

# Otpornost na abrazijsko trošenje subfosilnog drva hrasta

---

**Barišić, Josip**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2018**

*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:235:164310>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-27**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Josip Barišić**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentori:

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

Student:

Josip Barišić

Zagreb, 2018.

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

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

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji koja mi je omogućila ovaj studij i na pruženoj podršci tijekom cijelog studija.

Zahvaljujem se djevojci, kolegama i prijateljima na pruženoj podršci tijekom cijelog studija.

Josip Barišić



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:	
Ur. broj:	

### DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **JOSIP BARIŠIĆ** Mat. br.: **0069062678**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Otpornost na abrazijsko trošenje subfosilnog drva hrasta**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Abrasive wear resistance of subfossil oak wood**

Opis zadatka:

Zbog jedinstvene kombinacije fizikalnih, mehaničkih i tehnoloških svojstava drvo je jedan od prvih, ali i danas vrlo zanimljivih tehničkih materijala. Drvo je hijerarhijski strukturirani kompozitni materijal, a s obzirom na svoje biološko podrijetlo, podložno je biološkoj razgradnji ako nije prikladno zaštićeno. U određenim uvjetima primjene drvo može opstati kroz dugo vremensko razdoblje bez značajnijeg smanjenja svojstava.

U radu je potrebno odrediti abrazijsku otpornost subfosilnog drva hrasta lužnjaka izvađenog iz korita rijeke Save na području Bosanske Posavine. S obzirom na izrazitu ortotropnost drvene strukture i svojstava, ispitivanje abrazijskog trošenja treba provesti na sva tri karakteristična presjeka: poprečnom, radijalnom i tangencijalnom. Dobivene rezultate potrebno je staviti u korelaciju sa starošću i gustoćom uzoraka.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadao:  
27. rujna 2018.

Rok predaje rada:  
29. studenog 2018.

Predviđeni datum obrane:  
03. prosinca 2018.  
06. prosinca 2018.  
07. prosinca 2018.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Vera Rede

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD.....	1
2. STRUKTURA DRVA .....	2
2.1. Makroskopska građa drva .....	2
2.1.1. Poprečni presjek.....	3
2.1.2. Radijalni presjek .....	7
2.1.3. Tangencijalni presjek .....	8
2.2. Kemijski sastav drva .....	8
3. ANATOMSKA GRAĐA DRVA .....	11
3.1. Podjela drva.....	11
3.2. Stanica.....	12
3.3. Vrste stanica.....	15
3.3.1. Traheide .....	15
3.3.2. Članak traheje .....	17
3.3.3. Drvna vlakanca .....	18
3.3.4. Stanice parenhima .....	18
3.3.5. Sekretnice .....	19
3.4. Mikrostruktura četinjača .....	20
3.5. Mikrostruktura listača .....	21
4. TEHNIČKA SVOJSTVA DRVA.....	24
4.1. Fizička svojstva.....	24
4.2. Mehanička svojstva.....	30
4.3. Fizičko-kemijska svojstva.....	38
4.4. Estetska svojstva .....	39
5. EKSPERIMENTALNI DIO .....	40
5.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja .....	40
5.2. Materijal za ispitivanje.....	40
5.3. Priprema uzoraka .....	45
5.4. Određivanje gustoće.....	47
5.5. Ispitivanje otpornosti uzoraka na abrazijsko trošenje .....	49
5.6. Analiza rezultata.....	54
6. ZAKLJUČAK.....	58
LITERATURA.....	59
PRILOZI.....	61

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Osnovni presjeci drva; A-poprečni presjek, B-radijalni presjek, C-tangencijalni presjek [3].....	2
Slika 2.	Poprečni presjek polovice debla [3].....	4
Slika 3.	Poprečni presjek A-četinjače( <i>Pinus resinosa</i> ),B-listače ( <i>Quercus rubra</i> ) [5].....	4
Slika 4.	A: 1- prekinuti god, 2-normalni god; B: 1- lažni god, 2-kasno drvo normalnog završetka [7] .....	5
Slika 5.	Makroskopski prikaz drva [8] .....	6
Slika 6.	Radijalni presjek, drvo brijest [10].....	7
Slika 7.	Tangencijalni presjek drva jasen [10] .....	8
Slika 8.	Prosječni kemijski sastav stijenki drva četinjača i listača [12].....	9
Slika 9.	Pojednostavljena formula celuloze [13] .....	9
Slika 10.	Raspored i maseni udio lignina, celuloze i hemiceluloze u staničnoj stijenci bora [5] .....	10
Slika 11.	Opći oblik stabla četinjača (A) i listača (B)[5].....	11
Slika 12.	Prostorni prikaz stanice i stijenki [4].....	12
Slika 13.	Aksijalne traheide ranog i kasnog drva [6] .....	14
Slika 14.	Trahealni niz [9] .....	16
Slika 15.	Članci traheja: a- hrast ( <i>Quercus</i> )- rano drvo, b- jasen ( <i>Fraxinus</i> ), c- hrast ( <i>Quercus</i> ) [14] .....	16
Slika 16.	Aksijalni parenhim [15].....	17
Slika 17.	Smolenica [16] .....	17
Slika 18.	Poprečni presjek drva četinjače ( <i>Picea glauca</i> ) [5].....	18
Slika 19.	Prostorni prikaz građe četinjača[4].....	19
Slika 20.	Prostorni prikaz građe listača [17].....	19
Slika 21.	Poprečni presjek raznih vrsta drva koji prikazuju niz aksijalnih parenhima [5]...	21
Slika 22.	Promjena volumena ovisno o smjeru [4].....	26
Slika 23.	Utezanje i distorzija drva uslijed sušenja [20].....	26
Slika 24.	Vlačna čvrstoća u tri smjera[23] .....	29
Slika 25.	Tlačna čvrstoća u tri smjera [23].....	31
Slika 26.	Ovisnost smične čvrstoće i deformacije [23] .....	31
Slika 27.	Prikaz stadija kod savijanja [23] .....	33
Slika 28.	Tvrdoća po Brinellu [25].....	34
Slika 29.	Usporedba mjerenja tvrdoće po Brinellu i po Janki [26] .....	35
Slika 30.	Jedna od najstarijih drvenih crkvi u Norveškoj [29] .....	38
Slika 31.	Bosna i Hercegovina sa susjednim državama i područje sa kojeg su uzorci izvađeni [30].....	41
Slika 32.	Svjetlosni mikroskop.....	42
Slika 33.	Makrostruktura poprečnog presjeka recentnog hrasta.....	43
Slika 34.	Makrostruktura poprečnog presjeka drva hrasta starosti 1840. Godina.....	43
Slika 35.	Makrostruktura poprečnog presjeka subfosilnog drva .....	43
Slika 36.	Mikrostruktura subfosilnog hrasta.....	44
Slika 37.	Osnovne osi simetrije i karakteristični presjeci drva [32].....	45
Slika 38.	Izrezivanje uzoraka.....	45
Slika 39.	Stolna brusilica i obrada uzorka .....	46
Slika 40.	Uzorci za određivanje gustoće .....	46
Slika 41.	Mjerna vaga .....	47

Slika 42.	Uređaj za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje „Taber abrader“ .....	48
Slika 43.	Uzorci za ispitivanje .....	49
Slika 44.	Ovisnost intenziteta trošenja uzorka 1 o kvaliteti brusnog papira.....	52
Slika 45.	Ovisnost intenziteta trošenja uzorka 2 o kvaliteti brusnog papira.....	53
Slika 46.	Ovisnost intenziteta trošenja uzorka 3 o kvaliteti brusnog papira.....	53
Slika 47.	Ovisnost intenziteta trošenja uzorka 1 o prosječnoj veličini abrazivnih čestica ...	54
Slika 48.	Ovisnost intenziteta trošenja uzorka 2 o prosječnoj veličini abrazivnih čestica ...	54
Slika 49.	Ovisnost intenziteta trošenja uzorka 3 o prosječnoj veličini abrazivnih čestica ...	55
Slika 50.	Ovisnost poprečnog presjeka sva tri uzorka o prosječnoj veličini abrazivnih čestica .....	55
Slika 51.	Ovisnost tangencijalnog presjeka sva tri uzorka o prosječnoj veličini abrazivnih čestica .....	56
Slika 52.	Ovisnost radijalnog presjeka sva tri uzorka o prosječnoj veličini abrazivnih čestica .....	56
Slika 53.	Ovisnost intenziteta trošenja presjeka uzoraka o gustoći uzorka za kvalitetu brusnog papira P120 .....	57
Slika 54.	Ovisnost intenziteta trošenja presjeka uzoraka o gustoći uzorka za kvalitetu brusnog papira P600 .....	57



## POPIS TABLICA

Tablica 1. Elementarni sastav drva.....	9
Tablica 2. Načini u postupci uvažavanja svojstava drva kao tehničkog materijala [19].....	22
Tablica 3. Koeficijenti toplinske vodljivosti $\lambda$ [21].....	27
Tablica 4. Vrijednosti vlačne čvrstoće u tangencijanom i radijalnom smjeru [24].....	30
Tablica 5. Vrijednosti savojne čvrstoće određenih domaćih vrsta drva [24] .....	33
Tablica 6. Metode ispitivanja drva na otpornost abrazijskog trošenja [28] .....	37
Tablica 7. Rezultati starosti uzoraka .....	42
Tablica 8. Srednja širina goda .....	45
Tablica 9. Rezultati gustoće uzoraka.....	48
Tablica 10. Brusni papiri korišteni za ispitivanje [33] .....	51
Tablica 11. Intenzitet trošenja uzorka 1 pri abrazijskom trošenju.....	51
Tablica 12. Intenzitet trošenja uzorka 2 pri abrazijskom trošenju.....	52
Tablica 13. Intenzitet trošenja uzorka 3 pri abrazijskom trošenju.....	52

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$t$	mm	Prosječna širina goda
$L$	mm	Mjerena dužina
$N$	-	Broj godova
$V_{Kd}$	mm <sup>3</sup>	Volumni udio zone kasnog drva
$\sum l$	mm	Zbroj širina kasnog drva
$\rho$	g/cm <sup>3</sup>	Gustoća
$m$	g	Masa
$V$	cm <sup>3</sup>	Volumen
$\omega$	%	Vlažnost drva
$m_{\omega}$	g	Masa u vlažnom stanju
$m_o$	g	Masa u apsolutno suhom stanju
$\delta$	mm	Dimenzije drva pri udjelu vode $w$
$\Delta_s$	mm	Dimenzije drva pri zasićenju biljnih stanica
$\lambda$	W/(m*K)	Koeficijent toplinske vodljivosti
$\sigma$	MPa	Vlačna čvrstoća
$F_{max}$	N	Maksimalna vlačna sila
$A_o$	mm <sup>2</sup>	Dimenzije početne površine poprečnog presjeka
$\sigma_t$	MPa	Tlačna čvrstoća
$F_{max}$	N	Maksimalna tlačna sila
$\sigma_{m\tau}$	N/mm <sup>2</sup>	Smična čvrstoća
$F_{max}$	N	Maksimalna smična sila
$b, l$	mm	Dimenzije smične površine
$\sigma_b$	N/mm <sup>2</sup>	Savojna čvrstoća
$F_{max}$	N	Maksimalna sila savijanja
$l$	mm	Razmak između oslonaca
$b$	mm	Širina uzorka
$h$	mm	Visina uzorka
HB	MPa	Tvrdoća po Brinellu
$F$	N	Sila utiskivanja
$D$	mm	Promjer kuglice
$d$	mm	Promjer otiska

---

$H_j$	N	Tvrdoća po Janki
$K$		Koeficijent ovisan o dubini prodiranja kuglice
$F$	N	Sila utiskivanja na propisanu dubinu
$E$	GPa	Modul elastičnosti
KU(KV)	J	Udarni rad loma
$G$	N	Težina bata
$h_1$	m	Početna visina bata
$h_2$	m	Visina bata nakon loma epruvete
$\rho_w$	g/cm <sup>3</sup>	Gustoća za neki udio vlage
$m_w$	g	Masa uzorka za neki udio vlage
$V_w$	cm <sup>3</sup>	Volumen uzorka za neki udio vlage

## **SAŽETAK**

Cilj istraživanja bio je utvrditi abrazijsku otpornost uzoraka recentnog i subfosilnih uzoraka hrasta lužnjaka starosti 1840 godina i 5890 godina. Subfosilni uzorci izvađeni su na području Bosanske Posavine. S obzirom na anizotropnost strukture i svojstava drva, ispitivanje je provedeno na sva tri karakteristična presjeka (poprečnom, radijalnom i tangencijalnom). Ispitivanje je provedeno na uređaju taber abrader s rotirajućim diskom, s brusnim papirima različite finoće. Intenzitet abrazijskog trošenja stavljen je u korelaciju s veličinom abrazivnih čestica, sa starošću i gustoćom uzoraka. Pokazalo se da usmjerenost strukture, prosječna veličina abrazivnog zrna, gustoća i starost imaju veliki utjecaj na abrazijsku otpornost. Najveća otpornost na abrazijsku dobivena je kod svih uzoraka u poprečnom, a najmanja u tangencijalnom presjeku. Povećanjem veličine abrazivnog zrna, povećava se i intenzitet trošenja uzoraka do kritične veličine abrazivnog zrna, nakon čega dolazi do smanjenja intenziteta trošenja. Najveća otpornost na abrazijsko trošenje izmjerena je kod mlađeg subfosilnog hrasta koji ima i najveću gustoću, a najmanja kod starijeg subfosilnog hrasta koji ima i najmanju gustoću. Dugogodišnji boravak hrasta lužnjaka u riječnom mulju u anaerobnim uvjetima mijenja sastav i strukturu drva. Do određene starosti navedene promjene poboljšavaju abrazijsku otpornost i povišuju gustoću, a s produljenjem vremena dolazi do smanjenja tih svojstava.

Ključne riječi: otpornost na abrazijsko trošenje, subfosilno drvo, hrast lužnjak

## **SUMMARY**

The aim of the research was to investigate the abrasive wear resistance of recent and subfossil samples of the pedunculate oak that were 1840 and 5890 years old. Subfossil samples were prepared from the subfossil oak trunk found in Bosnian Posavina region. Taking into consideration the anisotropic structure and characteristics of the wood, research was undertaken in all three orthogonal planes (transverse, radial and tangential cross sections). Tests were carried out using Taber abrasion machine with a rotating disc and with sandpapers of various grit sizes. The abrasion wear intensity was correlated with the grit size, as well as with the age and the density of the samples. It was found that the direction of the structure, grit size, density and age had a considerable influence on abrasion resistance. The highest wear resistance of all samples was obtained on the transverse, while the least in the tangential cross section. By increasing the grit size, the wear intensity in the sample also increased up to the critical size of the abrasive grain, followed by a reduction in the wear intensity. The highest wear resistance was observed for younger subfossil oaks that had the highest density, while the lowest wear resistance was observed for older subfossil oaks which had the lowest density. The many years that the pedunculate oaks spent in river sludge in anaerobic conditions changed the wood's composition and structure. Up to a certain age, the aforementioned changes improved the abrasion resistance and increased the density, but over an extended period of time these properties decreased.

Key words: abrasion wear resistance, subfossil tree, pedunculate oak

## 1. UVOD

Drvo kao tehnički materijal ima jedinstvena svojstva. Ono je obnovljiv, potpuno recikličan, prirodan i tehnički svestran materijal. Kao takav ima široku upotrebu. Može se upotrijebiti u obrađenom i u ne obrađenom stanju. U ranoj ljudskoj povijesti, uz kamen i glinu, drvo je bilo najvažniji materijal. Drvo se danas pokušava zamjeniti sa drugim materijalima kao što su polimeri, kompoziti i slično, ali i dalje ostaje u upotrebi zbog odličnih svojstava.

Drvo ima specifična fizikalna, mehanička, kemijska i tehnološka svojstva. Lako se obrađuje, lagano je, trajno uz pravilnu zaštitu, estetski visoko vrijedno i raznoliko, s dobrim mehaničkim svojstvima i obnovljivo. U pogledu mehaničkih svojstava, najvažnija prednost drva je omjer čvrstoće i gustoće, koja ga čini boljim od drugih tehničkih materijala.

Osim prednosti, drvo kao materijal ima i nedostataka, kao što je anizotropnost strukture, unutrašnje nepravilnosti, upijanje vlage, sakupljanje i bubrenje. Jedan od važnijih prirodnih nedostataka drva je dimenzijska ograničenost. S obzirom na biološko podrijetlo drvo je podložno biološkoj degradaciji. Sve nabrojane nedostatke moguće je različitim postupcima svesti na minimum.

Ukoliko drvo duže vremena provede u tlu pod utjecajem vode tekućice, nastaje subfosilno drvo. Tekuća voda u okruženju drva osigurava nepovoljne uvjete za razvoj gljivica i mikroorganizama koji uništavaju drvo. Velika trajnost subfosilnog drva uzrokovana je taloženjem minerala iz tekuće vode koja osigurava konzervaciju i trajnost građe drva. Postoji veliki broj vrsta otkriven u navedenim uvjetima, ali najznačajnije je drvo hrasta.

Šume predstavljaju važan faktor u razvoju čovjeka i društva. Drvo kao proizvod šume je materijal jednostavan za obradu, jedan je od prvih materijala kojeg je čovjek u prošlosti koristio, za stvaranje raznih predmeta, oružja i slično. Tijekom razvoja ljudskog društva uporaba drva je sve šira. Osim što se drvo koristi kao tehnički materijal, ono je glavni izvor energije za veći dio svjetske populacije. Šume i drvo su u Hrvatskoj važan prirodni sirovinski resurs. U hrvatskoj, ukupna površina šuma i šumskih zemljišta iznosi 47% kopnene površine države.

Drvo se kroz ljudsku povijest do danas koristi za različite namjene: plodovi drva za prehranu, grijanje, oružje, različite vrste nastambi, mostove, drvene stubove, nosive konstrukcije, čamce, brodove, namještaj, alat i drugo.

## 2. STRUKTURA DRVA

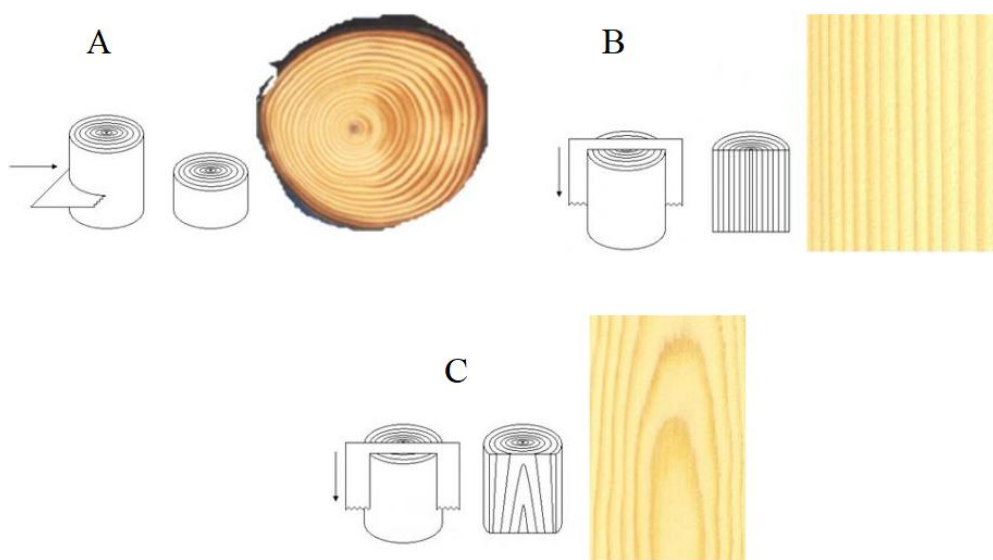
Tehničko drvo je prirodni organski materijal koji se sastoji od različitih drvnih stanica. Dobiva se iz drvenastih i višegodišnjih biljaka, uglavnom od razvijenog debla stabala. Za drvo je, više nego za druge tehničke materijale, karakteristično veliko rasipanje vrijednosti svojstava. Svojstva se razlikuju po vrstama, a vrlo velike razlike mogu biti i unutar iste botaničke vrste pa čak i unutar istok debla. Zbog toga je potrebno najprije upoznati samu građu drva, jer su svojstva posljedica strukture. Struktura drva se može promatrati na nekoliko razina, a znanost koja se bavi proučavanjem makroskopske, mikroskopske i sub-mikroskopske građe drva naziva se anatomija drva.

Razlike u građi drva, koje su specifične za pojedine vrste drva utječu na trajnost, svojstva, boju, miris i druge karakteristike drva [1].

### 2.1. Makroskopska građa drva

U makroskopsku građu drva ubrajamo one strukturne karakteristike koje su vidljive golim okom ili pri manjim uvećanjima. Makroskopske karakteristike drva posljedica su različite i nehomogene građe drva u histološkom smislu. Presijecanjem drva po poprečnoj, radijalnoj i tangencijalnoj ravnini, otvara se njegova unutrašnjost i dobiva se potpuna slika o njegovoj specifičnoj građi.

Na slici 1 vidljiva su tri osnovna presjeka drva [2].



**Slika 1. Osnovni presjeci drva; A-poprečni, B-radijalni, C-tangencijalni [3]**

### 2.1.1. Poprečni presjek

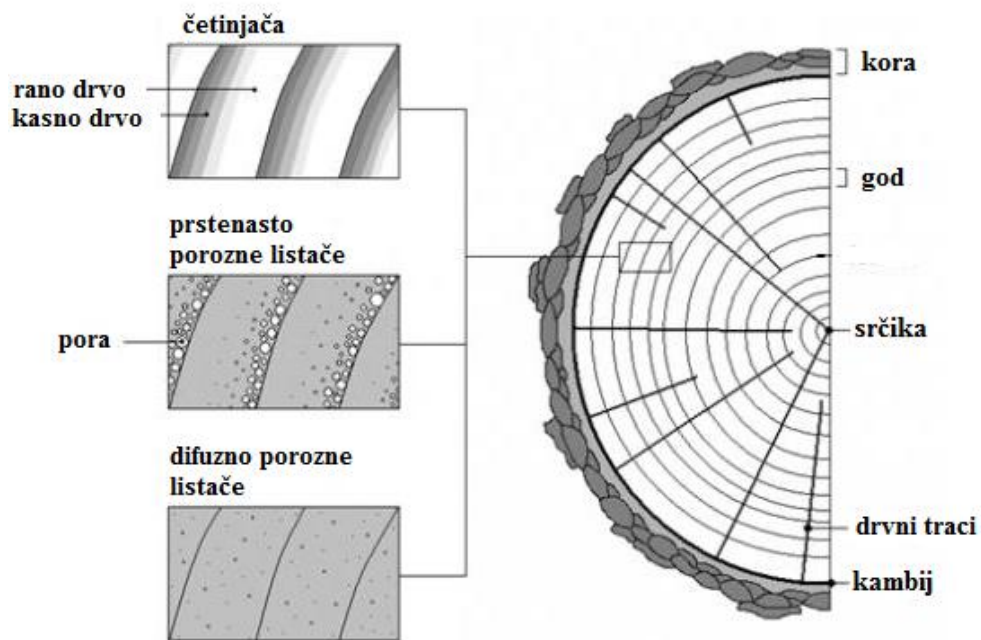
Ovaj presjek je okomit na uzdužnu os debla i na drvena vlakanca, čime se dobije oblik sličan krugu. Na njegovoj površini vide se karakteristična područja koncentrično raspoređena od srčike prema kori.

