

Usmjerenost svojstava abrazijske otpornosti različitih vrsta drva

Vukonić, Leonarda

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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:235:243550>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**

Repository / Repozitorij:

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



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Leonarda Vukonić

Zagreb, 2020.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Vera Rede, dipl. ing.

Studentica:

Leonarda Vukonić

Zagreb, 2020.

IZJAVA:

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno služeći se vlastitim znanjem stečenim na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, uz pomoć navedene literature.

Zahvaljujem se svojoj mentorici izv. prof. dr. sc. Veri Rede na pomoći, savjetima, utrošenom vremenu i trudu te ustupljenoj literaturi.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Studentica: **Leonarda Vukonić** Mat. br.: 0035208568

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Usmjerenost svojstva abrazijske otpornosti različitih vrsta drva**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Anisotropic abrasive wear behaviour of some wood species**

Opis zadatka:

Drvo je specifičan tehnički materijal čija su svojstva određena njegovim biološkim funkcijama, odnosno njegovom složenom anizotropnom strukturom. Drvo je prirodni kompozitni materijal čija je matrica sačinjena od lignina, a ojačalo u najvećoj mjeri čine celulozna vlakna te hemiceluloza. Struktura drva razlikuje se od vrste do vrste, što za posljedicu ima i razliku u svojstvima. Velike razlike mogu se pojaviti i unutar iste vrste. U završnom radu potrebno je odrediti abrazijsku otpornost nekoliko domaćih vrsta drva koje se primjenjuju za izradu parketa. Ispitivanje otpornosti na trošenje potrebno je provesti standardnom metodom suhi pijesak – gumeni kotač. S obzirom na veliku usmjerenost strukture, ispitivanje je potrebno provesti za svaki od tri karakterističnih presjeka: radijalni, tangencijalni i poprečni. Dobivene rezultate treba analizirati i na temelju provedene analize donijeti odgovarajuće zaključke.

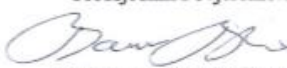
Zadatak zadan:
18. studenog 2019.

Datum predaje rada:
1. rok: 21. veljače 2020.
2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.
3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 24.2. – 28.2.2020.
2. rok (izvanredni): 3.7.2020.
3. rok: 21.9. – 25.9.2020.

Zadatak zadala:


Prof. dr. sc. Vera Rede

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	1
POPIS TABLICA	4
POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA	5
SAŽETAK	6
SUMMARY	7
1.UVOD.....	8
2. STRUKTURA DRVA	9
2.1. Botanička podjela.....	9
2.2. Makrostruktura drva.....	10
2.2.1. Godovi	11
2.3. Stanična struktura drva.....	14
2.4. Molekularna struktura drva	17
3. SVOJSTVA DRVA	18
3.1. Gustoća drva.....	18
3.2. Voda u drvu.....	19
3.3. Mehanička svojstva	21
3.3.1 Čvrstoća drva.....	22
3.3.2. Modul elastičnosti.....	24
3.3.3. Žilavost.....	25
3.3.4. Tvrdća.....	26
3.3.5. Otpornost na trošenje.....	29
4. EKSPERIMENTALNI DIO	32
4.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja	32
4.2. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje	32
4.2.1. Rezultati ispitivanja abrazijskog trošenja	36
4.3. Određivanje gustoće.....	40
4.4 Analiza mikrostrukture.....	41
5. ANALIZA REZULTATA	45
6. ZAKLJUČCI.....	54
LITERATURA	55

POPIS SLIKA

Slika 2.1 Četinjače i listače, opći oblik stabla četinjače (A) i listače (B), poprečni presjek kroz deblo četinjače (C) i listače (D), [5]	9
Slika 2.2 Karakteristični presjeci drva [5]	10
Slika 2.3 Poprečni presjek kroz deblo s makroskopskim elementima građe, vanjska kora (vk), unutarnja kora (uk), kambij (k), bjeljika, srževina i srčika (s) [5]	11
Slika 2.4 Poprečni presjek četinjače (lijevo – bor (Pinus)) i listače (desno – hrast(Quercus)) s naznačenim ranim i kasnim dijelom goda [5]	12
Slika 2.5 Tri karakteristična tipa godova kod četinjača i listača [2]	13
Slika 2.6 Poprečni presjek kroz drvo četinjače (A) i listače (B) [5]	14
Slika 2.7 Drvni traci, A i B tangencijalni presjek, C i D radijalni presjek [5]	16
Slika 3.1 Utjecaj anizotropnosti drvne građe na utezanje [5]	20
Slika 3.2 Tri osnovne osi drva [1]	21
Slika 3.3 Položaj godova u odnosu na smjer savojne sile [1]	23
Slika 3.4 Shematski prikaz ispitivanja tlačne čvrstoće [1]	23
Slika 3.5 Specifična krutost drva i ostalih tehničkih materijala [1]	25
Slika 3.6 Odnos čvrstoće i žilavosti drva i drugih tehničkih materijala [15]	26
Slika 3.7 Razlika između mjerenja poprečne i bočne tvrdoće [16]	27
Slika 3.8 Ispitivanje tvrdoće metodom po Janki [17]	28
Slika 3.9 Ispitivanje tvrdoće metodom po Brinellu [1]	29
Slika 3.10 Osnovne osi simetrije i osnovni presjeci u drvu (P, R i T) [1]	30
Slika 3.11 Taber abrader [20]	30
Slika 3.12 Suhi pijesak-gumeni kotač [21]	31
Slika 4.1 Uređaj za ispitivanje abrazijskog trošenja „Suhi pijesak – gumeni kotač“	33
Slika 4.2 Ispitni uzorci triju vrsta drva – jasen, hrast, orah	33
Slika 4.3 Prikaz uzorka postavljenog u čeljust naprave neposredno prije početka ispitivanja... ..	34
Slika 4.4 Mjerna vaga „Metler B5C 1000“	35
Slika 4.5 Optički mikroskop AXIO	41
Slika 4.6 Poprečni presjek hrasta	42
Slika 4.7 Radijalni presjek hrasta	42
Slika 4.8 Tangencijalni presjek hrasta	42

Slika 4.9	Poprečni presjek jasena	43
Slika 4.10	Radijalni presjek jasena	43
Slika 4.11	Tangencijalni presjek jasena.....	43
Slika 4.12	Poprečni presjek oraha.....	44
Slika 4.13	Radijalni presjek oraha	44
Slika 4.14	Tangencijalni presjek oraha.....	44
Slika 5.1	Ukupni gubitak volumena	45
Slika 5.2	Kumulativan gubitak volumena po presjecima	46
Slika 5.3	Utjecaj anizotropnosti strukture na intenzitet abrazijskog trošenja hrasta	47
Slika 5.4	Utjecaj anizotropnosti strukture na intenzitet abrazijskog trošenja jasena.....	47
Slika 5.5	Utjecaj anizotropnosti strukture na intenzitet abrazijskog trošenja oraha.....	48
Slika 5.6	Razlika trošenja poprečnog presjeka između trošenja u smjeru paralelnom i okomitom na godove.....	49
Slika 5.7	Hrast, poprečni presjek – godovi paralelni sa smjerom trošenja (a), godovi okomiti na smjer trošenja (b)	49
Slika 5.8	Jasen, poprečni presjek – godovi paralelni sa smjerom trošenja(a), godovi okomiti na smjer trošenja (b).....	49
Slika 5.9	Orah, poprečni presjek – godovi paralelni sa smjerom trošenja (a), godovi okomiti na smjer trošenja (b).....	50
Slika 5.10	Razlika trošenja radijalnog presjeka između trošenja u smjeru paralelnom i okomitom na godove.....	51
Slika 5.11	Hrast,radijalni presjek – smjer trošenja paralelan s vlakancima (a), smjer trošenja okomit na vlakanca (b).....	51
Slika 5.12	Jasen,radijalni presjek – smjer trošenja paralelan s vlakancima (a), smjer trošenja okomit na vlakanca (b).....	51
Slika 5.13	Orah, radijalni presjek – smjer trošenja paralelan s vlakancima (a), smjer trošenja okomit na vlakanca (b).....	52
Slika 5.14	Razlika trošenja tangencijalnog presjeka između trošenja u smjeru paralelnom i okomitom na godove.....	52
Slika 5.15	Hrast, tangencijalni presjek - smjer trošenja paralelan s vlakancima (a), smjer trošenja okomit na vlakanca (b)	53
Slika 5.16	Jasen, tangencijalni presjek - smjer trošenja paralelan s vlakancima (a), smjer trošenja okomit na vlakanca (b)	53

Slika 5.17 Orah, tangencijalni presjek – smjer trošenja paralelan s vlakancima (a), smjer trošenja okomit na vlakanca (b)	53
---	----

POPIS TABLICA

Tablica 3. 5 Vrijednosti modula elastičnosti nekih vrsta drva (po skupinama) [14]	25
Tablica 4.1 Gubitak mase hrasta u svakom presjeku	37
Tablica 4.2 Gubitak mase jasena u svakom presjeku	38
Tablica 4.3 Gubitak mase oraha u svakom presjeku.....	39

POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
ρ	g/cm^3	gustoća
ρ_0	g/cm^3	gustoća drva pri udjelu vlage od 0 %
ρ_{12}	g/cm^3	gustoća drva pri udjelu vlage od 12 %
ρ_w	g/cm^3	gustoća drva pri određenom udjelu vlage
m	g	masa uzorka
m_0	g	masa uzorka u apsolutno suhom stanju
m_w	g	masa uzorka pri određenom udjelu vlage
V	cm^3	volumen uzorka
R_m	N/mm^2	vlačna čvrstoća
R_{ms}	N/mm^2	savojna čvrstoća

SAŽETAK

Cilj ovog rada bio je utvrditi utjecaj usmjerenosti strukture na otpornost prema abrazijskom trošenju različitih vrsta drva. Analizirane vrste drva su: hrast, jasen i orah - domaće vrste koje se najčešće koriste za izradu parketa.

Rad se sastoji od teorijskog i eksperimentalnog dijela.

U teorijskom dijelu opisana je struktura drva od makro do molekularne razine te njegova osnovna fizikalna i mehanička svojstva.

U eksperimentalnom dijelu prikazani su rezultati ispitivanja svojstva abrazijske otpornosti ovisno o usmjerenosti strukture, odnosno otpornost abrazijskom trošenju u tri karakteristična presjeka – radijalnom, tangencijalnom i poprečnom. Pored otpornosti na abrazijsko trošenje određena je i gustoća svake od triju vrsta drva te je provedena analiza mikrostrukture.

Pokazalo se da orah ima najveću otpornost na abrazijsko trošenje, iako ima manju gustoću od hrasta. Poprečni presjek pokazao se najviše otpornim na abrazijsko trošenje kod svih triju vrsta drva. Intenzitet abrazijskog trošenja u radijalnom i tangencijalnom presjeku znatno ovisi o kutu između smjera trošenja i drvnih vlaknaca, a u poprečnom o kutu između smjera trošenja i linije goda.

KLJUČNE RIJEČI: *drvo, usmjerenost strukture, abrazijska otpornost*

SUMMARY

The aim of this paper was to determine the influence of structure orientation on the abrasion resistance of various wood species. The analyzed types of wood are oak, ash, and nut.

The work consists of theoretical and experimental parts.

In the theoretical part, wood structure from macro to the molecular level and its basic physics, as well as mechanical properties, are described.

In the experimental part, the results of tests obtained by examination of abrasion resistance depending on structure orientation, i.e. abrasion resistance in three characteristic sections – radial, tangent, and cross are shown. Except for the abrasion resistance, the density of all three wood species was determined and the analysis of microstructure was done.

It was shown that nut is most resistant to abrasive wearing, even though it has a lower density than oak. Among all three wood species, cross-section showed as best resistance to abrasion. The intensity of abrasion wearing in radial and tangent sections depends significantly on the angle between wearing direction and wood fibers, while cross-section depends on the angle between wearing direction and a line of a tree ring.

KEYWORDS: *wood, structure orientation, abrasion resistance*

1.UVOD

Drvo, kao glavni proizvod šume, ekološke tvornice u kojoj se „uvjeti rada“ mijenjaju iz dana u dan s obzirom na varijable iz okoliša, ima izuzetno važnu ulogu u životu ljudi od prvih početaka civilizacije do danas. Ono je uvijek dostupno, raste uz pomoć Sunčeve energije, a koristi se za razne namjene te u proizvodnji brojnih proizvoda. Uz kamen i glinu, drvo je bilo među prvim tehničkim materijalima, neophodnim za život ljudi te razvoj industrije, a i danas predstavlja glavni izvor energije većem dijelu svjetske populacije. Kada je riječ o proizvodnji i obradi drva, ono u usporedbi s ostalim sirovinama zahtijeva minimalan utrošak energije. Drvo posjeduje sposobnost proizvodnje kisika i prirodnog vezivanja štetnog ugljikovog dioksida, stoga predstavlja dobru alternativu ostalim materijalima s obzirom na današnje vrlo visoke ekološke zahtjeve i norme. Drvo kao tehnički materijal ima posebna i jedinstvena fizikalna, kemijska, mehanička i tehnološka svojstva. Ono je u potpunosti reciklabilan, prirodan, obnovljiv i svestran materijal, koji razvojem tehnologije svoju primjenu osim u građevinarstvu i celuloznoj industriji nalazi i šire. Osnovni cilj u modernoj primjeni drva jest naglasiti i iskoristiti njegove prirodne, estetske i tehničke prednosti, uz istodobno eliminiranje njegovih nedostataka. Mnogobrojne su prednosti drva u odnosu na moderne tehničke materijale: laka obradivost, mala osjetljivost na temperaturne promjene, mala težina elemenata, velika čvrstoća u smjeru vlakancima. Drvo ima i neke nedostatke kao što su: greške u drvu, usmjerenost građe i svojstava, ovisnost mehaničkih svojstava o udjelu vlage, skupljanje, bubrenje, zapaljivost te osjetljivost na biotske i abiotske razgrađivače. Različitim postupcima ove prirodne nedostatke drva teži se smanjiti na minimum. [1, 2, 3, 4]

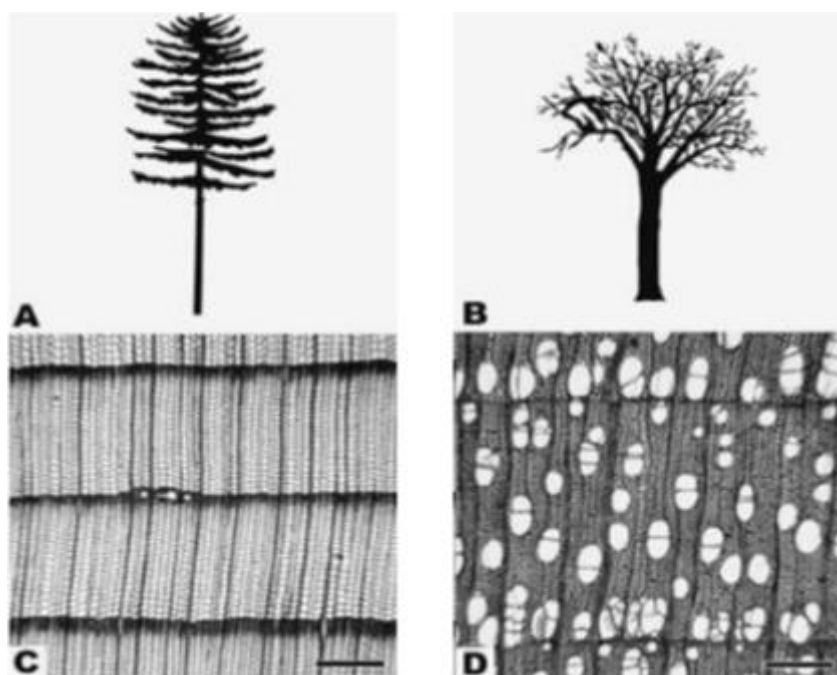
Zbog izrazito anizotropne strukture kod drva je vrlo izražena i anizotropnost većine svojstava. U ovom radu analiziran je utjecaj usmjerenosti strukture na abrazijku otpornost triju domaćih vrsta drva koje se najčešće koriste za izradu parketa. Ispitivanja su provedena na tri karakteristična presjeka (poprečnom, radijalnom i tangencijalnom), paralelno s vlakancima i okomito na vlakanca te paralelno s godovima i okomito na godove. Pored ispitivanja otpornosti abrazijskom trošenju određena je i gustoća drva za neki udio vlage te gustoća u apsolutno suhom stanju, a provedena je i analiza mikrostrukture.

