

Utjecaj vrste drva na brzinu širenja ultrazvuka kroz drvo

Domitrović, Marko

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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:108:905827>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-26**



Repository / Repozitorij:

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



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
ŠUMARSKI FAKULTET
DRVNOTEHNOLOŠKI ODSJEK**

**PREDDIPLOMSKI STUDIJ
DRVNA TEHNOLOGIJA**

MARKO DOMITROVIĆ

**UTJECAJ VRSTE DRVA NA BRZINU ŠIRENJA
ULTRAZVUKA KROZ DRVO**

ZAGREB (srpanj, 2020.)

PODACI O ZAVRŠNOM RADU

AUTOR:	Marko Domitrović 29.04.1993. 0130264690
NASLOV:	Utjecaj vrste drva na brzinu širenja ultrazvuka kroz drvo
PREDMET:	Zaštita drva II
MENTOR:	izv. prof. dr. sc. Marin Hasan
IZRADU RADA JE POMAGAO:	doc. dr. sc. Vinko Paulić
RAD JE IZRAĐEN:	Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet, Zavod za znanost o drvu
AKAD.GOD:	2019./2020.
DATUM OBRANE:	10.07.2020.
RAD SADRŽI:	Stranica: 26 Slika: 17 Tablica: 14 Navoda literature: 12
SAŽETAK:	<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 gustoće drva na brzinu širenja ultrazvuka kroz drvo. U radu se mjeri i uspoređuje brzina prolaska ultrazvuka kroz dvije različite vrste drva različitih gustoća.</p> <p>Dobiveni rezultati pokazuju da se brzina ultrazvuka u drvu mijenja s obzirom na vrstu drva, gustoću drva i smjer kojim se kroz drvo širi; porastom gustoće drva proporcionalno se povećava i brzina prolaska ultrazvuka kroz drvo; brzina ultrazvuka u radijalnom i tangentnom smjeru pri sadržaju vode od 0% je veća kod bukovine u odnosu na borovinu 1,5 – 2 puta; brzina ultrazvuka u radijalnom i tangentnom smjeru pri sadržaju vode od 11% je veća kod bukovine u odnosu na borovinu za 1,7 – 1,9 puta.</p> <p>Ovaj rad je svojevrsni doprinos stvaranju baze podataka za buduće određivanje korekcijskih vrijednosti pri ultrazvučnom određivanju zdravosti drva.</p>

	IZJAVA O IZVORNOSTI RADA	OB ŠF 05 07
		Revizija: 1
		Datum: 28.6.2019.

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

Marko Domitrović

U Zagrebu, 10. srpnja 2020.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA	2
2.1. Destruktivne metode.....	2
2.2. Polu nedestruktivne metode (semi-nde – non destructive examination)	2
2.3. Nedestruktivne (NDE – NonDestructive Evaluation) metode	2
2.3.1. Vizualna zapažanja	3
2.3.2. Električna svojstva	3
2.3.3. Gama zračenje	3
2.3.4. Rendgenska metoda.....	3
2.3.5. Infracrvena termografija (eng. Infrared Termography - IRT)	4
2.3.6. Zvučni (ultrazvučni) val - ispitivanja	4
2.4. Što je to ultrazvuk.....	5
2.4.1. Brzina širenja ultrazvuka kroz drvo	5
2.4.2. Utjecajni čimbenici koji utječu na brzinu širenja ultrazvuka kroz drvo	5
2.5. Upotreba ultrazvuka u eksperimentalne svrhe	6
2.5.1. Ultrazvučni val	6
2.5.2. Metoda ispitivanja zvučnim tomografom	6
2.6. Upotreba ultrazvučnih tehnika u komercijalne svrhe	6
3. CILJ RADA.....	8
4. MATERIJALI I METODE.....	9
4.1. Materijali	9
4.1.1. Obična bukva (<i>Fagus sylvatica</i> , L.).....	9
4.1.2. Obični bor (<i>Pinus sylvestris</i> , L.).....	9
4.2. Postupak izrade i ispitivanja uzoraka	10
4.2.1. Izrada i označavanje uzoraka.....	10
4.2.2. Redoslijed slaganja uzoraka	11
4.3. Metode	12
4.3.1. Sortiranje uzoraka za ispitivanje.....	12
4.3.2. Mjerenje širine godova i određivanje srednje širine goda na uzorcima bukovine i borovine	13
4.3.4. Mjerenje brzine prolaska zvuka kroz uzorke drva zvučnim tomografom	14
5. REZULTATI I RASPRAVA	18
5.1. Gustoća drva.....	18
5.2. Širina goda	19
5.3. Brzina prolaska ultrazvuka.....	20

