

Intenzitet abrazijskog trošenja u tri osnovna presjeka drva ariša

Mrvelj, Nikola

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:479166>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-10-16**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Nikola Mrvelj

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentorica:

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

Student:

Nikola Mrvelj

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem mentorici Veri Rede, prof. dr. sc. na uloženom vremenu i trudu pri izradi diplomskog rada. Zahvaljujem asistentici Heleni Lukšić, mag. ing. mech. na pomoći prilikom eksperimentalnog dijela istraživanja te na savjetima prilikom pisanja diplomskog rada.

Zahvaljujem prijateljima, kolegama te posebno djevojci i obitelji na ogromnoj podršci tijekom studija.

Nikola Mrvelj



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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Nikola Mrvelj** JMBAG: 0035218433

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Intenzitet abrazijskog trošenja u tri osnovna presjeka drva ariša**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Abrasive wear intensity in the three principal sections of larch wood**

Opis zadatka:

Mnogi tehnički materijali imaju usmjerenu strukturu, a među njima se osobito ističe drvo. Velika većina drvnih stanica koje čine drveno tkivo izduženog je oblika i usmjerena paralelno s uzdužnom osi debla. Zbog toga se svojstva drva jako razlikuju u tri osnovna smjera – poprečnom, radijalnom i tangencijalnom.

U diplomskom radu potrebno je odrediti intenzitet abrazijskog trošenja drva ariša u poprečnom, radijalnom i tangencijalnom presjeku. Zbog dobre obradivosti, tvrdoće i atraktivnog izgleda, drvo ariša se često koristi za izradu stubišta, brodskih podova i parketa. U svim navedenim primjerima otpornost na abrazijski mehanizam trošenja je vrlo važno svojstvo. Ispitivanje treba provesti na uređaju Taber abrader, na brusnim papirima s različitim veličinom abrazivnih čestica. Dobivene rezultate potrebno je analizirati i na temelju analize donijeti odgovarajuće zaključke o razlici između intenziteta trošenja pojedinih presjeka te o utjecaju veličine abrazivnih čestica na intenzitet abrazijskog trošenja u svim presjecima. Također je potrebno dobivene rezultate usporediti s rezultatima sličnih ispitivanja iz recentne literature. U radu je potrebno navesti dobivenu pomoć, a u zadnjem poglavlju svu korištenu literaturu pri izradi rada.

Zadatak zadan:

28. rujna 2023.

Datum predaje rada:

30. studenoga 2023.

Predviđeni datumi obrane:

4. – 8. prosinca 2023.

Zadatak zadala:

Prof. dr. sc. Vera Rede

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. STRUKTURA DRVA	2
2.1. Makrostruktura drva.....	3
2.2. Godovi.....	5
2.3. Mikrostruktura četinjača	7
2.4. Građa stanične stijenke	11
3. SVOJSTVA DRVA	13
3.1. Higroskopnost	13
3.2. Gustoća.....	14
3.3. Tvrdća	17
3.4. Krična veličina abrazivnih čestica	19
3.5. Otpornost na trošenje	20
4. ARIŠ (<i>Larix</i>).....	21
5. EKSPERIMENTALNI DIO	23
5.1. Cilj rada i provedena ispitivanja	23
5.2. Materijal za ispitivanje.....	23
5.3. Određivanje gustoće i udjela vlage	26
5.4. Analiza mikrostrukture ispitnih uzoraka.....	28
5.5. Ispitivanje abrazijske otpornosti	31
5.6. Ispitivanje tvrdoće Brinellovom metodom	36
5.7. Analiza rezultata	38

5.7.1. Utjecaj veličine abrazivnih čestica na abrazijsku otpornost ariša.....	38
5.7.2. Utjecaj usmjerenosti strukture na abrazijsku otpornost ariša.....	39
5.7.3. Utjecaj usmjerenosti strukture na tvrdoću ariša.....	41
6. ZAKLJUČAK.....	43
LITERATURA.....	44

POPIS SLIKA

Slika 1.	Struktura drva od makro do molekularne razine [6]	2
Slika 2.	Tri osnovna presjeka drva [8].....	3
Slika 3.	Prikaz poprečnog presjeka kroz deblo s makroskopskim elementima [9]	4
Slika 4.	Prikaz poprečnog presjeka kroz drvo [7]	5
Slika 5.	Karakteristični tipovi godova kod četinjača i listača [11].....	6
Slika 6.	Trodimenzionalni prikaz mikrostrukture četinjača [25].....	7
Slika 7.	Osnovni tipovi drvnih stanica kod četinjača [6].....	8
Slika 8.	Smolni kanali u aksijalnom (A), radijalnom (B) i tangencijalnom presjeku (C) [10]	9
Slika 9.	Drvni traci [10].....	9
Slika 10.	Građa drva četinjača u aksijalnom (A), radijalnom (B) i tangencijalnom presjeku (C) [10].....	11
Slika 11.	Građa stanične stijenke [6].....	12
Slika 12.	Model stijenke traheide četinjača [6]	12
Slika 13.	Shematski prikaz mjerenja tvrdoće po Brinellu [7].....	18
Slika 14.	Ovisnost intenziteta trošenja o veličini abrazivnih čestica [19].....	19
Slika 15.	Osi simetrije i presjeci u drvu [13].....	20
Slika 16.	Ariš (<i>Larix</i>) [21]	21
Slika 17.	Rasprostranjenost ariša [20]	22
Slika 18.	Rezanje uzoraka tračnom pilom	24
Slika 19.	Precizno izrezivanje uzoraka	24
Slika 20.	Uzorci za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje, C – poprečni presjek, R – radijalni presjek, T – tangencijalni presjek	25
Slika 21.	Određivanje mase ispitnih uzoraka na analitičkoj vagi Ohaus Analytical Plus	25
Slika 22.	Sušionik	26
Slika 23.	Eksikator.....	27
Slika 24.	Optički mikroskop AXIO	28
Slika 25.	Uzorci za analizu mikrostrukture	29
Slika 26.	Mikrostruktura poprečnog presjeka ariša	29
Slika 27.	Mikrostruktura radijalnog presjeka ariša.....	30
Slika 28.	Mikrostruktura tangencijalnog presjeka ariša	30
Slika 29.	Ispitivanje abrazijske otpornosti na uređaju Taber abrader.....	31

Slika 30.	Shematski prikaz ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje [6]	32
Slika 31.	Tvrdomjer VEB WPM HP 250 [24].....	36
Slika 32.	Otisci kuglice pri mjerenju tvrdoće	37
Slika 33.	Ovisnost gubitka volumena o srednjoj veličini abrazivnih čestica	38
Slika 34.	Ovisnost intenziteta abrazijskog trošenja o srednjoj veličini abrazivnih čestica ..	39
Slika 35.	Gubitak volumena pri abraziji za tri osnovna presjeka za različite kvalitete brusnih papira	40
Slika 36.	Intenzitet abrazijskog trošenja za različite kvalitete brusnih papira.....	40
Slika 37.	Prosječne vrijednosti tvrdoće na tri osnovna presjeka	42

POPIS TABLICA

Tablica 1. Varijabilnost gustoće u apsolutno suhom stanju nekih domaćih vrsta [17]	16
Tablica 2. Vrste drva razvrstane po razredima gustoće [17]	16
Tablica 3. Udio vlage i gustoća ispitnih uzoraka	26
Tablica 4. Korištene kvalitete abrazivnih papira i srednje vrijednosti abrazivnih čestica	33
Tablica 5. Gubitak mase pri abrazijskom trošenju pri udjelu vlage 8,58 %	33
Tablica 6. Gubitak volumena pri abrazijskom trošenju pri udjelu vlage od 12 %	34
Tablica 7. Intenzitet abrazijskog trošenja pri udjelu vlage od 12 %	35
Tablica 8. Izmjerene vrijednosti tvrdoće HB	37
Tablica 9. Omjeri gubitka volumena pri abrazijskom trošenju za tri osnovna presjeka	41

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
D	mm	promjer kuglice
d	mm	promjer otiska kalote
F	N	primijenjena sila utiskivanja
HB		tvrdoća po Brinellu
m_w	g	masa drva
V_w	cm ³	volumen drva
w	%	udio vlage u drvu
Δm	g	gubitak mase
ΔV	cm ³	gubitak volumena
$\Delta V/A$	mm ³ /mm ²	intenzitet trošenja
ρ_w	g/cm ³	gustoća drva

SAŽETAK

Osnovni cilj ovog diplomskog rada bio je odrediti intenzitet abrazijskog trošenja drva ariša (*Larix*) u poprečnom, radijalnom i tangencijalnom presjeku te utjecaj veličine abrazivnih čestica na intenzitet trošenja.

Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje provedeno je pomoću uređaja Taber abrader koristeći različite kvalitete brusnog papira od P80 do P800. Također su izmjerene tvrdoće uzoraka na tri osnovna presjeka pomoću Brinellove metode.

Analizom prikupljenih rezultata zaključeno je da usmjerenost strukture i veličina abrazivnih čestica imaju značajan utjecaj na otpornost drva ariša na abrazijsko trošenje. Najmanji intenzitet abrazijskog trošenja izmjeren je na poprečnom presjeku. Radijalni i tangencijalni presjek imali su slične vrijednosti intenziteta trošenja.

Porastom abrazivnih čestica raste intenzitet abrazijskog trošenja na svim osnovnim presjecima. Na poprečnom i tangencijalnom presjeku, intenzitet abrazijskog trošenja raste linearno do vrijednosti veličine abrazivnog zrna od oko 125 μm , nakon čega se rast intenziteta trošenja usporava. Ovaj fenomen kritične veličine abrazivnog zrna nije uočen na radijalnom presjeku.

Najviša vrijednost prosječne tvrdoće zabilježena je na poprečnom presjeku i iznosi 6,06 HB. Na tangencijalnom presjeku tvrdoća je iznosila 4,07 HB, a najnižu srednju vrijednost tvrdoće ima radijalni presjek u iznosu od 3,28 HB.

Ključne riječi: intenzitet trošenja, abrazijsko trošenje, tvrdoća, ariš

SUMMARY

The main goal of this master's thesis was to determine the intensity of abrasive wear of larch wood (*Larix*) in cross, radial, and tangential sections, as well as the influence of the size of abrasive particles on the wear intensity.

The test of resistance to abrasive wear was conducted using a Taber abrader device, using different grades of abrasive papers ranging from P80 to P800. Hardness measurements were also taken on three basic sections using the Brinell method.

The analysis of the collected results showed that the orientation of the structure and size of abrasive particles significantly affect the abrasion resistance of larch wood. The lowest intensity of abrasive wear was measured in the cross section, while the radial and tangential sections had similar wear intensity values.

As the abrasive particle size increased, the intensity of abrasive wear rose in all basic sections. In the cross and tangential sections, the intensity of abrasive wear increased linearly up to an abrasive grain size of approximately 125 μm , after which the wear intensity growth slowed down. This critical abrasive grain size phenomenon was not observed in the radial section.

The highest average hardness value was measured in the cross section, amounting to 6.06 HB. In the tangential section, the hardness was 4.07 HB, while the radial section had the lowest average hardness value at 3.28 HB.

Key words: wear intension, abrasion, hardness, larch

1. UVOD

Interes za drvo i druge materijale koji sadrže celulozu značajno je porastao početkom 21. stoljeća iz više razloga. Iscrpljivanje mineralnih resursa i povećanje količine industrijskog i kućnog otpada postali su sve veći problemi. Iako se samo mali dio materijala reciklira i ponovno koristi, raste svijest o prijetnji koju predstavlja zagađenje okoliša i povećanje koncentracije ugljičnog dioksida u atmosferi. Stoga, drvo, biljni materijali koji sadrže celulozu i biokompoziti postaju sve poželjniji tehnički materijali zbog svojih karakteristika, kao što su visoka ekološka prihvatljivost, biorazgradivost i mogućnost modifikacije [1].

Drvo je složen materijal s kompleksnom biološkom strukturom. Unatoč napretku sintetičkih materijala, njegova uporaba i primjena i dalje rastu zbog stalnih istraživanja u vezi s njegovom strukturom i svojstvima. Visoka varijabilnost strukture i svojstava čini drvo zanimljivim istraživačkim područjem, što potiče istraživanje svojstava različitih vrsta drva. Istraživanja se također sve više usredotočuju na različite oblike modifikacije drva [2].

Ovaj diplomski rad usredotočuje se na istraživanje intenziteta abrazijskog trošenja drva ariša. Otpornost na abrazijsko trošenje jedno je od ključnih svojstava drva, posebno kada se ono primjenjuje u podnim konstrukcijama.

U teorijskom dijelu rada opisana je struktura i svojstva drva kroz pregled rezultata recentnih istraživanja različitih vrsta drva. Eksperimentalni dio rada uključuje opis metoda ispitivanja abrazijske otpornosti i tvrdoće uzoraka drva ariša na tri osnovna presjeka. Prikazani su rezultati ovih ispitivanja, provedena je analiza dobivenih rezultata, a na temelju analize doneseni su odgovarajući zaključci ovog diplomskog rada.

2. STRUKTURA DRVA

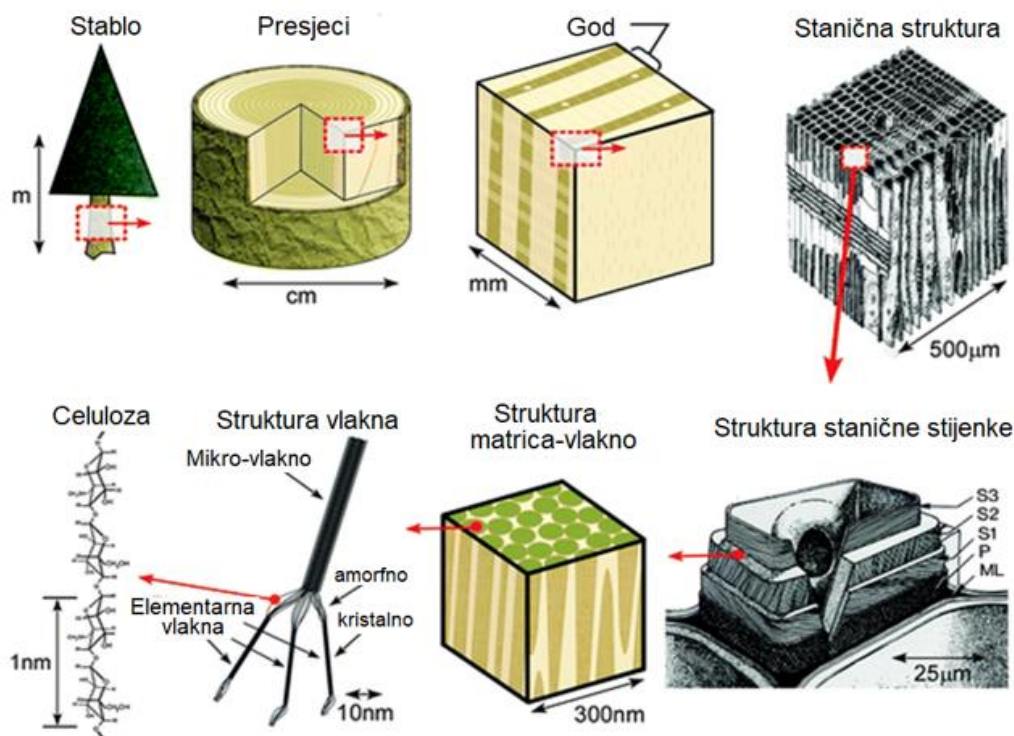
Drvo je izuzetno važan tehnički materijal, prirodni kompozit koji se ističe kompleksnom biološkom strukturom, svojom heterogenošću i anizotropijom svojstava te sposobnošću regeneracije. Prema literaturi, karakteristike drvene strukture, kao što su poroznost, veličina i raspodjela pora, imaju značajan utjecaj na fizikalna i mehanička svojstva. Stoga je istraživanje strukture i povezanosti sa svojstvima drva iznimno bitno s aspekta inženjerstva materijala [3].