2. STRUKTURA DRVA

Drvo je prirodni, heterogeni, anizotropan kompozitni materijal. Dobiva se od drvenastih, vaskularnih, višegodišnjih biljaka s razvijenim trajnim stablom. Osnovna strukturna razina na kojoj se drvo može promatrati je molekularna, u kojoj drvo predstavlja skup različitih biopolimera, odnosno umreženih lanaca celuloze i hemiceluloze, povezanih ligninom. Osnovna mikrostrukturna jedinica je drvena stanica sastavljena od lumena i stanične stijenke, a kada je riječ o makrostrukтури, razlikujemo različite slojeve na karakterističnim presjecima – unutarnja i vanjska kora, srževina, bjeljika, godovi, ... [1]

2.1. Botanička podjela

Sve komercijalno zanimljive vrste drva pripadaju skupini cvjetnica ili sjemenjača, a dijele se na listače i četinjače, slika 2.1



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

Četinjače još nazivamo i meko drvo, a spadaju u skupinu golosjemenjača, rastu na sjevernoj hemisferi te su uglavnom zimzelene (zadržavaju lišće u hladnom dijelu godine). Malobrojne

su po porodicama, nema mnogo vrsta, a najpoznatije kod nas su bor (Pinus), jela (Abies) i smreka (Picea).

Listače spadaju u skupinu kritosjemenjača, a nazivaju se još i tvrdo drvo ili bjelogorica. Za razliku od četinjača, zastupljene su s oko 2000 vrsta, rastu u tropskom klimatskom pojasu, a lišće im u jesen opada. Tipični predstavnici su bukva (Fagus), jasen (Fraxinus) i hrast (Quercus). [1, 2]

2.2. Makrostruktura drva

Svako stablo čine tri glavna dijela: korijen, deblo i krošnja. Svaki od njih ima svoju ulogu. Sustav korijenja podupire i drži deblo te apsorbira vodu i mineralne tvari. Deblo podupire krošnju, do koje od korijenja provodi vodu i mineralne tvari, dok u dubljem sloju pohranjuje rezervne tvari i šećere. Krošnju čine grane, izboji i lišće. Listovi apsorbiraju ugljični dioksid iz atmosfere, upijaju energiju iz sunčeve svjetlosti i procesom fotosinteze proizvode ugljikohidrate. [1, 2, 6]

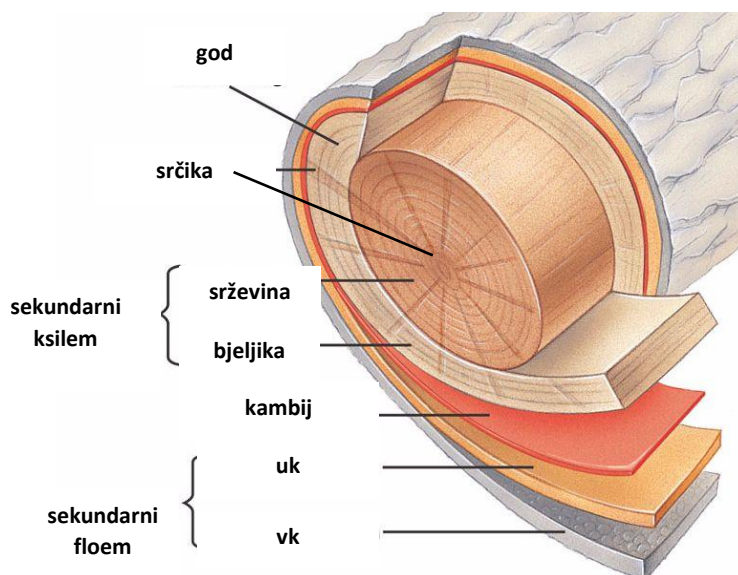
Zbog usmjerenosti građe drva za dobivanje cijele predodžbe o njegovim svojstvima i strukturi te za potpuno definiranje građe drva, koriste se tri karakteristična presjeka (slika 2.2), a to su: [7]

- **POPREČNI** - okomit na uzdužnu os debla i na drvena vlakanca
- **RADIJALNI** – u ravnini koju određuju radijus i uzdužna os debla
- **TANGENCIJALNI** – okomit na radijus valjka debla i paralelan s uzdužnom osi debla.



Slika 2.2 Karakteristični presjeci drva [7]

Na poprečnom presjeku drva, na slici 2.3, prikazana je različitost makroskopskih elemenata građe.



Slika 2.3 Poprečni presjek kroz deblu s makroskopskim elementima građe, vanjska kora (vk), unutarnja kora (uk), kambij (k), bjeljika, srževina i srčika (s) [7]

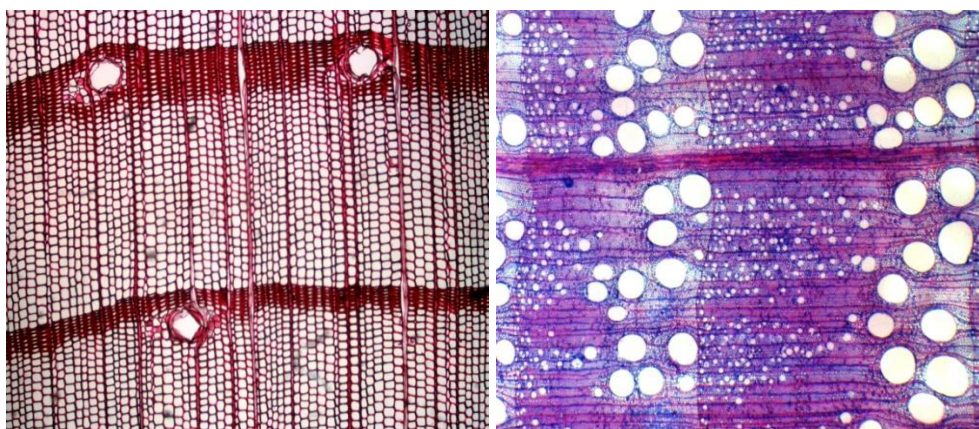
Vanjska kora ima mehaničku ulogu zaštite cijelog debla od isušivanja. Kroz **unutarnju koru** provode se organske tvari nastale u procesu fotosinteze od listova prema korijenju. **Kambij** je tanki živi sloj stanica između unutarnje kore i drvnog tkiva, iz kojeg svakog proljeća, u našoj klimatskoj zoni, kreće rast novog goda prema unutra (sekundarni ksilem), a prema van novi sloj unutarnje kore (sekundarni floem). U živom i metabolički aktivnom sloju drva, **bjeljici**, sintetiziraju se i pohranjuju škrob i lipidi, dok se voda i mineralne tvari transportiraju od korijena prema gore. **Srževinu** čine odumrle stanice i nataložene različite biokemijske tvari, ekstraktivi, zbog kojih je ona tamnije obojena, a provod vode i mineralnih tvari kroz nju je onemogućen. O količini i vrsti ekstraktivnih tvari ovise mehanička svojstva i trajnost drva. U samom središtu drvnog valjka nalazi se **srčika**, ostatak tkiva iz rane faze prije formiranja samog debla. [1, 6]

2.2.1. Godovi

Kod drveta postoje primarni i sekundarni rast. Primarni rast odnosi se na rast vegetacijskog vrha, odnosno na rast u visinu, dok sekundarni rast podrazumijeva rast u debljinu i traje

čitavog života biljke. Za sekundarni rast zadužen je kambij, čije djelovanje može biti kontinuirano ili diskontinuirano. Diskontinuirano djelovanje kambija karakteristično je za umjereni zemljopisni pojas s pravilnom izmjenom godišnjih doba, u kojem je djelovanje kambija najintenzivnije u proljeće, a potpuno prestaje krajem ljeta. Prirast sekundarnog ksilema koji nastaje u tom razdoblju naziva se god. Kontinuirano djelovanje kambija karakteristično je za vrste koje rastu u tropskom pojasu i one nemaju godove. Na poprečnom presjeku drva upravo godovi daju najbolji prikaz njegove nehomogene građe. Rani dio goda čine stanice nastale na početku vegetacijske zone, a kasni dio goda stanice koje nastaju nešto kasnije. [1]

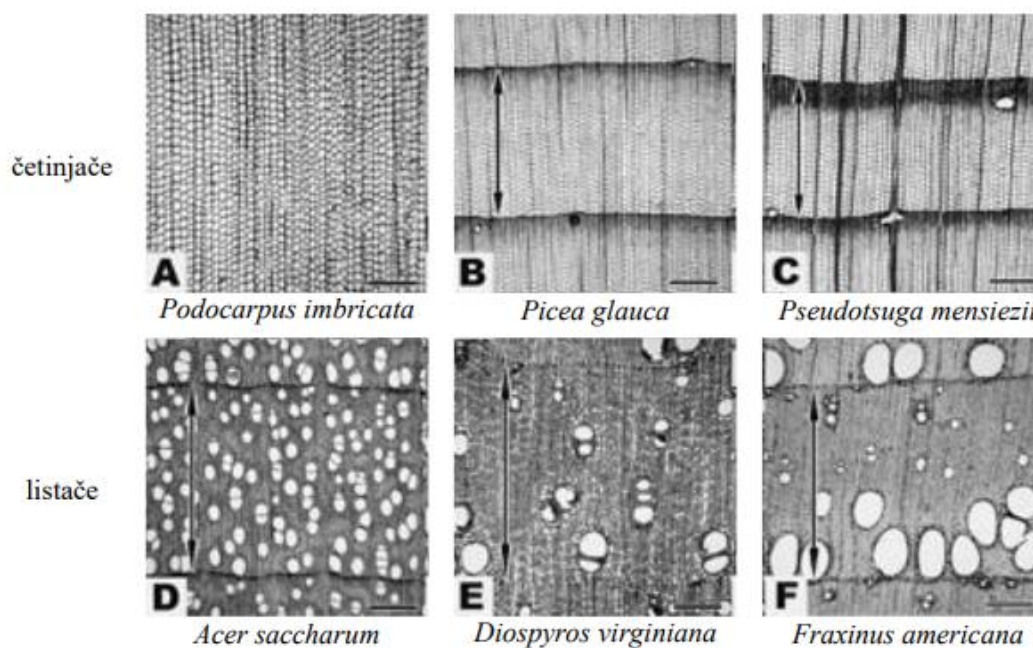
Na slici 2.4. prikazan je poprečni presjek kroz drvo gdje se jasno vidi razlika između ranog i kasnog goda kod četinjača i listača.



Slika 2.4 Poprečni presjek četinjače (lijevo – bor (Pinus)) i listače (desno – hrast (Quercus)) s naznačenim ranim i kasnim dijelom goda [8, 9]

S obzirom na izgled stanica ranog i kasnog dijela goda, sve vrste drva dijele se u jednu od tri slijedeće skupine (slika 2.5): [1]

- vrste **bez razlike** između stanica ranog i kasnog dijela goda
- vrste kod kojih se unutarnji promjer provodnih elemenata **postepeno smanjuje** od ranog prema kasnom godu
- vrste kod kojih se unutarnji promjer provodnih elemenata **naglo smanjuje** od ranog prema kasnom godu.



Slika 2.5 Tri karakteristična tipa godova kod četinjača i listača [2]

A – nema izraženih godova, **B** – postupan prijelaz iz ranog u kasno drvo, **C** - izražen prijelaz iz ranog u kasno drvo, **D** – difuzno porozno drvo (ne vidi se prijelaz iz ranog u kasni dio goda), **E** – semi-difuzno porozno drvo (postupan prijelaz iz ranog u kasni dio goda), **F** – prstenasto porozno drvo (nagli prijelaz iz ranog u kasni dio goda)

Za razliku od četinjača, koje imaju jednostavniju građu, listače posjeduju velike provodne sudove – pore. Pore mogu biti ravnomjerno (difuzno) razmještene po cijelom godu ili grupirane samo u ranom dijelu goda (prstenasto). Semi-difuzno porozne vrste drva predstavljaju prijelazni oblik između difuzno poroznog i prstenasto poroznog drveta. [1]

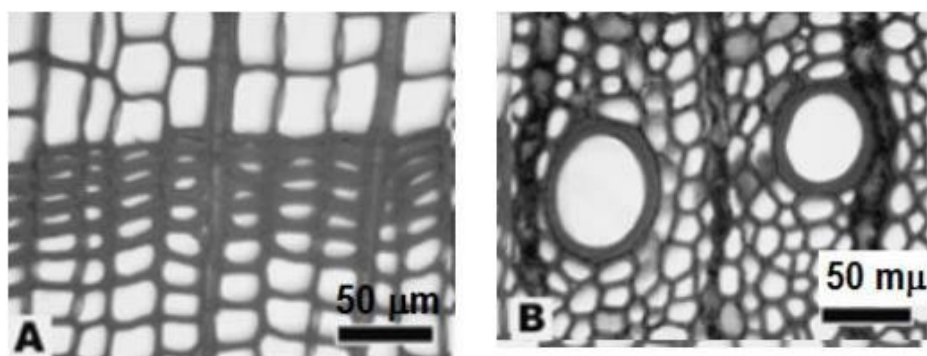
Godovi se međusobno razlikuju po:

- načinu rasporeda pora (slika 2.5.)
- stupnju markantnosti (izraženosti godova) - markantniji su kod četinjača, nego listača
- boji – mogu biti svjetliji ili tamniji
- širini - fini (do 1/3 cm), polu-fini (1/3-2/3 cm) ili grubi (širi od 2/3 cm)
- tijeku granične linije – paralelni s periferijom poprečnog presjeka debla, valoviti ili uleknuti

- načinu nizanja – uglavnom širi u blizini srčike, nego na periferiji

2.3. Stanična struktura drva

Osnovna organizacijska jedinica bilo koje biljke jest biljna stanica, koja se sastoji od protoplasti (žive tvari okružene staničnom membranom) i stanične stijenke (nežive tvari izgrađene uglavnom od ugljikohidrata). Kada se govori o drvnoj stanici, misli se na mrtvu stanicu bez plazmatskog sadržaja. Prazni prostor omeđen staničnom stijenkom u kojem su se ranije nalazile protoplasti i čija je osnovna funkcija provođenje vode naziva se lumen. Uloga stanične stijenke je mehanička potpora stanice te zaštita od previsokog osmotskog tlaka. Četinjače i listače međusobno se razlikuju prema obliku stanice, debljini stijenke i veličini lumena, što je prikazano slikom 2.6.



