

# Utjecaj gustoće na brzinu širenja ultrazvuka u drvu

---

Šporčić, Pave

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Forestry / Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:108:228037>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-07**



Repository / Repozitorij:

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



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**ŠUMARSKI FAKULTET**  
**DRVOTEHNOLOŠKI ODSJEK**

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


**PAVE ŠPORČIĆ**

**UTJECAJ GUSTOĆE NA BRZINU ŠIRENJA ULTRAZVUKA U DRVU**  
**ZAVRŠNI RAD**

**ZAGREB, (rujan, 2019.)**

## PODACI O ZAVRŠNOM RADU

|   |   |
|---|---|
| <b>AUTOR:</b>   | Pave Šporčić<br>23.05.1995, Gospić<br>0068227284                    |
| <b>NASLOV:</b>  | Utjecaj gustoće na brzinu širenja<br>ultrazvuka u drvu              |
| <b>PREDMET:</b>   | Zaštita drva II   |
| <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, Šumarski fakultet<br>Zavod za znanost o drvu |
| <b>AKAD.GOD:</b>  | 2018./2019.   |
| <b>DATUM OBRANE:</b>  | 20.09.2019.   |
| <b>RAD SADRŽI:</b>  | Stranica:32<br>Slika: 17<br>Tablica: 10<br>Navoda literature:12     |
| <b>SAŽETAK:</b> Ultrazvučna ispitivanja danas se vrlo često koriste u dijagnostičke svrhe određivanja zdravosti drva kao nedestruktivna metoda. No, provedeno je vrlo malo sustavnih ispitivanja utjecaja gustoće drva na brzinu širenja ultrazvuka kroz drvo. U radu se mjeri i uspoređuje brzina prolaska ultrazvuka kroz dvije različite vrste drva različitih gustoća. Ovaj rad je svojevrsni doprinos stvaranju baze podataka za buduće određivanje korekcijskih vrijednosti pri utrazvučnom određivanju zdravosti drva. |   |

|   |                                     |                      |
|---|-------------------------------------|----------------------|
|  | <b>IZJAVA<br/>O IZVORNOSTI RADA</b> | <b>OB ŠF 05 07</b>   |
|   |                                     | Revizija: 1          |
|   |                                     | Datum:<br>28.6.2019. |

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.

---

*Pave Šporčić*

U Zagrebu, 20. rujna 2019.

# SADRŽAJ

|  |    |
|--|----|
| 1. UVOD .....  | 1  |
| 2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA.....   | 2  |
| 2.1. DESTRUKTIVNE METODE .....   | 2  |
| 2.2. Polu nedestruktivne metode (Semi-NDE Non Destructive Examination) .....       | 3  |
| 2.3. Nedestruktivne (NDE – Nondestructive Evaluation) metode.....                  | 3  |
| 2.3.1. Vizualna zapažanja .....  | 4  |
| 2.3.2. Električna svojstva.....  | 4  |
| 2.3.3. Gama zračenje .....   | 4  |
| 2.3.4. Rendgenska metoda .....   | 5  |
| 2.3.5. Infracrvena termografija (eng. Infrared Termography - IRT).....             | 5  |
| 2.3.6. Zvučni (ultrazvučni) val - ispitivanja .....                                | 6  |
| 2.4. ŠTO JE TO ULTRAZVUK .....   | 7  |
| 2.4.1. Brzina širenja ultrazvuka kroz drvo.....                                    | 7  |
| 2.4.2. Utjecajni čimbenici koji utječu na brzinu širenja ultrazvuka kroz drvo..... | 8  |
| 2.7. UPOTREBA ULTRAZVUKA U EKSPERIMENTALNE SVRHE .....                             | 8  |
| 2.7.1. Ultrazvučni val .....   | 8  |
| 2.7.2. METODA ISPITIVANJA ZVUČNIM TOMOGRAFOM .....                                 | 9  |
| 2.8. UPOTREBA ULTRAZVUČNIH TEHNIKA U KOMERCIJALNE SVRHE.....                       | 10 |
| 3. CILJ RADA .....   | 11 |
| 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.) .....                            | 12 |
| 4.2.1. IZRADA I OZNAČAVANJE UZORAKA.....   | 13 |

|  |    |
|--|----|
| 4.2.2. REDOSLIJED SLAGANJA UZORAKA .....   | 14 |
| 4.3. METODE.....   | 16 |
| 4.3.1. SORTIRANJE UZORAKA ZA ISPITIVANJE.....  | 16 |
| 4.3.2. Mjerenje širine godova i određivanje srednje širine goda na uzorcima bukovine i borovine..... | 16 |
| 4.3.4.MJERENJE BRZINE PROLASKA ZVUKA KROZ UZORKE DRVA ZVUČNIM TOMOGRAFOM.....                        | 18 |
| 5. REZULTATI I RASPRAVA.....   | 23 |
| 5.1. Gustoća drva.....   | 23 |
| 5.2. Širina goda.....  | 25 |
| 5.3. Brzina prolaska ultrazvuka .....  | 28 |
| 6. Zaključci.....  | 31 |
| 7. LITERATURA .....  | 32 |

## 1. UVOD

Od samog početka civilizacije drvo se koristilo i imalo je bitnu ulogu u životu čovjeka, te se do dan danas ta uloga nije mijenjala. Prvi ljudi su ga koristili u razne svrhe kao što su dijelovi oružja i oruđa, kao materijal za izolaciju ili pak kao ogrijevni materijal. Uz kamen i glinu, drvo je bilo prvi tehnički materijal kojeg su prvi ljudi primijenjivali kako bi učinili svoj život jednostavnijim, što je omogućilo bolji napredak čovječanstva u svakom smislu. Drvo se oduvijek koristilo za veliki broj namjena i različitih proizvoda kao što su alati u poljoprivredi, razne nastambe, primitivna vozila, oružje, obuća, posuđe, mostovi i sl. Također, neki dijelovi drva kao što su kora, plodovi i listovi, koristili su se u prehrambene i druge svrhe što je povećavalo njegovu uporabivost i učinkovitost. Energija koja se dobije izgaranjem drva dala je veliki doprinos razvoju industrije, a drvo je i danas glavni izvor energije za veći dio svjetske populacije.

U europskoj građevinskoj domeni, posebno za građevine, upotreba drva je danas vrlo ograničena. To je zbog drugih čimbenika, do poteškoće u primjeni ove sirovine i obnovljivih materijala, čija mehanička svojstva je prilično teško kontrolirati, s obzirom na njihove moguće bezbrojne varijabilnosti. S ciljem povećanja kvalitativnog znanja o ovom materijalu, nerazorne metode upravljanja temeljene na ultrazvuku su intenzivno razvijene tijekom posljednjih 10 godina. Te se metode temelje na postojanju izravnog odnosa brzine širenja uzdužnog ultrazvučnog vala u uzorku i njegovih elastičnih svojstava.

Osim što proizvode drvo za konstrukcijsku i energetska primjenu, šume pozitivno utječu na ekosustav i ljudski život općenito što uključuje:

- zadržavanje vode u tlu
- proizvodnja kisika
- povoljni utjecaj na klimu
- vezanje CO<sub>2</sub> za sebe što smanjuje njegovu emisiju u atmosferu

- sprječavanje erozije tla
- veliki estetski značaj
- povoljni utjecaj na bioraznolikost

Zbog svoje visoke čvrstoće uz istovremeno nisku gustoću te jednostavne obrade, drvo se u velikoj mjeri primjenjuje u brodogradnji, građevinarstvu, poljoprivredi, proizvodnji vozila, rudarstvu, obrtništvu, kućanstvu i tekstilnoj industriji. Kao sirovina služi za proizvodnju papira i celuloze. Iako se drvo u primjeni nastoji zamijeniti kompozitnim, metalnim i polimernim materijalima, kao obnovljivi materijal i dalje ima značajan udio u primjeni. Kao prirodan konstrukcijski materijal, drvo se primjenjuje u neobrađenom stanju, ali i u fizikalno i kemijski modificiranom stanju, čime se znatno umanjuju prirodni nedostaci drva. Drvo je kao prirodni materijal podložan abiološkoj i biološkoj razgradnji. Točno i detaljno utvrđivanje stupnja razgradnje ugrađenog konstrukcijskog drva izuzetno je važno, vrlo je komplicirano i teško, često puta iziskuje izuzimanje uzoraka za ispitivanja čime se narušava ili čak uništava dio konstrukcije. Ultrazvuk se danas koristi u svrhu nedestruktivnih ispitivanja različitih materijala i njihovih svojstava. Ideja rada je da se utvrdi utjecaj gustoće drva i smjera kretanja ultrazvuka kroz zdravo recentno drvo na njegovu brzinu, kako bi se napravila baza podataka koja će se u budućnosti koristiti za procjenu zdravstvenog stanja drva u upotrebi.

## **2.PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA**

### **2.1. DESTRUKTIVNE METODE**

Destruktivne metode ispitivanja su metode ispitivanja koje podrazumijevaju bušenje, glodanje, struganje, uzimanje uzoraka drva iz ugrađenih elemenata ili na bilo koji način oštećivanja površine ili unutrašnjosti ugrađenog drva. To su metode koje smanjuju vrijednost drva i kao takve nisu poželjne za ispitivanje. Destruktivnim metodama dolazimo relativno brzo do rezultata jer imamo manje podataka za obradu a samim time dolazimo brže do željenih rezultata.



## **2.2. Polu nedestruktivne metode (Semi-NDE Non Destructive Examination)**

Pseudo-NDE metode često se koriste zajedno s vizualnim opažanjima. Uključuju takve metode kao što su:

- a) Udaranje čekićem za slušanje šupljeg zvuka u stupovima,
- b) Upotreba noža za struganje degradirane površine za određivanje dubine degradacije,
- c) Uklanjanje inkrementalnih jezgara radi ispitivanja unutarnje razgradnje,
- d) Upotreba bušenja s resistografom za utvrđivanje lokacije degradiranih presjeka,
- e) Elektro ispitivanja su ispitivanja temeljena na elektičnom otporu drva a na temelju njega i sadržaja vlage mogu se dobiti informacije o stanju drva. Električni otpor koristi se i za otkrivanje propadanja in-situ ispitivanjima.

Iako pseudo-NDE metode mogu pomoći u proširenju informacija dobivenih vizualnim pregledom, one su, uglavnom, i subjektivne prirode. Na primjer, za izradu opsega šupljine propadanja mogu se upotrijebiti priraštajni jezgra ili zapis bušenja rezistografa. Međutim, puno je teži zadatak odrediti granicu raspadanja upada.

## **2.3. Nedestruktivne (NDE – Nondestructive Evaluation) metode**

Gotovo sve NDE metode koje se koriste za razne materijale i proizvode mogu se primijeniti na drvo. Nedestruktivne metode ispitivanja su metode ispitivanja koje ne podrazumijevaju bušenje, glodanje, struganje, uzimanje uzoraka drva iz ugrađenih elemenata ili na bilo koji način oštećivanje površine ili unutrašnjosti ugrađenog drva. To su metode koje nam pružaju mogućnost kvalitetnog i jednostavnijeg izbora održavanja ugrađenog drva jer se ovim nedestruktivnom metodom može vidjeti u kakvom je stanju drvo da se ne dira njegov konstrukcijski i estetski izgled.