U botanici, drvene vrste se klasificiraju u dva osnovna tipa: četinjače ili golosjemenjače (engl. *softwood*) te listače ili kritosjemenjače (engl. *hardwood*) [4].

Glavne razlike između ove dvije skupine su oblik listova, gdje četinjače karakteriziraju igličasti zimzeleni listovi, dok listače karakteriziraju široki i ravniji listovi te položaj sjemena, gdje četinjače imaju otvorene sjemenke, dok su sjemenke listača zatvorene unutar ploda [4].

Također, postoje primjetne razlike u staničnoj strukturi između četinjača i listača koje se manifestiraju kroz različita svojstva i primjene ovih dviju skupina drvnih vrsta [3, 5].

Slika 1 prikazuje hijerarhijsku strukturu drva na različitim razinama, s naglaskom na makrostrukturom, mikrostrukturom i molekularnom strukturu, koje zajedno utječu na fizikalna, kemijska i mehanička svojstva drva.

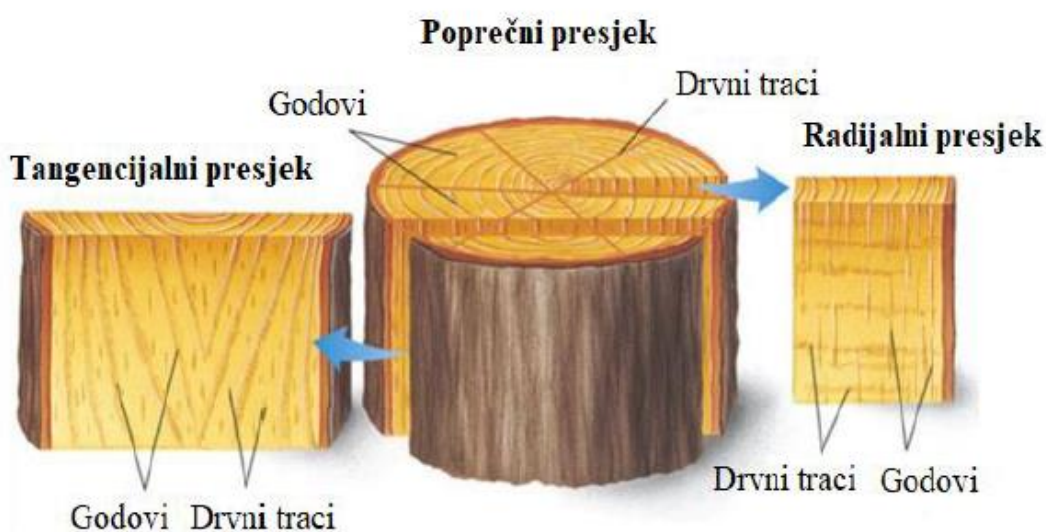


Slika 1. Struktura drva od makro do molekularne razine [6]

2.1. Makrostruktura drva

Najveći dio mase drva čini deбло. Stablo se može podijeliti na podzemni i nadzemni dio. Podzemni dio predstavlja korijen koji crpi vodu i hranjive tvari, skladišti ih te opskrbljuje nadzemni dio koji se sastoji od debla, grana i lišća. Postoji razlika između primarnog i sekundarnog rasta drva. Primarni rast odnosi se na vegetativni rast vrha, dok sekundarni rast traje tijekom cijelog života biljke i odnosi se na rast u debljinu. Ksilem koji se formira sekundarnim rastom naziva se drvo. Makroskopske karakteristike drva proizlaze iz njegove nehomogene i raznolike građe u histološkom smislu. Makroskopska struktura drva uočljiva je na svakom presjeku, bez obzira na orijentaciju reza ili način obrade. Budući da je drvo, u idealiziranom obliku, valjkasto tijelo s centralnom uzdužnom osi simetrije, za potpuno razumijevanje građe drva koriste se tri karakteristična presjeka [7].

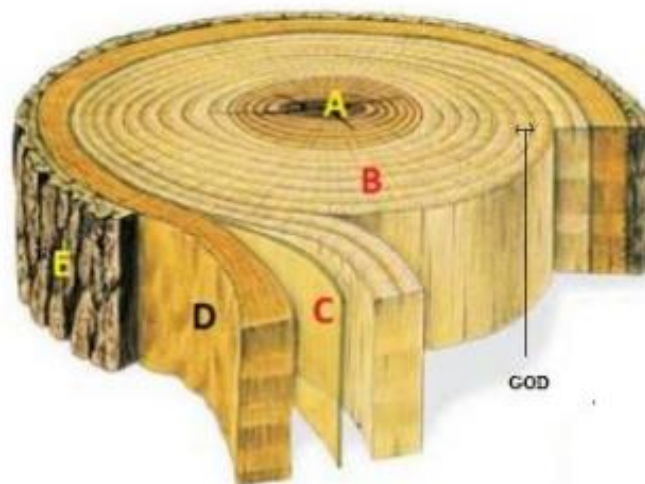
Na slici 2 prikazani su poprečni, radijalni i tangencijalni presjeci, koji ujedno čine tri karakteristična presjeka drva.



Slika 2. Tri osnovna presjeka drva [8]

Proučavanjem karakteristika na tri osnovna presjeka drva postiže se sveobuhvatno razumijevanje trodimenzionalne strukture drva [3].

Poprečni presjek dobiva se okomitim presijecanjem središnje osi debla. Kada se promatra poprečni presjek od središta debla prema njegovim rubovima, uočavaju se sljedeći slojevi: srčika, srževina, bjeljika, kambij, unutarnja kora te vanjska kora. Prikaz poprečnog presjeka sa slojevima nalazi se na slici 3.



Slika 3. Prikaz poprečnog presjeka kroz deblu s makroskopskim elementima [9]

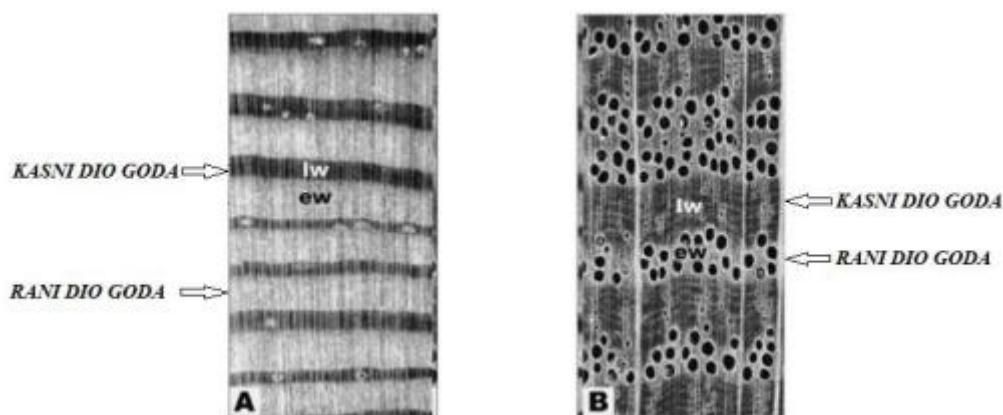
A – srčika i srževina, B – bjeljika, C – kambij, D – unutarnja kora, E – vanjska kora

Vanjska kora ima zaštitnu ulogu te štiti stablo od napada bioloških organizama i isušivanja. Većina stanica vanjske kore je funkcionalna, no nisu žive. Debljina i karakteristike vanjske kore značajno variraju između različitih vrsta drva. Neposredno ispod vanjske kore je unutarnja kora koja prenosi proizvode fotosinteze od lišća prema korijenu. Između drvnih stanica i kore smješten je vaskularni kambij. Kambij je tanak sloj stanica, pri čemu njegov vanjski dio (sekundarni floem) tvori stanice kore, dok njegov unutarnji dio tvori stanice drva (ksilem). Kambij transformira hranjive tvari u nove stanice i odgovoran je za rast stabla u širinu. Bjeljika je svjetlije područje koje okružuje srževinu. Veći dio bjeljike čine mrtve stanice bez protoplazme, koje prenose mineralne tvari i vodu od korijena do lišća. Također, bjeljika služi za pohranu škroba i lipida. Tijekom starenja stabla dolazi do kemijskih promjena u pohranjenim materijalima te prestaje prijenos vode, što dovodi do pretvaranja bjeljike u srževinu. U središtu debla nalazi se preostalo drveno tkivo iz rane faze rasta, koje se naziva srčika [8].

Radijalni presjek formira se prilikom uzdužnog presijecanja preko radijusa debla. Na ovom presjeku mogu se primijetiti strukturne karakteristike od srčike do kore, te uzdužne promjene unutar drva. Godovi u radijalnom presjeku izgledaju kao paralelne linije. Tangencijalni presjek nastaje okomitim presijecanjem radijusa debla ili presijecanjem duž tangente godova. S obzirom na varijaciju zaobljenosti godova na različitim mjestima, godovi u tangencijalnom presjeku izgledaju kao nizovi parabola ili su u obliku slova V [10].

2.2. Godovi

Najuočljivija nehomogenost građe na poprečnom presjeku jest god ili godišnji prirast. Godovi predstavljaju prstenaste skupine stanica koje se koncentrično slažu oko srčike drva. Svake godine dok drvo raste, nastaje nova skupina stanica koja se u poprečnom presjeku vidi kao prsten. Brojem godova moguće je procijeniti starost stabla, iako to nije uvijek pouzdano zbog vanjskih utjecaja koji mogu poremetiti ili prekinuti rast godova. U radijalnom presjeku godovi se pojavljuju kao uže trake, dok su u tangencijalnom presjeku šire svjetlije trake paralelne sa srži, međusobno odvojene tamnijom prugom koja razdvaja godine tekućeg i sljedećeg goda [7]. Na slici 4 prikazan je poprečni presjek kroz drvo, gdje se jasno vidi razlika između ranog i kasnog dijela goda kod četinjača i listača.

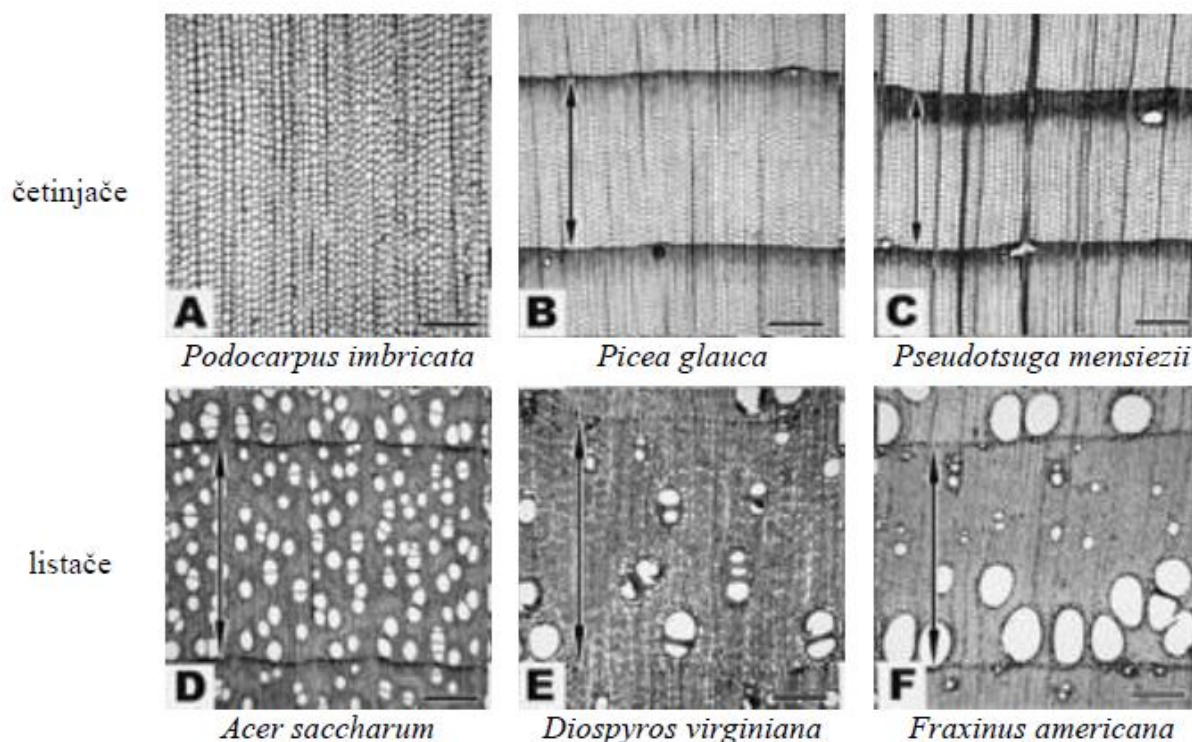


Slika 4. Prikaz poprečnog presjeka kroz drvo [7]

A – četinjače, B - listače

Četinjače se razlikuju od listača po jednostavnijoj građi. Kod određenih vrsta četinjača, unutar jednog goda nema primjetne razlike u duljini, debljini stjenke ili promjeru lumena stanica, slika 5 A. Kod drugih vrsta, postoji postupna promjena stanica od ranog prema kasnom dijelu goda, slika 5 B, dok je kod preostalih vrsta taj prijelaz izuzetno nagao, slika 5 C [7].

Listače se od četinjača razlikuju po prisutnosti velikih provodnih sudova, poznatih kao pore. Pore mogu biti ravnomjerno raspoređene (difuzne) kroz cijeli god, slika 5 D ili grupirane samo u ranom dijelu goda, slika 5 F. Vrste drva koje imaju prijelazne oblike između difuzno poroznog i prstenasto poroznog drva nazivaju se semi-difuzno porozne vrste drva, slika 5 E [7].



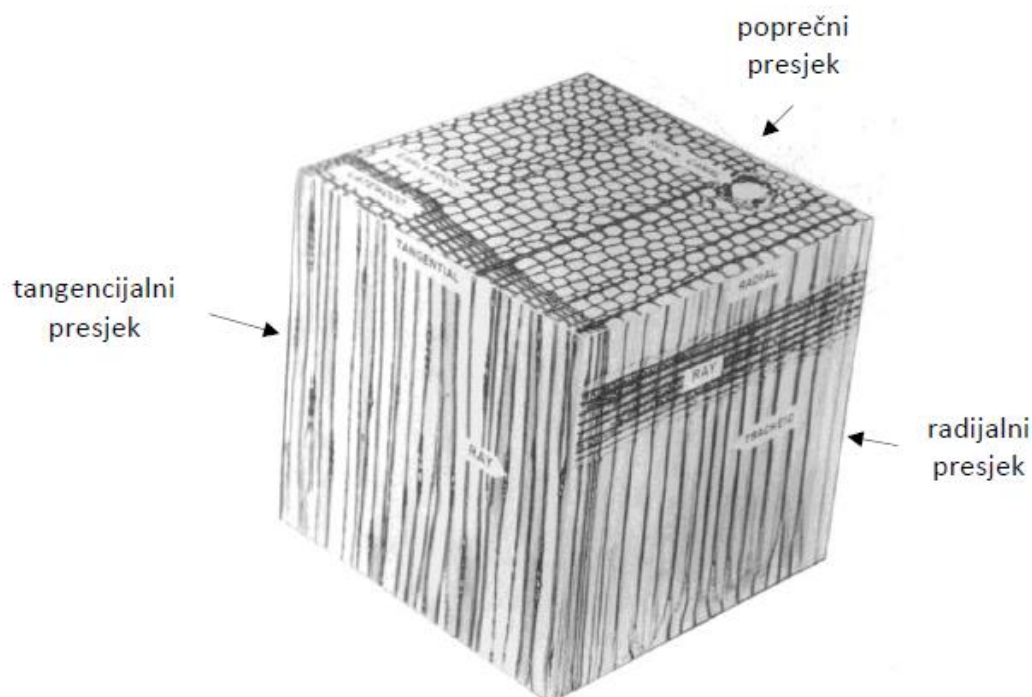
Slika 5. Karakteristični tipovi godova kod četinjača i listača [11]

Godovi mogu biti izraženiji ili manje izraženi, ovisno o vrsti. Općenito, godovi su kod četinjača izraženiji nego kod listača. Na primjer, ariš, jela, smreka, i duglazija imaju izražene godove, dok tisa i borovica imaju manje izražene godove. Godovi prstenasto-poroznih listača obično su izraženiji u usporedbi s difuzno poroznim vrstama. Kod bagrema, brijesta, bukve, hrasta i jasena godovi su izraženiji, dok su kod graba, javora i lipe manje izraženi. Boja godova može biti svjetlija ili tamnija, dok se prema širini godovi dijele na fine ili uske (do 1/3 cm), polu-fine ili srednje široke (1/3 do 2/3 cm) i grube ili široke (šire od 2/3 cm). Širina godova kod debla obično je veća blizu srčike, dok su kod grana u listača širi s gornje, a kod četinjača s donje strane. Ove razlike proizlaze iz različitih uvjeta rasta, osvjetljenja i mehaničkih uvjeta. Granične linije godova mogu biti paralelne s periferijom poprečnog presjeka debla, valovite (kod užlijebljenog debla) i uleknute [7].

