

# Brzina prolaska ultrazvuka kroz drvo bijelog bora i obične bukve u različitim smjerovima

---

Jurišić, Mario

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Forestry and Wood Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet šumarstva i drvne tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:108:066218>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-27**



Repository / Repozitorij:

[University of Zagreb Faculty of Forestry and Wood Technology](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE**  
**DRVNOTEHNOLOŠKI ODSJEK**

**PREDDIPLOMSKI STUDIJ**  
**DRVNA TEHNOLOGIJA**

**MARIO JURIŠIĆ**

**BRZINA PROLASKA ULTRAZVUKA KROZ DRVO BIJELOG  
BORA I OBIČNE BUKVE U RAZLIČITIM SMJEROVIMA**

**ZAGREB, (rujan, 2022.)**

## PODACI O ZAVRŠNOM RADU

<b>AUTOR:</b>	Mario Jurišić 22.08.1999. 0068233930
<b>NASLOV:</b>	Brzina prolaska ultrazvuka kroz drvo bijelog bora i obične bukve u različitim smjerovima
<b>PREDMET:</b>	Zaštita drva I
<b>MENTOR:</b>	izv. prof. dr. sc. Marin Hasan
<b>IZRADU RADA JE POMAGAO:</b>	doc. dr. sc. Vinko Paulić
<b>RAD JE IZRAĐEN:</b>	Sveučilište u Zagrebu, Fakultet šumarstva i drvne tehnologije Zavod za znanost o drvu
<b>AKAD.GOD:</b>	2021./2022.
<b>DATUM OBRANE:</b>	09.09.2020.
<b>RAD SADRŽI:</b>	Stranica: 29+V Slika: 20 Tablica: 3 Navoda literature: 19
<b>SAŽETAK:</b>	<p>Ultrazvučna ispitivanja danas se vrlo često koriste u dijagnostičke svrhe određivanja zdravosti drva kao ne destruktivna metoda. No, provedeno je vrlo malo sustavnih ispitivanja utjecaja smjera kroz koji se ultrazvuk širi kroz drvo na njegovu brzinu. U radu će se mjeriti brzina širenja ultrazvuka u sva tri smjera (R/T/L) kroz uzorke drva različitih gustoća, kondicioniranih na različite sadržaje vode.</p> <p>Na temelju dobivenih rezultata ispitivanja, mogu se donijeti sljedeći zaključci:</p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. Povećanjem gustoće drva proporcionalno se povećava brzina kojom ultrazvučni val prođe kroz drvo.</li><li>2. Najveća brzina prolaska ultrazvuka kroz drvo je u longitudinalnom smjeru, manja je u radialnom, a najmanja je u tangentialnom smjeru.</li><li>3. Drvo bora u longitudinalnom smjeru ima veću brzinu prolaska ultrazvuka negoli drvo bukve.</li><li>4. Povećanjem sadržaja vode u drvu, povećava se brzina prolaska ultrazvuka.</li></ol>



# IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

OB FŠDT 05 07

Revizija: 2

Datum: 29.04.2021.

„Izjavljujem da je moj završni rad izvorni rezultat mojega rada te da se u izradi istoga nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni“.

U Zagrebu, 05. rujna 2022. godine

---

*vlastoručni potpis*

Mario Jurišić

## Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA .....	2
2.1. Destruktivne metode .....	2
2.2. Polu nedestruktivne metode.....	2
2.3. Nedestruktivne metode .....	2
2.3.1. Vizualno promatranje.....	3
2.3.2. Ispitivanje električnih svojstava.....	3
2.3.3. Infracrvena termografija.....	4
2.3.4. Gama zračenje .....	4
2.3.5. Rendgenska metoda .....	4
2.3.6. Zvučni (ultrazvučni) val - ispitivanja .....	5
2.4. Što je to ultrazvuk .....	6
2.4.1. Brzina širenja i čimbenici koji utječu na brzinu širenja ultrazvuka kroz drvo .....	6
2.5. Korištenje ultrazvučnih ispitivanja.....	7
2.5.1. Ultrazvučni val .....	7
2.5.2. Ultrazvučno ispitivanje tomografom .....	8
2.5.3. Način rada tomografa .....	8
3. CILJ RADA.....	10
4. MATERIJALI I METODE.....	11
4.1. Materijali .....	11
4.1.1. Obična bukva ( <i>Fagus sylvatica</i> , L.).....	11
4.1.2. Obični bor ( <i>Pinus sylvestris</i> , L.) .....	11
4.2. Metode označavanja i slaganja uzoraka.....	12
4.2.1. Izrada i označavanje uzoraka .....	12
4.2.2. Redoslijed slaganja uzoraka.....	13
4.3. Metode istraživanja .....	15
4.3.1. Sortiranje uzoraka za ispitivanje .....	15

4.3.2. Mjerenje brzine širenja zvuka kroz drvo tomografom .....	15
5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA .....	20
6. ZAKLJUČAK.....	27
7. LITERATURA.....	28

## Popis slika

Slika 1. Tomograf s pripadajućim kompletom senzora i priključnim kablovima .....	8
Slika 2. Shematski prikaz piljenja četvrtaka, elemenata i letvica za izradu uzoraka .....	13
Slika 3. Shematski prikaz finog piljenja uzoraka iz fino blanjanih četvrtaka .....	13
Slika 4. Prikaz vage .....	14
Slika 5. Prikaz pomičnog mjerila .....	14
Slika 6. Prikaz sortiranja uzoraka prema gustoćama .....	15
Slika 7. Sušionik s uzorcima .....	16
Slika 8. Prikaz dijelova tomografa .....	17
Slika 9. Program ARBOTOM s prikazom rezultata mjerenja na senzoru 1 i senzoru 2 .....	18
Slika 10. Smjerovi drva (Vergot, 2018) .....	19
Slika 11. Ispitivanje uzoraka .....	19
Slika 12. Gustoća drva bukve u apsolutno suhom i kondicioniranom stanju .....	20
Slika 13. Gustoća drva bora u apsolutno suhom i kondicioniranom stanju .....	21
Slika 14. Sadržaj vode bukovine i borovine nakon kondicioniranja .....	21
Slika 15. Brzina prolaska UZV kroz drvo bukve u apsolutno suhom stanju u sva tri smjera ..	22
Slika 16. Brzina prolaska UZV kroz drvo bukve u kondicioniranom stanju u sva tri smjera ...	23
Slika 17. Ovisnosti brzine prolaska UZV o gustoći drva bukve .....	23
Slika 18. Brzina prolaska UZV kroz drvo bora u apsolutno suhom stanju u sva tri smjera ....	24
Slika 19. Brzina prolaska UZV kroz drvo bora u kondicioniranom stanju u sva tri smjera .....	25
Slika 20. Ovisnost brzine prolaska UZV o gustoći drva bora .....	25

## Popis tablica

Tablica 1. Osnovna svojstva obične bukovine ( <i>Fagus sylvatica</i> , L.; Horvat i Krpan, 1987; Vergot, 2018) .....	11
Tablica 2. Osnovna svojstva drva običnoga bora ( <i>Pinus sylvestris</i> , L.; Horvat i Krpan, 1987) .....	12
Tablica 3. Gustoća drva bukve i bora u apsolutno suhom i u kondicioniranom stanju .....	20

# 1. UVOD

Od samoga početka čovječanstva, drvo nalazi brojne funkcije i visoku uporabljivost. Ispočetka drvo se koristio kao građevni materijal za gradnju nastamba, kasnije i kuća, ogradu za životinje, alate za obradu zemlje, oružje i brojne druge funkcije. Danas se drvo nastoji što više koristiti jer je prirodni materijal, ekološki je prihvatljiv i biološki je razgradiv. Rijetko koji dijelovi stabala se ne iskoriste. Određeni dijelovi stabala kao što su listovi i plodovi koristili su se i koriste se u prehrambene svrhe što je dodatno povećalo njegovu uporabljivost. Energija koja se dobije izgaranjem drva i drvnih proizvoda je jedan od glavnih izvora energije za dobar dio populacije u svijetu.

Ljudi nastoje povećavati generalno znanje o svemu, pa tako i o samome drvu kao materijalu. U svijetu se pojavio problem smanjenja zaliha drvene mase, što je dovelo do pojave ne destruktivnih metoda analize drva (Unger i sur., 2001). Jedna od tih ne destruktivnih metoda je i ultrazvuk.

Ultrazvučni valovi su zvučni valovi čija je frekvencija veća od gornje granice osjetljivosti ljudskog uha, tj. veća od približno 20.000 Hz. Valne duljine ultrazvučnih valova u zraku iznose do 0,5  $\mu\text{m}$ , a u tekućinama i čvrstim tijelima veće su oko 4 do 12 puta, zbog veće brzine širenja ultrazvuka (Hrvatska enciklopedija, 2021).

Kod ne destruktivnih vrsta ispitivanja, izvori ultrazvučnih valova su sonde odnosno senzori koje prislanjanjem na objekt ispitivanja prenose titranje u sredstvo s kojim su u dodiru. Unutar senzora nalazi se pretvarač koji titra stvarajući ultrazvučne valove zbog različitih vanjskih potencijala (Bubalo, 2017).

Ispitivanja svojstava materijala ultrazvukom se zasnivaju na principu širenja zvuka kroz homogene materijale i odbijanja na granici materijala različitih akustičkih svojstava, to jest od nehomogenosti u ispitivanom materijalu. Ovo svojstvo širenja odnosno refleksije ultrazvuka unutar ispitivanog drvnog materijala osnova je za ispitivanja svojstava drva ultrazvukom.