Najčešći i najviše razvijeni i istraživani tipovi nedestruktivnih (NDE) metoda su:

### **2.3.1. Vizualna zapažanja**

Jednostavnija i najstarija metoda NDE je vizualno promatranje. Mnoge se evaluacije u praksi još uvijek u potpunosti oslanjaju na vizualna opažanja i subjektivnu interpretaciju tih opažanja. U mnogim su situacijama potrebna vizualna promatranja za donošenje odluke o kritičnosti stanja proizvoda ili komponente.

Neke od ključnih zapažanja koja služe u tu svrhu uključuju:

- Slomljeni komad
- Mehanička oštećenja
- Uznapredovala biološka i / ili abiološka razgradnja
- Opsežna šteta od insekata
- promjena prvobitnog oblika i / položaja pojedinih elemenata ugrađenog drva u upotrebi (dijela namještaja, elementa konstrukcije i sl.).

Odluke koje se temelje na vizualnom promatranju obično su vrste "go, no-go", što znači da se proizvod odbacuje ili se ocjenjuje prikladnim za neprekidnu uslugu. U nekim se slučajevima može preporučiti popravak ili pojačanje.

### **2.3.2. Električna svojstva**

Funkcionira na temelju inverznog piezoelektričnog efekta: djelovanjem električnog polja na piezoelektrične kristale dolazi do deformacije. Inverzni piezoelektrični efekt omogućuje dobivanje vibracija kristala u ultrazvučnom i zvučnom području, a pomoću direktnog piezoelektričnog efekta može se detektirati ultrazvuk. Koriste se kao NDE parametri poput odnosa sadržaja vlage i električne otpornosti drva. Električni otpor koristi se i za otkrivanje propadanja in-situ ispitivanjima.

### **2.3.3. Gama zračenje**

Ispitivanje se vrši gama zračenjem ovaj način ispitivanja koristan je alat za kvantificiranje propadanja. Također se koristi kao element u tragovima za kvantificiranje raspodjele konzervansa u drvu. Jedno od ograničenja ove metode su propisi koji se odnose na uporabu radioaktivnog izvora.

### **2.3.4. Rendgenska metoda**

Uglavnom se koristi u laboratorijskom okruženju ili na proizvodnim linijama zbog glomazne prirode izvora X-zraka i mjerne opreme. Kod ove metode je najveći problem šta se ispitivanje vrši u 3d obliku, a dobiveni rezultati budu u 2d obliku, zbog izrazito puno dobivenih podataka dolazi do komplikacija u iščitavanju željenih rezultata i nemogućnosti npr. određivanja rasporeda grešaka, oštećenja po debljini ispitnog materijala, razlike ranog i kasnog drva i dr. Osim navedenih grešaka velika mana ove metode šta je oprema glomazna i skupa pa zbog toga nije najbolji izbor za istraživanja.

### **2.3.5. Infracrvena termografija (eng. Infrared Termography - IRT)**

Nedestruktivna je metoda koja se sve češće upotrebljava u građevinarstvu, posebice u fazama dijagnostike građevine, preventivnog održavanja ili pri provjerama ishoda intervencija na građevini. Na postojećim konstrukcijama ona omogućuje istraživanje detalja konstrukcije (npr. skrivenih i teško dostupnih dijelova), otkrivanje oštećenja i propadanja materijala (npr. vlage, pukotina, temperature elemenata, mikroklimatskih uvjeta). Prisutnost nevidljivih defekata modificira brzinu difuzije toplinskog širenja. IRT je beskontaktna nedestruktivna metoda koja ima mogućnost snimanja raspodjele površinske temperature i na taj način otkriti detalje o tome što je ispod površine materijala i njihovo toplinsko ponašanje. Iako vizualni pregled površine drva još uvijek ostaje najbolji postupak za detekciju defekata i oštećenja, IRT ima mogućnost daljinskog lociranja područja s visokim rizikom od budućih oštećenja ili za detekciju već oštećenih područja. Aktivni pristup se može primijeniti pri identifikaciji vlažnog drva zbog visoke osjetljivosti na promjene temperature i posljedičnog visokog udjela vode. Općenito govoreći, iako je osjetljivost IRT tehnika zasad lošija od tradicionalnih tehnika, IRT omogućuje lokaliziranje područja s različitim udjelima vlage na brz i apsolutno nedestruktivan način. (Stepinac i suradnici, 2017.g).

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

Jedna je od najpopularnijih NDE metoda koja se koristi za drvo i drvene kompozite. Valovi pobuđivanja nastaju ili putem udara ili prisilne vibracije. Zbog teškoće spajanja prisilnog generatora vibracija na komad koji se procjenjuje, većina istražitelja favorizira metodu udaranja (Thomson, 1981).

Iako je istina da uzorak može vibrirati bez fizičkog dodira izvora zvuka, zbog ove metode prijenosa dolazi do velikog gubitka energije. Stoga je dosadašnja beskontaktna tehnika dobila samo ograničenu primjenu. Sama metoda zvučnog valnog vala obično se koristi na dva različita načina koristeći brzinu zvuka ili vibracijski spektar. Brzina mjerenja zvuka koja se često koristi za izražavanje dinamičkog modula elastičnosti vrlo je popularna kod proizvođača od drva. Razlog njegove popularnosti je njegova jednostavnost u instrumentaciji i računanju. Obično se brzina zvuka pretvara u modul elastičnosti (E). Unatoč svojoj jednostavnosti, korištenje modula elastičnosti kao NDE parametra ima nekoliko nedostataka:

- obično se mjeri samo najbrži zvučni val
- najbrži zvučni val putuje u dijelu najkvalitetnijeg drva i zaobilazi slabija područja (juvenilno drvo, čvorovi, slojevi male gustoće itd.)
- računanje modula elastičnosti zahtijeva znanje gustoće i mase koje se trenutno ne mogu odrediti nerazorno
- ne postoji teorijski odnos između svojstava čvrstoće i modula elastičnosti

S druge strane, pomoću spektra valnog napona iz kojeg su odabrani NDE parametri mogu se prevladati mnogi nedostaci koji predstavljaju brzinu zvuka (Bodig 1995), uključujući:

- spektar naponskih valova pruža prikaz cjelokupnih materijalnih uvjeta i karakteristika
- veliki broj neovisnih varijabli (maksimalna energija, dominantna frekvencija, pomicanje frekvencije, prigušenje itd.) Može se izabrati iz jednog frekvencijskog spektra

- višestruki NDE parametri mogu pružiti bolju povezanost s destruktivnim svojstvom

- mogu se odabrati varijable koje su manje osjetljive na nekontrolirane uvjete okoliša (temperatura, vlaga, granični uvjeti)

## **2.4. ŠTO JE TO ULTRAZVUK**

Zvuk je mehanički val koji nastaje titranjem zvučnog izvora kao što je čvrsto tijelo, tekućina ili plin. Ako na drvo djeluju vibracije odnosno zvučni valovi, ono će početi rezonirati na određen način zbog svojih akustičnih karakteristika. Brzina zvuka direktno je povezana s modulom elastičnosti i gustoćom. Ona naravno ovisi i o vrsti drva te se razlikuje s obzirom na smjer vlakana. Youngov modul u radijalnom smjeru je samo 1/20 do 1/10 iznosa modula u longitudinalnom smjeru. Analogno tome, brzina zvuka u smjeru okomitom na smjer vlakana je otprilike 20 do 30 % njene vrijednosti u longitudinalnom smjeru. Općenito, brzina zvuka u drvu smanjuje se povećanjem temperature ili sadržaja vlage proporcionalno utjecaju tih varijabli na modul elastičnosti i gustoću. Također, smanjuje se porastom frekvencije i amplitude vibracija. Brzina zvuka je veoma važna kao akustičko svojstvo za primjenu kod glazbenih instrumenata jer uvjetuje prijenos zvučnih valova s glazbala koje ima vlastitu impedanciju na zrak, koji ima drugačiju impedanciju, budući da taj zvuk dolazi do ljudskog uha putem zraka.

### **2.4.1. Brzina širenja ultrazvuka kroz drvo**

Općenito, brzina ultrazvuka u drvu smanjuje se povećanjem temperature ili sadržaja vlage proporcionalno utjecaju tih varijabli na modul elastičnosti i gustoću. Također, smanjuje se porastom frekvencije i amplitude vibracija (Stepinac i suradnici, 2017.g). Brzina širenja zvuka u zraku pri standardnom atmosferskom tlaku i temperaturi od 0 °C iznosi u prosjeku 331,8 m/s, a pri standardnom tlaku (1013,25 hPa ili 760 mm Hg) i sobnoj temperaturi iznosi u prosjeku 340 m/s. Brzina širenja zvuka u drvu je za otprilike 10 do 15 puta veća od širenja brzine zvuka u zraku (Wegst, 2006.). Bitno je napomenuti da zdrava odrasla osoba čuje valove zvuka nastale mehaničkim titranjem frekvencijskog raspona 16 do 20 000 Hz (titraja u sekundi). Brzina zvuka je veoma važna kao akustičko svojstvo za primjenu kod

glazbenih instrumenata jer uvjetuje prijenos zvučnih valova s glazbala koje ima vlastitu impedanciju na zrak, koji ima drugačiju impedanciju, budući da taj zvuk dolazi do ljudskog uha putem zraka.

## **2.4.2. Utjecajni čimbenici koji utječu na brzinu širenja ultrazvuka kroz drvo**

Brzina širenja vala je u direktnoj vezi s modulom elastičnosti, ali je primarno u korelaciji s lokalnim nepravilnostima (kvrgama, orijentaciji vlakanca, propadanju presjeka, itd.). Najveća vrijednost mjerene energije predstavlja vrijednost mjenog akustičnog odgovora drva. Ultrazvučna ispitivanja omogućuju mjerenja dviju ultrazvučnih varijabli u sva tri smjera vlakanca - longitudinalnom, tangentnom i radijalnom. Nakon izmjerene brzine propagacije longitudinalnog vala vrlo je lako izračunati modul elastičnosti drva ako je poznata njegova gustoća. Dakle, gustoća drva je ključna varijabla koja mora biti poznata ako se koriste ultrazvučna ispitivanja za određivanje dinamičkog modula elastičnosti (Stepinac i suradnici, 2017.g).

Još jedno bitno svojstvo drva, posebno kod glazbenih instrumenata, je prilagođavanje uvjetima okruženja u kojem se nalazi, točnije promjeni relativne vlage zraka. Sva svojstva materijala bitna za primjenu u akustici kao što su gustoća, Youngov modul, prigušenje i skupljanje veoma ovise o sadržaju vode u drvu. Općenito, brzina sorpcije vlage u drvu se smanjuje porastom gustoće i udjela akcesornih tvari u drvu (smole, metalni ioni, terpentin). Gustoća i Youngov modul te koficijent gubitka imaju primarni utjecaj na akustično ponašanje jer o njima direknto ovisi brzina zvuka u materijalu i intenzitet prenesenog zvuka (Wegst, 2006.).

