteti korištenog abraziva tj. brusnog papira [18].

### 3.5.1. Kritična veličina abrazivnog zrna

Iz literature je poznato da veličina abrazivnih čestica ima utjecaj na rezultate abrazijskog trošenja. Najčešće se s povećanjem veličine abrazivnih čestica povećava i intenzitet abrazijskog trošenja i ta ovisnost je do neke vrijednosti veličine abrazivnih čestica linearna. Nakon toga, iz nekog razloga, intenzitet abrazivnog trošenja ne raste linearno kao prije [19].

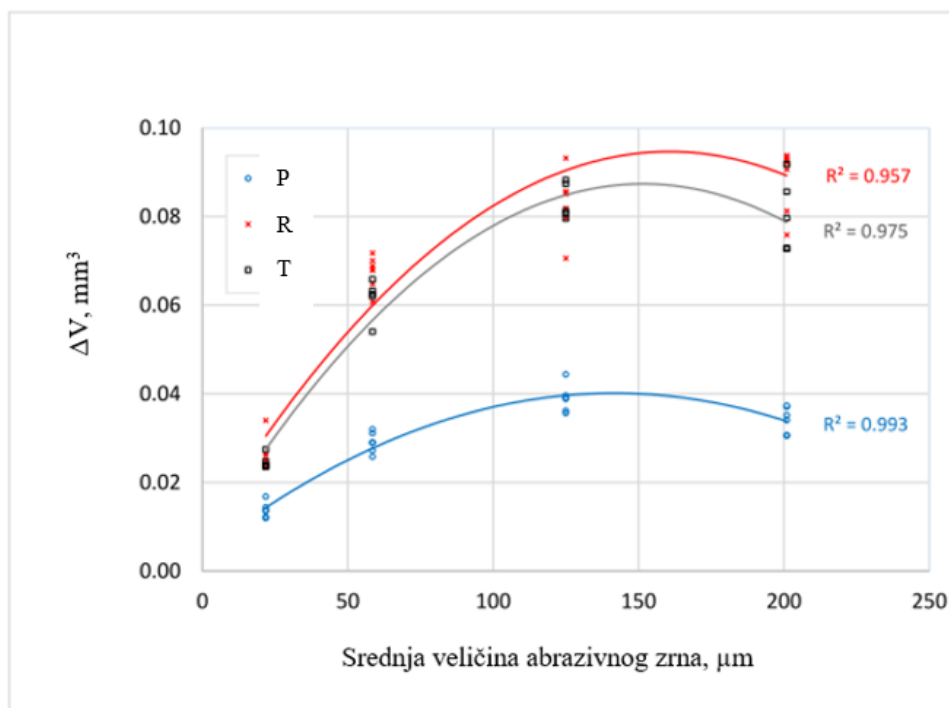


Slika 11. Kritična veličina abrazivnog zrna [19]

Ta veličina u literaturi je poznata kao kritična veličina abrazivnog zrna i označava onu veličinu abrazivnog zrna nakon koje intenzitet trošenja može: nastaviti se povećavati ali manjim intenzitetom, ostati konstantan ili se smanjivati, kao što prikazuju krivulje 1,2 i 3 na slici 11 [19].

U literaturi nije još u potpunosti objašnjeno zbog čega dolazi do ove pojave, i ne postoje univerzalni podaci vrijednosti kritične veličine abrazivnog zrna čak ni unutar iste vrste materijala.

U praksi, na slici 12 može se vidjeti ovisnost gubitka volumena pri abrazivskom trošenju hrasta lužnjaka o veličini abrazivnog zrna. Prilikom trošenja na sva tri karakteristična presjeka može se uočiti lineran rast gubitka volumena ovisno o veličini abrazivnog zrna do određene vrijednosti nakon čega gubitak volumena opada s porastom veličine abrazivnog zrna [15].



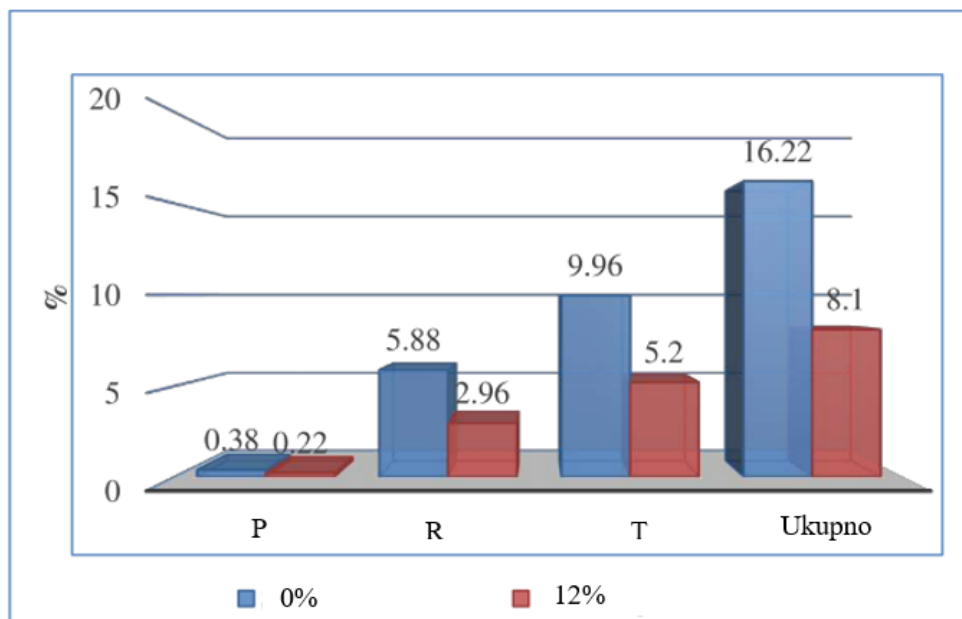
Slika 12. Ovisnost gubitka volumena o srednjoj veličini abrazivnog zrna za drvo hrasta lužnjaka [15]

### 3.6. Anizotropija svojstava drva

Drvo je anizotropan materijal odnosno materijal čija se svojstva razlikuju u različitim usmjerenjima strukture. Anizotropija drva može se odraziti na svojstva higroskopnosti, gustoću, toplinska svojstva, tvrdoću i druga mehanička svojstva te abrazivsku otpornost.

Iz literature je poznato da je volumno bubrenje drva anizotropno; bubrenje drva iznosi oko 10 % u tangencijalnom smjeru, 5 % u radijalnom smjeru i 0,1 % u uzdužnom smjeru. Iz literature je također poznato da je iskazano veće bubrenje kod onih drvnih vrsta koje imaju višu gustoću. Odnosno, promjena volumena (povećanje volumena) uslijed bubrenja u drvu je otprilike proporcionalna s gustoćom drva [9] [11].



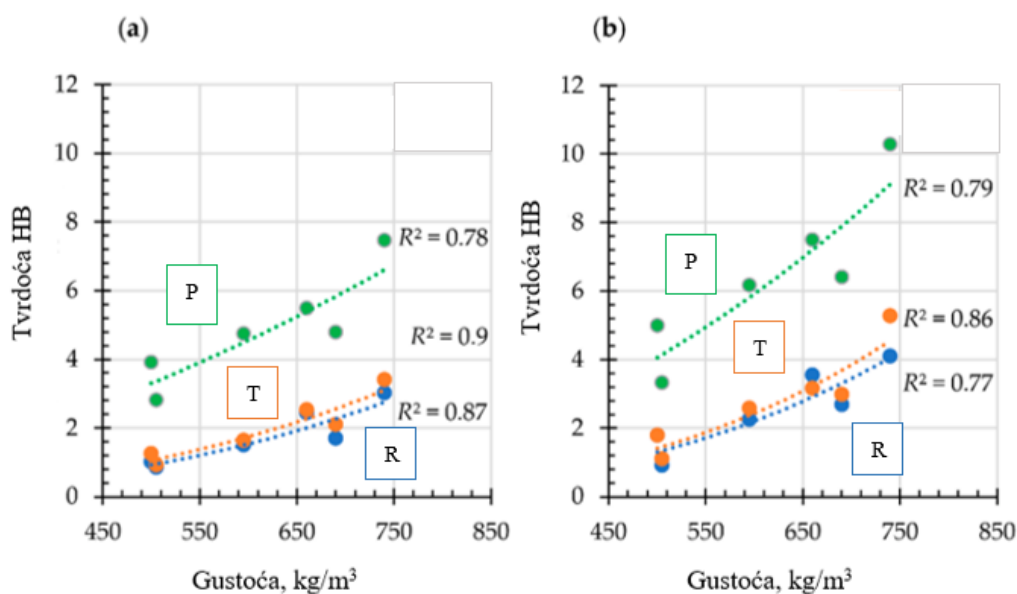


**Slika 13. Volumno utezanje drva hrasta kitnjaka pri 0 % i 12 % vlage na tri karakteristična presjeka [11]**

Slika 13 prikazuje volumno utezanje drva hrasta kitnjaka pri 0 % i pri 12 % vlage na tri karakteristična presjeka. Može se vidjeti da je utezanje izraženije na radijalnom i tangencijalnom presjeku nego na poprečnom presjeku. Također, ukupno volumno utezanje veće je pri udjelu vlage od 0 %.

Iz literature je poznato da je toplinska vodljivost gotovo jednaka u tangencijalnom i radijalnom smjeru, dok je u poprečnom smjeru prosječno 1,8 puta manja nego u uzdužnim smjerovima. Koeficijent toplinskog širenja potpuno suhog drva je neovisan o gustoći i vrsti u poprečnom smjeru, dok je u radijalnom i tangencijalnom smjeru koeficijent toplinskog širenja proporcionalan gustoći. Ujedno, u uzdužnim smjerovima su poznate 5 do 10 puta više vrijednosti koeficijenta toplinskog širenja nego u poprečnom smjeru [10].