Kora je vanjski dio stabla koji obuhvaća deblo. Kora se sastoji od vanjskog plašta ili mrtvog sloja (*lub*) koji ima zaštitnu funkciju te od unutarnjeg sloja (*lika*) koji služi za provođenje produkata fotosinteze (*drvnog soka*) od lišća niz stablo. Ispod kore nalazi se vrlo tanki sloj tvornog kambija čije stanice imaju sposobnost razmnožavanja i iz kojeg početkom svakog proljeća (u našem klimatskom pojasu) nastaje novi god prema unutra te novi sloj kore prema vani.

Godovi su približno koncentrični krugovi, gdje svaki krug predstavlja godišnji prirast drva. Razlikuju se prema stupnju markantnosti, boji, širini i izgledu granične linije. Svaki god je u pravilu sastavljen od dva dijela, svjetlije zone ranog drva i tamnije zone kasnog drva. Unutarnji dio goda nastaje u proljetnoj vegetaciji uz obilje hrane i čini rano drvo u kojem se nalaze stanice s tankim stijenkama i širim prostorom unutar stanične stijenke (*lumenom*). Njihova uloga je pretežno provodna. U odnosu na kasni dio goda, rano drvo je svjetlije, lakše i mekanije. Kasno drvo čini vanjski dio goda, a nastaje krajem ljeta i u jesen kad je manja potreba za vodom. Stanice koje čine ovaj dio imaju deblje stanične stijenke i manji prostor unutar stanične stijenke. Zbog toga je kasno drvo tamnije boje, teže i gušće. Razlika u boji kasnog i ranog drva kod nekih vrsta može biti skoro pa zanemariva (lipovina), a kod nekih je jako izražena. Površina između kasnog drva jednog goda i ranog drva sljedećeg goda je granica goda. Uočljivost granice ovisi o građi i gustoći susjednih godova. Granica goda je izraženija kod četinjača nego kod listača. Listače kod kojih su traheje ranog drva prstenasto raspoređene imaju izraženiji prijelaz (hrast, brijest, jasen). Godovi iste vrste drva mogu imati različite širine ovisno o vanjskim čimbenicima kao što su tlo, vlaga, klima, nadmorska visina i slično te o unutarnjim čimbenicima. Pošto su rano i kasno drvo jednog goda posljedica različitih klimatskih uvjeta tijekom jedne godine, u tropskim područjima, gdje je klima tijekom cijele godine skoro pa ujednačena (razlike do 5°C), godovi ne čine godišnji prirast drva u širinu [2,4].

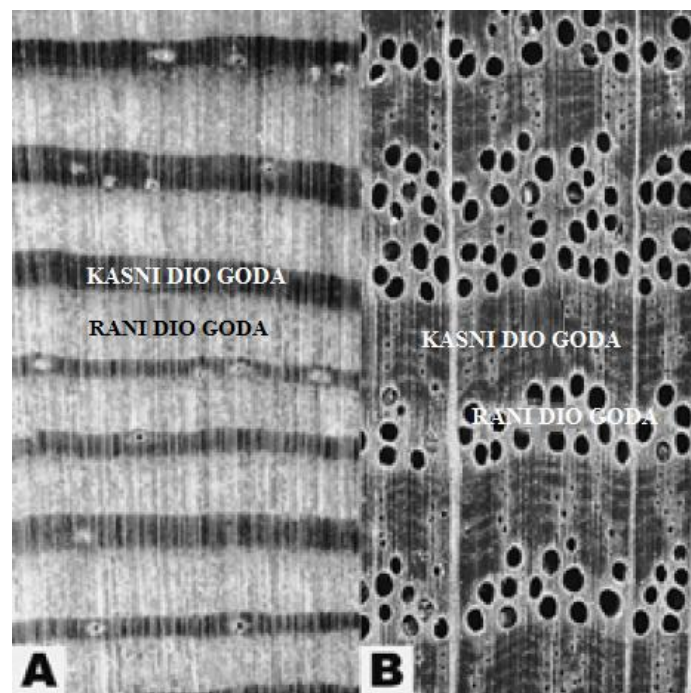
Na slici 2 prikazan je poprečni presjek debla s rasporedom provodnih sudova kod četinjača i listača.





Slika 2. Poprečni presjek polovice debla [3]

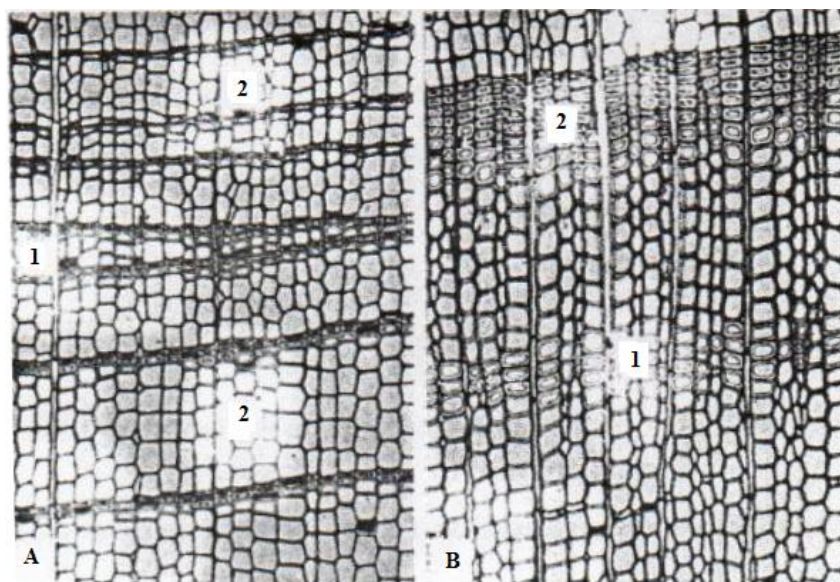
Na slici 3 prikazan je poprečni presjek drva četinjača (A) i drva listača (B) gdje se vidi razlika između ranog i kasnog drva pri povećanju od  $\approx 14\times$ .



Slika 3. Poprečni presjek A-četinjače (*Pinus resinosa*), B-listače (*Quercus rubra*) [5]

Zbog raznih poremećaja djelovanja kambija dolazi do abnormalne građe goda. Ovi godovi se histološki razlikuju od normalnih godova, ali takve greške u pravilu ne utječu na tehnička svojstva i teksturu drva.

Prekinuti god nastaje većinom pred kraj života, u stablu s asimetričnom i djelomično uginulom krošnjom, slika 4.A. Do toga dolazi zbog manjka hranjivih tvari, pa kambij ne proizvodi drvo po čitavom opsegu u jednoj ili više uzastopnih vegetacijskih perioda i na takvim mjestima dolazi do spajanja godova. Nakon određenog vremena, skriveni dijelovi kambija se aktiviraju i formiraju na tom mjestu neprekinuti god. [6]



**Slika 4. A: 1- prekinuti god, 2-normalni god; B: 1- lažni god, 2-kasno drvo normalnog završetka [7]**

Na slici 4.B prikazan je lažni god koji nastaje zbog preranog formiranja zone kasnog drva u normalno građenom godu. Razlika između formirane zone kasnog drva i normalnog završetka goda je ta, što je zona uža i manje uočljiva. Zona kasnog drva lažnog goda je s obje strane okružena s manje stanicama ranog drva, te ne izgrađuje oštro omeđenu granicu goda prema van. Takve nepravilnosti se nazivaju dvostruki ili višestruki godovi. Uzrok nastanka lažnog goda su poremećaji u fiziološkim procesima, kao što je produljen vegetacijski period do kasno u jesen, poplava, suša, mraz i slično [6].

Širina goda i udio kasnog drva imaju veliki utjecaj na osobine drva, zbog čega se njihove vrijednosti navode pri ispitivanju.

Prosječna širina goda (1.1)

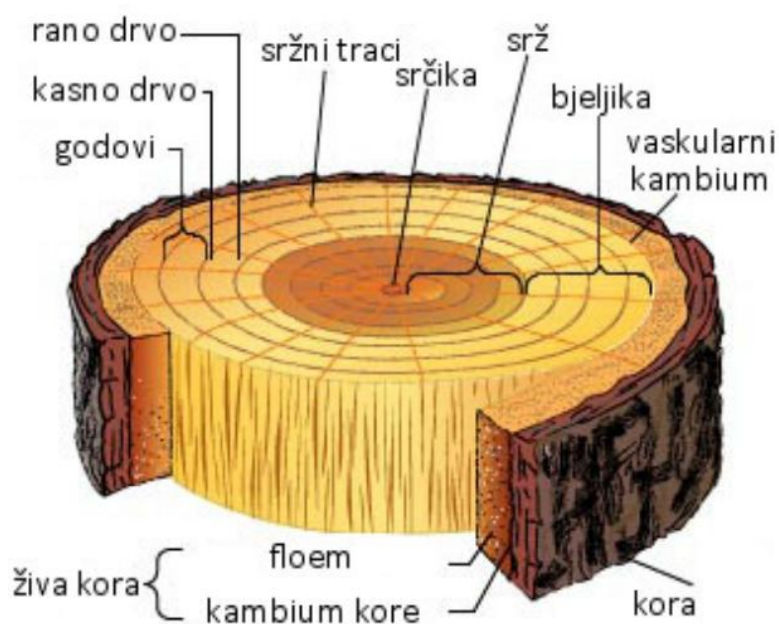
$$t = \frac{L \text{ (mjerena dužina u mm)}}{N \text{ (broj godina)}} \quad (1.1)$$

Udio zone kasnog drva (1.1)

$$V_{ka} = \frac{\sum l \text{ (zbroj širina kasnog drva u mm)}}{L \text{ (mjerena dužina u mm)}} \cdot 100 \% \quad (1.2)$$

Na poprečnom presjeku drva, prikazanom na slici 5, bjeljika je prvi sloj idući od kore prema središtu debla. Dobila je ime po tome što je obično svjetlija od ostatka presjeka. Ona je dio drva koja u živom stablu ima funkciju provođenja vode, te spremanja hrane u živim stanicama. Bjeljika postupno prelazi u srževinu. Fiziološke promjene do kojih dolazi prilikom prijelaza bjeljike u srž zovu se proces osržavanja.

Srž je unutarnja zona, dio drva koju u živom stablu više ne provodi vodu i u kojem su sve stanice odumrle. Najčešće je tamnije boje i bez biološke zadaće. Svake godine stablo proizvodi novi sloj, a najstariji unutrašnji slojevi bjeljike prestaju provoditi vodu, pa se vanjska granica srži stalno pomiče prema van. Proces stvaranja novog sloja i osrživanja je u ravnoteži [6].



Slika 5. Makroskopski prikaz drva [8]

Zbog održavanja ravnoteže broj godina i širina bjeljike ovise o vrsti, veličini, ekološkim čimbenicima, elastičnosti i starosti drva. Širina bjeljike ovisi o brzini rasta pojedine vrste drva. Brzorastuće vrste drva imaju uglavnom veću širinu bjeljike od sporije rastuće vrste za jednaki broj godina. Proces osrživljanja započinje prestankom provodne funkcije u provodnim stanicama bjeljike, a završava odumiranjem parenhimskih stanica [9]. Srž postaje manje propusna za vodu i hranjive tvari, teža i trajnija.

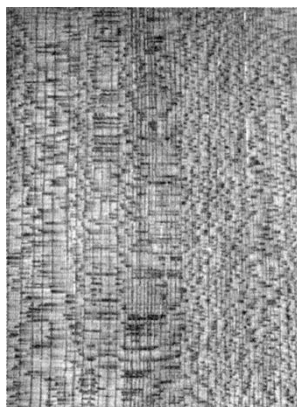
Srčika je os stabla, vidljiva na poprečnom presjeku kao veća ili manja točka središta što je vidljivo na slici 5. Ima nepovoljni učinak na samo drvo jer pri sušenju dovodi do pucanja i vitoperenja samog drva.

Drvni traci su poprečna tkiva koja koru spajaju s godom u kojem su nastali. Na poprečnom presjeku se uočavaju kao svjetlije crte različitih veličina i izraženosti, ovisno o vrsti drva.

### 2.1.2. Radijalni presjek

To je presjek koji je usporedan s osi debla i prolazi kroz središte, po radijusu. Radijalni presjek prolazi okomito kroz godove i sječe ih na njihovu širinu. Zato se na radijalnom presjeku uočava niz više ili manje usporednih linija. Njihova izraženost ovisi o tome kolike su izrazite razlike između ranog i kasnog drva u istom godu. Stanični snopići koji su vidljivi na uzdužnom presjeku zovu se žica drva.

Drvni traci se vide kao plohe ili manje površine ovisno o vrsti drva, a presječeni su po duljini i visini. Na slici 6 prikazan je radijalni presjek drva brijesta [4].

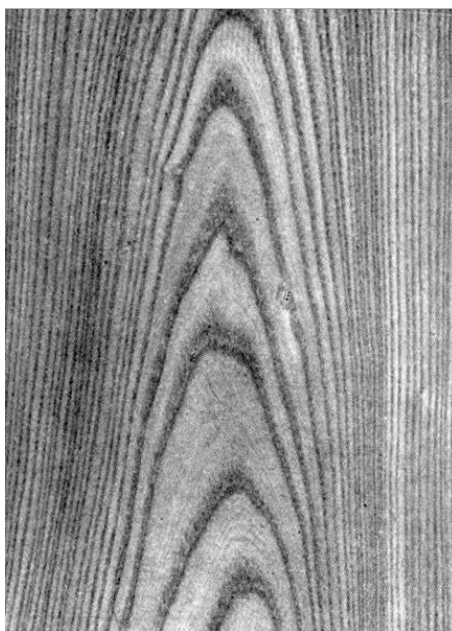


Slika 6. Radijalni presjek [10]

### 2.1.3. Tangencijalni presjek

Ovaj presjek je paralelan s uzdužnom osi drva kao i radijalni, samo ne prolazi po radijusu nego po tangenti. Linije godova u središtu imaju oblik parabole zbog presijecanja konusnih cilindara goda, dok linije prema rubovima prelaze u sve ravnije oblike. Drvni traci su presječeni po visini i duljini i pojavljuju se kao crtice usporedne s uzdužnom osi [4].

Na slici 7 prikazan je tangencijalni presjek drva jasena.



Slika 7. Tangencijalni presjek [10]

## 2.2 Kemijski sastav drva

Drvo je organski materijal, spojen od različitih kemijskih tvari. Nije poznato kako su pojedine tvari povezane unutar stijenke, niti to da li su veze kemijski spoj ili skupina spojeva koja se mogu izolirati. Poznavanje kemijskog sastava bitno je za znanstvena istraživanja drva kao prirodne tvari, a posebno kao tehničkog materijala [11].

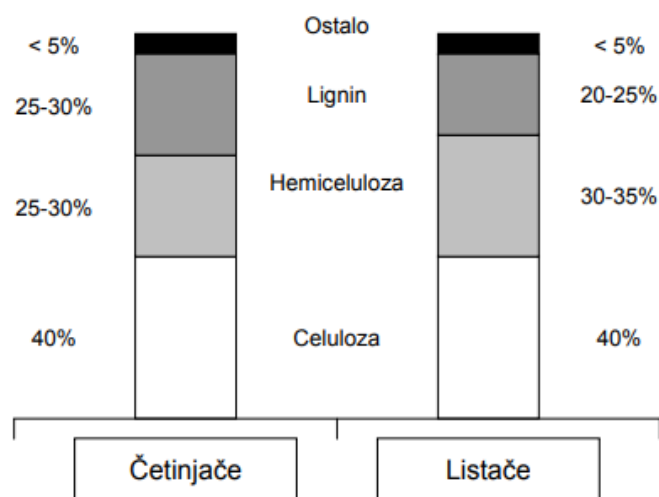
Elementarni sastava drva ne razlikuje se bitno između raznih vrsta drva. Rast stabla se odvija zahvaljujući reakciji fotosinteze, pri čemu se različiti ugljikohidrati iz ugljikovog dioksida i vode uz prisutnost klorofila i sunčeve svjetlosti. U tom pogledu nema bitnih razlika između drva četinjača i drva listača. U prosjeku suha drvna tvar pokazuje gotovo uvijek podjednak sastav što je vidljivo u tablici 1.

Tablica 1. Elementarni sastav drva

Ugljik (C)	50%
Kisik (O)	43%
Vodik (H)	6%
Dušik (N)	1%

### 2.3.1 Kemijski sastav stanične stijenske

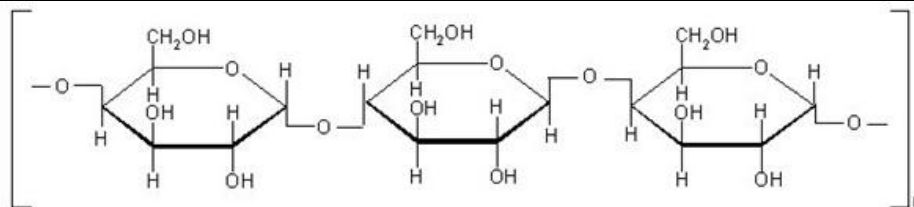
Stanična stijenska drvene stanice sastavljena je od umreženih lanaca celuloze, drvene polioze (hemiceluloze) i lignina, koji su prisutni u svim vrstama drva, i sporednih akcesornih tvari ili ekstraktivne supstance koje su vezane za svaku vrstu pojedinačno. Na slici 8 prikazan je prosječni udio lignina, celuloze i hemiceluloze u staničnoj stijenci četinjača i listača.



Slika 8. Prosječni kemijski sastav stijenki drva četinjača i listača [12]

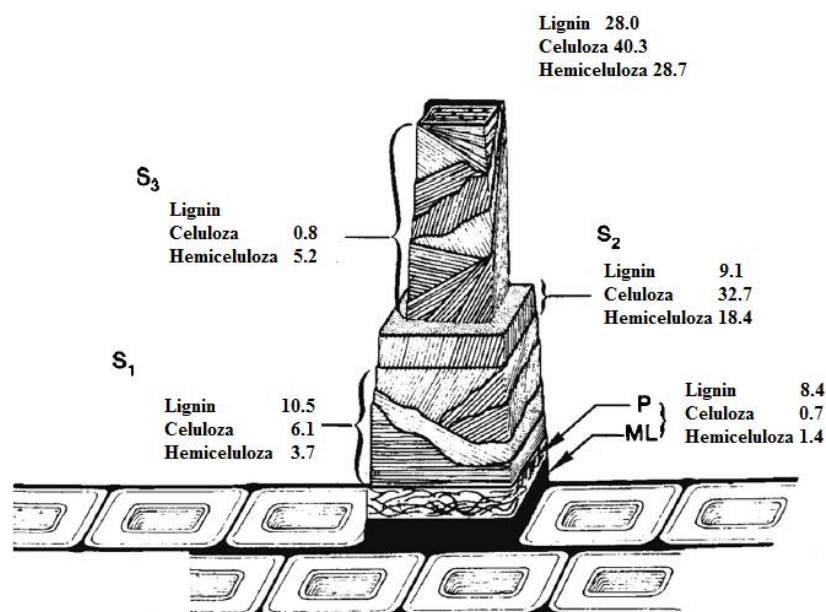
Celuloza dolazi od latinske riječi *celula*, što znači stijenska. Najrašireniji organski spoj na zemlji. Celuloza je lančani polimer s pravilno paralelno poredanim molekulama, međusobno povezanim u kristalnu rešetku gdje tvore kristalite ili micle. Ona je polisaharid empirijskog sastava ( $C_6H_{10}O_5$ )<sub>n</sub>, pri čemu je n stupanj polimerizacije, koji je za pamuk približno 7000, a za jelovo drvo 2500. Molekule celuloze se slažu u oblik mikrofibrila, koji se dalje povezuju u makrofibrile. Bijele je boje, bez okusa i mirisa, gustoće 1,55 g/cm<sup>3</sup>. Na slici 9 prikazan je pojednostavljeni oblik celuloznog lanca.





Slika 9. Pojednostavljena formula celuloze [13]

Lignin je amorfni polimer. U kambijskoj zoni počinje stvaranje protolignina aktivacijom prethodnika lignina, koji onda polimeriziraju u velik trodimenzionalan polimer u stijenki stanice. Nalazi se više u tvrdom drvu i u ranom drvu. Ne može se mehanički odvojiti od celuloze, nego do odvajanja dolazi tijekom procesa kuhanja s alkalijama.



Slika 10. Raspored i maseni udio lignina, celuloze i hemiceluloze u staničnoj stijenci bora [5]

Hemiceluloza je polimerni ugljikohidrat (polisaharid), ima manji stupanj polimerizacije od celuloze, a stupanj polimerizacije im je između 10 i 200. To su linearni polimeri s kratkim lancima. Polioze listača se razlikuju od polioza četinjača po udjelu u građi i sastavu. Jedna skupina služi za dobivanje alkohola, a druga za dobivanje šećera.

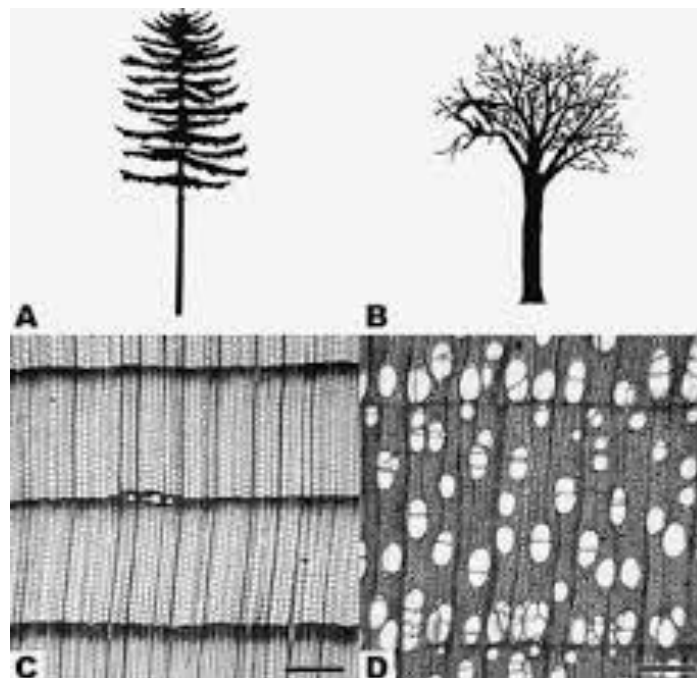
Na slici 10 prikazan je maseni udio i raspored lignina, celuloze i hemiceluloze u staničnoj stijenci bora.

