

# Utjecaj veličine abrazivnog zrna na abrazijsku otpornost subfosilnog drva jasena u tri karakteristična presjeka

---

Jukić, Josip

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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:235:075144>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-24**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Josip Jukić**

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Josip Jukić

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem mentorici prof. dr. sc. Veri Rede na izdvojenom vremenu, savjetima i stručnoj pomoći za izradu diplomskog rada.

Zahvaljujem se Heleni Lukšić mag. ing. mech. na pomoći pri izradi rada te Josipu Mijiću sa Strojarskog fakulteta u Slavonskom Brodu na stručnoj pomoći prilikom eksperimentalnog dijela istraživanja.

Hvala mojoj obitelji što su bili neiscrpan izvor ljubavi i podrške kroz ove godine, a na poseban način hvala mojim roditeljima na žrtvi i odricanju tijekom ovih godina.

Hvala svim mojim prijateljima koji su bili uz mene tijekom studiranja, a na poseban način hvala ekipi iz ZKHS-a što je uljepšala moje studentske dane.

I najviše hvala dragom Bogu na talentima koje mi je podario i na svemu što čini za mene.

*„Korijeni znanja su gorki, al' plodovi su slatki“*

Josip Jukić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Josip Jukić** JMBAG: 0035220727

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj veličine abrazivnog zrna na abrazijsku otpornost subfosilnog drva jasena u tri karakteristična presjeka**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Effect of abrasive grain size on the abrasion resistance of subfossil ash wood in three characteristic sections**

Opis zadatka:

Drvo je visoko vrijedan tehnički materijal. U odnosu na druge materijale ima niz prednosti, ali i nedostataka. S obzirom na svoje prirodno porijeklo osjetljivo je na biotsku i abiotsku razgradnju, ali se u određenim uvjetima može očuvati dugi niz godina bez značajnog gubitka svojstava. Struktura drva je vrlo složena i različita u longitudinalnom, radijalnom i tangencijalnom smjeru. Zbog toga su mehanička i druga važna svojstva drva u navedenim smjerovima također različita.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je izmjeriti tvrdoću i ispitati abrazijsku otpornost uzoraka subfosilnog drva jasena u poprečnom, radijalnom i tangencijalnom presjeku. Ispitivanje abrazijske otpornosti provesti na uređaju taber abrader, na brusnim papirima različite kvalitete. Dobivene rezultate analizirati i utvrditi kako veličina abrazivnih čestica utječe na gubitak volumena pri abraziji za svaki navedeni presjek te usporediti s rezultatima sličnih ispitivanja na drugim vrstama drva.

Na temelju analize donijeti odgovarajuće zaključke.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

9. svibnja 2024.

11. srpnja 2024.

15. – 19. srpnja 2024.

Zadatak zadala: *Rede*

Prof. dr. sc. Vera Rede

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. *Wica* Garašić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD.....	1
2. MAKROSTRUKTURA DRVA .....	2
2.1. Osnovna podjela.....	2
2.1.1. Godovi.....	4
2.2. Botanička podjela.....	5
2.3. Karakteristični presjeci drva .....	6
3. MIKROSTRUKTURA DRVA.....	7
3.1. Mikrostruktura četinjača .....	8
3.1.1. Longitudinalne traheide .....	8
3.1.2. Aksijalni parenhim i smolni kanali .....	9
3.2. Mikrostruktura listača .....	10
3.2.1. Traheje .....	10
3.2.2. Aksijalni parenhim.....	10
3.2.3. Drvna vlakanca .....	11
4. SVOJSTVA DRVA .....	12
4.1. Senzorne karakteristike .....	12
4.2. Gustoća.....	12
4.3. Higroskopnost .....	13
4.4. Mehanička svojstva.....	15

---

4.5. Toplinska svojstva.....	16
4.6. Električna svojstva .....	17
4.7. Akustična svojstva .....	17
4.8. Biološka degradacija drva.....	17
4.8.1. Plijesni i gljivice .....	17
4.8.2. Bakterije.....	19
4.8.3. Gljive.....	19
4.8.4. Kukci.....	19
5. MEHANIZMI TROŠENJA .....	21
5.1. Abrazija.....	21
6. EKSPERIMENTALNI DIO .....	24
6.1. Cilj rada i provedena ispitivanja .....	24
6.2. Materijal za ispitivanje.....	24
6.3. Rezultati ispitivanja.....	29
6.3.1. Određivanje starosti subfosilnog jasena.....	29
6.3.2. Analiza mikrostrukture u poprečnom, radijalnom i tangencijalnom presjeku....	30
6.3.3. Određivanje gustoće i udjela vlage .....	32
6.3.4. Mjerenje tvrdoće metodom po Brinellu .....	33
6.3.5. Mjerenje otpornosti na abrazijsko trošenje .....	37
7. ZAKLJUČAK.....	45

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Dijelovi stabla [2].....	2
Slika 2.	Dijelovi stabla u poprečnom presjeku[4] .....	3
Slika 3.	Karakteristični tipovi godova za četinjače i listače [6] .....	4
Slika 4.	Razlika između četinjača i listača [8].....	5
Slika 5.	Karakteristični presjeci [11] .....	6
Slika 6.	Aksijalni i radijalni sustav stanica u drvu [12].....	7
Slika 7.	Shematski prikaz traheide [14].....	8
Slika 8.	A) aksijalni parenhim, B) radijalni presjek koji prikazuje aksijalni parenhim u uzdužnom prikazu [10].....	9
Slika 9.	Shematski prikaz smolnih kanala [15] .....	10
Slika 10.	Poprečni presjeci koji pokazuju niz uzoraka aksijalnog parenhima listača [10]...	11
Slika 11.	Problemi u uporabi drva kao posljedica higroskopnosti [19].....	14
Slika 12.	Plijesan na površini drvnih proizvoda [20] .....	18
Slika 13.	Gljivice na površini drva [21] .....	19
Slika 14.	Oštećenja u drvu nastala djelovanjem termita [22] .....	20
Slika 15.	Jedinični događaj abrazije [24].....	22
Slika 16.	Shematski prikaz djelovanja abrazijskih čestica na trošenu površinu [24].....	23
Slika 17.	Oštećenja na površini drva izazvana abrazijom [25].....	23
Slika 18.	Zemljopisno područje iz kojeg potječe uzorak.....	25
Slika 19.	Dio trupca jasena iz kojeg su uzeti uzorci za sva ispitivanja .....	25
Slika 20.	Piljenje jasena na manje komade.....	26
Slika 21.	Poprečni presjek subfosilnog jasena.....	27
Slika 22.	Tangencijalni presjek subfosilnog jasena.....	27
Slika 23.	Radijalni presjek subfosilnog jasena .....	28
Slika 24.	Kalibracijska krivulja .....	29
Slika 25.	Svjetlosni mikroskop Zeiss .....	30
Slika 26.	Mikrostruktura subfosilnog jasena u poprečnom presjeku.....	30
Slika 27.	Mikrostruktura subfosilnog jasena u tangencijalnom presjeku.....	31
Slika 28.	Mikrostruktura subfosilnog jasena u radijalnom presjeku .....	31
Slika 29.	Uzorak za određivanje gustoće.....	32



---

Slika 30.	Analitička vaga Ohaus Analytical Plus .....	32
Slika 31.	Uređaj za ispitivanje tvrdoće metodom po Brinellu.....	34
Slika 32.	Kuglica od kaljenog čelika .....	35
Slika 33.	Uređaj za mjerenje promjera otiska čelične kuglice .....	35
Slika 34.	Taber abrader.....	37
Slika 35.	Geometrija uzorka za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje.....	38
Slika 36.	Rezanje uzoraka .....	38
Slika 37.	Uzorci za abrazijsko trošenje: a – poprečni, b – radijalni, c - tangencijalni .....	39
Slika 38.	Ispitivanje otpornosti abrazijskog trošenja na uređaju Taber abrader na poprečnom presjeku .....	40
Slika 39.	Utjecaj srednje veličine abrazivnog zrna na gubitak volumena pri abraziji.....	42
Slika 40.	Utjecaj srednje veličine abrazivnog zrna na intezitet abrazijskog trošenja.....	43
Slika 41.	Subfosilni jasen u odnosu na druge autohtone drvne vrste .....	44

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Klasifikacija vrsta drva po razredima gustoće [18].....	13
Tablica 2. Rezultati datiranja uzorka.....	29
Tablica 3. Izmjerene vrijednosti tvrdoće HB .....	36
Tablica 4. Korištene kvalitete abrazivnih papira i srednje vrijednosti abrazivnih zrna [27]..	40
Tablica 5. Gubitak mase uzoraka pri abrazijskom trošenju .....	41
Tablica 6. Gubitak volumena pri abrazijskom trošenju .....	41
Tablica 7. Dimenzije abradiranih površina ispitnih uzoraka.....	42

**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
a	mm	dužina uzorka
b	mm	širina uzorka
$d_{sr}$	$\mu\text{m}$	srednja veličina abrazivnog zrna
HB	$\text{N}/\text{mm}^2$	tvrdoća po Brinellu
$m_1$	g	masa uzorka prije sušenja
$m_2$	g	masa uzorka nakon sušenja
$m_w$	g	masa uzorka pri nekom udijelu vlage
$V_w$	$\text{cm}^3$	volumen uzorka za neki udio vlage
w	%	udio vlage u drvu
$\rho_w$	$\text{g}/\text{cm}^3$	gustoća za neki udio vlage

## **SAŽETAK**

Osnovni cilj ovog rada je utvrditi kako usmjerenost strukture utječe na abrazijsku otpornost i tvrdoću drva subfosilnog jasena u njegova tri karakteristična presjeka. Tvrdoća je izmjerena Brinellovom metodom, a otpornost na abrazijsko trošenje ispitana je na uređaju Taber abraser. Udio vlage u uzorcima pri ispitivanju iznosio je 6,81 %, a gustoća 0,674 g/cm<sup>3</sup>. Najviša tvrdoća izmjerena je u poprečnom presjeku i iznosila je 8,72 HB. Veličina abrazivnih čestica ima veliki utjecaj na intenzitet abrazijskog trošenja subfosilnog jasena. S povećanjem abrazivnih čestica raste i intenzitet trošenja.

U odnosu na druge autohtone drvene vrste subfosilni jasen ima viši intenzitet abrazijskog trošenja.

Ključne riječi: abrazijsko trošenje, tvrdoća, subfosilni jasen

## **SUMMARY**

The aim of this work is to determine how the orientation of the structure affects the abrasion resistance and hardness of subfossil ash wood in its three characteristic sections. The hardness was measured by the Brinell method, and the resistance to abrasive wear was tested on the Taber abraser.

The proportion of moisture in the samples during testing was 6.81 %, and the density was 0.674 g/cm<sup>3</sup>. The highest hardness was measured in the cross-section and was 8.72 HB. The size of abrasive particles has a great influence on the intensity of abrasive wear of subfossil ash. With the increase in abrasive particles, the intensity of wear also increases. Compared to other autochthonous wood species, subfossil ash has a higher intensity of abrasion wear.

Keywords: abrasive wear, hardness, subfossil ash

## **1. UVOD**

Od prvih početaka civilizacije pa sve do danas šume i njihov glavni proizvod drvo imaju važnu ulogu u životu ljudi. Drvo se kroz povijest koristilo za tisuće različitih potreba, a tako je i danas. Poljoprivredni alati, oruđa, različite nastambe, mostovi, plovna vozila, namještaj i odjeća samo su od nekih proizvoda koji se proizvode od drva. Šume imaju veliki utjecaj na kvalitetu ljudskog života i ekosistem općenito tako što povoljno utječu na klimu, zadržavaju i čuvaju vodu u tlu, proizvode kisik, vežu ugljični dioksid i tako smanjuju njegovu emisiju u atmosferu, imaju veliki estetski značaj, povoljno utječu na bio-raznolikost, sprječavaju eroziju tla itd. [1].

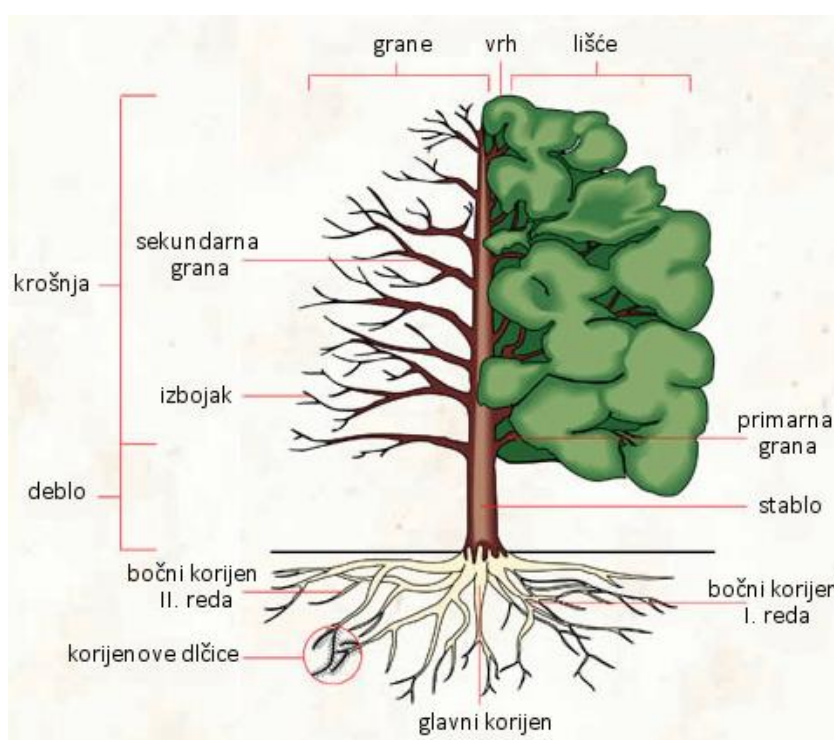
Drvo kao tehnički materijal ima posebna i jedinstvena svojstva. Drvo je prirodan, obnovljiv, u potpunosti reciklabilan, biodegradabilan, ekološki visokovrijedan i tehnički svestran materijal. Prilikom korištenja drva osnovni cilj je iskoristiti prirodnu estetiku i tehničku kvalitetu, ali pritom njegove nedostatke eliminirati ili smanjiti na što manju mjeru. Da bi se predvidjelo njegovo ponašanje u različitim uvjetima primjene te da bi se iskoristile njegove prednosti treba dobro upoznati građu drva jer su svojstva materijala posljedica njegove građe. Znanstvena botanička disciplina koja se bavi proučavanjem makroskopskih, mikroskopskih i sub-mikroskopskih značajki strukture drva, a koja je dio opće anatomije bilja, zove se anatomija drva [1].