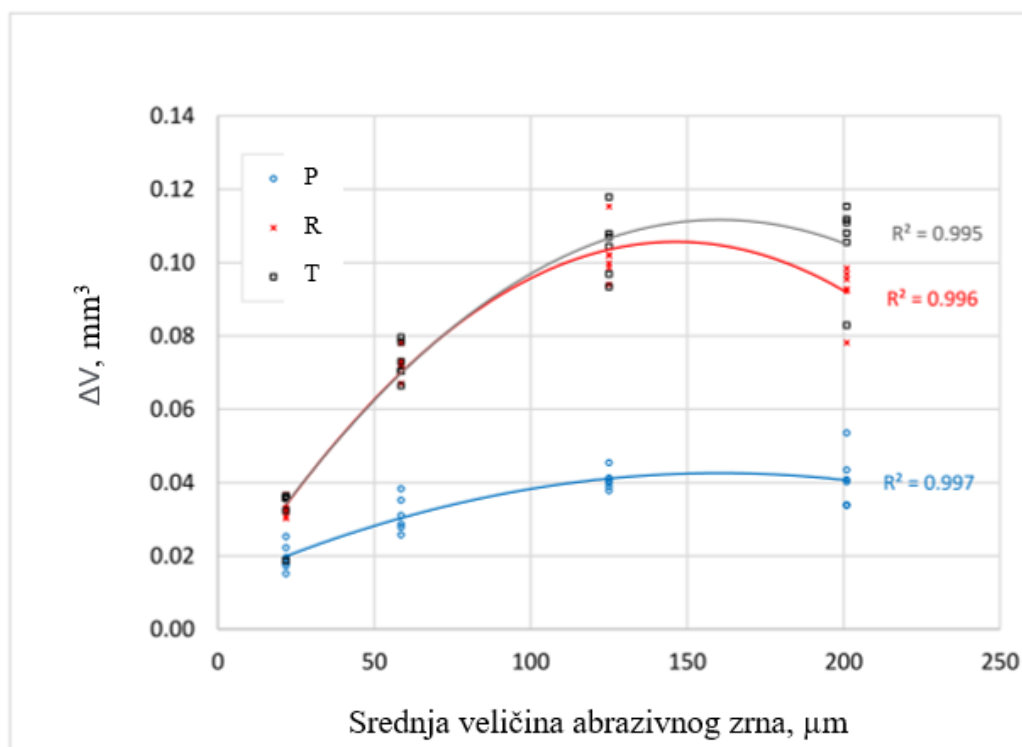
Tvrdoća drva gotovo uvijek se mjeri na sva tri karakteristična presjeka, s obzirom da vrijedi da je tvrdoća i do nekoliko puta veća na poprečnom presjeku nego na tangencijalnom i radijalnom presjeku gdje se uglavnom mjere slične vrijednosti tvrdoće. Odnosno, tvrdoća drva ovisi o usmjerenosti strukture [14].



**Slika 14. Ovisnost Brinellove tvrdoće i gustoće različitih vrsta drva na tri karakteristična presjeka pri opterećenju a) 294,2 N i b) 980,7 N [14]**

Slika 14 prikazuje ovisnost Brinellove tvrdoće i gustoće različitih vrsta drva triju karakterističnih presjeka pri različitim opterećenjima. Na slici se može uočiti da je pri različitim opterećenjima tvrdoća najviša na poprečnom presjeku, dok su vrijednosti tvrdoće na radijalnom i tangencijalnom presjeku podjednake.

Za abrazijsku otpornost drva, kao i za tvrdoću drva, poznata je ovisnost o usmjerenosti strukture. Iz istraživanja abrazijske otpornosti različitih vrsta drva može se očekivati bolja abrazijska otpornost na poprečnom nego na radijalnom i tangencijalnom presjeku. Pri ispitivanju abrazijskog trošenja na radijalnom i tangencijalnom presjeku mjere se slične vrijednosti gubitka volumena dok se znatno niže vrijednosti gubitka volumena mjere na poprečnom presjeku. Ta razlika je veća ili manja ovisno o veličini abrazivnih zrna korištene kvalitete brusnog papira. Slika 15 prikazuje ovisnost gubitka volumena o srednjoj veličini abrazivnog zrna subfosilnog drva hrasta na tri karakteristična presjeka [15].



Slika 15. Ovisnost gubitka volumena o srednjoj veličini abrazivnog zrna subfosilnog drva hrasta na tri karakteristična presjeka [15]

### 3.7. Modifikacija drva u cilju poboljšanja mehaničkih svojstava

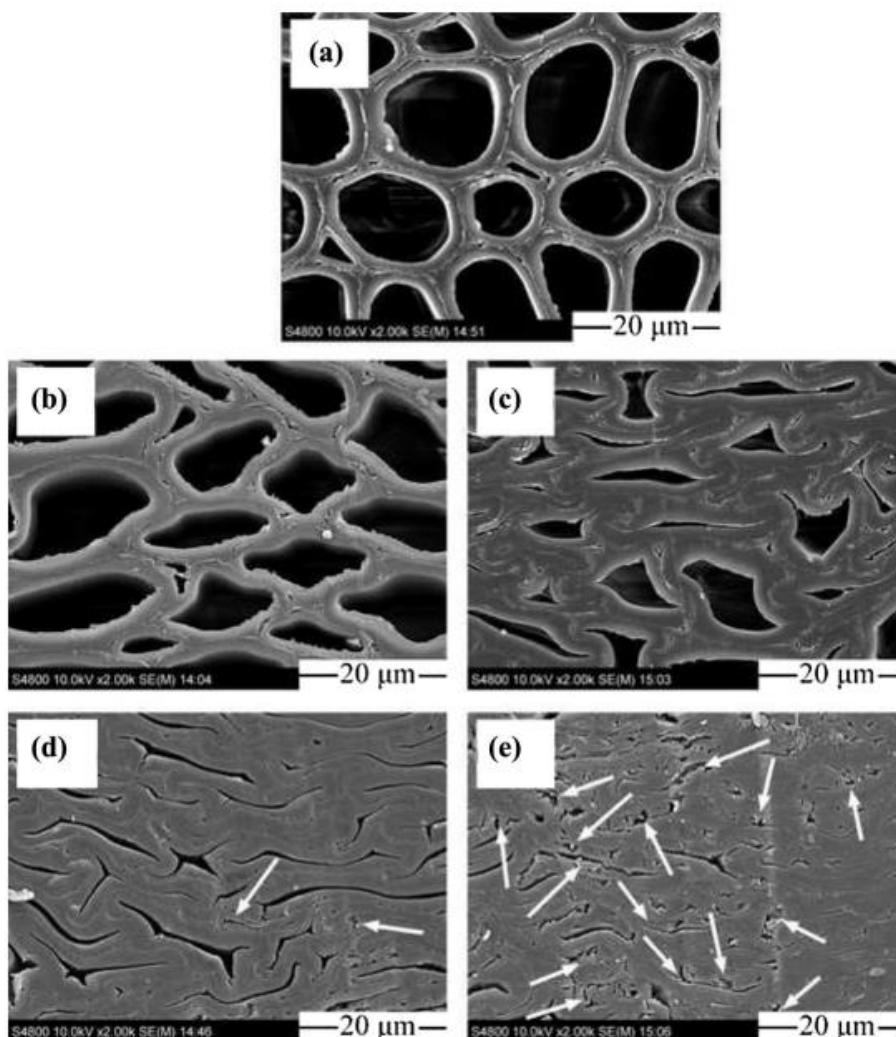
Drvo je tehnički visoko vrijedan prirodni materijal kojeg karakterizira visoka varijabilnost strukture i svojstava te stoga postoje ograničenja u njegovoj upotrebi. Iz tog razloga, nerijetko se provodi modifikacija drvnih materijala kako bi se stekla željena funkcionalnost proizvoda, odnosno kako bi se poboljšala određena svojstva drva. Modifikacija drvne strukture primjenjuje se zbog uklanjanja nedostataka poput niske tvrdoće, niske abrazijske otpornosti, osjetljivosti na vlagu, niske dimenzijske stabilnosti itd. Također, modifikacija drva provodi se kako bi se povećala trajnost drva tj. poboljšala otpornost na degradaciju. Modifikacija drva uključuje primjenu kemijskih, bioloških ili fizičkih agenasa na materijal, a u cilju postizanja boljih svojstava tijekom upotrebe modificiranog drva. Modificirano drvo samo po sebi treba biti netoksično pri uvjetima eksploatacije. Modifikacija drva može biti tzv. aktivna modifikacija, što podrazumijeva promjenu svojstava drva uzrokovanu promjenom kemijskog sastava materijala, ili pasivna modifikacija što podrazumijeva promjenu svojstava drva bez promjene kemijskog sastava materijala [18].

U literaturi je poznata sistematizacija modifikacija drva na toplinske i kemijske postupke. Toplinska modifikacija drva provodi se na temperaturama između 160 °C i 260 °C, na zraku, u vakuumu, pari ili nekim inertnim plinovima. Kada je temperatura između 20 °C i 150 °C, drvo prolazi kroz proces sušenja u kojem se prvo gubi slobodna voda, a na kraju i vezana voda. Kako temperatura dalje raste, drvo prolazi kroz proces toplinske modifikacije i dolazi do promjene fizikalnih i kemijskih svojstava koja ovisi o odabranim parametrima procesa – trajanju i temperaturi. Međutim, toplinska obrada smanjuje mehanička svojstva drva. Gubitak mase i niža gustoća toplinski modificiranog drva uzrokovani su režimom zagrijavanja, vrstom postupka, trajanjem postupka i sadržajem vlage u drvu. Ove nepoželjne promjene mogu ograničiti primjenu toplinski modificiranog drva. Postupci toplinske obrade drva još uvijek se istražuju. Toplinski modificirano drvo pokazuje prednosti u estetskim svojstvima kao što su ujednačena promjena boje od izvorne do tamnosmeđih tonova te nekim tehničkim svojstvima, poput povećane dimenzijske stabilnosti i poboljšane otpornosti na truljenje. Međutim, postoje i nedostaci u smislu smanjenja mehaničkih svojstava, tvrdoće i abrazijske otpornosti. Glede toplinske modifikacije drva, potrebno je istraživati utjecaj toplinske obrade na svaki tip drva pojedinačno, jer se pokazalo da se njihova svojstva mijenjaju na različite načine [20] [21].

Budući da su svojstva drva uglavnom određena sastavom i svojstvima stanične stijenske, cilj kemijske modifikacije je promjena sastava stanične stijenske. U posljednjem desetljeću, glede razvoja postupaka kemijske modifikacije, jedan od vodećih ciljeva je razviti postupke koji su su ekološki prihvatljivi i netoksični. Iz literature je poznato da se kemijskom modifikacijom mogu poboljšati neka mehanička svojstva (primjerice tvrdoća), iako je primarni cilj poboljšanje dimenzijske stabilnosti drva [20] [22].

S obzirom na pozitivnu korelaciju između gustoće i različitih mehaničkih svojstava, drvene vrste s većom gustoćom primjenjuju se na mjestima gdje je važna visoka čvrstoća materijala. Iz tog razloga, razvijen je i proces povećavanja gustoće drva tiješnjenjem, denzifikacija, kako bi bilo moguće povećati gustoću određenih drvnih vrsta odnosno poboljšati njihova mehanička svojstva. Denzifikacija je proces povećanja kvalitete i gustoće drva tiješnjenjem tj. smanjenjem praznina u materijalu različitim tehnikama: kompresijom, toplinom i/ili parom, impregnacijom tvari u lumen ili kombinacijom spomenutog [23].

Na taj način povećava se gustoća drva i posredno poboljšavaju mehanička svojstva drva: modul loma, modul elastičnosti, krutost i tvrdoća. Kod nekih drvnih vrsta u određenim primjenama u kojima su važna površinska svojstva provodi se denzifikacija samo površnog sloja [23].