Slika 2.6 Poprečni presjek kroz drvo četinjače (A) i listače (B) [5]

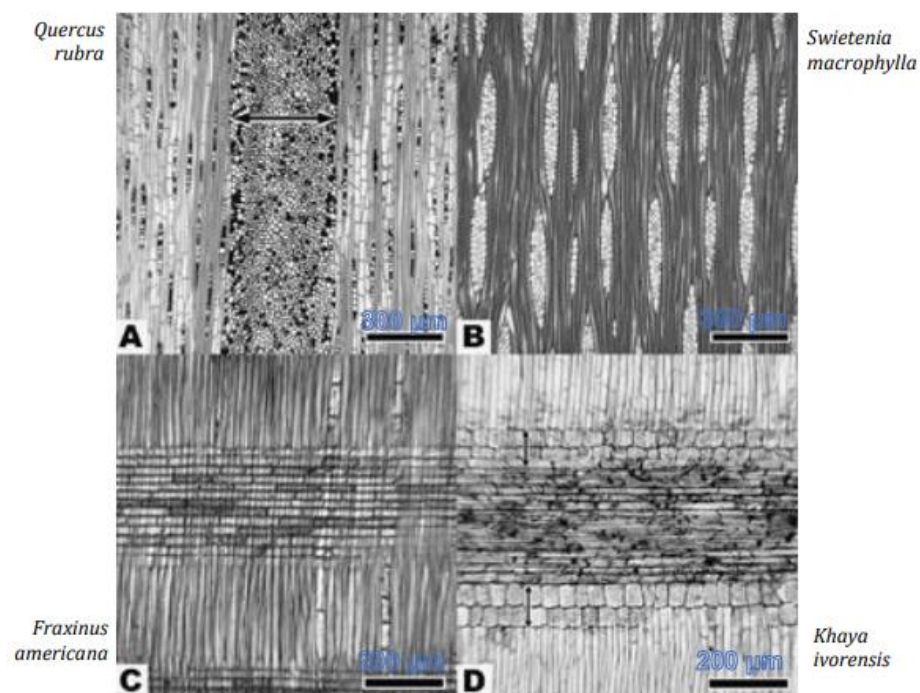
Stanice četinjača pravokutnog su oblika, sve su istog tipa i zovu se traheide, dok su stanice listača pore - velike i okrugle, debele stanične stijenke i vrlo velikog lumena. [1, 2]

Staničnu stijenku čine tri glavna dijela: središnja lamela, primarni i sekundarni dio stijenke. Struktura svih dijelova je kompozitna, izgrađena od mikrovlakana celuloze i hemiceluloze okruženih matricom od lignina. Središnjom lamelom stanice su povezane u jedinstvenu cjelinu, čime je omogućena njihova funkcija - provođenje vode i biokemijskih tvari. Na središnju lamelu nastavlja se primarni dio stijenke sačinjen od dugih mikrovlakana celuloze koja stanicu omataju pod kutom od 0° do 90° u odnosu na uzdužnu os. Na primarnu stijenku nastavlja se sekundarna, sastavljena od tri sloja različite debljine. U vanjskom sloju sekundarne stijenke, koji je relativno tanak, celulozna mikrovlakna položena su pod kutem od

50° do 90° u odnosu na uzdužnu os stanice. U srednjem sloju, ujedno i najdebljem, celulozna mikrovlakna položena su pod kutem od 5° do 30°, a udio lignina manji je, nego u središnjoj lameli i primarnoj stijenci. Posljednji, najdublji sloj, sadrži još manje lignina, relativno je tanak, a mikrovlakna su omotana pod kutem većim od 70°. Sadržaj lignina, koji je hidrofoban, smanjuje se postupno od središnje lamele prema lumeni da bi se olakšao protok vode u živom drvu. Između listača i četinjača također postoji razlika i u mikrostrukturi. Listače su nešto kompliciranije građe - sačinjene su od četiri vrste stanica, a to su traheje, traheide, libriformne i parenhimske stanice.

Četinjače tvore samo dvije vrste stanica – traheide i parenhimske stanice. Traheide su aksijalno orijentirane stanice čiji volumni udio u drvu četinjača iznosi preko 90 %. Omjer duljine i širine je približno 100:1. Krajevi su zašiljeni, a na njima se nalaze otvori preko kojih su dvije susjedne stanice povezane. Osim aksijalnih traheida postoje i radijalne, koje obavljaju funkciju radijalnog transporta vode. Parenhimske stanice također mogu biti radijalne ili aksijalne, a od traheida se razlikuju po tamnije obojenom lumeni. Aksijalne parenhimske stanice zauzimaju svega 1 % volumena dok se radijalne grupiraju u drvene trake i povezuju centar debla s periferijom. Prizmatičnog su oblika i služe sintezi, skladištenju i lateralnom transportu biokemijskih tvari između ksilema i sekundarnog floema. Neke vrste golosjemenjača (bor, smreka, ariš) posjeduju i strukture koje se nazivaju smolnim kanalima ili smolenicama. To su međustanični prostori omeđeni parenhimskim stanicama koji produciraju smolu.

Osnovne vrste stanica listača, traheje, velike su provodne stanice koje, nastavljajući se jedna na drugu, čine provodne sudove sposobne sprovesti veliku količinu vode od korijena prema gore. Traheje različitih vrsta drva međusobno se razlikuju po veličini i rasporedu unutar goda. Pored traheja, aksijalni sustav listača čine još i drvena vlakanca, traheide i parenhimske stanice, koje svojim oblikom, veličinom i rasporedom također utječu na mnoga svojstva drva. Radijalni sustav sačinjen je od parenhimskih stanica. Glavna uloga drvnih vlakanca, izduženih stanica debele stanične stijenske i uskog lumena, jest mehanička potpora. Drvni traci listača građeni su isključivo od parenhimskih stanica i javljaju se u mnogo više oblika, nego kod četinjača. Na slici 2.7. vide se drvni traci nekoliko različitih vrsta drva u tangencijalnom i radijalnom presjeku. [1, 6, 10]



Slika 2.7 Drvni traci, A i B tangencijalni presjek, C i D radijalni presjek [5]

2.4. Molekularna struktura drva

Suha drvena tvar stanične stijenke se na elementarnoj razini sastoji skoro u potpunosti od samo tri kemijska elementa:

- ugljika, C – 50 %
- vodika, H – 6 %
- kisika, O – 44 %.

Ostatak do 100 % čine anorganske tvari kojih ima vrlo malo. Na razini kemijskih spojeva drveno tkivo čine međusobno umreženi lanci celuloze, hemiceluloze i lignina, sačinjeni od ugljika, vodika i kisika s nešto malo izlučevina i anorganskih tvari. Sve te tvari skupa čine trodimenzionalni biopolimerni kompozit – drvo. [2]

Celuloza je bijela vlaknasta tvar bez okusa i mirisa, netopiva je u vodi i organskim otapalima, a sastavljena je od dugih nizova međusobno povezanih molekula glukoze. Najrasprostranjeniji je polisaharid i najrašireniji organski spoj na Zemlji. U drvu se uglavnom nalazi visokokristalinična celuloza čiji stupanj polimerizacije doseže 15 tisuća. [2, 11]

Hemiceluloza se, za razliku od celuloze, vrlo lako otapa u lužinama. Razgranati je polimer koji sadrži više monomernih šećera. Amorfne je strukture i puno manjeg stupnja polimerizacije, svega 100-200. [12]

Lignin je visokokompleksni, amorfni, uglavnom aromatski polimer, sačinjen od fenilpropanskih stanica. Osnovna uloga lignina je povećanje krutosti i stabilnosti stanične stijenke. [1, 6]

Ostali ugljikohidratni polimeri koji se nalaze u drvenoj tvari listača i četinjača su još i **pektin**, **škrob** i **proteini**.

Osim ugljikohidratnih polimera, u drvu se mogu naći i **ekstrahirane** i **anorganske** tvari. Ekstrahirane tvari su prirodni produkti nastali ekstrakcijom iz biljnih sokova, uglavnom su koncentrirani u srževini. O njihovoj vrsti i veličini ovise boja, miris i trajnost drva. [1]

3. SVOJSTVA DRVA

3.1. Gustoća drva

Gustoća predstavlja odnos između mase i volumena te se računa prema izrazu (1.1) :

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad \text{g/cm}^3 \quad (1.1)$$

gdje je:

ρ – gustoća, g/cm³

m – masa uzorka, g

V – volumen uzorka, cm³.

Kako gustoća drva ovisi o udjelu vlage u drvu, uz vrijednosti gustoće uvijek se navode i udjeli vlage pri kojima je mjerena gustoća.

Gustoća drva pri određenom udjelu vlage (w) računa se prema izrazu (1.2):

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w}, \quad \text{g/cm}^3 \quad (1.2)$$

dok se gustoća drva u apsolutno suhom stanju računa prema formuli (1.3) :

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0}, \quad \text{g/cm}^3 \quad (1.3)$$

Preračunavanje vrijednosti gustoće drva pri nekom udjelu vlage na vrijednosti pri udjelu vlage od 12 % računa se prema izrazu (1.4.):

$$\rho_{12} = \rho_w \frac{1+0,01(12-w)}{1+0,01(12-w)x \frac{\rho_w}{\rho_{H_2O}}}, \quad \text{g/cm}^3 \quad (1.4)$$

Gustoća drva u obrnutom je razmjeru s poroznošću drva – što je veća gustoća, manji je volumen pora i obrnuto. S druge strane, porastom gustoće dolazi i do porasta čvrstoće, tvrdoće te ogrijevne vrijednosti drva.

3.2. Voda u drvu

Živo drvo sadrži toliko vode koliko je potrebno za održavanje elastičnosti i izdržavanje vanjskih naprezanja poput udara vjetra i slično. Tehničko drvo je mrtvo i primjenjuje se u prosušenom stanju. Kako je drvo higroskopan materijal, ono upija vlagu iz zraka, a s promjenom količine vlage dolazi i do promjene dimenzija, mehaničkih, toplinskih i ostalih svojstava. Vлага u drvu može biti **slobodna** (nalazi se u lumenu) ili **vezana** (nalazi se unutar stanične stijenke). Određena je udjelom vode u ukupnoj masi vlažnog drva te se njen sadržaj u drvu izračunava prema izrazu (1.5):

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2} * 100 \quad \text{u \%} \quad (1.5)$$

pri čemu je:

w – sadržaj vode u drvu, %

m_1 – masa drva kod nekog sadržaja vlage, g

m_2 – masa drva u apsolutno suhom stanju, g.

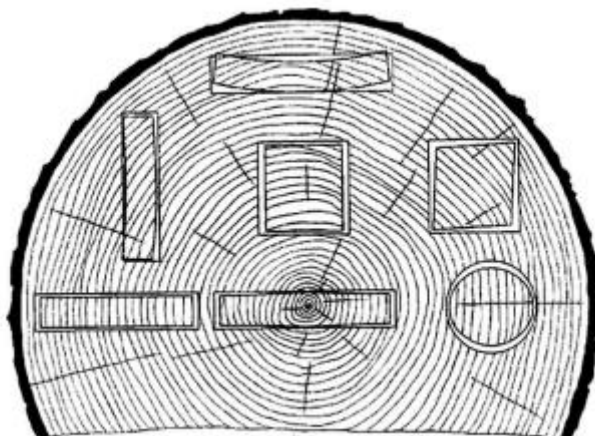
Sadržaj vlage izražava se u % i zaokružuje na 1 %.

Metode određivanja sadržaja vode u drvu:

1. Direktne – mjeri se masa ili volumen vode koja se na određeni način izdvoji iz drva
2. Indirektne – mjere se promjene nekog fizikalnog svojstva drva te se na osnovi poznavanja odnosa sa sadržajem vode indirektno procjenjuje sadržaj vode
3. Higrometrijske – mjeri se promjena nekog higroskopskog elementa

Sušenjem posječenog drva i smanjenjem udjela vlage njegov volumen ostaje nepromijenjen sve dok se ne dosegne točka zasićenja vlakanaca, koja iznosi između 25 % i 35 % vlage, a definira se kao sadržaj vlage u staničnoj stijenci pri kojem nema slobodne vode u lumenu, a stanična stijenka je potpuno zasićena vodom. Padom udjela vlage ispod točke zasićenja doći će do utezanja drva, odnosno smanjenja njegovog volumena. Obrnutim procesom, povećanjem higroskopske vode, dolazi do bubrenja (porasta volumena). Zbog anizotropnosti

drva utezanje ili bubrenje neće biti jednako u sva tri smjera - prosječno 8 % u tangencijalnom smjeru, oko 4 % u radijalnom smjeru te samo 0,2 - 0,4 % u longitudinalnom smjeru, slika 3.1.



Slika 3.1 Utjecaj anizotropnosti drvene građe na utezanje [5]

Volumno bubrenje i volumno utezanje ovise o gustoći drva u suhom stanju i točki zasićenja vlaknaca. Te promjene sadržaja vlage imaju značajan utjecaj na različita svojstva drva. Bubrenje negativno utječe na vibracijska i akustična svojstva koja su u uskoj vezi s modulom elastičnosti i kohezivnom silom između celuloze, hemiceluloze i lignina unutar stanične stijenke. S druge strane, djeluje pozitivno na toplinsku i električnu vodljivost. [1,13]

3.3. Mehanička svojstva

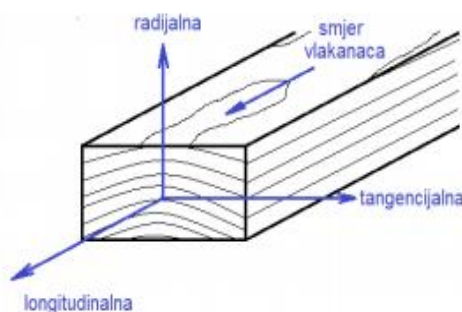
Mehanička svojstva drva su skup obilježja materijala koja dolaze do izražaja u uvjetima mehaničkog opterećenja, prerade i uporabe.

Različite vrste drva imaju različita mehanička svojstva koja su posljedica anatomske građe drva. Do značajnih razlika u svojstvima drva može doći i unutar iste vrste drva, ali i unutar istog debla pa čak i unutar jednog goda. Drvo korijena manje je čvrstoće od drva debla i grana, a drvo grana je, uz neke izuzetke, čvršće od drva debla [1,14]

Mehanička svojstva drva ovise o:

- vrsti i građi drva
- gustoći drva
- smjeru vlaknaca
- sadržaju vode u drvu
- trajanju i intenzitetu opterećenja
- temperaturi i vremenu uporabe.