U ovom radu analizirat će se utjecaj usmjerenosti drvne strukture subfosilnog jasena na abrazijsku otpornost i tvrdoću.

## 2. MAKROSTRUKTURA DRVA

### 2.1. Osnovna podjela

Sva stabla se dijele na tri osnovna dijela: korijen, deblo i krošnja kao što je prikazano na Slika 1. Unutar ova tri elementa postoje različite varijacije, no oni su glavni elementi svih stabala bez obzira na veličinu, klimu i ostale čimbenike.

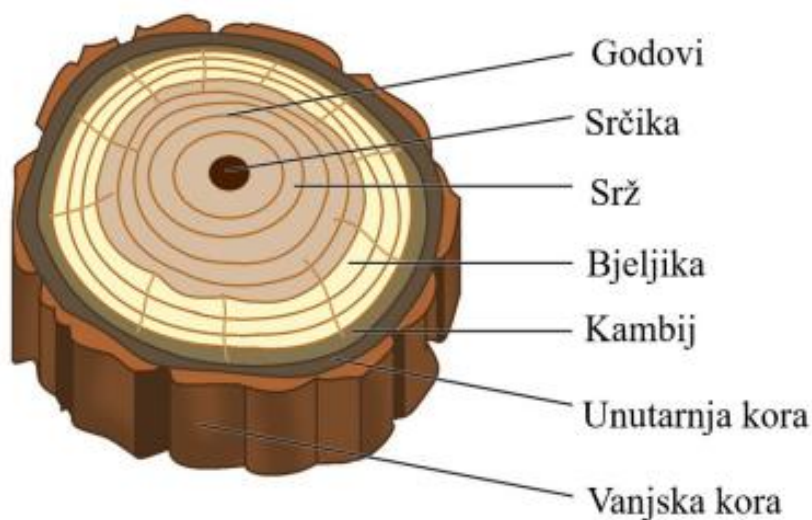


Slika 1. Dijelovi stabla [2]

Korijen je dio stabla koji se nalazi pod tlom. Glavna funkcija korijena je apsorpcija vode i minerala iz tla i prenošenje tih tvari do stabla. Ovisno o visini stabla, raste i korijen stabla. Drvo koje raste visoko treba imati dugačak i jak korijenski sustav koji će ga učvrstiti za tlo. Iz glavnog korijena rastu i brojne korijenove dlačice koji podupiru i hrane stablo. Deblo je središnji potporni sustav za sve što se događa u stablu. Ono prenosi vodu i minerale koji dođu kroz korijenje. Deblo ne prenosi samo vodu i minerale iz tla, ono također prenosi šećere od lišća do korijena kako bi podržao i hranio korijenski sustav [3].

Slika 2 prikazuje šest karakterističnih slojeva u poprečnom presjeku debla debla:

- Srčika – starije i mrtve stanice koje se nalaze u središtu debla i dosta su tamnije od bjeljike
- Srževina ili srž – nastavlja se na srčiku i najčešće je tamnije obojena od drugih dijelova
- Bjeljika – najmlađi slojevi koji se sastoje od živih stanica i tijekom godina oni umiru
- Kambij – sloj tkiva koji se sastoji od rastućih stanica prisutnih između unutarnje kore i bjeljike, zadužen za stvaranje novog goda i novog sloja unutarnje kore svake vegetacijske sezone
- Unutarnja kora – nalazi se između vanjske kore i kambija debla, a predstavlja „cijevovod“ koji prenosi produkte fotosinteze u sve dijelove biljke
- Vanjska kora – vanjski sloj debla, grana i grančica. Vanjska kora nekad ima karakterističan miris [4].



**Slika 2. Dijelovi stabla u poprečnom presjeku[4]**

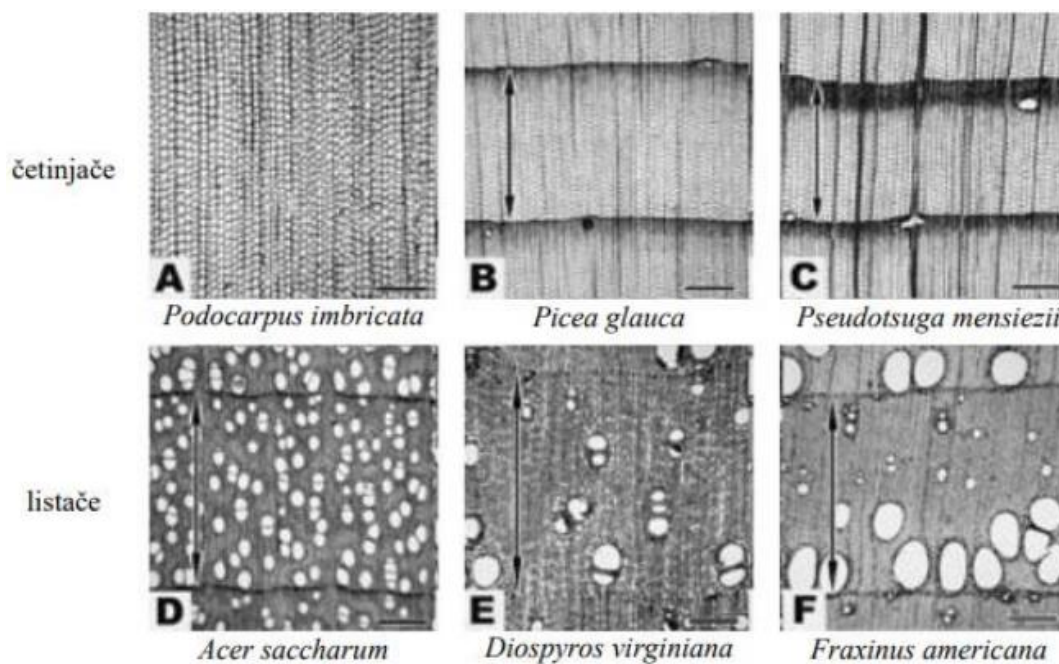
Krošnja se nalazi na vrhu stabla i sastoji se od grana i lišća. Ona služi kako bi zaštitila stablo i korijen od okoline. Listovi na krošnji obavljaju fotosintezu te time hrane stablo. Na krošnji uz lišće i grane nazale se cvjetovi i plodovi [3].



### 2.1.1. Godovi

Na poprečnom presjeku stabla mogu se uočiti nehomogenosti koje se nazivaju godovima. Godovi su koncentrični krugovi koji se nalaze oko srčike drva. Svake godine kako stablo raste nastaje nova skupina stanica koja se vidi kao koncentrični krug. Broj godova govori kolika je starost stabla, no ni taj podatak nije nužno točan zbog utjecaja okoline koji može poremetiti rast godova. Različiti presjeci daju različitu sliku godova. Kod radijalnog presjeka godovi se mogu vidjeti kao uske trake dok se kod tangencijalnog presjeka vide šire svjetlije trake koje su paralelne sa srži i međusobno odvojene s tamnijom trakom [5].

Slika 3 prikazuje karakteristične tipove godova kod listača i četinjača. Na slici A nema velikih razlika između debljine stijenke i veličine stanica kroz cijeli god, slika B prikazuje postupnu promjenu stanica od ranog prema kasnom godu, dok slika C prikazuje nagli prijelaz. Za razliku od četinjača, listače imaju provodne sudove tj. pore. One mogu biti ravnomjerno raspoređene po cijelom godu kao što prikazuje slika D ili biti grupirane u ranom dijelu goda kao na slici F. Slika E prikazuje vrste drva koje imaju prijelazne oblike između difuzno poroznog i prstenasto poroznog drva i nazivaju se semi-difuzno porozne vrste drva [5].



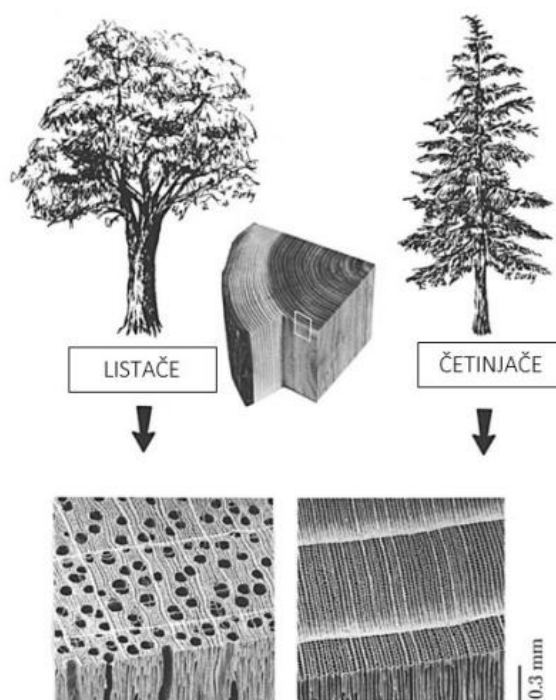
Slika 3. Karakteristični tipovi godova za četinjače i listače [6]

Godovi se razlikuju po načinu:

- rasporeda pora
- stupnju izraženosti godova - godovi su izraženiji kod četinjača nego kod listača
- boji - svjetliji ili tamniji)
- širini - fini (1/3 cm), polu-fini (1/3 – 2/3 cm) te grubi godovi (2/3 cm)
- tijeku granične linije - paralelni, valoviti ili okomiti s periferijom poprečnog presjeka stabla [5].

## 2.2. Botanička podjela

Botanička podjela drva je na listače i četinjače, a njihova mikrostruktura se dosta razlikuje. Drvo četinjača građeno je od traheida. To su duge, na oba kraja zašiljene cijevi koje su omeđene membranom. Građa četinjača jednostavnija je nego kod listača. Najpoznatije četinjače su bor, jela i smreka. S druge strane, listače su građene od traheja, vlaknaca i parenhima. Članci traheja imaju prave otvore bez membrana, a oko traheja se nalazi parenhim (na granici goda ili unutar goda). Vlakanca čine glavnu masu listača. Najpoznatije listače su bukva, hrast, jasen, bagrem itd. [7]. Slika 4 prikazuje razliku između četinjača i listača.



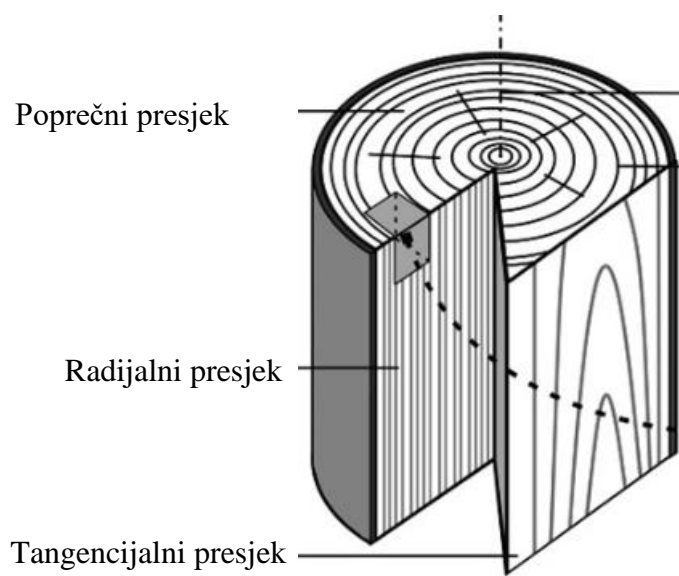
Slika 4. Razlika između četinjača i listača [8]

### 2.3. Karakteristični presjeci drva

Karakteristike debla proučavaju se na tri karakteristična presjeka drva, a to su poprečni, tangencijalni i radijalni presjek. Poprečni presjek je okomit na smjer primarnog rasta stabla i grana. Slika 2 prikazuje poprečni presjek stabla i njegove dijelove. Tangentni presjek je paralelan s rastom debla i grana. On nastaje presijecanjem radijusa stabla ili presijecanjem po tangenti stabla pri čemu dodiruje plašt stabla.

Slika 5 prikazuje izgled godova kod tangencijalnog presjeka gdje je vidljivo da godovi nalikuju nizovima parabola [9].

Radijalni presjek prolazi kroz centralnu uzdužnu os debla. Godovi na ovom presjeku mogu se vidjeti kao paralelne linije, a također se, kao i kod poprečnog presjeka, mogu vidjeti strukturne značajke od srčike do vanjske kore [9]. Sve tri ravnine presjeka važne su za ispravno promatranje drva, a samo promatranjem svake ravnine može se steći cjelovito i točno razumijevanje trodimenzionalne strukture drva. Tri ravnine presjeka određene su strukturom drva i načinom na koji su stanice u drvu raspoređene [10].



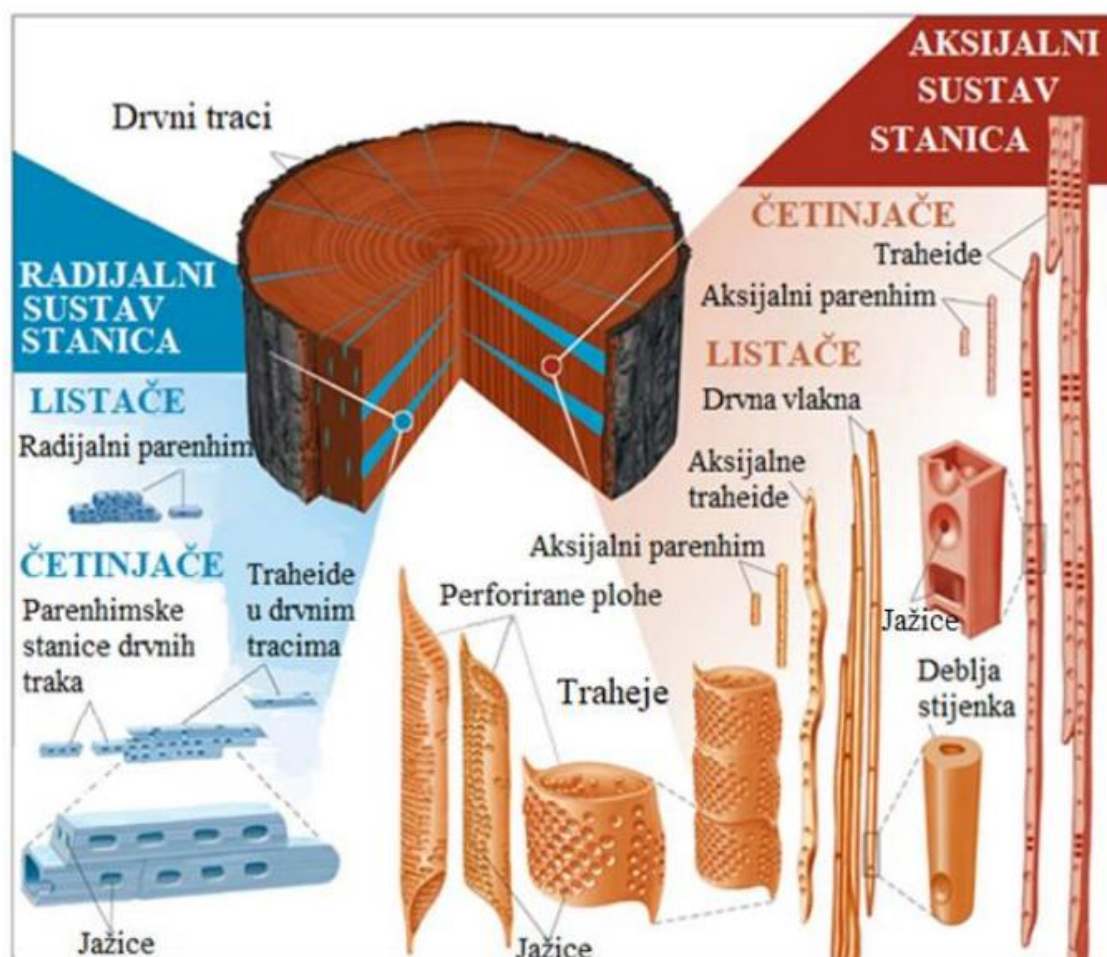
Slika 5. Karakteristični presjeci [11]

### 3. MIKROSTRUKTURA DRVA

Temeljne razlike između različitih vrsta drva temelje se na vrsti, veličini, proporcijama i rasporedu različitih stanica koje sačinjavaju drvo.