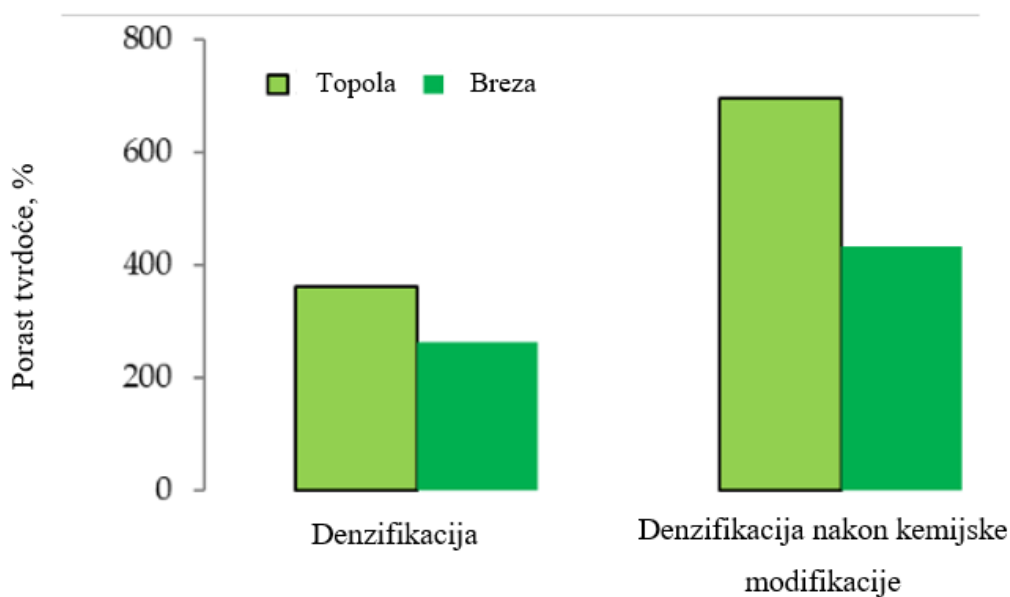


**Slika 16. Fotografije mikrostrukture drva topole prije i nakon denzifikacije pri različitim stupnjevima kompresije a) 0 % b) 50 % c) 60 % d) 70 % e) 75 % [24]**

Slika 16 prikazuje fotografije mikrostrukture drva topole prije i nakon denzifikacije pri različitim stupnjevima kompresije. Stupanj kompresije je omjer dobivenog volumena nakon kompresije i početnog volumena. Može se vidjeti kako se povećanjem stupnja kompresije pri denzifikaciji sve više smanjuje poroznost tj. praznine u drvu i na taj način se povećava gustoća drva.

Denzifikacija drva najčešće se provodi nakon provedene toplinske ili kemijske modifikacije drva, te se na taj način dobiva najbolja kombinacija mehaničkih i ostalih željenih svojstava. Rezultati će ovisiti o odabranim postupcima modifikacije te odabranim parametrima kemijske ili toplinske modifikacije kao i denzifikacije [25].

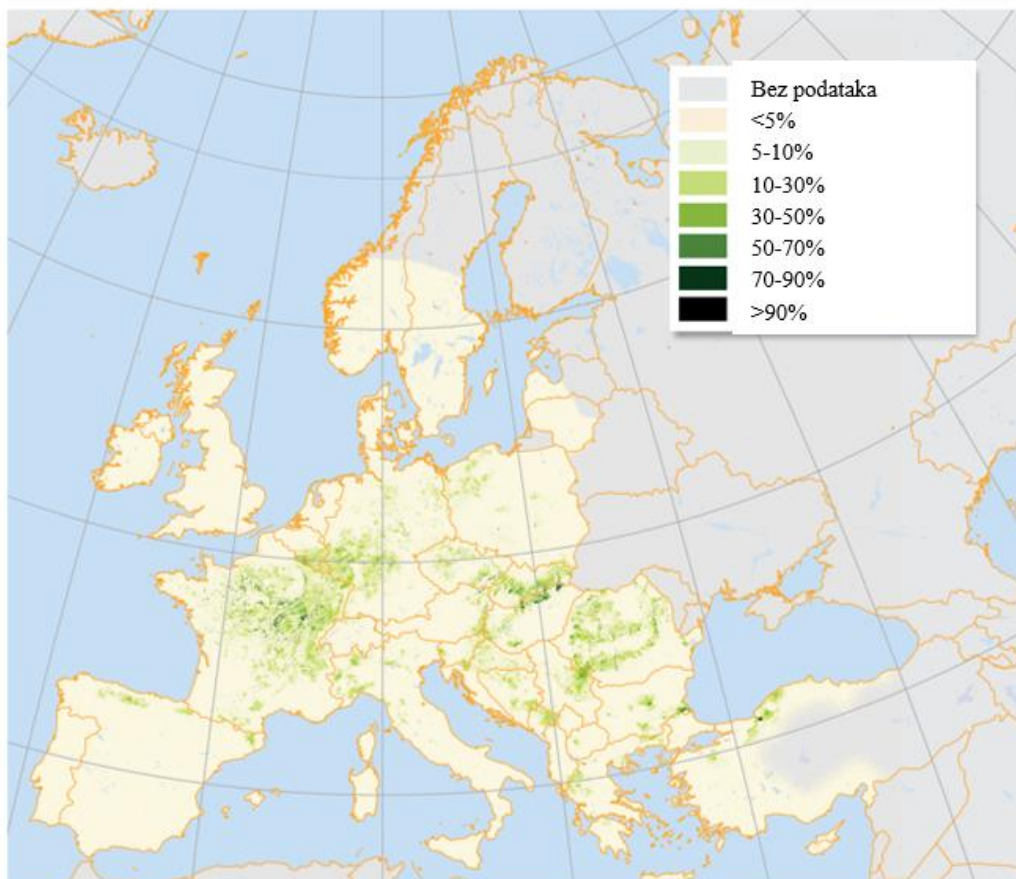
Slika 17 prikazuje porast tvrdoće nakon provedene denzifikacije na dvije različite vrste drva. Provedena je denzifikacija na uzorcima koji nisu prethodno kemijski modificirani i na uzorcima koji su prethodno kemijski modificirani. Namjera ovog istraživanja bila je potvrditi može li proces degradacije pridonijeti (smanjenjem udjela lignina i hemiceluloze) povećanju gustoće i poboljšanju tvrdoće gusto komprimiranog materijala. Kao što se može vidjeti na slici, veći porast u tvrdoći vidljiv je kod obje vrste drva kada je prethodno denzifikaciji provedena i kemijska modifikacija drva [25].



**Slika 17. Porast tvrdoće nakon denzifikacije te nakon denzifikacije i kemijske modifikacije drva topole i breze [25]**

#### 4. PRIMJENA I SVOJSTVA HRASTA KITNJAKA

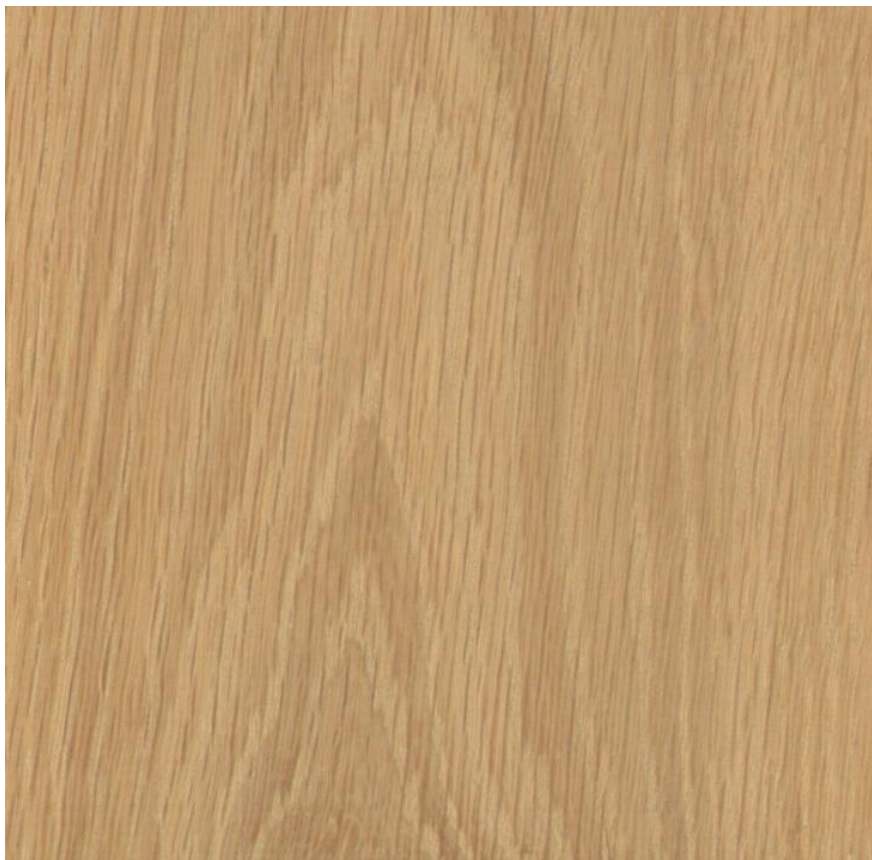
Hrast kitnjak (*Quercus petraea*) je čvrsto listopadno drvo širokih listova koje je autohtono u većem dijelu Europe. Rasprostranjenost hrasta kitnjaka u Europi prikazana je na slici 18.



**Slika 18. Rasprostranjenost hrasta kitnjaka [26]**

Hrast kitnjak je dugovječno drvo, u nekim slučajevima životni vijek ove vrste drva je i preko 1000 godina. Može izrasti do preko 40 metara u visinu i imati promjer do 4 metra. Hrast kitnjak je sporo rastuće stablo. Zbog svojih dobrih karakteristika, dobrih mehaničkih i estetskih svojstava, jako se često koristi u industriji primjerice za izradu vrata, prozora, podova, vinskih bačvi i mnogih drugih proizvoda [11] [26].

Tekstura hrasta kitnjaka u tangencijalnom presjeku prikazana je na slici 19 [27].



**Slika 19. Tekstura hrasta kitnjaka u tangencijalnom presjeku [27]**

Hrast kitnjak suši se vrlo sporo s tendencijom pucanja i stvaranja pukotina, posebno u ranijim fazama sušenja. Obradivost sirovine hrasta kitnjaka može biti bolja ili lošija, ovisno o sadržaju vlage. Što je sadržaj vlage veći, to se očekuje bolja obradivost [11] [26].

Budući da se hrast kitnjak često koristi u izradi podnih konstrukcija, u ovom diplomskom radu cilj je prikazati abrazijska svojstva i tvrdoću hrasta kitnjaka kroz tri karakteristična presjeka.



## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

### 5.1. Cilj rada i provedena ispitivanja

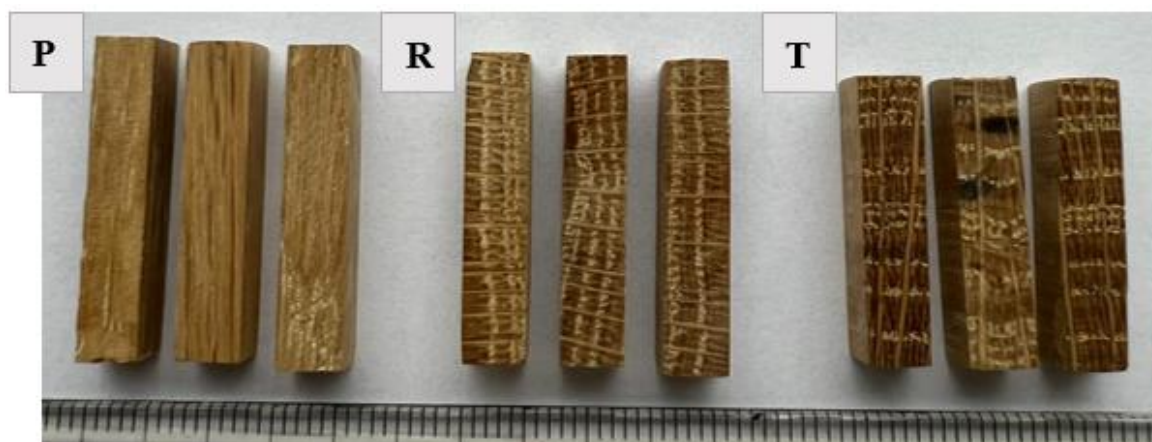
Cilj ovog diplomskog rada je prikazati kako veličina abrazivnog zrna i usmjerenost strukture utječu na abrazijsku otpornost hrasta kitnjaka (*Quercus petraea*). Kako bi se mogli donijeti zaključci o utjecaju veličine abrazivnog zrna i usmjerenosti strukture na abrazijsku otpornost, provedena su sljedeća ispitivanja:

- određivanje gustoće i udjela vlage ispitnih uzoraka
- analiza mikrostrukture u tri karakteristična presjeka: poprečnom, radijalnom i tangencijalnom
- ispitivanje abrazijske otpornosti u poprečnom, radijalnom i tangencijalnom presjeku, na uređaju Taber abrader
- ispitivanje tvrdoće u tri karakteristična presjeka Brinellovom metodom.

#### 5.1.1. Materijal za ispitivanje

Ispitni uzorci izrezani su iz tesane grede hrasta kitnjaka koja je bila jedan od nosača krovne konstrukcije u razdoblju od sedamdesetak godina, u okolici grada Gospića u Republici Hrvatskoj. Starost debla procijenjena je brojanjem godova na više od 50 godina.

Na slici 20 prikazan je dio ispitnih uzoraka za ispitivanje abrazijske otpornosti na Taber abraderu, za svaki od tri karakteristična presjeka.



Slika 20. Uzorci za ispitivanje abrazijske otpornosti tri karakteristična presjeka (P - poprečni, R - radijalni, T - tangencijalni presjek)

Uzorci su izrezani u Laboratoriju za alatne strojeve Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Pripremljeno je po pet uzoraka za ispitivanja abrazijske otpornosti na svakom od tri karakteristična presjeka, ukupno 15 ispitnih uzoraka. Dimenzije uzoraka bile su  $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ . Abradirana je površina  $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ .

Kako bi se pripremila površina ispitnih uzoraka za ispitivanje abrazijske otpornosti, uzorci su prije ispitivanja fino brušeni brusnim papirom P500 i očetkani.

Nakon finog brušenja pomičnim su mjerilom izmjerene točne dimenzije površina koje će se trošiti, kako bi se precizno mogao odrediti intenzitet trošenja na svakom od tri karakteristična presjeka. Potom je izmjerena masa svih uzoraka na analitičkoj vagi Ohaus Analytical Plus koja se može vidjeti na slici 21.



Slika 21. Određivanje mase ispitnih uzoraka na analitičkoj vagi Ohaus Analytical Plus

### 5.1.2. Određivanje gustoće i udjela vlage

Za određivanje gustoće i udjela vlage u uzorcima izrezan je uzorak dimenzija  $30\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ , kako je propisano normom ISO-13061-2. Navedeni uzorak izrezan je na tračnoj pili, u Laboratoriju za alatne strojeve Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Kako propisuje

norma, pripremljeni uzorak sušen je u peći na temperaturi  $103 \pm 2$  °C do apsolutno suhog stanja, odnosno dok nije postignuta razlika mase manja od 0,1% između dva uzastopna vaganja. Prije postavljanja uzorka u sušionik i nakon sušenja do apsolutno suhog stanja, mjeri se masa uzorka. Udio vlage u ispitnom uzorku određuje se iz razlike masa i izražava se u postocima, prema izrazu (1).

U tablici 1 prikazani su rezultati mjerenja udjela vlage ispitnih uzoraka i vrijednost gustoće ispitnih uzoraka pri izmjerenom udjelu vlage.

**Tablica 1. Udio vlage i gustoća ispitnih uzoraka**

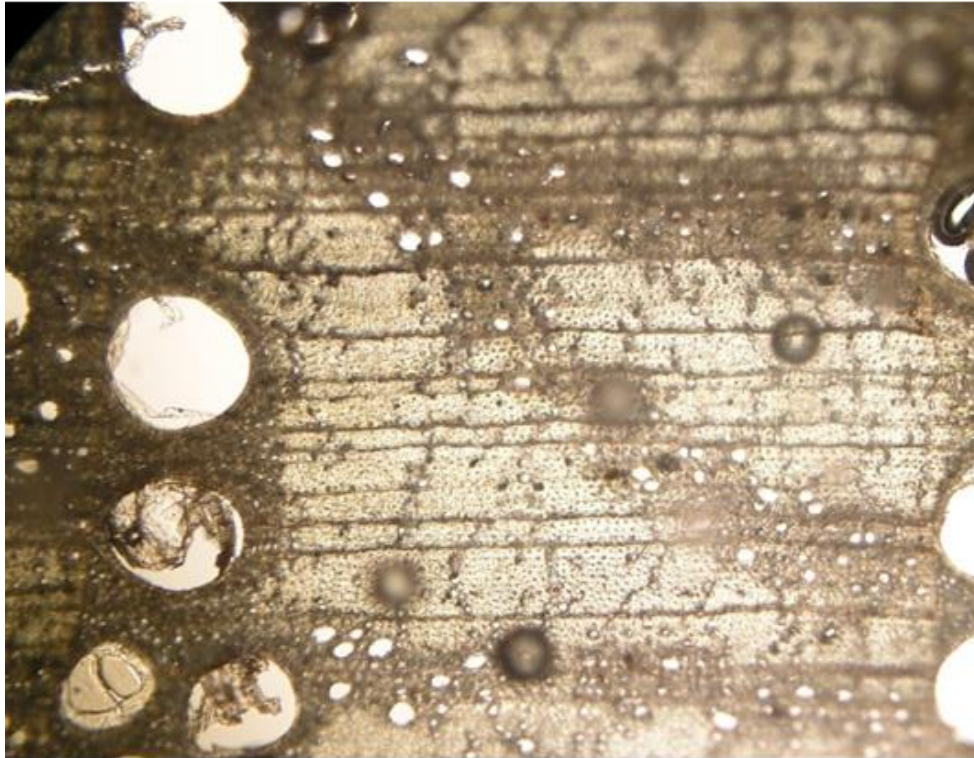
Udio vlage pri ispitivanju, %	7,97
Gustoća pri 7,97 % vlage, g/cm <sup>3</sup>	1,01

### **5.1.3. Analiza mikrostrukture ispitnih uzoraka**

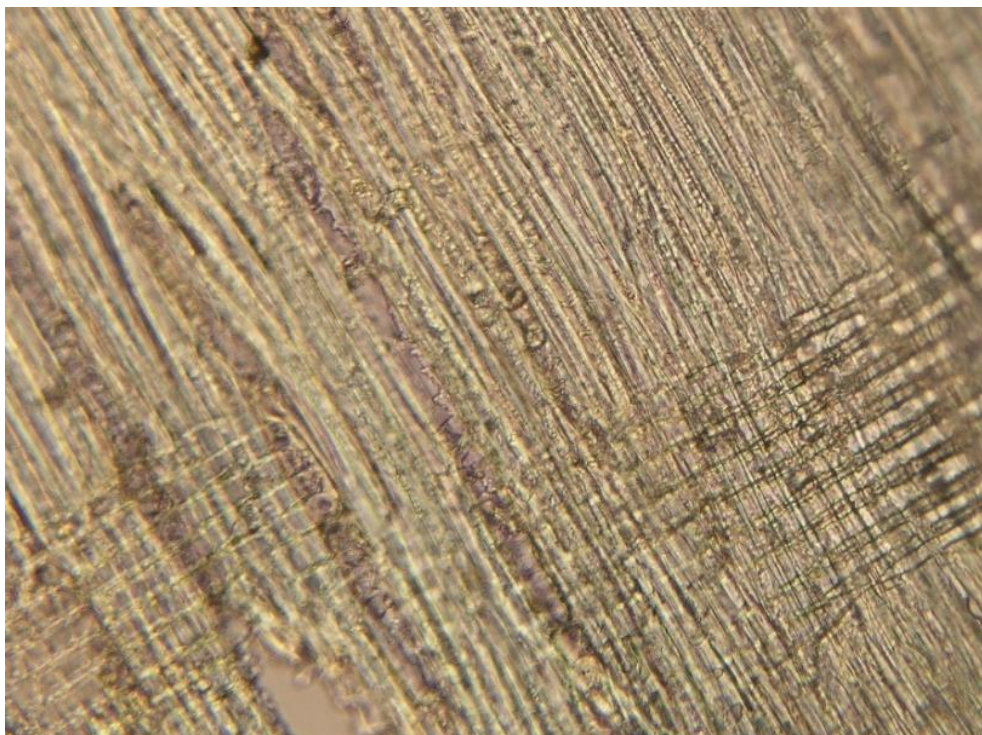
Analiza mikrostrukture provedena je na AXIO optičkom mikroskopu s kamerom TOUPCAM, na Biološkom odsjeku Prirodoslovno matematičkog fakulteta u Zagrebu. Mikrostruktura hrasta kitnjaka analizirana je u tri karakteristična presjeka – poprečnom, tangencijalnom i radijalnom. Fotografije mikrostrukture u sva tri presjeka mogu se vidjeti na slikama 21, 22 i 23.

Na poprečnom presjeku hrasta kitnjaka, slika 21, mogu se uočiti kasni i rani dio goda. Osnovna razlika, kao što je i poznato iz literature, je u vrsti provodnih stanica. Traheje ranog dijela goda karakterizira veći promjer i deblja stanična stijenka u usporedbi s trahejama kasnog dijela goda koje imaju znatno manji promjer. Osim traheja, u kasnom dijelu goda vide se i drvena vlakanca. To su najdulje stanice kod hrasta, s malim lumenom i relativno debelom staničnom stijenkom. Na radijalnom presjeku hrasta kitnjaka, slika 22, vide se uzdužno presječeni drvni traci i uzdužno presječena drvena vlakanca, koja su okomito usmjerena na drvne trake. Na tangencijalnom presjeku hrasta kitnjaka, slika 23, mogu se uočiti drvni traci koji su na ovom presjeku poprečno presječeni te vlakanca koja su i na ovom presjeku presječena uzdužno. Također, na ovom presjeku vidi se i jedan vrlo široki drvni trak koji je karakterističan za strukturu hrasta kitnjaka.