Drvo kao ortotropan materijal ima jedinstvena svojstva, ovisna o smjeru triju međusobno okomitih osi: longitudinalnoj, radijalnoj i tangencijalnoj. Položaj ovih triju osi u odnosu na smjer vlaknaca i godova, prikazan je na slici 3.2. Longitudinalna os paralelna je s vlakancima i glavnom osi debla, radijalna je okomita na godove i vlakanca, a tangencijalna je okomita na vlakanca i tangira zakrivljene linije godova.



Slika 3.2 Tri osnovne osi drva [1]

3.3.1 Čvrstoća drva

Čvrstoća drva predstavlja jedno od najvažnijih svojstava koje se traži u svakoj nosivoj konstrukciji. To je otpor kojim drvo nadvladava silu koja na njega djeluje tako da ga razvuče, stlači, savije, iskrene, slomi ili smrvi. Prema čvrstoći se, dakle, određuje i uporabna vrijednost drva. Značajne su razlike u čvrstoći u smjeru vlakanaca te one okomito na vlakanca. Znatno višu čvrstoću pokazuje drvo opterećeno u smjeru vlakanaca. Ovisno o načinu opterećenja, razlikujemo **savojnu**, **tlačnu**, **vlačnu** i **smičnu** čvrstoću.

Savojna čvrstoća određuje se najčešće standardnom metodom savijanja u tri točke. Savojna sila djeluje na sredini između oslonaca, pri čemu je gornja polovica uzorka opterećena tlačno, donja vlačno, a sredina ostaje neutralna. Normom je propisan prirast sile u jedinici vremena, a ispitivanje se provodi općenito do loma. Vrijednost savojne čvrstoće ovisi o usmjerenosti strukture - najviša je u longitudinalnom smjeru, a računa se prema izrazu (1.6):

$$R_{ms} = \frac{3F_{max}}{2b} * \frac{L}{h^2} \quad \text{N/mm}^2 \quad (1.6)$$

gdje je :

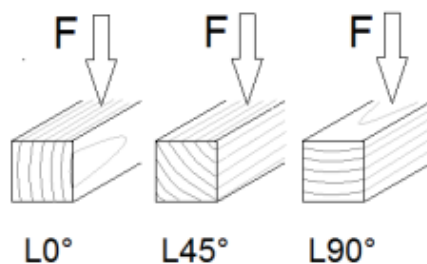
L – razmak između oslonaca, mm

h – visina uzorka, mm

b - širina uzorka, mm

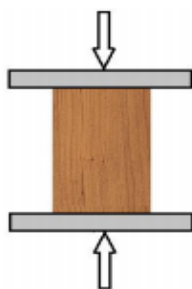
F_{max} - maksimalna sila, N.

Kod nekih vrsta drva savojna čvrstoća drva u longitudinalnom smjeru ovisi i o kutu između savojne sile i linije goda, slika 3.3. Kod nekih vrsta maksimalne vrijednosti postižu se pri kutu od 0°, a kod drugih pri kutu od 45° ili 90°. U tablici 3.1. prikazane su vrijednosti savojne čvrstoće nekih domaćih vrsta drva. [1, 15]



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

Tlačna čvrstoća predstavlja najveće naprezanje koje se javlja na uzorku smještenom na horizontalnoj podlozi kad na njega djeluje sila okomita na podlogu i nastoji ga stlačiti, slika 3.4.



Slika 3.4 Shematski prikaz ispitivanja tlačne čvrstoće [1]

Tlačna čvrstoća u smjeru vlakanaca također se razlikuje od tlačne čvrstoće okomito na smjer vlakanaca – 3 do 10 puta je veća ona u smjeru vlakanaca. Tlačna čvrstoća dosiže samo 50 % vlačne čvrstoće u smjeru vlakanaca. U tablici 3.2. prikazane su prosječne vrijednosti tlačne čvrstoće domaćih vrsta drva. **Vlačna čvrstoća** se definira kao omjer maksimalne postignute sile pri vlačnom opterećenju i početnog presjeka ispitnog uzorka te se računa prema izrazu (1.7):

$$R_m = \frac{F_{max}}{A}, \quad \text{N/mm}^2 \quad (1.7)$$

gdje su:

F_{max} – maksimalna sila

A - površina početnog presjeka ispitnog uzorka.

Vlačna čvrstoća, slično kao i tlačna, znatno je veća u smjeru vlakanaca od čvrstoće okomito na njih.

Smično naprezanje javlja se kao rezultat paralelnog djelovanja dviju suprotnih (vlačnih ili tlačnih) sila koje određuju ravninu smicanja, slika 3.4. Razlikuju se uzdužna (radijalna ili tangencijalna), poprečna i dijagonalna površina smicanja. Kod uzdužnih površina smjer djelovanja posmičnih sila može biti u smjeru vlakanaca ili okomito na njih, a kod poprečne površine sile su ili paralelne s godovima ili okomite na godove. **Smična čvrstoća** u smjeru vlakanaca u tangencijalnoj ravnini veća je za 15 % do 35 %, nego u radijalnoj, dok je u frontalnoj ravnini čvrstoća okomito na vlakanca znatno veća od one u smjeru vlakanaca. [1, 13]

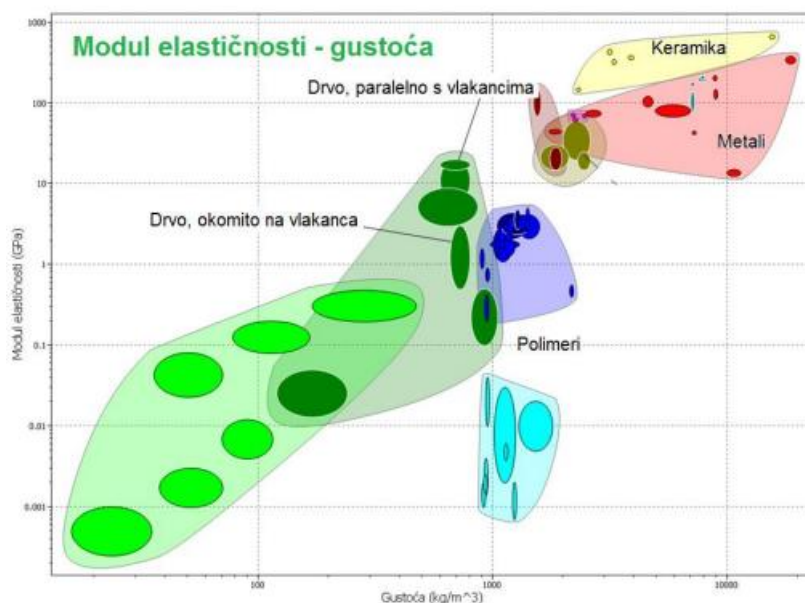
3.3.2. Modul elastičnosti

Modul elastičnosti predstavlja otpor nekog materijala prema elastičnoj deformaciji. Kod drva je jedno od najčešće određivanih svojstava čije se vrijednosti za različite vrste drva dosta razlikuju pa čak i unutar iste vrste. [1]

Modul elastičnosti ovisi o:

- jakosti veza između atoma
- vanjskim uvjetima – temperaturi, udjelu vlage, načinu opterećenja i kemijskom tretmanu
- usmjerenosti mikrostrukture - položaju ispitnog uzorka u odnosu na tri glavne osi

Prosječna vrijednost modula elastičnosti iznosi od 3 do 25 GPa (Tablica 3.5), a onaj određen u longitudinalnom pravcu (E_L) ima 10 do 20 puta više vrijednosti od modula elastičnosti u radijalnoj (E_R) i tangencijalnoj osi (E_T). Na slici 3.5. prikazana je specifična krutost (omjer modula elastičnosti i gustoće) drva koja je jedna od velikih prednosti drva u odnosu na druge materijale.



Slika 3.5 Specifična krutost drva i ostalih tehničkih materijala [1]

Tablica 3.1 Vrijednosti modula elastičnosti nekih vrsta drva (po skupinama) [16]

Modul elastičnosti u GPa ($w=15\%$, $\vartheta=1$ do $20\text{ }^{\circ}\text{C}$)	
Europske četinjače	8 ... 16
Američke četinjače	6 ... 17
Listače srednje gustoće	3 ... 16,5
Listače velike gustoće	10 ... 19
Listače vrlo velike gustoće	11 ... 25

3.3.3. Žilavost

Svojstva materijala u uvjetima udarnog opterećenja određuje žilavost. Ispitivanje žilavosti materijala provodi se na Charpyjevu batu te se računa prema izrazu (1.8):

$$KU (KV) = G(h_1 - h_2), \quad (1.8)$$

gdje su:

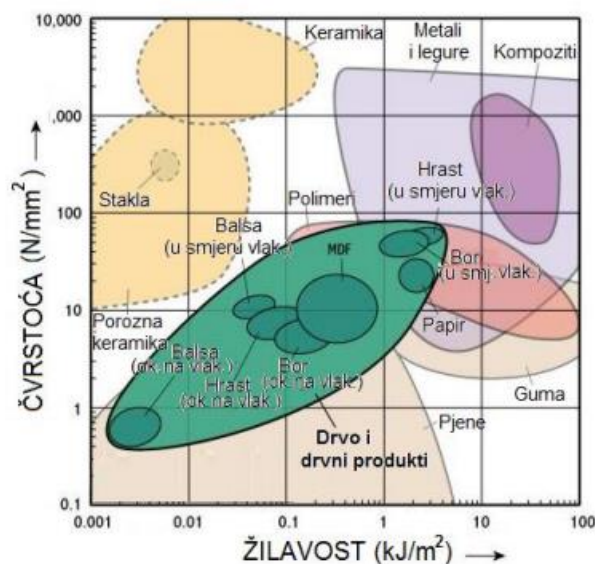
G - težina bata u N

h_1 - početna visina bata u m

h_2 - visina bata nakon loma epruvete u m.

Kao i dosad navedena svojstva, žilavost također ovisi o usmjerenosti strukture i najmanje vrijednosti postiže pri udarcu tangencijalno na godove, a najviše kad pada u radijalnom

smjeru. Promjenom mikrostrukture (u smisku degradacije) drva dolazi do značajnijeg pada žilavosti nego, primjerice, čvrstoće ili gustoće. Na slici 3.6. prikazan je odnos čvrstoće i žilavosti nekih vrsta drva te drugih tehničkih materijala.



Slika 3.6 Odnos čvrstoće i žilavosti drva te drugih tehničkih materijala [17]

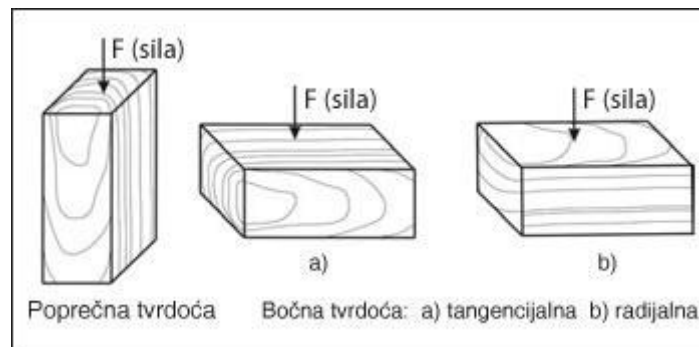
3.3.4. Tvrdća

Tvrdoća je otpor kojim se materijal suprotstavlja prodiranju nekog drugog, tvrdjeg tijela u vlastitu površinu.

Ovisna je o slijedećim faktorima:

- vrsti drva
- gustoći drva
- udjelu vlage
- omjeru ranog i kasnog drva u svakom godu
- mjestu uzimanja uzorka
- anatomskeoj građi

Ponovno zbog ortotropnosti drva nužno je razlikovati poprečnu (paralelnu s vlakancima), tangencijalnu i radijalnu (poprečnu na vlakanca) tvrdoću. Pravac djelovanja sile pri mjerenju poprečne, odnosno bočne tvrdoće prikazan je na slici 3.7. [16]



Slika 3.7 Razlika između mjerenja poprečne i bočne tvrdoće [18]

Za ispitivanje tvrdoće drva rabe se dvije metode:

- metoda po Brinellu
- metoda po Janki

Metodom po Janki mjeri se sila potrebna za utiskivanje čelične kuglice u uzorke drva dimenzija $50 \times 50 \times 30 \text{ mm}^3$ do polovice svog promjera od 5,64 mm. Brzina utiskivanja je konstantna i ne prelazi 0,1 mm/s. Vrijednost tvrdoće računa se prema izrazu (1.9): [19]

$$H_J = K * F, \quad \text{N} \quad (1.9)$$

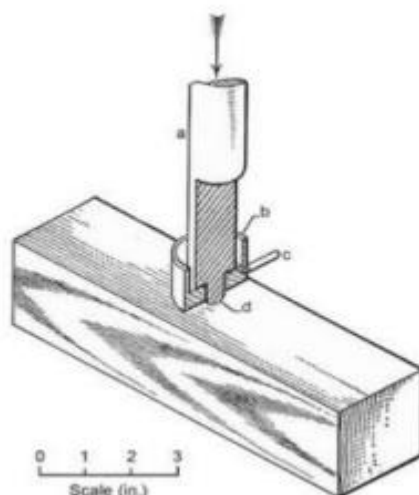
gdje je:

H_J – tvrdoća po Janki u N

K – koeficijent ovisan o dubini prodora kuglice

F – sila utiskivanja u N

Na slici 3.8 prikazano je ispitivanje tvrdoće metodom po Janki.



Slika 3.8 Ispitivanje tvrdoće metodom po Janki [19]

Metodom po Brinellu u uzorke prizmatičnog oblika sa stranicama od približno 50 mm utiskuje se kuglica od kaljenog čelika promjera 10 mm pod opterećenjem od 500 N za mekše, odnosno 1000 N za tvrde vrste drva, slika 3.8. Prirast sile je postepen, konačno opterećenje postiže se nakon otprilike 15 sekundi. Nakon djelovanja maksimalnog opterećenja u trajanju od 25 sekundi slijedi rasterećenje, kada se mjeri promjer otiska kuglice u površini drva. Tvrdoća se računa prema izrazu (1.10): [20]

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (1.10)$$

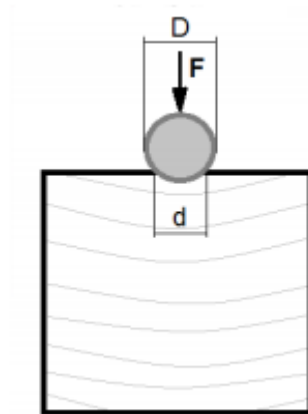
gdje je:

HB - tvrdoća po Brinellu

F – sila od 500 ili 1000 N

D – promjer kuglice

d – promjer otiska



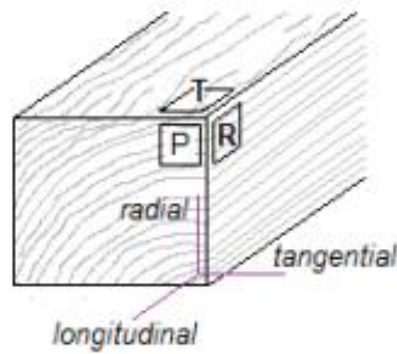
Slika 3.9 Ispitivanje tvrdoće metodom po Brinellu [1]

3.3.5. Otpornost na trošenje

Otpornost na trošenje je svojstvo drva da se opire postepenom narušavanju svoje površine uslijed djelovanja vanjskih mehaničkih sila. Od 4 osnovna mehanizma trošenja, za drvo je najznačanije abrazijsko trošenje, kao ono najučestalije. Abrazija je mehanizam trošenja istiskivanjem materijala zbog prodiranja tvrdih čestica ili tvrdih izbočina pri relativnom gibanju dvaju tijela. [21]

Otpornost na trošenje ovisi o:

- vrsti drva
- građi drva
- gustoći drva
- sadržaju vode
- stanju površine drva
- tvrdoći drva
- orijentaciji mikrostrukture (presjeku).