Slika 6 prikazuje aksijalni i radijalni sustav stanica u drvu.

Četinjače imaju jednostavniju osnovnu strukturu od listača zbog prisutnosti samo dviju vrsta stanica i relativno male varijacije u strukturi unutar tih vrsta stanica. Listače imaju složeniju strukturu jer imaju i veći broj osnovnih tipova stanica i daleko veći stupanj varijabilnosti unutar tipova stanica [10].



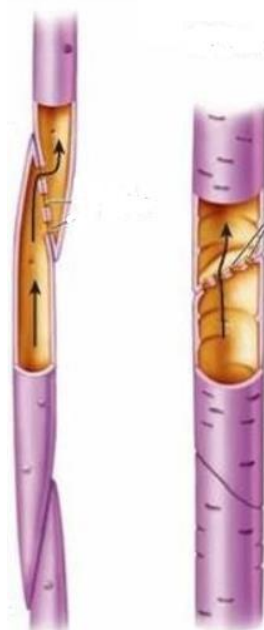
Slika 6. Aksijalni i radijalni sustav stanica u drvu [12]

### 3.1. Mikrostruktura četinjača

Struktura četinjača relativno je jednostavna. Veći dio stanica kod četinjača usmjeren je u uzdužnom, a manji dio u radijalnom smjeru. Aksijalni sustav stanica sastavljen je uglavnom od traheida, a radijalni sustav stanica sastavljen je uglavnom od parenhimskih stanica drvnih traka [13].

#### 3.1.1. Longitudinalne traheide

Traheide su duge stanice koje su često više od 100 puta duže od svoje širine i glavni su sastavni dio mekog drva, čineći preko 90 % volumena drva. Na poprečnom presjeku traheide se pojavljuju kao kvadratne ili blago pravokutne stanice u radijalnim redovima. Da bi voda tekla između traheida, mora proći kroz kružne obrubljene jažice koje su koncentrirane u dugim, suženim krajevima stanica. Traheide se preklapaju sa susjednim stanicama i na vrhu i na dnu 20 % do 30 % svoje duljine što se može vidjeti na slici 7. Tok vode mora ići blago cik-cak putanjom dok ide od jedne stanice do druge kroz jažice. Budući da jažice imaju membranu, otpor protoku je značajan. Otpor membrane zajedno s uskim promjerom lumena čini traheide relativno neučinkovitim kanalima u usporedbi s provodnim stanicama tvrdog drva [13].

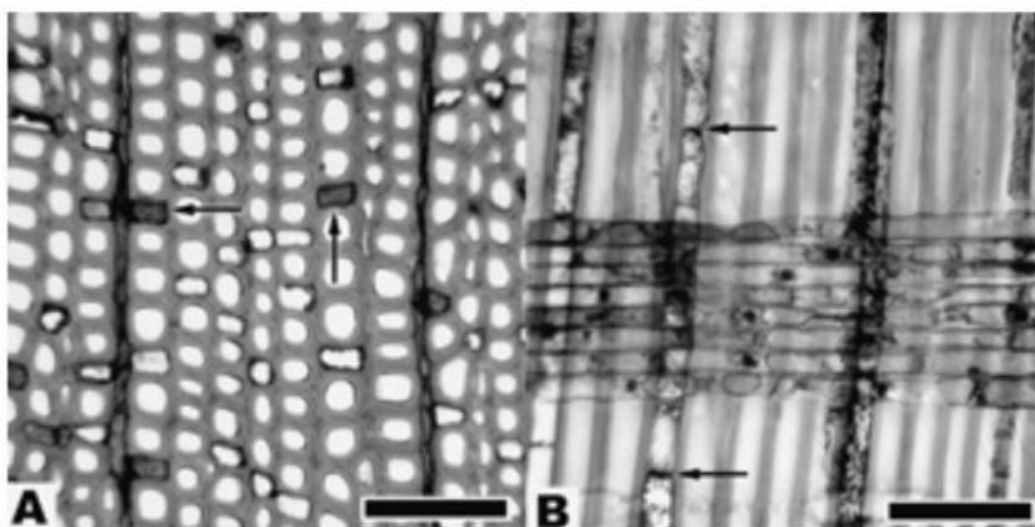


Slika 7. Shematski prikaz traheide [14]

### 3.1.2. Aksijalni parenhim i smolni kanali

Aksijalni parenhim je drugi tip stanica koji je prisutan kod četinjača. Stanice aksijalnog parenhima slične su stanicama zrakastog parenhima po veličini i obliku, ali su okomito orijentirane i naslagane jedna na drugu tvoreći tako nit parenhima. U radijalnom ili tangencijalnom presjeku pojavljuju se kao dugačke niti stanica koje općenito sadrže tamno obojene tvari [13].

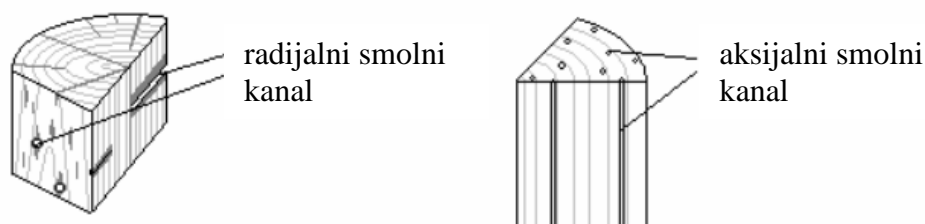
Na slici 8 vidi se aksijalni parenhim.



Slika 8. A) aksijalni parenhim, B) radijalni presjek koji prikazuje aksijalni parenhim u uzdužnom prikazu [10]

Strukture koje se obično nazivaju smolni kanali prisutne su aksijalno i radijalno i to su strukturne praznine ili prostori u drvu, a ne stanice. Specijalizirane stanice parenhima koje sudjeluju u proizvodnji smole okružuju smolne kanale. Kada se govori o smolnim kanalima i svim pridruženim stanicama parenhima, ispravan izraz je aksijalni ili radijalni kompleks smolnog kanala. Kompleksi smolnih kanala nedostaju u normalnom drvu četinjača, ali neke vrste mogu formirati velike tangencijalne skupine traumatskih aksijalnih smolastih kanala kao odgovor na oštećenja [13].

Na slici 9 shematski su prikazani radijalni i aksijalni smolni kanali.



**Slika 9. Shematski prikaz smolnih kanala [15]**

### 3.2. Mikrostruktura listača

Struktura listača mnogo je kompliciranija od strukture četinjača. Kao i kod četinjača, radijalni ili horizontalni sustav čine drvni traci, koji se zrakasto šire od srčike prema kori. U aksijalnom smjeru struktura listača sastoji se od traheja i vlakanaca, a neke vrste drva sadrže i traheide. Traheje služe za prijenos vode, a drvena vlakanca uglavnom za mehaničku potporu [10].

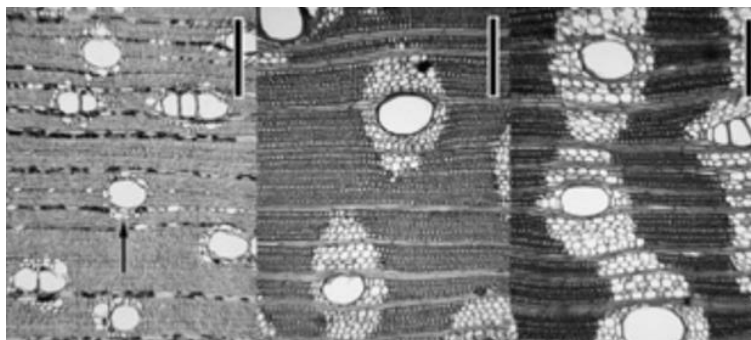
#### 3.2.1. Traheje

Osnovna značajka listača je prisutnost specijaliziranih provodnih stanica u koje se nazivaju traheje. Te su stanice naslagane jedna na drugu kako bi omogućile brzi protok vode s otopljenim mineralnim tvarima od korijena prema vrhu stabla. Traheje su međusobno spojene preko perforiranih ploča. Na poprečnom presjeku, traheje se vide kao veliki otvori i često se nazivaju porama. Promjer traheja obično se kreće od 50 do 200  $\mu\text{m}$ , ali može biti i manji (30  $\mu\text{m}$ ). Duljina im je puno kraća od traheida i kreće se od 100 do 1200  $\mu\text{m}$ .

#### 3.2.2. Aksijalni parenhim

Za razliku od četinjača, gdje aksijalnog parenhima nema ili je samo privremeno prisutan kao raštrkane stanice, listače ima širok raspon uzoraka aksijalnog parenhima. Stanice aksijalnog parenhima kod listača i četinjača približno su iste veličine i oblika, a također funkcioniraju na isti način. Aksijalni parenhim listača razlikuje se po specifičnim šarama. Dvije glavne vrste aksijalnog parenhima nalaze se u tvrdom drvu.

Na slici 10 vide se različiti uzorci aksijalnog parenhima listača.



**Slika 10.** Poprečni presjeci koji pokazuju niz uzoraka aksijalnog parenhima listača [10]

### 3.2.3. *Drvena vlakanca*

Vlakna kod listača gotovo isključivo funkcioniraju kao mehaničke potporne stanice. Vlakna su kraća od traheida, prosječne širine oko polovine širine traheida. Gustoća i čvrstoća listača ponajviše ovisi o debljini vlaknaste stanične stijenke.



## 4. SVOJSTVA DRVA

Kako bi se drvo moglo koristiti na optimalne načine potrebno je poznavati svojstva drva te uz pomoć njih primijeniti najbolju tehnologiju za dobivanje željenih produkata.

### 4.1. Senzorne karakteristike

Senzorne karakteristike uključuju boju, sjaj, miris, okus, teksturu, zrnatost, oblik, težinu i tvrdoću drva. Ove karakteristike su korisne prilikom opisivanja drva. Drvo se pojavljuje u raznim bojama kao što su žuta, zelena, crvena, smeđa, ali kod većine prevladavaju nijanse smeđe boje. Zbog velike izloženosti atmosferi, boja je podložna promjenama. Neke vrste drva kao što su smreka jasen i lipa imaju karakterističan prirodni sjaj koji je uglavnom izražen na radijalnim površinama. Pojmovi zrnatost i tekstura su usko povezani i oni opisuju ujednačenost drvene teksture, obično na poprečnom presjeku [16].

### 4.2. Gustoća

Jedno od najvažnijih svojstva drva je gustoća. Gustoća drva ovisi o klimatskim uvjetima u kojima je drvo raslo i o vrsti. Što je veća gustoća drva, veća je koncentracija vlakana pa je među njima i manje prostora [17]. Gustoća se izražava kao masa po jedinici volumena. Nije jednostavno odrediti gustoću drva, a razlog leži u tome da su masa i volumen pod velikim utjecajem vlage. Standardne vrijednosti koje se uzimaju za masu i volumen drva dobiju se sušenjem drva u sušioniku čime se udio vlage svede na približno 0 %. Drvo je vrlo higroskopan materijal i ako boravi na zraku u njemu uvijek ima određeni sadržaj vlage. Udio vlage utječe na mehanička i ostala svojstva pa se kod prikazivanja mehaničkih svojstava uvijek navodi udio vlage pri kojem je provedeno ispitivanje. Također vrlo često se dobivene vrijednosti različitih svojstava preračunavaju za udio vlage od 12 %, kako bi se međusobno mogle uspoređivati.

Gustoća drva može se procijeniti promatranjem debljine godova. Kasno drvo, zbog debljih staničnih stijenki i manjih staničnih šupljina, ima veću gustoću od ranog drva. Stoga širi

prstenovi označavaju manju gustoću kod četinjača, a veću gustoću u prstenasto poroznom drvu listača. Gustoća je mjera kvalitete čistog drva tj. drva bez grešaka [16]. U tablici 1 prikazana je podjela drvnih vrsta prema gustoći.

**Tablica 1. Klasifikacija vrsta drva po razredima gustoće [18]**

Razred	Gustoća $\rho_0$ , kg/m <sup>3</sup>	Vrsta
Iznimno i vrlo niska	< 200, 200 – 300	balsa, zeleni bor
Niska	300 – 450	smreka, jela, bor, topola, jasika, joha
Srednja	450 – 600	ariš, kesten, lipa, trešnja
Srednje visoka	600 – 700	javor, breza, bukva, hrast, jasen, orah, tik
Visoka i vrlo visoka	700 – 800, 800 – 1000	bagrem, grab, palisander, eukaliptus

### 4.3. Higroskopnost

Higroskopnost je sposobnost drva da upija vlagu iz okoliša u kojem se nalazi. Drvo može upiti vlagu iz zraka ili, ako je u kontaktu s vodom. Iako drvo može apsorbirati i druge tekućine i plinove, voda je najvažnija i kao takva utječe na svojstva drva. Dio vlage koji se nalazi u stijenkama stanica je najvažniji. Vлага u stijenkama varira od 20 do 40 %. Točka zasićenja vlakanaca je ona u kojoj su stanične stijenske potpuno zasićene, a u staničnim šuplinama (lumenima) nema vode. Ako se udio vlage poveća preko stupnja zasićenja vlakanaca, vlaga ulazi u lumen. Kada se i lumen potpuno napuni, drvo postiže maksimalnu količinu vlage koju može podnijeti. Sadržaj vlage u drvu ovisi o mnogim čimbenicima, a neki od njih su vrsta i godišnje doba.