## **2.7. UPOTREBA ULTRAZVUKA U EKSPERIMENTALNE SVRHE**

### **2.7.1. Ultrazvučni val**

Ultrazvučna metoda vrlo je popularna kod homogenih, neporoznih materijala za otkrivanje nedostataka (Mal i Bar-Cohen 1988). Iako se ova metoda koristi i na drvu i na drvnim kompozitima, manje je učinkovita zbog porozne i diskontinuirane prirode drva kao materijala (Beall 1987). Ultrazvučna ispitivanja su najučinkovitija za kontrolu kvalitete proizvodnje, kao što su otkrivanje oštećenih područja u laminatima i

udaraca u kompozitima čestica. To je zbog sposobnosti ultrazvučnih valova da se koncentriraju na malom području. Ultrazvuk se koristi ili kao:

- Sustav prolaznih valnih napona
- Pulse-eho sustav

Ultrazvučni val šalje signal kroz debljinu materijala, a karakteristike vala bilježe se na izlaznoj strani ploče. S druge strane, sustav puls-eho oslanja se na mjerenje odjeka koji je stvoren unutarnjim površinama, poput razdvajanja materijala. Pulsna tehnika koristi se za otkrivanje dubine na kojoj se pukotine nalaze, poput udara u ivericu ili dubine gdje se gomila drvene građe raspada.

### **2.7.2. METODA ISPITIVANJA ZVUČNIM TOMOGRAFOM**

Metoda koja se bazira na mjerenju vremena prolaza ultrazvučnog vala kroz drvo od momenta pobuđivanju emitera vala s jedne strane do momenta očitavanja impulsa na primatelju s druge strane i analiza vremena pomoću programa ARBOTOM.



**Slika 1. Tomograf**

## Princip rada tomografa

Zvučni tomograf je arborikulturni instrument koji mjeri brzinu prolaska zvučnih valova kroz drvo u više različitih mjesta i smjerova.

Osnovno svojstvo je da služi za preciznu procjenu statike stabla s obzirom na prometnu sigurnost, a cilj je otkrivanje truleži ili šupljina unutar stabla.

Brzina ultrazvuka u krutom mediju zavisi 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)

$\rho$  – gustoća materijala

$E$  – modulelastičnost materijala

## 2.8. UPOTREBA ULTRAZVUČNIH TEHNIKA U KOMERCIJALNE SVRHE

Industrijsko drvo se obično umjetno suši nakon sječe. Proces sušenja je često vrlo dugotrajan i troši veliku količinu energije, međutim, neprimjeren raspored sušenja može uzrokovati oštećenja u drvu. Predobrade poput ultrazvuka pokazuju potencijal smanjenja vremena sušenja drva bez utjecaja na kvalitetu. Predobrade su izvedene pri intenzitetu ultrazvuka od  $10 \text{ Wcm}^{-2}$  i frekvencijama od 28 i 40 kHz, odnosno za 30, 60 i 90 min, zatim prethodno obrađeni uzorci su sušeni na temperaturi  $40^\circ \text{C}$  pod apsolutnim tlakom od 0,08 MPa. Rezultati su pokazali da je ultrazvučna obrada skratila vrijeme sušenja drva vakuumom, povećala efektivnu difuzivnost vode, otvorila kanale vode, razložila ekstrakte drva i smanjila sadržaj hidroksila. U stvari, ultrazvučna obrada može se primijeniti za uspješno smanjenje vremena sušenja drva. (Zhengbin He i suradnici, 2016.g)

Karte u poprečnom presjeku stabljike Bukve, konjskog kestena i Norveškog javora na koje je utjecao *Ganoderma adspersum* (Schulz) Donk, *Pleurotus ostreatus* (Jaquin: Fr.) Kumm i *Kretzschmaria deusta* (Hoffm.: P. Martin) (*Ustulina deusta* (Fr.



Petrak), odnosno gljivično propadanje dobiveno je iz živih stabala. Izgrađene su zone izmjenjene gustoće svježe i suhe tvari, koje su u usporedbi s Picus® akustičnim tomogramima istih presjeka. Prikazane studije pokazuju da se unutar presjeka uzorka zona raspada može točno odrediti prema njegovoj veličini i umjereno točno prema položaju. Oblik presjeka uzorka utječe na točnost akustičnog tomograma. Dakle, što je veće odstupanje od kružnog obrisa, lošija je točnost. Isto tako, broj senzora prirodno utječe na točnost. Propadanje drva uzrokovano *Kretzschmaria deusta* može se otkriti Picus® akustičnim tomografom. Rezolucija tomograma i dalje je vrijedna poboljšanja jer reakcijske zone još uvijek ne mogu biti predstavljene, usprkos velikoj gustoći. Iako se može poboljšati u nekim aspektima, Picus® akustični tomograf trenutno nudi vrlo dobru dijagnostičku procjenu stanja stabala i, prema tome, njihovu otpornost na lom. (C. Rabe i suradnici, 2004.g).

### 3. CILJ RADA

Ciljevi ovog rada su:

1. ispitati utjecaj gustoće drva na brzinu širenja ultrazvuka kroz drvo,
2. ispitati ima li razlike u brzini širenja ultrazvuka kroz drvo u različitim smjerovima.

Na temelju ispitivanja dobiveni rezultati će biti doprinos stvaranju baze podataka pomoću koje će se utvrđivati kvaliteta i gustoća određenih vrsta drva u upotrebi.

### 4. MATERIJALI I METODE

#### 4.1. Materijali

Za ispitivanje brzine ultrazvuka u drvu odabrane su sljedeće vrste drva:

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

Drvo bukve je nehomogen, anizotropan, porozan, vlaknast i higroskopian materijal sastavljen od celuloze (40-50%), lignina (25-30%), drvnih polioza (20-30%) i

popratnih tvari (smole, minerala, i dr.). Svojstva drva odraz su njegovog prirodnog porijekla, tj. građe.

Drvo bukve dobar je vodič zvuka, a njegova akustično-rezonancijska svojstva čine ga nezamjenjivim materijalom za izradu glazbala. Ploče izrađene od drva drugačije provode zvuk i mogu poslužiti kao zvučna izolacija.

**Tablica 1. Obična bukva (*Fagus sylvatica*,L.)**

| 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.)**

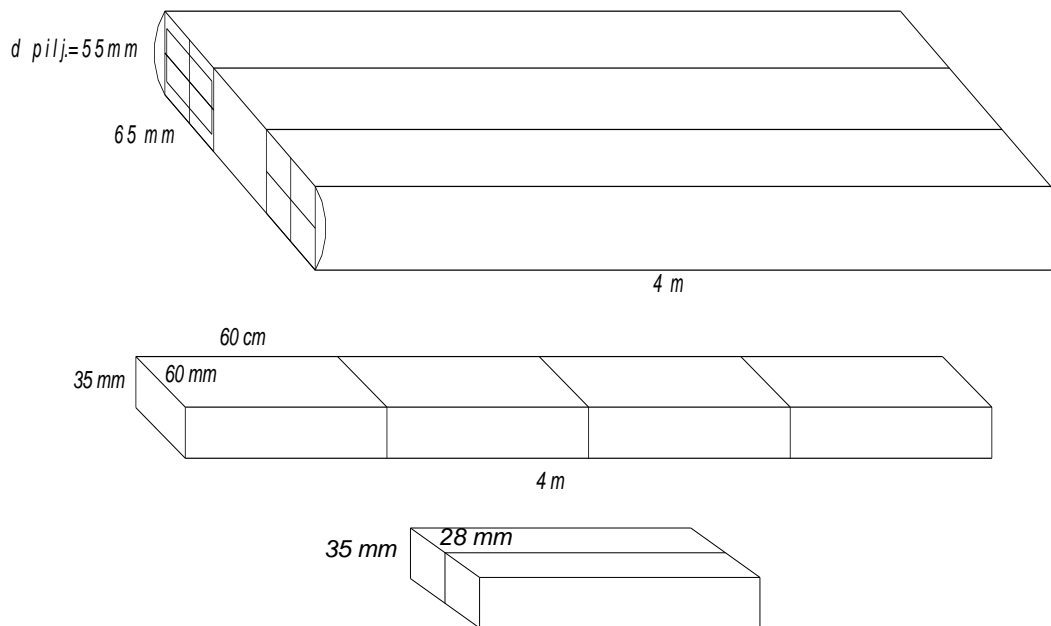
Drvo običnog bora se upotrebljava za proizvodnju rezanog i ljuštenog furnira, za proizvodnju furnirskih ploča i za furniranje iverica. Drvo se upotrebljava za proizvodnju vrata i prozora, za proizvodnju podova i krovnih konstrukcija i kao takvo dobar je materijal za ispitivanje, zbog njegovih dobrih svojstava i jako široke primjene.

**Tablica 2. Obični bor (*Pinus sylvestris*, L.)**

| Svojstvo                                | Minimalna vrijednost | Srednja vrijednost | Maksimalna vrijednost |
|---|----------------------|--------------------|-----------------------|
| Gustoća, $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]    | 0,30                 | 0,49               | 0,86                  |
| Utezanje, $\alpha$ [%]                  |                      |                    |                       |
| - radialno                              |                      | 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                 |                       |

#### 4.2.1. IZRADA I OZNAČAVANJE UZORAKA

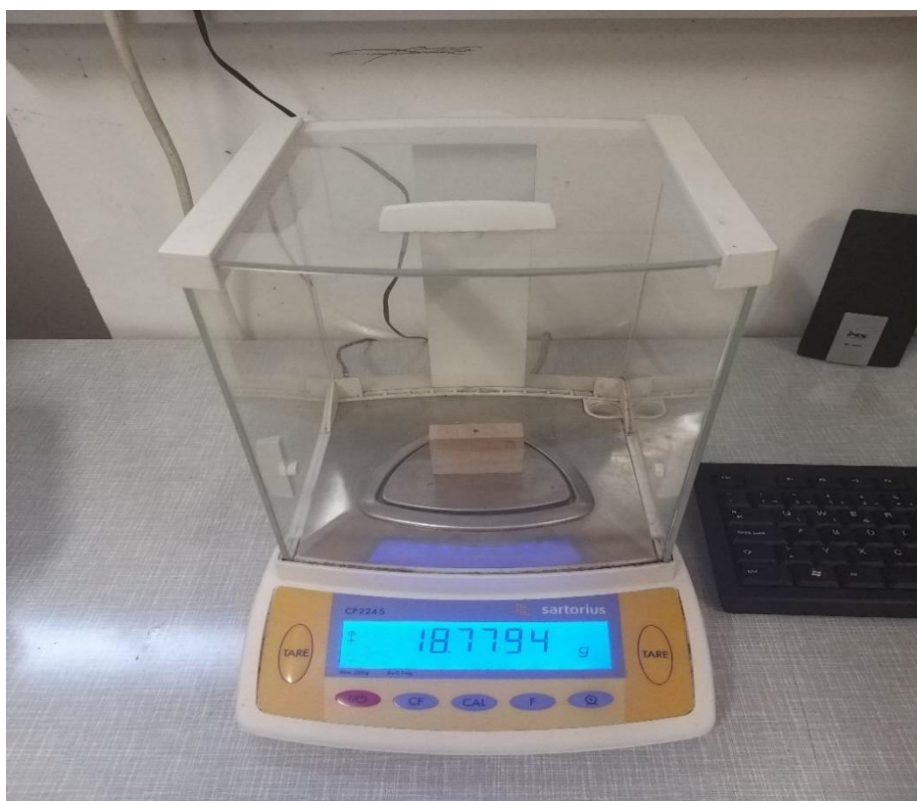
Iz prirodno prosušanih, te naknadno u sušari dosušanih piljenica ispiljene su letve debljine 55 mm, širine 65 mm i dužine 4 m. Iz svake pojedine letve ispiljena su, a potom fino blanjana i iskrojena, po 4 elementa debljine 35 mm, širine 60 mm i dužine 600 mm (slika 2). Bukovina je piljena u zoni tik ispod kore dok je borovina piljena tik ispod bijeljike. Nakon modifikacije elemenata, ispiljene su i fino blanjane dvije letvice na dimenziju poprečnog presjeka 20 × 20 mm, a potom su uzorci ispiljeni na kružnoj pili jedan za drugim na točnu dimenziju (R×T×L) 46×46×14 mm ±0,2 mm, selektirani, grupirani i označeni. Svaki konačni uzorak ima izbušene rupice promjera 3 mm i dubine 5,5 mm sa sve četiri strane (debljine) uzorka.