## **2. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA**

### **2.1. Destruktivne metode**

Destruktivne metode ispitivanja su metode ispitivanja kod kojih dolazi do djelomičnog ili potpunog uništenja uzoraka. Uzorak se pripremi prema zadanim normama te se na njemu testira željeno svojstvo. Kod uzoraka drva, najčešće dolazi do oštećenja površine i/ili cjelokupnog uzorka. Neki od destruktivnih načina su bušenje, struganje i glodanje uzoraka drva. Samim time smanjuje se sama vrijednost drva i generalno takve metode ispitivanja nisu baš poželjne metode ispitivanja ugrađenog drva u upotrebi. Prednost destruktivnih metoda je ta da se do rezultata dođe relativno brzo. Načini ispitivanja destruktivnom metodom su glodanje, bušenje i brušenje uzorka te struganje uzoraka.

### **2.2. Polu nedestruktivne metode**

Polu nedestruktivne metode su one metode kod kojih se uzorci što manje oštećuju prilikom testiranja željenog svojstva. Vrlo se često koriste vizualna zapažanja s drugim metodama kao što su:

- a) Udaranjem čekića za slušanje zvuka u uzorcima,
- b) Korištenje noža za struganje površine za određivanje dubine degradacije uzoraka,
- c) Elektro ispitivanja koja su temeljena na električnom otporu drva, te pomoću sadržaja vode mogu se dobiti informacije o stanju drva.
- d) Uklanjanje inkrementalnih jezgara radi ispitivanja unutarnje razgradnje uzoraka.
- e) Upotreba bušenja s rezistografom za utvrđivanje lokacije degradiranih presjeka uzoraka.

Iako polu nedestruktivne metode mogu pomoći u dobivanju informacija iz vizualnog pregleda, one ne daju bolji uvid samoga stanja materijala.

### **2.3. Nedestruktivne metode**

Nedestruktivne metode su metode ispitivanja kojima se ne uništava i ne narušava konstrukcijska i estetska svojstva drva. Ovakva ispitivanja pojednostavljuju izbor i daju kvalitetne rezultate ispitivanja uzoraka drva je se nedestruktivnim metodama može steći bolji uvid u stvarno stanje uzoraka drva.

Neke od nedestruktivnih metoda ispitivanja koriste se za ispitivanje površine ili unutrašnjosti ugrađenog drva. To su metode koje nam pružaju mogućnost kvalitetnog i jednostavnijeg izbora održavanja ugrađenog drva jer se ovim nedestruktivnim metodama može vidjeti u kakvom je stanju drvo da se ne dira njegov konstrukcijski i estetski izgled.

Neke od nedestruktivnih metoda su: vizualno promatranje, ispitivanje električnih svojstva, infracrvena termografija, gama zračenje, rendgenske metode, ultrazvučna ispitivanja.

### 2.3.1. Vizualno promatranje

Vizualno promatranje je jedna od najjednostavnijih i najstarijih metoda nedestruktivnih ispitivanja. Brojna ispitivanja se većinom provode na vizualnom zapažanju eventualnih grešaka i promjena na ispitanom uzorku, te je interpretacija subjektivna i može varirati. U mnogim je situacijama potrebna vizualno promatranje, te se na temelju istih donose odluke o kritičnosti stanja uzoraka, a samim time i proizvoda.

Neka od bitnih vizualnih zapažanja koja služe u svrhu donošenja odluke uključuju:

- Slomljene komade uzoraka
- Mehanička oštećenja uzoraka
- Povećanje biološke i / ili abiološke razgradnje
- Povećana šteta od insekata
- Promjena početnoga oblika i položaja elemenata ugrađenog drva u upotrebi (dio namještaja, elementi konstrukcije i sl.).

Temeljem vizualnoga promatranja donose se odluke kojima se ispitani uzorci drva odobravaju ili odbijaju, što znači da proizvod od drva može ostati u uporabi ili se mora djelomično ili u potpunosti zamijeniti novim. U određenim situacijama, gdje je uklanjanje drvenoga proizvoda ili njegova dijela izrazito teško, može se sanirati samo taj oštećeni dio ili isti pojačati.

### 2.3.2. Ispitivanje električnih svojstava

Ispitivanje električnih svojstava bazira se na temelju inverznog piezoelektričnog efekta, tj. djelovanjem električnog polja na piezoelektrične kristale pri čemu dolazi do njihove deformacije. Inverzni piezoelektrični efekt omogućuje stvaranje vibracije kristala u ultrazvučnom i zvučnom području, a pomoću direktnog piezoelektričnog efekta može se

determinirati ultrazvuk. Koriste se kao NDE parametri poput odnosa sadržaja vode i električne otpornosti drva. Električni otpor koristi se i za otkrivanje propadanja in-situ ispitivanjima.

### 2.3.3. Infracrvena termografija

Infracrvena termografija je nedestruktivna metoda koja omogućava snimanje temperature na površini uzoraka i to beskontaktno te se tako otkrivaju detalji koji se nalaze ispod površine uzorka i njegovo temperaturno ponašanje. Samim time, metoda je jako popularna u građevinarstvu, posebno u fazama dijagnostike građevine, preventivno-sanacijskog održavanja ili pri provjerama stanja i situacije na građevini. Na postojećim građevinama i njenim konstrukcijskim dijelovima ona omogućuje lakše istraživanje detalja konstrukcije, koju su u većini slučajeva skriveni i teško dostupni, otkrivanje oštećenja i propadanja materijala uslijed djelovanja vlage, temperature, te pojavu pukotina. Prisutnost nevidljivih oštećenja i unutarnjih deformacija, modificira brzinu toplinskog širenja. Iako vizualni pregled površine drvene konstrukcije ostaje najbolji postupak za određivanje i otkrivanje oštećenja, infracrvena termografija ima mogućnost daljinskog otkrivanja područja s visokim rizikom od eventualnih budućih oštećenja ili za određivanje već oštećenih područja. Generalno govoreći, iako je osjetljivost infracrvene termografije lošija, samim time je i tehnika lošija od tradicionalnih tehnika, infracrvena termografija omogućuje lokaliziranje područja s različitim sadržajem vlage na brz i apsolutno nedestruktivan način (Stepinac i sur., 2017).

### 2.3.4. Gama zračenje

Gama zračenje su elektromagnetski valovi koji imaju visoku frekvenciju i energiju, a ispitivanje se koristi za pronalaženje i određivanje mjesta propadanja. Također se može koristiti i kao element za raspodjelu konzervansa u drvu. Najveće ograničenje ove metode je uporaba štetnog i izrazito radioaktivnih materijala ( $\gamma$ -zrake), te njihovo kasnije zbrinjavanje te što se koristi isključivo u posebno opremljenim i ovlaštenim laboratorijima.

### 2.3.5. Rendgenska metoda

Koristi se u laboratorijima ili na nekim proizvodnim linijama radi izrazito velike količine izvora X-zraka i mjerne opreme. Najveća mana ovoga ispitivanja je ta da se ispitivanje vrši u 3D obliku, a dobiveni se rezultati interpretiraju u 2D obliku, te upravo iz toga razloga najčešće dolazi do lošeg iščitavanja rezultata zbog velike količine dobivenih podataka. Osim problema kod iščitavanja podataka, sama oprema je velika i izrazito skupa, pa zato nije baš najbolje rješenje za mnoga ispitivanja.

### 2.3.6. Zvučni (ultrazvučni) val - ispitivanja

Ultrazvuk je longitudinalni mehanički val čija je frekvencija veća od gornje granice osjetljivosti čovječjeg uha, tj. veća od približno 20 000 Hz. Ultrazvučno testiranje materijala najvažnija je tehnička primjena ultrazvuka. Radi se za detekciju mikropukotina u krutim objektima (npr. stijenke velikih spremnika pod tlakom, glomazni rotirajući elementi), za provjeru kvalitete (prije ugradnje objekta), ili ustanovljenje stanja (dotrajalosti). Testiranje se temelji na mjerenju vremena prolaska ultrazvučnog signala kroz uzorak: ako je npr. obloga spremnika homogena, signal će se reflektirati tek na unutrašnjoj granici stijenke, a ako postoji nehomogenost, refleksija će se pojaviti ranije (Hrvatska enciklopedija, 2021).

Ultrazvučna ispitivanja jedna su od popularnijih nedestruktivnih metoda koja se koristi za drvo i drvene kompozite. Frekvencije koje se koriste prilikom ispitivanja su između 20 kHz i 10 GHz. Valovi pobuđivanja nastaju ili putem udara ili prisilne vibracije. Zbog teškoće spajanja prisilnog generatora vibracija na materijal koji se ispituje, većina istražitelja favorizira metodu udaranja (Thomson, 1981).

Kod nerazornih vrsta ispitivanja, izvori ultrazvučnih valova su sonde odnosno senzori koje prislanjanjem na objekt ispitivanja ili uranjanjem u tekućinu prenose titranje u sredstvo s kojim su u dodiru. Unutar senzora nalazi se pretvarač koji titra stvarajući ultrazvučne valove zbog različitih vanjskih potencijala (Bubalo, 2017)

Uzorak može vibrirati i bez fizičkog dodira sa izvorom zvuka, te kod ove metode prijenosa zvuka dolazi do velikog gubitka energije, zato je dosadašnja beskontaktna tehnika dobila određenu i ograničenu primjenu. Metoda zvučnog vala obično se upotrebljava na dva različita načina koristeći brzinu zvuka ili vibracije. Brzina mjerenja zvuka koja se često koristi za izražavanje dinamičkog modula elastičnosti vrlo je popularna kod proizvođača od drva. Razlog njegove popularnosti je jednostavnost u instrumentaciji i računanju. Brzina zvuka se pretvara u modul elastičnosti. No, unatoč svojoj jednostavnosti, korištenje modula elastičnosti kao nedestruktivna metoda ispitivanja željenih svojstava, ima nekoliko nedostataka:

- mjeri se samo najbrži zvučni val;
- najbrži zvučni val putuje u dijelu najkvalitetnijeg drva i zaobilazi slabija područja kao što su juvenilno drvo, kvrge, slojevi male gustoće i sl;
- ne postoji teorijski odnos između pojedinih mehaničkih svojstava i modula elastičnosti;
- računanje modula elastičnosti zahtijeva poznavanje gustoće i mase uzoraka, koje se ne mogu odrediti bez uništavanja uzoraka.