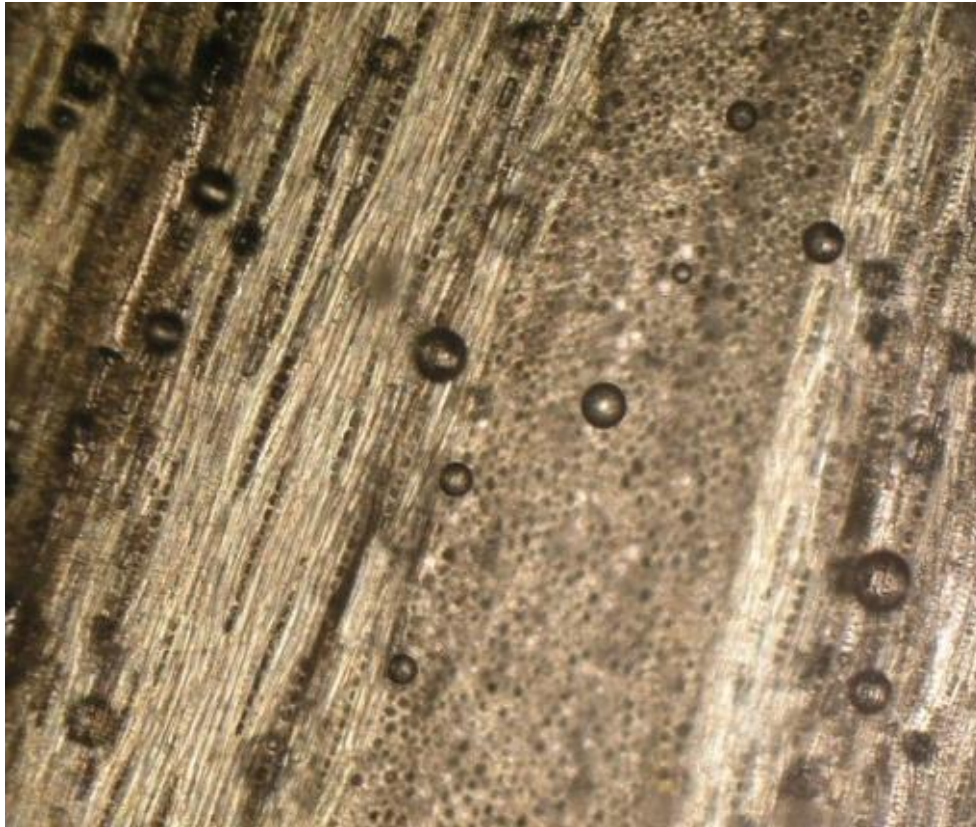




**Slika 22. Mikrostruktura poprečnog presjeka hrasta kitnjaka**



**Slika 23. Mikrostruktura radijalnog presjeka hrasta kitnjaka**



**Slika 24. Mikrostruktura tangencijalnog presjeka hrasta kitnjaka**



#### 5.1.4. Ispitivanje abrazijske otpornosti

Abrazijska otpornost uzoraka hrasta kitnjaka ispitana je u Laboratoriju za tribologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu na uređaju Taber abrader koji se može vidjeti na slici 25.



Slika 25. Ispitivanje abrazijske otpornosti na uređaju Taber abrader

Svaki od 15 ispitnih uzoraka abradiran je na četiri različite kvalitete brusnog papira u ciklusima od po 60 okretaja. Brusni papir postavljen je na rotacijskom disku uređaja, promjera 125 mm. Uređaj rotira brzinom od 1 okr/s, a sila pritiska uzoraka na brusni papir iznosi 4,91 N.

Prije ispitivanja abrazijske otpornosti izmjerena je masa svih ispitnih uzoraka. Nakon svakog ciklusa trošenja na brusnim papirima različitih kvaliteta, mjerena je masa ispitnih uzoraka kako bi se odredio gubitak mase. Taj gubitak mase je potom predočen kao gubitak volumena kako bi se mogao odrediti intenzitet abrazijskog trošenja tj. gubitak volumena sveden na abradiranu površinu. Na taj način, moguće je uspoređivati gubitak volumena i intenzitet trošenja na različitim karakterističnim presjecima, ali i za različite kvalitete brusnih papira. Masa svih uzoraka prije i nakon svakog ciklusa abradiranja, mjerena je na analitičkoj vagi Ohaus Analytical Plus u Laboratoriju za analizu metala Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Provedeno je ispitivanje abrazijskog trošenja na četiri različite kvalitete brusnog papira kako bi se utvrdio utjecaj veličine abrazivnog zrna na intenzitet abrazijskog trošenja.

Korištene kvalitete brusnih papira s pripadajućom srednjom veličinom abrazivnog zrna prikazane su u tablici 2.

**Tablica 2. Korištene kvalitete brusnih papira**

Kvaliteta brusnog papira	Srednja veličina abrazivnog zrna, $\mu\text{m}$
P800	21,8
P220	68,0
P120	125,0
P80	201,0

Različite kvalitete brusnih papira odabrane su kako bi se eventualno uočio efekt kritične veličine abrazivnog zrna, koji je poznat iz literature.

#### **5.1.5. Ispitivanje tvrdoće**

Tvrdoća ispitnih uzoraka hrasta kitnjaka ispitana je Brinellovom metodom, u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Ispitivanje je provedeno pomoću tvrdomjera HP250 proizvođača VEB WPM koji je prikazan na slici 26. Provedeno je po 16 mjerenja tvrdoće na svakom od tri karakteristična presjeka i izračunate su srednje vrijednosti tvrdoće.

Ispitivanje tvrdoće Brinellovom metodom provedeno je sukladno normi HRN EN 1534:2010. Pri ispitivanju je kuglica od kaljenog čelika promjera 2,5 mm utiskivana u površinu ispitnog uzorka. Maksimalno opterećenje, koje se postupno postiže nakon  $15 \pm 3$  sekunde, iznosilo je 490,5 N i zadržano je 30 sekundi. Nakon što se pojedini ispitni uzorak uklonio s tvrdomjera, uređajem za precizno mjerenje izmjeren je promjer kalote koja je ostala nakon utiskivanja kuglice. Prema izrazu (5) izračunata je tvrdoća HB.



**Slika 26. Uredaj za ispitivanje tvrdoće uzoraka Brinellovom metodom**



## 5.2. Rezultati provedenih ispitivanja

### 5.2.1. Rezultati ispitivanja abrazijske otpornosti

Tablica 3 prikazuje rezultate gubitka mase na tri karakteristična presjeka pri ispitivanju abrazijske otpornosti uzoraka hrasta kitnjaka pri udjelu vlage 7,97 %.

**Tablica 3. Gubitak mase pri abrazijskom trošenju pri udjelu vlage 7,97 %**

Presjek	Uzorak	Gubitak mase, g			
		P800	P220	P120	P80
		21,8 $\mu\text{m}$	68 $\mu\text{m}$	125 $\mu\text{m}$	201 $\mu\text{m}$
poprečni	1	0,0066	0,0154	0,0289	0,0247
	2	0,0067	0,0180	0,0315	0,0308
	3	0,0061	0,0154	0,0316	0,0259
	4	0,0058	0,0182	0,0262	0,0259
	5	0,0061	0,0208	0,0329	0,0311
	$\bar{x}$	0,0063	0,0176	0,0302	0,0277
radijalni	1	0,0094	0,0257	0,0471	0,0737
	2	0,0099	0,0284	0,0511	0,0624
	3	0,0086	0,0320	0,0530	0,0584
	4	0,0108	0,0245	0,0474	0,0522
	5	0,0107	0,0295	0,0534	0,0620
	$\bar{x}$	0,0099	0,0280	0,0504	0,0617
tangencijalni	1	0,0083	0,0261	0,0483	0,0623
	2	0,0069	0,0268	0,0536	0,0648
	3	0,0082	0,0220	0,0527	0,0637
	4	0,0088	0,0257	0,0479	0,0422
	5	0,0074	0,0297	0,0463	0,0565
	$\bar{x}$	0,0079	0,0260	0,0498	0,0579

Tablica 4 prikazuje rezultate gubitka volumena na tri karakteristična presjeka pri ispitivanju abrazijske otpornosti uzoraka hrasta kitnjaka pri udjelu vlage 7,97 %, a tablica 5 prikazuje intenzitete abrazijskog trošenja tj. gubitak volumena po površini na tri karakteristična presjeka pri udjelu vlage 7,97 %.

**Tablica 4. Gubitak volumena pri abrazijskom trošenju pri udjelu vlage 7,97 %**

Presjek	Uzorak	Gubitak volumena, mm <sup>3</sup>			
		P800	P220	P120	P80
		21,8 μm	68 μm	125 μm	201 μm
poprečni	1	6,50	15,30	28,67	24,54
	2	6,67	17,86	31,23	30,60
	3	6,07	15,31	31,35	25,72
	4	5,77	18,09	26,01	25,68
	5	6,01	20,60	32,59	30,82
	$\bar{x}$	6,20	17,43	29,97	27,47
radijalni	1	9,35	25,54	46,73	73,11
	2	9,83	28,13	50,68	61,93
	3	8,58	31,76	52,56	57,95
	4	10,75	24,31	46,98	51,77
	5	10,66	29,25	52,98	61,53
	$\bar{x}$	9,84	27,79	49,99	61,26
tangencijalni	1	8,24	25,92	47,92	61,77
	2	6,87	26,58	53,14	64,24
	3	8,18	21,79	52,31	63,19
	4	8,72	25,45	47,50	41,89
	5	7,34	29,42	45,95	56,04
	$\bar{x}$	7,87	25,83	49,37	57,43

Tablica 5. Intenzitet abrazijskog trošenja pri udjelu vlage 7,97 %

Presjek	Uzorak	Intenzitet trošenja $\Delta V/A$ , mm <sup>3</sup> /mm <sup>2</sup>			
		P800	P220	P120	P80
		21,8 $\mu\text{m}$	68 $\mu\text{m}$	125 $\mu\text{m}$	201 $\mu\text{m}$
poprečni	1	0,2584	0,6083	1,1400	0,9759
	2	0,2678	0,7172	1,2543	1,2288
	3	0,2343	0,5908	1,2100	0,9929
	4	0,2269	0,7106	1,0220	1,0091
	5	0,2610	0,8940	1,4147	1,3380
	$\bar{x}$	0,2497	0,7042	1,2082	1,1090
radijalni	1	0,3885	1,0616	1,9425	3,0391
	2	0,3825	1,0943	1,9721	2,4098
	3	0,3799	1,4060	2,3271	2,5656
	4	0,4217	0,9532	1,8425	2,0300
	5	0,4151	1,1383	2,0619	2,3947
	$\bar{x}$	0,3976	1,1307	2,0292	2,4879
tangencijalni	1	0,3220	1,0126	1,8717	2,4126
	2	0,2680	1,0361	2,0717	2,5041
	3	0,3287	0,8749	2,1009	2,5380
	4	0,3440	1,0039	1,8740	1,6529
	5	0,2706	1,0845	1,6937	2,0655
	$\bar{x}$	0,3067	1,0024	1,9224	2,2346

### 5.2.2. Rezultati ispitivanja tvrdoće

U tablici 7 prikazani su rezultati ispitivanja tvrdoće na tri karakteristična presjeka. Prema srednjim vrijednostima može se vidjeti da je najveća tvrdoća izmjerena na poprečnom presjeku (16,19 HB), a niža tvrdoća izmjerena je na radijalnom (14,51 HB) i tangencijalnom presjeku (15,14 HB).