Kada je drvo izloženo atmosferi, njegov postotak vlage će se postupno smanjivati.

Higroskopnost je od primarne važnosti jer količina vlage utječe na ostala svojstva. Sadržaj vlage može povećati masu drva i do 100 % što kasnije dovodi do većih troškova prilikom transporta [16].

Lokalni uvjeti, zrak i relativna vlažnost zraka određuju vlažnost drva. Ako se udio vlage u okolišu smanjuje, smanjuje se i udio vlage u drvu. Drvo prvo gubi slobodnu vodu iz lumena pri čemu se volumen drva ne smanjuje, a onda i vezanu vodu iz stanične stijenke pri čemu

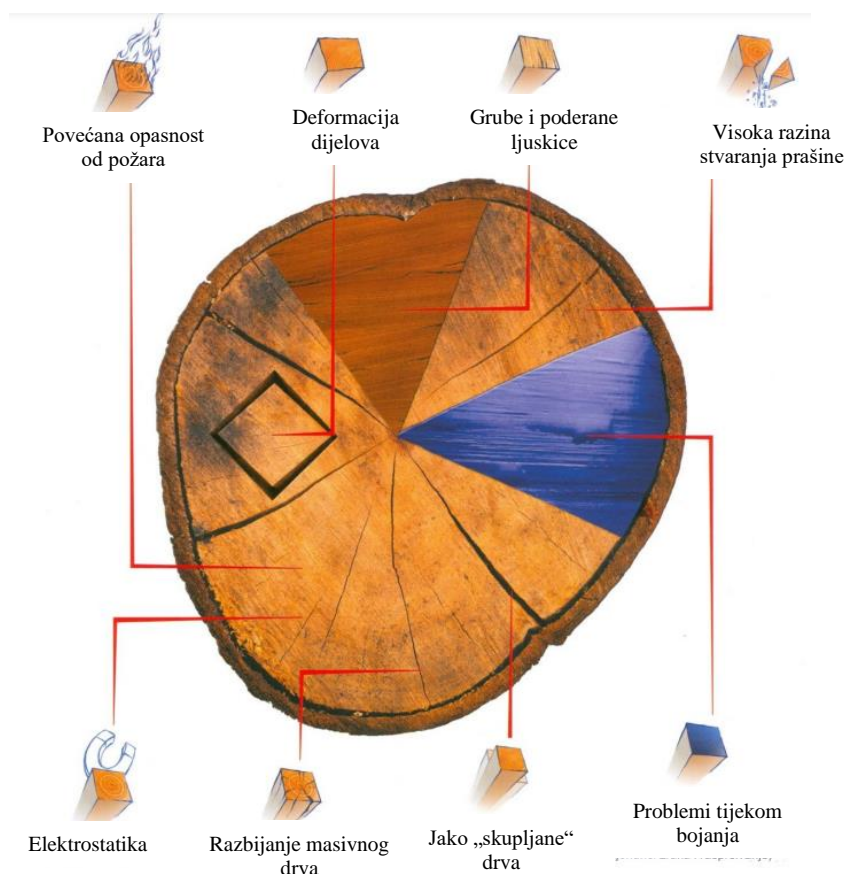
dolazi do smanjenja volumena odnosno do utezanja. S obzirom da je drvo anizotropan materijal, utezanje nije jednako u longitudinalnom, radijalnom i tangencijalnom smjeru.

Ako se drvo nađe u okolišu koji je zasićen vlagom, povećava se i udio vlage u drvu. Vlaga prvo ulazi u staničnu stijenku, a volumen drva zbog toga raste. Prirast volumena uglavnom je proporcionalan s volumenom apsorbirane vode. Uobičajeni naziv za tu pojavu je bubrenje drva. Drvo bubri dok se ne dosegne točka zasićenja vlaknaca. Drvo i dalje može apsorbirati vodu koja popunjava lumen, ali volumen drva više ne raste i drvo više ne bubri. Osim što bubrenje izaziva promjenu dimenzija, loše utječe na biotsku i abiotsku razgradnju drva.

Tijekom bubrenja nastaje tlačno naprezanje koje se može izmjeriti. Teoretska vrijednost ovog naprezanja može se izračunati preko vrijednosti osmotskog tlaka i iznosi 158 MPa.

Bubrenje i utezanje su reverzibilni procesi.

Na slici 11 prikazani su problemi koji mogu biti izazvani vlagom.



**Slika 11. Problemi u uporabi drva kao posljedica higroskopsnosti [19]**

#### 4.4. Mehanička svojstva

Mehanička svojstva drva mjere sposobnost drva da se odupre primjeni sile koja može promijeniti njegov oblik i veličinu. Otpornost na takve sile ovisi o načinu na koji sile djeluju i o njihovoj vrijednosti, a također ovisi i o vrsti drva i njegovim karakteristikama. Svojstva drva su znatno drugačija u aksijalnom smjeru (paralelno s vlaknima), nego u poprečnom smjeru (okomito na vlakna) [16].

Ono što drvo čini vrlo dobrim tehničkim materijalom je činjenica da ima malu gustoću. Ako se bilo koje mehaničko svojstvo svede na gustoću, onda se drvo može svrstati među najbolje konstrukcijske materijale.

Najčešće određivana mehanička svojstva drva su:

- Savojna čvrstoća i savojni modul elastičnosti – savojna sila je okomita na smjer vlakana što kao posljedicu ima skraćivanje gornjih vlakana i produljenje donjih.
- Vlačna čvrstoća – drvo ima najveći otpor u smjeru vlakana, a najmanji okomito na njih. Pucanje pri vlačnom naprezanju nastaje iznenada.
- Tlačno naprezanje – ako je gustoća drva veća, otpornije je na tlačno naprezanje. Kod tlačnog opterećenja može doći do izvijanja, tj. do savijanja drva u stranu zbog primijenjene kompresije.
- Elastičnost – vrijednost koja ovisi o vrsti i načinu opterećenja te o trajanju opterećenja.
- Dinamička izdržljivost – maksimalno naprezanje koje drvo može podnijeti prije loma, ako je dugotrajno dinamički opterećeno [17].

Ispitivanje nekih mehaničkih svojstava drva uglavnom se rade na malim, čistim uzorcima dimenzija  $2 \times 2 \text{ cm}^2$ . Dobivene vrijednosti se analiziraju kako bi se dobile radne vrijednosti koje koriste inženjeri i arhitekti u projektiranju drvnih konstrukcija. Ispitivanja se ponekad provode i na strukturnim komponentama kao što su traheide i vlakna jer je njihova čvrstoća povezana s čvrstoćom proizvoda (npr. papira). Gustoća, vlaga i temperatura su neki od čimbenika koji utječu na čvrstoću i druga mehanička svojstva drva. S porastom temperature pada čvrstoća drva. Uz ove čimbenike, na smanjenje čvrstoće drva uvelike utječu i defekti drva kao što su kvрге. Oni predstavljaju osnovu po kojima se drvo vizualno procjenjuje [16].

#### 4.5. Toplinska svojstva

Za drvo su važna četiri sljedeća toplinska svojstva:

- toplinska vodljivost

Veličina koja opisuje kako toplina prolazi kroz tvari. Ovisi o vrsti drva, strukturi, gustoći, udjelu vlage i temperaturi. Toplinska vodljivost drva nalazi se u rasponu od 0,10 do 0,14 W/mK.

- toplinski kapacitet

Veličina koja pokazuje koliko topline treba dovesti nekom sustavu da mu se temperatura povisi za 1 K. Specifični toplinski kapacitet drva iznosi oko 1,8 kJ/kgK.

- toplinska difuznost

Veličina koja mjeri brzinu prijenosa topline materijala s toplijeg prema hladnijem području. To je svojstvo materijala da provodi toplinu, u odnosu prema toplini koja je pohranjena u jedinici volumena. Difuznost drva je oko  $1,6 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s.

- koeficijent toplinskog širenja

Veličina koja opisuje relativnu promjenu dimenzija izazvanu promjenom temperature. Vrijednosti koeficijenta toplinskog širenja za drvo je u rasponu od 3,1 do  $4,5 \times 10^{-6}$  K<sup>-1</sup> (u smjeru vlakana).

Iako se drvo pod utjecajem temperature širi i skuplja, te promjene su dosta manje u odnosu na promjene dimenzija koje se događaju zbog udjela vlage. Širenje i skupljanje koje nastaje zbog promjene temperature gotovo je zanemarivo. Ako toplinsku vodljivost drva usporedimo s drugim materijalima kao što su metali, staklo i beton, dolazi se do zaključka da je toplinska vodljivost drva jako mala. Ona može porasti s rastom gustoće i sadržaja vlage.

Drvo ne gori. Pri visokim temperaturama, iz drva počinju hlapiti tvari koje gore u dodiru s otvorenim plamenom. Prednost ovog svojstva je da se može koristiti kao ogrjev, pogodno je za grijanje, ali je nepogodno za tehničku upotrebu. Četinjače imaju veću ogrjevnju vrijednost (npr. smola u borovim iglicama ima veliku ogrjevnju vrijednost). Vlaga pridonosi smanjenu te vrijednosti; drvo koje je osušeno na zraku ima 15 % manju ogrjevnju vrijednost od onoga koje je osušeno u pećnici.

Zapaljivost drva može se smanjiti kemijskim preparatima [16].

#### **4.6. Električna svojstva**

Električna svojstva drva ovise o količini vlage u drvu. Drvo koje je osušeno u peći i ne sadrži vlagu je električni izolator. Međutim, ako sadržaj vlage raste, povećava se i električna vodljivost drva te ono, kada dosegne maksimalnu količinu vlage, ima električnu vodljivost približno kao i voda. Ostali čimbenici kao što su vrsta drva i gustoća imaju mali utjecaj na ovo svojstvo. Treba spomenuti kako je aksijalni otpor oko 50 % manji od poprečnog [16].

#### **4.7. Akustična svojstva**

Izravnim udarcem od drvo može se proizvesti zvuk. Drvo može taj zvuk pojačati ili apsorbirati. Zbog ovih razloga drvo se koristi za glazbene instrumente. Visina proizvedenog zvuka ovisi o dimenzijama, gustoći, modulu elastičnosti i količini vlage. Drveni instrumenti koji imaju manje dimenzije, manju količinu vlage i veću gustoću, proizvode više tonove. Brzinu zvuka u drvu usporava vlaga te se tako zvuk prigušuje. Smreka je vrsta drva koja se najviše koristi pri izradi instrumenata, ali postoje i druge vrste, kao što su jela, bor i javor, koje također pronalaze svoje mjesto u izradi ovih glazbenih instrumenata [16].

#### **4.8. Biološka degradacija drva**

Drvo je biorazgradivi materijal. Drvo i drvni proizvodi koji su u okolišu, a nisu pravilno zaštićeni, izloženi su propadanju zbog djelovanja različitih mikroorganizama. Ključnu ulogu u tome imaju vlaga i temperatura. Najčešći uzročnici propadanja drva su bakterije, plijesni, gljivice, kukci i različiti vodeni organizmi [1]. Degradacija može utjecati na drvo živih stabala, trupaca ili drvnih proizvoda, uzrokujući promjene u izgledu, strukturi ili kemijskom sastavu. Te promjene variraju od jednostavne promjene boje do izmjena koje drvo čine potpuno neupotrebljivim materijalom [16].

##### **4.8.1. Plijesni i gljivice**

Plijesni su mikroskopske gljivice koje rastu na površini drva u obliku kolonija, međusobno povezanih i umreženih hifa koje tvore micelij. Postoji više desetaka tisuća različitih plijesni, a ovisno o vrsti mogu biti u različitim bojama. Plijesni rastu na bjeljici i ne prodiru u strukturu

drva, ali ostavljaju ružne tragove na površini te se time smanjuje vrijednost drva. Uklanjanje plijesni kod četinjača se radi dosta jednostavno blanjanjem ili brušenjem dok kod listača plijesni prodiru znatno dublje te ih je teže ukloniti [1].

Slika 12 prikazuje površine drvnih proizvoda obrasle plijesnima.



**Slika 12. Plijesan na površini drvnih proizvoda [20]**

Gljivice prodiru dublje u strukturu drva i ne mogu se ukloniti brušenjem i blanjanjem. Najčešće ostavljaju plave, smeđe i zelene mrlje na površinama. Gljivice uzrokuju pad žilavosti, a čvrstoća drva zahvaćenog gljivicama značajno se ne mijenja. Gljivice uzrokuju i veću apsorpciju vlage te time povećavaju osjetljivost drva na druge nametnike [1].

Prema prirodnoj trajnosti prema gljivicama vrste drva su raspoređene u pet kategorija:

- vrlo otporne
- otporne
- srednje otporne
- slabo otporne
- neotporne

Slika 13 prikazuje gljivice na površini drva [21].



Slika 13. Gljivice na površini drva [21]

#### 4.8.2. Bakterije

Bakterije su prisutne u vodi, u tlu i iznad tla te kroz dugi period mogu degradirati drvo koje je zasićeno vlagom. Mehanička svojstva drva u samom početku ostaju nepromijenjena, no s vremenom ta svojstva postaju sve lošija. Postoji puno različitih bakterija koje napadaju drvo, a u odnosu na druge uzročnike, bakterije su najbezopasnije [1].

#### 4.8.3. Gljive

Gljive stapčarke koriste drvo kao hranu i uzrokuju trulež drva. One napadaju staničnu stijenu drva i tako mijenjaju boju i mehanička, fizikalna te kemijska svojstva. Za rast na drvu gljivama je potrebna hrana, zrak, određena temperatura i vlaga u drvu iznad točke zasićenja. Ako je količina vlage ispod točke zasićenja, one se neće razviti. Također gljive se ne mogu razviti ni pri velikoj količini vlage zbog nedostatka kisika. Pojavom gljiva smanjuje se čvrstoća i žilavost drva, a pogoršavaju se i akustična svojstva [1].

#### 4.8.4. Kukci

Kukci su najveći štetnici koji napadaju drvo. Hrane se drvom, u njemu se razmnožavaju te im služi kao sklonište. Različiti kukci napadaju različite vrste drva. Neki napadaju živa stabla, drugi gotove proizvode, treći pak neobrađeni drveni materijal i sl. Također postoje kukci koji napadaju samo vlažno drvo ili samo suho. Kukci se razvijaju u rupama na drvu i najviše štete



nanesu dok su u stadiju ličinke jer tada kroz drvo prave tunele dok se ne zakukulje. Najčešće vrste koje uništavaju drvo pripadaju redu tvrdokrilaca i redu termita [1].

Slika 14 prikazuje oštećenja u drvu nastala djelovanjem termita.