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

#### 4.2.2. REDOSLIJED SLAGANJA UZORAKA

Uzorci su označeni brojevima te grupirani po geometrijski pravilnom odnosno nepravilnom slaganju godova kod obje vrste drva (obična bukva i obični bijeli bor). Uzorke koji su imali približno paralelne godove s obzirom na tangencijalni smjer su se izdvojili te koristili u daljnjim fazama istraživanja. Svi izdvojeni uzorci su izvagani na digitalnoj vagi (slika 3. ) s točnošću mjerenja na 4 decimale te su izmjerene dimenzije širine, visine i debljine uzoraka pomoću digitalne pomične mjerke (slika 4.).



**Slika 3. Prikaz vage**



**Slika 4. Prikaz pomičnog mjerila**

## 4.3. METODE

### 4.3.1. SORTIRANJE UZORAKA ZA ISPITIVANJE

Izračunate su gustoće svih odabranih uzoraka te su prema tim gustoćama uzorci sortirani u tri grupe: maksimalna gustoća (Ro max), srednja gustoća (Ro sred.) te minimalna gustoća (Ro min) od svake vrste drva.

Iz svake grupe gustoća je odabran određen broj odgovarajućih uzoraka za daljnje ispitivanje kako je prikazano na slici 5.

Ispitivanja su se obavljala na u slijedećim uvjetima:

- Sušenje uzoraka na 0% sadržaja vode

| Ro min      |     |     |         |                 |                   |       | Ro sred     |          |     |     |                 |                   |       | Ro max      |       |          |          |                 |                   |     |         |       |       |       |          |          |
|-------------|-----|-----|---------|-----------------|-------------------|-------|-------------|----------|-----|-----|-----------------|-------------------|-------|-------------|-------|----------|----------|-----------------|-------------------|-----|---------|-------|-------|-------|----------|----------|
| broj uzorka | R x | T x | L x     | V x             | Ro x              |       | broj uzorka | R x      | T x | L x | V x             | Ro x              |       | broj uzorka | R x   | T x      | L x      | V x             | Ro x              |     |         |       |       |       |          |          |
| g           | mm  | mm  | mm      | cm <sup>3</sup> | g/cm <sup>3</sup> |       | g           | mm       | mm  | mm  | cm <sup>3</sup> | g/cm <sup>3</sup> |       | g           | mm    | mm       | mm       | cm <sup>3</sup> | g/cm <sup>3</sup> |     |         |       |       |       |          |          |
| 1           | 1   | 9   | 19.6021 | 46.21           | 46.13             | 14.52 | 30.95181    | 0.63331  |     |     |                 |                   |       |             |       |          |          |                 |                   |     |         |       |       |       |          |          |
| 10          | 10  | 170 | 17.983  | 46.01           | 46.25             | 13.89 | 29.5574     | 0.60849  | 10  | 10  | 33              | 19.3823           | 46.16 | 46          | 13.93 | 29.5784  | 0.655206 | 10              | 10                | 18  | 20.2981 | 46.18 | 46.26 | 14.32 | 30.59163 | 0.663518 |
| 19          | 19  | 187 | 18.1278 | 46.02           | 46.99             | 13.87 | 29.3553     | 0.617531 | 19  | 19  | 44              | 19.8501           | 46.32 | 46.16       | 14.28 | 30.53251 | 0.65013  | 19              | 19                | 43  | 19.7789 | 46.22 | 46.26 | 14.01 | 29.9553  | 0.660208 |
| 28          | 28  | 210 | 17.9377 | 46.37           | 46.32             | 13.98 | 30.02706    | 0.597384 | 28  | 28  | 85              | 19.6443           | 46.11 | 46.41       | 14.06 | 30.08791 | 0.652897 | 28              | 28                | 57  | 20.737  | 46.2  | 46.27 | 14.12 | 30.18396 | 0.687021 |
| 37          | 37  | 228 | 17.9131 | 46.09           | 46.14             | 13.81 | 29.36824    | 0.609948 | 37  | 37  | 103             | 19.6055           | 46.12 | 46.22       | 13.94 | 29.71543 | 0.659775 | 37              | 37                | 73  | 20.6036 | 46.17 | 46.16 | 14.1  | 30.05002 | 0.685643 |
| 54          | 54  | 260 | 17.9673 | 46.33           | 46.19             | 13.77 | 29.46756    | 0.609731 | 54  | 54  | 155             | 19.2321           | 46.14 | 46.22       | 13.91 | 29.66434 | 0.648324 | 54              | 54                | 102 | 19.9644 | 46.1  | 46.14 | 14.12 | 30.034   | 0.664727 |
| 63          | 63  | 270 | 18.2199 | 46.14           | 46.1              | 13.97 | 29.71494    | 0.613156 | 63  | 63  | 172             | 19.4161           | 46.15 | 46.32       | 13.94 | 29.79009 | 0.651567 | 63              | 63                | 113 | 20.635  | 46.29 | 46.2  | 14.11 | 30.17562 | 0.688383 |
| 72          | 72  | 281 | 18.4928 | 46.46           | 46.36             | 14.16 | 30.49902    | 0.606341 | 72  | 72  | 196             | 19.5308           | 46.18 | 46.3        | 14.17 | 30.29736 | 0.644637 | 72              | 72                | 138 | 20.1345 | 46.12 | 46.17 | 13.93 | 29.66199 | 0.678798 |
| 81          | 81  | 292 | 18.0892 | 46.25           | 46.46             | 13.97 | 30.01839    | 0.602604 | 81  | 81  | 227             | 18.8449           | 46.2  | 46.26       | 13.37 | 28.57452 | 0.6595   | 81              | 81                | 166 | 18.9323 | 46.17 | 46.15 | 13.41 | 28.5733  | 0.662587 |
| 90          | 90  | 302 | 18.0833 | 46.58           | 46.12             | 14.09 | 30.26912    | 0.597417 | 90  | 90  | 297             | 18.6553           | 46.26 | 46.31       | 13.23 | 28.34264 | 0.658206 | 90              | 90                | 259 | 19.2167 | 46.16 | 46.43 | 13.49 | 28.91189 | 0.664664 |
| 2           | 2   | 61  | 19.8322 | 46.14           | 46.43             | 14.92 | 31.96282    | 0.620477 | 2   | 2   | 8               | 20.0122           | 46.33 | 46.08       | 14.28 | 30.48618 | 0.656435 | 2               | 2                 | 2   | 19.8648 | 46.12 | 46.12 | 13.95 | 29.67241 | 0.66947  |
| 11          | 11  | 171 | 18.0102 | 45.97           | 45.98             | 13.87 | 29.31703    | 0.614326 | 11  | 11  | 34              | 19.4669           | 46.35 | 46.03       | 14.08 | 30.03955 | 0.648042 | 11              | 11                | 20  | 19.9395 | 46.17 | 46.24 | 14.01 | 29.9096  | 0.666651 |
| 20          | 20  | 188 | 18.3424 | 45.99           | 46.1              | 13.95 | 29.57594    | 0.62018  | 20  | 20  | 47              | 19.2715           | 46.2  | 46.18       | 14.03 | 29.93323 | 0.643816 | 20              | 20                | 45  | 19.9719 | 46.1  | 46.1  | 13.79 | 29.21765 | 0.663556 |
| 29          | 29  | 211 | 17.9466 | 46.21           | 46.35             | 13.93 | 29.83574    | 0.601513 | 29  | 29  | 86              | 19.1257           | 46.08 | 46.19       | 13.9  | 29.58255 | 0.646461 | 29              | 29                | 58  | 20.259  | 46.28 | 46.2  | 14.07 | 30.08357 | 0.673424 |
| 38          | 38  | 229 | 18.2067 | 46.1            | 46.25             | 14    | 29.84975    | 0.609945 | 38  | 38  | 109             | 19.6777           | 46.15 | 46.21       | 14.14 | 30.15404 | 0.652555 | 38              | 38                | 75  | 20.2286 | 46.36 | 46.18 | 14.12 | 30.22958 | 0.669166 |
| 53          | 53  | 257 | 17.8684 | 45.98           | 46.24             | 13.67 | 29.06399    | 0.614795 | 53  | 53  | 154             | 19.0811           | 46.13 | 46          | 13.83 | 29.34698 | 0.650189 | 53              | 53                | 101 | 20.2205 | 46.29 | 46.28 | 14.05 | 30.09933 | 0.671792 |
| 62          | 62  | 269 | 18.2915 | 46.15           | 46.47             | 14.02 | 30.06716    | 0.608355 | 62  | 62  | 168             | 19.3809           | 46.11 | 46.23       | 14.11 | 30.0778  | 0.644359 | 62              | 62                | 112 | 20.3954 | 46.28 | 46.31 | 14.09 | 30.19807 | 0.675388 |
| 71          | 71  | 280 | 18.2264 | 46.22           | 46.4              | 14.02 | 30.0674     | 0.606185 | 71  | 71  | 189             | 19.2522           | 46.1  | 46.18       | 14    | 29.80457 | 0.645948 | 71              | 71                | 134 | 20.3102 | 46.12 | 46.25 | 13.86 | 29.56407 | 0.686989 |
| 80          | 80  | 290 | 18.2279 | 46.41           | 46.14             | 14.07 | 30.1289     | 0.604997 | 80  | 80  | 225             | 18.8873           | 45.92 | 46.57       | 13.48 | 28.8269  | 0.655197 | 80              | 80                | 147 | 20.5206 | 46.19 | 46.41 | 14.01 | 30.03293 | 0.683217 |
| 89          | 89  | 301 | 18.1755 | 46.15           | 46.15             | 14.06 | 29.9453     | 0.606957 | 89  | 89  | 268             | 18.8079           | 46.28 | 46.41       | 13.45 | 28.88865 | 0.651048 | 89              | 89                | 258 | 18.69   | 45.95 | 46.14 | 13.35 | 28.30378 | 0.660336 |
| 3           | 3   | 63  | 19.4444 | 46.23           | 46.04             | 14.24 | 30.30883    | 0.641542 | 3   | 3   | 10              | 19.7094           | 46.27 | 46.23       | 14.01 | 29.96826 | 0.657676 | 3               | 3                 | 4   | 20.9533 | 46.19 | 46.12 | 14.81 | 31.54949 | 0.664141 |
| 12          | 12  | 176 | 17.8174 | 46.09           | 45.88             | 13.92 | 29.43536    | 0.605306 | 12  | 12  | 35              | 19.7987           | 46.21 | 46.43       | 13.99 | 30.01597 | 0.659606 | 12              | 12                | 22  | 19.981  | 46.16 | 46.16 | 14.03 | 29.89436 | 0.668387 |
| 21          | 21  | 190 | 19.0392 | 46.02           | 46.26             | 13.93 | 29.65537    | 0.642015 | 21  | 21  | 52              | 19.5918           | 46.34 | 46.25       | 14.19 | 30.41236 | 0.644205 | 21              | 21                | 46  | 19.8175 | 46.15 | 46.2  | 14    | 29.84882 | 0.663907 |
| 30          | 30  | 212 | 17.9456 | 46.12           | 46.21             | 13.97 | 29.77294    | 0.602749 | 30  | 30  | 87              | 19.4093           | 46.2  | 46.16       | 14.16 | 30.1975  | 0.642745 | 30              | 30                | 59  | 20.5316 | 46.34 | 46.12 | 14.07 | 30.07042 | 0.682784 |
| 39          | 39  | 230 | 18.1006 | 46.18           | 46.36             | 14.05 | 30.07971    | 0.601754 | 39  | 39  | 123             | 19.3836           | 46.1  | 46.56       | 14.06 | 30.17861 | 0.642296 | 39              | 39                | 76  | 20.5421 | 46.19 | 46.17 | 14.08 | 30.0269  | 0.684123 |
| 52          | 52  | 255 | 17.8628 | 46.2            | 46.32             | 13.67 | 29.25358    | 0.610619 | 52  | 52  | 153             | 19.1326           | 46.25 | 46.04       | 13.94 | 29.68314 | 0.644561 | 52              | 52                | 98  | 20.0093 | 46.31 | 46.21 | 14.04 | 30.04539 | 0.665969 |
| 61          | 61  | 267 | 18.0673 | 46.24           | 46.31             | 13.87 | 29.70086    | 0.608309 | 61  | 61  | 167             | 19.1191           | 46.46 | 46.33       | 13.59 | 29.25236 | 0.653592 | 61              | 61                | 111 | 20.5702 | 46.27 | 46.37 | 14.08 | 30.27357 | 0.679477 |
| 70          | 70  | 279 | 18.2756 | 46.27           | 46.19             | 13.98 | 29.87821    | 0.611667 | 70  | 70  | 186             | 18.7701           | 46.11 | 46.25       | 13.38 | 28.53402 | 0.657815 | 70              | 70                | 130 | 20.1668 | 46.14 | 46.07 | 13.95 | 29.65309 | 0.680091 |
| 79          | 79  | 289 | 18.1598 | 46.13           | 46.15             | 14.09 | 29.99519    | 0.605403 | 79  | 79  | 219             | 19.899            | 46.16 | 46.3        | 14.11 | 30.156   | 0.659869 | 79              | 79                | 145 | 19.9938 | 46.16 | 46.18 | 13.96 | 29.7581  | 0.671878 |
| 88          | 88  | 300 | 17.9442 | 46.17           | 46.17             | 13.9  | 29.6302     | 0.605605 | 88  | 88  | 254             | 18.7978           | 46.12 | 46.53       | 13.31 | 28.56278 | 0.658122 | 88              | 88                | 250 | 19.7944 | 46.25 | 46.2  | 14.01 | 29.93587 | 0.661227 |