Ekstraktivne tvari kao što su smole, masti proteini i minerali se pojavljuju u jako malim količinama.

### 3. ANATOMSKA GRAĐA DRVA

#### 3.1. PODJELA DRVA

Vrste drva dijele se u dvije velike skupine, a to su četinjače i listače. Listače pripadaju skupini kritosjemenjača, dok četinjače spadaju u skupinu golosjemenjača.



**Slika 11. Opći oblik stabla četinjača (A) i listača (B)  
Poprečni presjek kroz deblo četinjača (C) i listača (D) [5]**

Na slici 11. A prikazano je deblo uočljivo cijelom dužinom, dok se na slici 11. B deblo gubi u krošnji.

Četinjače su pretežito čunjastog oblika, a stablo im je uočljivo cijelom visinom. Imaju lišće u obliku iglica koje zimi ne otpada (jela, smreka, bor). Danas postoji nekoliko stotina vrsta četinjača i rastu pretežito u umjerenoj i hladnoj zoni sjeverne hemisfere.

Listače imaju široku i najčešće kuglastu krošnju. Mlađeg su podrijetla, a samim time i višeg stupnja organizacije. Lišće im otpada, a ima široki i plosnati oblik (hrast, bukva, trešnja, itd. ).

Podzemni dio stabla čine korijen sa žilama i žilicama, dok nadzemni čini deblo, krošnja i grane. Svaki dio ima kompleksnu ulogu u životu stabla. Korijen služi za učvršćenje stabla u tlu i funkciju uzimanja vode i mineralnih sastojaka iz tla. Deblo je centralni nosač cilindričnog oblika i najvažniji je dio stabla (s tehničke točke gledišta i po kvaliteti), te služi

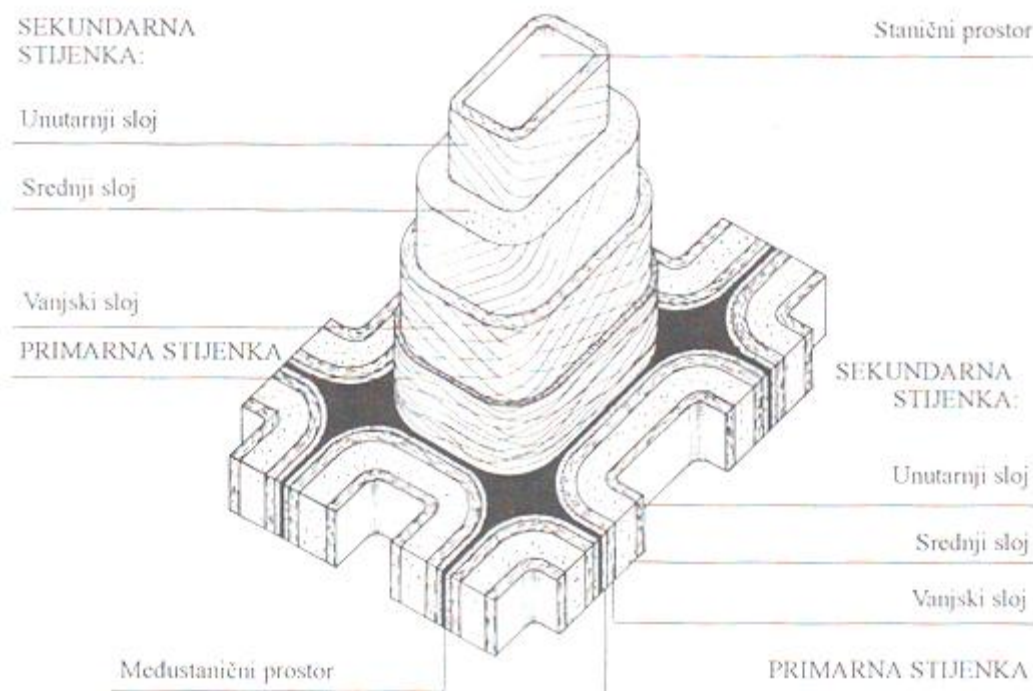


za provođenje vode i minerala iz korijena do krošnje. Krošnja je kompleks grana i grančica, skupa s lišćem. Pomoću sunčeve svjetlosti i procesa fotosinteze proizvode se složeni ugljikovi spojevi, koji se preko grančica i grana odvođe u sve dijelove stabla.

### 3.2. STANICA

Unutrašnjost drva ima nehomogenu građu koja je pod mikroskopom još izraženija. Osnovni element građe drva je stanica. Živa stanica sastoji se od stanične stijenke i sadržaja (protoplazme). Kod mrtvih stanica postupno nestaje sadržaj, te ostaje samo stanična stijenka i stanični prostor (lumen) koji je ispunjen vodom ili zrakom. Osnovna funkcija lumena je upijanje vlage, a ima i vrlo važnu ulogu pri formiranju drvnih kompozita. Stanična stijenka osigurava mehaničku potporu i štiti stanicu od previsokog osmotskog tlaka. Stijenke stanica su građene od nekoliko slojeva koje su izgrađene većinom od celuloze, hemiceluloze i lignina (tanji primarni i deblji sekundarni sloj). Sekundarni sloj se dijeli na više podslojeva (tankog unutarnjeg, debljeg srednjeg i tankog vanjskog sloja), a sastoji se pretežno od celuloze (~50 %) i nešto lignina. Na vanjskoj strani primarne stijenke mikrofibrili su isprepleteni bez orijentacije, dok na unutrašnjoj strani orijentacija otprilike okomita na uzdužnu os stanice [10].

Na slici 12 prikazan je prostorni prikaz stanice i stijenke.



**Slika 12. Prostorni prikaz stanice i stijenki [4]**

Mikrofibril je svežanj lančanih molekula celuloze i pridruženih polisaharida, te osnovna biološka jedinica celuloznog kostura stijenke.

Jedan od najvećih nedostataka drva je higroskopnost koja je aktivna kroz cijelo postojanje drva. Celuloza je higroskopna, a to znači da ona prima i otpušta vlagu u ovisnosti o temperaturi i vlažnosti zraka. Zbog higroskopnosti dolazi do promjene volumena staničnih stijenki, a samim time i do promjene volumena drva, što rezultira utezanjem i bubrenjem drva [4].

U fazi odebljanja sekundarne stijenke ostaju pojedina mjesta na kojima ne dolazi do zadebljanja između susjednih stanica zbog toga da ne bi došlo do zatvaranja komunikacijskih puteva između stanica prilikom ojačanja stijenki, a ta mjesta se zovu jažice. Jažice se formiraju prilikom izgradnje sekundarnog sloja stijenke stanice koja je prikazana na slici 12.. Ovisno o potrebi komunikacije između stanica može se razviti jedna ili više jažica. Razlikuju se po građi, veličini, obliku, položaju i rasporedu. Prilikom zadebljanja membrane mogu nastupiti razni tipovi jažica, a glavne vrste su jednostavna, ograđena i razgranjena jažica.

Jednostavna jažica nastaje kada prilikom zadebljanja dviju suprotnih sekundarnih slojeva stijenki ostane šupljina okruglog oblika gdje se nalazi ne zadebljana membrana jažice. Za komunikaciju između dvije stanice, dvije jažice se nalaze jedna nasuprot drugoj te čine par jednostavnih jažica. Karakteristična je za žive elemente građe drva i nalaze se u parenhimskim stanicama četinjača ili listača [2].

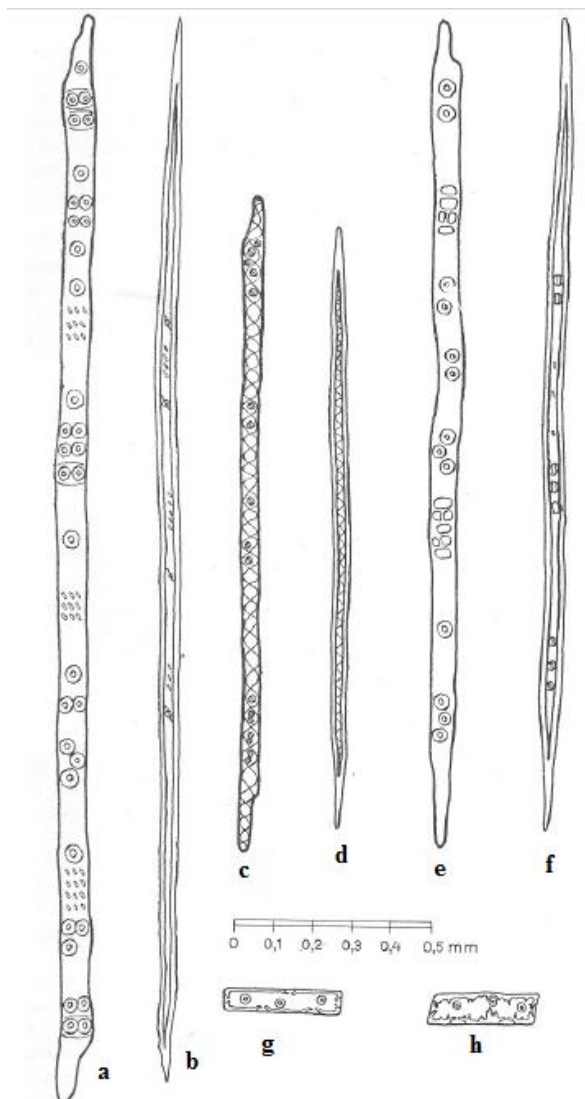
## 2.4 VRSTE STANICA

### 2.4.1 Traheide

Traheide su osnovni element građe drva koje obavljaju provodnu i mehaničku funkciju. Tipične su za četinjače, ali mogu se naći i kod listača. Aksijalne traheide četinjača (usporedno postavljene s uzdužnom osi stabla) su vrlo produljene, te su na završetcima ušiljene kako bi se što bolje prihvaćale jedna za drugu, slika 13. A-f. Traheide drva četinjača su dugačke od 1 mm do 7 mm, što znači da su 75 do 200 puta duže nego što su široke. Za svaku vrstu drva širina traheida u tangencijalnom smjeru je otprilike stalna, dok u radijalnom smjeru ovisi o vrsti drva i položaju elementa unutar goda. Najšire traheide ima drvo *Sequoia*, *Taxodium* i *Larix* (~0,080 mm), a najuže *Thuja* i *Taxus* svega ~0,020 mm [6].

Namjena traheida četinjača je :

1. Traheide četinjača ranog drva su provodni elementi sa širokim lumenom, krupnim jažicama i tankom stijenkom, slika 13. A, c, e [9].
2. Traheide četinjača kasnog drva su primarno mehanički elementi s debelom stijenkom i sitnim lumenom. Glavni im je zadatak davanje čvrstoće stablu. Jažice su malobrojne, slika 13. B, d, f..

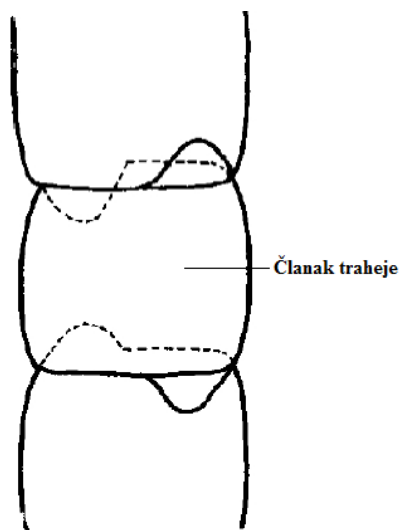


**Slika 13. Aksijalne traheide ranog i kasnog drva: (a,b) ariš (*Larix*), (c, d) tisa (*Taxus*), (e, f) crni bor (*Pinus nigra*); traheide traka: (g) smreka (*Picea*), (h) crni bor (*Pinus nigra*) [6]**

Traheide listača su kraće od traheida četinjača i često deformirane, zajednička im je karakteristika postojanje ograđenih jažica.

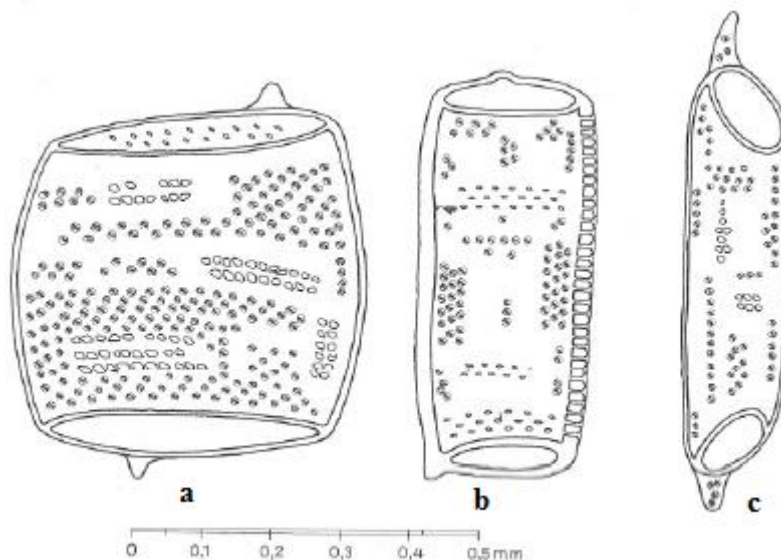
### 2.4.2 Članak traheje

Traheje su nizovi mrtvih stanica s provodnom funkcijom, a sastoji se od aksijalnog niza članaka koji tvore neprekidne uzdužne kanale, slika 14. Članak traheje je pojedina stanica trahealnog niza, odnosno kratke stanice oblika cijevi, valjka ili bačve, koje imaju otvore s obje strane. Po građi i načinu provođenja vode bitno se razlikuju od traheida i vlaknastih traheida. Nalaze se samo kod drva listača [9].



Slika 14. Trahealni niz [9]

Na poprečnom presjeku otvori su im okruglog, eliptičnog ili poligonalnog oblika. Uzdužne stijenke su potpuno izgrađene, a jažice su ograđenog tipa, različitog oblika i rasporeda i znatno ih je manje nego kod traheida. Veličina i oblik članka ovisi o vrsti, a podliježe znatnim promjena ovisno o položaju u godu (rano, prijelazno i kasno drvo) i u drvetu (korijen, deblo). Što je članak širi, to je kraći, a završne stijenke zatvaraju veći kut s uzdužnom osi elementa, slika 15. Traheje uslijed prelaska bjeljike u srž prestaju provoditi vodu, te zajedno s vlakancima preuzimaju mehaničku funkciju [4].



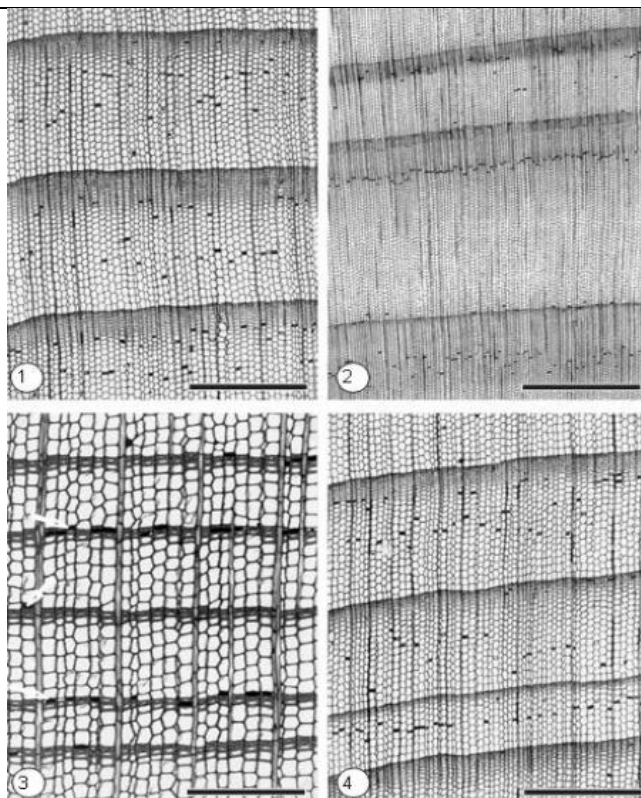
Slika 15. Članci traheja: a- hrast (*Quercus*)- rano drvo, b- jasen (*Fraxinus*), c- hrast (*Quercus*) [14]

### 2.4.3 Drvna vlakanca

Stanice izrazito produljenog oblika (od 0,5 mm do 5 mm), oko 40 puta veće dužine od debljine, s debelom stijenkom i uskim lumenom. Drvna vlakanca imaju ušiljene i isprepletene krajeve, zbog boljeg prihvaćanja u duljinu. Jažice su im jednostavne, malobrojne ili ih nema. Tehnička svojstva drva dosta ovise o količini, veličini i pravilnosti vlakanca. Ako su drvna vlakanca tanja, drvo će biti finije i tvrđe [4].

### 2.4.4 Stanice parenhima

Stanice parenhima su vrlo sitne i žive stanice drva. Jažice parenhima su isključivo jednostavne, a stijenka može biti tanka celulozna ili se može zadebljati i odrvenjeti. Dimenzije nisu konstante, debljina i širina su između 15 i 30  $\mu\text{m}$ , a duljina je promjenjiva i kreće se između 20 i 100  $\mu\text{m}$ . Izrazito produljene parenhimske stanice mogu imati duljinu do 300  $\mu\text{m}$ . Svrha im je spremanje rezervne hrane koja je potrebna stablu kad prestane vegetacija i transport. U aksijalnim strukturama drva često susrećemo više ili manje aksijalnog parenhima, dok su radijalne strukture drva izgrađene od parenhim traka. Završne stanice parenhimskog niza su ušiljene. Na slici 16.1 prikazana je difuzna/rastresita (*Taxodium distichum*), 16.2 tangencijalna (*Cryptomeria japonica*), 16.3 tangencijalna u kasnom drvu na granici goda (*Sequoia semprevirens*), 16.4 difuzna/rastresita i tangencijalna (*Taxodium distichum*).

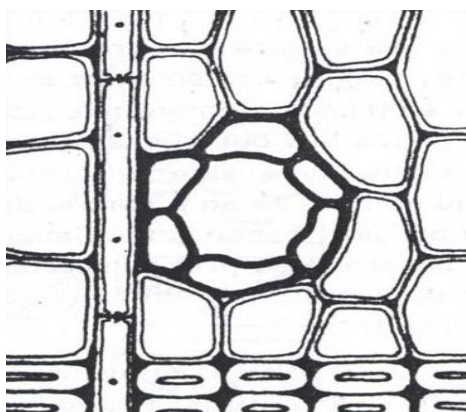


Slika 16. Aksijalni parenhim [15]

#### 2.4.5 Sekretne stanice

Kod određenih vrsta drva četinjača (bor, ariš, smreka) prisutne su uljno-smolne tvari koje se nalaze u stanicama aksijalnog i radijalnog parenhima. U određenim situacijama uljno-smolne tvari se izlučuju u međustanične prostore gdje tvore aksijalne smolenice (smolne kanale). Smolni kanali su kod određenih vrsta četinjača vidljivi golim okom, dok su kod drugih sitniji. Smolenice mogu biti i traumatske, kao reakcija na vanjske ozljede (povreda kambija i bjeljike).

Na slici 17 prikazane su smolenice.

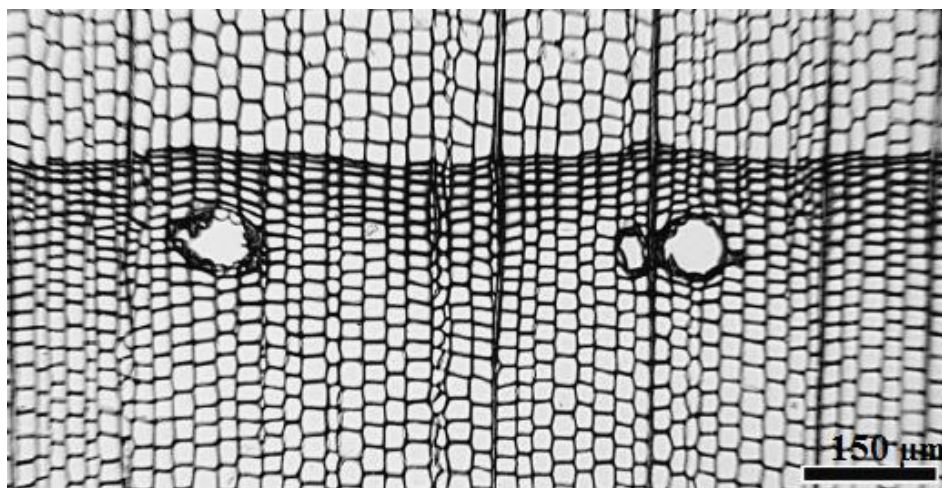


Slika 17. Smolenica [16]



## 2.5 Mikrostruktura četinjača

Mikrostruktura drva četinjača je razmjerno jednostavne građe. Sastoji se od osnovnih elemenata, aksijalnih traheida i parenhimskih traka, dok složenije građe mogu sadržavati i aksijalni parenhim drva. Glavni element građe četinjača su aksijalne traheide, čiji je volumni udio u drvu 90-94 %. Služe za provođenje vode u ranom drvu, dok u kasnom drvu imaju mehaničku funkciju. Drugi element građe je radijalni parenhim čiji je udio 4,5-8%, a služi za spremanje hrane.

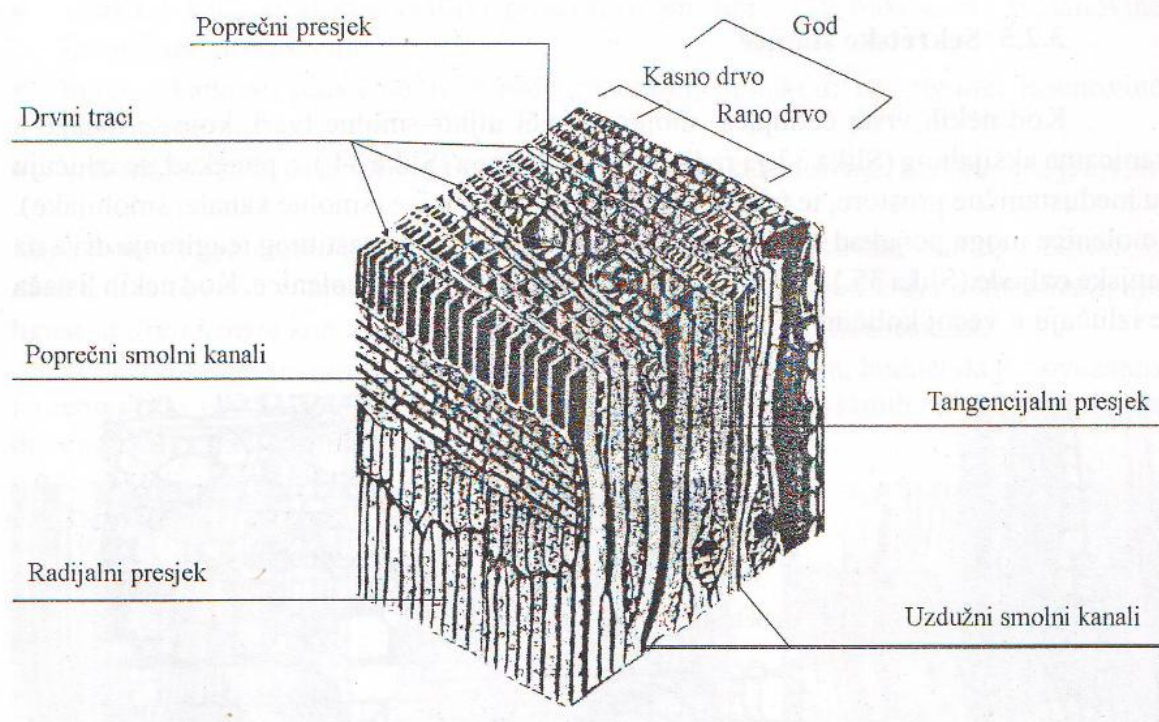


Slika 18. Poprečni presjek drva četinjače (*Picea glauca*) [5]

Na slici 18 vidi se poprečni presjek debla koji je izgrađen od traheida, malih pravokutnika različitih debljina. Tri velike okrugle rupe su smolni kanali i njihove povezane stanice [5].