**Slika 14.** Oštećenja u drvu nastala djelovanjem termita [22]

## 5. MEHANIZMI TROŠENJA

Trošenje definiramo kao gubitke materijala tijela koja se uzajamno gibaju. Posljedice trošenja su promjena geometrije površina uzajamno pokretnih dijelova [23].

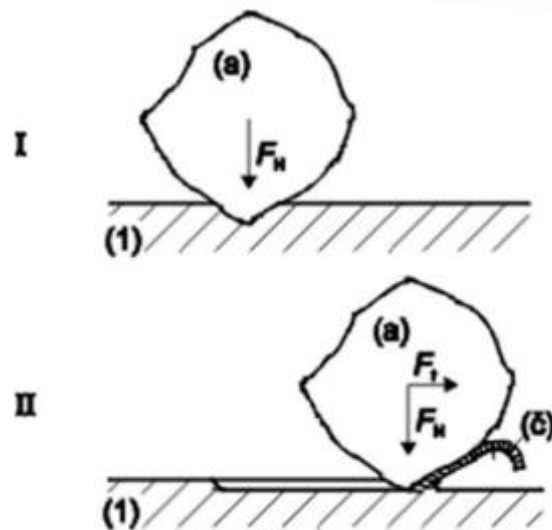
Mehanizmi trošenja opisuju se jediničnim događajima. Jedinični događaj je slijed zbivanja koji dovodi do odvajanja jedne čestice trošenja s trošene površine. On uvijek uključuje proces nastajanja pukotina i proces napredovanja pukotina. Svaki realni proces trošenja sastoji se od jednog ili više mehanizama trošenja koji djeluju istovremeno ili u vremenskom slijedu, a mehanizmi trošenja su:

- abrazija
- adhezija
- umor površine
- tribokorozija [24].

### 5.1. Abrazija

Abrazija se ponekad naziva i mikrorezanje. Definira se kao trošenje istiskivanjem materijala uzrokovano tvrdim česticama, ali i tvrdim izbočinama. Abrazija je najčešći mehanizam trošenja.

Jedinični događaji kod abrazije mogu se podijeliti u dvije faze. U prvoj fazi abraziv (a) prodire u površinu materijala (1) pod utjecajem normalne komponente opterećenja  $F_N$ . U drugoj fazi dolazi do istiskivanja materijala u obliku čestica trošenja (č) pod utjecajem tangencijalne komponente opterećenja  $F_t$  kao što prikazuje Slika 15. [24].



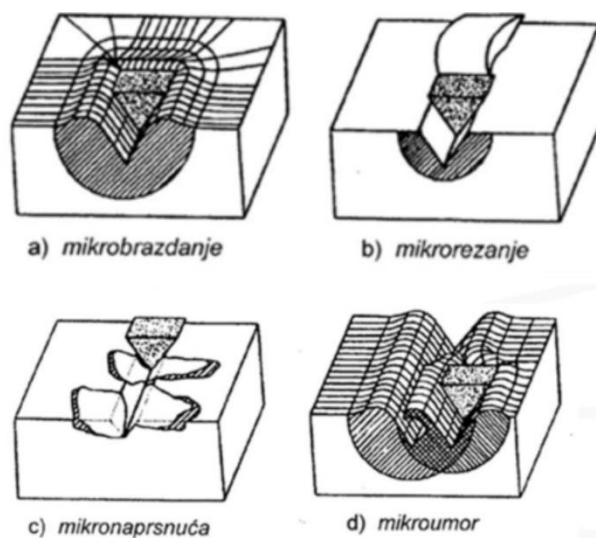
Slika 15. Jedinični događaj abrazije [24]

Ovisno o strukturi tribosustava abrazija može biti u dodiru dva tijela te u dodiru tri tijela. Kada se tribosustav sastoji od dva funkcionalna dijela (abrazivno tijelo i abrazijsko protutijelo) tada govorimo o abraziji u dodiru dva tijela. Abrazija u dodiru tri tijela nastaje kada se tribosustav sastoji od dva funkcionalna dijela, te međutijela (čestice) koje se gibaju slobodno između funkcionalnih dijelova i djeluju abrazijski [24].

Ovisno o međusobnom djelovanju između abrazijskih čestica i trošene površine razlikuju se:

- Mikrobraždanje – odnošenje materijala proporcionalno volumenu brazde nastale plastičnom deformacijom pri prolazu jedne abrazijske čestice. Abrazijska čestica neće proizvesti produkte trošenja nego će materijal biti potisnut u stranu u obliku bočnih “grebena”.
- Mikrorezanje – odnošenje materijala jednako volumenu zarez nastalog prolaskom abrazivne čestice.
- Mikronaprsnuća – odnošenje materijala s krhke površine mehanizmom nastanka i širenja mikropukotina.
- Mikroumor – odnošenje materijala mehanizmom umora površine nastalim učestalim izmjeničnim opterećenjem. Materijal je izložen trenutnim deformacijama uslijed čega nastaju mikropukotine koje se zatim šire i koje u konačnici uzrokuju odvajanje dijelova materijala trošene površine [24].

Na slici 16 prikazana su četiri moguća djelovanja abrazivskih trošenja na površinu.



**Slika 16.** Shematski prikaz djelovanja abrazivskih čestica na trošenu površinu [24]

Otpornost na abrazivsko trošenje definira se kao sposobnost materijala da se suprostavi mehaničkom trošenju izazvanom tvrdim česticama koje se gibaju po površini materijala. Ovo svojstvo se vrlo teško jednoznačno definira, a ovisi o brojnim unutarnjim i vanjskim čimbenicima. Na abrazivsku otpornost drva utječe vrsta drva, kemijski sastav i struktura od molekularne do makro razine. U nekim aplikacijama otpornost na abrazivsko trošenje je vrlo važno svojstvo drva (parket, podovi, stube, palete). Na slici 17 prikaza su oštećenja na površini drva nastala uslijed abrazivskog trošenja.



**Slika 17.** Oštećenja na površini drva izazvana abrazijom [25]

## 6. EKSPERIMENTALNI DIO

### 6.1. Cilj rada i provedena ispitivanja

Osnovni cilj ovoga rada je odrediti kako veličina abrazivnog zrna utječe na abrazijsku otpornost subfosilnog drva jasena u tri karakteristična presjeka: poprečnom, radijalnom i tangencijalnom.

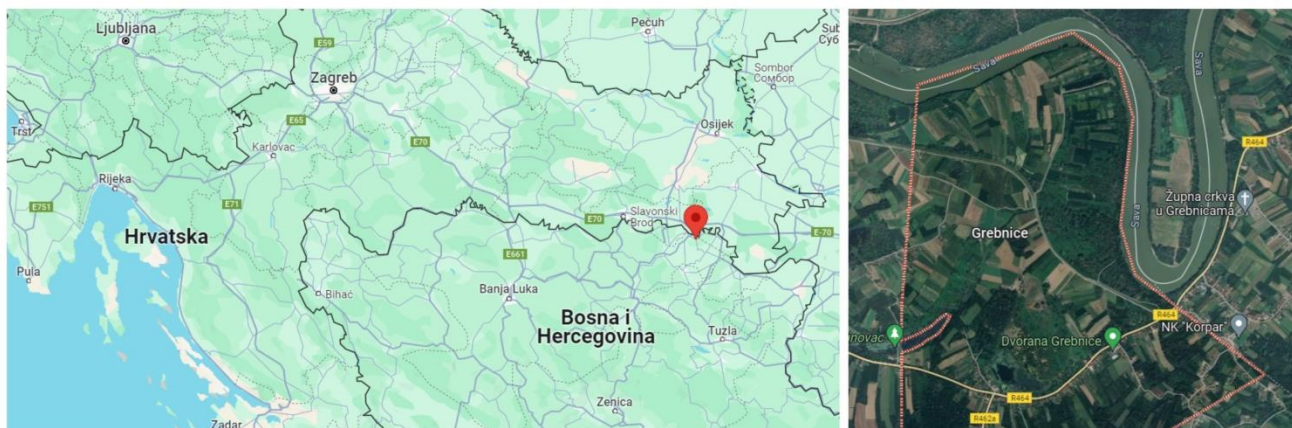
U okviru predviđenog istraživanja provedena su sljedeća ispitivanja:

- određivanje starosti subfosilnog jasena
- analiza mikrostrukture u poprečnom, radijalnom i tangencijalnom presjeku
- određivanje gustoće i udjela vlage u ispitnim uzorcima
- mjerenje tvrdoće
- mjerenje otpornosti na abrazijsko trošenje u poprečnom, radijalnom i tangencijalnom presjeku

### 6.2. Materijal za ispitivanje

Planirana ispitivanja provedena su na drvu subfosilnog jasena. Trupac jasena izvađen iz korita rijeke Save pri vađenju šljunka kod mjesta Grebnice u sjevernoj Posavini, Bosna i Hercegovina. Na ovom zemljopisnom području vrlo često se pronalaze subfosilni trupci, uglavnom u koritu rijeke Save, ali i izvan sadašnjeg vodotoka rijeke. U velikoj većini slučajeva pronalaze se trupci hrasta, a puno rjeđe trupci jasena i brijesta. Najstariji dosad izvađeni uzorak hrasta bio je star oko 8290 godina. Trupci su obično zakopani u mulju i šljunku koji su natopljeni vodom i u takvim anaerobnim uvjetima mogu se očuvati dugi niz godina. Drvno tkivo se fosilizira i „impregnira“ i postaje vrlo trajno.

Na slici 18. prikazano je zemljopisno područje iz kojeg potječe uzorak.



**Slika 18. Zemljopisno područje iz kojeg potječe uzorak**

Uzorci za sva potrebna ispitivanja izrezani su iz dijela trupca jasena visokog oko 30 cm, a promjer poprečnog presjeka, po slobodnoj procjeni, iznosio je oko jednog metra. Uzorci za sva potrebna ispitivanja pripremljeni su u Laboratoriju za alatne strojeve, na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Na slici 19 vidi se dio trupca jasena iz kojeg su izrezani uzorci za sva planirana ispitivanja.



**Slika 19. Dio trupca jasena iz kojeg su uzeti uzorci za sva ispitivanja**

Uz pomoć tračne pile iz početnog komada drva izrezani su manji dijelovi od kojih su kasnije dobiveni uzorci potrebni za ispitivanje na Taber abraderu kao i uzorci potrebni za mjerenje tvrdoće. Na slici 20 vidi se izrezivanje manjih dijelova iz početnog komada.



**Slika 20. Piljenje jasena na manje komade**

Na slici 21 prikazana je izgled poprečnog presjeka na kojem se jasno vide rani i kasni dijelovi goda. Rani dio goda je puno svjetliji od kasnog dijela goda koji je tamniji. U donjem dijelu slike, bliže srčiki, godovi su širi, a u gornjem dijelu slike godovi su puno uži, skoro paralelni. U ranom dijelu goda, bez optičkih pomagala, mogu se vidjeti sitne pore. To su najveći provodni sudovi odnosno drvene stanice, koje se kod listača zovu traheje.

Uzorci za sva predviđena ispitivanja izrezani su iz područja s uskim godovima kako bi se smanjio utjecaj razlike u gustoći između ranog i kasnog dijela goda na rezultate.

Na slici 22 vidi se tangencijalni presjek. I na ovom presjeku mogu se razlučiti rani i kasni dijelovi goda.

Na slici 23 prikazan je radijalni presjek subfosilnog drva jasena na kojem se također mogu uočiti rani i kasni dijelovi goda.

Iako se radi o subfosilnom jasenu, koji je star nekoliko stoljeća, struktura drva je dobro očuvana. Mjestimice se mogu uočiti pukotine koje su nastale tijekom sušenja debla nakon što je izvađeno iz vlažnog okoliša. Kod izrezivanja uzoraka nastojalo se izbjeći spomenute pukotine.



**Slika 21. Poprečni presjek subfosilnog jasena**



**Slika 22. Tangencijalni presjek subfosilnog jasena**





**Slika 23. Radijalni presjek subfosilnog jasena**

### 6.3. Rezultati ispitivanja

#### 6.3.1. Određivanje starosti subfosilnog jasena

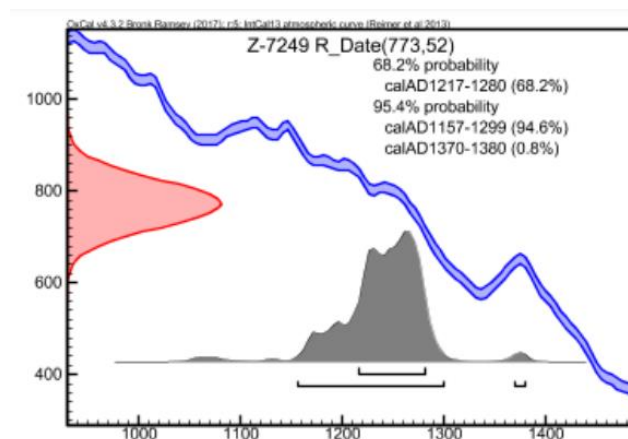
Određivanje starosti subfosilnog uzorka provedeno je u Laboratoriju za mjerenje niskih aktivnosti, Instituta Ruđera Boškovića. Datiranje je provedeno postupkom određivanja relativne specifične aktivnosti ugljikovog izotopa  $^{14}\text{C}$  LSC. Mjerni instrument bio je tekućinski scintilacijski brojač (engl. *Liquid scintillation counter – LSC*), model Quantulus 1220. Konvencijska starost  $^{14}\text{C}$  je apsolutna starost izražena u godinama „prije sadašnjosti“ gdje je 1950. godina uzeta kao početna godina, a u rezultat je uračunato i konvencijsko vrijeme poluraspada izotopa  $^{14}\text{C}$  od 5570 g. Rezultat je dan s mjernom nesigurnošću koja odgovara sastavljenoj standardnoj mjernoj nesigurnosti uz faktor pokrivanja  $k = 1$ , koji za normalnu raspodjelu odgovara vjerojatnosti pokrivanja od približno 68 %.

Starost subfosilnog jasena procijenjena je na oko 775 godina, a rezultati datiranja prikazani su u tablici 2.

**Tablica 2. Rezultati datiranja uzorka**

Konvencijska $^{14}\text{C}$ starost	Kalibrirana starost	Relativna specifična aktivnost $^{14}\text{C}$
$775 \pm 55$	cal AD 1217 – 1280	$90,8 \pm 0,6$

Na grafičkom prikazu kalibracijske krivulje, slika 24, prikazani su kalibrirani periodi za faktore pokrivanja  $k = 1$  i  $k = 2$  što odgovara vjerojatnostima pokrivanja od približno 68 % i 95 % za normalnu raspodjelu.