2.3. Mikrostruktura četinjača

U usporedbi s listopadnim drvećem, četinjače imaju značajno jednostavniju mikrostrukturu. Glavni elementi njihove mikrostrukture su traheide, jednostavne stanice koje su usmjerene aksijalno, to jest paralelno s glavnom osi debla. U nekim vrstama četinjača, osim traheida, mogu se pronaći i parenhimske stanice, ali u malom udjelu. Što se tiče drvnih traka, koji su radijalno usmjereni od srčike prema kori, sastoje se od parenhimskih stanica. Ova jednostavnija mikrostruktura četinjača odražava njihovu specifičnu biologiju i prilagodbe njihovom prirodnom okruženju [25].

Na slici 6 prikazana je trodimenzionalni prikaz mikrostrukture četinjača s jasno naznačenim presjecima.



Slika 6. Trodimenzionalni prikaz mikrostrukture četinjača [25]

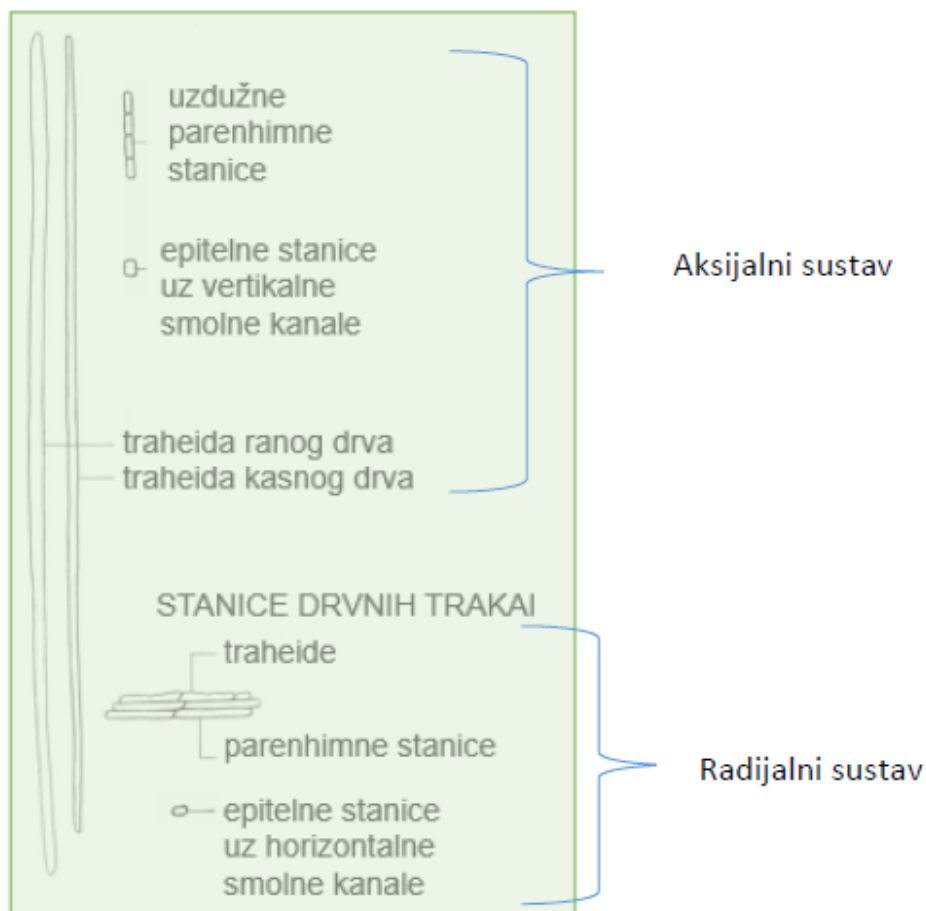
Na slici 7 prikazani su osnovni tipovi stanica kod četinjača te je naznačeno koje stanice pripadaju aksijalnom, a koje radijalnom sustavu.

Traheide u poprečnom presjeku imaju pravokutan oblik i sve su iste vrste. Njihova duljina kod vrsta umjerenog pojasa varira između 0,7 i 9 mm. Stanice u ranom dijelu goda imaju veći lumen i tanje stijenke u usporedbi s kasnim dijelom goda, gdje je stijenka deblja, a lumen manji. Omjer duljine i širine traheida iznosi otprilike 100:1. Volumni udio traheida u drvu četinjača prelazi

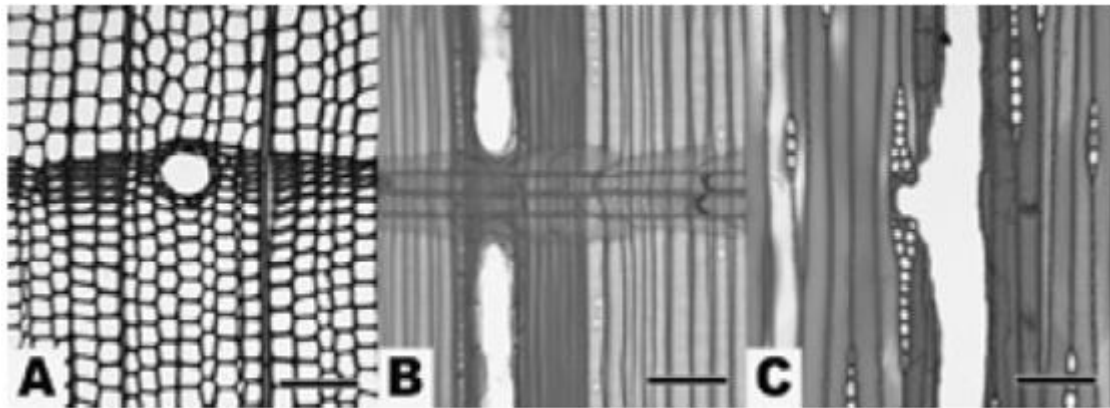
90 %. Njihova primarna funkcija je prijenos vode te pružanje mehaničke potpore drvu. Otopljene tvari zajedno s vodom putuju između susjednih stanica preko jažica koje se nalaze u suženim dijelovima traheida [25].

Ove karakteristike traheida odražavaju njihovu ključnu ulogu u cirkulaciji vode i održavanju strukturne stabilnosti četinjača.

Slika 8 prikazuje smolne kanale u aksijalnom, radijalnom i tangencijalnom presjeku.



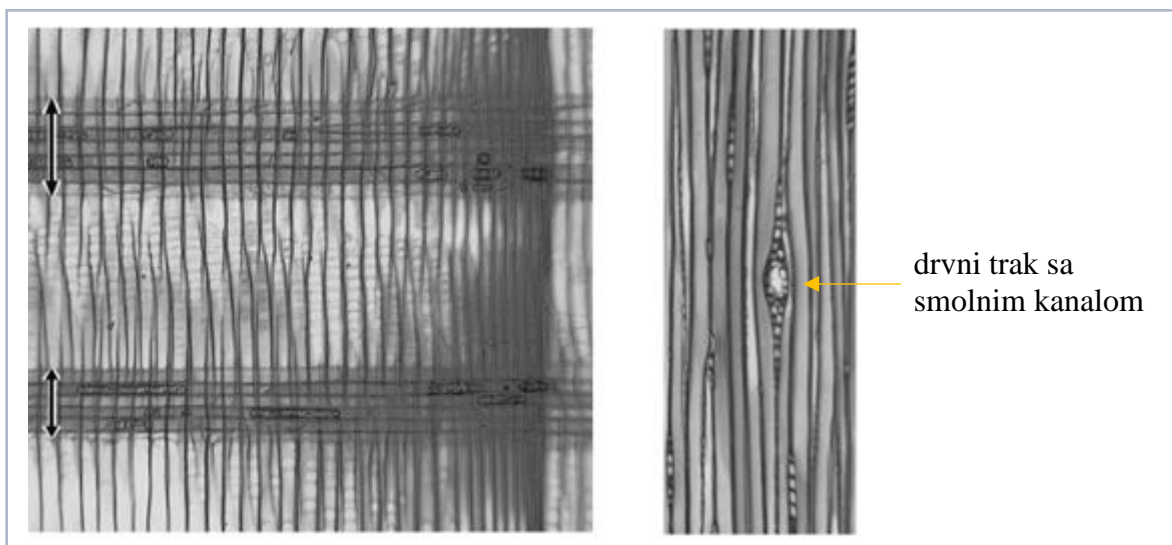
Slika 7. Osnovni tipovi drvnih stanica kod četinjača [6]



Slika 8. Smolni kanali u aksijalnom (A), radijalnom (B) i tangencijalnom presjeku (C) [10]

Smolni kanali su dio mikrostrukture određenih vrsta četinjača. Oni se mogu protezati aksijalno i radijalno kroz drvo. Smolni kanali su praznine okružene posebnim parenhimskim stanicama koje su odgovorne za proizvodnju smole. U nekim vrstama četinjača, smolni kanali su dovoljno veliki da budu vidljivi golim okom, dok kod drugih vrsta mogu biti izuzetno sitni. Radijalni smolni kanali često su integrirani u drvene trake, čineći ih znatno širim i većim od drvnih traka koje ne sadrže smolne kanale. U odgovoru na bolesti ili mehanička oštećenja, neke vrste četinjača mogu razviti velike smolne kanale, poznate kao klasterne. Ova raznolikost smolnih kanala odražava prilagodljivost četinjača na različite uvjete okoline te njihovu sposobnost da se brane od bolesti i oštećenja [10].

Slika 9 prikazuje radijalni i tangencijalni presjek kroz četinjaču gdje se jasno vide drvni traci bez smolnih kanala i sa smolnim kanalima.

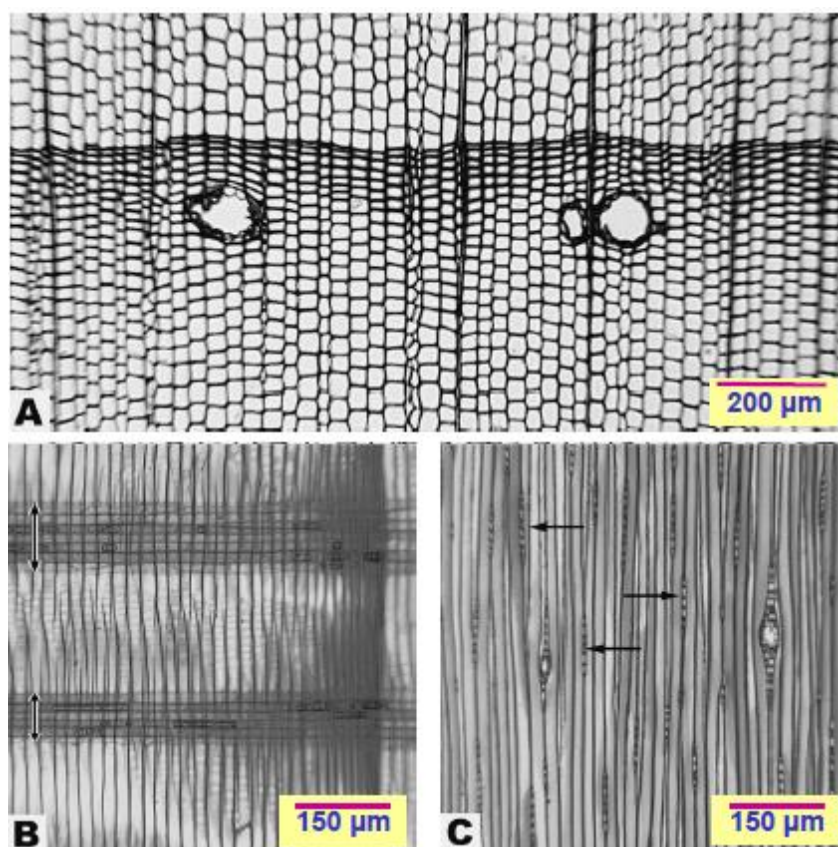


Slika 9. Drvni traci [10]

Drvni traci u četinjača građeni su od parenhimskih stanica i radijalno su usmjereni od srčike prema kori debla. Važni su dijelovi strukture drva i igraju ključnu ulogu u njegovim svojstvima i funkcionalnosti [10].

- **Parenhimske stanice:** Parenhimske stanice u drvnim tracima su prizmatičnog oblika, visine oko 15 μm , širine oko 10 μm i duljine od 150 do 250 μm . Njihova glavna uloga je sinteza, skladištenje i lateralni transport biokemijskih tvari i, u manjoj mjeri, vode. Parenhimske stanice su organizirane u drvnom traku jedna iznad druge.
- **Vidljivost u poprečnom presjeku:** Na poprečnom presjeku debla, drvni traci se pojavljuju kao tamnije vertikalne pruge, slika 10 A.
- **Vidljivost u radijalnom presjeku:** U radijalnom presjeku, mogu se vidjeti drvni traci koji su vodoravno položeni i okomiti na aksijalne traheide, slika 10 B.
- **Prošireni drvni traci:** Širina drvnih traka kod četinjača obično nije veća od širine jedne stanice, osim ako u njima ne postoje radijalni smolni kanali, zbog kojih su znatno širi. Na slici 10 C prikazana su dva takva proširena drvena traka s radijalnim smolnim kanalima.
- **Cross-Field Pitting:** Mjesto gdje se parenhimske stanice drvnih traka presijecaju s aksijalnim traheidama formira posebne jažice, preko kojih je povezan aksijalni i radijalni sustav drva. Oblik ovih jažica može se razlikovati za različite vrste drva.
- **Traheide u drvnim tracima:** Kod drvnih vrsta koje sadrže smolne kanale, u drvnim tracima mogu se naći i traheide. Traheide mogu biti prisutne i u drvnim tracima nekih vrsta koje nemaju smolne kanale.

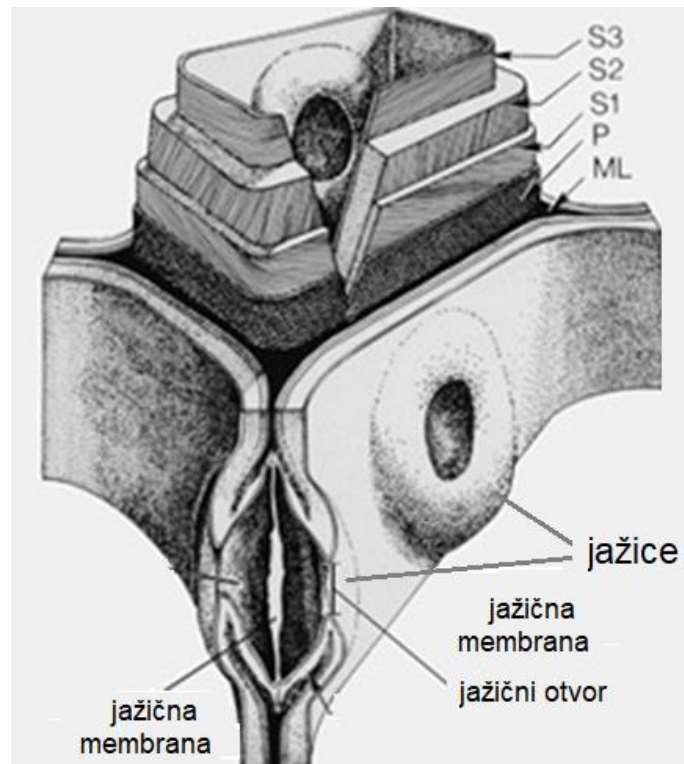
Mikrostruktura drvnih traka ima ključan utjecaj na svojstva i primjenu drva četinjača te igra važnu ulogu u njihovoj trajnosti i upotrebi u različitim industrijama i obrtničkim projektima [10].