Traheide se razlikuju po debljini stijenke i veličini lumena ovisno da li se radi o ranom ili kasnom drvu. Drvo sa širokim godovima najveći prirast ostvare u ranom drvu, dok je širina kasnog drva jednaka kod širokih i uskih godova. Drvo uskih godova sadrži više kasnog drva, gdje su traheide s debljim stijenkama i manjim lumenima, zbog čega su čvršće, trajnije, teže i imaju veću tehničku vrijednost. Kod četinjača sa širokim godovima prevladava rano drvo, gdje su traheide s tankim stijenkama i krupnim lumenima, pa zbog toga je i drvo mekše i lakše.

Radijalni parenhim izgrađuje drvene trake i povezuje centar debla s periferijom. Drvni traci omogućavaju poprečno-radijalnu vezu između živih dijelova drva i kambija, te kambija i sekundarnog floema. Služe za provođenje vode i mineralnih tvari iz drva preko kambija u koru i hranjivih tvari iz kore u kambij i drvo [6].

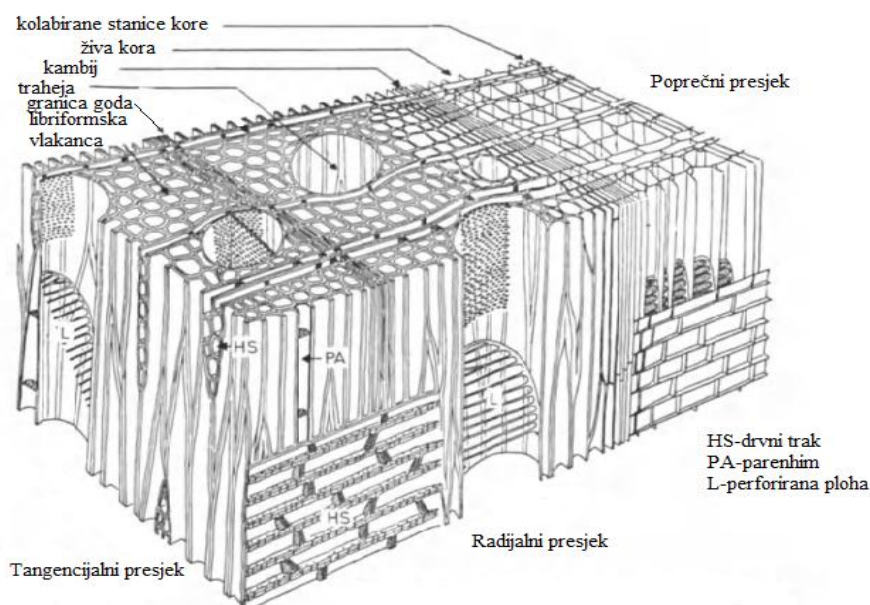


**Slika 19. Prostorni prikaz građe četinjača[4]**

Na slici 19 vidi se da neke vrste četinjača mogu imati i smolne kanale za koje se smatra da nastaju onda, kad drvo ima genetski uvjetovane uzdužne i poprečne kanale, a ne traumatske.

## 2.6 Mikrostruktura listača

Mikrostruktura različitih vrsta drva listača je daleko složenije građe od drva četinjača, što je vidljivo na slici 20. Glavna razlika u usporedbi s drvom četinjača je prisustvo traheja.



**Slika 20. Prostorni prikaz građe listača [17]**



U uzdužnom smjeru drveno tkivo listače izgrađeno je iz traheja, drvnih vlakana, stanica parenhima i traheida. Drvo listača sadrži od 4 do 80 % drvnih vlakana koja obavljaju mehaničku funkciju, oko 3,6- 58 % traheja čija je svrha provođenje vode, 7-38% radijalnog parenhima, 0-74 % aksijalnog parenhima koji služi za pohranu rezervne hrane, te nešto traheida.

Na poprečnom presjeku je vidljivo da je drvo sastavljeno većinom od traheja koje se vide golim okom, te na tom dijelu je drvo listača porozno. Traheje su nizovi provodnih mrtvih elemenata, te se po načinu i građi provođenja vode bitno razlikuju od traheida. U poprečnom presjeku širina traheje je u rasponu od 50 do 200  $\mu\text{m}$ , a duljina je puno kraća od traheida i kreće se u rasponu od 100 do 1200  $\mu\text{m}$ . Veličina i raspored traheja unutar goda su različiti i posebni za svaku vrstu drva. Drvo listače prema tome možemo podijeliti u četiri skupine [4]:

1. Prstenasto porozne (hrastovina, brestovina, jasenovina)

Na početku goda nalazi se vijenac krupnijih traheja. Krupne traheje izgrađuju svjetliju zonu poroznijeg drva u pravilnom kružnom rasporedu. One su pojedinačno vidljive golim okom (*Quercus, Castanea*)

2. Semi prstenasto porozne (trešnjevina, šljivovina)

Sitne pore izgrađuju usku, svjetliju zonu ranog drva u rasporedu. Pojedinačno su uočljive samo pomoću povećala na poprečnom presjeku. Nazivaju se još i lažno prstenasto porozne traheje.

3. Difuzno krupno porozne (orahovina, mahagonijevina)

Traheje su po čitavoj širini goda i približno su jednake gustoće i veličine.

4. Difuzno sitno porozne (kruškovina, bukovina, lipovina)

U početnoj zoni goda pore su gušće, brojnije i nešto veće od pora u kasnijem dijelu goda. Takav raspored pora uzrokuje svjetliju početnu zonu i porozniju, koju je moguće vidjeti okom. Pojedinačne pore se ne mogu uočiti golim okom.

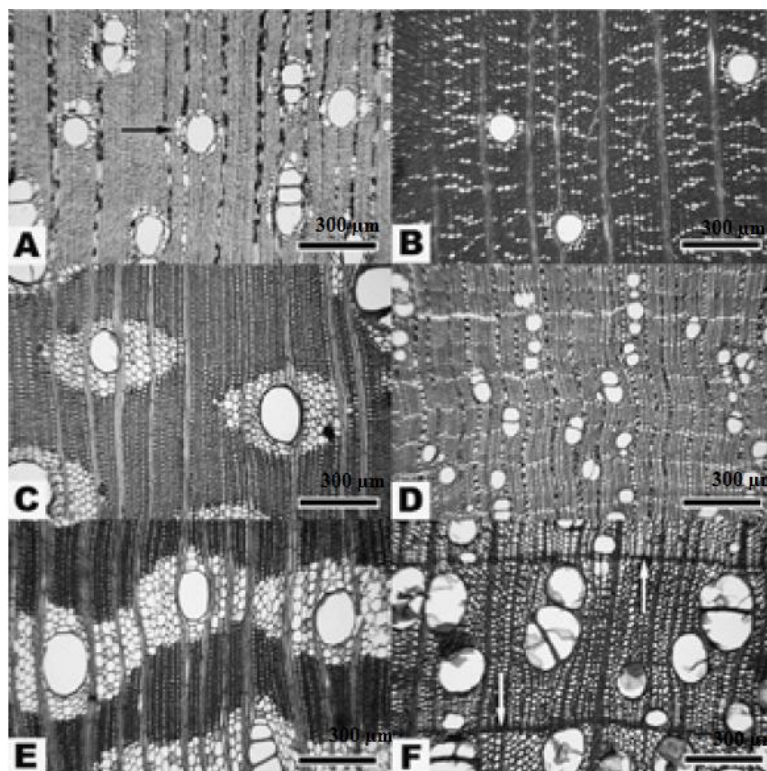
Drvena vlakna su stanice s debljom stijenkom i uskim lumenom. Duljina im je između 200 i 1200  $\mu\text{m}$ , a širina upola manja. Vrste listača čija vlakna imaju tanku stijenku i široki lumen imaju nisku čvrstoću i gustoću, dok one s debelom stijenkom i uskim lumenom imaju veću čvrstoću i gustoću. Vlakna obavljaju mehaničku funkciju [5].

Drvni traci listača su izgrađeni od parenhimskih stanica i dosta su različiti od onih kod četinjača. Njihova visina je pretežito do 1 mm, a širina većine vrsta je između 1 i 5 stanica. Na poprečnom presjeku se vide kao radijalno usmjerene trake od srčike prema kori.

Aksijalne parenhimske stanice imaju tanku stijenku i velik lumen. Pojavljuju se u različitim formacijama, mogu se grupirati uz velike traheje ili biti neovisne o njihovom položaju. Po građi i funkciji aksijalne parenhimske stanice listača su iste kao i kod četinjača, jedina razlika je ta što se kod četinjača jako rijetko pojavljuju [5].

Na slici 21 prikazani su poprečni presjeci različitih vrsta drva koji prikazuju niz aksijalnih parenhima. Slika 21. A, C i E prikazuje vrste paratrahealne parenhimske stanice, A- Vazicentrični parenhim (*Licaria excelsa*); C- Aliforman parenhim koji izgrađuje debele tokove oko traheja, koji se šire u tangentsnom smjeru i pri krajevima su sve uži (*Afzelia africana*). Stanice su svjetlije boje, tanke stijenke i lako vidljive; E- Konfluentan parenhim (*Afzelia cuazensis*). Takav raspored se dobije proširivanjem vazicentričnog parenhima u tangentsnom smjeru gdje se spajaju susjedne skupine u suvisle, oko traheje proširene valovite zone parenhima.

Slika 21. B, D i F prikazuje vrste apotrahealne parenhimske stanice. Apotrahealan parenhim nije u vezi s trahejama i javlja se unutar goda ili na granicama. B- Difuzno-zoniran parenhim (*Dalbergia stevensonii*); D- Granični parenhim koji izgrađuje potpune tokove unutar goda (*Micropholis guyanensis*); F-Granični parenhim (*Juglans nigra*)[18].



Slika 21. Poprečni presjek raznih vrsta drva koji prikazuju niz aksijalnih parenhima [5]

## 4. TEHNIČKA SVOJSTVA DRVA

Prilikom primjene drva kao konstrukcijskog materijala potrebno je obratiti pozornost na to da je drvo anizotropno, što znači da se njegova svojstva razlikuju u različitim presjecima drva (poprečni, radijalni i tangencijalni presjek). Drvo je higroskopan materijal koji može primati ili otpuštati vlagu. Svojstva drva ovise o promjeni vlažnosti drva, a upotreba drva u tehničke svrhe povezana je s osobinama vezanim uz njegov rast (širina godova, raspored vlaknaca i razgranatost) [19].

U tablici 2 prikazani su načini i postupci uvažavanja svojstava tehničkog drva.

Tablica 2. Načini i postupci uvažavanja svojstava drva kao tehničkog materijala [19]

Različiti pokazatelji	Primjenom karakterističnih vrijednosti $f_k$ i koeficijenta sigurnosti $\gamma_M$ za materijal
Anizotropija	Razlikovanjem svojstava okomito, paralelno ili pod kutom $\alpha$ u odnosu na vlakna
Higroskopnost	Izračunom deformacija nastalih bubrenjem ili skupljanjem
Sadržaj vlage	Modifikacijskim faktorom $k_{mod}$ i čimbenikom deformacije $k_{def}$
Trajanje opterećenja	Modifikacijskim faktorom $k_{mod}$ i čimbenikom deformacije $k_{def}$
Svojstva rasta drva	Pri razvrstavanju drva

Drvo je jako dobar građevni materijal s dosta prednosti. Prije svega drvo je prirodni materijal, dobrih mehaničkih svojstava, lagano i pouzdano, te gotovo pa najbolji vatrootporni građevinski konstrukcijski materijal. Da bi se drvo pravilno i efikasno primijenilo, te što bolje iskoristilo, potrebno je dobro poznavati njegova svojstva.

Najbitnija svojstva drva su fizička, mehanička, fizičko-kemijska i estetska svojstva.

### 4.1 Fizička svojstva

#### 4.1.1 Gustoća drva

Gustoća drva ( $\rho$ ) je najvažnije svojstvo, a predstavlja odnos mase drvne tvari i pora po volumenu. Povećanjem gustoće dolazi do poboljšavanja i elastomehaničkih osobina. Računa se prema izrazu (1.3):

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.3)$$

gdje je:

- $\rho$ - gustoća [g/cm<sup>3</sup>]
- $m$ - masa [g]
- $V$ - volumen [cm<sup>3</sup>]

Pošto sadržaj vode u drvu ima bitan utjecaj na gustoću, uz vrijednost gustoće se navodi i sadržaj vode pri kojoj je mjerena gustoća. Računa se prema izrazu (1.4):

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \quad (1.4)$$

Gustoća drva u kojem je tijekom sušenja isprema sva vlaga naziva se gustoća u apsolutno suhom stanju. Računa se prema izrazu (1.5):

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0} \quad (1.5)$$

Od praktičnog značenja je samo masa koju drvo ima uz postotak oko 12%, odnosno drvo u uvjetima upotrebe. Uvijek se daju podaci za 12 % vlage.

Postoji mnogo faktora koji utječu na gustoću drva. Neki od tih faktora su vrsta drva, njegova starost, dio stabla, građa, struktura, greške, stanište. Sadržaj smole povećava gustoću, a gustoća bjeljike je manja od gustoće srži.

#### 4.1.2 Vlažnost drva

Živo drvo je uvijek vlažno jer sadrži u sebi vodu, dok je tehničko drvo mrtvo drvo i primjenjuje se u prosušenom stanju. Kada se osušeno drvo dovede u dodir s vodenom parom iz zraka, ono će upijati tu paru do stanja ravnoteže, ovisno o temperaturi i relativnoj vlažnosti okoline. Ova svojstvo drva se naziva higroskopnost. Drvo tijekom svoga postojanja i prima i otpušta vlagu, najviše putem poprečnog presjeka jer su tu stanice otvorene. To je proces izmjene adsorpcije i desorpcije. Adsorpcija drva je upijanje preko površine u okruženju vlažnog zraka, dok je desorpcija isparavanje kada je drvo u okruženju suhog zraka. Prilikom promjene vlage u zraku dolazi do promjene u drvu, kao što su dimenzije drva, mehanička, toplinska i druga svojstva.

Najveći sadržaj vode ima drvo koje je potopljeno u vodu napunilo sve šupljine i tako istisnulo sav zrak iz šupljina.

Najmanji sadržaj vlage, a da se ne razgradi ima drvo koje se dobije sušenjem uzoraka (15-20 mm) na temperaturi od  $103\pm 2$  °C.

Vlažnost drva se izračunava preko mase izmjerene u vlažnom stanju i mase izmjerene u apsolutno suhom stanju prema izrazu (1.6):

$$\omega = \frac{m_{\omega} - m_o}{m_o} \quad (1.6)$$

gdje je:

- $\omega$  – vlažnost drva [%]
- $m_{\omega}$  – masa u vlažnom stanju [g]
- $m_o$  – masa u apsolutno suhom stanju [g]

Određivanje vlage se provodi pomoću [19]:

- preciznih postupaka mjerenja i vaganja uzoraka u vlažnom i nakon sušenja na temperaturi od  $103\pm 2$  °C
- neizravnog i brzog postupka mjerenja specifičnog električnog otpora drva vlagomjerom, uz mjernu preciznost od  $\pm 2\%$  pri postotku vlage od 6% do 32%

Voda u drvu se nalazi kao slobodna (kapilarna) i vezana (higroskopna). Slobodna voda provodi rastopljene hranjive tvari od korijena prema vrhu stabla i nalazi se u staničnim šupljinama. Nema utjecaja na bubrenje i utezanje. Vezana voda je upijena u šupljinama stanične stijenke i sporo izlazi iz drva. Ima utjecaj na bubrenje i utezanje, pa je zbog toga važna s tehnološkog gledišta.

Prema normi DIN-u 4074-1 [19] razlikuju se tri tipa drva, prema sadržaju vlage :

- svježe (sirovo) drvo s udjelom vlage većim od 30%
- polusuho drvo s udjelom vlage između 20 i 30%
- suho drvo s udjelom vlage manjim od 20%

Svježe drvo je drvo odmah nakon obaranja. Količina vlage u svježem drvu ovisi o vrsti drva, staništu, šumi, području i slično. Polusuho drvo je drvo koje je izgubilo svu slobodnu vodu. U prosjeku sadrži 28% vlage, što se postiže ležanjem drva nekoliko mjeseci nakon obaranja.

Pošto svojstva drva ovise o vlažnosti, odnosno sadržaju vlage, kao i uvjetima u kojima će se buduća konstrukcija nalaziti dijelimo drvo u 3 klase [19] :

- Klasa uporabljivosti 1 – Temperatura 20 °C, relativna vlažnost zraka nekoliko tjedana u godini prelazi preko 65 % (ujednačena vlažnost u punom drvu  $\omega=12\%$ )
- Klasa uporabljivosti 2 – Temperatura 20 °C, relativna vlažnost zraka u nekoliko tjedana u godini prelazi preko 85% (ujednačena vlažnost u punom drvu  $\omega=20\%$ )
- Klasa uporabljivosti 3 – Uvjeti koji dovode do vlažnosti drva vrijednosti veće od klase uporabljivosti 2

### 4.1.3 Utezanje i bubrenje

Utezanje i bubrenje su pojave promjene volumena drva pod utjecajem promjene vlage. Točka zasićenosti vlakanaca je stanje kada su stijenke stanica zasićene vodom, a pore ispunjene zrakom. Tada se u drvu nalazi oko 28 % vlage. Drvo se uteže prilikom gubitka vezane vode što uzrokuje smanjenje volumena, od točke zasićenja vlakanaca do suhog drva. Drvo bubri kada upija vezanu vodu što uzrokuje povećanje volumena drva, od suhog drva do točke zasićenja vlakanaca. Dimenzije drva se mijenjaju od 5% do 20% linearno s promjenom vlažnosti.

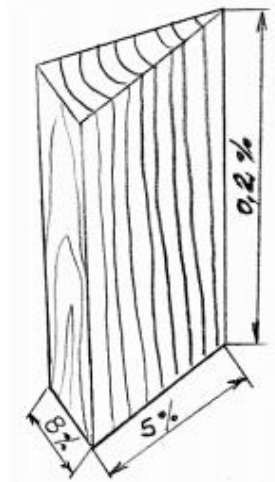
Utezanje u bubrenje može se prikazati prema izrazu (1.7):

$$\delta = \delta_s \cdot \left(1 - \frac{w}{w_s}\right) \quad [\text{mm}] \quad (1.7)$$

gdje je:

- $\delta$  - dimenzije drva pri udjelu vode [mm]
- $\delta_s$  – dimenzije drva pri zasićenju biljnih stanica [mm]
- $w$  – udio vode u drvu
- $w_s$  - udio vode zasićenih biljnih stanica

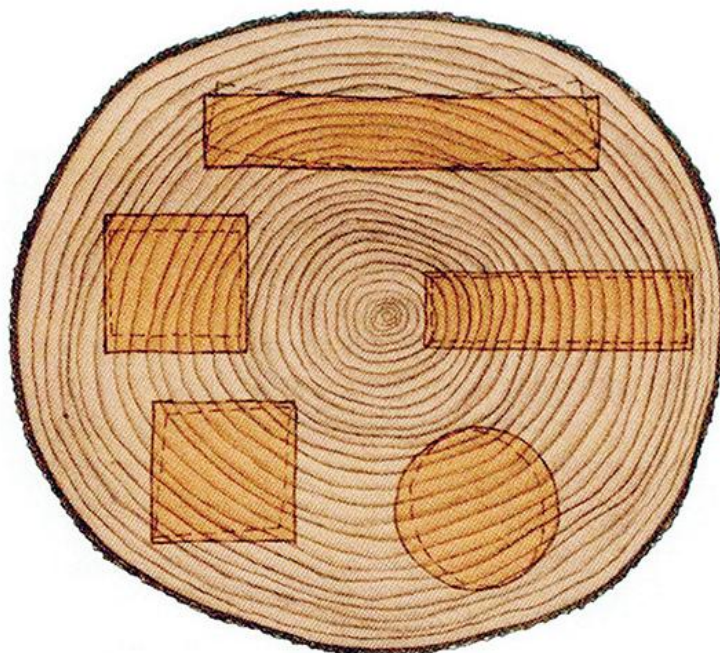
Sve ove promjene nisu uvijek jednake, razlikuju se ovisno o smjeru u kojemu promjena djeluje, što je prikazano na slici 22. Na slici se vide promjene dimenzija drva pri bubrenju i tri karakteristična smjera - uzdužnom, radijonom i tangencijalnom. Najmanja promjena dimenzija je u uzdužnom smjeru i iznosi svega 0,2%. U radijalnom smjeru je vidljiva promjena volumena do 5%, što je značajna promjena.



Slika 22. Promjena volumena ovisno o smjeru [4]

Kod tangencijalnog presjeka, volumen se mijenja okomito na radijus, po tangenti godova, a veličina promjene je oko 8%. Do ovih promjena dolazi zbog anatomske građe, promjena u orijentaciji mikrofibrila i različitostima u staničnoj stijenci.

Poprečno utezanje zbog anatomske građe može biti smanjeno drvnim tracima, postavljenim transverzalno, čime dolazi da smanjenja radijalnog utezanja drva. Jače utezanje u tangencijalnom smjeru kasnog drva nego ranog, prisiljava da se rano drvo uteže jače u tangencijalnom nego u radijalnom smjeru [4].



Slika 23. Utezanje i distorzija drva uslijed sušenja [20]

Na slici 23 prikazane su promjene dimenzija zbog utezanja. Osim promjena dimenzija, zbog anizotropnosti drva, dolazi do raznih pukotina i deformacija oblika, po duljini i po širini.

Brzina bubrenja je veća ako je volumna masa drva manja, a najveća je na početku bubrenja, sve sporija je što više približava točki zasićenja vlakanaca. Drvo uslijed bubrenje razvija tlak velike snage, koji na početku adsorpcije iznosi oko 350 Mpa.