Slika 5. Prikaz sortiranja uzoraka prema gustoćama

### 4.3.2. Mjerenje širine godova i određivanje srednje širine goda na uzorcima bukovine i borovine

Iz svake je grupe uzoraka odabran statistički uzorak (manji broj) uzoraka kojima su se mjerile širine godova u strogo radijalnom smjeru (liniji). Mjerenje je vršeno ručno pomoću mjerne lupe povećanja 5 × i preciznosti očitavanja od 0,1 mm. 4.3.3. KONDICIONIRANJE UZORAKA

Prvo su pripremljene otopine soli u laboratorijskim kadicama u koje se ulila destilirana voda, a potom dodavala sol uz stalno miješanje do trenutka kad je u otopini ostalo neotopivog taloga soli. Prije pripreme otopine, kadice su se oprale i dodatno isprale destiliranom vodom. Uzorci su stavljeni u sušionik (slika 6.) na temperaturu od 30 °C.

Kadice s otopinom su postavljene na dno sušionika kako bi se ostvarilo kondicioniranje uzoraka do određenog sadržaja vode.

Ravnotežni sadržaj vode u drvu nakon kondicioniranja otopine izračunavao se prema slijedećem izrazu (2):

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

pri čemu je:

$U_r$  – ravnotežni sadržaj vode u drvu nakon kondicioniranja,

$m_k$  – masa uzorka nakon kondicioniranja,

$m_0$  – masa apsolutno suhog uzorka prije postupka kondicioniranja.



**Slika 6.** Sušionik s uzorcima koji je ujedno služio i kao klima komora za kondicioniranje uzoraka

#### 4.3.4.MJERENJE BRZINE PROLASKA ZVUKA KROZ UZORKE DRVA ZVUČNIM TOMOGRAFOM



Slika 7. Tomograf

##### 4.3.4.1. Princip rada tomografa

Zvučni tomogram je arborikulturni instrument koji mjeri brzinu prolaska zvučnih valova kroz drvo u više različitih mjesta i smjerova.

Osnovno svojstvo je da služi za preciznu procjenu statike stabla s obzirom na prometnu sigurnost, a cilj je otkrivanje truleži ili šupljina unutar stabla.

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

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

$v$  – brzina zvučnog vala (m/s)

$\rho$  – gustoća materijala

$E$  – modul elastičnosti materijala



#### 4.3.4.2. Dijelovi zvučnog tomografa

Komplet zvučnog tomografa ARBOTOM sastoji se od:

- senzora
- baterijske jedinice
- punjača
- kabela za spajanje senzora
- glavnog kabela (za baterijsku jedinicu i 1. senzor)
- dodataka: čavlići za senzore, čekić, kliješta
- kabelaška veza za računalo i baterijsku jedinicu (postoji mogućnost bežične veze)



Slika 8. Prikaz dijelova zvučnog tomografa

### 4.3.4.3. Program ARBOTOM

Uređaj radi na način da bilježi podatke koje snima ARBOTOM uređaj i prikazuje ih u obliku matrice, linije ili površinskog grafa. Program je također osmišljen da sprema sva mjerenja te ih je po potrebi moguće i ispisati na pisaču.

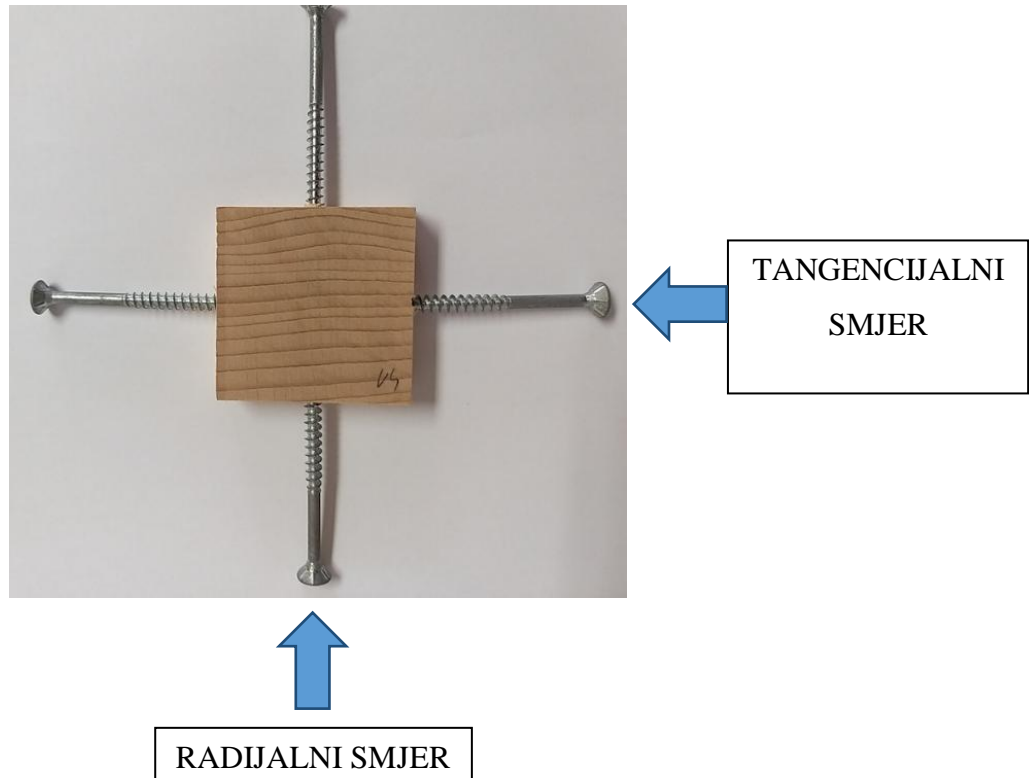
Vrste podataka koje se bilježe su niže navedene:

- pozicije senzora
- udaljenosti
- vrijeme putovanja zvučnog impulsa
- brzine
- postotne pogreške izmjere

| Sensor | 1 | 2   |
|--------|---|-----|
| 1      |   | 339 |
| 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      |   | 338 |
| 1      |   | 340 |
| 1      |   | 332 |
| 2      |   | 387 |
| 2      |   | 395 |
| 2      |   | 388 |
| 2      |   | 388 |
| 2      |   | 388 |
| 2      |   | 383 |
| 2      |   | 378 |
| 2      |   | 383 |
| 2      |   | 361 |
| 2      |   | 388 |
| 2      |   | 381 |
| 2      |   | 385 |
| 2      |   | 379 |
| 2      |   | 381 |
| 2      |   | 382 |
| 2      |   | 384 |

**Slika 9.** Prikazuje rezultate prilikom mjerenja udaranja na senzor 1 i senzor 2

Svaki od odabranih vrsta uzoraka je stavljen na postolje (slika 11.) te je ispitan zvučnim tomografom u radijalnom i tangencijalnom smjeru (slika 10.). Od svake gustoće (maksimalna, srednja, minimalna) su pomno odabrani uzorci te ispitivani na malo prije spomenutom uređaju.



**Slika 10.** Prikaz uzorka za ispitivanje sa označenim smjerovima

Uzorak je pričvršćen na dva senzora i brzina prolaza zvuka je ispitivana s jednog senzora na drugi i obrnuto kako bi se dobili pravilni i vjerodostojni podaci za daljnju razradbu (slika 11.). Kod radijalnog smjera uzorci su mjereni tako da su im godovi okrenuti od srca prema kori u odnosu na senzor koji je pričvršćen na uzorak. Na svakom uzorku gdje je napravljena rupica je stavljen vijak do dubine 8 mm odnosno na svakom uzorku su se uvila po četiri vijka na koja se se pričvršćivali senzori za ispitivanje.