S druge strane, uz pomoć spektra valnog napona iz kojeg su odabrani parametri dobivaju nedestruktivnim metodama, mogu se prevladati mnogi nedostaci koji predstavljaju brzinu zvuka (Bodig, 1995), uključujući:

- spektar naponskih valova pruža sveobuhvatni prikaz materijalnih uvjeta i njegovih karakteristika
- veliki broj neovisnih varijabli kao što su maksimalna energija, dominantna frekvencija, pomicanje frekvencije, prigušenje i sl.
- višestruki parametri nedestruktivne metode mogu se bolje povezati s destruktivnim svojstvom
- moguće je određivanje varijabli koje su manje osjetljive na nekontrolirane uvjete okoliša kao što su temperatura i vlaga.

## **2.4. Što je to ultrazvuk**

Ultrazvuk je longitudinalni mehanički val čija je frekvencija veća od gornje granice osjetljivosti čovječjeg uha, tj. veća od približno 20 000 Hz. Ultrazvučno testiranje materijala najvažnija je tehnička primjena ultrazvuka. Radi se za detekciju mikropukotina u krutim objektima (npr. stijenke velikih spremnika pod tlakom, glomazni rotirajući elementi), za provjeru kvalitete (prije ugradnje objekta), ili ustanovljenje stanja (dotrajalosti). Testiranje se osniva na mjerenju vremena prolaska ultrazvučnog signala kroz uzorak: ako je npr. obloga spremnika homogena, signal će se reflektirati tek na unutrašnjoj granici stijenke, a ako postoji nehomogenost, refleksija će se pojaviti ranije (Hrvatska enciklopedija, 2021).

### **2.4.1. Brzina širenja i čimbenici koji utječu na brzinu širenja ultrazvuka kroz drvo**

Brzina ultrazvuka u drvu smanjuje se povećanjem temperature uzoraka ili sadržaja vode, proporcionalno utječu na modul elastičnosti i gustoću. Također, smanjuje se porastom frekvencije i amplitude vibracija (Stepinac i sur., 2017). Brzina širenja zvuka u zraku pri standardnom atmosferskom tlaku (1013,25 hPa) i temperaturi od 0 °C je u prosjeku oko 332 m/s, a pri standardnom tlaku (1013,25 hPa) i sobnoj temperaturi (20°C) je otprilike oko 341 m/s, dok brzina širenja zvuka u drvu je 10 do 15 puta veća od brzine širenja zvuka u zraku (Wegst, 2006). Odrasla, zdrava osoba može čuti zvuk frekvencijskog raspona od 16 do 20 000 Hz (Herz-titraja u sekundi). Vrlo bitna funkcija i utjecaj brzine zvuke je kao akustika, tj.

akustična svojstva za izradu i korištenje glazbenih instrumenata, zato što se prijenos zvučnih valova s glazbala do ljudskoga uha prenosi zrakom (Wegst, 2006).

Na brzinu širenja zvučnog vala utječu brojni čimbenici kao što su nepravilnosti u strukturi i greške drva kao što su: kvrge, usukanost drva, broj i veličina godova i itd., ali je brzina širenja zvuka u direktnoj povezanosti s modulom elastičnosti (Wegst, 2006). Najveći iznos izmjerene energije je, zapravo vrijednost izmjerenog akustičnog odgovora drva, tj. dobivena vrijednost predstavlja vrijeme koje je potrebno ultrazvučnom valu da pređe s jednoga senzora na drugi. Ispitivanja ultrazvukom mogu se mjeriti u sva tri smjera vlakanaca drva- radijalnom, tangentnom i longitudinalnom. Nakon izmjerene brzine propagacije longitudinalnog vala vrlo je lako izračunati modul elastičnosti drva ako je poznata njegova gustoća. Stoga, gustoća drva je važna varijabla koja mora biti poznata, ako se koriste ultrazvučna ispitivanja za određivanje dinamičkog modula elastičnosti (Stepinac i sur., 2017; Wegst, 2006).

## **2.5. Korištenje ultrazvučnih ispitivanja**

### **2.5.1. Ultrazvučni val**

Ultrazvučna ispitivanja su vrlo popularna kod homogenih i neporoznih materijala, kao što je drvo, kako bi se otkrile eventualne greške i nedostaci ispitanog uzorka (Mal i sur., 1991). lako se ova metoda koristi i na drvu i na drvnim kompozitima, manje je učinkovita zbog porozne i diskontinuirane prirode drva kao materijala (Beall, 1987, 2007). Ispitivanja ultrazvukom su jedna od najučinkovitijih ispitivanja kojima se može odrediti kontrola proizvoda, te neke njegove greške koje se mogu javiti prije ili za vrijeme obrade kao što su pojava pukotina na drvenim gredama, nosačima zidova, parketa, i to upravo zato što se ultrazvučni valovi koncentriraju na jednu malu površinu, tj. područje. Ultrazvuk se može koristiti kao:

- Pulse-eho sustav
- Sustav prolaznih valnih napona

Sustav puls-eho se temelji na mjerenju odjeka koji je stvoren unutarnjim površinama, kao što su pukotine. Tehnika pulsa često se koristi kako bi se otkrile na kojoj se dubini nalaze moguće pukotine. Ultrazvučni val šalje signal duž cijele debljine materijala, a same se karakteristike vala bilježe na izlaznoj strani ploče.

## 2.5.2. Ultrazvučno ispitivanje tomografom

Ultrazvučno ispitivanje tomografom (sl. 1) je ispitivanje koje se bazira na mjerenju vremena koje je potrebno ultrazvučnom valu da prođe kroz ispitani uzorak od sonde s koje se ultrazvučni val emitira do sonde koja val registrira. Pomoću programa ARBOTOM mjeri se vrijeme koje je potrebno impulsu da penetrira s jedne sonde k drugoj.



Slika 1. Tomograf s pripadajućim kompletom senzora i priključnim kablovima

## 2.5.3. Način rada tomografa

Arborikulturni instrument koji mjeri brzinu prolaska zvuka kroz stablo i na osnovu mjerenja daje prikaz mehanički oslabljenih područja. Služi za dijagnostiku sigurnosti od loma. (rječnik.com).

Tomograf pretežito se koristi kako bi se dobila što preciznija procjena statika stabla sa ciljem pronalaska i otkrivanja truleži ili šupljina unutar samoga stabla.

Brzina ultrazvuka u krutom mediju ovisi o vrsti zvučnog vala te o elastičnosti i gustoći materijala. Formula za određivanje brzine ultrazvuka u drvu je (1):

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

$v$  – brzina ultrazvučnog vala (m/s)

$E$  – modul elastičnosti (N/mm<sup>2</sup>)

$\rho$  – gustoća materijala (g/cm<sup>3</sup>)



### 3. CILJ RADA

Ciljevi ovog rada su:

1. ispitati utjecaj vrste drva na brzinu širenja ultrazvučnoga vala kroz drvo,
2. ispitati postoji li razlika u brzini širenja ultrazvučnoga vala kroz drvo u njegovim različitim smjerovima (radijalni, tangentialni i longitudinalni smjer),
3. ispitati utjecaj sadržaja vode drva na brzinu širenja ultrazvuka kroz drvo
4. ispitati utjecaj gustoće drva na brzinu širenja ultrazvuka kroz drvo

Na temelju istraživanja u laboratoriju, dobiveni rezultati će biti doprinos stvaranju bolje baze podataka pomoću koje će se utvrđivati kvaliteta i gustoća određenih vrsta drva koje su i koje će biti u upotrebi.

## 4. MATERIJALI I METODE

### 4.1. Materijali

Za ispitivanje brzine ultrazvuka u drvu odabrane su sljedeće vrste drva: obična bukva (*Fagus sylvatica* L.) i obični (bijeli) bor (*Pinus sylvastris* L.).

#### 4.1.1. Obična bukva (*Fagus sylvatica*, L.)

Obična bukva je anizotropan, nehomogen, porozan i izrazito higroskopian materijal koji se sastoji od celuloze, hemiceluloze, lignina, drvnih polioza i drugim materijala. .

Obična bukva je izrazito dobar vodič zvuka, a njegova zvučna svojstva čine ga jednim od najbitnijih materijala koji se koriste za izradu glazbala. Ploče koje su izrađene od drva, najčešće, drugačije provode zvuk, a neke se čak mogu koristiti i kao zvučna izolacija na građevinskim objektima. Neka od osnovnih svojstava drva obične bukve prikazana su u tablici 1.

Tablica 1. Osnovna svojstva obične bukovine (*Fagus sylvatica*,L.; Horvat i Krpan, 1987; Vergot, 2018)

Svojstvo	Minimalna vrijednost	Srednja vrijednost	Maksimalna vrijednost
Gustoća, $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	0,54	0,72	0,91
Utezanje, $\alpha$ [%]			
- radijalno		5,8	
- tangencijalno	8,3	10,05	11,8
- longitudinalno	0,2	0,27	0,34
- volumno	14	17,5	21
Tvrdoća [MPa]	54	78	110
Čvrstoća na tlak [MPa]	350	530	840
Udarna radnja loma [kJ/m <sup>2</sup> ]	30	100	190

#### 4.1.2. Obični bor (*Pinus sylvestris*, L.)

Drvo običnog bora je anizotropan, nehomogen, porozan i higroskopian materija, sa širokom uporabnom vrijednošću, a jedna od čestih uporabnosti je za proizvodnju vrata i prozora, nosači krovova i krovnih konstrukcija, te izradu furnira i furnirskih ploča. Jako je dobar

materijal za ispitivanje različitih svojstava, zbog njegovih dobrih karakteristika i široke mu primjene. Osnovna svojstva običnoga bora prikazana su u tablici 2.