#### 4.1.4 Toplinska svojstva

##### 4.1.4.1 Toplinska vodljivost

Svojstva drva u pogledu toplinske vodljivosti odnosno izolacijskih sposobnosti baziraju se na anatomskoj i submikroskopskoj građi drva. Drvo je porozno, a postojanje pora u kojima se nalazi zrak u smjeru okomitom na tijek vlakanaca daje drvu dobru izolacijsku sposobnost, to jest vrlo mali toplinski koeficijent. Shodno s tim drvo teško i sporo provodi toplinu kroz unutrašnjost, posebice u poprečnom smjeru, pa je loš toplinski vodič. U tablici 3 prikazane su razlike koeficijenta toplinske vodljivosti za različite materijale. Iz prikazanih vrijednosti je vidljivo da drvo ima manji koeficijent toplinske vodljivosti, pruža višestruko veći otpor prolazu topline od drugih materijala.

Tablica 3. Koeficijenti toplinske vodljivosti  $\lambda$  [21]

Materijal	Četinjače	Listače	Beton	Čelik	Aluminij
$\lambda$ [W/(m*K)]	0,13	0,17	0,75	15-45	237

##### 4.1.4.2 Zapaljivost drva

Do gorenja drva dolazi pod utjecajem povišenih temperaturama pri čemu dolazi do pucanja kemijskih veza i drvo se termički razgrađuje bez prisutnosti kisika, što se naziva piroliza. Tijekom pirolize nastaju pougljeni slojevi, katran i hlapljivi plinovi.

Ako je prisutan zrak hlapljivi plinovi se miješaju s okolnim zrakom i ako je toplina dovoljna, dolazi do gorenja. Pougljeni sloj je zaštitni sloj drva, s malim koeficijentom toplinske vodljivosti, štiti dublje slojeve drva od povišenih temperatura. Brzina stvaranja pougljenog sloja ovisi o gustoći drva, sadržaju vode, toplini, i udjelu kisika.

Ispravnom upotrebom zaštitnih kemijskih sredstava zapaljivost drva se može potpuno spriječiti [22].



#### **4.1.5 Električna svojstva**

Drvo loše provodi elektricitet. U odnosu na gustoću, otpornost je obrnuto proporcionalna, kod veće gustoće je električna otpornost manja. Različiti električni otpor koji se pojavljuje s obzirom na sadržaj vode u drvu se koristi za uređaj koji može mjeriti sadržaj vode, a zove se vlagomjer. Postoje varijante s kontaktnim elektrodama ili u obliku igala.

#### **4.1.6 Akustična svojstva**

Zbog nehomogene strukture i anizotropnosti, drvo ima niz specifičnosti. Specifičnost akustičnih svojstava drva su bazirana na raznolikosti submikroskopske i anatomske građe, porozitetu i sadržaju vlage. Drvo je dobar vodič zvuka i zbog toga se koristi za razne glazbene instrumente. Odličan je materijal za postizanje optimalnih akustičnih svojstava neke prostorije, zbog toga što se lako postigne potrebna ravnoteža između upijanja i odbijanja zvuka.

Brzina zvuka ovisi o pravilnosti građe, a veća je što je građa drva pravilnija.

Četinjače su zbog svoje jednostavnije građe i veće homogenosti, te manje gustoće bolji vodiči zvuka od listača.

#### **4.1.7 Optička svojstva**

Drvo slabo provodi svjetlost, a vlaga i smola mogu malo povećati dubinu prodiranja svjetlosti. Propušta rendgenske zrake, kroz debljinu oko 45 cm i to svojstvo se koristi za otkrivanje grešaka u unutrašnjosti. Optička propusnost je manja ako je veći sadržaj vode. Drvo upija infracrveno zračenje, pa se to može koristiti za sušenje drva [2].

### **4.2 Mehanička svojstva**

Drvo je prirodni materijal koji raste pri različitim uvjetima okoline, pa zbog toga ima i široki raspon mehaničkih svojstava. Svojstva drva se razlikuju ne samo od vrste do vrste, nego čak i unutar iste vrste, a različita su ovisno i o presjeku koji može biti poprečni, radijalni i tangencijalni. Razlike mogu biti čak i unutar jednoga goda. Što je veća nehomogenost u građi drva, to su niža mehanička svojstva drva. Drvo ima različitu otpornost na djelovanje vanjskih sila, što ovisi o smjeru djelovanja sile u odnosu na usmjerenost građe drva.

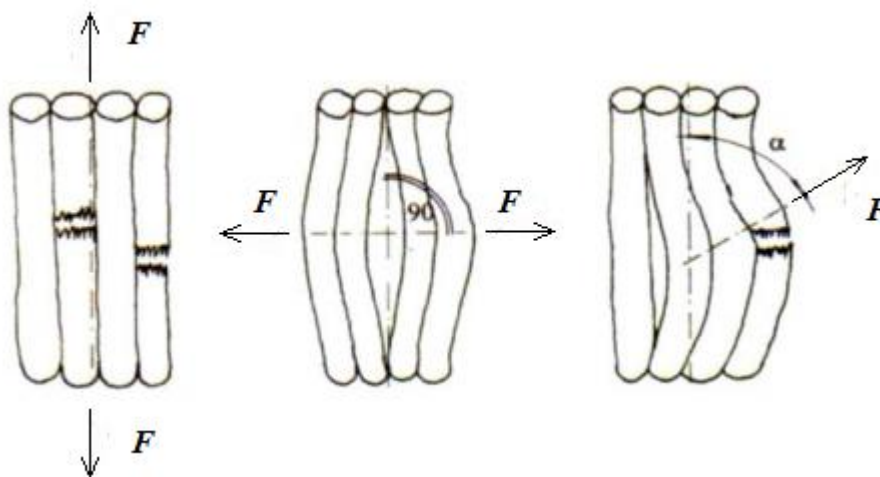
Mehanička svojstva ovise o građi, vrsti, gustoći, smjeru vlakana, sadržaju vode, temperaturi, trajanju opterećenja i slično [10].

### 4.2.1 Čvrstoća

Čvrstoća je jedno od najbitnijih svojstava, u izravnoj je vezi s konstrukcijskim zahtjevima. Zahtjevi za čvrstoćom su jednaki i za sami materijal i za veze unutar materijala. Čvrstoća drva je proporcionalna s gustoćom, što znači da drvo ima veću čvrstoću ako je teže. Velike su razlike u čvrstoći drva u smjeru vlaknaca i okomito na njih, a čvrstoća u smjeru vlaknaca je puno veća. Greške u građi drva kao što su kvrge, umanjuju čvrstoću. Prilikom dimenzioniranja nosivih drvnih konstrukcija, potrebno je uzeti u obzir da drvo starenjem gubi na čvrstoći. Vanjske sile mogu opteretiti drvo na vlak, tlak, smik, savijanje.

#### 4.2.1.1 Vlačna čvrstoća

Prilikom ispitivanja vlačne čvrstoće drva potrebno je provesti ispitivanja na tri vrste vlačnih naprezanja, vlak paralelno, vlak okomito i vlak pod kutom na pravac pružanja vlaknaca, što je vidljivo na slici 24.



Slika 24. Vlačna čvrstoća u tri smjera[23]

Za ispitivanje vlačne čvrstoće drva koristi se kidalica, za koju se pripremi standardizirane epruvete, iz čega se čvrstoća računa prema izrazu (1.8):

$$\sigma = \frac{F_{max}}{A_o} \quad [\text{Mpa}] \quad (1.8)$$

gdje je:

- $\sigma$  - vlačna čvrstoća [Mpa]
- $F_{max}$  - maksimalna vlačna sila [N]
- $A_o$  – dimenzije početne površine poprečnog presjeka [ $\text{mm}^2$ ]

Vlačna čvrstoća paralelno s vlakancima ovisi o nepravilnostima u građi, odnosno u strukturi drva. Prilikom pojave kvrga, vlakanca se prekidaju, te se umanjuje efektivna površina poprečnog presjeka koja prenosi opterećenja. Čvrstoća na vlak okomito na vlakanca je do 16 puta manja naspram vlačne čvrstoće paralelno s vlakancima i ovisi o nepravilnostima i širini goda. Zbog toga se naprezanja ove vrste trebaju izbjegavati u konstrukcijama, a ako je to neizbježno, potrebno je dobro analizirati i dovoljno učvrstiti takva mjesta kako bi se spriječila havarija. Vrijednosti čvrstoće na vlak pod nekim kutom u odnosu na vlakanca su između prethodna dva slučaja. Neke vrijednosti vlačne čvrstoće u tangencijalnom i radijalnom u odnosu na čvrstoću u uzdužnom smjeru, za četinjače i listače, prikazane su u tablici 4.

Tablica 4. Vrijednosti vlačne čvrstoće u tangencijalnom i radijalnom smjeru [24]

	<b>Tangencijalno</b>	<b>Radijalno</b>
<b>Četinjače</b>	0,025-0,030	0,040-0,050
<b>Listače</b>	0,040-0,065	0,070-0,100

Vlačno naprezanje se gotovo pa nikad ne pojavljuje samo, nego u kombinaciji sa smičnim naprežanjem, pa ove vrijednosti ne možemo uzimati kao konačne.

#### 4.2.1.2 Tlačna čvrstoća

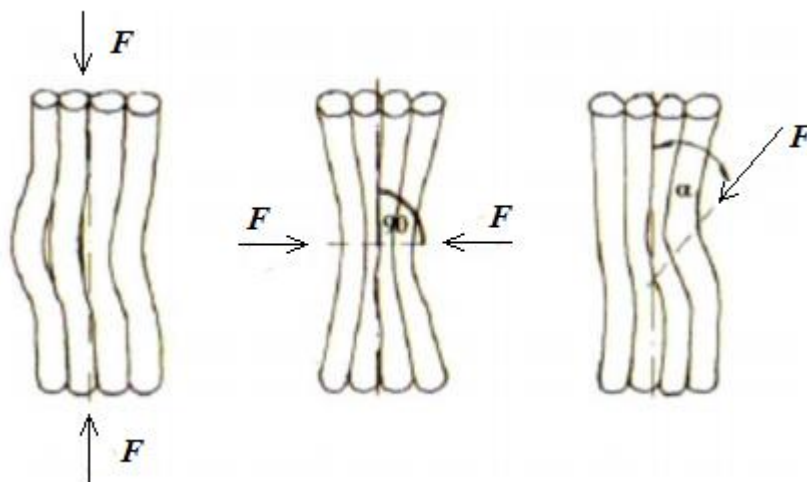
Tlačna čvrstoća je najveće naprežanje koje se javlja okomito na uzorak, te ga sila koja djeluje na uzorak pokušava deformirati, to jest stlačiti. Računa se prema izrazu (1.9):

$$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A_o} \quad [\text{Mpa}] \quad (1.9)$$

gdje je:

- $\sigma_t$  – tlačna čvrstoća [Mpa]
- $F_{max}$  – maksimalna tlačna sila [N]
- $A_o$  – dimenzije početne površine poprečnog presjeka [ $\text{mm}^2$ ]

Kao i kod vlačne čvrstoće, tlačna naprežanja se gledaju u tri smjera. Tlak okomito, tlak paralelno i tlak pod kutom u odnosu na smjer vlakancaca, što je prikazano na slici 25.

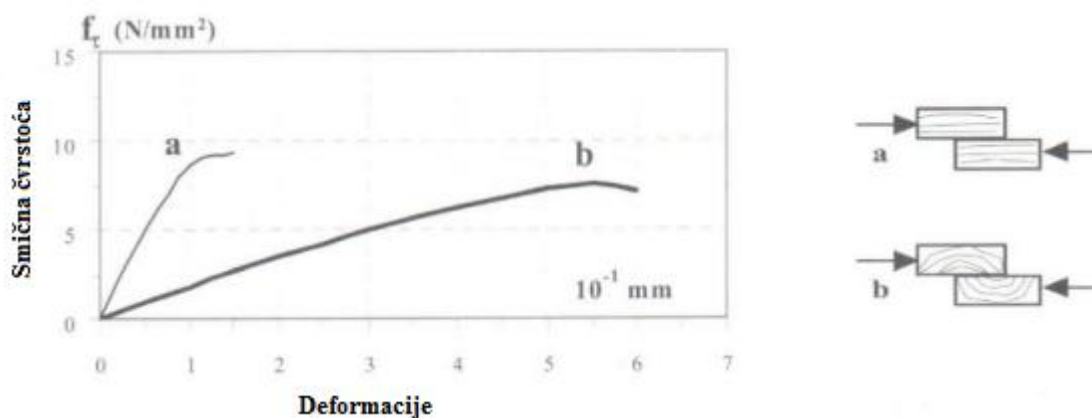


Slika 25. Tlačna čvrstoća u tri smjera [23]

Tlačna čvrstoća koja djeluje paralelno s vlakancima ne ovisi toliko o nepravilnostima u strukturi drva, jer ne dolazi do loma zbog pucanja vlaknaca, koja imaju široko elastoplastično i elastično područje deformacija. Vrijednosti tlačne čvrstoće su upola manje od vlačne čvrstoće. Tlačna čvrstoća okomito na vlaknca je jedna od manjih čvrstoća, a najčešće nastupa kod klasičnih drvenih krovišta. Povećani sadržaj vlage smanjuje čvrstoću drva.

#### 4.2.1.3 Smična čvrstoća

Čvrstoća na smik je otpor koji drvo pruža vanjskoj sili koja je rezultat paralelnog djelovanja dviju suprotnih sila (vlačnih ili tlačnih), što je prikazano na slici 26.



Slika 26. Ovisnost smične čvrstoće i deformacije [23]

Iz slike 26 vidljivo je da se smična čvrstoća paralelno i okomito s vlakancima ne razlikuju značajno, ali je velika razlika kod deformacije. Kod smika paralelno s vlakancima,

deformacija je 1%, a kod smika okomitog na vlakanca i do 6%. Kod drvenih konstrukcija najčešće se susreće smična čvrstoća paralelna s vlakancima.

Smična čvrstoća se računa prema izrazu (2.0):

$$\sigma_{m\tau} = \frac{F_{max}}{b \cdot l} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (2.0)$$

gdje je:

- $\sigma_{m\tau}$  – smična čvrstoća [ $\text{N/mm}^2$ ]
- $F_{max}$  – maksimalna smična sila [N]
- $b, l$  – dimenzije smične površine [mm]

Vrijednost smične čvrstoće paralelno s vlakancima za četinjače iznosi od 4,5 do 10  $\text{N/mm}^2$ , a za listače od 4,5 do 16  $\text{N/mm}^2$ .

#### 4.2.1.4 Savojna čvrstoća

Prilikom savijanja dolazi do kombiniranog naprezanja. Savojna sila djeluje na sredini oslonca, s gornjeg dijela djeluje tlak, a donji dio je vlačno opterećen. Uz smičnu i tlačnu čvrstoću, jedna je od češće ispitivanih i važnijih svojstava. Za njezino određivanje koriste se standardizirane metode i uzorkovanja i ispitivanja na kidalicama.

Savojna čvrstoća, kod metode savijanja u tri točke, računa se prema izrazu (2.1):

$$\sigma_b = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (2.1)$$

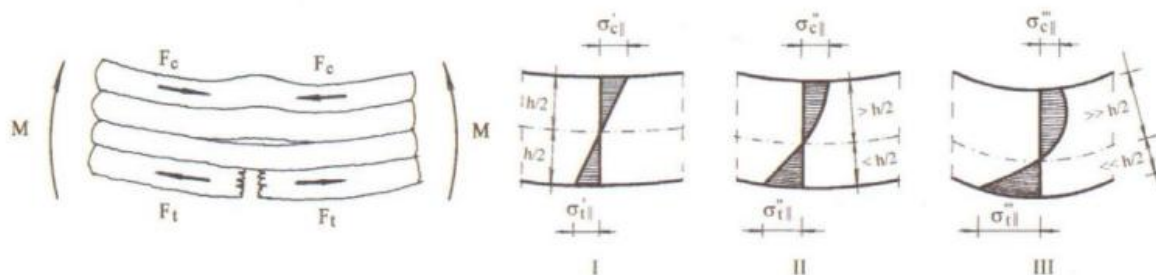
gdje je :

- $\sigma_b$  – savojna čvrstoća [ $\text{N/mm}^2$ ]
- $F_{max}$  – maksimalna sila savijanja [N]
- $l$  – razmak između oslonaca [mm]
- $b$  – širina uzorka [mm]
- $h$  – visina uzorka [mm]

Tablica 5. Vrijednosti savojne čvrstoće određenih domaćih vrsta drva [24]

Vrsta drva	Savojna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]
Hrast (lužnjak)	74,0-88,0-105,0
Bukva	74,0-123,0-210,0
Brijest	56,0-89,0-260,0
Bor (crni)	69,0-130,5-198,5
Smreka	49,0-78,0-136,0
Ariš	64,0-99,0-132,0

Prilikom naprezanja pri savijanju nastupaju tri stadija. U prvoj fazi drvo se ponaša po Hookeovom pravcu, kao što se vidi na slici 27. Normalna naprezanja su raspoređena simetrično. U drugoj fazi dolazi do povećanja opterećenja i pomicanja neutralne osi prema vlačnoj zoni. U trećoj fazi prije samoga loma, dolazi do značajnih plastičnih deformacija, gdje se vlakanca u tlačnoj zoni izmotavaju. Lom prvo nastaje u tlačnoj zoni, pa tek onda u vlačnoj zoni.



Slika 27. Prikaz stadija kod savijanja [23]

Vrijednost savojne čvrstoće ovisi o usmjerenosti strukture, a ponekad i o kutu zatvaranja savojne sile i linije goda.

#### 4.2.2 Tvrdoća drva

Tvrdoća je otpor koji materijal pruža prodiranju u nekog drugog tijela u njegovi strukturu. Prilikom mehaničke obrade, tvrde drvo se puno teže obrađuje od mekšeg i zahtjeva više energije i vremena za obradu.

Tvrdoća drva se može utvrditi na nekoliko načina. Najčešće se koristi metoda po Brinellu (EN 1534) i po Janki (ASTM D 1037-12).

Metoda utiskivanja čelične kuglice po Brinellu se prvotno koristila za metale, ali se zatim prilagodila za utvrđivanje tvrdoće drva. Provodi se tako da se čelična kuglica promjera 10 mm, pri ispitivanju utiskuje u ispitni uzorak od drva silom od 500 ili 1000N. Prirast sile je postupan.

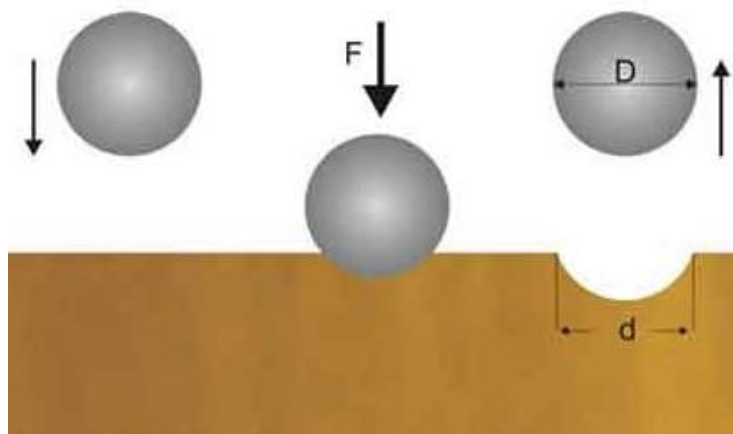
Tvrdoća po Brinellu se računa prema izrazu (2.2):

$$HB = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2.2)$$

gdje je :

- HB – Tvrdoća po Brinellu [Mpa]
- $F$ - sila utiskivanja [N]
- $D$ - promjer kuglice [mm]
- $d$ - promjer otiska [mm]

Postizanje vrijednosti sila utiskivanja, opterećenje se zadržava  $25 \pm 5$  sekundi, kako bi se otisak stabilizirao.



**Slika 28. Tvrdoća po Brinellu [25]**

Druga metoda je određivanje tvrdoće po Janki. Ispitivanje se provodi na standardiziranim uzorcima. Otisak je konstantan, jer se kuglica promjera 11,284 mm utisne na dubinu koja je jednaka radijusu kuglice 5,642 mm, pa se tako dobije površina otiska od  $100 \text{ mm}^2$ . Tvrdoća po Janki se računa prema izrazu (2.3):

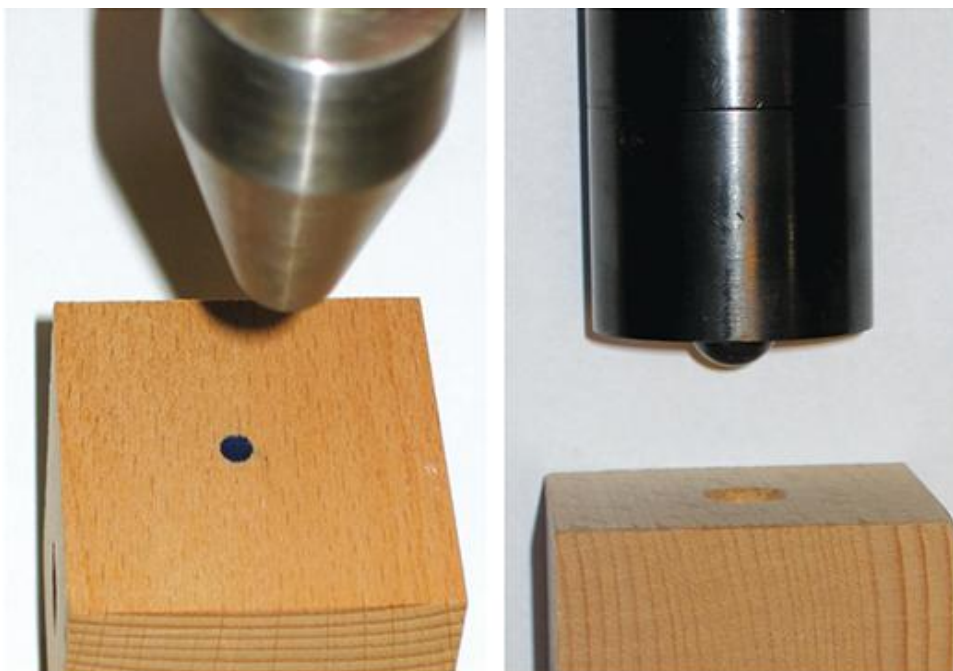
$$H_j = K \cdot F \quad (2.3)$$

gdje je :

- $H_j$ - Tvrdoća po Janki [N]
- $K$ - koeficijent ovisan o dubini prodiranja kuglice
- $F$ - Sila utiskivanja na propisanu dubinu [N]

Tvrdoća na poprečnom presjeku je veća od tvrdoće na uzdužnom presjeku, kod mekših vrsta drva do 2,5 puta, a kod tvrdih do 1,6 puta. Ovisi o vrsti drva, građi i strukturi, gustoći, zdravlju, udjelu vlage i presjeku na kojem se mjeri.