Slika 3.10 Osnovne osi simetrije i osnovni presjeci u drvu (P, R i T) [1]

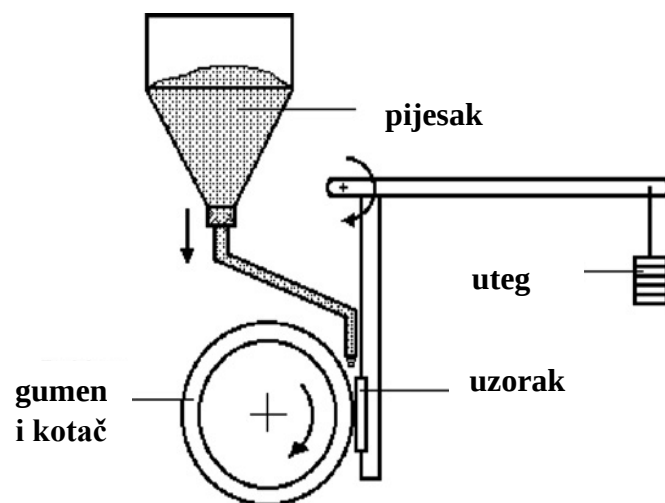
Poprečni presjek (P) ima najveću otpornost na abraziju, dok se radijalni presjek R) troši malo više od tangencijalnog (T).

Postoji nekoliko standardnih uređaja za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje, od kojih su dva najznačajnija:

- Taber abrader, slika 3.10.
- standardni uređaj za ispitivanje trošenja metodom „Suhi pijesak – gumeni kotač“, slika 3.11.



Slika 3.11 Taber abrader [22]



Slika 3.12 Suhi pijesak-gumeni kotač [23]

4. EKSPERIMENTALNI DIO

4.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja

U radu je istražen utjecaj usmjerenosti strukture triju različitih vrsta drva na otpornost prema abrazijskom trošenju. S obzirom na anizotropnost svojstava drva, ispitano je abrazijsko trošenje u tri karakteristična presjeka – poprečnom, radijalnom i tangencijalnom. Ispitana je otpornost na abrazijsko trošenje kod hrasta, jasena i oraha. Kod ispitivanja abrazijske otpornosti u poprečnom presjeku smjer trošenja bio je okomit na godove i paralelno s godovima, a kod trošenja u radijalnom i tangencijalnom presjeku smjer trošenja bio je okomito na vlakanca i paralelno s vlakancima.

U okviru planiranog istraživanja, provedena su sljedeća ispitivanja:

- otpornost abrazijskom trošenju
- određivanje gustoće
- analiza mikrostrukture

Nakon provedbe ispitivanja, obavljena je analiza te interpretacija dobivenih rezultata, temeljem čega su doneseni i odgovarajući zaključci.

4.2. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje

Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje provedeno je u laboratoriju za tribologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, na uređaju prikazanom na slici 4.1. Metoda je poznata pod nazivom „Suhi pijesak – gumeni kotač“ i normirana je prema standardu ASTM G 65-94. Standard nudi četiri različite procedure koje su prilagođene materijalima s različitim stupnjevima otpornosti i namijenjen je prvenstveno ispitivanju metalnih materijala. Oblik i dimenzije ispitnog uzorka također su propisani navedenim standardom.

Ispitivanja su provedena na uzorcima dimenzija $25 \times 76 \times 25 \text{ mm}^3$, slika 4.2. Za svaku od tri vrste drva – hrast, jasen i orah, ispitano je po 9 uzoraka, kako bi se obuhvatili svi karakteristični presjeci s obzirom na izrazitu usmjerenost strukture drva. Prva tri uzorka izrezana su tako da ispitna površina budu radijalni i tangencijalni presjek. Kod sljedeća tri uzorka abrazijskom trošenju podvrgnuti su poprečni i tangencijalni presjek, a posljednja tri uzorka ispitana su u poprečnom i radijalnom presjeku.



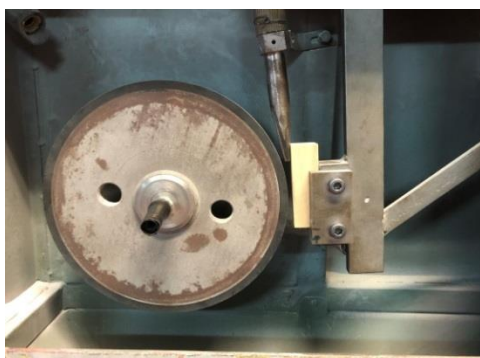
Slika 4.1 Uređaj za ispitivanje abrazijskog trošenja „Suhi pijesak – gumeni kotač“



Slika 4.2 Ispitni uzorci triju vrsta drva – jasen, hrast, orah

Ispitni uzorak postavlja se i učvrsti u čeljust naprave, sustavom poluge pritisne se odgovarajućom silom o gumeni kotač koji rotira brzinom od 200 okretaja u minuti. Pijesak (silicijev oksid - SiO_2) slobodno pada iz komore kroz sapnicu na dodirnu površinu uzorka i rotirajućeg kotača te uzrokuje abrazijsko trošenje površine uzorka. Opterećenje tijekom ispitivanja iznosilo je 45 N, a cijeli proces trajao je 60 s.

Na slici 4.3 prikazan je uzorak postavljen u čeljust naprave i prislonjen uz gumeni kotač.



Slika 4.3 Prikaz uzorka postavljenog u čeljust naprave neposredno prije početka ispitivanja

Uzorcima je određena masa prije i nakon ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje. Mjerenje mase provedeno je na uređaju prikazanom na slici 4.4, s osjetljivošću mjerenja 0,001 g.



Slika 4.4 **Mjerna vaga „Metler B5C 1000“**

4.2.1. Rezultati ispitivanja abrazijskog trošenja

U tablici 4.1 prikazani su rezultati dobiveni tijekom ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje uzoraka hrasta. Kod uzoraka od 1 do 3 trošenju su podvrgnuti radijalni i tangencijalni presjek u smjeru koji je paralelan s vlakancima. Svaki presjek ispitan je dva puta, pri čemu se pazilo da smjerovi trošenja, jedan u odnosu na drugi, budu zakrenuti za 180°.

Uzorci od 4 do 6 ispitani su u poprečnom i tangencijalnom presjeku. U poprečnom presjeku smjer abrazijskog trošenja bio je paralelan s godovima, a u tangencijalnom okomit na vlakanca. Kao i kod prethodne skupine uzoraka, kod svakog presjeka trošenje je provedeno u dva smjera.

Kod uzoraka od 7 do 9 ispitani su radijalni i poprečni presjek. U radijalnom presjeku smjer abrazijskog trošenja bio je okomit na vlakanca, a u poprečnom smjeru, smjer trošenja bio je okomit na godove. I ovdje je svaki presjek ispitan dva puta sa zakretanjem od 180°.

Na isti način provedeno je ispitivanje drugih dviju vrsta drva. U tablici 4.2 prikazani su rezultati za abrazijsko trošenje jasena, a u tablici 4.3 rezultati za trošenje oraha.

Tablica 4.1 Gubitak mase hrasta u svakom presjeku

Broj uzorka	Gubitak mase, Δm u g			
	radijalni presjek $\parallel$ s vlakancima		tangencijalni presjek $\parallel$ s vlakancima	
	smjer 1	smjer 2	smjer 1	smjer 2
1	0,0423	0,0225	0,0199	0,0121
2	0,0444	0,0354	0,0757	0,0204
3	0,0479	0,024	0,0215	0,0185
$\bar{x}$	0,0449	0,0273	0,0390	0,0170
	tangencijalni presjek $\perp$ na vlakanca		poprečni presjek $\parallel$ s godovima	
	smjer 1	smjer 2	smjer 1	smjer 2
4	0,039	0,0203	0,0032	0,0019
5	0,0676	0,0224	0,002	0,0005
6	0,0369	0,0176	0,0055	0,0025
$\bar{x}$	0,0478	0,0185	0,0036	0,0016
	poprečni presjek $\perp$ na godove		radijalni presjek $\perp$ na godove	
	smjer 1	smjer 2	smjer 1	smjer 2
7	0,0089	0,00185	0,0126	0,037
8	0,0079	0,0096	0,0269	0,0415
9	0,0079	0,0112	0,0149	0,0402
$\bar{x}$	0,0082	0,0131	0,0181	0,0396

Tablica 4.2 Gubitak mase jasena u svakom presjeku

Broj uzorka	Gubitak mase, Δm u g			
	radijalni presjek $\parallel$ s vlakancima		tangencijalni presjek $\parallel$ s vlakancima	
	smjer 1	smjer 2	smjer 1	smjer 2
1	0,0482	0,0191	0,0166	0,0037
2	0,0323	0,0163	0,0217	0,0094
3	0,0465	0,0234	0,0193	0,0092
$\bar{x}$	0,0423	0,0196	0,0192	0,0074
	tangencijalni presjek $\perp$ na vlakanca		poprečni presjek $\parallel$ s godovima	
	smjer 1	smjer 2	smjer 1	smjer 2
4	0,013	0,03	0,011	0,0053
5	0,0468	0,0187	0,0132	0,0117
6	0,0115	0,0099	0,0186	0,012
	0,0238	0,0195	0,0143	0,0097
$\bar{x}$	poprečni presjek $\perp$ na godove		radijalni presjek $\perp$ na vlakanca	
	smjer 1	smjer 2	smjer 1	smjer 2
7	0,0065	0,0104	0,0081	0,0375
8	0,00197	0,0036	0,0299	0,0333
9	0,0131	0,012	0,0249	0,0436
$\bar{x}$	0,0131	0,0087	0,0210	0,0381

Tablica 4.3 Gubitak mase oraha u svakom presjeku

Broj uzorka	Gubitak mase, Δm u g			
	radijalni presjek $\parallel$ s vlakancima		tangencijalni presjek $\parallel$ s vlakancima	
	smjer 1	smjer 2	smjer 1	smjer 2
1	0,049	0,037	0,0134	0,0066
2	0,043	0,0021	0,0195	0,0005
3	0,0481	0,0221	0,0064	0,0151
$\bar{x}$	0,0467	0,0204	0,0131	0,0074
	tangencijalni presjek $\perp$ na vlakanca		poprečni presjek $\parallel$ s godovima	
	smjer 1	smjer 2	smjer 1	smjer 2
4	0,0123	0,0327	0,0025	0,011
5	0,0416	0,0244	0,0038	0,0147
6	0,0242	0,0262	0,0081	0,0167
$\bar{x}$	0,0260	0,0278	0,0048	0,0141
	poprečni presjek $\perp$ na godove		radijalni presjek $\perp$ na vlakanca	
	smjer 1	smjer 2	smjer 1	smjer 2
7	0,0125	0,0019	0,0221	0,0195
8	0,0089	0,0006	0,021	0,0405
9	0,0109	0,0076	0,0269	0,0175
$\bar{x}$	0,0108	0,0034	0,0233	0,0258

4.3. Određivanje gustoće

Gustoća svih uzoraka određena je prema normi ISO – 13061 – 2. Najprije je određen volumen uzoraka mjerenjem širine, duljine i visine uzoraka pomičnim mjerilom, a zatim je uzorcima izmjerena masa na mjernoj vagi prikazanoj na slici 4.4. Da bi se u uzorcima odredio maseni udio vlage, kao i gustoća u apsolutno suhom stanju, uzorci su zagrijavani u peći pri temperaturi od $103^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$ do konstantne mase, odnosno potpune eliminacije vlage iz drva. Nakon toga uzorcima je ponovno izmjeren volumen.

Gustoća uzoraka izračunata je prema izrazu (1.2) i prikazana je u tablici 4.5.

Udio vlage uzoraka pri ispitivanju određen je prema izrazu (1.5), a prikaz je dan u tablici 4.6. U tablici 4.7 prikazane su vrijednosti gustoće uzoraka u apsolutno suhom stanju koje su određene izrazom (1.3).

Prema izrazu (1.4) izračunata je vrijednost gustoće ispitanih uzoraka za 12 % vlage. Prikaz je dan u tablici 4.8.

Tablica 4.5 Gustoća uzoraka pri ispitivanju

	hrast	jasen	orah
Gustoća $\rho_w, \text{g/cm}^3$	0,756	0,641	0,673

Tablica 4.6 Udio vlage u uzorcima pri ispitivanju

	hrast	jasen	orah
w, %	6,9596	7,2296	6,9786

Tablica 4.7 Gustoća uzoraka u apsolutno suhom stanju

	hrast	jasen	orah
$\rho_0, \text{g/cm}^3$	0,732	0,631	0,629

Tablica 4.8 Gustoća uzoraka pri 12% vlage

	hrast	jasen	orah
$\rho_{12}, \text{g/cm}^3$	0,794	0,672	0,707

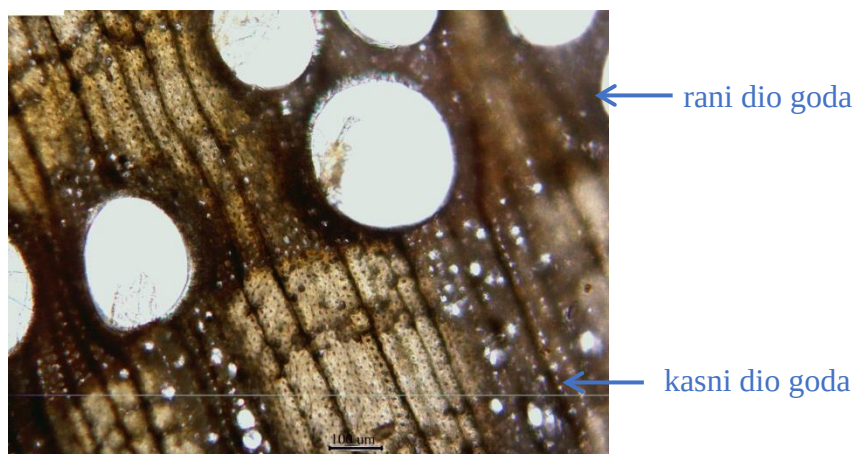
4.4 Analiza mikrostrukture

Analiza mikrostrukture provedena je na Botaničkom zavodu Biološkog odsjeka PMF-a u Zagrebu. Analizirana je mikrostruktura u tri karakteristična presjeka – poprečnom, radijalnom i tangencijalnom. Uzorci su propisno pripremljeni i analizirani na optičkom mikroskopu AXIO s kamerom TOUPCAM pri različitim povećanjima (slika 4.5).