**Tablica 6. Rezultati ispitivanja tvrdoće**

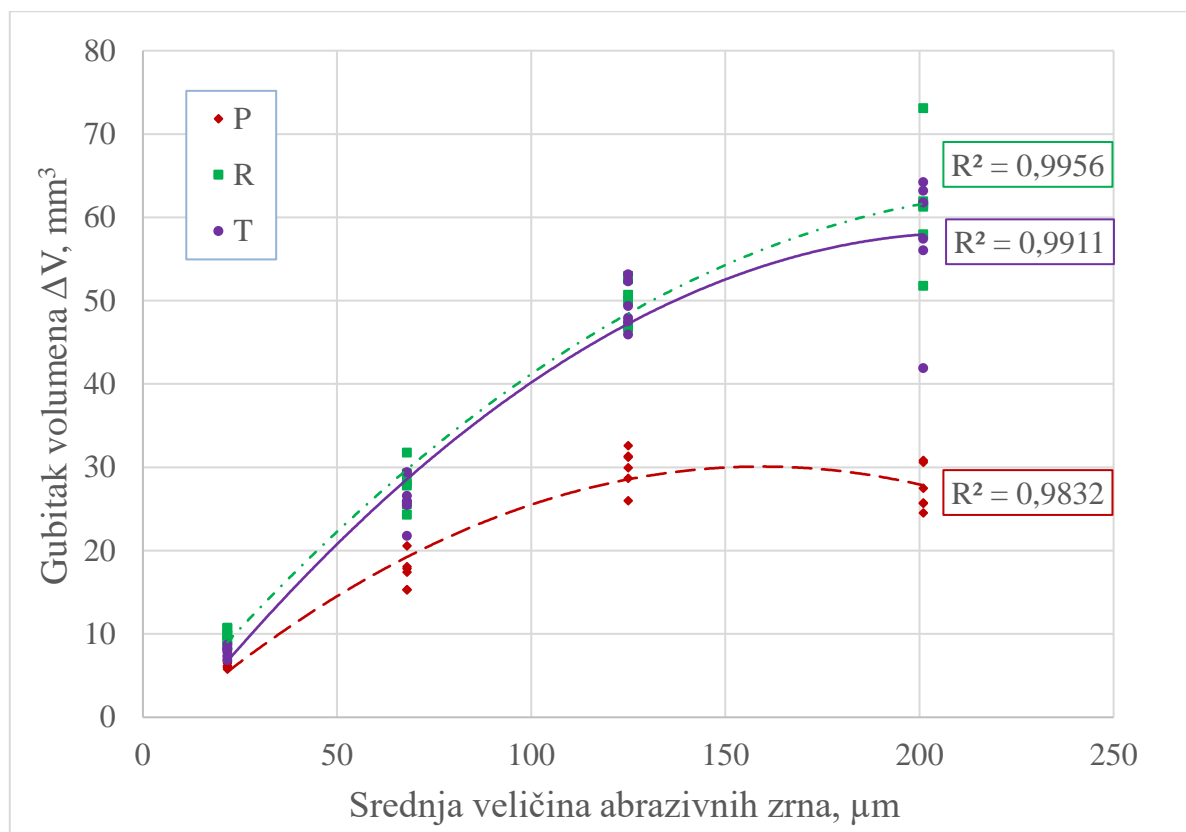
Mjerenje	Tvrdoća HB		
	Presjeci		
	poprečni	radijalni	tangencijalni
1	14,56	14,56	14,56
2	16,65	12,74	14,56
3	16,65	14,56	14,56
4	16,65	12,74	14,56
5	14,56	14,56	12,74
6	16,65	16,65	12,74
7	19,10	14,56	14,56
8	16,65	12,74	14,56
9	19,10	14,56	14,56
10	16,65	16,65	16,65
11	16,65	14,56	14,56
12	16,65	16,65	19,10
13	14,56	12,74	16,65
14	14,56	16,65	14,56
15	16,65	12,74	16,65
16	12,74	14,56	16,65
$\bar{x}$	16,19	14,51	15,14
Standardna devijacija	1,66	1,51	1,62
Koeficijent varijacije, %	10,27	10,38	10,71

### 5.3. Analiza rezultata provedenih ispitivanja

#### 5.3.1. Utjecaj veličine abrazivnog zrna na abrazijsku otpornost hrasta kitnjaka

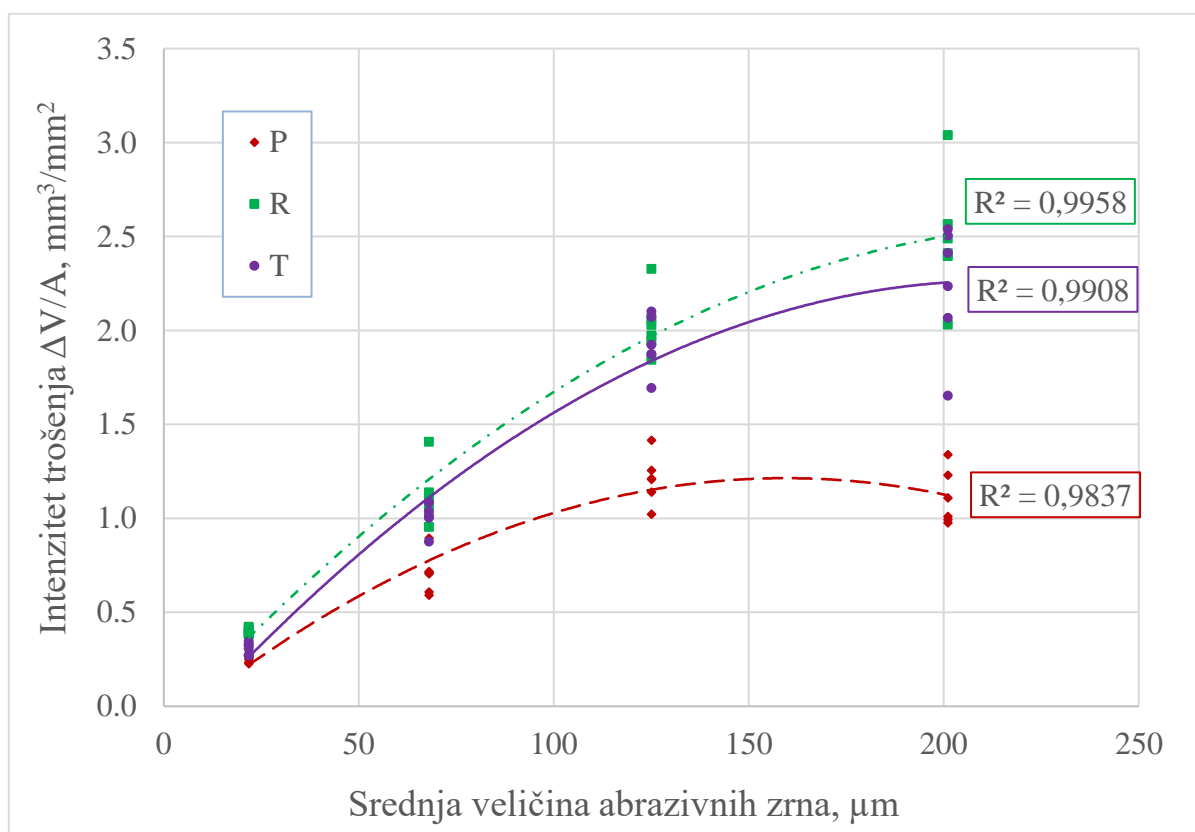
Na slici 27 grafički je prikazana ovisnost gubitka volumena pri abraziji o srednjoj veličini abrazivnog zrna za sva tri karakteristična presjeka. Može se primijetiti da se s porastom abrazivnog zrna povećava gubitak volumena pri abraziji na radijalnom i tangencijalnom presjeku. Prirast gubitka volumena veći je za manje vrijednosti abrazivnog zrna, a kad veličina abrazivnog zrna dosegne vrijednost od oko 125  $\mu\text{m}$  prirast gubitka volumena se smanjuje. Na poprečnom presjeku gubitak volumena povećava se s povećanjem abrazivnog zrna do vrijednosti od 125  $\mu\text{m}$ . Nakon toga se gubitak volumena smanjuje iako raste srednji promjer abrazivnog zrna. Opisana pojava poznata je iz literature kao efekt kritične veličine abrazivnog zrna.

Ovisnost gubitka volumena pri abraziji triju karakterističnih presjeka o veličini abrazivnih čestica može se aproksimirati polinomima drugog stupnja uz vrlo visoki koeficijent korelacije (0,99).



Slika 27. Ovisnost gubitka volumena o srednjoj veličini abrazivnog zrna

Kritična veličina abrazivnog zrna pri ispitivanju hrasta kitnjaka podudara se s vrijednostima kritične veličine abrazivnog zrna dobivenim pri ispitivanju hrasta lušnjaka [15] i bagrema [28]. Na slici 28 prikazana je ovisnost intenziteta trošenja o srednjoj veličini abrazivnih zrna. Ako se promatraju grafički prikazi na slici 27 i 28, može se uočiti vrlo velika sličnost u izgledu krivulja za tri karakteristična presjeka. Razlog tome su vrlo ujednačene veličine abradiranih površina što je posljedica preciznog rezanja ispitnih uzoraka i minimalne razlike u dimenzijama ispitnih uzoraka.