Na slici 29 prikazana je usporedba mjerenja tvrdoće po Brinellu i po Janki. Vidljivo je da je glavni nedostatak Brinellove metode u tome što ima mali promjer otiska, koji može uhvatiti više ranog ili kasnog drva, čime bi se dobili nedovoljno objektivni rezultati. Ispitivanje tvrdoće po Janki taj problem eliminira korištenjem kuglice većeg promjera i obuhvaća više godova.



Slika 29. Usporedba mjerenja tvrdoće po Brinellu i po Janki [26]

### 4.2.3 Modul elastičnosti

Modul elastičnosti je osnovna karakteristika elastičnosti materijala, jedno od najčešće određivanih mehaničkih svojstava. Vrijednosti se razlikuju za različite vrste drva, pa čak i unutar iste vrste. Predstavlja otpor materijala prema elastičnim deformacijama. Kod drva se treba paziti na njegovu anizotropnost, tako da se treba voditi računa o smjeru u kojem će se određivati. Najčešće se određuje iz deformacije savijanja prema izrazu (2.4):



$$E = \frac{F \cdot l^3}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot f} \quad (2.4)$$

gdje je:

- $E$  – modul elastičnosti [Gpa]
- $F$ - sila [N]
- $l$ - razmak između oslonaca [mm]
- $b$ - širina uzorka [mm]
- $h$ - visina uzorka [mm]
- $f$ - progib

Vrijednosti modula elastičnosti kreću se od 2 do 25 Gpa. Modul elastičnosti u longitudinalnom smjeru ima vrijednosti 10 do 20 puta više od modula elastičnosti u radijalnom i tangencijalnom presjeku [27]. Ovisi o mikrostrukturi, sadržaju vlage, temperaturi i načinu opterećenja.

#### 4.2.4 Žilavost

Žilavost je otpornost drva na udarna opterećenja, a pri deformaciji se produžava područje između granice elastičnosti i točke loma. Ispituje se pomoću Charpeyjevog bata, a računa se prema izrazu (2.5):

$$KU (KV) = G \cdot (h_1 - h_2) \quad (2.5)$$

gdje je:

- $KU (KV)$  – udarni rad loma [J]
- $G$ - težina bata [N]
- $h_1$ - početna visina bata [m]
- $h_2$ - visina bata nakon loma epruvete [m]

Žilavost drva ovisi o mikrostrukturi i usmjerenosti. Najmanja je prilikom udarca bata na uzorak tangencijalno na godove, dok je najveća kad bat udara na uzorak u radijalnom smjeru.

### 4.2.5 Otpornost na trošenje

Otpornost na trošenje je svojstvo drva da se opire razaranju (mehaničkom trošenju) površine pri djelovanju vanjskih sila. Postoji jako veliki broj slučajeva trošenja, a od osnovna četiri mehanizma trošenja, najčešće se promatra abrazijsko trošenje drva. Abrazijsko trošenje drva je trošenje istiskivanjem materijala djelovanjem tvrdih čestica ili izbočina. Izbor i način provođenja ispitivanja do danas nije potpuno određeno, a neke od metoda i načina ispitivanja su prikazane u tablici 6.

Tablica 6. Metode ispitivanja drva na otpornost abrazijskog trošenja [28]

Tip ispitivanja	Način ispitivanja
Taber abrader	Abrazivni papiri
Padajući pijesak	Abrazijom
Olovka	Ručno pod kutom od 45°
Zračna struja	Abrazijom u zračnoj struji

Abrazivno trošenje površine drva može se izraziti preko smanjenja dimenzija i mase, te recipročnom vrijednošću smanjenja debljine uzorka. Otpornost na abrazijsko trošenje ovisi o vrsti drva, građi i sastavu drva, gustoći, usmjerenosti mikrostrukture, sadržaju vlage i načinu obrade površine. U uskoj vezi je s tvrdoćom, ali ta dva svojstva nisu potpuno ista. Najveća otpornost drva se postiže na poprečnom presjeku, dok se tangencijalni i radijalni presjeci puno više troše.

## 4.3 Fizičko-kemijska svojstva

### 4.3.1 Trajnost

Trajnost drva se može definirati kao osobinu drva da za određeno vrijeme zadrži nepromijenjena prirodna svojstva, kao što je anatomska građa, čvrstoća, tvrdoća i boja. Postoji cijeli niz različitih utjecaja na trajnost drva, fizički utjecaj (voda, temperatura, promjenjivost dimenzija), biološki utjecaj (gljivice, insekti, plijesni), kemijski utjecaj (kisljine, redukcija sastavnih elemenata, oksidacija), mehanički utjecaji (statički, dinamički, trajni, promjenjivi i slično).

Vlaga uzrokuje pojavu gljivica i insekata, osobito u povoljnim temperaturnim uvjetima.

Trajnost ovisi o vrsti drva, gustoći, staništu, vrsti i sadržaju zaštitnih kemijskih sastojaka.

Drvo se može podijeliti po trajnosti u tri skupine:

- Vrlo trajno – hrastovina, ariš, bagrem
- Trajno – jasen, bor, smreka
- Kratko trajno- bukva, grab, trešnja

Na slici 30 prikazana je jedna od najstarijih crkvi u Norveškoj, izgrađenoj 1130 godine, koja na vrlo upečatljiv način govori o trajnosti drva.



Slika 30. Jedna od najstarijih drvenih crkvi u Norveškoj [29]

#### 4.3.2 Ogrjevna snaga drva

Snaga ogorijevanja je kalorična vrijednost, odnosno količina topline koja se dobije izgaranjem volumne količine drva. Povećanjem sadržaja vlage pada ogrjevna snaga zbog toga što se dio energije troši na isparavanje vode, pa je suho drvo najbolji izbor za ogrjev. Snaga ogorijevanja je veća, što je veća masa drva, te što je veći sadržaj lignina i smole. Drvo četinjača je zbog toga bolji izbor, jer je bogat ligninom, a sadrži i smolu. Problem je što zbog toga drvo četinjača brže gori od drva listača, a i potrebno je utrošiti veći volumen drva četinjača za isti toplinski učinak. Iz toga proizlazi da je drvo listača pogodnije za zagrijavanje.

#### 4.4 Estetska svojstva

Ocjena većine estetskih svojstava je subjektivna i ovisi o doživljaju pojedinca. Neka svojstva se mogu uspoređivati s normativima, kao što je boja, sjaj i miris, a neka se mogu i mjeriti kao elementi tekture (širina goda).

#### **4.4.1 Boja drva**

Pod bojom se podrazumijeva prirodna boja na određenoj površini zdravog i prosušenog drva. Boja drva ovisi o sadržaju vlage, presjeku, načinu i kvaliteti obrade površine, te starosti drva. Razlikuje se od vrste do vrste, a može se razlikovati čak i unutar jednog debla. Boje se kreću od bijele do crne, s nizom prijelaza između nijansi. Ovisi i o vrsti i količini infiltrata u stanicama, pa pod utjecajem svjetla, topline ili zraka, bijela boja će kod nekih vrsta promijeniti u žućkastu. Svjetlije vrste drva pri djelovanju atmosferilija će potamniti, a tamnije boje posvijetliti.

#### **4.4.2 Sjaj drva**

Sjaj je svojstvo odraza svjetla od površine drva. Ovisi o obrađenoj površini, građi, strukturi, infiltratima i presjeku. Površinskom obradom se može povećati sjaj, a od unutarnje građe drva, najviše na sjaj utječu drvni traci u radijalnom presjeku.

#### **4.4.3 Tekstura drva**

Tekstura je izgled drva na glatko obrađenoj površini. Izraz je strukture drva zbog razlike u boji ranog i kasnog drva, širine godova i veličine drvnih trakova. Većim sjajem se dobije izrazitija tekstura. Ovisno o načinu u smjeru obrade drva, mogu se dobiti različite teksture. Razlikuje se pravilna i nepravilna tekstura. Pravilnu teksturu daju normalna građa i deblo pravilnog oblika, a nepravilna građa daje i nepravilnu teksturu. Pravilna tekstura može biti poprečna, radijalna, tangencijalna i spiralna. Nepravilna tekstura se javlja u obliku poprečnih rebara, kvržica i valovitih linija. Unatoč tome što je nepravilne teksture, takvo drvo može biti vrlo cijenjeno i atraktivno.

#### **4.4.4 Miris drva**

Drvena tvar nema miris, ali zbog kemijskog sastava, neke vrste drva imaju određeni miris. On dolazi od različitih infiltrata u drvnim stanicama, koji imaju svojstvo hlapljivosti, kao što su eterična ulja ili mirisi od procesa truljenja. Drvo lako upija mirise, pa o tome treba voditi računa pri uporabi drva u dodiru s hranom. Drvo može neugodno mirisati, ako je napadnuto gljivicama.

Ugodan miris ima bor, smreka i ariš, dok neugodni šimšir, lovorika i smrdljika.

## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

### 5.1 Cilj rada i provođenje ispitivanja

U radu je istražen utjecaj starosti na abrazijsku otpornost subfosilnog drva hrasta lužnjaka izvađenog iz korita rijeke Save na području Bosanske Posavine. Ispitivanje je provedeno na tri uzorka iz iste vrste drva, ali različite starosti, te su rezultati međusobno uspoređeni. Zbog anizotropnosti strukture i svojstava, za svaki uzorak pojedinačno su provedena ispitivanja u sva tri karakteristična presjeka: poprečnom, radijalnom i tangencijalnom. Pri ispitivanju otpornosti na abrazijsko trošenje koristile su se različite kvalitete brusnog papira, kako bi se utvrdio utjecaj finoće abrazivnih čestica brusnog papira na abrazijsku otpornost drva. Dobiveni rezultati su stavljeni u korelaciju sa starošću i gustoćom uzoraka.

S obzirom na postavljeni cilj, provedeno je sljedeće:

- Određivanje starosti uzoraka
- Određivanje gustoće uzoraka
- Analiza mikro i makro strukture
- Ispitivanje otpornost na abrazijsko trošenje

### 5.2 Materijal za ispitivanje

Ispitivanja su provedena na uzorcima drva hrasta lužnjaka različite starosti, kako je prikazano u tablici 7. Uzorci subfosilnog hrasta su pronađeni slučajno, tijekom eksploatacije šljunka. Na pravilan način su skladišteni kako ne bi došlo do pucanja prilikom naglog sušenja. Svi uzorci potječu iz istog zemljopisnog područja, kako je prikazano na slici 31.



**Slika 31. Bosna i Hercegovina sa susjednim državama i područje s kojeg su uzorci izvađeni [30]**

Na slici je prikazano uvećano područje oko mjesta Oštra Luka, gdje se nalazi umjetno jezero nastalo kopanjem šljunka, iz kojeg je izvađeno subfosilno deblo hrasta starosti oko 5890. Iz korita rijeke Save na području mjesta Domaljevac, izvađen je hrast star 1840. Godina. Uzorci recentnog hrasta izrezani su iz debla posječenog na području oko Štitara i sušenog u natkrivenom prostoru desetak godina.

Određivanje starosti subfosilnih uzoraka provedeno je metodom radioaktivnog izotopa ugljika  $C_{14}$  na Zavodu za eksperimentalnu fiziku, u Laboratoriju za mjerenje niskih aktivnosti, Instituta Ruđera Boškovića. Rezultati su prikazani u tablici 7.

Tablica 7. Rezultati starosti uzoraka

	Konvencijska $^{14}C$ starost	Kalibrirana starost [godine]	Median Cal (BC/AD)
Uzorak 1	$\approx 70$ g.	-	-
Uzorak 2	$1840 \pm 55$	123-240 cal AD	178 cal AD
Uzorak 3	$5890 \pm 115$		

Konvencijska  $^{14}C$  starost je apsolutna starost drva u godinama, računana od sada (BP- before present), a kao relevantna godine se uzima 1950. Rezultat je izračunat uz konvencijski usvojeno vrijeme poluraspada izotopa  $^{14}C$  od 5570 godina, s pogreškom  $1\sigma$ .

Kalibrirana starost je starost izražena u povijesnim godinama, određena na osnovi dendrokronološke kalibracijske krivulje.

Median je centralna vrijednost raspodjele kalibriranih starosti [31].

### 5.2.1 Analiza mikro i makro strukture

Priprema uzoraka za analizu mikro i makro strukture uzoraka provedena je u Laboratoriju za polimere i kompozite Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Analiza mikrostrukture je provedena na svjetlosnom mikroskopu OLYMPUS BX 51, slika 32.

Makrostruktura je snimljena digitalnim fotoaparatom.

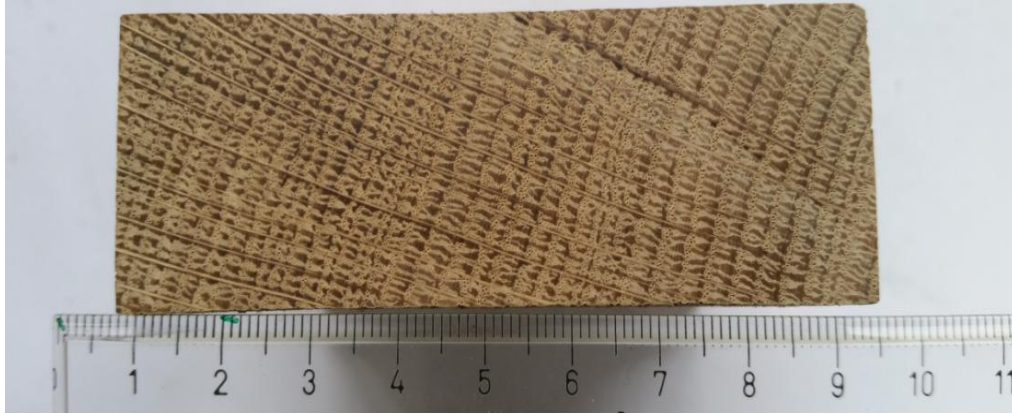


Slika 32. Svjetlosni mikroskop

Na slikama 33, 34 i 35 prikazana je makrostruktura poprečnog presjeka svih uzoraka.

Kod svakog uzorka određena je prosječna širina goda u području s kojeg su izrezani uzorci za ispitivanje abrazijske otpornosti. Rezultati su prikazani u tablici 8.

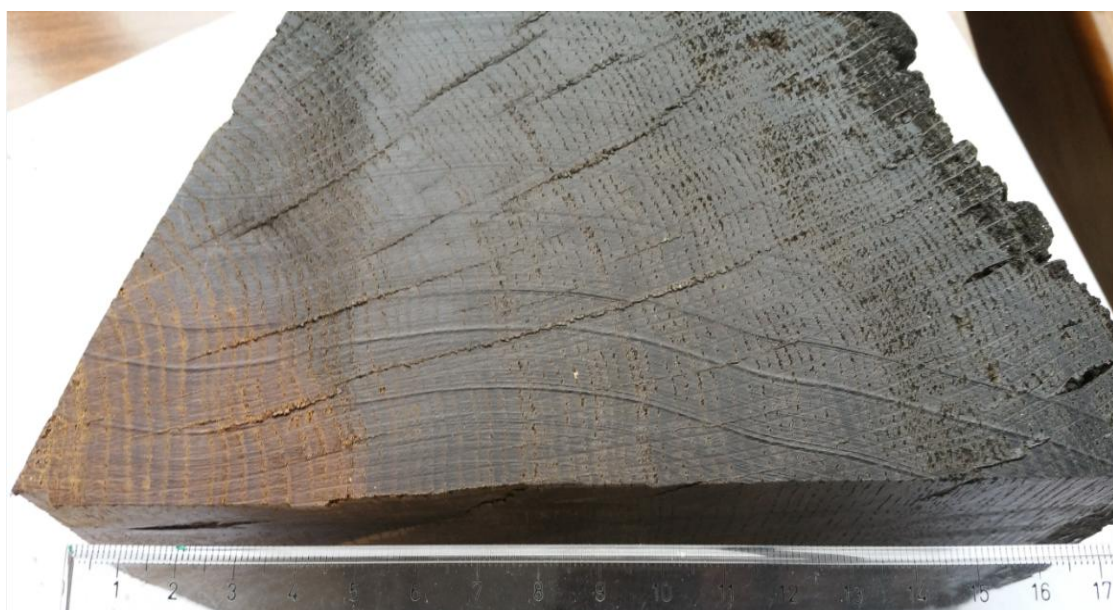




**Slika 33. Makrostruktura poprečnog presjeka recentnog hrasta**



**Slika 34. Makrostruktura poprečnog presjeka 1840 godina starog hrasta**



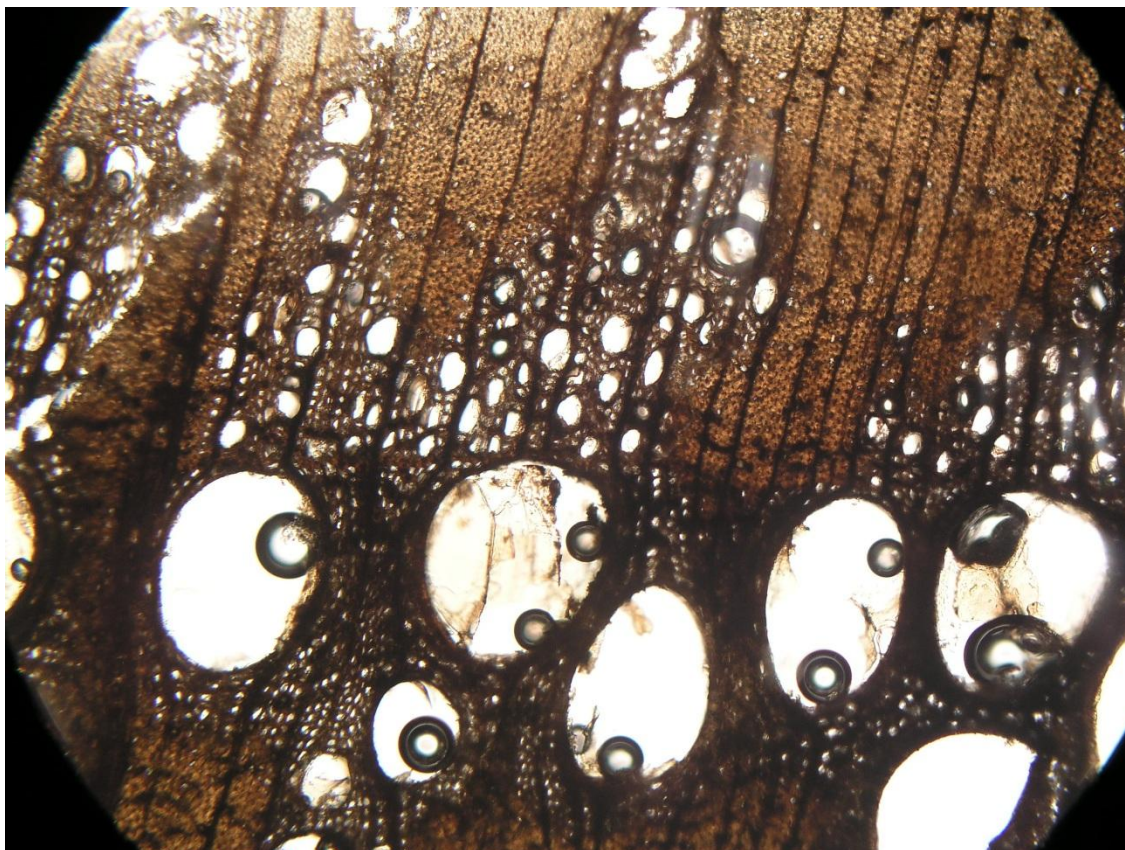
**Slika 35. Makrostruktura poprečnog presjeka drva hrasta starosti 5800. Godina**



Tablica 8. Srednja širina goda

	Srednja širina goda [mm]
Uzorak 1	2,1
Uzorak 2	2,5
Uzorak 3	1,3

Na slici 36 prikazana je mikrostruktura subfosilnog uzorka drva u poprečnom presjeku.



Slika 36. Mikrostruktura subfosilnog hrasta (uzorak 3, ≈ 5890 god.)

Na temelju rasporeda i veličine provodnih sudova može se zaključiti da svi uzorci pripadaju istoj vrsti drva, hrastu lužnjaku (*Quercus robur*).

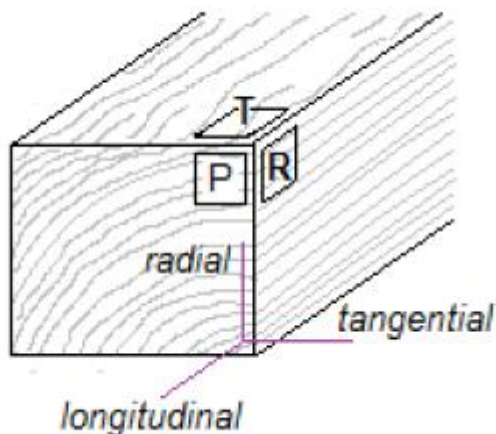
### 5.3 Priprema uzoraka

Dimenzije poprečnog presjeka uzoraka za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje bile su  $5 \times 5 \text{ mm}^2$ . Poprečni presjek uzoraka korišten je kao površina trošenja pri ispitivanju otpornosti na abrazijsko trošenje. Izrezane su tri skupine uzoraka na osnovu karakterističnih presjeka, za tri različita uzorka po starosti. Površina trošenja uzorka P (poprečni presjek) bila je okomita na uzdužnu os, površina trošenja uzorka R je bila okomita na tangencijalnu os (radijalni

presjek), dok je površina trošenja uzorka T (tangencijalni presjek) bila okomita na radijalnu os.

Na slici 37 shematski su prikazane površine trošenja za sva tri karakteristična presjeka.

Uzorci su izrezani ručno, pomoću ručne pile za drvo na dimenzije približno  $7 \times 7 \text{ mm}^2$ . Slika 38 prikazuje izrezivanje ispitnih uzoraka iz komada drva hrasta.