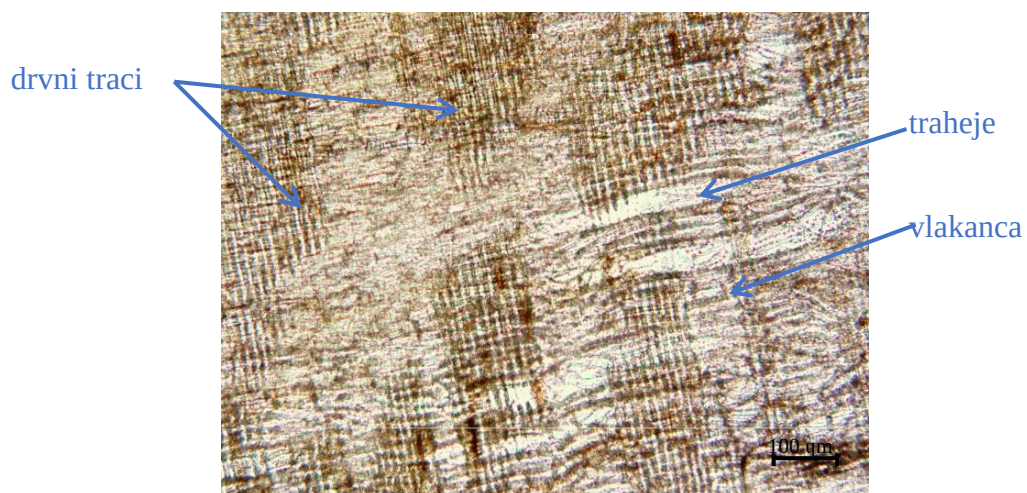


Slika 4.5 Optički mikroskop AXIO

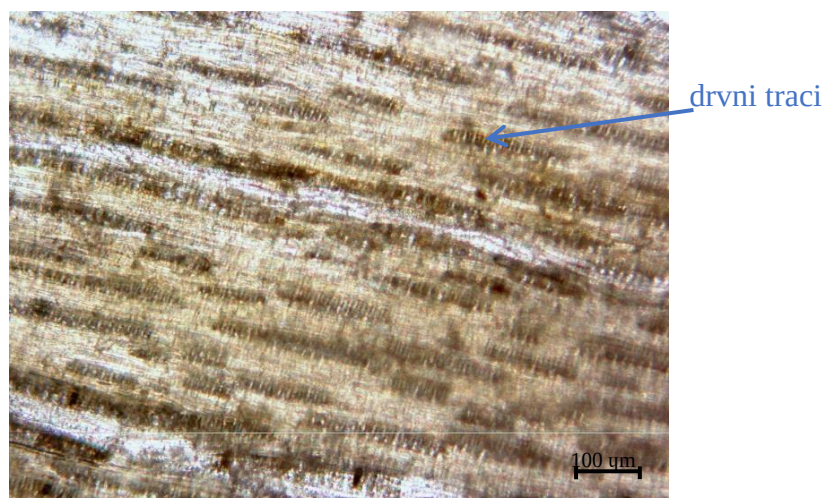
Fotografije mikrostrukture prikazane su na slikama 4.6 – 4.14



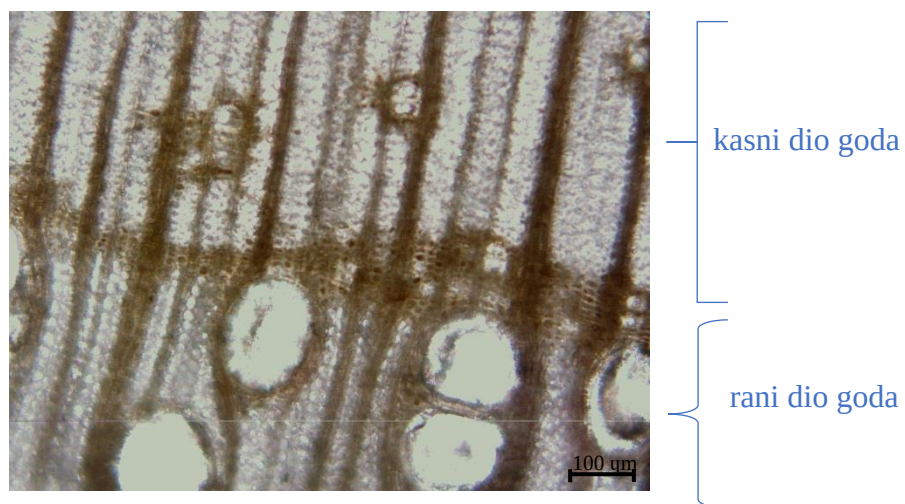
Slika 4.6 Poprečni presjek hrasta



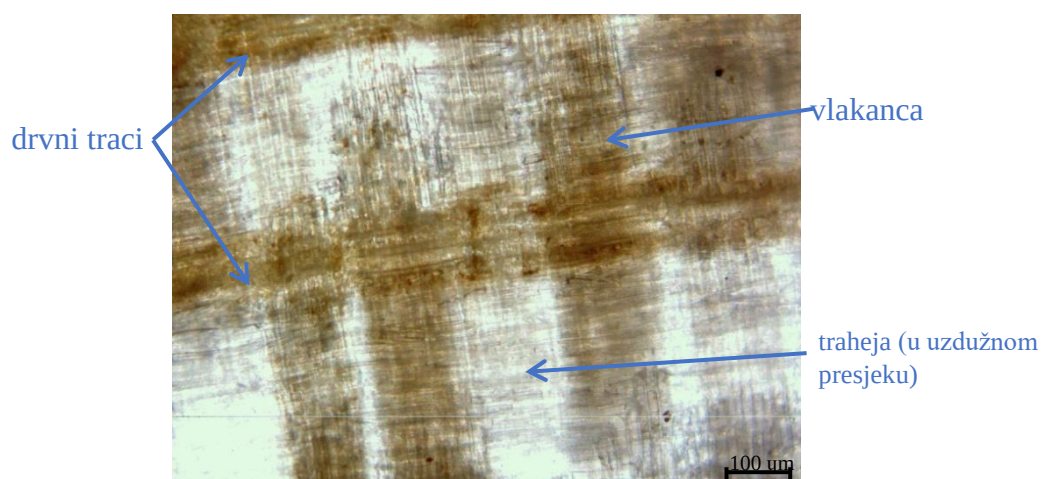
Slika 4.7 Radijalni presjek hrasta



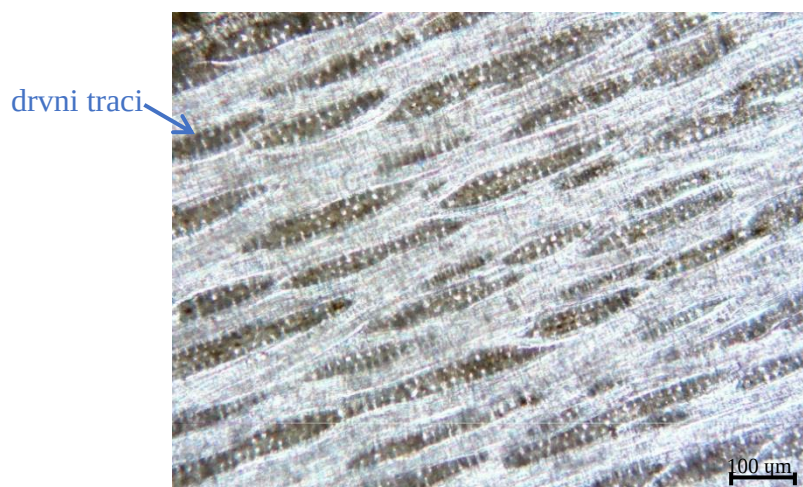
Slika 4.8 Tangencijalni presjek hrasta



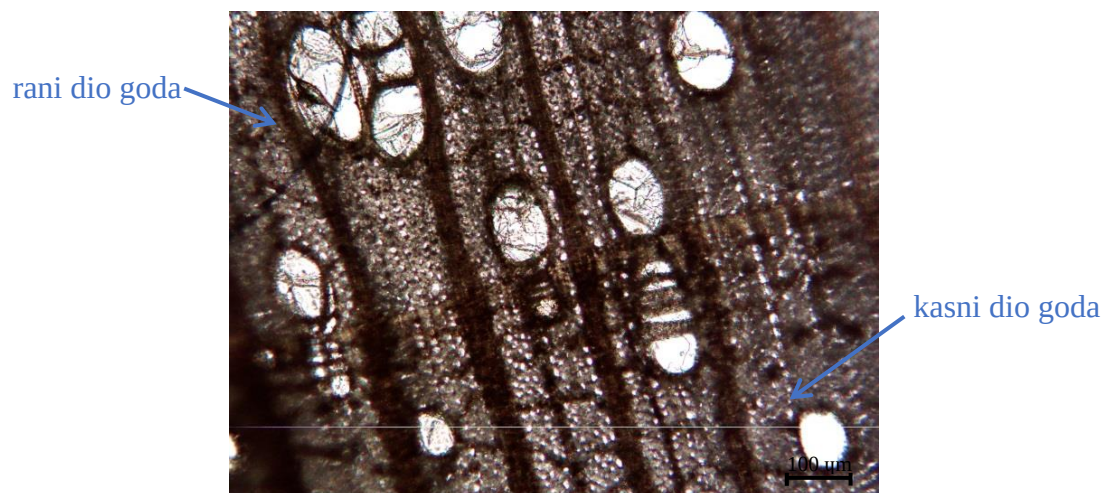
Slika 4.9 Poprečni presjek jasena



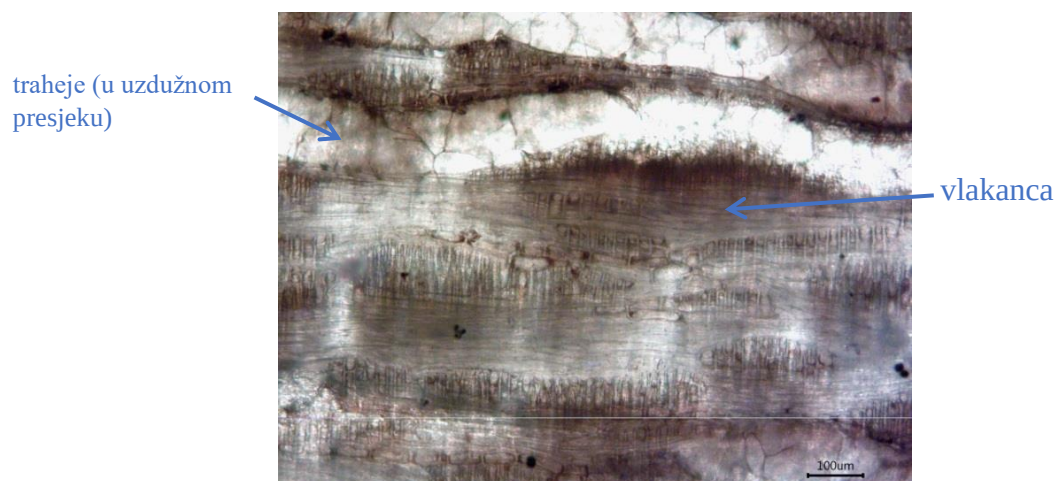
Slika 4.10 Radijalni presjek jasena



Slika 4.11 Tangencijalni presjek jasena



Slika 4.12 Poprečni presjek oraha



Slika 4.13 Radijalni presjek oraha



Slika 4.14 Tangencijalni presjek oraha

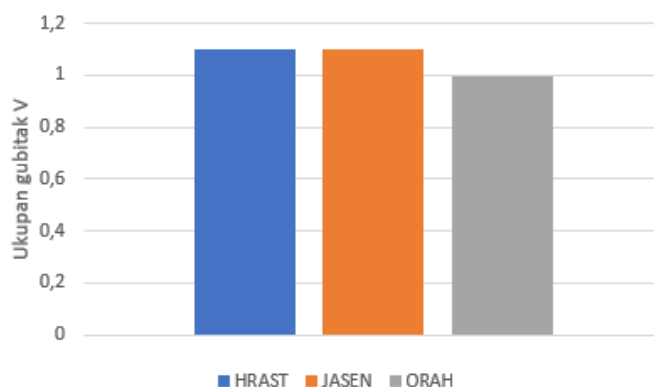
5. ANALIZA REZULTATA

S obzirom na razlike u gustoći ispitivanih vrsta drva, radi mogućnosti međusobne usporedbe ispitanih uzoraka, vrijednosti gubitaka mase preračunati su u vrijednosti gubitaka volumena prema izrazu (1.11)

$$V_w = \frac{m_w}{\rho_w}, \text{ cm}^3 \quad (1.11)$$

Na slici 5.1 prikazan je ukupan gubitak volumena pri ispitivanju abrazijske otpornosti za sve tri vrste, kumulativno u svim presjecima i smjerovima.

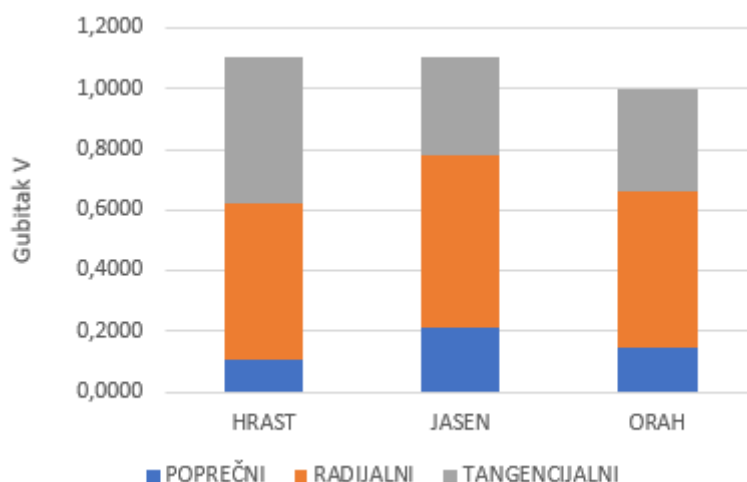
Najmanji ukupni gubitak volumena izmjeren je kod oraha, a hrast i jasen troše se podjednako.



Slika 5.1 Ukupni gubitak volumena

Na slici 5.2 vidi se za svaku ispitivanu vrstu kako su se trošili poprečni, radijalni i tangencijalni presjeci.

Sve tri analizirane vrste drva pokazale su najveću otpornost abrazijskom trošenju u poprečnom presjeku, dok se najveći gubitak volumena ostvario u radijalnom presjeku. Najmanji gubitak volumena u poprečnom presjeku zabilježen je kod hrasta, a najveći kod jasena. U radijalnom presjeku sve tri vrste su se trošile podjednako. U tangencijalnom presjeku najmanje se trošio jasen, a najveće trošenje zabilježeno je kod hrasta.