Slika 10. Građa drva četinjača u aksijalnom (A), radijalnom (B) i tangencijalnom presjeku (C) [10]

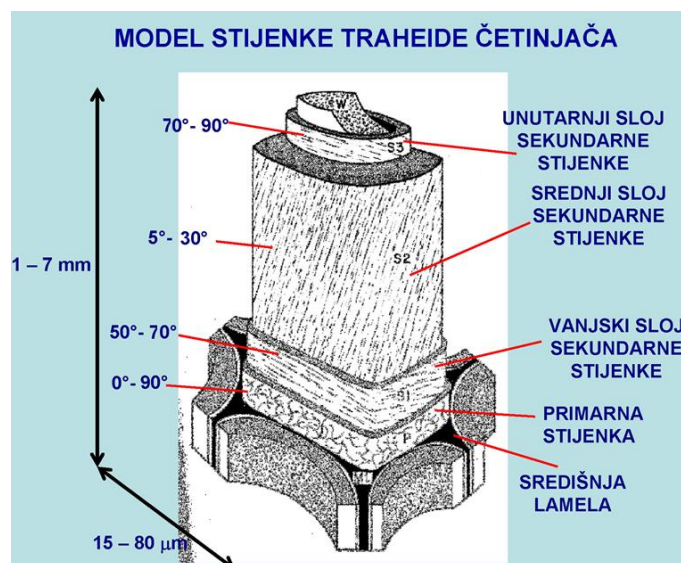
2.4. Građa stanične stijenke

Stanična stijenka se sastoji od primarnog (P) i sekundarnog dijela, koji obuhvaća tri sloja (S1, S2 i S3). Središnja lamela (ML) predstavlja prostor između primarnih stijenki susjednih stanica. Središnja lamela je bogata ligninom, što omogućuje povezanost susjednih stanica u cjelinu, što pak olakšava provođenje vode i biokemijskih tvari kroz drveno tkivo. Primarni dio drvene stijenke kontinuirano se proteže na središnju lamelu. Zbog njezine tanke strukture, ponekad je teško razgraničiti gdje točno završava središnja lamela, a gdje počinje primarni dio stanične stijenke. Sekundarni dio stanične stijenke, koji slijedi nakon primarnog dijela, znatno je deblji i sastoji se od tri različito debela sloja. Komunikacija između pojedinih stanica te prijenos tvari iz jedne u drugu stanicu omogućeni su putem posebnih struktura u staničnoj stijenki poznatih kao jažice. Na slici 11 prikazana je građa stanične stijenke [6].



Slika 11. Građa stanične stijenke [6]

U modelu stanične stijenke drvene stanice četinjača (traheida), prikazanom na slici 12, jasno su prikazani pojedini dijelovi i slojevi stijenke, kao i kutovi koje formiraju mikrovlakna celuloze s uzdužnom osi stanične stijenke. Svaki od slojeva stijenke ima svoj karakterističan kut, što pridonosi visokoj stabilnosti i mehaničkoj otpornosti same stanice [6].



Slika 12. Model stijenke traheide četinjača [6]

3. SVOJSTVA DRVA

3.1. Higroskopnost

Voda je prirodni sastojak živog drva te igra ključnu ulogu u određivanju fizikalnih i mehaničkih svojstava, otpornosti na biološku degradaciju i dimenzijske stabilnosti tehničkog drva. Hidroksilne skupine na molekulskim lancima celuloze i hemiceluloze čine staničnu stijenkicu izrazito higroskopnom. Nasuprot tome, lignin, koji povezuje stanice, je u osnovi hidrofobna tvar, što znači da stanična stijenkica ima jaku privlačnost prema vodi, ali s ograničenom sposobnošću adsorpcije [13].

Voda u drvu prisutna je unutar stanične stijenkice i u lumenu. Količina vode unutar stanične stijenkice živog drva uglavnom ostaje konstantna tijekom svih godišnjih doba i klasificira se kao vezana voda. S druge strane, voda unutar lumena poznata je kao slobodna voda, čija se količina mijenja ovisno o uvjetima. Unutar lumena, voda može sadržavati otopljene hranjive tvari proizvedene fotosintezom, kao i organske te anorganske tvari. Kritična razina vode u drvu, nazvana točkom zasićenja vlaknaca, označava stanje u kojem je uklonjena sva voda iz lumena dok je stanična stijenkica zasićena vodom. Daljnjim sušenjem drva dolazi do gubitka vezane vode, što uzrokuje približavanje lančanih molekula celuloze i hemiceluloze te utezanje, odnosno volumno skupljanje drva [14, 15].

Drvo, kao higroskopan materijal, upija vlagu, a udio vlage u drvu jedan je od ključnih čimbenika koji utječe na njegova fizikalna i mehanička svojstva. Udio vlage u drvu određuje se prema izrazu:

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

pri čemu je:

w – sadržaj vlage u drvu, %

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

m_1 – masa drva u potpuno suhom stanju, g.

Količina apsorbirane vlage ovisi o relativnoj vlažnosti i temperaturi zraka te o količini vode u drvu. U zelenom drvu, sadržaj vlage može varirati ovisno o području, pri čemu se veći sadržaj vlage obično bilježi u bjeljici nego u srževini. Točka zasićenja vlakanaca označava vlažnost iznad koje se fizička i mehanička svojstva drva stabiliziraju, dok ispod te razine drvo može bubriti, uzrokujući potencijalne pukotine i koroziju na konstrukcijskim dijelovima od drva i metala. Izoterme sorpcije vlage koriste se za određivanje količine vlage u drvu pri određenoj temperaturi i relativnoj vlažnosti zraka, pružajući informacije o ravnotežnoj vlažnosti drva [15].

3.2. Gustoća

Iako je drvo materijal koji apsorbira vlagu, njegova svojstva ovise o udjelu vlage te je stoga ključno uspoređivati ta svojstva pri istom sadržaju vlage u drvu. Gustoća je važan faktor koji upravlja svim mehaničkim svojstvima drva. Pri određivanju gustoće drva pri određenom udjelu vlage (w) koristi se omjer mase drva i njegovog volumena te se izražava prema sljedećem izrazu:

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

pri čemu je:

ρ_w – gustoća drva pri udjelu vlage od w %, g/cm^3

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

V_w – volumen drva pri udjelu vlage od w %, cm^3 .

Da bi se preračunale vrijednosti gustoće drva za određeni udio vlage na vrijednosti pri udjelu vlage od 12 %, koristi se sljedeći izraz:

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

pri čemu je:

w – udio vlage, %

ρ_w – gustoća pri udjelu vlage od w %, g/cm^3

ρ_{H_2O} – gustoća vode (1000 g/cm^3).

Gustoća drva u apsolutno suhom stanju računa se prema sljedećem izrazu:

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0}, \text{ g/cm}^3 \quad (4)$$

pri čemu je:

m_0 – masa drva u apsolutno suhom stanju, g

V_0 – volumen drva u apsolutno suhom stanju, cm^3

Potpuna eliminacija vlage iz drva (apsolutno suho stanje) postiže se sušenjem u peći pri temperaturi od $103^\circ \pm 2^\circ \text{C}$ do konstantne mase. Gustoća je usko povezana s fizikalnim i mehaničkim karakteristikama drva tako da povećanjem gustoće dolazi do porasta ogrjevne vrijednosti, porasta čvrstoće i tvrdoće, drvo se teže suši, impregnacija drva se teže izvodi i dr. Vrijednosti gustoće domaćih vrsta kreću se između $0,3$ i $0,9 \text{ g/cm}^3$, a na taj raspon osim vrste drva utječu građa drva, pozicija u stablu, stanište, udio celuloze, hemiceluloze, lignina i dr. [7, 16].

U tablici 1 prikazana je varijabilnost gustoće u apsolutno suhom stanju nekih domaćih vrsta drva, dok tablica 2 prikazuje razvrstane vrste drva po razredima gustoće.

Tablica 1. Varijabilnost gustoće u apsolutno suhom stanju nekih domaćih vrsta [17]

Vrsta drva	Gustoća ρ_0 , g/cm ³		
	min	srednja	max
Topola	0,37	0,41	0,52
Jela	0,32	0,41	0,71
Smreka	0,30	0,43	0,64
Lipa	0,32	0,49	0,56
Bor	0,30	0,49	0,86
Kesten	0,46	0,51	0,55
Ariš	0,40	0,55	0,82
Duglazija	0,42	0,56	0,77
Javor	0,48	0,59	0,75
Breza	0,46	0,61	0,80
Hrast dub	0,39	0,62	0,79
Brijest	0,44	0,64	0,82
Jasen	0,41	0,65	0,82
Bukva	0,49	0,68	0,88
Grab	0,50	0,79	0,92

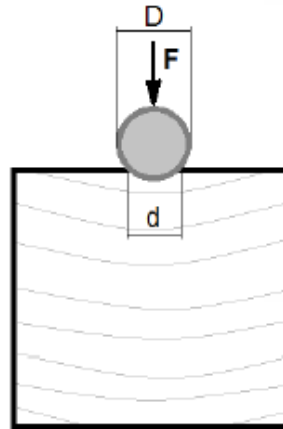
Tablica 2. Vrste drva razvrstane po razredima gustoće [17]

Ocjena	Gustoća ρ_0 , g/cm ³	Vrsta drva
iznimno niska	< 0,2	balza
vrlo niska	0,2 – 0,3	zeleni bor
niska	0,3 – 0,45	smreka, jela, bor, topola, joha
srednja	0,45 – 0,6	ariš, kesten, lipa, trešnja
srednje visoka	0,6 – 0,7	javor, breza, bukva, hrast, jasen, orah
visoka	0,7 – 0,8	bagrem, grab
vrlo visoka	0,8 – 1	bangossi, palisander, eukaliptus

3.3. Tvrdoća

Tvrdoća drva je jedno od ključnih svojstava koje se proučava u području drvne tehnologije. Ovo svojstvo ima važnu ulogu u određivanju prikladnosti drva za različite namjene. Tvrdoća drva ovisi o nekoliko faktora, uključujući gustoću, mikrostrukturu, distribuciju vlakana i udio različitih komponenti stanične stijenke. Postoje različite metode za određivanje tvrdoće drva. Među najčešće korištenim metodama su Brinellova metoda i metoda mjerenja tvrdoće prema Janki. Svaka od ovih metoda ima svoje specifičnosti i primjenu ovisno o vrsti drva i specifičnim zahtjevima istraživanja. Gustoća drva ima značajan utjecaj na njegovu tvrdoću. Općenito, što je veća gustoća drva, to je veća i njegova tvrdoća. Ovo se objašnjava strukturom drva, gdje viša gustoća rezultira kompaktnijim rasporedom vlakana i staničnih struktura. Različite vrste drva imaju različitu tvrdoću, što ih čini prikladnim za različite namjene. Na primjer, tvrdo drvo poput hrasta ili bukve općenito ima veću tvrdoću u usporedbi s mekim vrstama drva poput bora ili topole. Ove razlike u tvrdoći također utječu na način na koji se drvo obrađuje i koristi u različitim industrijskim granama. Tvrdoća drva ima značajan utjecaj na praktične primjene, poput obrade drva, izrade namještaja, proizvodnje podova i konstrukcijskih materijala. Osim toga, tvrdoća drva također može utjecati na abrazijsku otpornost, rizik od ogrebotina ili oštećenja te dugoročnu trajnost proizvoda od drva. Važno je napomenuti da vlažnost također može značajno utjecati na tvrdoću drva. Promjene u vlažnosti okoliša mogu uzrokovati povećanje ili smanjenje tvrdoće drva, što može biti ključno za njegovu primjenu u različitim uvjetima okoline [18].

Kod Brinellove metode indenter je kaljena čelična kuglica promjera 10 mm (oznaka za tvrdoću HBS). Za mjerenje tvrdoće tvrdih materijala koristi se kuglica od tvrdog metala „WIDIA“ (oznaka za tvrdoću HBW). Kuglica se kontrolirano utiskuje u površinu uzorka drva, čime se generira otisak koji odražava tvrdoću materijala, kako je prikazano na slici 13. Tipično, uzorci koji se koriste za ovu metodu imaju prizmatični oblik s duljinama stranica od približno 50 mm. Primjenjuje se određena sila pritiska, koja ovisi o tvrdoći samog drva. Za mekše vrste drva, sila pritiska iznosi 500 N, dok za tvrđe vrste drva iznosi 1000 N. Postupno se povećava opterećenje tijekom ispitivanja, dok se konačno opterećenje postiže unutar 15 ± 3 sekunde. Maksimalno opterećenje zadržava se tijekom 25 ± 5 sekundi, nakon čega slijedi postupak rasterećenja. Kako bi se bolje vizualizirao otisak i preciznije izmjerio promjer otiska, između kuglice i površine uzorka stavlja se indigo papir. Mjerenje promjera otiska vrši se pomoću opreme koja mora imati visoku točnost, s granicom pogreške od $\pm 0,2$ mm [7].



Slika 13. Shematski prikaz mjerenja tvrdoće po Brinellu [7]

Vrijednost tvrdoće po Brinellu računa se prema sljedećem izrazu:

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

pri čemu je:

F – primijenjena sila prodiranja, N

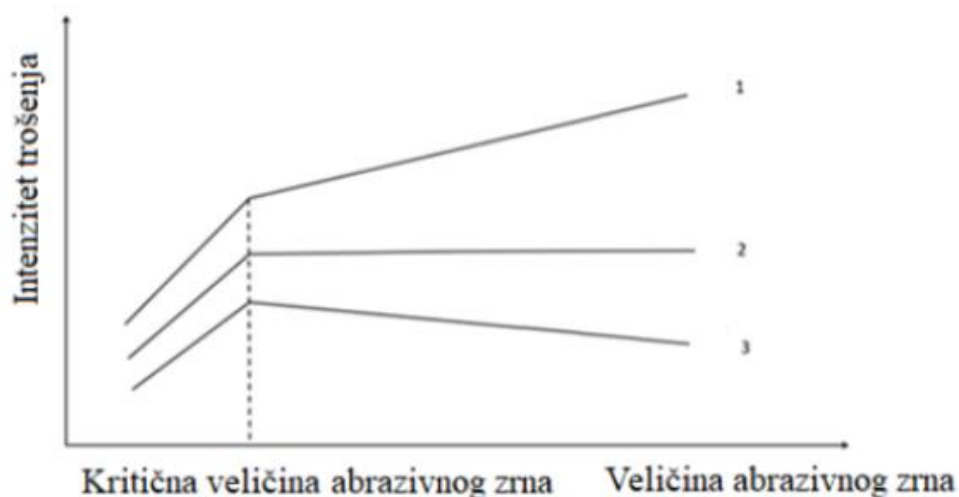
D – promjer kuglice, mm

d – promjer otiska (kalote), mm.

3.4. Kritična veličina abrazivnih čestica

Različite su činjenice vezane uz veličinu čestica koje utječu na gubitak volumena prilikom abrazijskog trošenja ili na intenzitet samog abrazijskog trošenja. Iako je intuitivno očekivati da će veće abrazivne čestice rezultirati većim intenzitetom trošenja, stvarnost je znatno složenija. Postoji pozitivna i linearna korelacija između tih dviju veličina sve dok abrazivne čestice ne dosegnu određene dimenzije. Ta određena veličina naziva se kritična veličina abrazivnih zrna. Kada se ta kritična veličina abrazivnih čestica dosegne, može nastupiti jedan od tri slučaja koji su prikazani na slici 14 [19]:

1. Nakon što se dosegne kritična veličina abrazivnih čestica, intenzitet abrazijskog trošenja s povećanjem veličine abrazivnih čestica i dalje raste, ali s manjim intenzitetom.
2. Također se može dogoditi da nakon dosezanja kritične veličine abrazivnih zrna i njihovim daljnjim rastom, intenzitet abrazijskog trošenja više ne raste i ostaje nepromijenjen.
3. Treća mogućnost je da se intenzitet trošenja smanjuje nakon što abrazivne čestice dosegnu kritičnu vrijednost.