Slika 37. Osnovne osi simetrije i karakteristični presjeci drva [32]



Slika 38. Izrezivanje uzorka

Nakon rezanja uzorka potrebno je dobiti dimenzije koje su nam potrebne za provođenje ispitivanja. Uzorak drva se postavlja na stolnu brusilicu, s brusnim papirom većih abrazivnih čestica te se na grubo obrađuje na dimenzije približno traženima. Postupak je prikazan na slici 39. Nakon toga slijedi završna fina obrada s jako finim brusnim papirom što manjih

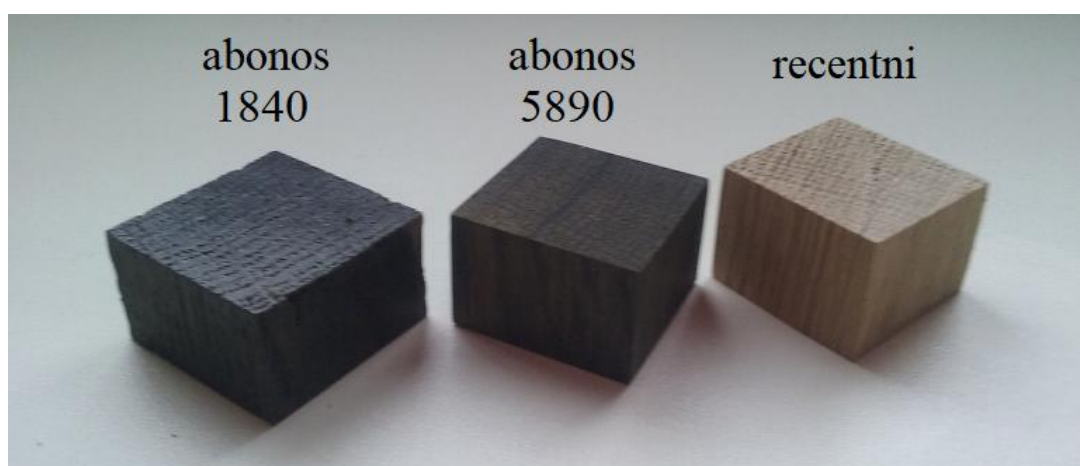
abrazivnih čestica na dimenzije  $5 \times 5 \text{ mm}^2$  kako bi se uklonili tragovi rezanja od pile i grube obrade. Završna kontrola dimenzija ispitnih uzoraka za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje obavljena je pomičnim mjerilom.



**Slika 39. Stolna brusilica i obrada uzorka**

#### 5.4 Određivanje gustoće

Gustoća uzoraka je određena prema normi ISO 13601 2014. Godine. Određena je na uzorcima izrezanim u četverostrane prizme dimenzija  $30 \times 30 \times 20$ , a minimalni broj godova ne smije biti manji od 5. Na slici 40 prikazani su svi uzorci za određivanje gustoće.



**Slika 40. Uzorci za određivanje gustoće**

Postupak se provodi tako da se odredi volumen uzorka mjerenjem širine, duljine i visine pomičnim mjerilom, te nakon toga vaganje uzorka na mjernoj vagi.

Gustoća se računa se prema izrazu (2.6):



$$\rho_w = \frac{m_w}{a_w \cdot b_w \cdot h_w} = \frac{m_w}{V_w} \quad (2.6)$$

gdje je:

- $\rho_w$ - gustoća za neki udio vlage [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]
- $m_w$ -masa uzorka za neki udio vlage [g]
- $V_w$ - volumen uzorka za neki udio vlage [ $\text{cm}^3$ ]

Masa uzorka je određena na mjernoj vazi s osjetljivošću od 0,001 g, a veća točnost je potrebna kod ispitivanja uzoraka tankih slojeva na abrazijsku otpornost, a iznosi 0,0001 g.

Na slici 41 prikazana je mjerna vaga.



Slika 41. Mjerna vaga

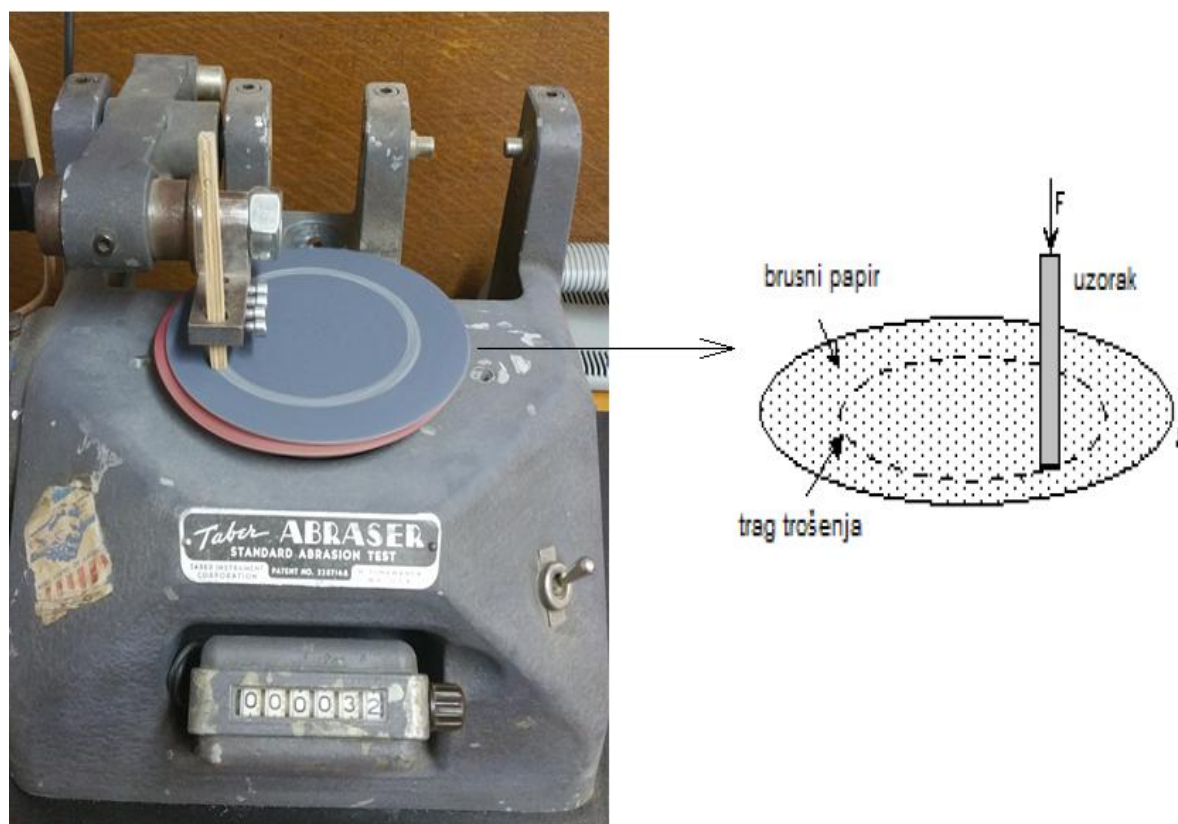
Dobiveni rezultati gustoće uzoraka prikazani su u tablici 8.

Tablica 9. Rezultati mjerenja gustoće uzoraka

	masa [g]	volumen [ $\text{cm}^3$ ]	gustoća [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	gustoća <sub>12%</sub> [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]
Uzorak 1	14,281	18,823	0,759	0,789
Uzorak 2	14,319	18,621	0,769	0,799
Uzorak 3	12,627	18,801	0,671	0,678

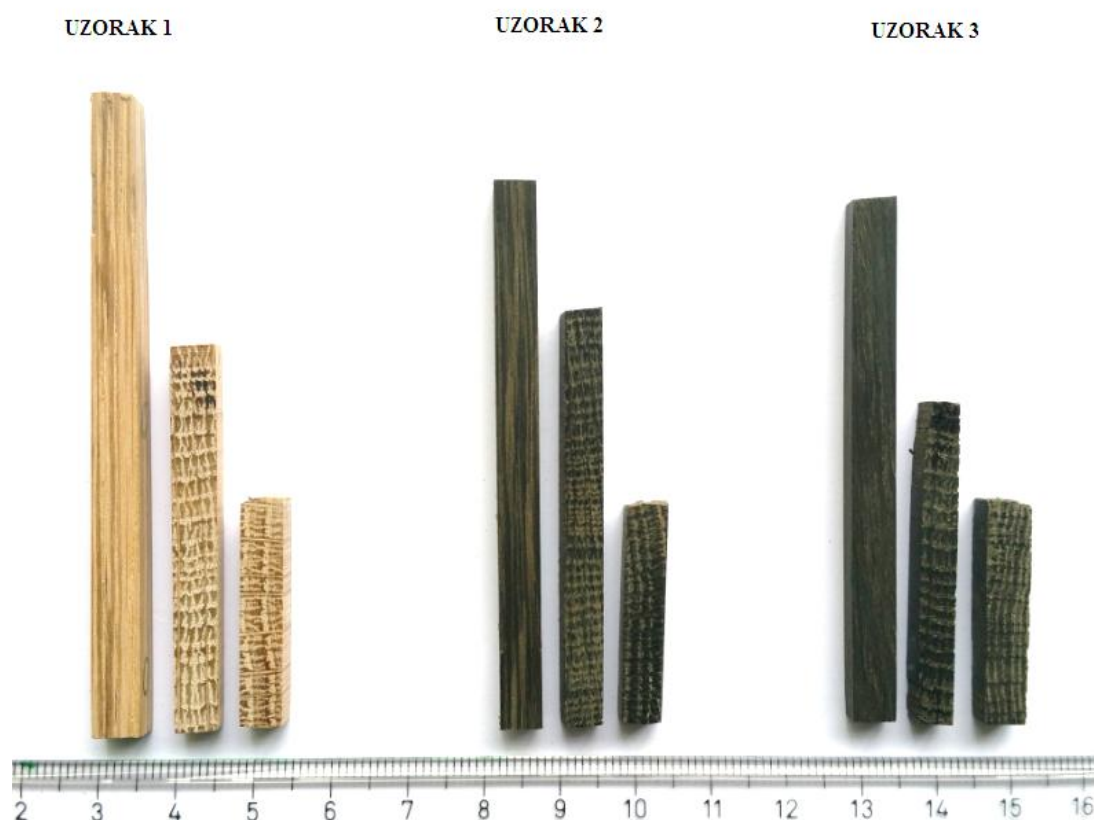
## 5.5 Ispitivanje otpornosti uzoraka na abrazijsko trošenje

Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje subfossilnog drva hrasta provedeno je u Laboratoriju za tribologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Provodi se na ispitnom uređaju „Taber abrader“, koji na sebi ima brusni papir određene granulacije, te uz konstantan pritisak i konstantan broj okretaja, uslijed trenja skida sloj s ispitnih uzoraka. Dimenzije i masa uzoraka se mjere prije i nakon provedenog ispitivanja. Također je potrebno paziti na karakterističan presjek uzorka i prilikom zapisa rezultata potrebno je označiti koji se presjek trošio (poprečni, radijalni i tangencijalni). Pošto je i brusni papir koji se upotrebljava trošiv, uređaju se ugrađuje naprava koja ujednačeno pomiče brusni papir kako bi se omogućilo jednolično trošenje svih uzoraka. Umjesto te naprave moguća je i varijanta u kojoj se brusni papir prilijepi na uređaj, te nakon određenog broja okretaja ručno pomakne. Uređaj i princip rada je prikazan na slici 42.



Slika 42. Uređaj za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje „Taber abrader“

Prije ispitivanja uzorci su pobrušeni kako bi se dobila kvalitetnija površina. Ispitivanja su provedena na devet četvrtastih uzoraka u sva tri karakteristična presjeka. Uzorci su prikazani na slici 43.



Slika 43. Uzorci za ispitivanje

Za procjenu otpornosti uzoraka na abrazijsko trošenje korišten je taber abrader s rotirajućim abrazivnim diskom promjera 125 mm. Brzina vrtnje bila je 1 okretaj/s, a obodna brzina 0,251 m/s. Uzorci su bili opterećeni konstantnom silom od 4,91 N, kako bi uzorci tijekom cijelog ispitivanja bili u kontaktu s abrazivnim česticama. Laboratorijska sobna temperatura bila je 25°C, a razina vlažnosti 56 %.

Svi uzorci tijekom ispitivanja su izloženi trošenju od 200 okretaja za svaku kvalitetu papira pojedinačno. Prije i nakon ispitivanja je izmjerena masa svakog uzorka iz čega se dobije gubitak mase nakon 200 okretaja.

Uzorci su abradirani brusnim papirima različite kvalitete abrazivnih čestica, koje su od silicijevog karbida. Nakon ispitivanja uzorci su očišćeni četkicom s finim vlaknima. Za svaki presjek je korišten novi brusni papir.

U tablici 10 prikazani su korišteni brusni papiri, njihove oznake i prosječna veličina abrazivnih čestica.

Tablica 10. Brusni papiri korišteni za ispitivanje [33]

Oznaka brusnog papira prema ISO/FEPA	Prosječna veličina abrazivnih čestica [ $\mu\text{m}$ ]
P 80	201
P 120	125
P280	52,2
P 600	25,8

Postupak ispitivanja se sastojao od vaganja uzorka, postavljanja brusnog papira od najfinijeg (P600) do najgrubljeg (P80), mjerenje dimenzija uzorka, postavljanje uzorka u držač, abrazijsko trošenje uzorka, čišćenje uzorka i brusnog papira, mjerenje dimenzija uzorka nakon trošenja, vaganje uzorka na mjernoj vagi i računanje gubitka mase uzorka.

Intenzitet trošenja se dobije preko gubitka mase koji se sveden na gubitak volumena zbog različite gustoće uzorka, te se onda otpornost na abrazijsko trošenje odredi preko gubitka volumena svedenog na površinu poprečnog presjeka trošenog uzorka.

U tablici 11, 12 i 13 prikazani su rezultati gubitka volumena uzorka svedenog na površinu poprečnog presjeka za svaki uzorak pojedinačno u sva tri karakteristična presjeka.

Tablica 11. Intenzitet trošenja uzorka 1 pri abrazijskom trošenju

$\Delta V/(axb)$	$\Delta V_{600}/(axb)$	$\Delta V_{280}(axb)$	$\Delta V_{120}(axb)$	$\Delta V_{80}(axb)$
C	0,057787764	0,317519619	2,778442696	1,960030372
T	0,276271044	2,038869258	7,566090774	7,694075044
R	0,472214357	2,100747319	5,935477881	4,755997945

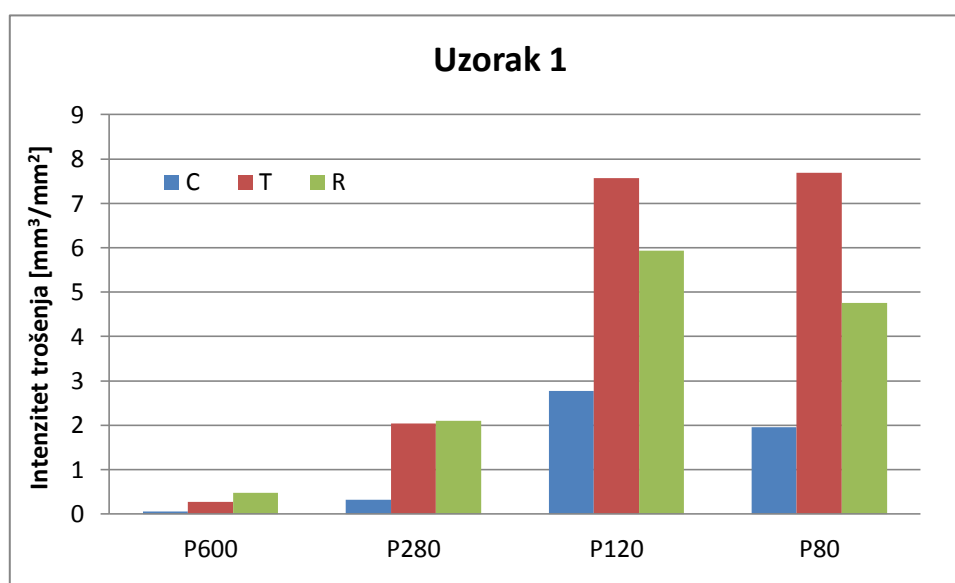
Tablica 12. Intenzitet trošenja uzorka 2 pri abrazijskom trošenju

$\Delta V/(axb)$	$\Delta V_{600}/(axb)$	$\Delta V_{280}/(axb)$	$\Delta V_{120}/(axb)$	$\Delta V_{80}/(axb)$
C	0,083039518	0,333204196	2,405677291	1,811616867
T	0,483883952	2,128005826	8,168960122	6,160656432
R	0,332694118	1,760650093	5,750824269	6,534150072

Tablica 13. Intenzitet trošenja uzorka 3 pri abrazijskom trošenju

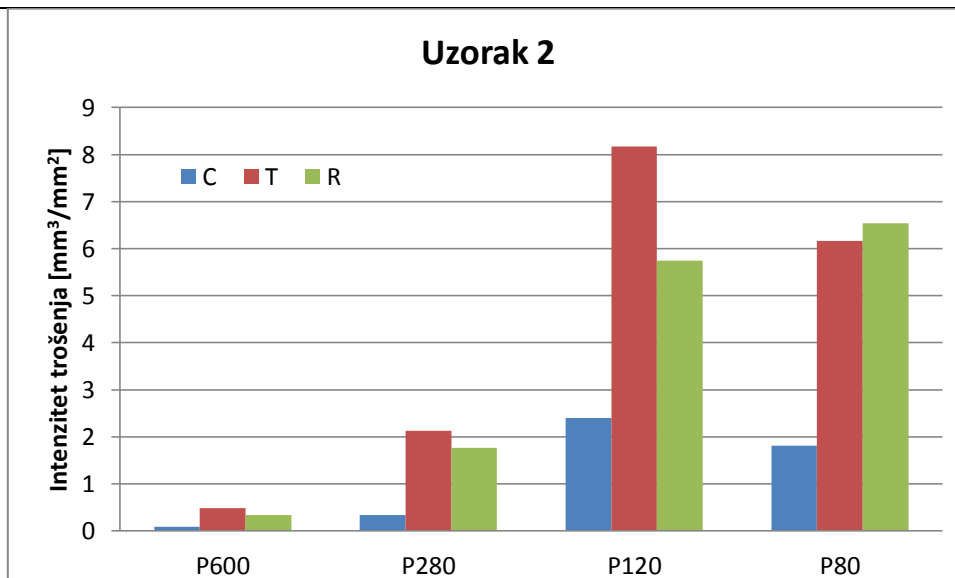
$\Delta V/(axb)$	$\Delta V_{600}/(axb)$	$\Delta V_{280}/(axb)$	$\Delta V_{120}/(axb)$	$\Delta V_{80}/(axb)$
C	0,105511018	0,488846794	3,627528328	3,075748098
T	0,510706932	3,146922779	12,25511991	10,06836624
R	0,691198013	3,199744829	12,40185527	7,283852458

Na slikama 44, 45, 46, prikazan je intenzitet trošenja uzoraka u poprečnom, tangencijalnom i radijalnom smjeru, za sve vrste kvaliteta brusnog papira. Kako ne bi došlo do razlike u veličini trošene površine, volumen trošene površine sveden je na površinu trošenog uzorka.

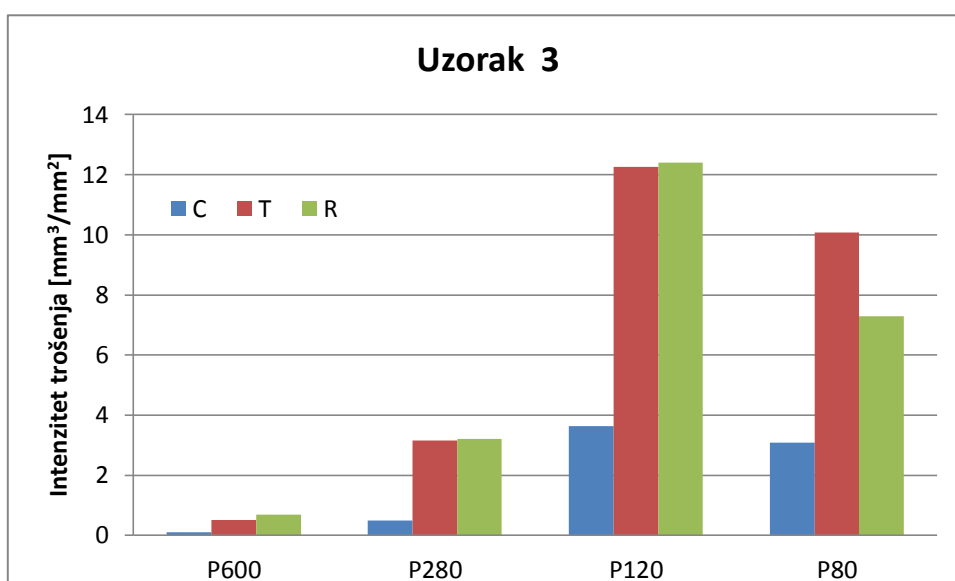


Slika 44. Ovisnost intenziteta trošenja uzorka 1 o kvaliteti brusnog papira





Slika 45. Ovisnost intenziteta trošenja uzorka 2 o kvaliteti brusnog papira



Slika 46. Ovisnost intenziteta trošenja uzorka 3 o kvaliteti brusnog papira

## 5.6 Analiza rezultata

### 5.6.1 Osvrt na utjecaj usmjerenosti drvene građe i veličine abrazivnih čestica na intenzitet trošenja

Na slikama 47, 48 i 49 prikazana je ovisnost intenziteta trošenja uzoraka o prosječnoj veličini abrazivnih čestica.

Za sve kvalitete brusnog papira, uzorci u tangencijalnom smjeru su se trošili najviše, a najmanje u poprečnom presjeku. Razlog tome je u činjenici da je drvo anizotropan materijal s posebno orijentiranom strukturom.

U poprečnom presjeku, vlakna i parenhim su orijentirani okomito na površinu trošenja i u tom smjeru drvo pruža najveću otpornost na trošenje.

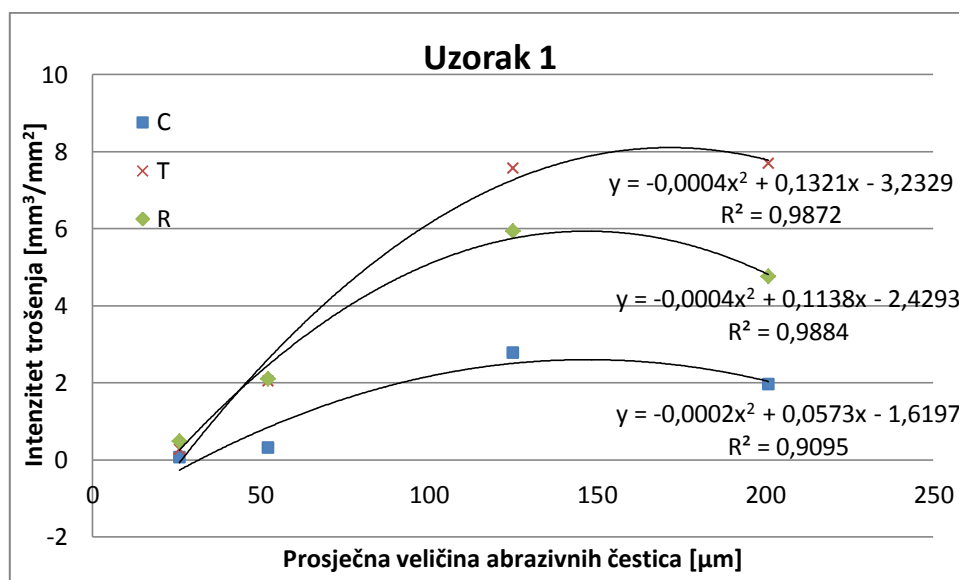
U tangencijalnom i radijalnom presjeku, pore, vlakna i parenhim su usmjereni paralelno s površinom trošenja uzoraka i okomiti na smjer trošenja.