6. Zaključci	25
7. LITERATURA.....	26

Popis slika

Slika 1. Shematski prikaz piljenja četvrtaka, elemenata i letvica za izradu uzoraka	10
Slika 2. Shematski prikaz finog piljenja uzoraka iz fino blanjanih četvrtaka.....	11
Slika 3. Prikaz vage	11
Slika 4. Prikaz pomičnog mjerila	12
Slika 5. Prikaz sortiranja uzoraka prema gustoćama	12
Slika 6. Sušionik s uzorcima koji je ujedno služio i kao klima komora za kondicioniranje uzoraka	13
Slika 7. Tomograf	14
Slika 8. Prikaz dijelova zvučnog tomografa.....	15
Slika 9. Prikazuje rezultate prilikom mjerenja udaranja na senzor 1 i senzor 2	16
Slika 10. Prikaz uzorka za ispitivanje sa označenim smjerovima	16
Slika 11. Ispitivanje uzorka	17
Slika 12. Gustoća uzorka bukvine lijevo(lijevo) i borovine (desno) u apsolutno suhom stanju	18
Slika 13. Širine godova bukovih (lijevo) i borovih (desno) uzoraka različitih gustoća	19
Slika 14. Brzina prolaska ultrazvuka u radijalnom smjeru kroz drvo bukve (lijevo) i bijelog bora (desno) različitih gustoća pri sadržaju vode od 0 %	20
Slika 15. Brzina prolaska ultrazvuka u tangentskom smjeru kroz drvo bukve (lijevo) i bijeloga bora (desno) različitih gustoća pri sadržaju vode od 0 %	21
Slika 16. Brzina prolaska ultrazvuka u radijalnom smjeru kroz drvo bukve (lijevo) i bijelog bora (desno) različitih gustoća pri sadržaju vode od 11 %	22
Slika 17. Brzina prolaska ultrazvuka u tangentskom smjeru kroz drvo bukve (lijevo) i bijeloga bora (desno) različitih gustoća pri sadržaju vode od 11 %	23

Popis tablica

Tablica 1. Obična bukva (<i>Fagus sylvatica</i> , L.)	9
Tablica 2. Obični bor (<i>Pinus sylvestris</i> , L.)	10
Tablica 3. Scheffe test razlike gustoće odabranih grupa uzoraka bukvine.	18
Tablica 4. Scheffe test razlike gustoće odabranih grupa uzoraka borovine.....	18
Tablica 5. Scheffe test značajnosti razlike širine goda bukvine različite gustoće.....	19
Tablica 6. Scheffe test značajnosti razlike širine goda borovine različite gustoće	20
Tablica 7. Scheffe test značajnosti razlike brzine prolaska ultrazvuka u radijalnom smjeru kroz drvo bukve različitih gustoća pri sadržaju vode od 0 %	20
Tablica 8. Scheffe test značajnosti razlike brzine prolaska ultrazvuka u radijalnom smjeru kroz drvo bijeloga bora različitih gustoća pri sadržaju vode od 0 %	21
Tablica 9. Scheffe test značajnosti razlike brzine prolaska ultrazvuka u tangentskom smjeru kroz drvo bukve različitih gustoća pri sadržaju vode od 0 %	21
Tablica 10. Scheffe test značajnosti razlike brzine prolaska ultrazvuka u tangentskom smjeru kroz drvo bijeloga bora različitih gustoća pri sadržaju vode od 0 %	22
Tablica 11. Scheffe test značajnosti razlike brzine prolaska ultrazvuka u radijalnom smjeru kroz drvo bijeloga bora različitih gustoća pri sadržaju vode od 11 %	22
Tablica 12. Scheffe test značajnosti razlike brzine prolaska ultrazvuka u radijalnom smjeru kroz drvo bijeloga bora različitih gustoća pri sadržaju vode od 11 %	23
Tablica 13. Scheffe test značajnosti razlike brzine prolaska ultrazvuka u tangentskom smjeru kroz drvo bukve različitih gustoća pri sadržaju vode od 11 %	23
Tablica 14. Scheffe test značajnosti razlike brzine prolaska ultrazvuka u tangentskom smjeru kroz drvo bijeloga bora različitih gustoća pri sadržaju vode od 11 %	24

1. UVOD

Od samih početaka civilizacije masivno drvo koristi se od strane čovjeka, te ima bitnu ulogu u njegovu životu što se do danas nije promijenilo. Drvo se koristilo u razne svrhe poput izrade oružja i oruđa, kao ogrjevni materijal ili kao izolacija. Također se drvo koristilo za različite proizvode kao što su razni poljoprivredni alati, nastambe, posuđe, mostovi i drugo. Dijelovi drva poput listova i plodova koristili su se u prehrambene svrhe što je povećalo njegovu uporabljivost. Energija koja se dobije izgaranjem drva je i danas glavni izvor energije za veći dio populacije u svijetu.