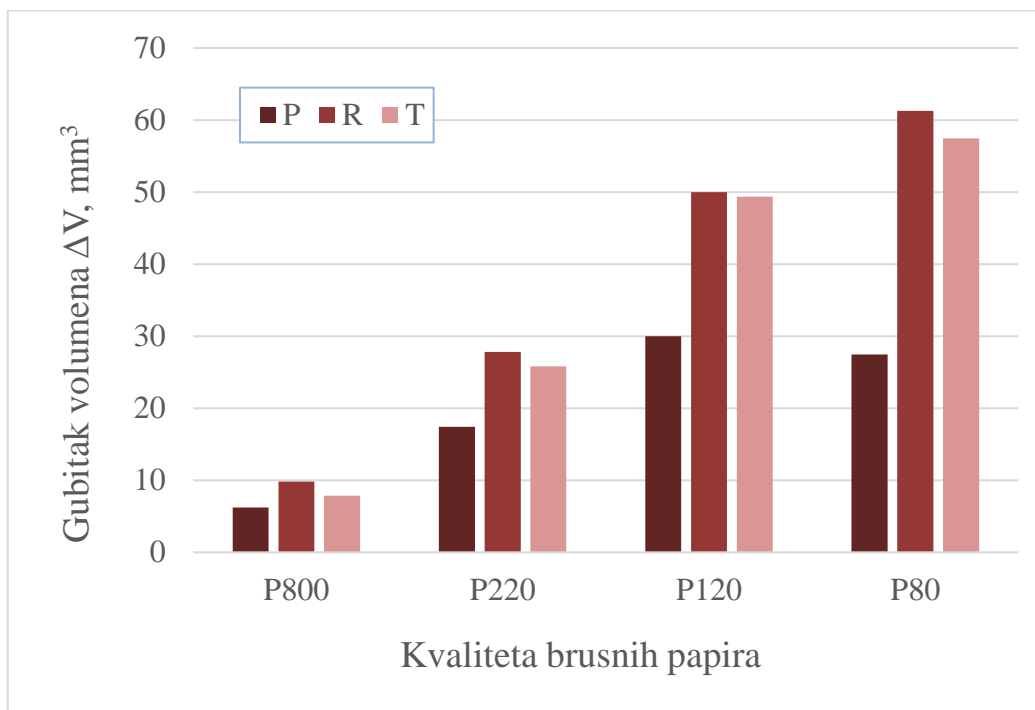
Slika 28. Ovisnost intenziteta trošenja o srednjoj veličini abrazivnog zrna

### 5.3.2. Utjecaj usmjerenosti strukture na abrazijsku otpornost hrasta kitnjaka

U dijagramu na slici 29 prikazane su vrijednosti gubitka volumena pri abraziji na tri karakteristična presjeka za sve četiri korištene kvalitete brusnih papira.

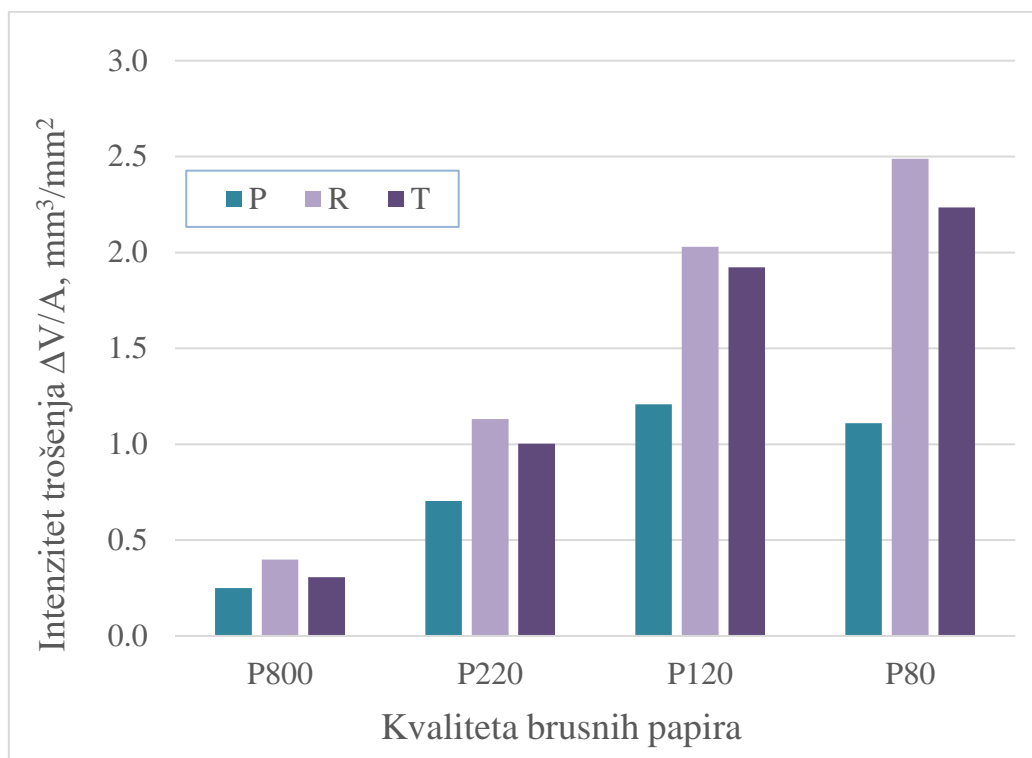
Promatranjem rezultata, može se zaključiti da poprečni presjek hrasta kitnjaka iskazuje bolju abrazijsku otpornost nego radijalni i tangencijalni presjek. Odnosno, najmanji gubitak volumena izmjeren je na poprečnom presjeku za sve četiri kvalitete brusnih papira. Abrazijska otpornost na radijalnom presjeku je neznatno manja od abrazijske otpornosti tangencijalnog

presjeka. Apsolutne razlike između poprečnog, radijalnog i tangencijalnog presjeka povećavaju se s povećanjem abrazivnog zrna.



**Slika 29. Gubitak volumena pri abrazijskoj na tri karakteristična presjeka za različite kvalitete brusnih papira**

Na slici 30 prikazane su vrijednosti intenziteta abrazijskog trošenja na tri karakteristična presjeka za sve četiri korištene kvalitete brusnih papira. I ovdje se vidi da je intenzitet abrazijskog trošenja najveći na radijalnom presjeku, nešto niži je na tangencijalnom presjeku, a najniži intenzitet abrazijskog trošenja izmjeren je na poprečnom presjeku.



**Slika 30. Intenzitet abrazijskog trošenja za različite kvalitete brusnih papira**

Tablica 7 prikazuje omjere srednjeg gubitka volumena pri ispitivanju abrazijskog trošenja hrasta kitnjaka između vrijednosti na pojedinačnim presjecima za različite kvalitete brusnih papira, odnosno različite srednje veličine abrazivnog zrna. Može se primijetiti da je R/T omjer blizu 1 za sve kvalitete brusnih papira, za razliku od P/R i P/T omjera koji su otprilike podjednaki za prve tri kvalitete brusnih papira.

**Tablica 7. Omjeri srednjeg gubitka volumena na karakterističnim presjecima**

Omjeri presjeka	Srednja veličina abrazivnog zrna, $\mu\text{m}$			
	21,8 $\mu\text{m}$	68 $\mu\text{m}$	125 $\mu\text{m}$	201 $\mu\text{m}$
P/R	0,63	0,63	0,60	0,45
P/T	0,79	0,67	0,61	0,48
R/T	1,25	1,08	1,01	1,07

Ako se dobiveni rezultati pri ispitivanju abrazijske otpornosti hrasta kitnjaka usporede sa sličnim ispitivanjima na drugim vrstama drva vide se slični trendovi. Kod hrasta lužnjaka [15]



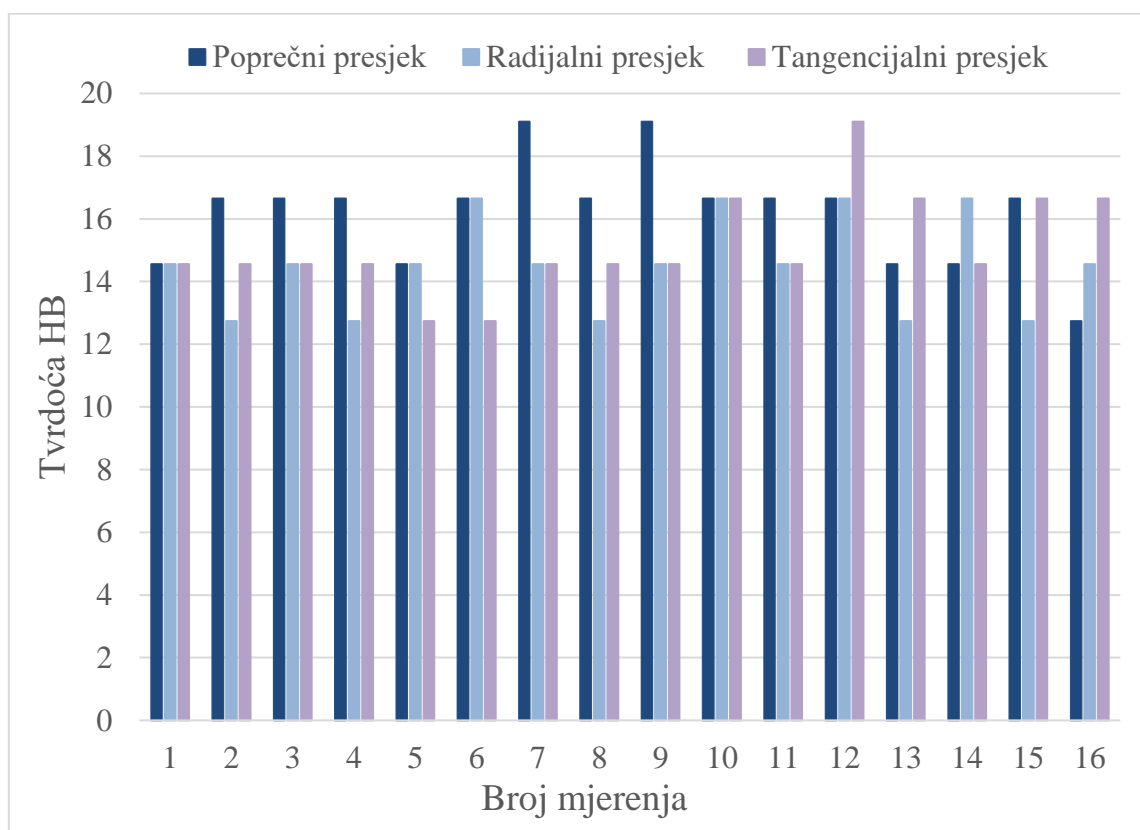
i kod bagrema [28] abrazijsko trošenje na poprečnom presjeku je niže nego na druga dva presjeka, a radijalni i tangencijalni presjek pokazuju vrlo sličnu abrazijsku otpornost.