Porastom prosječne veličine abrazivnih čestica, raste i trošenje uzoraka do određene veličine abrazivnih čestica, nakon čega dolazi do smanjenja intenziteta trošenja kod većine ispitanih uzoraka, unatoč povećanju prosječne veličine abrazivnih čestica. Ta se pojava opisuje kao kritična veličina abrazijskih čestica.

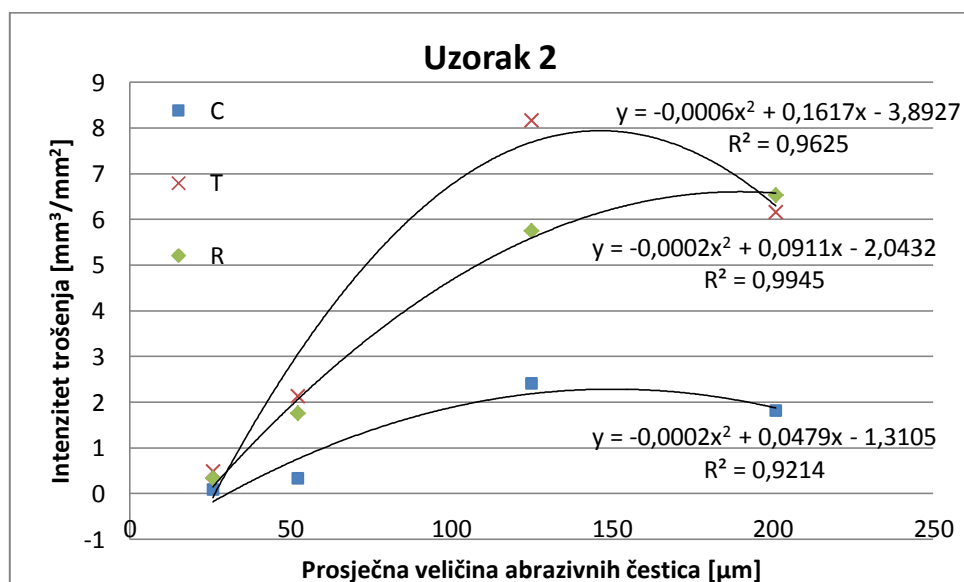
Kritična veličina abrazivnih čestica kod svih uzoraka je oko 125  $\mu\text{m}$ , osim kod uzorka 2 u radijalnom presjeku gdje je kritična veličina abrazivnog zrna na vrijednosti oko 200  $\mu\text{m}$ .

Razlike u intenzitetu trošenja između poprečnog (C), radijalnog (R) i tangencijalnog (T) presjeka svih uzoraka, postaju sve manje s povećanjem kvalitete brusnog papira, odnosno smanjenja prosječne veličine abrazivnih čestica. Smanjenjem prosječne veličine abrazivnih čestica, heterogenost mikrostrukture drva smanjuje se otpornost na abrazijsko trošenje uzoraka.

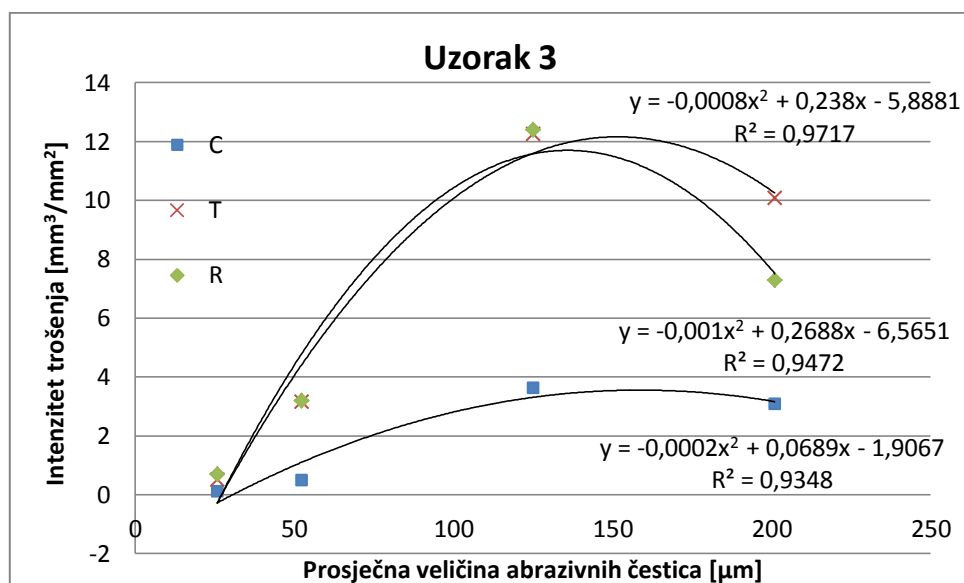
Dobiveni rezultati su vrlo dobro aproksimirani polinomima drugog stupnja. Koeficijenti determinacije za sve krivulje veći su od 0,909.



Slika 47. Ovisnost intenziteta trošenja uzorka 1 o prosječnoj veličini abrazivnih čestica

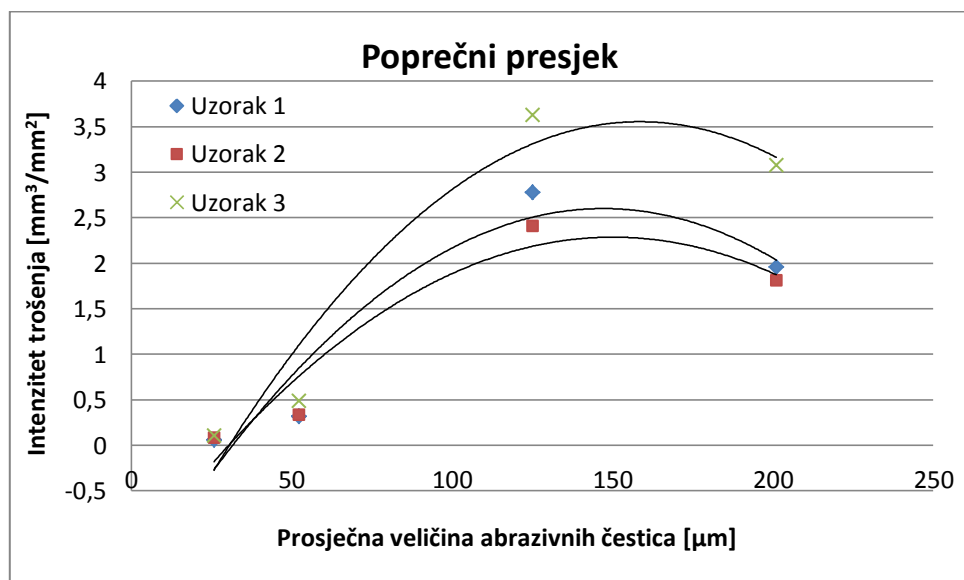


Slika 48. Ovisnost intenziteta trošenja uzorka 2 o prosječnoj veličini abrazivnih čestica

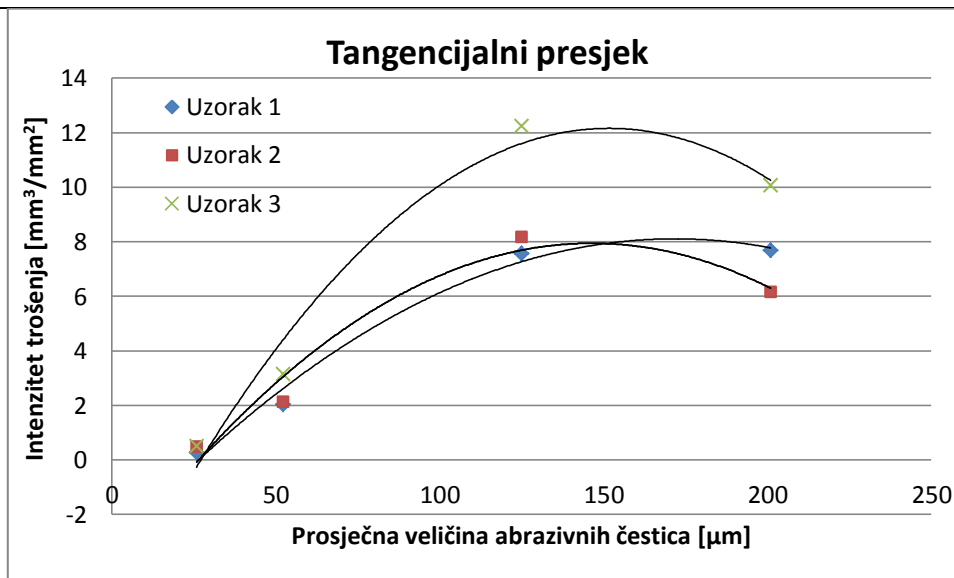


Slika 49. Ovisnost intenziteta trošenja uzorka 3 o prosječnoj veličini abrazivnih čestica

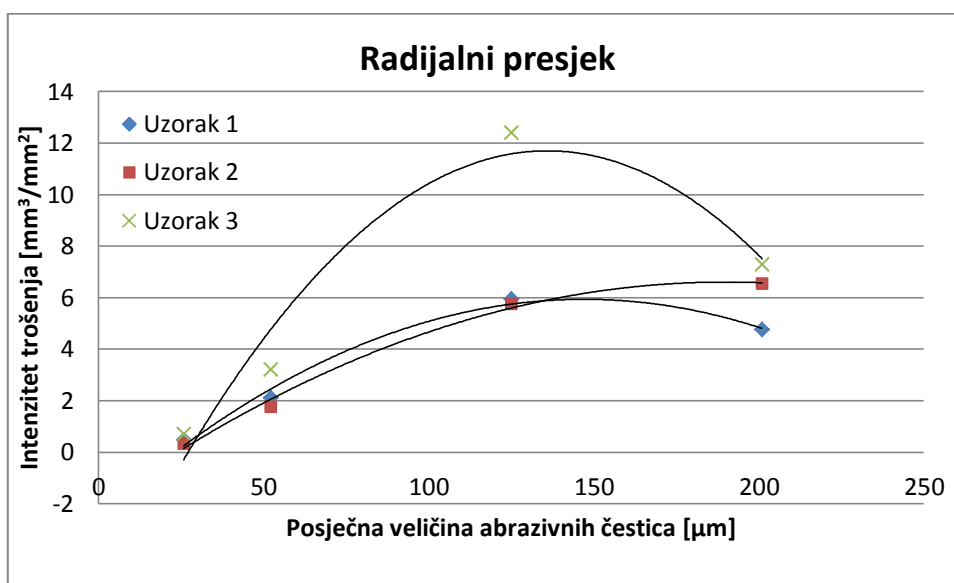
Na slikama 50, 51 i 52 prikazan je utjecaj prosječne veličine abrazivnih čestica na intenzitet abrazijskog trošenja svih uzoraka u poprečnom, tangencijalnom i radijalnom presjeku. U sva tri presjeka najviše se troši uzorak 3 koji je ujedno i najstariji uzorak. Uzorak 2, hrast abonos star 1840. godina, ima najmanji intenzitet trošenja za sve kvalitete brusnog papira.



Slika 50. Ovisnost poprečnog presjeka sva tri uzorka o prosječnoj veličini abrazivnih čestica



Slika 51. Ovisnost tangencijalnog presjeka sva tri uzorka o prosječnoj veličini abrazivnih čestica



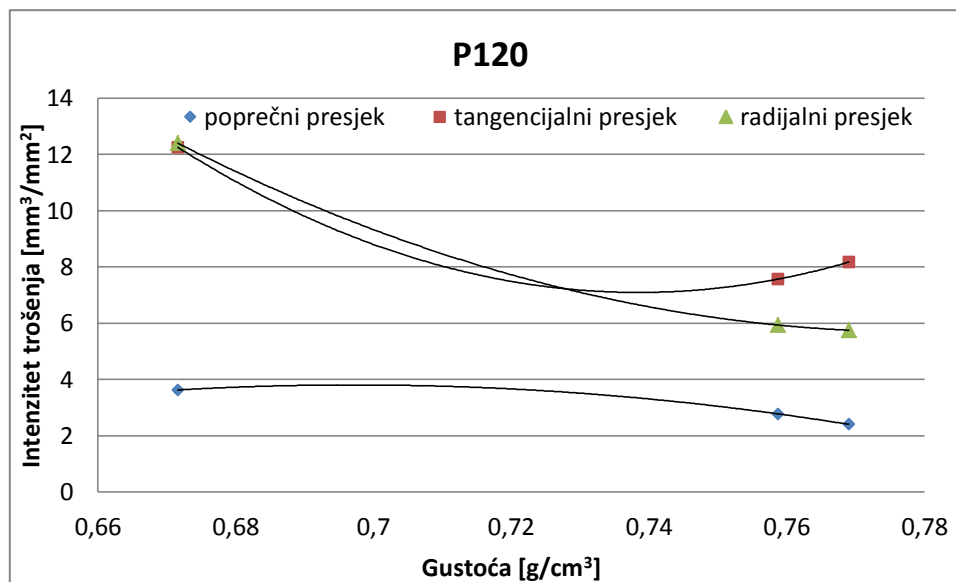
Slika 52. Ovisnost radijalnog presjeka sva tri uzorka o prosječnoj veličini abrazivnih čestica

### 5.6.1 Osvrt na utjecaj gustoće drva na intenzitet trošenja

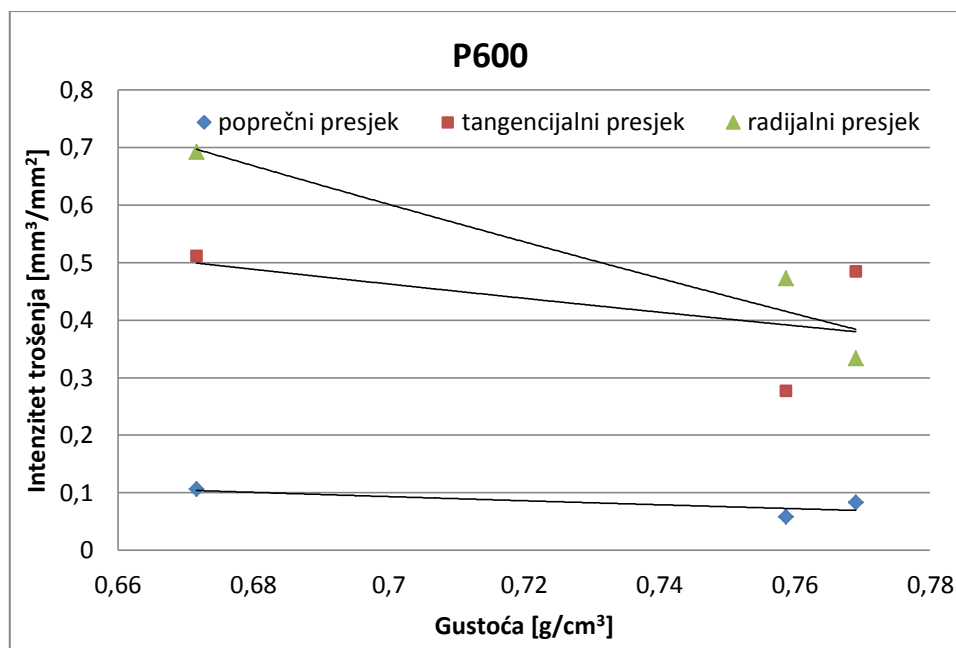
Na slikama 53 i 54 prikazana je ovisnost intenziteta trošenja o gustoći uzorka za kvalitetu brusnog papira P120 i P600. Iz slika se vidi da gustoća uzorka utječe na intezitet trošenja. Porastom gustoće smanjuje se intenzitet trošenja.

Najveću gustoću ima mlađi subfosilni hrast (uzorak 2), taj se uzorak najmanje i troši u svim presjecima. Stariji subfosilni hrast (uzorak 3), ima najmanju gustoću i on se najviše troši. Recentni hrast (uzorak 1) ima neznatno nižu gustoću od mlađeg subfosilnog hrasta i manje je

otporan na abrazijsko trošenje. Mlađi subfosilni hrast je pronađen u mulju rijeke Save, gdje je kroz dugi niz godina njegova mikrostruktura impregnirana različitim mineralima, što je povećalo njegovu gustoću (u odnosu na recentni), a u konačnici je povećalo i njegovu otpornost na abraziju.



Slika 53. Ovisnost intenziteta trošenja presjeka uzorka o gustoći uzorka za kvalitetu brusnog papira P120



Slika 54. Ovisnost intenziteta trošenja presjeka uzorka o gustoći uzorka za kvalitetu brusnog papira P600

## 6. ZAKLJUČAK

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

- Usmjerenost građe drva ima veliki utjecaj na intenzitet abrazijskog trošenja. Kod svih ispitanih uzoraka najintenzivnije se troši tangencijalni presjek, a najveću otpornost prema abrazijskom trošenju ima poprečni presjek.
- Prosječna veličina abrazivnog zrna ima veliki utjecaj na intenzitet abrazijskog trošenja svih uzoraka. S povećanjem prosječne veličine abrazivnog zrna, povećava se intenzitet abrazijskog trošenja.
- Kod svih ispitanih uzoraka izražen je fenomen kritične veličine abrazivnog zrna. Kritična veličina abrazivnog zrna je kod skoro svih uzoraka oko 125  $\mu\text{m}$ , nakon čega dolazi do smanjenja intenziteta abrazijskog trošenja.
- Mlađe subfosilno drvo starosti 1840 godina, zbog impregnacije mikrostrukture mineralima, ima najveću gustoću i otpornost na abrazijsko trošenje. Kod starijeg subfosilnog drva, starosti oko 5890 godina, zbog predugog vremena provedenog u specifičnim anaerobnim uvjetima u riječnom mulju, došlo je do promjena u sastavu i mikrostrukтури, te zbog toga ono ima najmanju gustoću i otpornost na abrazijsko trošenje.
- Gustoća drva ima značajan utjecaj na intenzitet trošenja. S povećanjem gustoće, raste otpornost na abrazijsko trošenje.

## LITERATURA

- [1] Noack, D./ Schwab, E.: Holz als Baustoff. In: Holzbau- Taschenbuch, Band 1, 8. Auflage. Ernst und Sohn, Berlin, 1986
- [2] Karahasanović, A.: Nauka o drvetu, Sarajevo, 1988.
- [3] <https://hrovat.net/o-lesu/teksture-lesa-in-nacini-razreza/prerezi-in-teksture-podrobno/>, pogledano 10.10.2018
- [4] Frgić, V.: Materijali dvodjeljske struke, Zagreb, 2001.
- [5] Roger M. Rowell: Handbook of wood chemistry and wood composites, 2005.
- [6] Špoljarić, Z.: Anatomija drva, skripta za slušače Šumarskog odjela Šumarskog fakulteta u Zagrebu, Zagreb, 1978.
- [7] Panshin, A.J. and C. de Zeeuw: Textbook of Wood Technology, 4th edition, McGraw-Hill Book. Co. New York, 1980.
- [8] <http://mendthegap.agr.hr/wp-content/uploads/2017/09/Prezentacija-drvo-radionica.pdf>, pogledano 12.10.2018.
- [9] Trajković J.: Anatomija drva, Skripta za studente sveučilišnog preddiplomskog studija Drvne tehnologije Šumarskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2017.
- [10] Leksikografski zavod Miroslav Krleža,  
<http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=16354>, pogledano 25.09.2018.
- [11] Antonović, A.: Kemija drva – Dio I. Interna skripta, Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet, 2008.
- [12] <http://www.ss-obrtnicka-pozega.skole.hr/documents/05%20-%20Tesarski%20radovi.pdf>, pogledano 12.10.2018
- [13] [http://projekti.gimvic.org/2011/2a/utekocinjen\\_les/zgradbalesa.html](http://projekti.gimvic.org/2011/2a/utekocinjen_les/zgradbalesa.html), pogledano 10.11.2018
- [14] Hrvatsko strukovno nazivlje, <http://struna.ihjj.hr/naziv/clanak-traheje/36298/#naziv>, pogledano 3.10.2018.
- [15] <http://mendthegap.agr.hr/wp-content/uploads/2017/09/Prezentacija-drvo-radionica.pdf>, pogledano 4.10.2018.
- [16] Hrvatsko strukovno nazivlje, <http://struna.ihjj.hr/naziv/smolenica/36496/>, pogledano 4.10.2018.
- [17] Grosser D. : Die Holzer Mitteleuropas, Berlin, 1977



- [18] <https://www.wood-database.com/wood-articles/hardwood-anatomy/>, pogledano 11.10.2018
- [19] Bjelanović A., Rajčić V. : Drvene konstrukcije prema europskim normama, Zagreb, 2005.
- [20] <http://drvotehnika.info/clanci/spojevi-masivnog-drveta-anizotropija-drveta-i-modeli-spajanja>, pogledano 11.11.2018.
- [21] [https://bib.irb.hr/datoteka/610088.Ponaanje\\_drvenih\\_konstrukcija\\_u\\_uvjetima\\_poara\\_i\\_otpornost\\_na\\_djelovanje\\_poara.pdf](https://bib.irb.hr/datoteka/610088.Ponaanje_drvenih_konstrukcija_u_uvjetima_poara_i_otpornost_na_djelovanje_poara.pdf), pogledano 11.11.2018
- [22] Jirouš-Rajković, Miklečić : Usporivači gorenja drva, Drvena industrija 60 (2) 111-121 (2009) Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2009
- [23] Volarić I. : Stručni članak: Svojstva drva, Zagreb, 2017.
- [24] Horvat I. : Tehnologija drva, Drvnoindustrijski priručnik, Tehnička knjiga, Zagreb
- [25] <http://www.gradimo.hr/clanak/izdrzljivost-parketa-brinell-cvrstoca/26056>, pogledano 12.11.2018.
- [26] <https://korak.com.hr/korak-020-prosinac-2007-tvrdoca-drva/>, pogledano 12.11.2018.
- [27] Kollmann F. F. P., Cote W. A. : Principles of wood science and technology, Springer-Verlag, 1968.
- [28] Athey, R. D.: Testing coatings for abrasion and wear: The Technology of Anodizing Aluminium. Athey Technologies, 1999.
- [29] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Urne%C5%A1ka\\_drvena\\_crkva](https://hr.wikipedia.org/wiki/Urne%C5%A1ka_drvena_crkva), pogledano 13.11.2018.
- [30] <https://www.google.hr/maps>, pogledano 14.11.2018.
- [31] Mareković S.: Izvještaj o rezultati mjerenja, Institut Ruđer Bošković, Zagreb, 2016.
- [32] Rede V., Essert S., Šokčević Z.: Effects of microstructural orientation on the abrasive wear resistance of subfossil elm wood in three orthogonal planes, Wear, 380/381, 2017.
- [33] <https://en.wikipedia.org/wiki/Sandpaper>, pogledano 15.11.2018.

## **PRILOZI**

I. CD-R disc