Slika 11. Ispitivanje uzoraka

#### 4.3.4.4. Izračun brzine prolaska uzv kroz ispitne uzorke

Rezultati su razvrstani po grupama ovisno o gustoći, sadržaju vode i smjeru ispitivanja (tangencijalni ili radijalni smjer). Dobiveni su rezultati u mikrosekundama ( $\mu\text{s}$ ) i kao takvi morali su se pretvoriti u m/s po formuli (4):

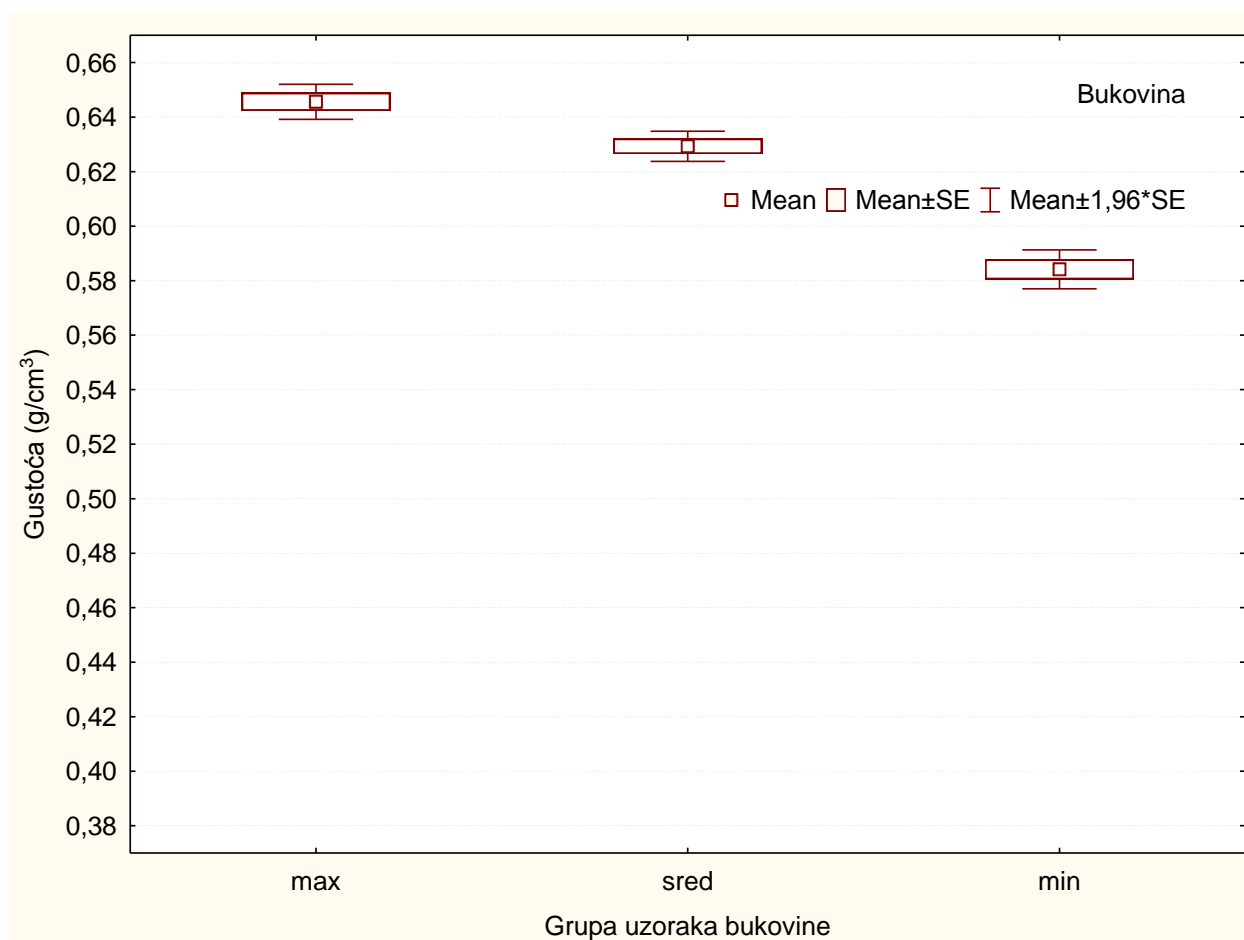
$$v = (d/1000) / (t_u/1000000) \quad (4)$$

gdje je  $v$ -brzina ultrazvuka u m/s,  $d$  je put koji ultrazvuk prođe od senzora 1 do 2, a  $t_u$  je vrijeme potrebno da ultrazvuk prođe od senzora 1 (2) do 2 (1) izraženo u mikro sekundama ( $\mu\text{s}$ ).

## 5. REZULTATI I RASPRAVA

### 5.1. Gustoća drva

Statističkom analizom gustoće bukovih uzoraka grupiranih u tri odvojene grupe utvrđeno je da statistički značajne razlike u gustoći u apsolutno suhom stanju između sve tri grupe uzoraka ima (slika 12; tablica 3). Maksimalna skupina grupe uzoraka bukovine ima srednju gustoću 0,646 g/cm<sup>3</sup>, srednja skupina grupe uzoraka ima 0,629 g/cm<sup>3</sup> dok minimalna skupina grupe uoraka ima srednju gustoću 0,584 g/cm<sup>3</sup>.

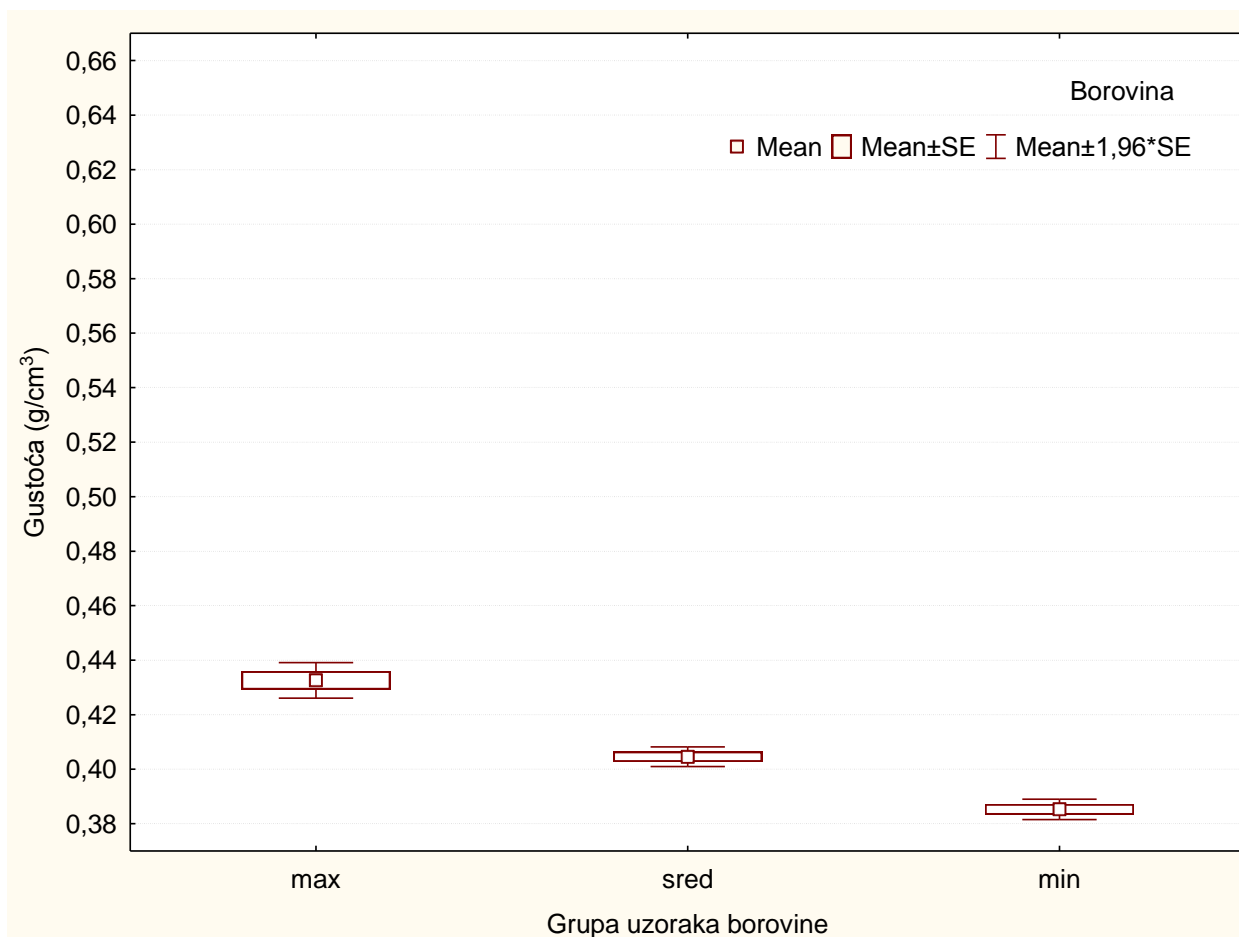


**Slika 12.** Gustoća uzorka bukovine u apsolutno suhom stanju

**Tablica 3.** Scheffe test razlike gustoće odabranih grupa uzoraka bukovine.

|                       |     | Scheffe Test; Variable: Gustoća (g/cm <sup>3</sup> ) (Bukovina RO 0 - gustoća) |          |          |
|-----------------------|-----|--|----------|----------|
|                       |     | Marked differences are significant at p < ,05000                               |          |          |
|                       |     | {1}  | {2}      | {3}      |
| Grupa uzoraka bukovin |     | M=,64561   | M=,62929 | M=,58414 |
| max                   | {1} |  | 0,00594  | 0,00000  |
| sred                  | {2} | 0,00594  |          | 0,00000  |
| min                   | {3} | 0,00000  | 0,00000  |          |

Statističkom analizom gustoće borovih uzoraka grupiranih u tri odvojene grupe utvrđeno je da statistički značajne razlike u gustoći u apsolutno suhom stanju između sve tri grupe uzoraka ima (slika 13; tablica 4.) Maksimalna skupina grupe uzoraka borovine ima srednju gustoću 0,433 g/cm<sup>3</sup>, srednja skupina grupe uzoraka ima 0,405 g/cm<sup>3</sup> dok minimalna skupina grupe uoraka ima srednju gustoću 0,385 g/cm<sup>3</sup>.



**Slika 13.** Gustoća uzorka borovine u apsolutno suhom stanju

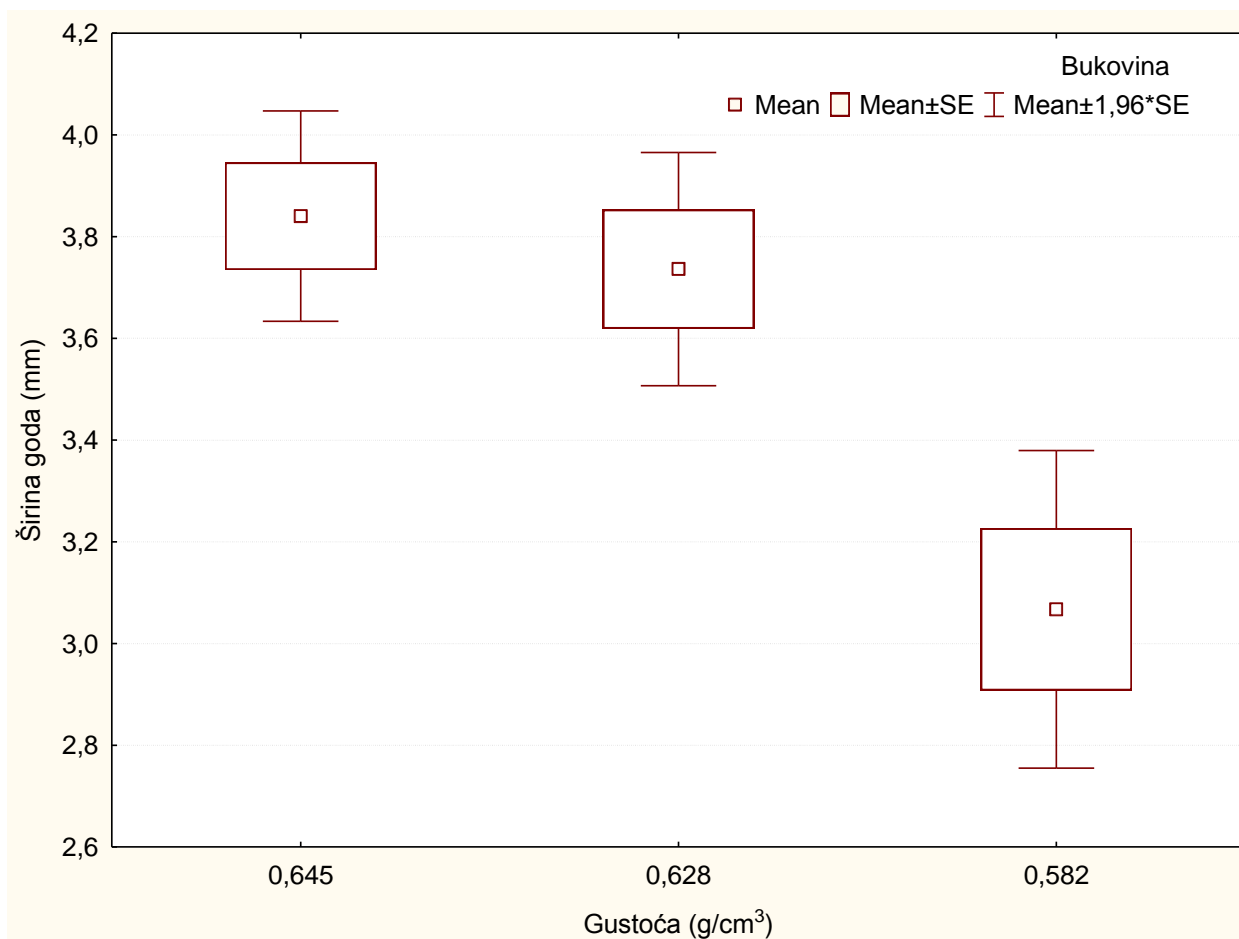
**Tablica 4.** Scheffe test razlike gustoće odabranih grupa uzoraka borovine.