Slika 14. Ovisnost intenziteta trošenja o veličini abrazivnih čestica [19]

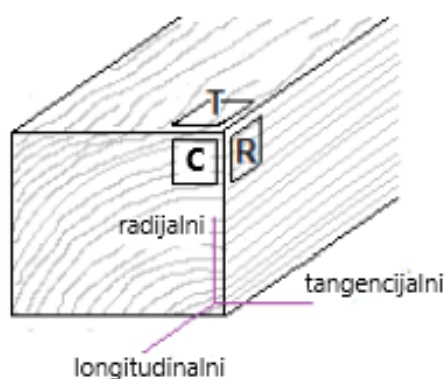
Fenomen kritične veličine abrazivnih čestica pojavljuje se u različitim situacijama, uključujući abraziju između dvaju tijela, abraziju između tri tijela, eroziju i procese strojne obrade. Ovaj fenomen nije ograničen samo na metalne materijale, već se također pojavljuje kod drva. Unatoč postojanju nekoliko teorija, uzrok ovog fenomena još uvijek nije potpuno razjašnjen [19].

Kada je riječ o abraziji između dvaju tijela, posebno kod metalnih materijala, veličina abrazivnih čestica direktno je povezana s kutom između bridova i oštrinom vrhova tih čestica. Oštrina vrhova, odnosno kut pod kojim abrazivne čestice djeluju na materijal, ključni je čimbenik koji utječe na trošenje materijala. Na primjer, manje abrazivne čestice imaju veći kut u kontaktu s materijalom koji se troši, što rezultira prevladavajućim mehanizmom abrazije poznatim kao mikrorezanje. S druge strane, veće abrazivne čestice imaju manji kut u kontaktu s površinom, a glavni mehanizam abrazije postaje mikrobrazdanje. Prilikom penetracije većih čestica, materijal koji se troši premješta se uz rubove brazde, što rezultira manjim gubicima materijala i, posljedično, manjim intenzitetom abrazije [19].

3.5. Otpornost na trošenje

Prilikom istraživanja mehanizama trošenja drva, posebna pažnja posvećuje se analizi otpornosti drva na abraziju. Abrazijsko trošenje drva nastaje kao posljedica relativnog gibanja čestica s višom tvrdoćom duž površine drva. Otpornost drva na abraziju povezana je s više čimbenika. Iako je usko povezana s tvrdoćom, ta dva svojstva nisu istoznačna. Osim o tvrdoći, otpornost na abraziju ovisi o granici razvlačenja, gustoći materijala te orijentaciji mikrostrukture. Udjeli celuloze, hemiceluloze i lignina, kao i sadržaj vlage u drvu te način obrade površine, također značajno utječu na otpornost materijala na trošenje. Općenito, najveću otpornost na trošenje ima drvo u poprečnom presjeku. Radijalni i tangencijalni presjek imaju puno manju otpornost na trošenje, pri čemu se radijalni troši malo više od tangencijalnog. Jedno od zapažanja je da difuzno porozne vrste drva, unatoč istoj gustoći, pokazuju manju razinu trošenja u usporedbi s prstenasto poroznim vrstama drva [7].

Na slici 15 prikazani su karakteristični smjerovi i osnovni presjeci u drvu: poprečni (C), radijalni (R) i tangencijalni (T).



Slika 15. Osi simetrije i presjeci u drvu [13]

4. ARIŠ (*Larix*)

Ariš je ekonomski i tradicionalno važno drvo u Europi, zahvaljujući svojoj brzorastućoj prirodi, visokoj prilagodljivosti i izdržljivosti. Srževina varira od žute do crvenkasto smeđe. Uski pojas bjeljike je gotovo potpuno bijel ili blijedo žut i jasno je odvojen od srčike. Drvo je tvrdo, jakog mirisa, a cijeni se zbog svoje izdržljivosti. Zbog koncentracije tanina do 10 % i udjela smole od oko 2,6 % ima visoku trajnost pod vodom [20].

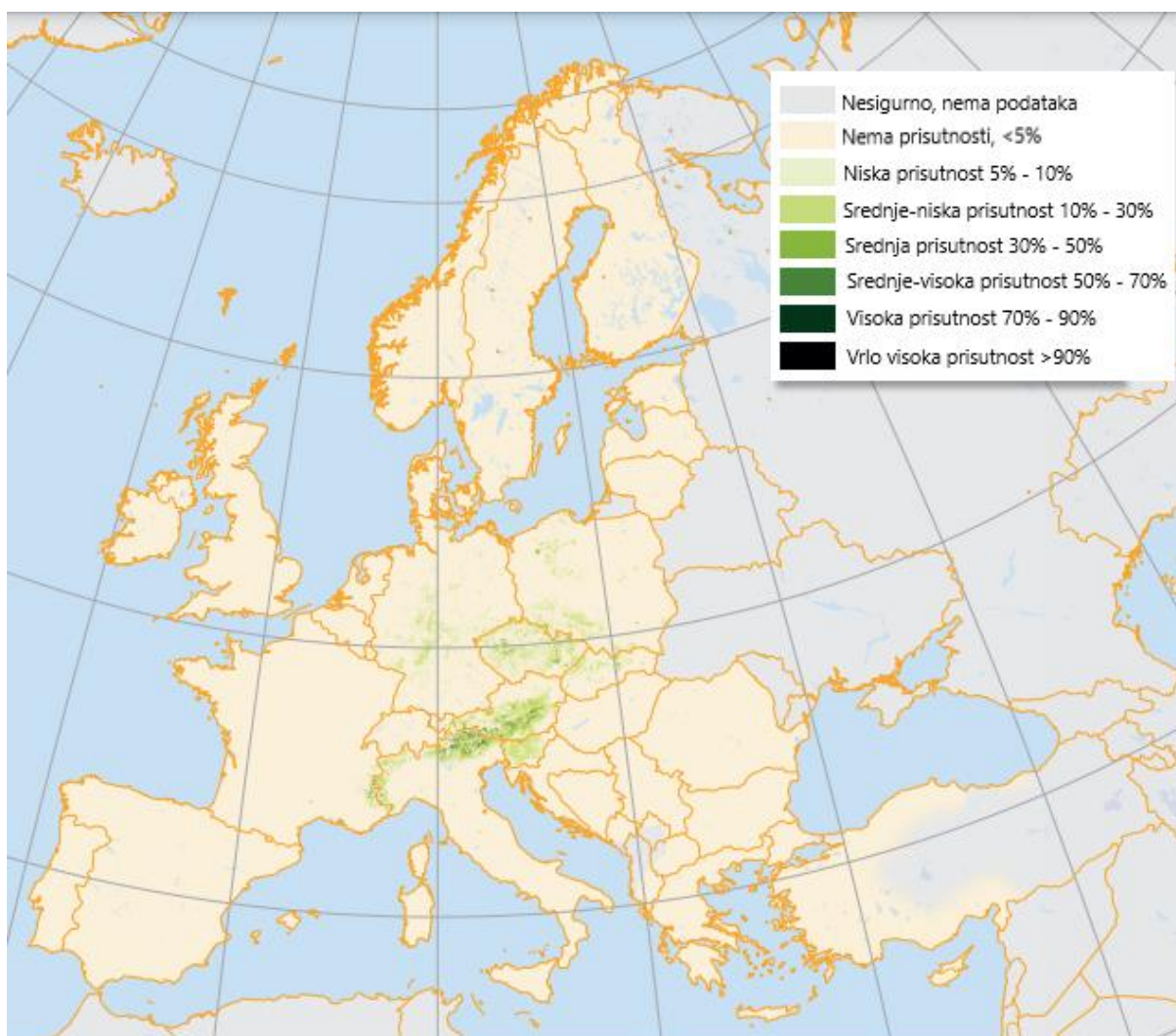
Slika 16 prikazuje stablo ariša.



Slika 16. Ariš (*Larix*) [21]

Ariš se koristi u stolarskoj i brodograđevnoj industriji. U europskim planinskim područjima njegovo drvo tradicionalno se koristi za izgradnju drvenih kuća, za proizvodnju namještaja i finih podova te mnoge vremenski postojane vanjske predmete poput ograda, vrata, klupa, stolova, drvenih krovova i pojilica za stoku [22].

Terpentin od drva ariša, poznat i kao venecijanski terpentin, dobiva se destilacijom smole drva ariša i koristi se u tradicionalnoj medicini kao antitusik i ekspektorans za prehlade, a u novije vrijeme i kao industrijsko otapalo, za pripremu boja i voska ili kao izvor organskih spojeva (npr. kamfor, kolofonij i sl.). Eterično ulje ariša još uvijek se koristi u aromaterapiji i kao parfem. U nekim alpskim područjima od drva ariša izrađuje se tradicionalni drveni rog dug 3-4 metra. Rog je savijen na kraju, može proizvesti vrlo niske i jake tonove, a svira se s jednim krajem položenim na tlo, uz veliki napor glazbenika. Ovaj tradicionalni alpski glazbeni instrument izvorno je korišten u srednjoeuropskim Alpama za komunikaciju među selima [23]. Na slici 17 prikazana je rasprostranjenost ariša u Europi.



Slika 17. Rasprostranjenost ariša [20]

5. EKSPERIMENTALNI DIO

5.1. Cilj rada i provedena ispitivanja

Cilj diplomskog rada je odrediti intenzitet abrazijskog trošenja drva ariša (*Larix*) u poprečnom, radijalnom i tangencijalnom presjeku te utjecaj veličine abrazivnih čestica na intenzitet trošenja. U svrhu dobivanja pouzdanih zaključaka o povezanosti navedenih varijabli s abrazijskom otpornošću, provedena su sljedeća ispitivanja:

1. Određivanje gustoće i udjela vlage u uzorcima
2. Analiza mikrostrukture u tri različita presjeka: poprečnom, radijalnom i tangencijalnom
3. Ispitivanje intenziteta abrazijskog trošenja na uređaju Taber abrader s različitim kvalitetama brusnog papira na tri osnovna presjeka: poprečnom, radijalnom i tangencijalnom

Rezultati ovih eksperimentalnih koraka pružit će ključne uvide u utjecaj veličine abrazivnih čestica i usmjerenosti strukture na abrazijsku otpornost drva ariša, a time i doprinijeti daljnjem razumijevanju ove problematike.

5.2. Materijal za ispitivanje

Svi uzorci predviđeni za ispitivanja izrezani su iz drva ariša (*Larix*). Uzorci za ispitivanje izrezani su iz područja gdje su godovi paralelni te relativno uski, sa sličnom širinom. Svi uzorci izrezani su u Laboratoriju za strojnu obradu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Pri izrezivanju uzoraka posebno se pazilo na usmjerenost strukture, a također se nastojalo da svi uzorci budu uzeti s istog područja na deblu kako ne bi bilo velike razlike u gustoći uzoraka. Izrezan je uzorak za mjerenje gustoće i udjela vlage te uzorci za određivanje intenziteta abrazijskog trošenja.

Na slici 18 prikazano je grubo izrezivanje uzoraka pomoću tračne pile, dok je na slici 19 prikazano precizno izrezivanje uzoraka.

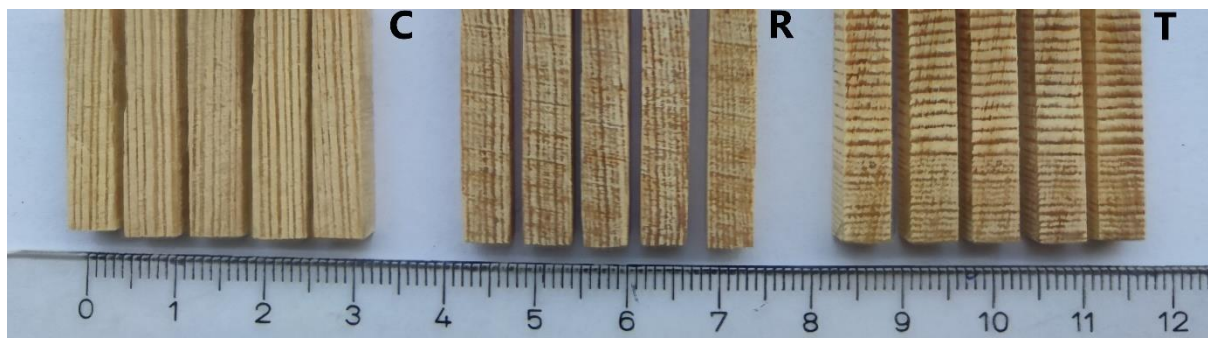


Slika 18. Rezanje uzoraka tračnom pilom



Slika 19. Precizno izrezivanje uzoraka

Uzorci za mjerenje otpornosti na abrazijsko trošenje imali su oblik četverostrane prizme dimenzija 5 mm × 5 mm × 30 mm, kako je prikazano na slici 20. Za svaki od tri karakteristična presjeka - poprečni, radijalni i tangencijalni, izrezano je po 5 uzoraka. Na ovim uzorcima ispitivana je otpornost na abrazijsko trošenje, a abradirana je površina dimenzija 5 mm × 5 mm.



Slika 20. Uzorci za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje, C – poprečni presjek, R – radijalni presjek, T – tangencijalni presjek

Stranice uzoraka nakon rezanja su pobrušene da se otklone srhovi od rezanja, a nakon toga su uzorci pažljivo očetkani. Kako se intenzitet abrazijskog trošenja određuje na temelju gubitka mase pri abradiranju, uzorci su izvagani da im se odredi početna masa. Masa svakog uzorka određena je na analitičkoj vazi Ohaus Analytical Plus u Laboratoriju za analizu metala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Vaga je prikazana na slici 21.



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

5.3. Određivanje gustoće i udjela vlage

U svrhu određivanja gustoće i udjela vlage, uzorak je izrezan na dimenzije 30 mm × 30 mm × 20 mm, u skladu s propisima norme ISO-13061-2 [26]. Rezanje uzorka obavljeno je pomoću tračne pile u Laboratoriju za alatne strojeve Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Prema navedenoj normi, pripremljeni uzorak je sušen u peći na temperaturi od 103 ± 2 °C sve dok nije postigao apsolutno suho stanje, odnosno dok se nije postigla razlika mase manja od 0,1 % između dva uzastopna mjerenja. Masa uzorka je mjerena prije postavljanja u sušionik te u potpuno suhom stanju. Uzorak se od sušionika do vage prenosio u eksikatoru kako bi se spriječilo upijanje vlage prije mjerenja mase uzorka. Udio vlage u ispitnom uzorku određen je kao razlika u masi i izražen je kao postotak prema izrazu (1). U tablici 3 prikazani su rezultati mjerenja udjela vlage ispitnog uzorka i vrijednost gustoće ispitnog uzorka pri tom udjelu vlage. Na slici 22 prikazan je sušionik u kojem je provedeno sušenje uzoraka, dok je na slici 23 prikazan eksikator.