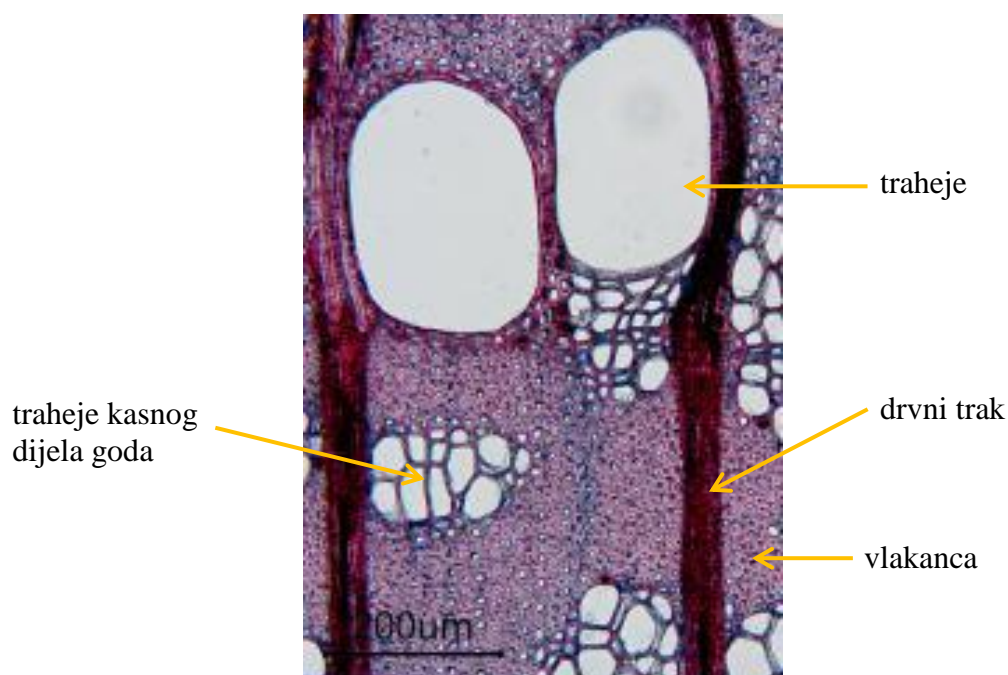
**Slika 24. Kalibracijska krivulja**

### 6.3.2. Analiza mikrostrukture u poprečnom, radijalnom i tangencijalnom presjeku

Analiza mikrostrukture subfosilnog drva jasena provedena je na Biološkom odsjeku Prirodoslovnog matematičkog fakulteta u Zagrebu. Analiza je provedena na svjetlosnom mikroskopu proizvođača Zeiss, pri povećanjima od 50 do 1000  $\times$ . Svjetlosni mikroskop prikazan je na slici 25. Na slikama 26, 27 i 28 prikazana je mikrostruktura subfosilnog jasena u tri karakteristična presjeka – poprečnom, tangencijalnom i radijalnom.



Slika 25. Svjetlosni mikroskop Zeiss

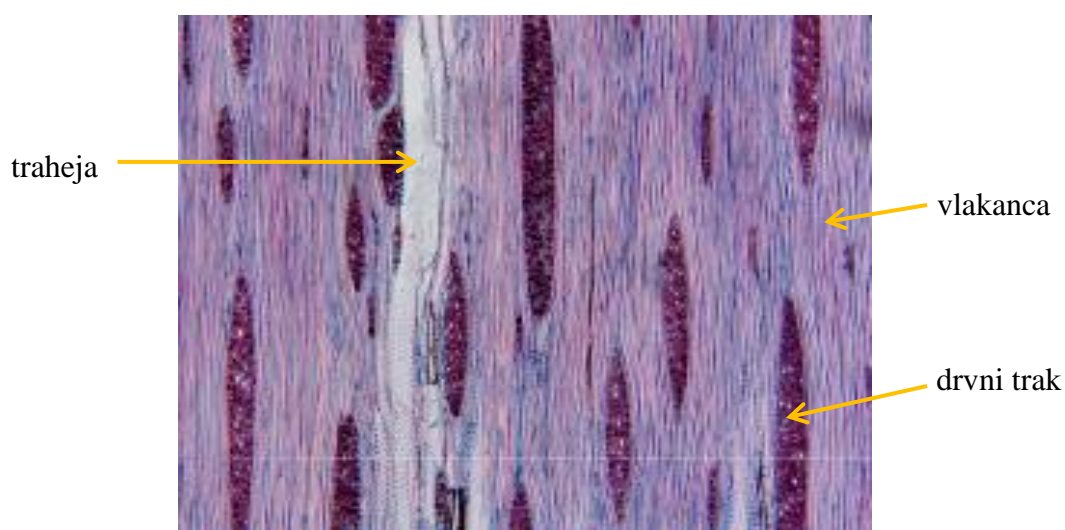


Slika 26. Mikrostruktura subfosilnog jasena u poprečnom presjeku

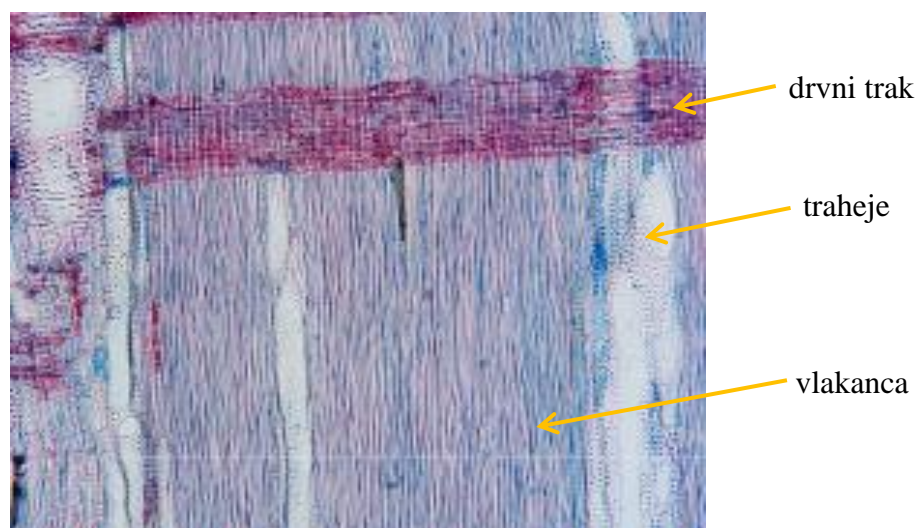
Na poprečnom presjeku, slika 26, vide se poprečno prerezane traheje ranog i kasnog dijela goda te vlakanca. Također se vide drvni traci s uzdužno prerezanim stanicama. Prema rasporedu traheja koje su smještene u ranom dijelu goda ova vrsta drva pripada prstenasto poroznim listačama.

Na tangencijalnom presjeku traheje i vlakanca su uzdužno prerezani, a drvni traci poprečno.

Na radijalnom presjeku uzdužno su prerezane traheje, vlakanca i stanice drvnih traka.



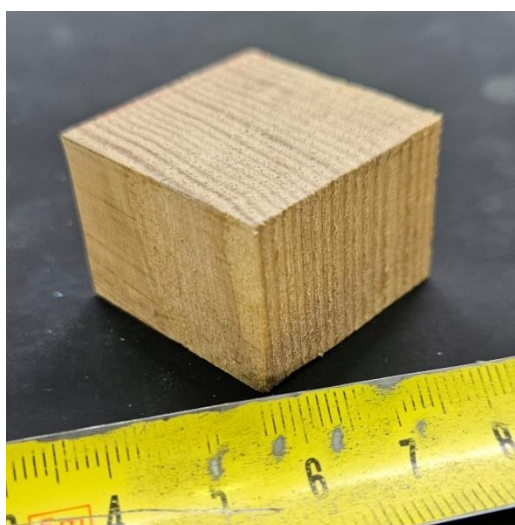
**Slika 27. Mikrostruktura subfosilnog jasena u tangencijalnom presjeku**



**Slika 28. Mikrostruktura subfosilnog jasena u radijalnom presjeku**

### 6.3.3. *Određivanje gustoće i udjela vlage*

Gustoća uzoraka određena je prema propisima norme ISO-13061-2 [26]. Norma propisuje oblik i dimenzije uzorka. Uzorak ima oblik pravilne četverostrane prizme čije dimenzije iznose  $30\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ . Za određivanje gustoće izrezan je uzorak kojeg prikazuje slika 29. Masa uzorka izmjerena je u Laboratoriju za analizu metala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, na analitičkoj vagi Ohaus Analytical Plus prikazanoj na slici 30. Masa uzorka iznosila je 12,139 g. Na temelju ove izmjerene mase i mase uzorka u apsolutno suhom stanju određen je udio vlage u uzorku.



**Slika 29.** Uzorak za određivanje gustoće



**Slika 30.** Analitička vaga Ohaus Analytical Plus

Gustoća uzorka jednaka omjeru mase i volumena:

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

gdje je:

- $\rho_w$  – gustoća za neki udio vlage,  $\text{g/cm}^3$
- $m_w$  - masa uzorka pri nekom udjelu vlage, g
- $V_w$  – volumen uzorka za neki udio vlage,  $\text{cm}^3$

Kako bi se odredio udio vlage u drvu, uzorak je sušen u peći na temperaturi  $103 \pm 2$  °C do apsolutno suhog stanja. Norma propisuje da je apsolutno suho stanje postignuto kada je između dva uzastopna vaganja razlika mase manja od 0,1 %. Dobivena masa nakon sušenja iznosi 11,312 g.

Udio vlage  $w$  računa se prema izrazu:

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

gdje je:

- $m_1$  - masa uzorka prije sušenja, g
- $m_2$  - masa uzorka nakon sušenja, g
- $w$  – udio vlage u drvu, %

S obzirom na izmjerene mase prije i nakon sušenja volumni udio vlage iznosi 6,81 %.

Za navedeni udio vlage gustoća uzorka je iznosila

#### **6.3.4. Mjerenje tvrdoće metodom po Brinellu**

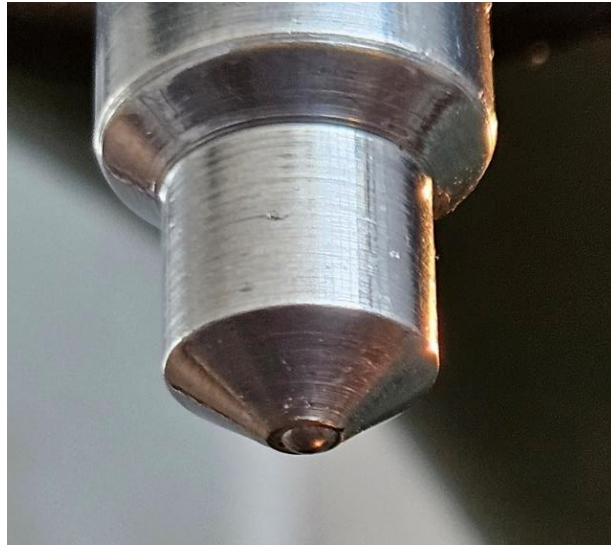
Ispitivanje tvrdoće provedeno je prema normi HRN EN 1534:2010, u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Tvrdoća triju karakterističnih presjeka izmjerena je metodom po Brinellu.

Slika 31 prikazuje tvrdomjer na kojem je provedeno ispitivanje. Model uređaja je HP250, a proizvođač VEB WPM.

Tijekom ispitivanja utiskivala se kuglica od kaljenog čelika promjera 5 mm, slika 32. Sila utiskivanja iznosila je 490,5 N (50 kg), a njezin prirast bio je postupan. Maksimalna sila utiskivanja postignuta je nakon  $15 \pm 3$  sekunde. Maksimalno opterećenje zadržano je 30 sekundi, a nakon toga uzorak je rasterećen. U svrhu određivanja tvrdoće očitava se promjer otiska kojeg je ostavila kuglica.

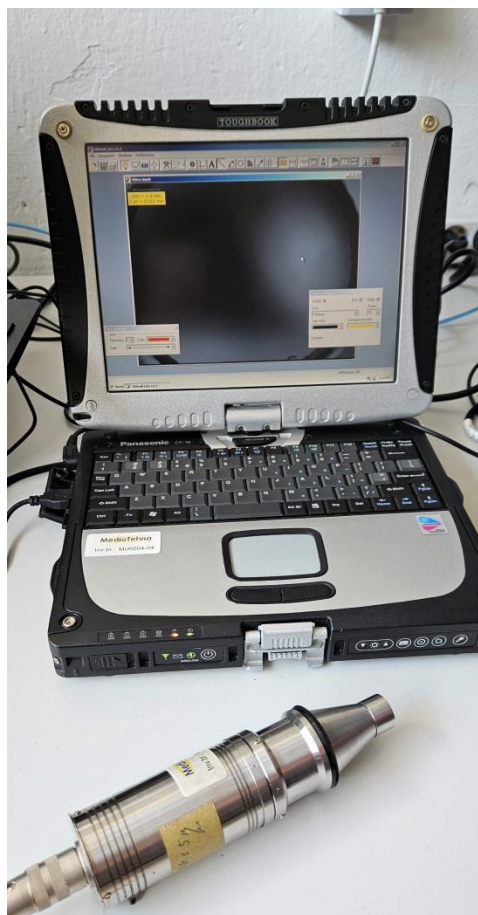


**Slika 31. Uredaj za ispitivanje tvrdoće metodom po Brinellu**



**Slika 32. Kuglica od kaljenog čelika**

Mjerenje otiska kuglice obavljeno je uz pomoć kamere i uređaja kojeg prikazuje slika 33.



**Slika 33. Uređaj za mjerenje promjera otiska čelične kuglice**



Mjerenja su ponavljana 20 puta za svaki karakteristični presjek, a dobiveni rezultati i srednje vrijednosti tvrdoće HB prikazani su u Tablica 3.

**Tablica 3. Izmjerene vrijednosti tvrdoće HB**

mjerenje	PRESJEK		
	poprečni	radijalni	tangencijalni
1	7,95	7,97	7,78
2	8,26	7,83	7,44
3	8,79	8,40	8,22
4	9,19	7,81	7,53
5	8,77	7,56	7,86
6	8,61	8,25	8,46
7	9,05	8,02	8,10
8	8,38	7,69	7,88
9	8,57	8,05	8,85
10	9,18	7,72	8,62
11	8,81	8,63	7,84
12	8,59	8,60	7,84
13	8,39	8,12	8,26
14	8,85	8,31	8,42
15	8,90	7,50	7,56
16	8,81	8,11	8,26
17	8,44	7,75	8,40
18	8,32	7,75	7,99
19	9,11	8,62	8,23
20	9,45	7,90	8,15
prosjeak	8,72	8,03	8,08

Iz tablice se može zaključiti kako je tvrdoća najviša u poprečnom presjeku dok radijalni i tangencijalni presjek imaju niže i međusobno slične vrijednosti tvrdoće.