Kako ljudi teže stalnom povećanju znanja o drvu kao materijalu, iako se njegova dostupnost smanjuje iz dana u dan, pojavila se ideja o ne razornim metodama ispitivanja svojstava drva. Ultrazvuk je jedna skupina takvih ne razornih metoda.

Ultrazvuk su zvučni valovi kojima je frekvencija veća od gornje granice osjetljivosti ljudskog uha, tj. veća od približno 20 000 Hz.

Ultrazvučna ispitivanja se zasnivaju na tome da se zvuk širi kroz homogene materijale i da se odbija na granici materijala različitih akustičkih osobina, to jest od nehomogenosti u materijalu.

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

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 pouzdanih 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 rezistografom za utvrđivanje lokacije degradiranih presjeka,
- e) elektro ispitivanja su ispitivanja temeljena na električnom 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 priraštajna 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 i 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 tim nedestruktivnim metodama 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:

- Vizualna zapažanja
- Električna svojstva

- Gama zračenje
- Rendgenska metoda
- Infracrvena termografija (eng. Infrared Termography – IRT)
- Zvučni (ultrazvučni) val - ispitivanja

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.

Neka 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 / ili položaja pojedinih elemenata ugrađenog drva u upotrebi (dijela namještaja, elemenata 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 daljnju upotrebu. 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 vode i električne otpornosti drva. Električni otpor koristi se i za otkrivanje propadanja in-situ ispitivanjima.

2.3.3. Gama zračenje

Ispitivanje se provodi gama zračenjem. Taj način ispitivanja koristan je alat za kvantificiranje razorenosti. Također se koristi kao element u tragovima za kvantificiranje raspodjele pojedinih aktivnih komponenti kemijskih zaštitnih sredstava u drvu. Veliko ograničenje te metode su propisi koji se odnose na uporabu radioaktivnog izvora i sigurnosne mjere zaštite od zračenja.

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 te metode je najveći problem što se ispitivanje provodi u 3d obliku, a dobiveni rezultati su u 2d obliku. Zbog izrazito mnogo 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 te metode je što 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 drva s povećanim sadržajem vode zbog visoke osjetljivosti na promjene temperature i posljedičnog većeg potencijala biološke razgradnje drva. Općenito govoreći, iako je osjetljivost IRT tehnika zasad lošija od tradicionalnih tehnika, IRT omogućuje lokaliziranje područja s različitim sadržajima vode na brz i apsolutno nedestruktivan način (Stepinac i suradnici, 2017).

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 te 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. Mjerenje brzine zvuka se često koristi za izražavanje dinamičkog modula elastičnosti, vrlo je popularna kod proizvoda 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, kvрге, 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 vode proporcionalno utjecaju tih varijabli na modul elastičnosti i gustoću. Također, smanjuje se porastom frekvencije i amplitude vibracija (Stepinac i suradnici, 2017). 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. 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 (greškama – 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 vlakana - 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).

Još je jedno bitno svojstvo drva, posebno kod glazbenih instrumenata, 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 bubrenje / utezanje 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 koeficijent gubitka imaju primarni utjecaj na akustično ponašanje, jer o njima direktno ovisi brzina zvuka u materijalu i intenzitet prenesenog zvuka (Wegst, 2006).

2.5. Upotreba ultrazvuka u eksperimentalne svrhe

2.5.1. Ultrazvučni val

Ultrazvučna metoda vrlo je popularna kod homogenih, neporoznih materijala za otkrivanje nedostataka (Mal i Bar-Cohen, 1988). Iako se ta 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 i
- pulse-echo sustav.

Ultrazvučni val šalje signal kroz debljinu materijala, a karakteristike vala bilježe se na izlaznoj strani ploče. S druge strane, sustav puls-echo 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 drvne građe raspada.

2.5.2. Metoda ispitivanja zvučnim tomografom

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

2.6. 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 Wcm² i frekvencijama od 28 i 40 kHz, odnosno za 30, 60 i 90 min. Uz to prethodno obrađeni uzorci su sušeni na temperaturi 40°C pod apsolutnim tlakom od 0,08 MPa. Rezultati su pokazali da je ultrazvučna obrada skratila vrijeme sušenja drva vakuomom, 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).