Tablica 3. Udio vlage i gustoća ispitnih uzoraka

Udio vlage pri ispitivanju, %	8,58
Gustoća pri 8,58 % vlage, g/cm ³	0,648



Slika 22. Sušionik

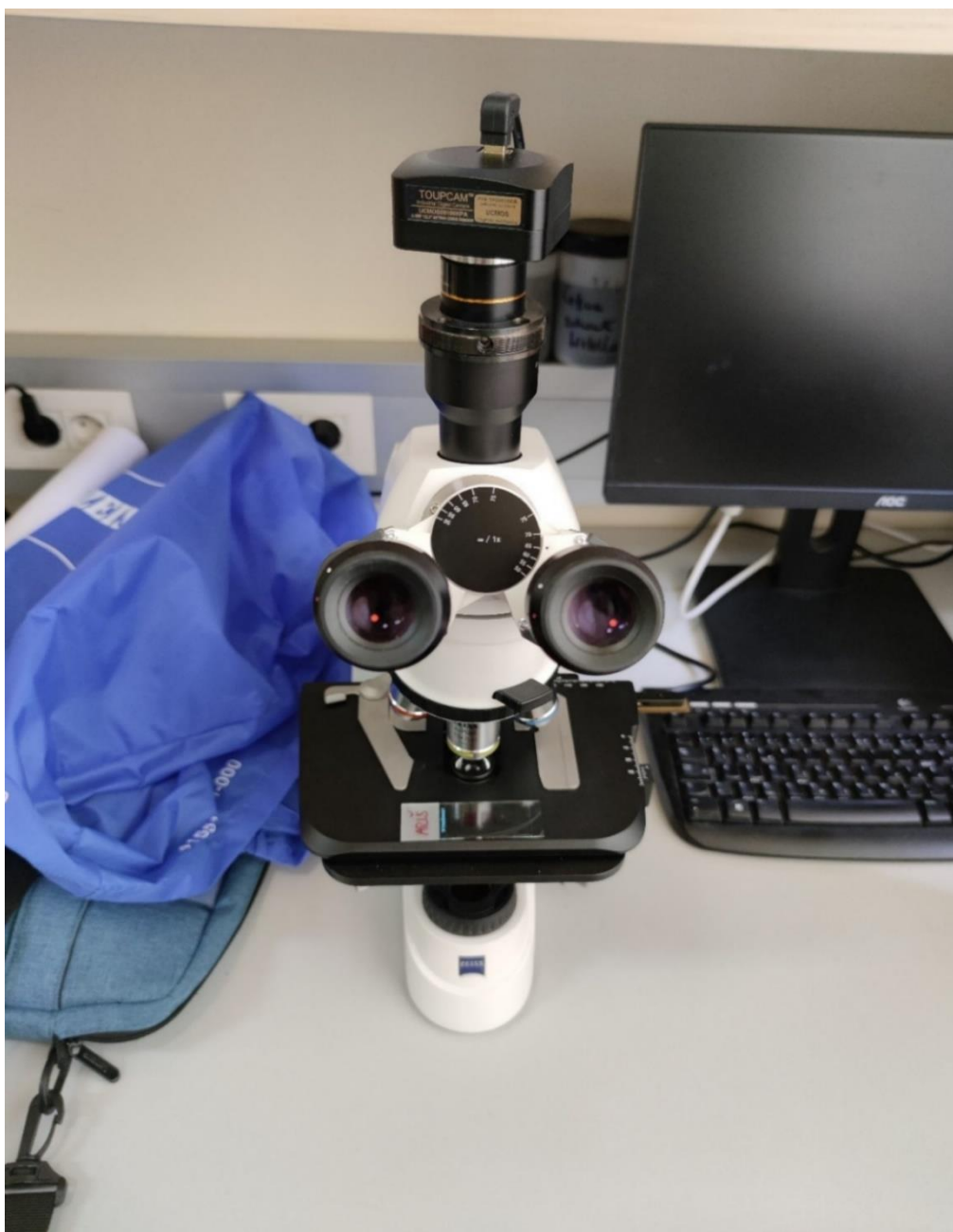


Slika 23. Eksikator

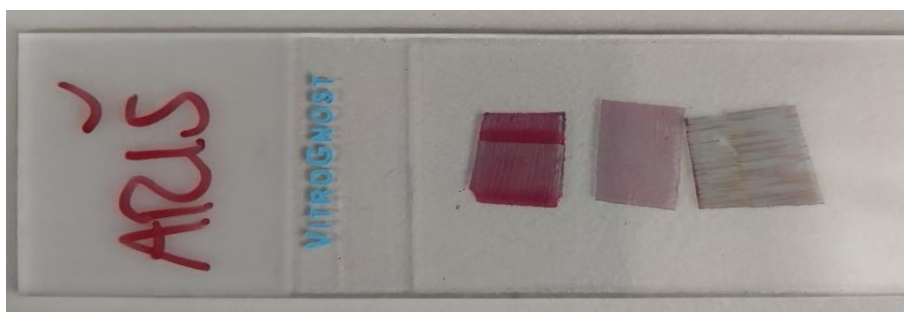
5.4. Analiza mikrostrukture ispitnih uzoraka

Detaljna mikrostrukturna analiza ispitnih uzoraka ariša provedena je na AXIO optičkom mikroskopu opremljenom kamerom TOUPCAM, na Biološkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Zagrebu. Mikrostruktura ariša je promatrana na tri osnovna presjeka - poprečnom, tangencijalnom i radijalnom.

Na slici 24 prikazan je optički mikroskop, dok su na slici 25 prikazani uzorci za promatranje mikrostrukture.



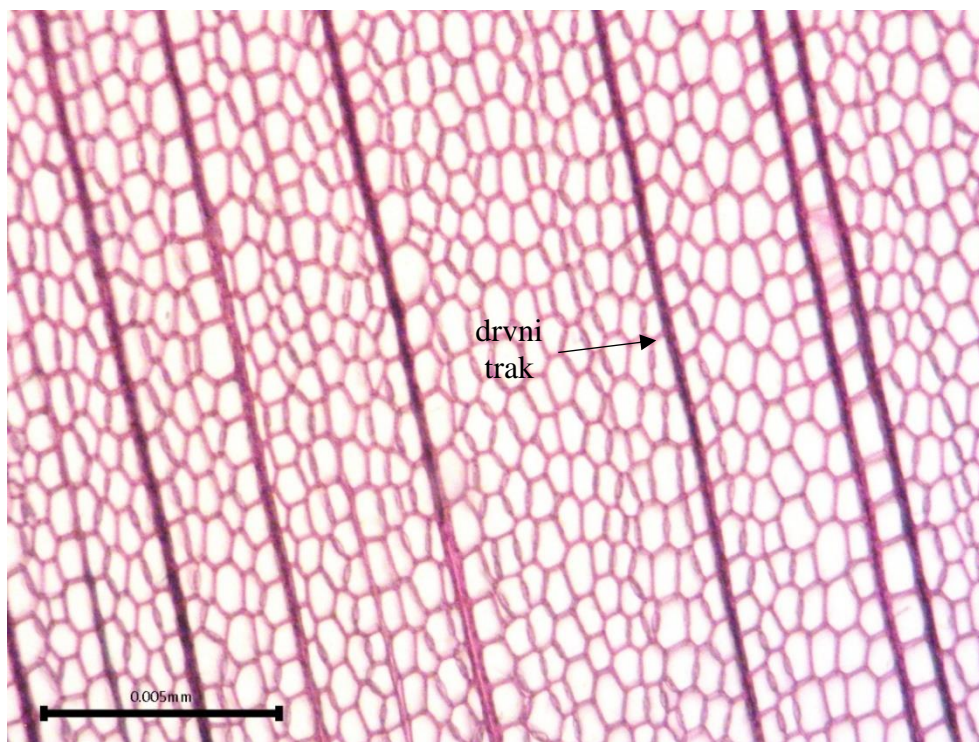
Slika 24. Optički mikroskop AXIO



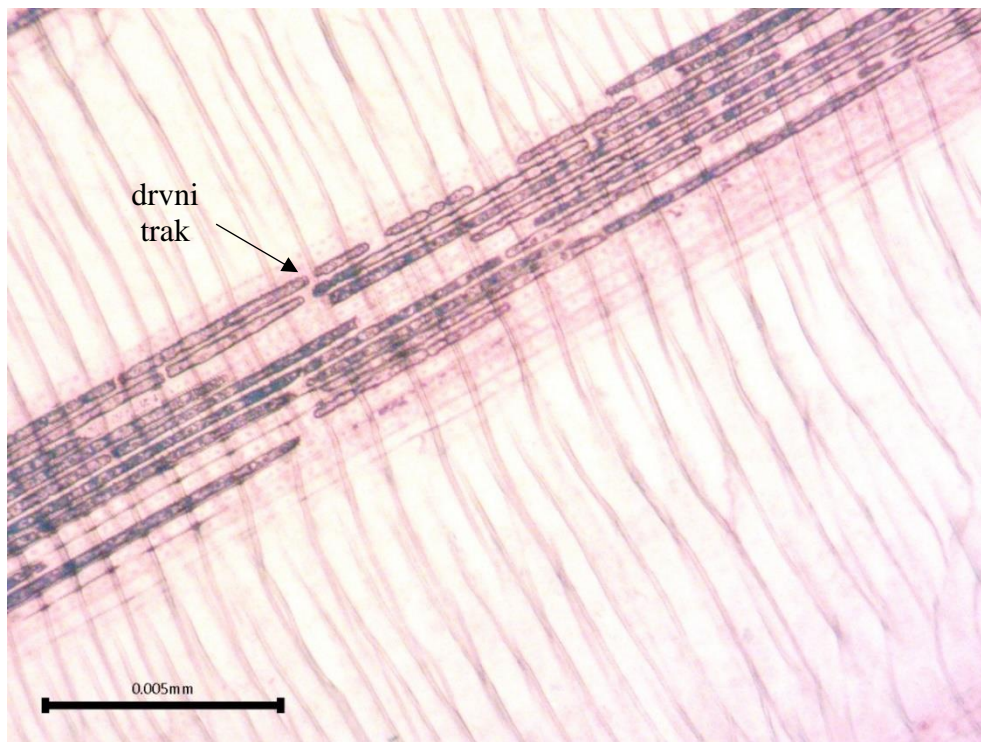
Slika 25. Uzorci za analizu mikrostrukture

Na poprečnom presjeku ariša, koji je prikazan na slici 26, mogu se vidjeti traheide ranog dijela goda koje karakteriziraju tanje stijenke i veći lumen. Između traheida protežu se tanki i ravni drvni traci načinjeni od parenhimskih stanica. Razmak između drvnih traka nije ujednačen. Zbog većeg povećanja ne vide se stanice u kasnom dijelu goda.

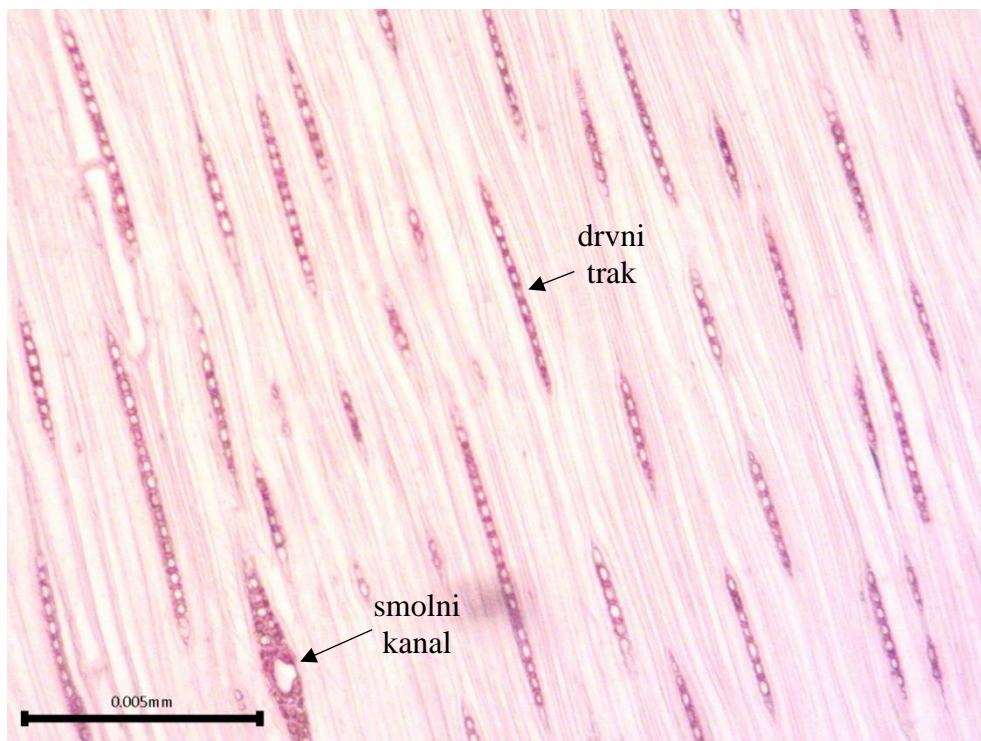
Na radijalnom presjeku, prikazanom na slici 27, vidi se po duljini presječen drvni trak s pravilnim parenhimskim stanicama te uzdužno presječene traheide. Tangencijalni presjek prikazan je na slici 28 i na njemu se vide uzdužno presječene traheide te poprečno prerezani drvni traci. Širina drvnih traka je širina jedne stanice, a visina nije ujednačena. Drvni traci s radijalnim smolnim kanalima su puno širi od drvnih traka koji ne sadrže smolne kanale.



Slika 26. Mikrostruktura poprečnog presjeka ariša



Slika 27. Mikrostruktura radialnog presjeka ariša



Slika 28. Mikrostruktura tangencijalnog presjeka ariša

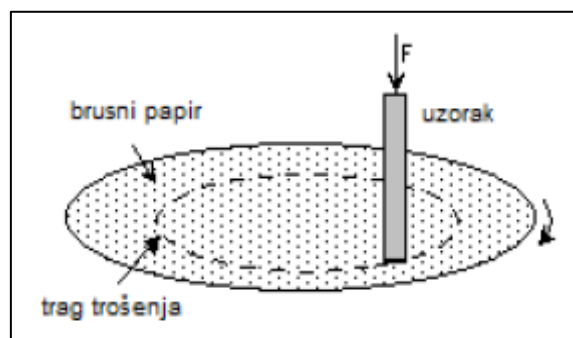
5.5. Ispitivanje abrazijske otpornosti

Određivanje intenziteta abrazijskog trošenja uzoraka drva ariša provedeno je u Laboratoriju za tribologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Intenzitet abrazijskog trošenja određen je na uređaju Taber abrader. Na slici 29 može se vidjeti navedeni uređaj s postavljenim uzorkom za ispitivanje.



Slika 29. Ispitivanje abrazijske otpornosti na uređaju Taber abrader

Na slici 30. nalazi se shematski prikaz ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje. Disk promjera 125 mm, na koji se postavi brusni papir odgovarajuće gradacije, rotira brzinom od 1 okretaj u sekundi. Uzorak koji se nalazi u držaču pritisnut je na brusni papir normalnom silom od 4,91 N. Tijekom ispitivanja usisavačem se uklanjaju čestice trošenja.



Slika 30. Shematski prikaz ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje [6]

Za svaki presjek ispitano je po pet uzoraka, ukupno 15 uzoraka. Prije početka ispitivanja abrazijske otpornosti, uzorcima je izmjerena početna masa. Uzorci su abradirani u ciklusima od po 60 okretaja. Nakon svakog ciklusa abrazije na brusnim papirima različitih kvaliteta, mjerena je masa uzoraka kako bi se odredio gubitak mase. Gubitak mase se zatim preračunavao u gubitak volumena. Kako bi se mogao kvantificirati intenzitet abrazijskog trošenja, gubitak volumena se dijelio s abradiranom površinom uzorka. Na taj način omogućeno je uspoređivanje gubitka volumena i intenziteta trošenja na različitim karakterističnim presjecima, kao i za različite kvalitete brusnih papira. Mase svih uzoraka, prije i nakon svakog ciklusa abrazije, mjerene su pomoću analitičke vage Ohaus Analytical Plus u Laboratoriju za analizu metala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Tijekom ispitivanja na Taber abraderu korištene su četiri različite kvalitete brusnog papira kako bi se procijenio utjecaj veličine abrazivnih čestica na intenzitet abrazijskog trošenja. Abrazivne čestice na brusnim papirima bile su od silicijevog karbida.

U tablici 4 prikazane su korištene kvalitete brusnih papira i pripadajuće srednje vrijednosti abrazivnih čestica.