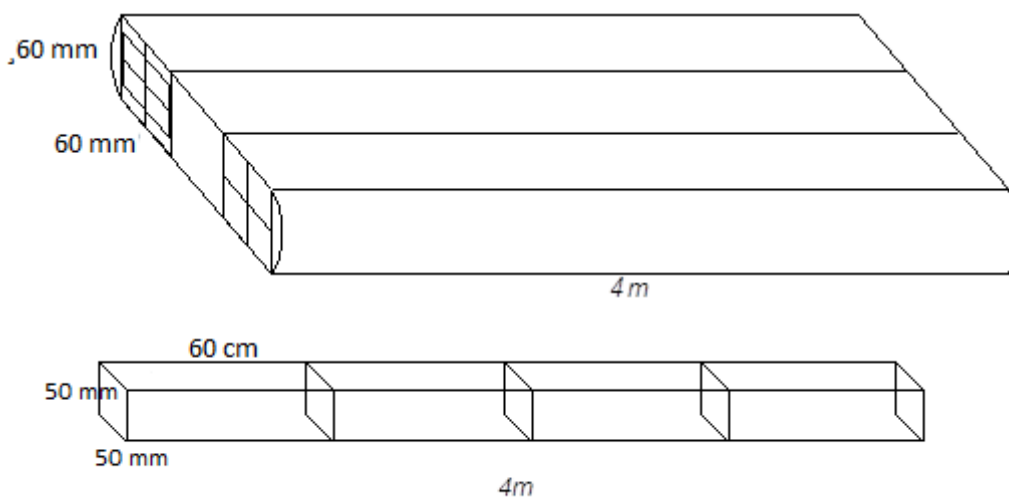
Tablica 2. Osnovna svojstva drva običnoga bora (*Pinus sylvestris*, L.; Horvat i Krpan, 1987)

Svojstvo	Minimalna vrijednost	Srednja vrijednost	Maksimalna vrijednost
Gustoća, $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	0,30	0,49	0,86
Utezanje, $\alpha$ [%]			
- radijalno		4,0	
- tangencijalno		7,7	
- longitudinalno		0,4	
- volumno		12,4	
Tvrdoća [MPa]		30	
Čvrstoća na tlak [MPa]		47	
Udarna radnja loma [kJ/m <sup>2</sup> ]		70	

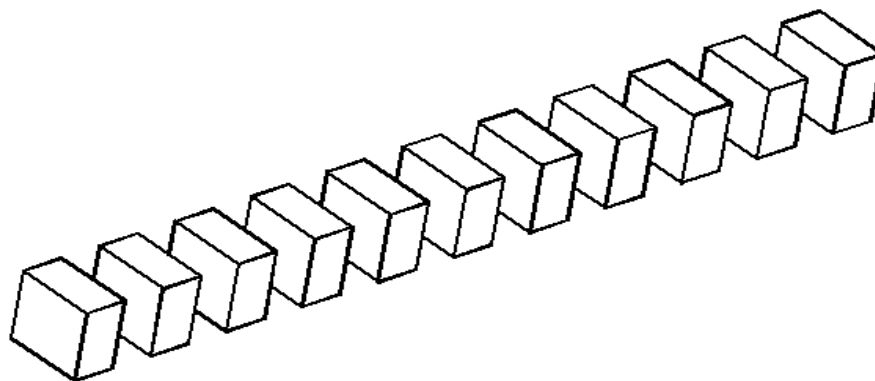
## 4.2. Metode označavanja i slaganja uzoraka

### 4.2.1. Izrada i označavanje uzoraka

Iz prirodno osušenih piljenica ispiljene su letve debljine 60 mm, širine 60 mm i dužine 4 m. Iz svake letve ispiljeni su, a potom fino blanjeni elementi debljine 55 mm, širine 55 mm i dužine 600 mm (sl. 2). Nakon kondicioniranja elemenata, fino su izblanjeni na konačnu dimenziju poprečnog presjeka, a potom su uzorci ispiljeni na kružnoj pili jedan za drugim na točnu dimenziju (R×T×L) 50×50×50 mm ±0,2 mm (borovina), odnosno na dimenzije (RxTxL) 45x45x45 mm ±0,2 mm (bukovina), selektirani, grupirani i označeni (sl. 3). Svaki konačni uzorak određen za mjerenje brzine prolaska ultrazvuka ima izbušene rupice promjera 3 mm i dubine 5 mm na sredini svih 6 ploha (lica) koje služe za uvijanje vijaka na koje su se pričvršćivale mjerne sonde.



Slika 2. Shematski prikaz piljenja četvrtaka, elemenata i letvica za izradu uzoraka

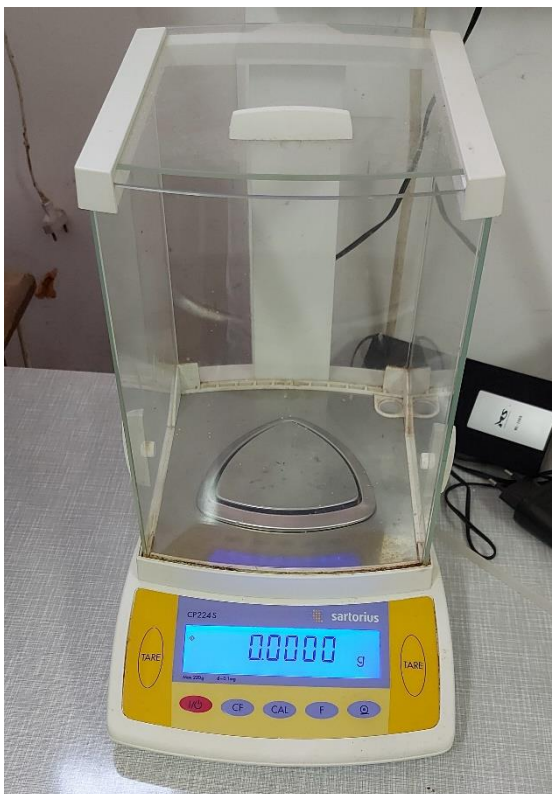


Slika 3. Shematski prikaz finog piljenja uzoraka iz fino blanjanih četvrtaka

#### 4.2.2. Redoslijed slaganja uzoraka

Svi uzorci obje vrste drva (obična bukva i obični bijeli bor) su označeni brojevima te su selektirani na način da su odbačeni svi oni uzorci koji su imali vidljive greške kao i oni kojima linije godova nisu bile paralelne s bridom uzorka. Svi odbačeni uzorci nisu korišteni u ovome istraživanju. Nakon selekcije i obilježavanja uzoraka, uzorci su bili kondicionirani u laboratorijskim uvjetima dodatnih 10 dana.

Svim odabranim kondicioniranim uzorcima izmjerena je masa na laboratorijskoj digitalnoj vagi (sl. 4) s točnošću mjerenja  $\pm 0,1$  mg, a potom su im izmjerene dimenzije (širine, visine i debljine) digitalnim pomičnim mjerilom (sl. 5).



Slika 4. Prikaz vage



Slika 5. Prikaz pomičnog mjerila



sadržaja vode borovine), a nakon izvršenog mjerenja uzorci su sušeni u sušioniku na  $103 \pm 0,1$  °C do konstantne mase (apsolutno suhog stanja; sl. 7). Nakon što je višestrukim sondiranjem utvrđena konstantna masa, uzorci su ohlađeni u eksikatoru iznad silika gela, a nakon toga su ponovo vagani i izmjerene su im sve dimenzije.

Ravnotežni sadržaj vode u drvu nakon sušenja izračunavao se prema sljedećem izrazu (2):

$$u_r = \frac{m_1 - m_0}{m_1} * 100[\%] \quad (2)$$

pri čemu je:

$u_r$  – ravnotežni sadržaj vode u uzorcima nakon sušenja,

$m_1$  – masa uzorka nakon sušenja,

$m_0$  – masa kondicioniranih uzoraka prije sušenja.



Slika 7. Sušionik s uzorcima

#### 4.3.2.1. Princip rada ultrazvučnog tomografa

Tomograf je arborikulturni instrument koji mjeri brzinu prolaska ultrazvuka kroz stablo i na osnovu mjerenja daje prikaz mehanički oslabljenih područja. Služi za dijagnostiku sigurnosti od loma (rječnik.com).

Brzina zvuka u krutom mediju ovisi o vrsti zvučnog vala te o elastičnosti i gustoći materijala, a formula glasi (3):

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3)$$

$v$  – brzina ultrazvučnog vala (m/s)

$E$  – modul elastičnosti (N/mm<sup>2</sup>)

$\rho$  – gustoća materijala (g/cm<sup>3</sup>)

#### 4.3.2.2. Dijelovi ultrazvučnog tomografa

Komplet zvučnog tomografa čini:

- Baterije
- Komplet senzorskih jedinica
- Punjač tomografa
- Kabela za povezivanje senzorskih jedinica
- Glavnog kabela (za baterijsku jedinicu i 1. senzor)
- Kabelska veza za računalo i baterijsku jedinicu (postoji mogućnost bežične veze)
- Dodataka kao što su čavlići za senzore, čekić, kliješta i sl.