|                       |     | Scheffe Test; Variable: Gustoća (g/cm <sup>3</sup> ) (Borovina RO 0 - gustoc.<br>Marked differences are significant at p < ,05000 |          |          |
|-----------------------|-----|---|----------|----------|
|                       |     | {1}   | {2}      | {3}      |
| Grupa uzoraka borovin |     | M=,43261  | M=,40459 | M=,38526 |
| max                   | {1} |   | 0,00000  | 0,00000  |
| sred                  | {2} | 0,00000   |          | 0,00003  |
| min                   | {3} | 0,00000   | 0,00003  |          |

## 5.2. Širina goda

Grupa uzoraka najveće gustoće (0,645 g/cm<sup>3</sup>) imala je prosječno najširi god (3,84 mm). Grupa uzoraka srednje gustoće (0,628 g/cm<sup>3</sup>) imala je godove prosječne širine 3,74 mm, a grupa uzoraka najmanje gustoće (0,582 g/cm<sup>3</sup>) imala je prosječnu širinu goda od 3,07 mm. Iako uzorci najveće gustoće imaju i prosječno najširi god, statistički značajne razlike u širini godova između grupe uzoraka najveće gustoće i grupe uzoraka srednje gustoće nema. Značajne razlike u širini goda između grupa uzoraka s najvišom i najmanjom gustoćom ima, kao i između grupa uzoraka sa srednjom i najmanjom gustoćom (slika 14, tablica 5).

S obzirom da je bukovina difuzno porozna listača, granica zone kasnog drva unutar goda se ne vidi jasno i ne može se s potpunom sigurnošću odrediti. Iz tog razloga porastom širine goda ne može se sa sigurnošću utvrditi da li učešće zone kasnog drva u godu raste ili opada, zato nema ni pravilnosti da porastom širine goda raste i gustoća drva.



**Slika 14.** Širine godova bukovih uzoraka različitih gustoća

**Tablica 5.** Scheffe test značajnosti razlike širine goda bukovine različite gustoće

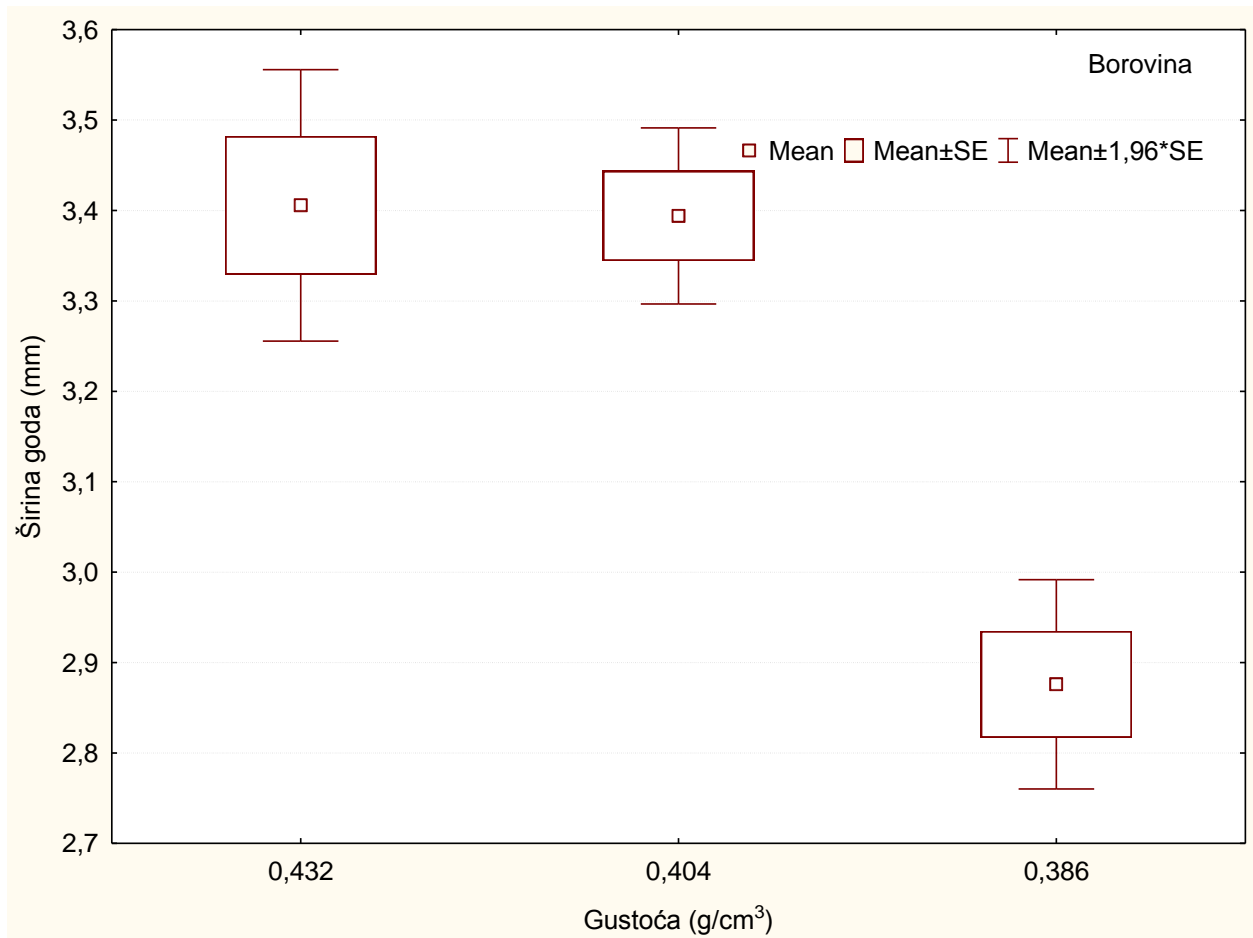
| Scheffe Test; Variable: Širina goda (mm) (Bukovina širina) |          |          |          |
|--|----------|----------|----------|
| Marked differences are significant at p < ,05000           |          |          |          |
| Gustoća (g/cm <sup>3</sup> )                               | {1}      | {2}      | {3}      |
| 0,645  | M=3,8404 | M=3,7362 | M=3,0671 |
| 0,628  | 0,80300  | 0,80300  | 0,00041  |
| 0,582  | 0,00041  | 0,00302  | 0,00302  |

Grupa uzoraka najveće gustoće (0,432 g/cm<sup>3</sup>) imala je prosječno najširi god (3,41 mm). Grupa uzoraka srednje gustoće (0,404 g/cm<sup>3</sup>) imala je godove prosječne širine 3,39 mm, a grupa uzoraka najmanje gustoće (0,386 g/cm<sup>3</sup>) imala je prosječnu širinu goda od 2,88 mm. Iako uzorci najveće gustoće imaju i prosječno najširi god, statistički značajne razlike u širini godova između grupe uzoraka najveće gustoće i grupe uzoraka srednje gustoće nema. Značajne razlike u širini goda između grupa



uzoraka s najvišom i najmanjom gustoćom ima, kao i između grupa uzoraka sa srednjom i najmanjom gustoćom (slika 15, tablica 6).

S obzirom da je borovina četinjača, granica zone kasnog drva unutar goda se jasno vidi i može se s potpunom sigurnošću odrediti. Iz tog razloga porastom širine goda može se sa sigurnošću utvrditi da učešće zone kasnog drva u godu raste, zato porastom širine goda raste i gustoća drva.



**Slika 15.** Širine godova borovih uzoraka različitih gustoća

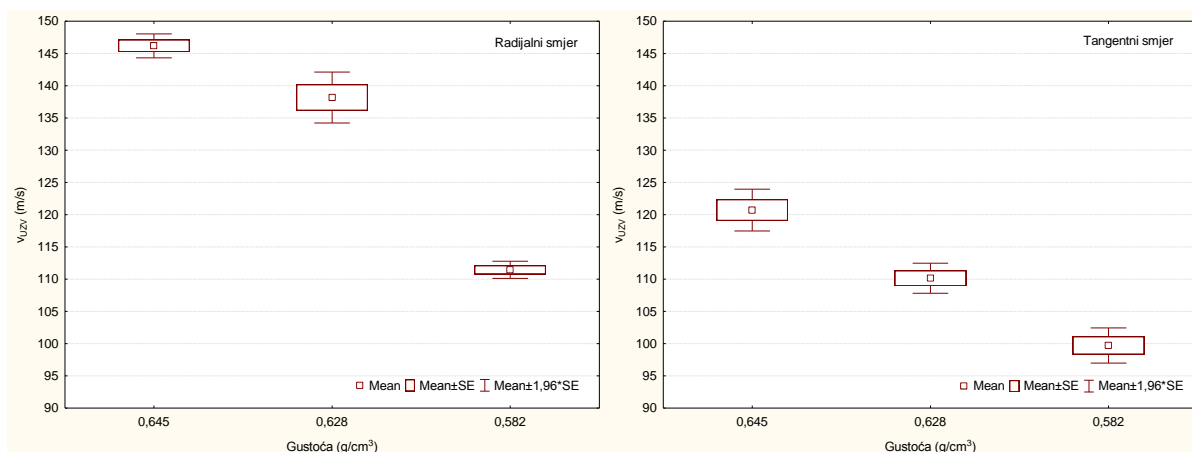
**Tablica 6.** Scheffe test značajnosti razlike širine goda bukovine različite gustoće

| Scheffe Test; Variable: Širina goda (mm) (Borovina širina) |          |          |          |
|--|----------|----------|----------|
| Marked differences are significant at $p < ,05000$         |          |          |          |
|  | {1}      | {2}      | {3}      |
| Gustoća (g/cm <sup>3</sup> )                               | M=3,4057 | M=3,3940 | M=2,8759 |
| 0,432  |          | 0,99158  | 0,00000  |
| 0,404  | 0,99158  |          | 0,00000  |
| 0,386  | 0,00000  | 0,00000  |          |

### 5.3. Brzina prolaska ultrazvuka

Poznato je da se zvuk, a tako i ultrazvuk brže širi kroz materijal veće gustoće. Grupa bukovih uzoraka najveće gustoće u radijalnom smjeru (0,645 g/cm<sup>3</sup>) imala je prosječnu brzinu ultrazvuka 146,9 m/s a grupa uzoraka najveće gustoće u tangencijalnom smjeru (0,645 g/cm<sup>3</sup>) imala je prosječnu brzinu ultrazvuka 120,72 m/s. Grupa bukovih uzoraka srednje gustoće u radijalnom smjeru (0,628 g/cm<sup>3</sup>) imala je prosječnu brzinu ultrazvuka 138,17 m/s a grupa uzoraka srednje gustoće u tangencijalnom smjeru (0,628 g/cm<sup>3</sup>) imala je prosječnu brzinu ultrazvuka 110,15 m/s. Grupa bukovih uzoraka minimalne gustoće u radijalnom smjeru (0,582 g/cm<sup>3</sup>) imala je prosječnu brzinu ultrazvuka 111,46 m/s a grupa uzoraka minimalne gustoće u tangencijalnom smjeru (0,582 g/cm<sup>3</sup>) imala je prosječnu brzinu ultrazvuka 99,73 m/s (slika 16; tablica 7 i 8).