### 6.3.5. Mjerenje otpornosti na abrazijsko trošenje

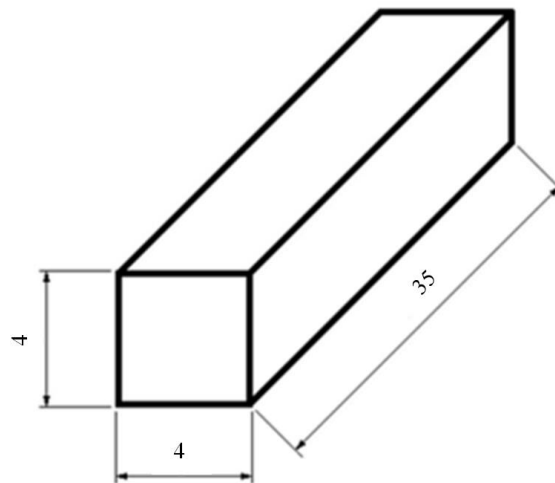
Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje provedeno je u Laboratoriju za ispitivanje materijala u sklopu Zavoda za inženjerstvo materijala koji se nalazi na Strojarskom fakultetu u Slavonskom Brodu. Otpornost na abrazijsko trošenje ispitana je na uređaju Taber abraser prikazanom na slici 34.

Uzorci za određivanje otpornosti na abrazijsko trošenje imali su oblik pravilne četverostrane prizme, dimenzija  $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 35\text{ mm}$ . Na slici 35 prikazani su oblik i dimenzije uzoraka. Izrezivanje uzoraka provedeno je u Laboratoriju za alatne strojeve na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu.

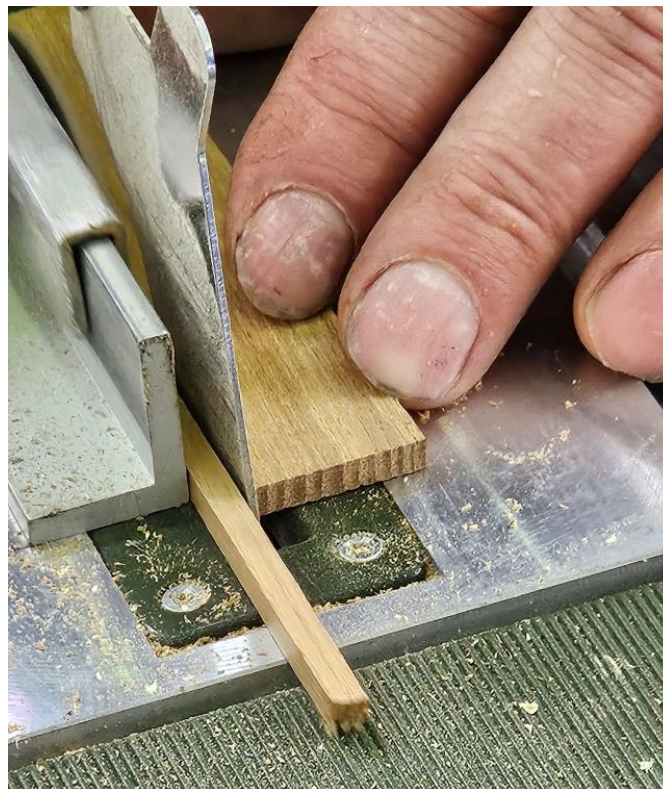
Na slici 36 prikazan je proces izrezivanja uzoraka. Za svaki karakteristični presjek izrezano je po pet uzoraka.



Slika 34. Taber abrader

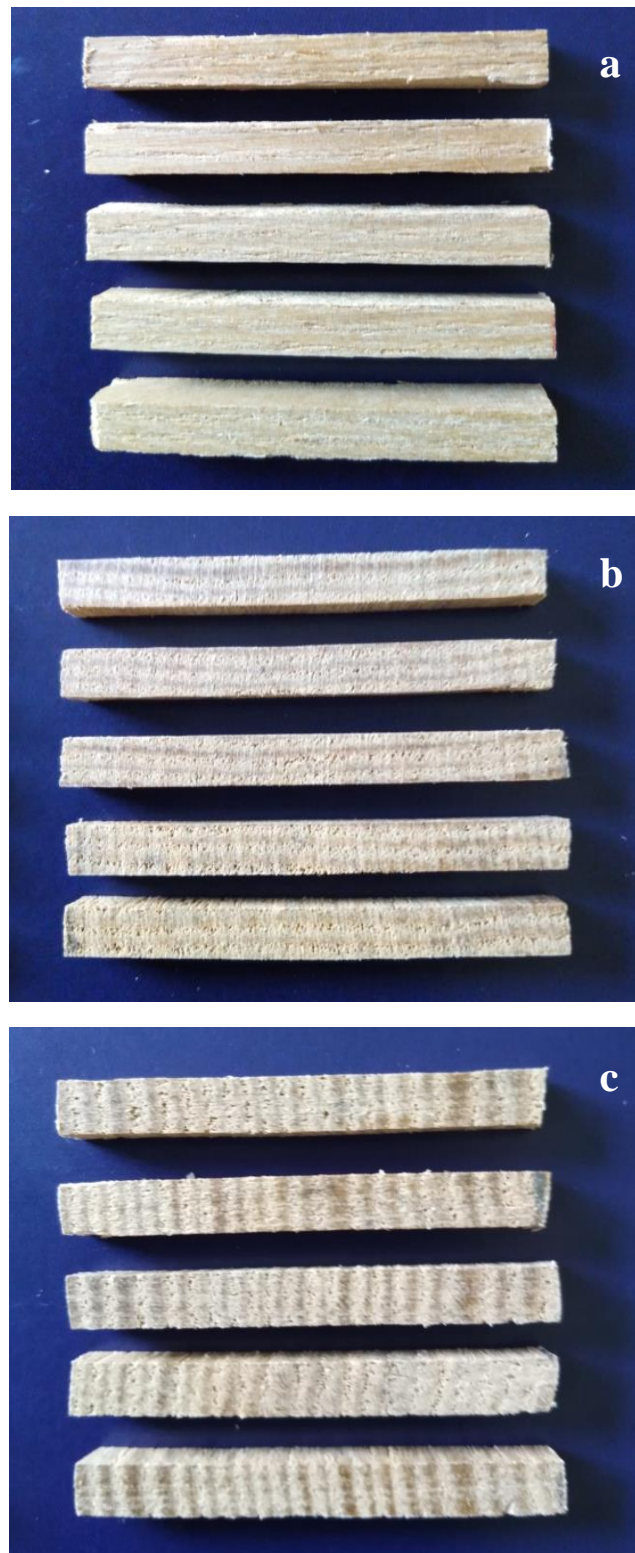


**Slika 35. Geometrija uzorka za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje**



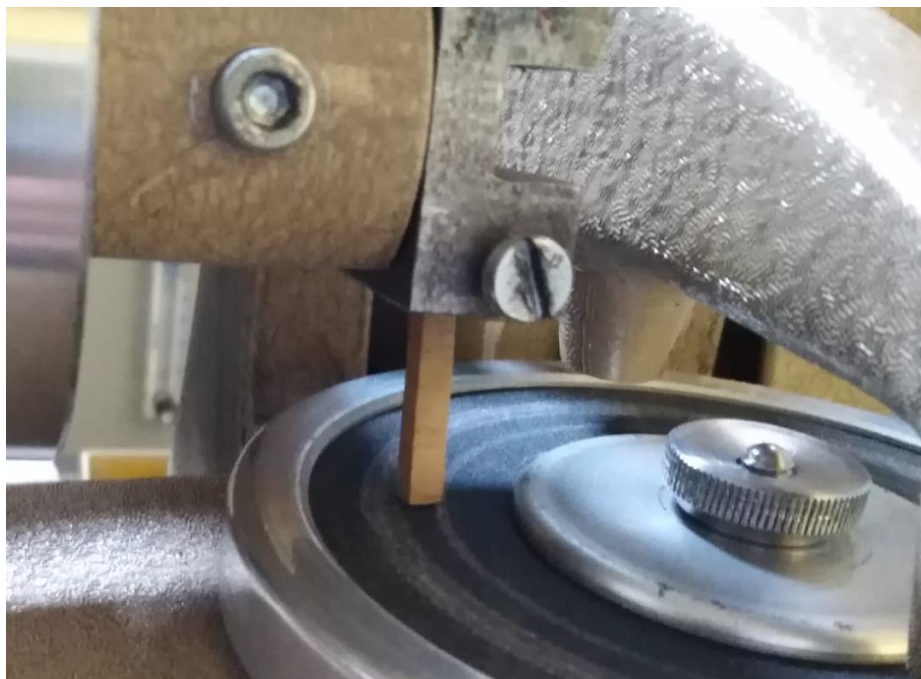
**Slika 36. Rezanje uzoraka**

Nakon rezanja, površina uzorka pobrušena je na finom brusnom papiru i očetkana. Na slici 37 prikazani su izrezani uzorci, po 5 za svaki karakteristični presjek. Abrazijskom trošenju podvrgava se površina dimenzija 4 mm × 4 mm.



**Slika 37. Uzorci za abrazijsko trošenje: a – poprečni, b – radijalni, c - tangencijalni**

Na slici 38 vidi se položaj ispitnog uzorka pri ispitivanju na Taber abraseru. Svi uzorci su trebali biti ispitani na četiri različite kvalitete brusnog papira i izloženi abrazijskom trošenju kroz 60 okretaja diska. Uzorci su na površinu brusnog papira pritisnuti silom od 49,05 N.



**Slika 38. Ispitivanje otpornosti abrazijskog trošenja na uređaju Taber abrader na poprečnom presjeku**

U tablici 4 prikazane su kvalitete korištenih brusnih papira i srednje vrijednosti promjera abrazivnih zrna.

**Tablica 4. Korištene kvalitete abrazivnih papira i srednje vrijednosti abrazivnih zrna [27]**

Kvalitete abrazivnog papira	Srednja veličina abrazivnog zrna, $d_{sr}$ $\mu\text{m}$
P320	46,2
P280	52,2
P150	100
P80	201

Uzorci na kojima je trebala biti ispitana abrazijska otpornost radijalnog i tangencijalnog presjeka bili su previše krhki i dolazilo je do pucanja uzoraka prilikom ispitivanja. Uzorci na kojima se abradirao poprečni presjek uspješno su ispitani na svim kvalitetama brusnog papira.

U tablici 5 prikazan je gubitak mase ( $\Delta m$ ) za poprečni presjek pri abradiranju na svim korištenim kvalitetama brusnog papira, nakon 60 okretaja diska za sve uzorke.

**Tablica 5. Gubitak mase uzoraka pri abrazijskom trošenju**

Kvaliteta brusnog papira	$d_{sr}$ , $\mu\text{m}$	Gubitak mase pri abrazijskom trošenju, g					
		1	2	3	4	5	$x_p$
P320	46,2	0,0100	0,0087	0,0098	0,0086	0,0078	0,0090
P280	52,2	0,0146	0,0141	0,0148	0,0155	0,0138	0,0146
P150	100	0,0150	0,0306	0,0296	0,0304	0,0290	0,0269
P80	201	0,0481	0,0446	0,0447	0,0406	0,0379	0,0432

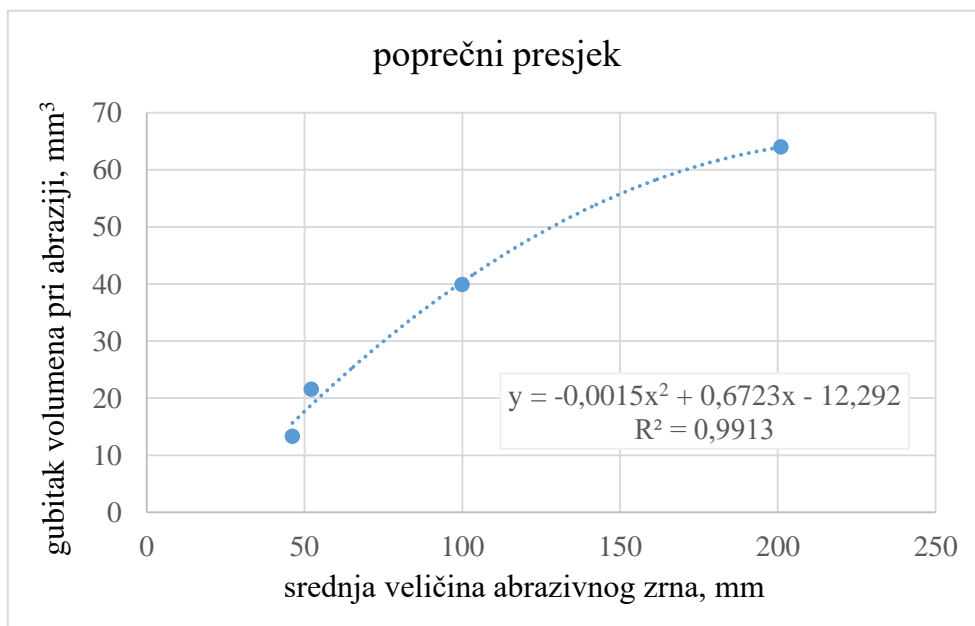
Kako se otpornost na abrazijsko trošenje različitih materijala, zbog različite gustoće, uspoređuje preko gubitka volumena dobiveni rezultati za gubitak mase pri abrazijskom trošenju preračunati su u gubitak volumena.

U tablici 6 prikazani su rezultati gubitka volumena pri abrazijskom trošenju, za poprečni presjek.

**Tablica 6. Gubitak volumena pri abrazijskom trošenju**

Kvaliteta brusnog papira	$d_{sr}$ , $\mu\text{m}$	Gubitak volumena pri abrazijskom trošenju, $\text{mm}^3$					
		1	2	3	4	5	$x_p$
P320	46,2	0,82	0,72	0,81	0,71	0,64	0,74
P280	52,2	1,20	1,16	1,22	1,28	1,14	1,20
P150	100	1,24	2,52	2,44	2,50	2,39	2,22
P80	201	3,96	3,67	3,68	3,34	3,12	3,56

Na slici 39 prikazana je korelacija između srednje veličine abrazivnog zrna i gubitka volumena pri abraziji za 60 okretaja diska. Jasno se vidi da s povećanjem srednje veličine abrazivnog zrna raste i gubitak volumena pri abraziji. Prirast volumena nije linearan. Kod sitnih abrazivnih zrna gubitak volumena raste brže nego kod krupnijih zrna. Dobiveni rezultati mogu se aproksimirati polinomom drugog stupnja uz vrlo visoki koeficijent korelacije, veći od 0,99.