Slika 8 Prikaz dijelova tomografa

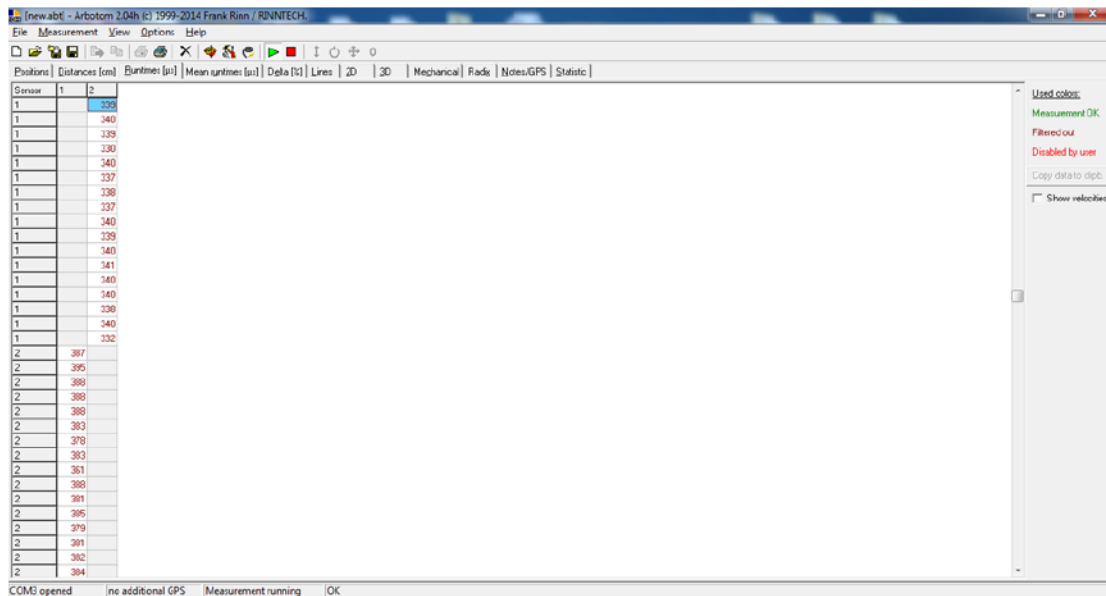


### 4.3.2.3. Program ARBOTOM

ARBOTOM je računalni program koji registrira i bilježi podatke koji se tvore prilikom testiranja uzoraka (sl. 9). Podaci se prikazuju u obliku matrice, linije ili površinskog grafa. Program je stvoren s ciljem da sprema sva mjerenja te ih je moguće ispisati na pisaču (RINNTECH, 2022).

Vrste podataka koje se bilježe su:

- poziciju senzorskih jedinica
- udaljenosti između senzora
- vrijeme putovanja zvučnog impulsa
- brzine zvučnog impulsa
- postotne greške pri izmjeri

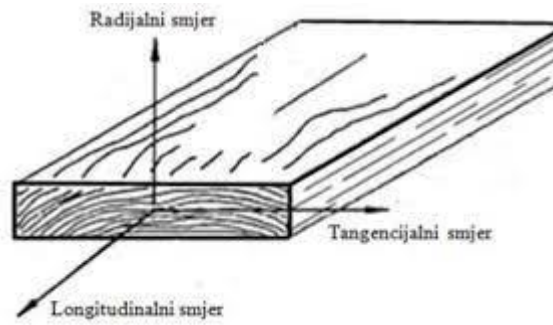


The screenshot shows the ARBOTOM software interface. The main window displays a table with two columns labeled '1' and '2' under the heading 'Senzor'. The table contains numerical data for each sensor across multiple rows. The status bar at the bottom indicates 'COM3 opened', 'no additional GPS', 'Measurement running', and 'OK'. A sidebar on the right shows 'Used colors' with options for 'Measurement OK' (green), 'Filtered out' (red), and 'Disabled by user' (red), along with a 'Copy data to clipboard' button and a 'Show velocities' checkbox.

Senzor	1	2
1		335
1		340
1		339
1		330
1		340
1		337
1		338
1		337
1		340
1		339
1		340
1		341
1		340
1		340
1		336
1		340
1		332
2		387
2		365
2		388
2		388
2		388
2		383
2		378
2		383
2		351
2		389
2		391
2		395
2		379
2		391
2		382
2		384

Slika 9. Program ARBOTOM s prikazom rezultata mjerenja na senzoru 1 i senzoru 2

Svaki je uzorak pojedinačno postavljen u postolje (škrip) te su u izbušene rupice na dijametralno suprotnim stranama uvijeni vijci kontroliranim okretnim momentom pomoću aku bušilice s reduktorom okretnog momenta. Na vijke su postavljene osjetilne sonde te se zvučnim tomografom mjeri vrijeme potrebno za prolaz ultrazvuka kroz uzorak od 1. do 2. sonde i obrnuto kako bi se dobili što točniji i pravilniji podaci (sl. 11.). Podražaj sonde vršen je udaranjem svake sonde 50 × drvenim utegom. Na svakom je uzorku mjereno vrijeme prolaska ultrazvuka kroz uzorak u sva tri smjera. Mjerenje je izvršeno na svim uzorcima u kondicioniranom stanju i u apsolutno suhom stanju.



Slika 10. Smjerovi drva (Vergot, 2018)



Slika 11. Ispitivanje uzoraka

#### 4.3.2.4. Izračun brzine prolaska UZV kroz ispitne uzorke

Dobivene rezultate mjerenja vremena prolaska UZV u sva tri smjera prema se zasebno za svaki uzorak u posebnu datoteku, a datoteke se grupiraju po gustoći i po sadržaju vode u poddirektorije. Dobiveni mjerni rezultati su u biti vrijeme ( $\mu\text{s}$ ) potrebno da UZV prođe od sonde 1 do sonde 2 odnosno obrnuto od sonde 2 do sonde 1. Izračun brzine prolaska UZV kroz drvo ( $v$  [m/s]) izračunava se po formuli (4):

$$v = (d/1000) / (t_u/1000000) \quad (4)$$

$v$ -brzina ultrazvučnog vala (m/s),

$d$ -udaljenost od senzora 1 do 2 i obratno, tj. put koji ultrazvučni val mora proći (mm),

$t_u$ -vrijeme koje je potrebno da ultrazvučni val prođe od senzora 1 do 2 i obrnuto ( $\mu\text{s}$ ).

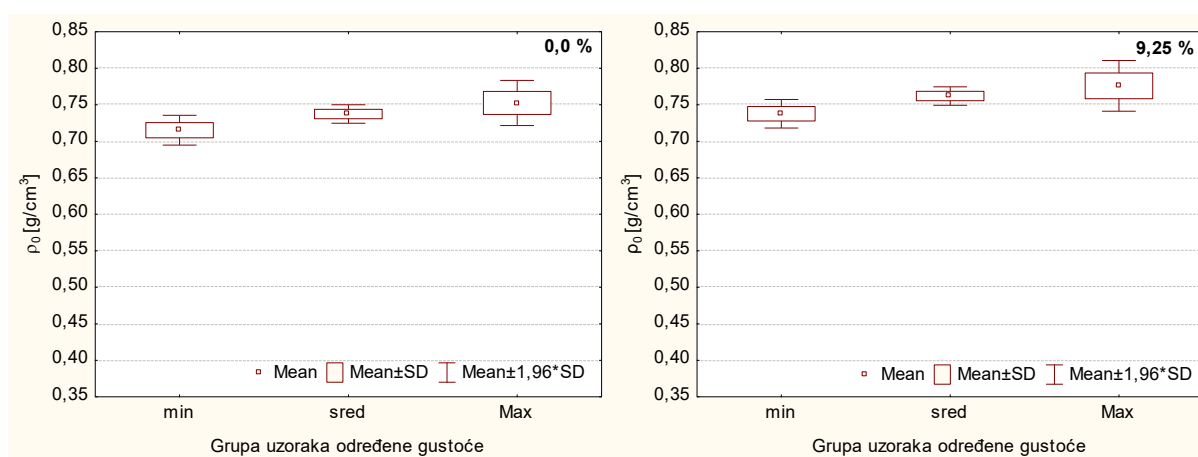
## 5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Grupiranjem uzoraka bukovine i borovine dobivene su po tri grupe uzoraka statistički značajnih razlika u gustoći i u apsolutno suhomo stanju i u kondicioniranome stanju. U tablici 3 prikazane su prosječne vrijednosti gustoće za svaku grupu uzoraka za obje vrste drva, a na slikama 12 i 13 prikazane su gustoće pomoću statističkih box i whisker grafova.

Tablica 3. Gustoća drva bukve i bora u apsolutno suhom i u kondicioniranom stanju

Vrsta drva	Grupa uzoraka određene gustoće	Aritmetička sredina gustoće [g/cm <sup>3</sup> ]		n
		$\rho_{\text{kondic}}$	$\rho_0$	
Bukva	min	0,738	0,715	25
	sred	0,762	0,737	25
	Maks	0,776	0,753	25
Bor	min	0,411	0,391	25
	sred	0,420	0,396	25
	Maks	0,431	0,404	25

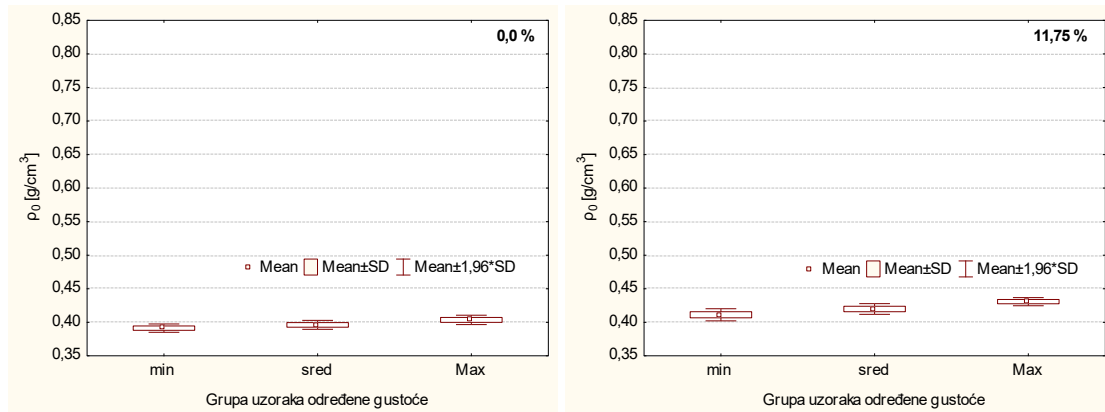
Utvrđena je statistički značajna razlika u gustoći drva bukve u apsolutno suhom stanju između sve tri grupe uzoraka minimalne, srednje i maksimalne gustoće. Pri tome je znatno veća razlika u gustoći između grupe minimalne i srednje gustoće, dok je razlika u gustoći između grupe uzoraka srednje i maksimalne gustoće mala (sl. 12).