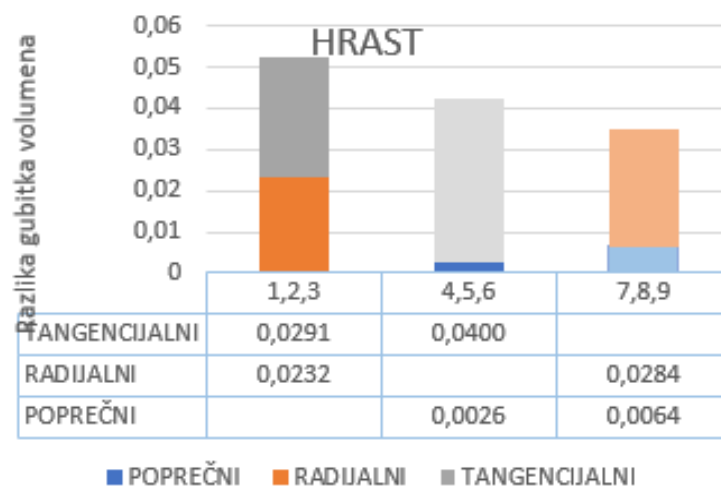


Slika 5.2 Kumulativan gubitak volumena po presjecima

S obzirom na izrazitu anizotropnost strukture, razmatran je i utjecaj usmjerenosti drvnih vlakana i godova na intenzitet abrazijskog trošenja. Za sve vrste pojedinačno određena je apsolutna razlika gubitka volumena između trošenja u dva nasuprotna smjera, na svakom od tri ispitana presjeka – poprečnom, radijalnom i tangencijalnom. Također je uzet u obzir položaj smjera trošenja s obzirom na vlakanca (paralelno i okomito na vlakanca) te godove (paralelno i okomito na godove).

Na slici 5.3 prikazane su apsolutne razlike u gubitku volumena kod hrasta.

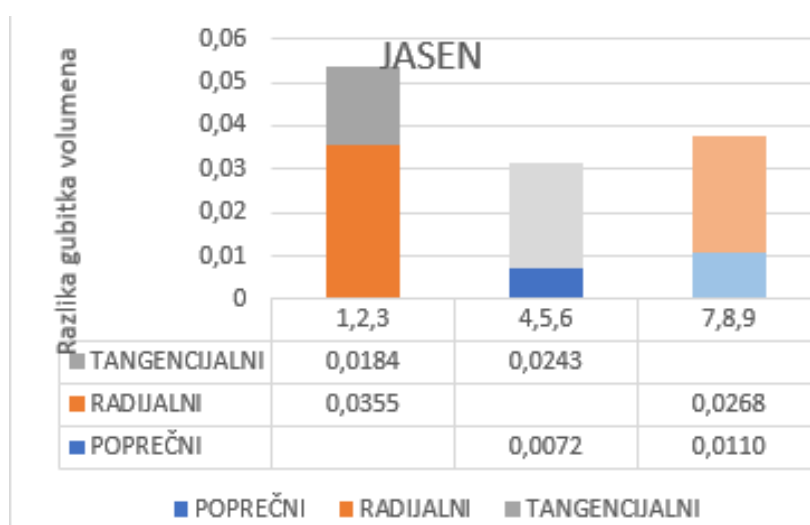
Najveća razlika, tj najveći utjecaj na intenzitet trošenja izmjerena je u tangencijalnom presjeku kad je smjer trošenja bio okomit na vlakanca. Najmanja razlika izmjerena je u poprečnom presjeku kad je smjer trošenja bio paralelan s godovima. Pokazalo se da je trošenje u poprečnom presjeku malo osjetljivo na promjenu smjera, dok je trošenje u radijalnom i tangencijalnom presjeku vrlo osjetljivo.



Slika 5.3 Utjecaj anizotropnosti strukture na intenzitet abrazijskog trošenja hrasta

Na slici 5.4 prikazane su apsolutne razlike u gubitku volumena kod jasena

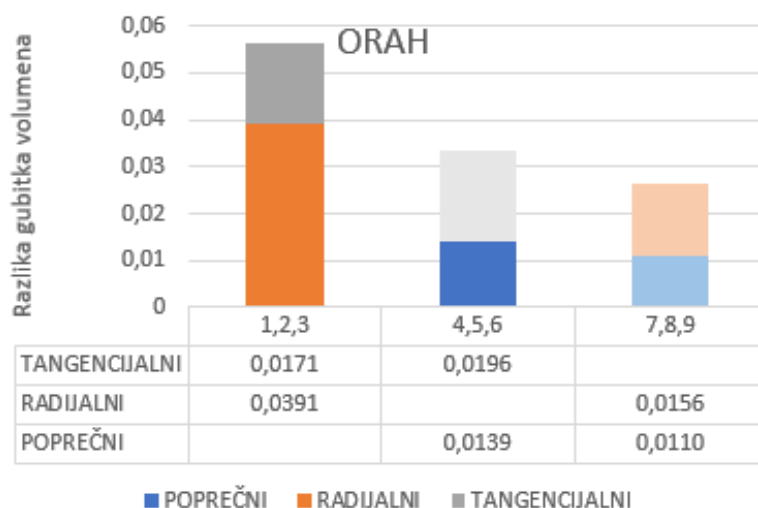
Najveći utjecaj intenziteta trošenja izmjeren je u radijalnom presjeku kad je smjer trošenja bio paralelan s vlakancima. Najmanja razlika izmjerena je, kao i kod hrasta, u poprečnom presjeku kad je smjer trošenja bio paralelan s godovima. Ponovno se pokazalo da je trošenje u poprečnom presjeku malo osjetljivo na promjenu smjera, dok je trošenje u radijalnom i tangencijalnom presjeku vrlo osjetljivo.



Slika 5.4 Utjecaj anizotropnosti strukture na intenzitet abrazijskog trošenja jasena

Na slici 5.5 prikazane su apsolutne razlike u gubitku volumena kod oraha.

I ovdje se pokazalo, kao i kod jasena, da je najveći utjecaj intenziteta trošenja izmjeren u radijalnom presjeku kad je smjer trošenja paralelan s vlakancima. Najmanja razlika izmjerena je u poprečnom presjeku kad je smjer trošenja bio okomit na godove. Pokazalo se da je kod oraha trošenje u sva tri presjeka osjetljivo na promjenu smjera trošenja.

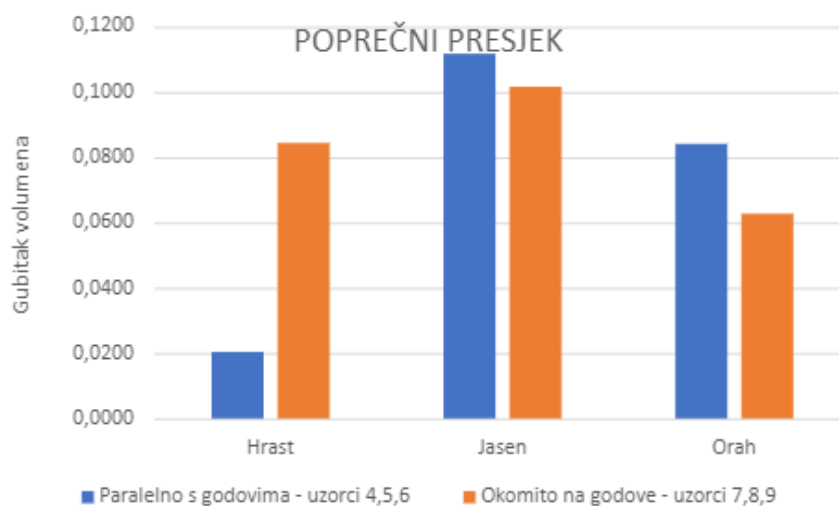


Slika 5.5 Utjecaj anizotropnosti strukture na intenzitet abrazijskog trošenja oraha

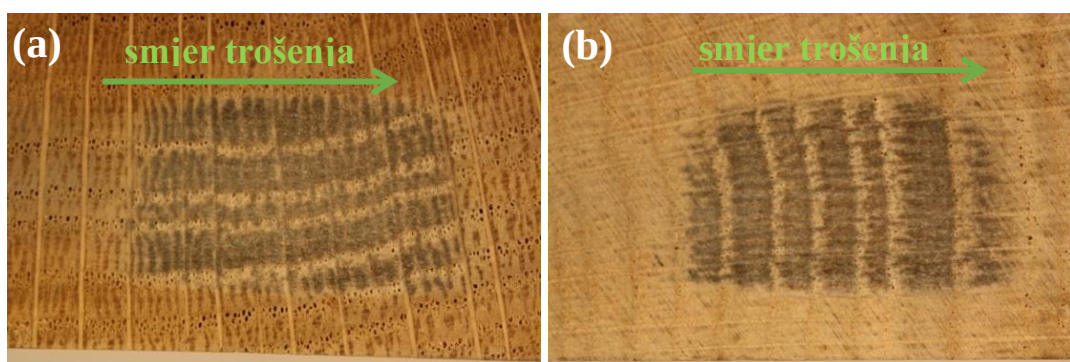
Na slici 5.6 prikazana je razlika u intenzitetu trošenja na poprečnom presjeku paralelno i okomito na godove kod svih vrsta drva.

Najveća razlika između trošenja u smjeru paralelnom s godovima i okomitom na godove uočena je kod hrasta. Također je zanimljivo što je trošenje u smjeru paralelnom s godovima znatno manje, nego u smjeru okomitom na godove. Kod druge dvije vrste intenzitet trošenja veći je u smjeru paralelnom s godovima, ali je ta razlika manje izražena.

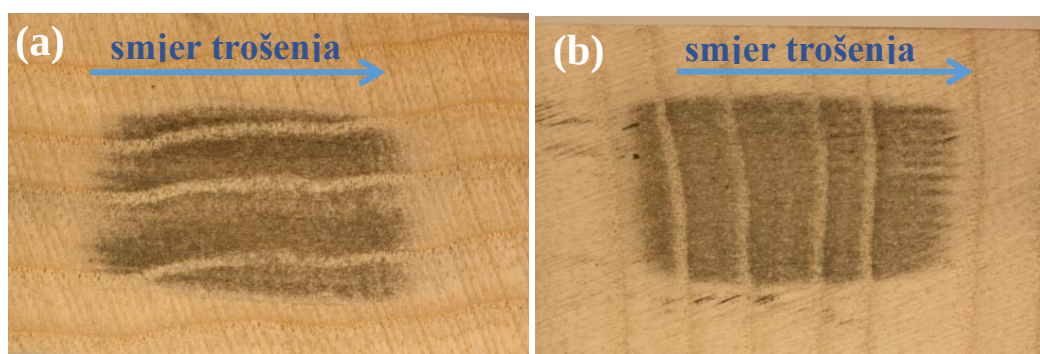
Na slikama od 5.7 do 5.9 prikazani su tragovi trošenja za sve vrste u poprečnom presjeku



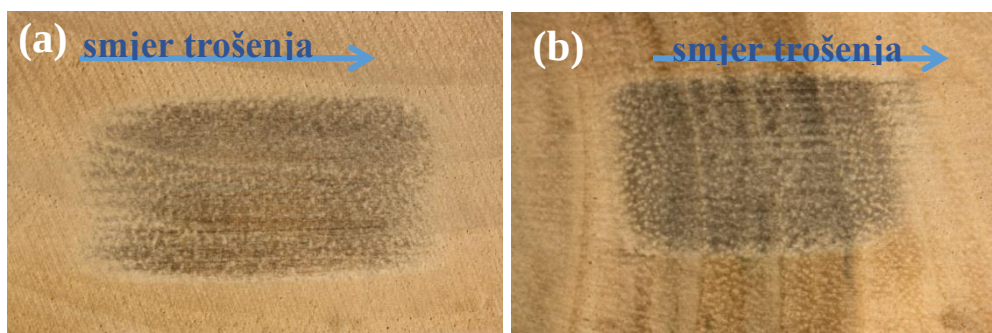
Slika 5.6 Razlika trošenja poprečnog presjeka između trošenja u smjeru paralelnom i okomitom na godove



Slika 5.7 Hrast, poprečni presjek – godovi paralelni sa smjerom trošenja (a), godovi okomiti na smjer trošenja (b)



Slika 5.8 Jasen, poprečni presjek – godovi paralelni sa smjerom trošenja(a), godovi okomiti na smjer trošenja (b)

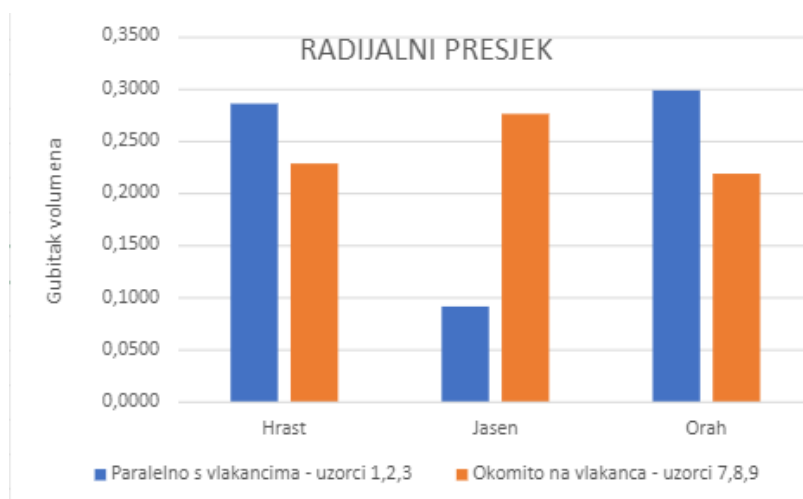


Slika 5.9 Orah, poprečni presjek – godovi paralelni sa smjerom trošenja (a), godovi okomiti na smjer trošenja (b)

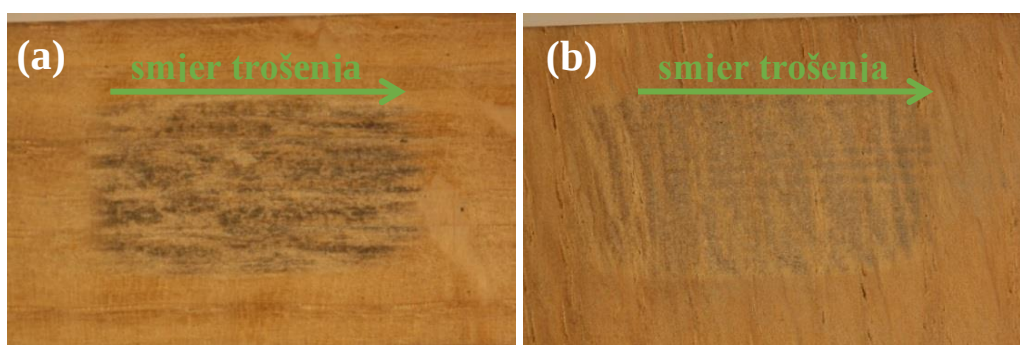
Na slici 5.10 vidi se razlika u intenzitetu trošenja na radijalnom presjeku, paralelno i okomito na vlakanca kod svih vrsta drva.

Najveća razlika između trošenja u smjeru paralelnom s vlakancima i okomitom na vlakance uočena je kod jasena. Zanimljivo je što je trošenje u smjeru paralelnom s vlakancima znatno manje, nego u smjeru okomitom na vlakanca, a kod druge dvije vrste intenzitet trošenja veći je u smjeru paralelnom s vlakancima. Kod hrasta i oraha razmatrana razlika je puno manje izražena.