**Slika 39. Utjecaj srednje veličine abrazivnog zrna na gubitak volumena pri abraziji**

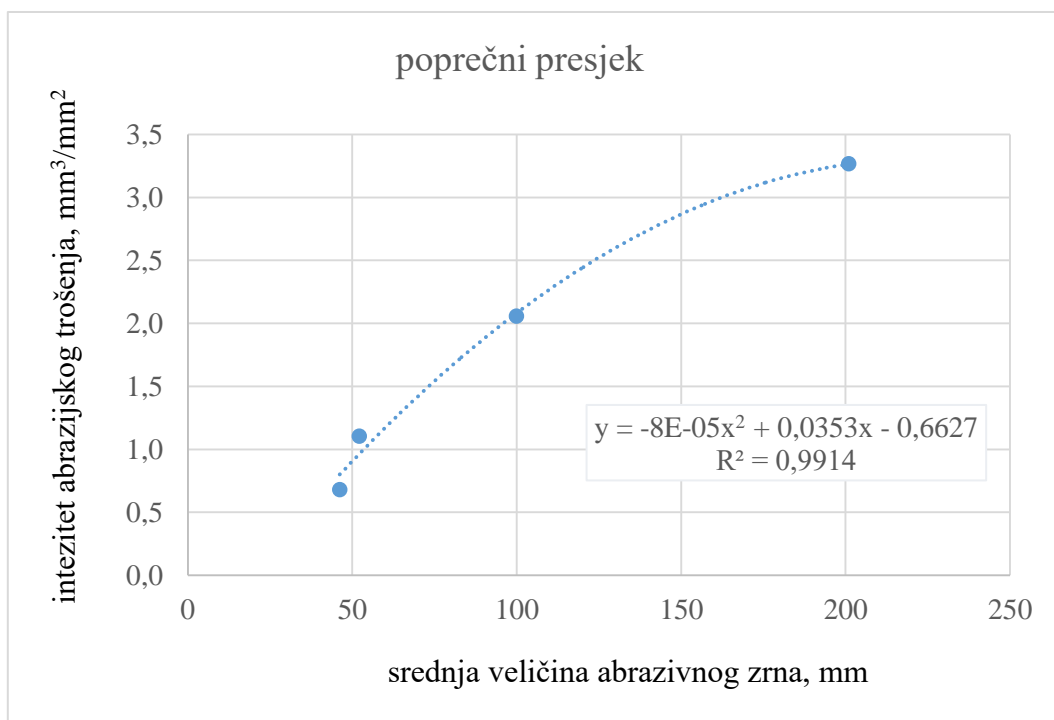
S obzirom da je ispitivanje provedeno na pet različitih uzoraka i da abradirana površina nije bila potpuno jednaka na svima, gubitak volumena treba svesti na površinu trošenja. Ta veličina predstavlja intenzitet abrazijskog trošenja i izražava se u mm<sup>3</sup>/mm<sup>2</sup>.

U tablici 7 prikazane su dimenzije abradiranih površina svih ispitnih uzoraka gdje su  $a$  i  $b$  stranice abradiranog pravokutnika.

**Tablica 7. Dimenzije abradiranih površina ispitnih uzoraka**

	Uzorci				
	1	2	3	4	5
a, mm	5,00	5,10	4,40	4,90	4,00
b, mm	4,20	4,10	4,20	4,10	4,40
$a \times b$ , mm <sup>2</sup>	21,00	20,91	18,48	20,09	17,60

Na slici 40 prikazana je korelacija između srednje veličine abrazivnog zrna i intenziteta abrazivnog trošenja. Iako abradirane površine nisu iste na svim uzorcima nema značajne razlike između grafova prikazanih na slici 39 i 40. Dobiveni podaci mogu se aproksimirati polinomom drugog stupnja uz vrlo visoki stupanj korelacije.

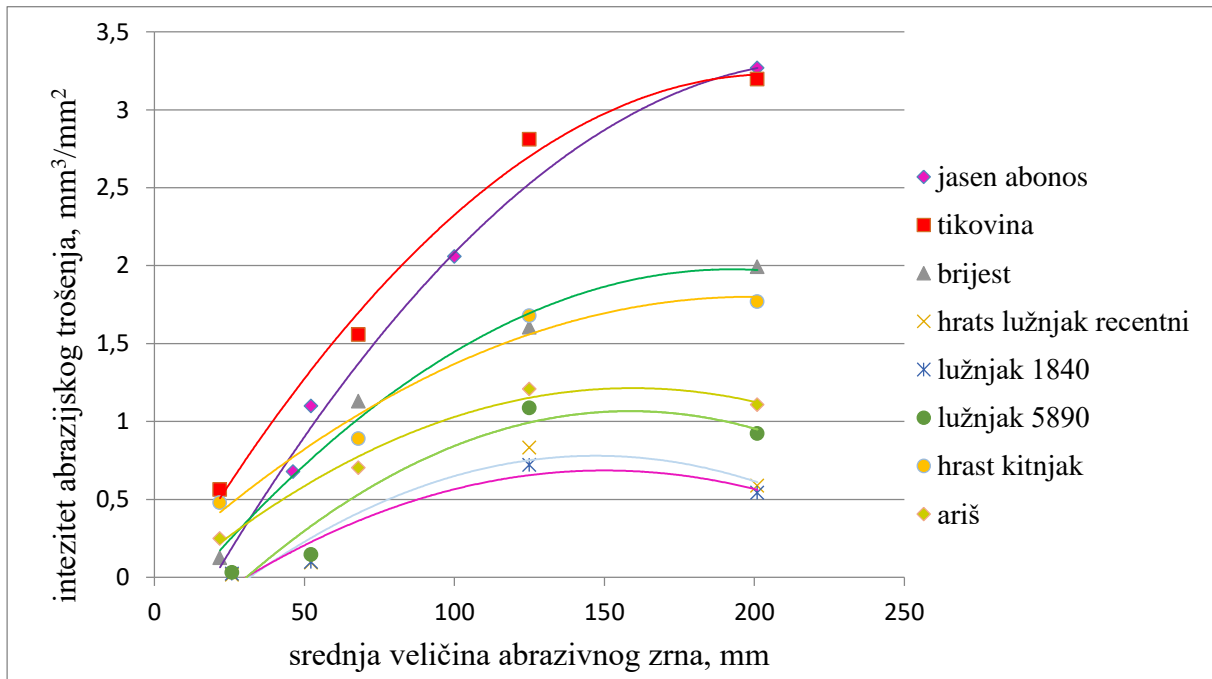


**Slika 40.** Utjecaj srednje veličine abrazivnog zrna na intenzitet abrazivnog trošenja

Na slici 41 prikazani su rezultati određivanja intenziteta abrazivnog trošenja subfosilnog jasena skupa s rezultatima ispitivanja intenziteta abrazivnog trošenja na drugim drvnim vrstama [28–32].

Prema dijagramu, subfosilni jasen u odnosu na druge autohtone drvene vrste ima vrlo visoki intenzitet trošenja. Troši se puno više i od subfosilnog hrasta iako je procjenjena starost hrasta puno veća. Jedino tikovina ima sličan intenzitet trošenja kao subfosilni jasen. Ovdje se mora napomenuti da je ispitivanje subfosilnog jasena (za razliku od drugih vrsta drva) provedeno s istim parametrima, ali na drugom uređaju.





Slika 41. Subfosilni jasen u odnosu na druge autohtone drvene vrste

## 7. ZAKLJUČAK

Nakon provedenih ispitivanja i analize dobivenih rezultata može se zaključiti sljedeće:

- Postupkom određivanja relativne specifične aktivnosti ugljikovog izotopa  $^{14}\text{C}$ , starost subfosilnog jasena procijenjena je na oko  $775 \pm 55$  godina.
- Analizom mikrostrukture u tri karakteristična presjeka potvrđeno je da subfosilno drvo pripada rodu jasena s prstenasto poroznom strukturom.
- Udio vlage u uzorku pri ispitivanju iznosio je 6,81 %.
- Pri udjelu vlage 6,81 % gustoća uzoraka subfosilnog jasena je  $0,674 \text{ g/cm}^3$ . U apsolutno suhom stanju gustoća iznosi  $0,628 \text{ g/cm}^3$ .
- Najviša tvrdoća HB izmjerena je u poprečnom presjeku i iznosi 8,72 HB. Radijalni i tangencijalni presjek imaju niže i međusobno slične vrijednosti tvrdoće – 8,03 HB (radijalni) i 8,08 HB (tangencijalni).
- Intenzitet abrazijskog trošenja subfosilnog jasena u poprečnom presjeku ovisi o veličini abrazivnih čestica i raste s porastom veličine abrazijskog zrna. Dobiveni rezultati mogu se aproksimirati polinomom drugog stupnja uz vrlo visoki koeficijent korelacije (0,999).
- U odnosu na druge autohtone drvene vrste subfosilni jasek ima viši intenzitet abrazijskog trošenja. Također ima viši intenzitet trošenja od uzoraka subfosilnog hrasta.

## LITERATURA

- [1] Rede V. Drvo - tehnički materijal. Zagreb 2017.
- [2] STABLA, <http://ivanlu-stabla.weebly.com/> (pristupljeno 11. siječnja 2024.).
- [3] Is Spanish Moss Poisonous? *Sciencing*, <https://sciencing.com/spanish-moss-poisonous-5717155.html> (pristupljeno 11. siječnja 2024.).
- [4] Mukherjee S. Parts of a Tree and Their Functions. *Science Facts*, <https://www.sciencefacts.net/parts-of-a-tree.html> (pristupljeno 15. siječnja 2024.).
- [5] Drvo, [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1401970934-0-drvo\\_14.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1401970934-0-drvo_14.pdf).
- [6] Angiosperm wood, <https://steurh.home.xs4all.nl/engloof/elooft.html#grondweefsel> (pristupljeno 17. siječnja 2024.).
- [7] Špoljarić, Zvonimir: Zaštita drva (impregnacija). Šumarski fakultet, Zagreb 1964.
- [8] Sharing Guidelines, <https://pubs.acs.org/page/policy/sharingguidelines> (pristupljeno 15. siječnja 2024.).
- [9] Hofer M. Anatomska i morfološka obilježja drva komercijalnih vrsta drveća [diplomski rad]. Zagreb: Prirodoslovno-matematički fakultet Biološki odsjek; 2019.
- [10] Wiedenhoef AC, Miller RB. Structure and Function of Wood. Madison; 2005.
- [11] Michael. Wood Movement: What You Should Know Before You Apply, <https://www.permachink.com/resources/applicator-program/wood-movement-what-you-should-know-before-you-apply> (pristupljeno 17. siječnja 2024.).
- [12] Wood - Cellulose, Lignin, Tracheids | Britannica, <https://www.britannica.com/science/wood-plant-tissue/Microstructure> (pristupljeno 13. lipnja 2024.).
- [13] Ross R. Wood Handbook. Madison; 2010.
- [14] How do tracheids and vessels differ? *Quora*, <https://www.quora.com/How-do-tracheids-and-vessels-differ> (pristupljeno 13. lipnja 2024.).
- [15] 3-LES\_ZGRADBA.pdf, [https://cpi.si/wp-content/uploads/2020/08/3-LES\\_ZGRADBA.pdf](https://cpi.si/wp-content/uploads/2020/08/3-LES_ZGRADBA.pdf) (accessed 14 June 2024).
- [16] Wood - Strength, Density, Hardness | Britannica, <https://www.britannica.com/science/wood-plant-tissue/Properties-of-wood> (pristupljeno 23. siječnja 2024.).
- [17] Greemap. □ Wood properties - GREEMAP. *Greemap - Madera de Paulownia*, <https://greemap.es/wood/wood-properties/?lang=en> (pristupljeno 23. siječnja 2024.).

- [18] Admin. Gustoća drva - Korak u prostor, <https://korak.com.hr/korak-021-ozujak-2008-gustoca-drva/> (pristupljeno 24. siječnja 2024.).
- [19] DRVO – materijal za zelenu gradnju. Šumarski fakultet
- [20] Worrall A. How to Remove Mold on Wood. *reynoldsrestoration*, <https://reynoldsrestoration.com/knowledge-center/how-to-remove-mold-on-wood/> (pristupljeno 30. siječnja 2024.).
- [21] Blue Stain Fungus and Mountain Pine Beetles. *Montana Public Radio*, <https://www.mtpr.org/arts-culture/2014-01-24/blue-stain-fungus-and-mountain-pine-beetles> (pristupljeno 30. siječnja 2024.).
- [22] Termite činjenice: Jeste li znali ...?, <https://hr.insterne.com/termite-fast-facts-sto-trebate-znati/> (pristupljeno 30. siječnja 2024.).
- [23] Trenje, trošenje i podmazivanje, Elementi strojeva 2.pdf, <https://www.ffri.hr/~mdundjer/Elementi%20strojeva%20II/11-TrenjeTrošenjeIPodmazivanje.pdf> (pristupljeno 16. lipnja 2024.).
- [24] Grilec K, Jakovljević S. Tribologija, Autorizirana predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015., [https://e-ucenje.fsb.hr/pluginfile.php/144186/mod\\_resource/content/1/prezentacija%20Mehanizmi%20tro%C5%A1enja.pdf](https://e-ucenje.fsb.hr/pluginfile.php/144186/mod_resource/content/1/prezentacija%20Mehanizmi%20tro%C5%A1enja.pdf) (pristupljeno 16. lipnja 2024.).
- [25] Abrasion On Wood Stock Photo 1139854508. *Shutterstock*, <https://www.shutterstock.com/image-photo/abrasion-on-wood-1139854508> (pristupljeno 11. srpnja 2024.).
- [26] ISO 13061-2:2014. *Physical and mechanical properties of wood — Test methods for small clear wood specimens*.
- [27] Santoabrasives, <https://santo-abrasives.com/abrasive-grade-grit-size> (pristupljeno 11. srpnja 2024.).
- [28] Bratić L. *Utjecaj veličine abrazivnog zrna i usmjerenosti strukture na abrazijsku otpornost hrasta kitnjaka (Quercus petraea) [diplomski rad]*. Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, 2023.
- [29] Barišić J. *Otpornost na abrazijsko trošenje subfosilnog drva hrasta [diplomski rad]*. Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, 2018.
- [30] Jakopec S. *Utjecaj veličine abrazivnog zrna na abrazijsku otpornost bagrema (Robinia pseudoacacia) u tri karakteristična presjeka [diplomski rad]*. Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, 2022.
- [31] Mrvelj N. *Intenzitet abrazijskog trošenja u tri osnovna presjeka drva ariša [diplomski rad]*. Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, 2023.

- [32] Grgić A. *Usporedba abrazijske otpornosti tikovine u poprečnom, radijalnom i tangencijalnom presjeku [diplomski rad]*. Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, 2023.