Rezultati mjerenja gubitka mase pri abrazijskom trošenju na Taber abraderu za sve ispitane uzorke i sve kvalitete brusnog papira prikazani su u tablici 5. Prikazani rezultati odnose se na udio vlage od 8,58 % i za 60 okretaja diska na Taber abraderu.

Tablica 4. Korištene kvalitete abrazivnih papira i srednje vrijednosti abrazivnih čestica

Kvaliteta brusnog zrna	Srednja veličina abrazivnih čestica, μm
P800	21,8
P220	68,0
P120	125,0
P80	201,0

Tablica 5. Gubitak mase pri abrazivskom trošenju pri udjelu vlage 8,58 %

Presjek	Uzorak	Gubitak mase, g			
		P800	P220	P120	P80
Poprečni	1	0,0072	0,0162	0,0299	0,0274
	2	0,0058	0,0102	0,0303	0,0291
	3	0,0072	0,0160	0,0260	0,0304
	4	0,0075	0,0094	0,0242	0,0232
	5	0,0090	0,0154	0,0151	0,0223
	\bar{x}	0,0073	0,0134	0,0251	0,1324
Radijalni	1	0,0079	0,0283	0,0725	0,1014
	2	0,0149	0,0525	0,0749	0,1205
	3	0,0150	0,0371	0,0915	0,1272
	4	0,0139	0,0467	0,0881	0,1249
	5	0,0085	0,0296	0,0647	0,1185
	\bar{x}	0,0120	0,0388	0,0783	0,1185
Tangencijalni	1	0,0122	0,0275	0,0578	0,0859
	2	0,0110	0,0220	0,0853	0,0910
	3	0,0142	0,0510	0,0933	0,0915
	4	0,0146	0,0527	0,0906	0,0977
	5	0,0109	0,0332	0,0907	0,0979
	\bar{x}	0,0126	0,0373	0,0835	0,0928

Kako se otpornost na abrazijsko trošenje, zbog različite gustoće uzoraka, treba iskazivati u gubitku abradiranog volumena, u tablici 6 prikazan je gubitak volumena na sva tri osnovna presjeka. Gubitak volumena iskazan je za udio vlage od 12 %, prema normi ISO 13061-2 [26].

Tablica 6. Gubitak volumena pri abrazijskom trošenju pri udjelu vlage od 12 %

Presjek	Uzorak	Gubitak volumena, mm ³			
		P800	P220	P120	P80
Poprečni	1	13,47	29,99	55,93	51,22
	2	10,89	19,06	56,66	54,38
	3	13,45	29,97	48,55	56,85
	4	13,94	17,60	45,30	43,26
	5	16,78	28,80	28,18	41,71
	\bar{x}	13,71	25,09	46,92	49,48
Radijalni	1	14,69	52,85	135,52	189,49
	2	27,79	98,03	139,93	225,15
	3	27,94	69,26	171,03	237,63
	4	26,01	87,25	164,64	233,37
	5	15,96	55,24	120,91	221,41
	\bar{x}	22,48	72,53	146,40	221,41
Tangencijalni	1	22,80	51,41	107,98	160,52
	2	20,56	41,02	159,33	170,11
	3	26,55	95,36	174,45	170,97
	4	27,28	98,50	169,38	182,59
	5	20,33	61,99	169,46	182,86
	\bar{x}	23,50	69,66	156,12	173,41

U tablici 7 prikazan je intenzitet abrazijskog trošenja, odnosno, gubitak volumena za sve uzorke sveden na abradiranu površinu. Na taj način se poništava utjecaj veličine abradirane površine pri iskazivanju abrazijske otpornosti materijala.

Tablica 7. Intenzitet abrazijskog trošenja pri udjelu vlage od 12 %

Presjek	Uzorak	Intenzitet abrazijskog trošenja $\Delta V/A$, mm ³ /mm ²			
		P800	P220	P120	P80
Poprečni	1	0,50	1,12	2,09	1,91
	2	0,41	0,72	2,15	2,06
	3	0,46	1,03	1,67	1,95
	4	0,48	0,61	1,57	1,50
	5	0,56	0,97	0,95	1,40
	\bar{x}	0,48	0,89	1,68	1,77
Radijalni	1	0,57	2,05	5,26	7,36
	2	1,06	3,73	5,33	8,57
	3	0,97	2,40	5,93	8,24
	4	0,93	3,11	5,88	8,33
	5	0,58	2,00	4,38	8,01
	\bar{x}	0,82	2,66	5,35	8,10
Tangencijalni	1	0,89	2,00	4,19	6,24
	2	0,78	1,56	6,07	6,48
	3	0,92	3,30	6,05	5,93
	4	0,97	3,52	6,04	6,52
	5	0,74	2,24	6,13	6,62
	\bar{x}	0,86	2,52	5,70	6,35

5.6. Ispitivanje tvrdoće Brinellovom metodom

Na uzorcima je provedeno ispitivanje tvrdoće sukladno normi HRN EN 1534:2010 [27]. Ispitivanje je provedeno na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava. Mjerenje tvrdoće uzoraka provedeno je Brinellovom metodom, a koristio se ispitni uređaj marke VEB WPM HP 250, prikazan na slici 31.

Tvrdoća je izmjerena na tri osnovna presjeka. Za svaki presjek mjerenje je ponovljeno deset puta. Za ispitivanje tvrdoće korištena je čelična kuglica promjera 5 mm, a sila pritiska iznosila je 490,5 N. Maksimalna sila se postiže unutar 15 ± 3 sekunde, dok je trajanje maksimalnog opterećenja bilo 30 sekundi. Kako bi se osigurala preciznost očitavanja promjera otiska, između čelične kuglice i površine uzorka stavljen je indigo papir koji nije imao utjecaja na rezultate. Tvrdoća po Brinellu računala se prema izrazu (5).

Slika 32 prikazuje ispitni uzorak na kojem se vide otisci mjerenja tvrdoće.

U tablici 8 prikazane su vrijednosti tvrdoće izmjerene na tri osnovna presjeka metodom po Brinellu. Za svaki presjek provedeno je 10 mjerenja. Najveće vrijednosti tvrdoće zabilježene su u poprečnom presjeku (6,06 HB). Tvrdoća u tangencijalnom presjeku bila je niža (4,07 HB), dok je najniža tvrdoća izmjerena u radijalnom presjeku (3,28 HB).



Slika 31. Tvrdomjer VEB WPM HP 250 [24]



Slika 32. Otisci kuglice pri mjerenju tvrdoće

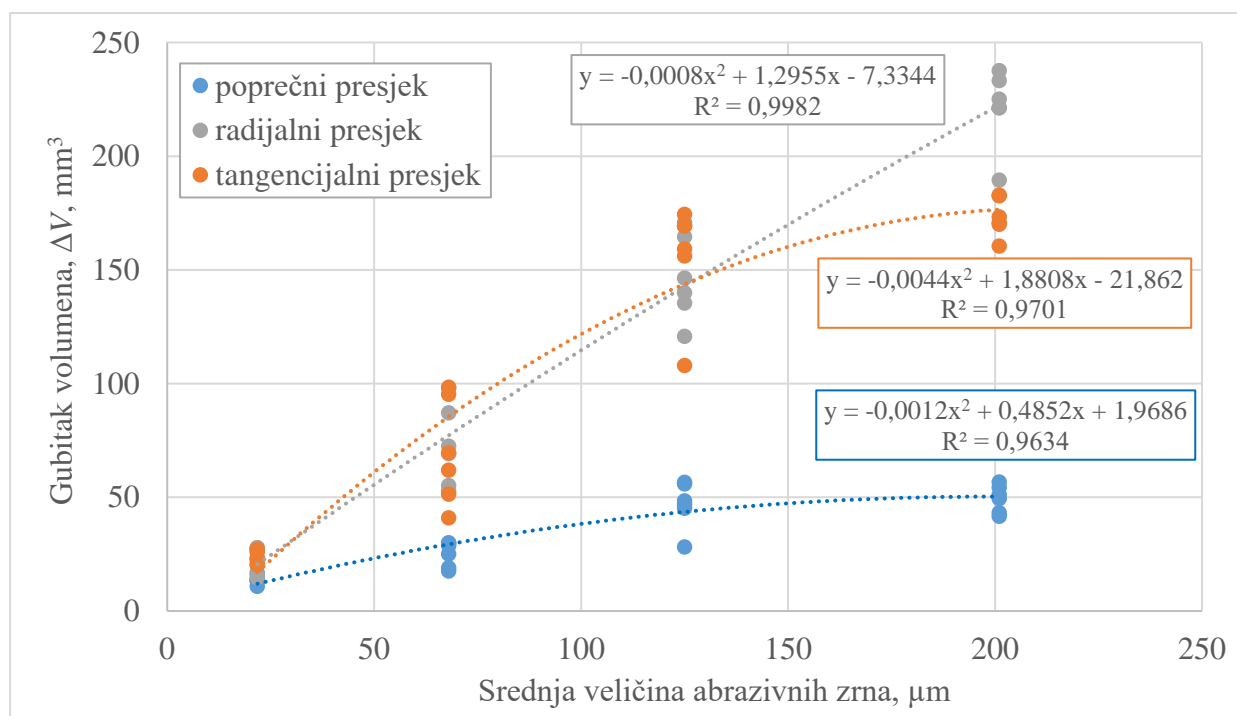
Tablica 8. Izmjerene vrijednosti tvrdoće HB

Mjerenje	Presjeci		
	poprečni	radijalni	tangencijalni
1	5,91	3,64	4,46
2	6,87	3,40	4,78
3	5,91	3,40	3,64
4	5,91	3,19	3,64
5	6,37	3,40	3,89
6	5,91	2,79	4,16
7	5,50	2,79	3,89
8	6,37	3,40	4,16
9	5,50	3,19	4,46
10	6,37	3,64	3,64
\bar{x}	6,06	3,28	4,07
Standardna devijacija	0,43	0,30	0,40
Koeficijent varijacije	7,08	9,23	9,81

5.7. Analiza rezultata

5.7.1. Utjecaj veličine abrazivnih čestica na abrazijsku otpornost ariša

Na dijagramu koji se nalazi na slici 33, prikazane su sve dobivene vrijednosti gubitka volumena pri abraziji za poprečni, radijalni i tangencijalni presjek drva ariša, u odnosu na kvalitetu brusnog papira, odnosno srednji promjer abrazivnih čestica.

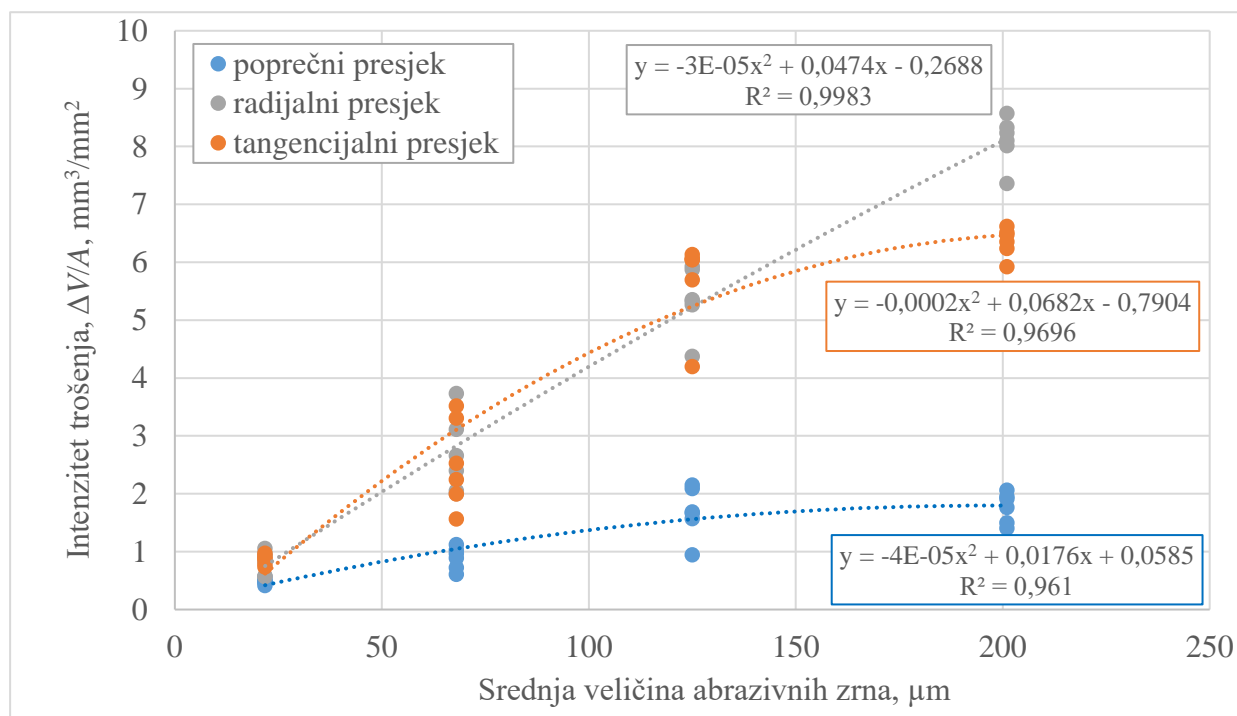


Slika 33. Ovisnost gubitka volumena o srednjoj veličini abrazivnih čestica

Najmanji gubitak volumena, za sve kvalitete brusnog papira, zabilježen je na poprečnom presjeku. Tangencijalni i radijalni presjeci pri ispitivanju dali su vrlo slične rezultate za sve kvalitete brusnog papira. Kod finijih brusnih papira na sva tri presjeka, odnos između gubitka volumena i veličine abrazivnih čestica gotovo je linearan. Međutim, kako se povećavaju abrazivne čestice, na poprečnom i tangencijalnom presjeku korelacija postupno postaje manje linearna, a prirast gubitka volumena opada. Ova pojava je poznata u literaturi kao kritična veličina abrazivnog zrna, koju je teško precizno odrediti. Kako se iz dijagrama može vidjeti kritična veličina abrazivnog zrna za ova dva presjeka kreće se oko vrijednosti od 125 μm . Na radijalnom presjeku ovaj fenomen nije uočen, kod njega je odnos između gubitka volumena i veličine abrazivnih čestica je gotovo linearan u cijelom ispitivanom području. Rezultati za sve

presjeke mogu se približno aproksimirati polinomom drugog stupnja, uz vrlo visok koeficijent determinacije ($> 0,96$).

Na slici 34 prikazana je promjena intenziteta abrazijskog trošenja za sva tri osnovna presjeka u ovisnosti o veličini abrazivnih čestica. Budući da su ispitni uzorci pažljivo izrezani i bili su vrlo sličnih dimenzija, ovisnost između intenziteta abrazijskog trošenja i veličine abrazivnih čestica pokazuje sličan trend kao i prethodni dijagram.