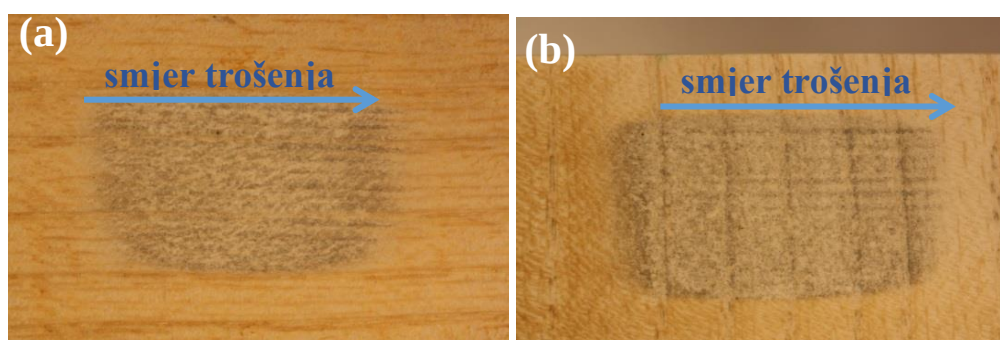
Na slikama od 5.11 do 5.13 prikazani su tragovi trošenja za sve vrste u radijalnom presjeku.



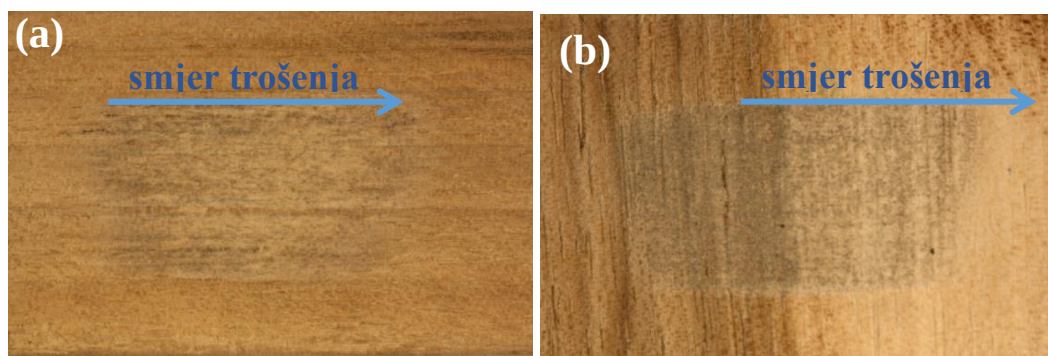
Slika 5.10 Razlika trošenja radijalnog presjeka između trošenja u smjeru paralelnom i okomitom na godove



Slika 5.11 Hrast, radijalni presjek – smjer trošenja paralelan s vlakancima (a), smjer trošenja okomit na vlakanca (b)



Slika 5.12 Jasen, radijalni presjek – smjer trošenja paralelan s vlakancima (a), smjer trošenja okomit na vlakanca (b)

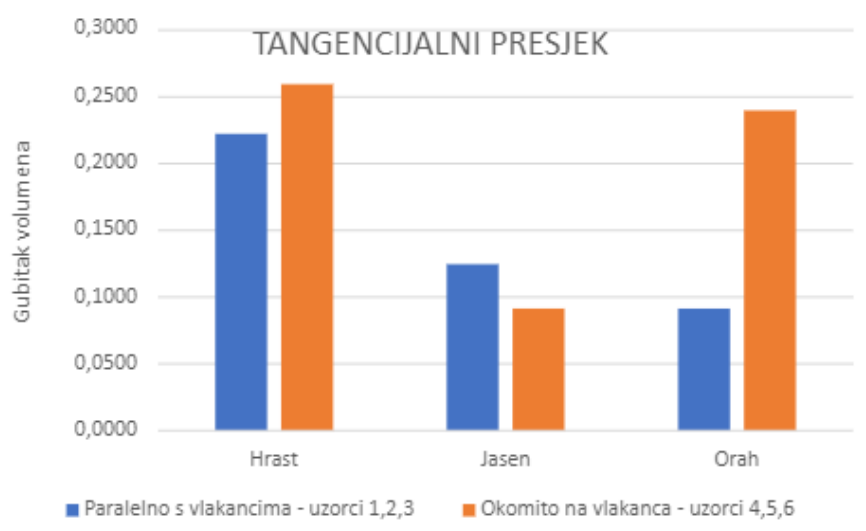


Slika 5.13 Orah, radijalni presjek – smjer trošenja paralelan s vlakancima (a), smjer trošenja okomit na vlakanca (b)

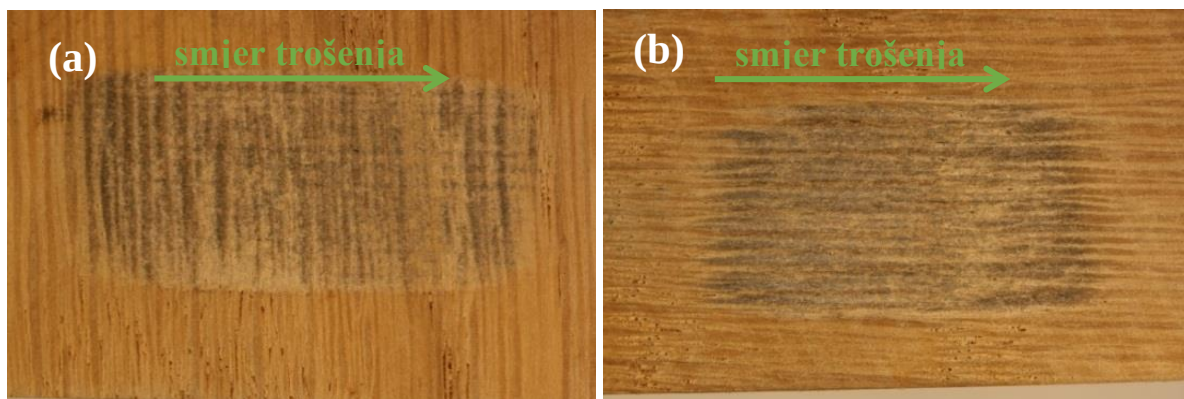
Na slici 5.14 vidi se razlika u intenzitetu trošenja na tangencijalnom presjeku paralelno s vlakancima i okomito na vlakanca, kod svih vrsta drva.

Najveća razlika između trošenja u smjeru paralelnom s vlakancima i okomitom na vlakanca uočena je kod oraha. Trošenje u smjeru paralelnom s vlakancima je znatno manje, nego u smjeru okomitom na vlakanca. Kod hrasta je također manje trošenje izmjereno u smjeru paralelnom s vlakancima, dok je kod jasena situacija obrnuta.

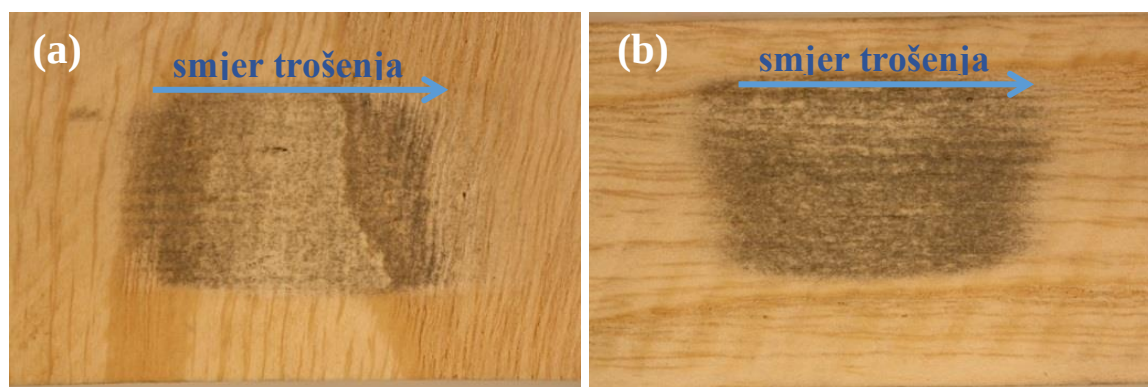
Slikama 5.15 – 5.17 prikazani su tragovi trošenja za sve vrste u tangencijalnom presjeku.



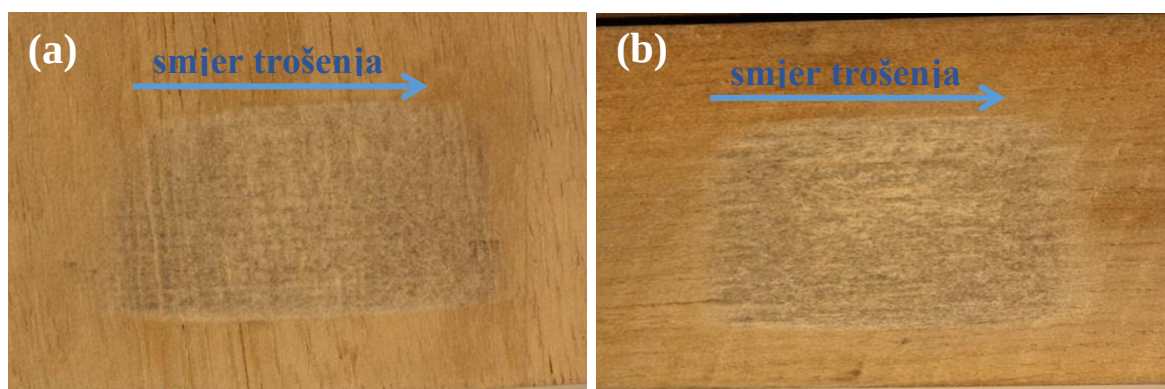
Slika 5.14 Razlika trošenja tangencijalnog presjeka između trošenja u smjeru paralelnom i okomitom na godove



Slika 5.15 Hrast, tangencijalni presjek - smjer trošenja paralelan s vlakancima (a), smjer trošenja okomit na vlakanca (b)



Slika 5.16 Jasen, tangencijalni presjek - smjer trošenja paralelan s vlakancima (a), smjer trošenja okomit na vlakanca (b)



Slika 5.17 Orah, tangencijalni presjek – smjer trošenja paralelan s vlakancima (a), smjer trošenja okomit na vlakanca (b)

6. ZAKLJUČCI

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

- od svih ispitanih vrsta drva, orah je pokazao najveću otpornost na abrazijsko trošenje, a trošenje hrasta i jasena je podjednako.
- postoje značajne razlike u intenzitetu trošenja između poprečnog, radijalnog i tangencijalnog presjeka kod svih vrsta. Najveću otpornost abrazijskom trošenju pokazuje kod svih vrsta poprečni presjek, a najmanju radijalni presjek.
- najmanji utjecaj smjera trošenja na iznos trošenja hrasta javlja se u poprečnom presjeku kada je smjer trošenja paralelan s godovima, a najveći utjecaj izmjeren je u tangencijalnom presjeku kad je smjer trošenja bio okomit na vlakanca.
- najveći utjecaj intenziteta trošenja ovisno o smjeru trošenja jasena izmjeren je u radijalnom presjeku kad je smjer trošenja bio paralelan s vlakancima, a najmanji, kao i kod hrasta, u poprečnom presjeku kad je smjer trošenja bio paralelan s godovima.
- najveći utjecaj intenziteta trošenja na iznos trošenja oraha izmjeren u radijalnom presjeku kad je smjer trošenja paralelan s vlakancima, a najmanja razlika izmjerena je u poprečnom presjeku kad je smjer trošenja bio okomit na godove.
- najmanju osjetljivost na promjenu smjera za sve tri ispitane vrste pokazuje poprečni presjek.
- na intenzitet trošenja u poprečnom presjeku bitno utječe kut između smjera trošenja i linije goda (0° i 90°). U radijalnom i tangencijalnom presjeku veliki utjecaj na intenzitet trošenja ima kut između smjera trošenja i vlakanca (0° i 90°).
- trošenje hrasta u poprečnom presjeku znatno je manje kada je kut između smjera trošenja i linije goda 0° , nego kada je 90° . Kod oraha i jasena situacija je obrnuta, ali je razlika manje izražena.
- u radijalnom presjeku je trošenje jasena izrazito manje kada je kut smjera trošenja i vlakanca 0° . Kod hrasta i oraha trošenje je nešto manje intenzivno pri kutu smjera trošenja od 90° .
- u tangencijalnom presjeku trošenje hrasta i oraha manje je intenzivno kada je kut smjera trošenja i vlakanca 0° , a kod od jasena je situacija obrnuta.

LITERATURA

- [1] Recenzirani materijali za predavanje
https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1496408466-0-drvo-skripta.pdf
- [2] Drvo, https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1401970934-0-drvo_14.pdf
- [3] Wood, <https://www.explainthatstuff.com/wood.html>
- [4] Užar, J., Drvo materijal u suglasnosti s prirodom, Tehnički glasnik,
<https://hrcak.srce.hr/109570> , 5.2.2020
- [5] Rowell, R. M.: Handbook of wood chemistry and wood composites, CRC Press, 2005.
- [6] Gordić, Milan V., Sinteza i mehanička svojstva biomorfne SiC keramike,
<https://goo.gl/1hM3zS>
- [7] <https://www.delta-intkey.com/citeswood/en/intro.htm>, 6.2.2020
- [8] <http://www.microlabgallery.com/gallery/Pinus%20PonderosaCS40X.aspx>, 6.2.2020.
- [9] <http://sitn.hms.harvard.edu/art/2017/oak-wood-cross-section/>, 6.2.2020.
- [10] Structure and arrangement of pits,
https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=19204
- [11] <https://glossary.periodni.com/glosar.php?hr=celuloza>, 8.2.2020.
- [12] Structure and Properties of Hemicellulose Hemicellulose,
<http://web.nchu.edu.tw/pweb/users/taiwanfir/lesson/10393.pdf>
- [13] Wood and moisture,
<http://www.wood-database.com/wood-articles/wood-and-moisture/>, 8.2.2020.
- [14] Drvo, Enciklopedija leksikarskog zavoda, M.Krleža,
<http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=16354>
- [15] Utjecaj mikrostrukture na abrazijska svojstva drva,
http://repozitorij.fsb.hr/7789/1/Trupina_2017_diplomski.pdf
- [16] I. Horvat, I. Tehnologija drva, Drvnoindustrijski priručnik, Tehnička knjiga, Zagreb

- [17] http://www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/interactive_charts/strength-toughness/basic.html, 8.2.2020.
- [18] Ispitivanje tvrdoće drveta,
http://www.gradjevinarstvo.rs/tekstovi/1012/820/ispitivanje_tvrdoce_drveta, 8.2.2020.
- [19] <https://www.hoskinghardwood.com/Department/Hardwood-Floors/Janka-Wood-Hardness-Chart.aspx?dId=7&pageId=12>
- [20] HRN EN 1534:2010 Određivanje otpornosti na utiskivanje (Brinell)-metoda ispitivanja
- [21] Abrazijsko trošenje,
https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1333523730-0-im5_trosenje12.pdf
- [22] <https://qinsunlab2016.zohosites.com/the-operating-instructions-of-taber-abrasion-test.html>, 10.2.2020.
- [23] https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-the-ASTM-G-65-dry-sand-rubber-wheel-abrasion-test_fig2_232380196, 10.2.2020.