Slika 12. Gustoća drva bukve u apsolutno suhom i kondicioniranom stanju

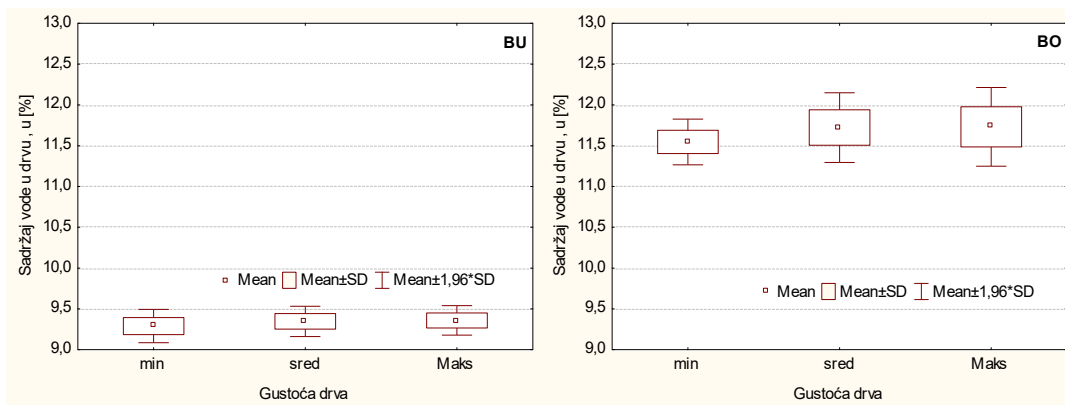
Također je utvrđena statistički značajna razlika u gustoći drva bora u apsolutno suhom stanju između sve tri grupe uzoraka minimalne, srednje i maksimalne gustoće. Pri

tome je razlika u gustoći između grupe minimalne i srednje gustoće otprilike ista kao i razlika u gustoći između grupe uzoraka srednje i maksimalne gustoće mala (sl. 13).



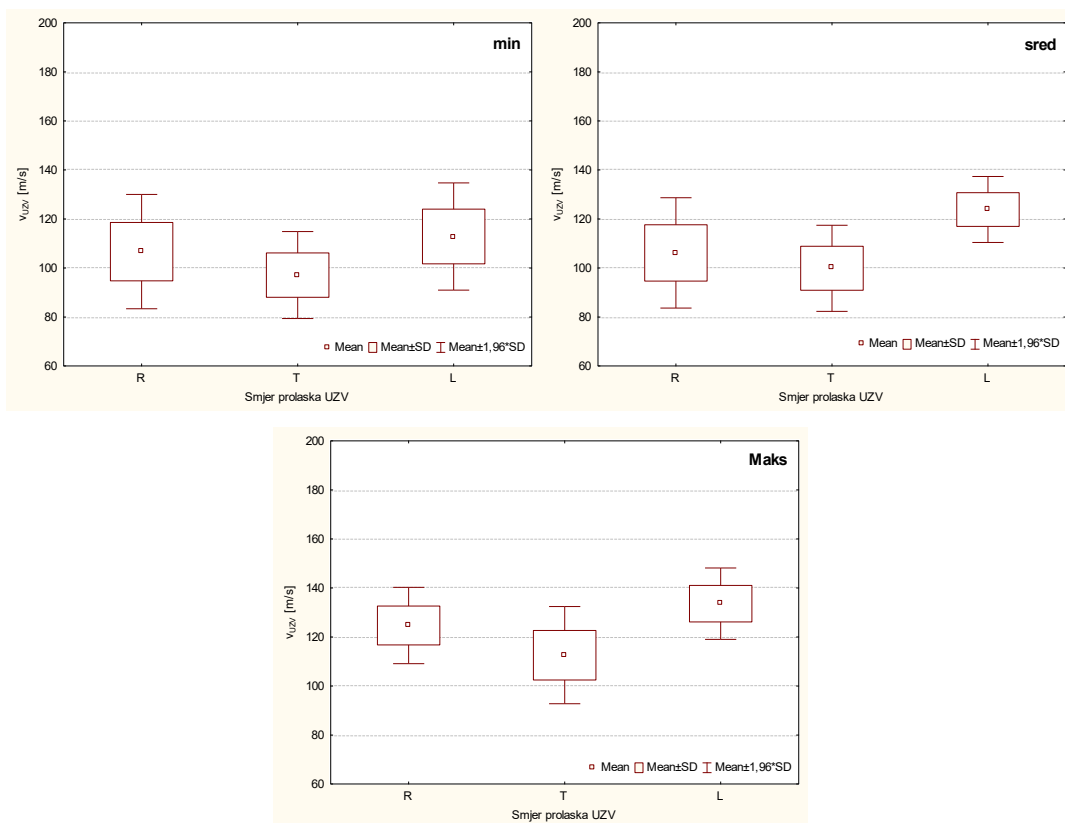
Slika 13. Gustoća drva bora u apsolutno suhom i kondicioniranom stanju

Kako je prikazano na slici 14, postoji razlika u sadržaju vode između bukovih i borovih uzoraka. Uzorci drva bukve i drva bora su bili kondicionirani u dvije različite prostorije te je to razlog njihovom odstupanju. Prosječan sadržaj vode kondicioniranih bukovih uzoraka iznosio je 9,25 %, dok je prosječni sadržaj vode kondicioniranih borovih uzoraka iznosio 11,75 %.



Slika 14. Sadržaj vode bukovine i borovine nakon kondicioniranja

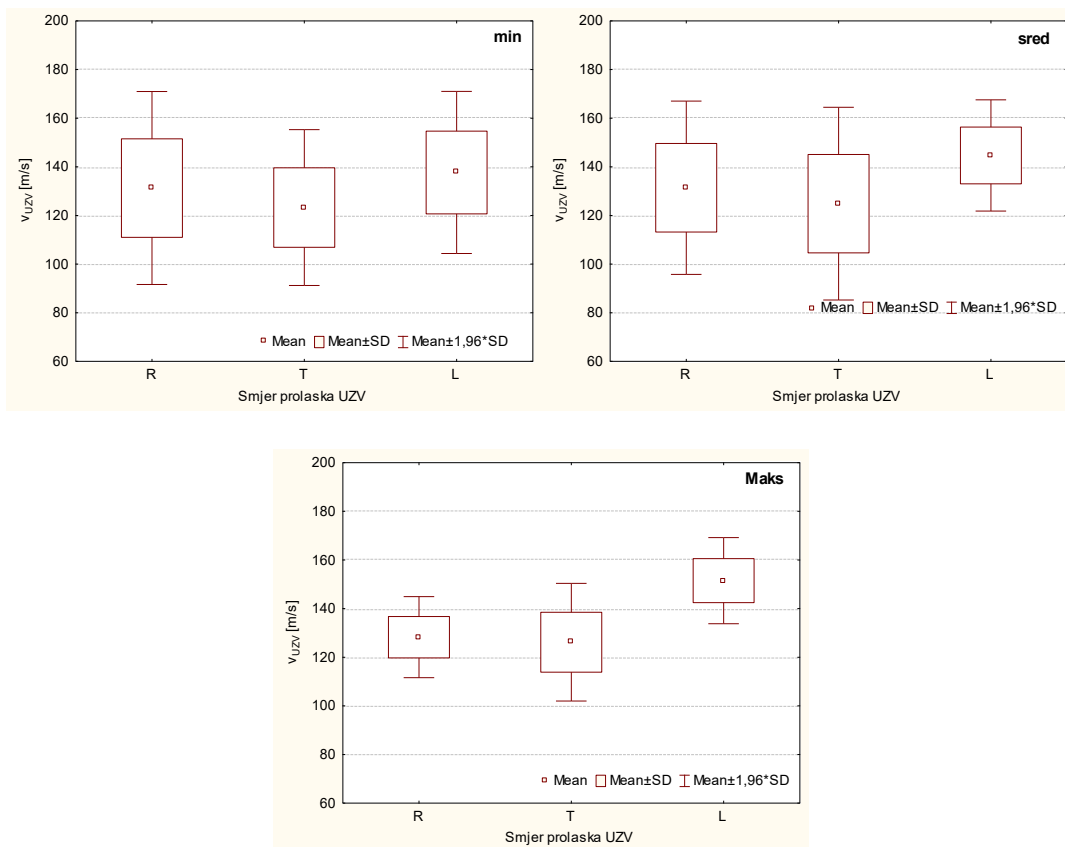
Statičkom analizom utvrđena je razlika u brzini prolaska ultrazvučnog vala kroz drvo bukve u apsolutno suhom stanju između sve tri grupe uzoraka minimalne, srednje i maksimalne gustoće u sva tri smjera. Porastom gustoće drva uzoraka raste i brzina ultrazvučnog vala. Također je utvrđena značajna razlika u brzini prolaska ultrazvučnog vala između sva tri smjera, pri čemu je brzina prolaska vala najmanja u tangentnome smjeru, a najveća u longitudinalnome smjeru (sl. 15).