S obzirom na rezultate mjerenja možemo utvrditi da se brzina ultrazvuka mijenja odnosno povećava se povećanjem gustoće drva. Šta je gustoća drva veća to je brzina ultrazvuka u drvu bukve veća. Vidljive su razlike i u smjeru prolaza ultrazvuka kroz drvo s obzirom na smjer drvnih vlaknaca u radijalnom smjeru brzina je veća s obzirom na tangencijalni smjer, razlika u brzini između tangencijalnog i radijalnog smjera je 8-9 %.



**Slika 16.** Brzina prolaska ultrazvuka u radijalnom (lijevo) i tangentnom (desno) smjeru kroz drvo bukve različitih gustoća pri sadržaju vode od 0 %.

**Tablica 7.** Scheffe test značajnosti razlike brzine prolaska ultrazvuka u radijalnom smjeru kroz drvo bukve različitih gustoća pri sadržaju vode od 0 %.

| Scheffe Test; Variable: $\bar{y}_v$ (m/s) (BU-uzvR o gustoci ( |          |          |          |
|--|----------|----------|----------|
| Marked differences are significant at $p < ,05000$             |          |          |          |
| Gustoća (g/cm <sup>3</sup> )                                   | {1}      | {2}      | {3}      |
|  | M=146,15 | M=138,17 | M=111,46 |
| 0,645  |          | 0,00027  | 0,00000  |
| 0,628  | 0,00027  |          | 0,00000  |
| 0,582  | 0,00000  | 0,00000  |          |

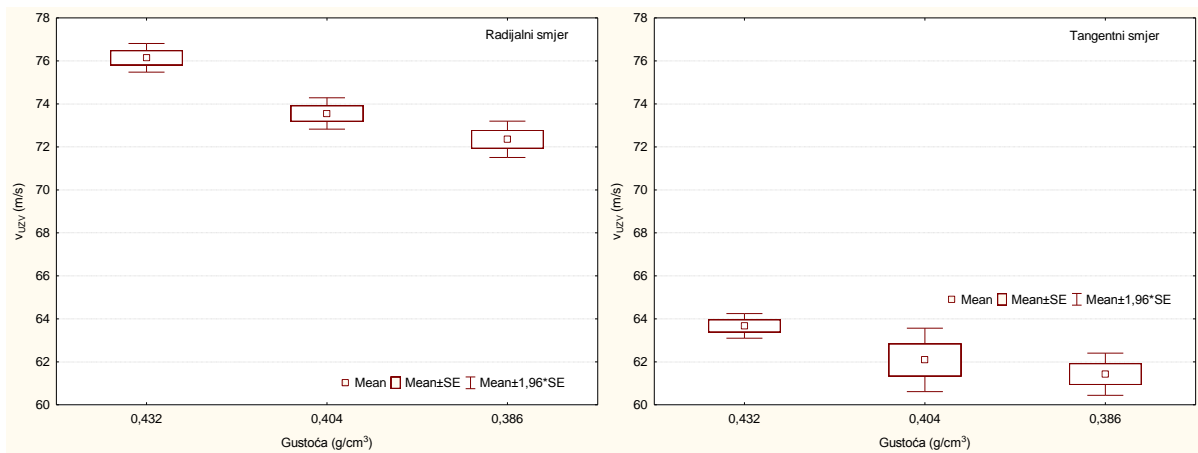
**Tablica 8.** Scheffe test značajnosti razlike brzine prolaska ultrazvuka u tangentnom smjeru kroz drvo bukve različitih gustoća pri sadržaju vode od 0 %.

| Scheffe Test; Variable: $\bar{y}_v$ (m/s) (BU-uzvT o gustoci ( |          |          |          |
|--|----------|----------|----------|
| Marked differences are significant at $p < ,05000$             |          |          |          |
| Gustoća (g/cm <sup>3</sup> )                                   | {1}      | {2}      | {3}      |
|  | M=120,72 | M=110,15 | M=99,725 |
| 0,645  |          | 0,00000  | 0,00000  |
| 0,628  | 0,00000  |          | 0,00000  |
| 0,582  | 0,00000  | 0,00000  |          |

Grupa borovih uzoraka najveće gustoće u radijalnom smjeru (0,432 g/cm<sup>3</sup>) imala je prosječnu brzinu ultrazvuka 76,15 m/s a grupa uzoraka najveće gustoće u tangencijalnom smjeru (0,432 g/cm<sup>3</sup>) imala je prosječnu brzinu ultrazvuka 63,67 m/s. Grupaborovih uzoraka srednje gustoće u radijalnom smjeru (0,404 g/cm<sup>3</sup>) imala je prosječnu brzinu ultrazvuka 73,56 m/s a grupa uzoraka srednje gustoće u tangencijalnom smjeru (0,404 g/cm<sup>3</sup>) imala je prosječnu brzinu ultrazvuka 62,09 m/s.

Grupa borovih uzoraka minimalne gustoće u radijalnom smjeru (0,386 g/cm<sup>3</sup>) imala je prosječnu brzinu ultrazvuka 72,37 m/s a grupa uzoraka minimalne gustoće u tangencijalnom smjeru (0,386 g/cm<sup>3</sup>) imala je prosječnu brzinu ultrazvuka 61,43 m/s(slika 17,tablica 9 i 10).

S obzirom na rezultate mjerenja možemo utvrditi da se brzina ultrazvuka mijenja odnosno povećava se povećanjem gustoće drva. Šta je gustoća drva veća to je brzina ultrazvuka u drvu borovine veća. Vidljive su razlike i u smjeru prolaza ultrazvuka kroz drvo s obzirom na smjer drvnih vlaknaca u radijalnom smjeru brzina je veća s obzirom na tangencijalni smjer,razlika u brzini između tangencijalnog i radijalnog smjera je 8-8.5 %.



**Slika 17.** Brzina prolaska ultrazvuka u radijalnom (lijevo) i tangencijalnom (desno) smjeru kroz drvo bijelog bora različitih gustoća pri sadržaju vode od 0 %.

**Tablica 9.** Scheffe test značajnosti razlike brzine prolaska ultrazvuka u radijalnom smjeru kroz drvo bijelog bora različitih gustoća pri sadržaju vode od 0 %.

| Scheffe Test; Variable: $v_{uzv}$ (m/s) (BO-uzvR o gustoci C) |          |          |          |
|---|----------|----------|----------|
| Marked differences are significant at $p < ,05000$            |          |          |          |
| Gustoća (g/cm <sup>3</sup> )                                  | {1}      | {2}      | {3}      |
|   | M=76,150 | M=73,550 | M=72,350 |
| 0,432   |          | 0,00000  | 0,00000  |
| 0,404   | 0,00000  |          | 0,11065  |
| 0,386   | 0,00000  | 0,11065  |          |

**Tablica 10.** Scheffe test značajnosti razlike brzine prolaska ultrazvuka u tangentskom smjeru kroz drvo bijelog bora različitih gustoća pri sadržaju vode od 0 %.

| Scheffe Test; Variable: $\bar{y}_v$ (m/s) (BO-uzvT o gustoći ( |          |          |          |
|--|----------|----------|----------|
| Marked differences are significant at $p < ,05000$             |          |          |          |
|  | {1}      | {2}      | {3}      |
| Gustoća (g/cm <sup>3</sup> )                                   | M=63,674 | M=62,090 | M=61,427 |
| 0,432  |          | 0,09679  | 0,02428  |
| 0,404  | 0,09679  |          | 0,73224  |
| 0,386  | 0,02428  | 0,73224  |          |

## 6. ZAKLJUČCI

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

- brzina ultrazvuka u drvu mijenja se s obzirom na vrstu drva, gustoću drva i smjer drvnih vlaknaca
- porastom gustoće drva povećava se i brzina zvuka u drvu
- razlika između tangencijalnog i radijalnog kretanja ultrazvuka u drvu postoji i ona je vidno različita, brzina ultrazvuka je veća u radijalnom smjeru za oko 8 % u odnosu na tangencijalni smjer.

## 7. LITERATURA

1. Beall, F.C. 1987. Fundamentals of Acoustic Emission and Acousto-Ultrasonics. Proceedings of the Sixth Nondestructive Testing of Wood Symposium, pp. 3-28. Washington State University, Pullman, WA, USA.
2. Bodig, J.1995. Quantification of Biodegradation in Poles and Piles.1996 Proceedings of the International Conference on Wood Poles and Piles. pp.337-352. Colorado State University/EDM. Fort Collins, CO, USA.
3. C. Rabe, D. Ferner, S. Fink & F. W.M.R. Schwarze (2004) Detection of decay in trees with stress waves and interpretation of acoustic tomograms
4. <https://www.arbor.tools/product/arbotom-expert-version-18-sensors/>
5. <https://www.chipoteka.hr/artikl/13360/pomicno-mjerilo-150mm-digitalno-metalno-6063447002>
6. <https://www.doccity.com/sr/akusticna-svojstva-drвета/553576/>
7. <https://www.ndt.net/article/v06n03/bodig/bodig.htm>
8. Mal, A.K. and Y. Bar-Cohen.(1988.)Ultrasonic NDE of Bonded Solids. Proceedings of the International Workshop on Nondestructive Evaluation for Performance of Civil Structures, pp. 299-308. University of Southern California, Los Angeles, CA, USA.
9. Stepinac, M., Rajčić, V., Barbalić, J. : Inspekcija i procjena stanja postojećih drvnih konstrukcija, *GRAĐEVINAR*, 69 (2017)9, str.861-873, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.1994.2017>
10. Thomson, W.T. (1981.)Theory of Vibration with Applications, Second Edition. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, USA.
11. Wegst, U.G.K.: Wood for sound, Max-Planck-Institut für Metallforschung, Germany, 2006.
12. Zhengbin He, Yu Zhang, Zhenyu Wang, Zijian Zhao & Songlin Yi (2016). Reducing wood drying time by application of ultrasound pretreatment, *Drying Technology*.