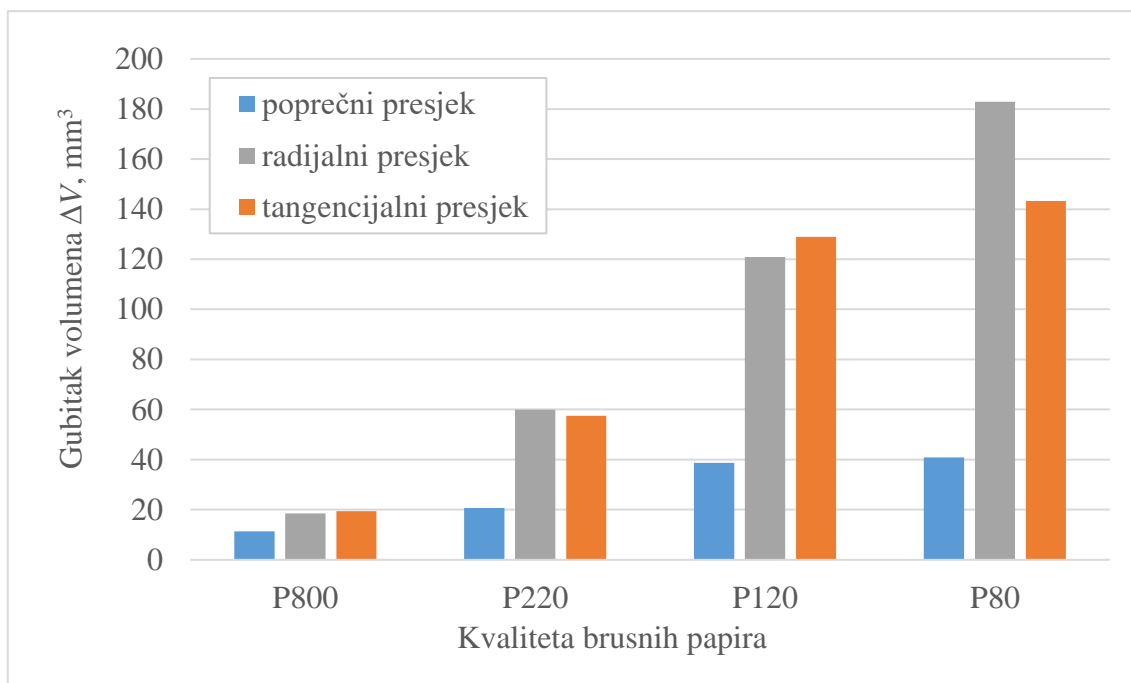


Slika 34. Ovisnost intenziteta abrazijskog trošenja o srednjoj veličini abrazivnih čestica

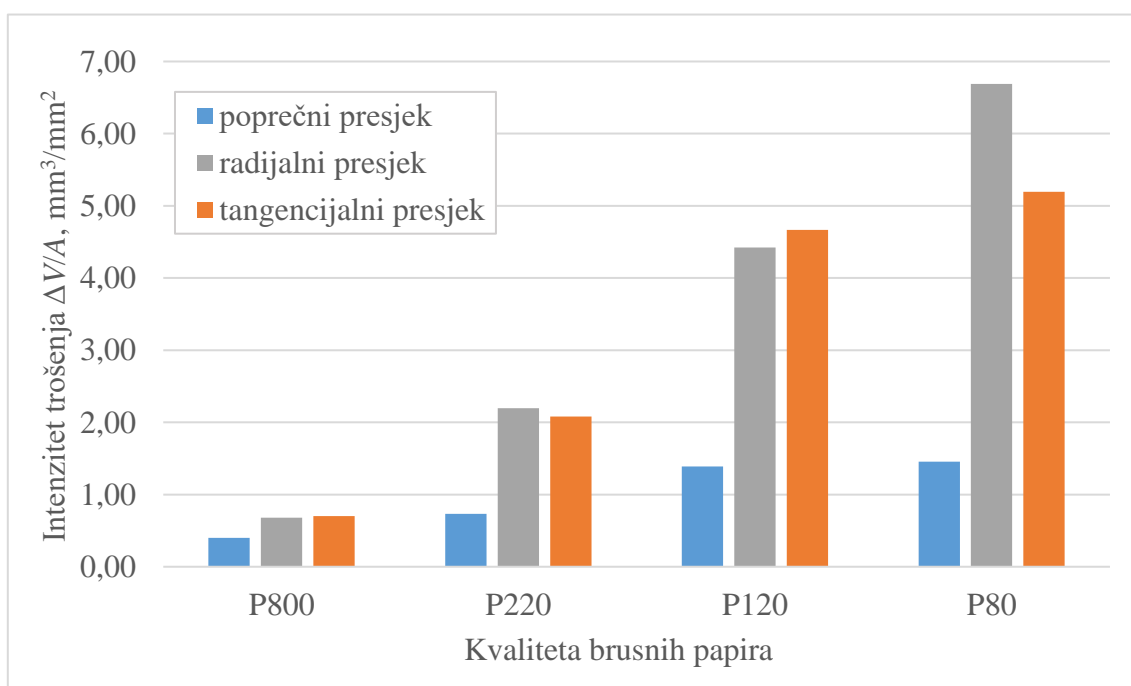
5.7.2. Utjecaj usmjerenosti strukture na abrazijsku otpornost ariša

Dijagram na slici 35 prikazuje rezultate gubitka volumena pri abraziji na tri osnovna presjeka za sve četiri korištene kvalitete brusnih papira. Analiza rezultata sugerira da je poprečni presjek ariša pokazao bolju otpornost na abraziju u usporedbi s radijalnim i tangencijalnim presjekom. Najmanji gubitak volumena zabilježen je na poprečnom presjeku za sve četiri kvalitete brusnih papira. Abrazijska otpornost na radijalnom presjeku vrlo je slična otpornosti tangencijalnog presjeka. Razlika između poprečnog te radijalnog i tangencijalnog presjeka značajno se povećava kako raste veličina abrazivnih čestica.

Na slici 36 prikazane su vrijednosti intenziteta abrazijskog trošenja na tri osnovna presjeka, za sve četiri korištene kvalitete brusnih papira. Međusobni odnosi između različitih presjeka vrlo su slični kao na prethodnom dijagramu.



Slika 35. Gubitak volumena pri abraziji za tri osnovna presjeka za različite kvalitete brusnih papira



Slika 36. Intenzitet abrazijskog trošenja za različite kvalitete brusnih papira

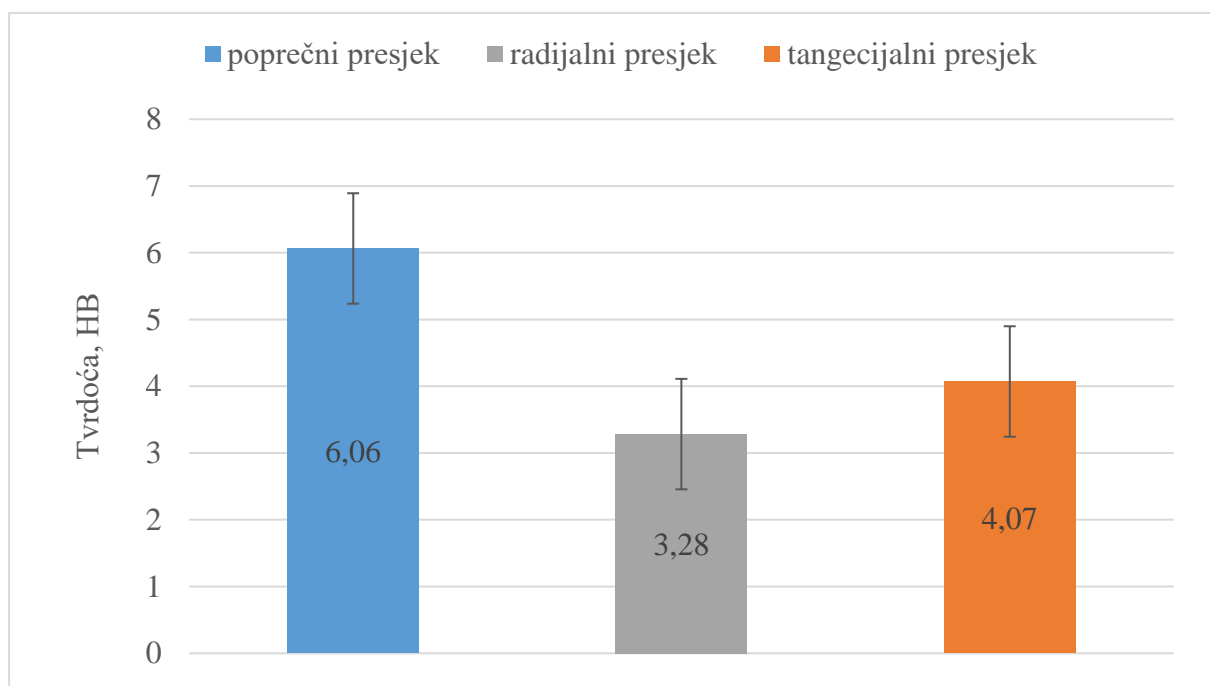
Tablica 9 prikazuje omjere srednjeg gubitka volumena pri abrazijskom trošenju drva ariša za tri osnovna presjeka pri svim korištenim kvalitetama abrazivnih papira. Omjer između radijalnog i tangencijalnog presjeka (R/T) kreće se oko 1 za sve kvalitete brusnog papira. Vrijednosti omjera P/R i P/T su podjednake i smanjuju se s povećanjem srednje veličine abrazivnih čestica.

Tablica 9. Omjeri gubitka volumena pri abrazijskom trošenju za tri osnovna presjeka

Omjeri presjeka	Srednja veličina abrazivnih čestica, μm			
	21,8 μm	68 μm	125 μm	201 μm
P/R	0,61	0,35	0,32	0,22
P/T	0,58	0,36	0,30	0,29
R/T	0,96	1,04	0,94	1,28

5.7.3. Utjecaj usmjerenosti strukture na tvrdoću ariša

Srednje vrijednosti tvrdoće na osnovnim presjecima drva ariša dosta se razlikuju. Najviše vrijednosti izmjerene su na poprečnom presjeku, gdje je srednja vrijednost iznosila 6,06 HB. Tvrdoće tangencijalnog i radijalnog presjeka bile su niže. Srednja vrijednost tvrdoće na tangencijalnom presjeku iznosila je 4,07 HB, a na radijalnom 3,28 HB. Na svim presjecima uočeno je relativno veliko rasipanje vrijednosti, što je uobičajeno kod svih drvnih vrsta. Ipak za sve presjeke koeficijent varijacije manji je od 17 % što je u skladu s propisima norme ISO 13061. Najveći koeficijent varijacije zabilježen je na tangencijalnom presjeku i iznosi 9,81 %. Slika 37 prikazuje srednje vrijednosti izmjerenih tvrdoća na tri osnovna presjeka.



Slika 37. Prosječne vrijednosti tvrdće na tri osnovna presjeka

6. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih ispitivanja i dobivenih rezultata mogu se donijeti sljedeći zaključci:

- Mikrostruktura ariša sastoji se uglavnom od aksijalno usmjerenih traheida koje u ranom dijelu goda imaju velike lumene i tanku staničnu stijenku, a u kasnom dijelu goda manje lumene i deblju staničnu stijenku. Radijalno usmjereni drveni traci su uski, širine jedne stanice, a neki od njih sadrže radijalne smolne kanale.
- Orijentacija strukture i veličina abrazivnih čestica značajno utječu na otpornost drva ariša na abrazijsko trošenje.
- Na poprečnom presjeku utvrđen je najmanji intenzitet abrazijskog trošenja, što upućuje na najveću otpornost pri trošenju. Radijalni i tangencijalni presjek pokazuju sličnu otpornost na abrazijsko trošenje.
- Porastom srednje veličine abrazivnih čestica raste intenzitet abrazijskog trošenja na svim osnovnim presjecima. Kod radijalnog presjeka intenzitet abrazijskog trošenja raste linearno, dok se na poprečnom i tangencijalnom presjeku uočava fenomen kritične veličine abrazivnog zrna pri vrijednosti od oko 125 μm . Nakon te vrijednosti usporava se intenzitet abrazijskog trošenja.
- Najviša vrijednost prosječne tvrdoće izmjerena je na poprečnom presjeku i iznosi 6,06 HB. Najniža vrijednost prosječne tvrdoće izmjerena je na radijalnom presjeku u iznosu od 3,28 HB, dok je vrijednost tvrdoće na tangencijalnom presjeku iznosila 4,07 HB.
- Rasipanje rezultata kod mjerenja tvrdoće je veliko, ali je koeficijent varijacije za sve presjeke manji od 17 %, što je u skladu s propisima norme ISO 13061. Najmanji koeficijent varijacije zabilježen je na poprečnom presjeku.

LITERATURA

- [1] Golovin YI, Gusev AA, Golovin DY, Matveev SM, Vasyukova IA. Multiscale Mechanical Performance of Wood: From Nano- to Macro-Scale across Structure Hierarchy and Size Effects. *Nanomaterials*. 2022;12(7):1139. <https://doi.org/10.3390/nano12071139>
- [2] Sandberg D, Kutnar A, Mantanis G. Wood modification technologies - A review. *IForest*. 2017;10(6):895–908. doi: 10.3832/ifor2380-010
- [3] Wiedenhoeft A. Structure and Function of Wood. Iz: Wood handbook: Wood as an engineering material. WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory; 2021., str. 3-2 – 3-17.
- [4] González OM, Velín A, García A, Arroyo CR, Barrigas HL, Vizquete K, Debut A. Representative Hardwood and Softwood Green Tissue-Microstructure Transitions per Age Group and Their Inherent Relationships with Physical–Mechanical Properties and Potential Applications. *Forests*. 2020; 11(5):569. <https://doi.org/10.3390/f11050569>
- [5] Chen C, Kuang Y, Zhu S et al. Structure–property–function relationships of natural and engineered wood. *Nat Rev Mater*. 2020;5(9):642–66. <https://doi.org/10.1038/s41578-020-0195-z>
- [6] Rede, V.: Građa drva – mikrostruktura, materijali s predavanja
- [7] Drvo, https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1401970934-0-drvo_14.pdf, pristup 23.9.2023.
- [8] Stems, Plant Organs, <https://slideplayer.com/amp/4207850/>, pristup 23.9.2023.
- [9] <http://www.teknogi.it/Joomla/index.php/6-il-legno-agenti-di-degrado-e-cure>, pristup 24.9.2023.
- [10] Rowell RM. Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites. 2005.
- [11] <https://steurh.home.xs4all.nl/engloof/elooft.html#grondweefsel>, pristup 25.9.2023.
- [12] Wood as material, <https://www.britannica.com/science/wood-plant-tissue/Wood-as-a-material>, pristup 25.9.2023.
- [13] 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.
- [14] Shmulsky R, Jones PD. Forest Products and Wood Science An Introduction: Sixth Edition. Forest Products and Wood Science An Introduction: Sixth Edition. 2011. doi: 10.1002/9780470960035

- [15] Wiedenhoeft A. Moisture Relations and Physical Properties of Wood. Iz: Wood handbook: Wood as an engineering material. WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory; 2021., str. 4-1 – 4-22.
- [16] Nauka o drvetu i njegova primjena u mašinstvu, <http://docslide.net/documents/drvo.html>, pristup 1.10.2023.
- [17] Gustoća drva, <https://korak.com.hr/korak-021-ozujak-2008-gustoca-drva/>, pristup 3.10.2023.
- [18] <https://www.gradjevinarstvo.rs/tekstovi/1012/820/ispitivanje-tvrdoce-drveta>, pristup 5.10.2023.
- [19] Rabinowicz E, Mutis A. Effect of abrasive particle size on wear. Wear. 1965;8(5):381–90. doi: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(65\)90169-9](https://doi.org/10.1016/0043-1648(65)90169-9)
- [20] A. Praciak, et al., The CABI encyclopedia of forest trees (CABI, Oxfordshire, UK, 2013)
- [21] Larix decidua, https://boris.unibe.ch/80793/1/Larix_decidua.pdf, pristup 10.10.2023.
- [22] V. Chalupa, Trees III, Y. P. S. Bajaj, ed.(Springer Berlin Heidelberg, 1991), vol.16 of Biotechnology in Agriculture and Forestry, pp. 446-470.
- [23] T. Geburek, Enzyklopädie der Holzgewächse: Handbuch und Atlas der Dendrologie, A. Roloff, H. Weisgerber, U. M. Lang, B. Stimm, P. Schütt, eds. (Wiley-Vch Verlag, Weinheim, 2002), vol. 3. A. Farjon, A handbook of the world's conifers (Brill, 2010).
- [24] <https://www.surplex.com/en/m/veb-hardness-tester-862675.html>, pristup 10.10.2023.
- [25] Rede, V.: Autorizirane vježbe iz kolegija „ Keramika, beton, drvo „ https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1401970934-0-drvo_14.pdf, pristup 10.10.2023.
- [26] Norma; ISO 13061, Physical and mechanical properties of wood -- Test methods for small clear wood specimens
- [27] Norma; HRN EN 1534:2010, Drveni podovi – Određivanje otpornosti na zasijecanje – Metode ispitivanja (EN 1534:2010)