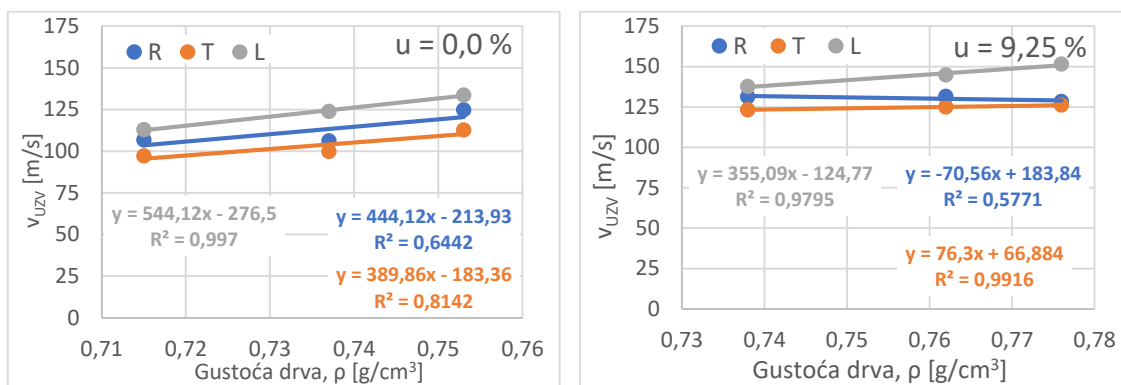
Slika 15. Brzina prolaska UZV kroz drvo bukve u apsolutno suhom stanju u sva tri smjera

Statičkom obradom dobivenih mjernih rezultata utvrđena je razlika u brzini prolaska ultrazvučnog vala kroz bukvinu u kondicioniranom stanju između sve tri grupe gustoća drva u sva tri smjera. Sukladno tome, vidi se i razlika u brzini prolaska ultrazvučnog vala između sva tri smjera, gdje je brzina prolaska vala najmanja u tangentalnome smjeru, a najveća je u longitudinalnome smjeru. Povećanjem gustoće drva bukve, povećava se i brzina prolaska ultrazvučnoga vala kroz bukvinu (sl. 16). Ovakvi rezultati sukladni su rezultatima Šporčića (2019) i Paczesniovsyja (2019).

Prema slici 17. tangentalni smjer ima najmanju brzinu prolaska ultrazvuka, dok longitudinalni ima najveću brzinu, a povećanjem sadržaja vode u drvu, dolazi do blagog linearnoga povećanja brzina prolaska ultrazvuka. Ovoj pravilnosti odstupa jedino brzina ultrazvuka u radialnome smjeru kondicioniranih uzoraka bukvine – utvrđeno je blago linearno opadanje brzine ultrazvuka s povećanjem gustoće. Razlog tome moguće je da uzorci nisu bili idealno radialne teksture, pa i zvuk nije prolazio idealno radialnim, tj. tangentalnim smjerom.



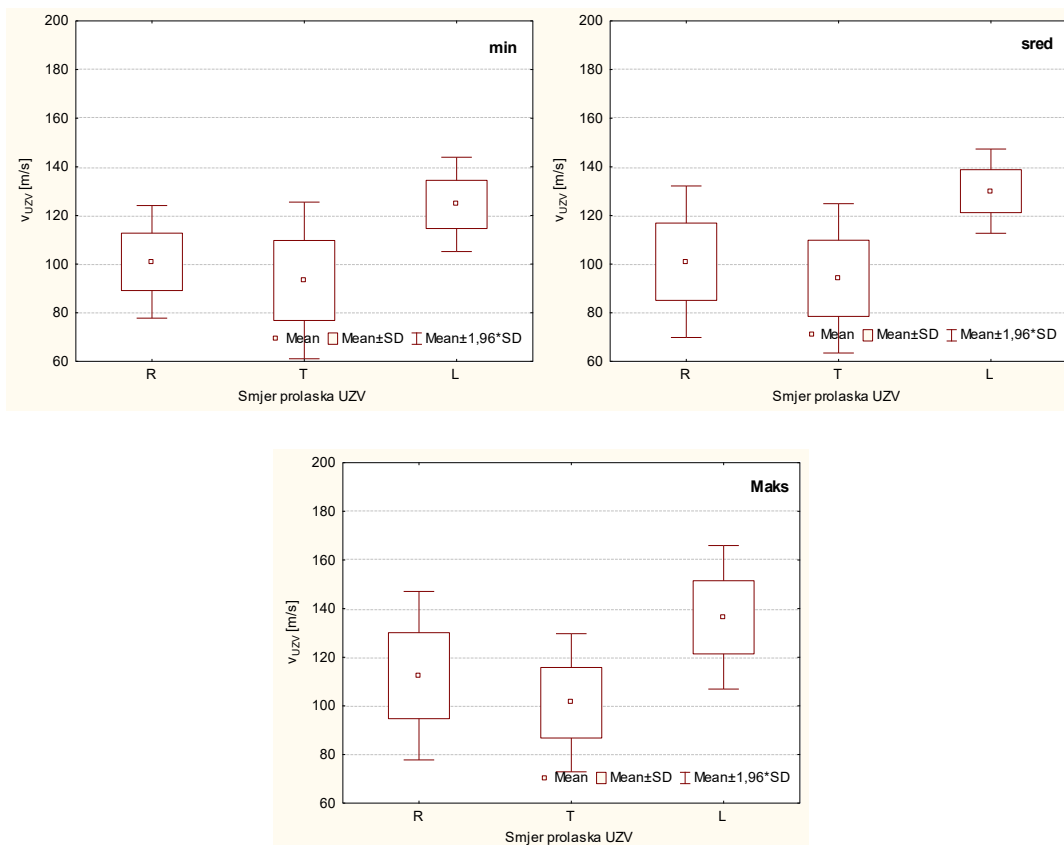
Slika 16. Brzina prolaska UZV kroz drvo bukve u kondicioniranom stanju u sva tri smjera



Slika 17. Ovisnosti brzine prolaska UZV o gustoći drva bukve

Statičkom je analizom utvrđena razlika u brzini prolaska ultrazvučnog vala kroz drvo bora u apsolutno suhom stanju između sve tri grupe uzoraka minimalne, srednje i maksimalne gustoće u sva tri smjera. Povećanjem gustoće drva bora raste i brzina prolaska ultrazvuka.

Također je vidljiva razlika u brzini prolaska ultrazvučnog vala između sva tri smjera, gdje je brzina prolaska vala najmanja u tangencijalnome smjeru, a najveća je u longitudinalnome smjeru (sl. 18).

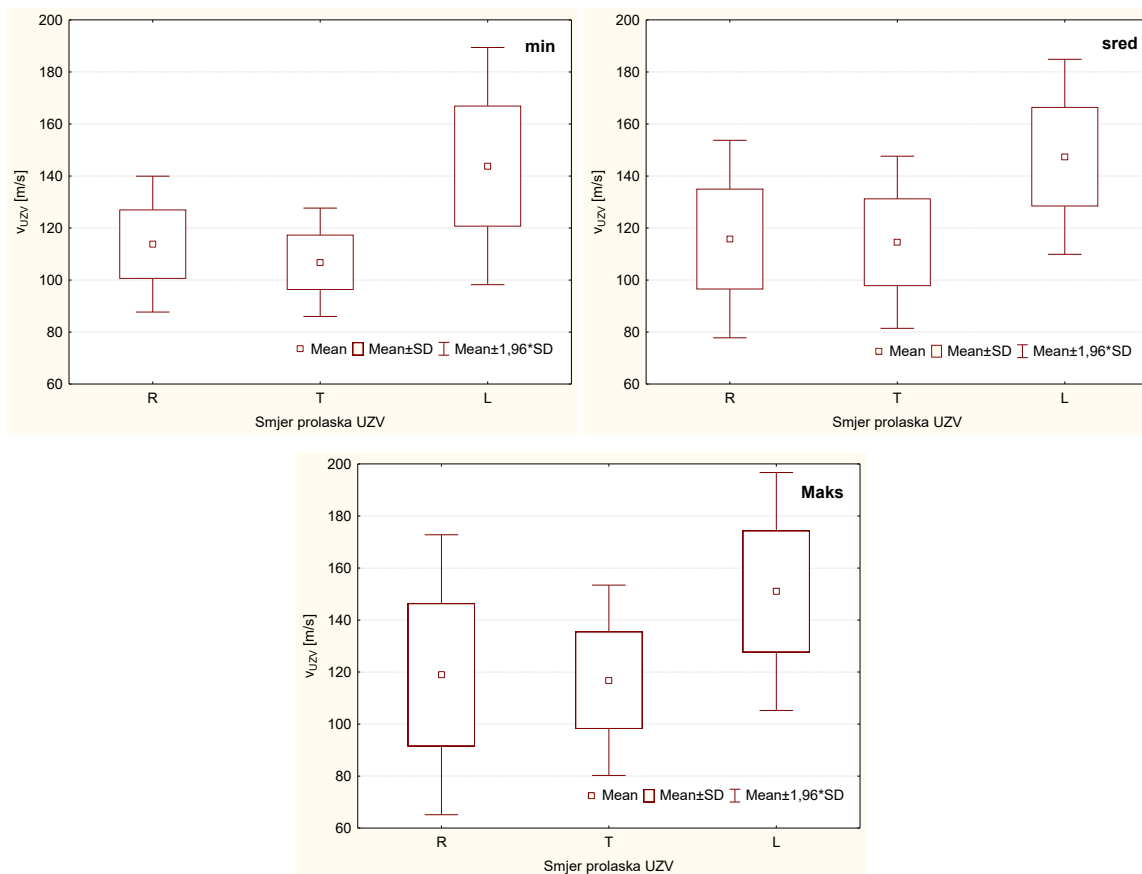


Slika 18. Brzina prolaska UZV kroz drvo bora u apsolutno suhom stanju u sva tri smjera