### 5.3.3. Utjecaj usmjerenosti strukture na tvrdoću hrasta kitnjaka

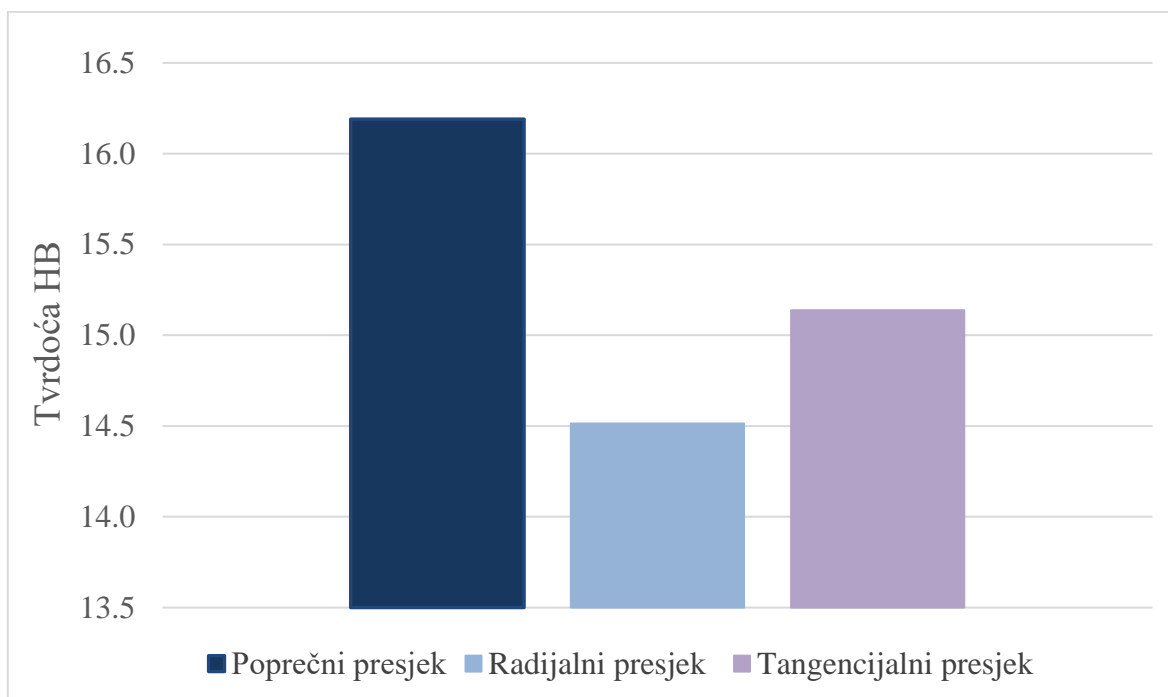
Dobivene vrijednosti tvrdoće HB na sva tri karakteristična presjeka grafički su prikazane na slici 31. Rasipanja su prisutna na svim presjecima. Na poprečnom presjeku izmjerene su tvrdoće u rasponu od 12,74 do 19,10 HB. Na radijalnom presjeku raspon izmjerenih tvrdoća je između 12,74 i 16,65 HB, a na tangencijalnom presjeku između 12,74 i 19,10 HB.

Koeficijent varijacije je na sva tri presjeka manji od 17 % što je unutar granica koje su propisane normom ISO 13061. Koeficijent varijacije najniži je na poprečnom presjeku.

Najviša prosječna tvrdoća izmjerena je na poprečnom presjeku i iznosi 16,19 HB. Najnižu vrijednost srednje tvrdoće od 14,51 HB ima radijalni presjek, a srednja vrijednost tvrdoće u tangencijalnom presjeku iznosi 15,14 HB u tangencijalnom presjeku. Na slici 32 prikazane su srednje vrijednosti tvrdoća na poprečnom, radijalnom i tangencijalnom presjeku.



Slika 31. Izmjerene vrijednosti tvrdoće na tri karakteristična presjeka



**Slika 32. Prosječne vrijednosti tvrdće na tri karakteristična presjeka**

---

## 6. ZAKLJUČAK

Nakon provedenih ispitivanja i analize dobivenih rezultata mogu se donijeti temeljni zaključci ovog diplomskog rada:

- Usmjerenost strukture i veličina abrazivnog zrna imaju značajan utjecaj na abrazijsku otpornost hrasta kitnjaka.
- Najviša abrazijska otpornost izmjerena je na poprečnom presjeku hrasta kitnjaka s obzirom da su na tom presjeku izmjerene najmanje vrijednosti gubitka volumena i intenziteta trošenja. Abrazijska otpornost radijalnog i tangencijalnog presjeka je vrlo slična.
- Porastom srednje veličine abrazivnog zrna povećavao se i intenzitet abrazijskog trošenja na svim presjecima, sve do dostizanja kritične veličine abrazivnog zrna koja je iznosila oko 125  $\mu\text{m}$ . Daljnjim porastom abrazivnog zrna na poprečnom presjeku smanjuje se gubitak volumena, a na radijalnom i tangencijalnom presjeku gubitak volumena i dalje raste, ali se smanjuje njegov prirast.
- Najviša prosječna tvrdoća izmjerena je na poprečnom presjeku i iznosila je 16,19 HB. Najnižu vrijednost prosječne tvrdoće od 14,15 HB imao je radijalni presjek, a na tangencijalnom presjeku srednja vrijednost tvrdoće iznosila je 15,14 HB.

---

**LITERATURA**

- [1] Golovin YI, Gusev AA, Golovin DY, Matveev SM, Vasyukova IA. Multiscale Mechanical Performance of Wood: From Nano- to Macro-Scale across Structure Hierarchy and Size Effects. *Nanomaterials*. 2022;12(7):1139. <https://doi.org/10.3390/nano12071139>
- [2] Sandberg D, Kutnar A, Mantanis G. Wood modification technologies - A review. *IForest*. 2017;10(6):895–908. doi: 10.3832/ifer2380-010
- [3] Wiedenhoef A. Structure and Function of Wood. Iz: *Wood handbook: Wood as an engineering material*. WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory; 2021., str. 3-2 – 3-17.
- [4] González OM, Velín A, García A, Arroyo CR, Barrigas HL, Vizquete K, Debut A. Representative Hardwood and Softwood Green Tissue-Microstructure Transitions per Age Group and Their Inherent Relationships with Physical–Mechanical Properties and Potential Applications. *Forests*. 2020; 11(5):569. <https://doi.org/10.3390/f11050569>
- [5] Chen C, Kuang Y, Zhu S et al. Structure–property–function relationships of natural and engineered wood. *Nat Rev Mater*. 2020;5(9):642–66. <https://doi.org/10.1038/s41578-020-0195-z>
- [6] Geus A, Silva S, Gontijo A, Silva F, Batista M, Souza J. An analysis of timber sections and deep learning for wood species classification. *Multimed Tools Appl*. 2020; 79(45-46): 34513–34529. doi: 10.1007/s11042-020-09212-x
- [7] Naji HR, Sahri MH, Nobuchi T, Bakar ES. The effect of growth rate on wood density and anatomical characteristics of Rubberwood ( *Hevea brasiliensis* Muell . Arg .) in two different clonal trails. 2011;1(2):71–80.
- [8] Ajuziogu GC, Onyeke CC, Ojua EO, Amujiri AN, Ibeawuchi CC. Effect of growth ring width and fiber dimensions on the compressive strength of some members of the moraceae family. *Wood and Fiber Science*. 2019; 51(4): 1-8. doi: 10.22382/wfs-2019-039
- [9] Arzola-Villegas X, Lakes R, Plaza NZ, Jakes JE. Wood moisture-induced swelling at the cellular scale-Ab intra. *Forests*. 2019; 10(11): 996. doi: 10.3390/f10110996
- [10] Wiedenhoef A. Moisture Relations and Physical Properties of Wood. Iz: *Wood handbook: Wood as an engineering material*. WI: U.S. Department of Agriculture, Forest

- Service, Forest Products Laboratory; 2021., str. 4-1 – 4-22.
- [11] Sejdiu R, Hoxha F, Jashari B, Idrizi L. Physical properties of sessile oak ( *quercus petraea* l) used by the wood industry in Kosovo. *Technium: Romanian Journal of Applied Sciences and Technology*. 2020;2(7): 278–85.
- [12] Sydor M, Pinkowski G, Jasińska A. The Brinell method for determining hardness of wood flooring materials. *Forests*. 2020;11(8):878. doi: 10.3390/f11080878
- [13] Vörös, Németh R. The history of wood hardness tests. 6th International Conference on Environment and Renewable Energy, IOP Conf Ser Earth Environ Sci. 2020;505(1). doi: 10.1088/1755-1315/505/1/012020
- [14] Sydor M, Pinkowski G, Kučerka M, Kminiak R, Antov P, Rogoziński T. Indentation Hardness and Elastic Recovery of Some Hardwood Species. *Appl Sci*. 2022;12(10):5049. doi: 10.3390/app12105049
- [15] Essert S, Rede V, Barišić J. Effect of Abrasive Grain Size on the Abrasion Volume Loss of Subfossil and Recent Oak Wood in Three Characteristic Sections. *Materials (Basel)*. 2023;16(1):1–9. doi: 10.3390/ma16010432
- [16] Sci W, Faculty T. Abrasive wear properties of compressed sugi wood. 2002;48(6):473–8.
- [17] Rede V, Essert S, Kocijan M, Dubravac T. Influence of Ageing on Abrasion Volume Loss, Density, and Structural Components of Subfossil Oak. *Appl Sci*. 2022;12(4):1814. doi: 10.3390/app12041814
- [18] Brožek M. Abrasive wear resistance of selected woods. *Res Agric Eng*. 2017;63(2):91–7. doi: 10.17221/74/2015-RAE
- [19] Rabinowicz E, Mutis A. Effect of abrasive particle size on wear. *Wear*. 1965;8(5):381–90. doi: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(65\)90169-9](https://doi.org/10.1016/0043-1648(65)90169-9)
- [20] Zhou T, Liu H. Research Progress of Wood Cell Wall Modification and Functional Improvement: A Review. *Materials (Basel)*. 2022;15(4):1–14. doi: 10.3390/ma15041598
- [21] Sedlar T, Stojnic S. Hardness of Thermally Modified Beech. 2019;143(9-10):425–33.
- [22] Brischke C, Ziegeler N, Bollmus S. Abrasion resistance of thermally and chemically modified timber. *Drv Ind*. 2019;70(1):71–6. doi: 10.5552/drvind.2019.1813
- [23] Cabral JP, Kafle B, Subhani M, Reiner J, Ashraf M. Densification of timber: a review

- on the process, material properties, and application. *J Wood Sci.* 2022;68(1). doi: 10.1186/s10086-022-02028-3
- [24] Bao M, Huang X, Jiang M, Yu W, Yu Y. Effect of thermo-hydro-mechanical densification on microstructure and properties of poplar wood (*Populus tomentosa*). *J Wood Sci.* 2017;63(6):591–605. doi: 10.1007/s10086-017-1661-0
- [25] Mania P, Wr M, Adam W, Roszyk E. Hardness of Densified Wood in Relation to Changed Chemical Composition. *Forests.* 2020; 11(506):1–12. doi:10.3390/f11050506
- [26] Eaton E, Caudullo G, Oliveira S, de Rigo D. *Quercus robur* and *Quercus petraea* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. Iz: *European Atlas of Forest Tree Species*. Luxembourg: Publication Office of The European Union; 2016., str. 160-163.
- [27] Tekstura hrasta kitnjaka, dostupno na: <https://www.wood-database.com/white-oak/> [pristupljeno 15. ožujka 2023.]
- [28] Jakopec S, Damijanić D, Kurtalj L, Lukšić H, Rede V. Effect of abrasive grain size on the abrasion resistance of black locust (*Robina pseudoacacia*) in three characteristic sections. Iz: *Proceeding of Natural Resources, Green Technology & Sustainable Development*, Zagreb, 14.09.2022. - 16.09.2022.