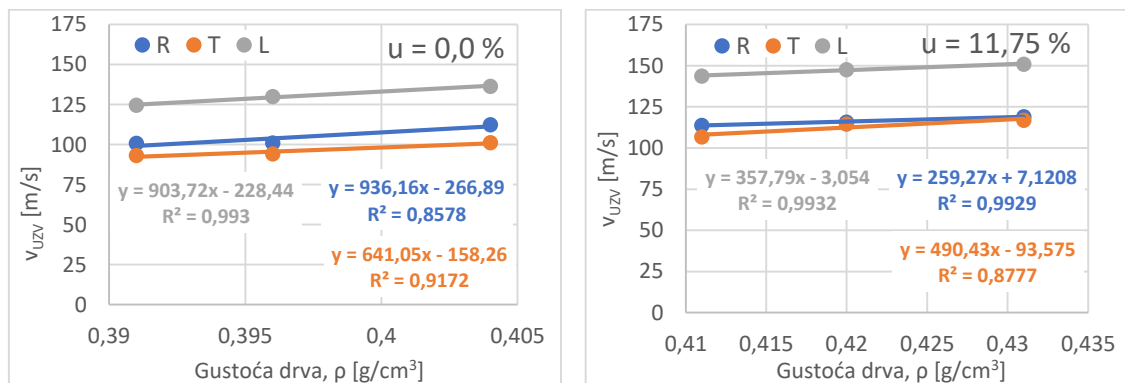
Nadalje, također je utvrđena značajna razlika u brzini prolaska ultrazvučnog vala kroz drvo bora u kondicioniranom stanju između sve tri gustoće drva u sva tri smjera. I kondicioniranome drvu bora porastom gustoće raste i brzina prolaska ultrazvuka kroz borovinu (sl. 19).

Utvrđena je razlika u prolasku ultrazvučnog vala između sva tri smjera, pri čemu je gdje brzina prolaska vala najmanja u tangencijalnome smjeru, a najveća je u longitudinalnome smjeru (sl. 19).

Mjerenjem je utvrđeno da se borovini povećanjem gustoće linearno povećava brzina kojom ultrazvučni val prođe kroz drvo. Prema slici 20. tangenti smjer ima najmanju brzinu prolaska ultrazvuka, dok longitudinalni ima najveću brzinu, a povećanjem sadržaja vode u drvu, dolazi do blagog povećanja brzina prolaska ultrazvuka. S obzirom da bukovina ima veću gustoću od borovine, logično je da je brzina prolaska ultrazvuka kroz bukovinu veća nego kroz borovinu. Iznimka od te pravilnosti je brzina prolaska ultrazvuka kroz drvo borovine u longitudinalnom smjeru – nešto je veća od brzine prolaska ultrazvuka kroz drvo bukve. Razlog toga djelomično je moguće objasniti činjenicom da drvo četinjača ima pravilniju anatomsku strukturu nego drvo listača.



Slika 19. Brzina prolaska UZV kroz drvo bora u kondicioniranom stanju u sva tri smjera



Slika 20. Ovisnost brzine prolaska UZV o gustoći drva bora

Sveukupnim pregledom dobivenih rezultata ovog istraživanja moguće je zaključiti da gušća bukovina ima značajno veću brzinu prolaska ultrazvuka u odnosu na manje gustu borovinu i u kondicioniranom i u apsolutno suhom stanju i to u svim smjerovima. Ovi rezultati



sukladni su rezultatima ranijih istraživanja Domitrovića (2020), Šporčića (2019), Paczesniovskyja (2019), Saadat-Niae i suradnika (2011) kao i Salesa (2005).

Za obje su ispitane vrste drva utvrđene značajno veće brzine prolaska ultrazvuka u radijalnom smjeru nego u tangentnom, iako je bilo logično očekivati da će brzina prolaska ultrazvuka u tangentnom smjeru biti veća iz razloga lakšeg i nesmetanog širenja kroz puno gušće kasno drvo nego u radijalnome smjeru gdje ultrazvučni val stalno nailazi na različite zone gustoće drva između ranoga i kasnoga drva. Ovakve rezultate utvrdili su i Domitrović (2020), Paczesniovsky (2019) i Šporčić (2019).

Ovim mjerenjima dobiveni rezultati pokazuju da povećanjem sadržaja vode u drvu raste i brzina prolaska ultrazvuka kroz drvo, suprotni su rezultatima koje je dobio Paczesniovsky (2019).

O najvećoj brzini prolaska zvuka u longitudinalnom smjeru u svome radu govori i Wegst (2006) i tu brzinu zvuka direktno povezuje s modulom elastičnosti drva. Ona opisuje da je brzina prolaska zvuka kroz drvo u transferzalnome smjeru (radijalni ili tangentni) tek 20 do 30 % brzine prolaska zvuka kroz drvo u longitudinalnome smjeru. Dobiveni rezultati ovih istraživanja potvrđuju njene navode da je brzina prolaska ultrazvuka kroz drvo najveća u longitudinalnome smjeru, no odnos izmjerenih brzina ( $v_R$  odnosno  $v_T$  :  $v_L = 1/3 - 1/5$ ) nije u tim omjerima.

## 6. ZAKLJUČAK

Na temelju dobivenih rezultata ispitivanja, mogu se donijeti sljedeći zaključci:

- povećanjem gustoće drva proporcionalno se povećava brzina kojom ultrazvučni val prođe kroz drvo;
- najveća brzina prolaska ultrazvuka kroz drvo je u longitudinalnom smjeru, manja je u radijalnom, a najmanja je u tangentnom smjeru;
- drvo bora u longitudinalnom smjeru ima veću brzinu prolaska ultrazvuka negoli drvo bukve,
- povećanjem sadržaja vode u drvu, povećava se brzina prolaska ultrazvuka

Dobivenim rezultatima zaključuje se da vrsta drva, njegova gustoća, sadržaj vode i smjer prolaska ultrazvuka značajno utječu na brzinu prolaska ultrazvuka kroz drvo.

## 7. LITERATURA

1. Beall, F.C. 1987: Acousto-ultrasonic monitoring of glueline curing. *Wood and Fiber Science*. 19(2): 204-214.
2. Beall, F.C. 2007: Industrial applications and opportunities for nondestructive evaluation of structural wood members. *Ciencia y Tecnología*. 9(2): 127-134.
3. Bodig, J. (1995): Quantification of Biodegradation in Poles and Piles. *Proceedings of the International Conference on Wood Poles and Piles*. Colorado State University, Ed.: Collins, M.F., Colorado, USA, pp. 337-352.
4. Bubalo, L. 2017: Dijagnostika ultrazvukom, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb  
[http://repozitorij.fsb.hr/7413/1/Bubalo\\_2017\\_zavrzni\\_prediplomski.pdf.pdf](http://repozitorij.fsb.hr/7413/1/Bubalo_2017_zavrzni_prediplomski.pdf.pdf)
5. Domitrović, M. 2020: Utjecaj vrste drva na brzinu širenja ultrazvuka kroz drvo, Završni rad, Šumarski fakultet, Zagreb
6. Horvat, I., Krpan, J. 1967: *Drveno Industrijski priručnik*, Tehnička knjiga Zagreb, 1967.
7. A.K.Mal, A.K., Yin, C.-C., Bar-Cohen, Y., 1991: Ultrasonic nondestructive evaluation of cracked composite laminates. *Composites Engineering*. 1(2): 85-101. doi: [https://doi.org/10.1016/0961-9526\(91\)90029-R](https://doi.org/10.1016/0961-9526(91)90029-R)
8. Paczesniowski, Z. 2019: Utjecaj sadržaja vode na brzinu širenja ultrazvuka u drvu, Diplomski rad, Šumarski fakultet, Zagreb
9. Saadat-Nia et al. 2011: Ultrasonics of reaction wood. *BioResources*. 6(2):1172-1185.
10. Sales, A.2005: in *Bioresource Technology 97 (2006)*: Relationship between density and ultrasonic velocity in Brazilian tropical woods. Department of Civil Engineering, UFSCar-Federal University of Sao Carlos, CEP: 13565-905, Sao Carlos, Sao Paulo, Brazil.
11. Stepinac, M., Rajčić, V., Barbalić, J. 2017: Inspekcija i procjena stanja postojećih drvnih konstrukcija. *GRAĐEVINAR*, 69(9): 861-873, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.1994.2017>
12. Šporčić, P. 2019: Utjecaj gustoće na brzinu širenja ultrazvuka u drvu, Završni rad, Šumarski fakultet, Zagreb
13. Thomson, W.T. 1981: *Theory of Vibration with Applications*. Second Edition. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, USA.
14. Unger, A., Schniewind, A.P., Unger, W. 2001: *Conservation of Wood Artifacts*. A Handbook. 1st Edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001.
15. Vergot, T. 2018: Utjecaj brzine opterećenja na čvrstoću na tlak paralelno sa vlakancima bukovine, Završni rad, Šumarski fakultet, Zagreb

16. Wegst, U.G.K., 2006: Wood for Sound. American Journal of Botany 93(10): 1439–1448. <https://doi.org/10.3732/ajb.93.10.1439>
17. \* \* \* 2022: RINNTECH. internet stranica – osnovne informacije. pristupljeno 24. 8. 2022. <http://www.rinntech.de/content/view/7/35/lang,english/index.html>
18. \* \* \* 2022: Ultrazvučni tomograf: rječnik. pristupljeno 24. 8. 2022. <https://www.xn--rjenik-k2a.com/Soni%C4%8Dni%20tomograf%20Syn.%20zvu%C4%8Dni%20tomograf>
19. \* \* \* 2021: Ultrazvuk. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. pristupljeno 8. 7. 2022. <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=63120>