Karte u poprečnom presjeku stabla bukve, divljeg kestena i norveškog javora na koje su djelovale gljive *Ganoderma adspersum* (Schulz) Donk, *Pleurotus ostreatus* (Jaquin: Fr.), Kumm i *Kretzschmaria deusta* (Hoffm.: P. Martin), *Ustulina deusta* (Fr. Petrak), odnosno gljivično razoreni drveni materijal dobiven je iz živih stabala. Izgrađene su zone izmijenjene 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 (Rabe i suradnici, 2004).

3. CILJ RADA

Ciljevi ovog rada su:

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

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:

- obična bukva (*Fagus sylvatica*, L.)
- obični bor (*Pinus sylvestris*, L.)

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

Drvo bukve je nehomogen, anizotropan, porozan, vlaknast i higroskopan 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, ρ [g/cm ³]	0,54	0,72	0,91
Utezanje, α [%]			
- radialno		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 ²]	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 te je kao takvo dobar materijal za ispitivanje zbog njegovih dobrih svojstava i vrlo široke primjene.

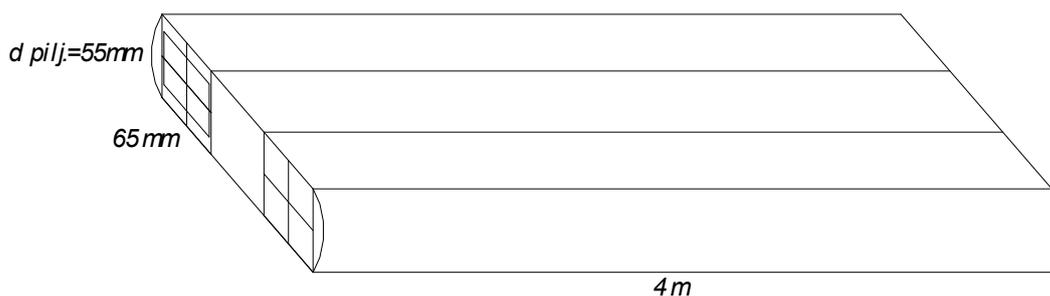
Tablica 2. Obični bor (*Pinus sylvestris*, L.)

Svojstvo	Minimalna vrijednost	Srednja vrijednost	Maksimalna vrijednost
Gustoća, ρ [g/cm ³]	0,30	0,49	0,86
Utezanje, α [%]			
- 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 ²]		70	

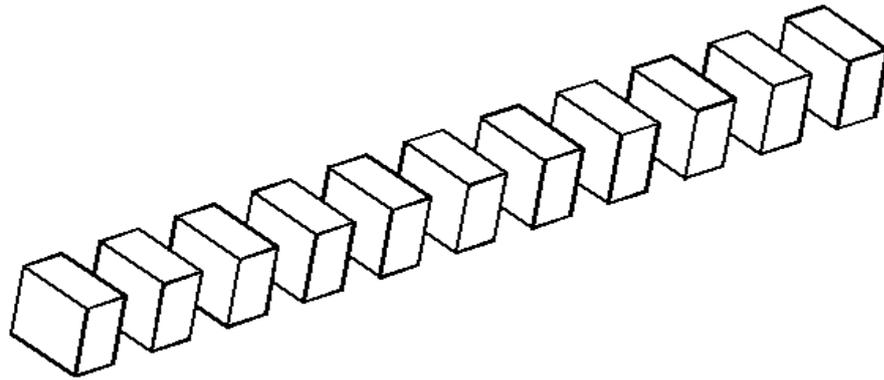
4.2. Postupak izrade i ispitivanja uzoraka

4.2.1. Izrada i označavanje uzoraka

Iz prirodno prosušeni, te naknadno u sušari dosušeni piljenica ispiljene su četvrtače debljine 55 mm, širine 60 mm i dužine 4 m. Bukovina je piljena u zoni tik ispod kore dok je borovina piljena tik ispod bijeljike. Nakon kondicioniranja u standardnoj klimi, iz svake pojedine četvrtače ispiljena su, a potom fino blanjana i iskrojena, po 4 elementa poprečnog presjeka 46 × 46 mm duljine oko 1050 mm (slika 1). Pri tome se pridavala velika pažnja na paralelnost godova s jednim bočnim pridom četrtaka (čista blistača). Iz svakog su elementa na kružnoj pili finih zubi redom piljeni uzorci dimenzija 46 × 46 × 14 mm (R×T×L) ± 0,2 mm i sukcesivno označeni (slika 2). Svaki konačni uzorak ima izbušene rupice promjera 3 mm i dubine 5,5 mm sa sredini sve četiri bočne strane.



Slika 1. Shematski prikaz piljenja četvtaka, elemenata i letvica za izradu uzoraka

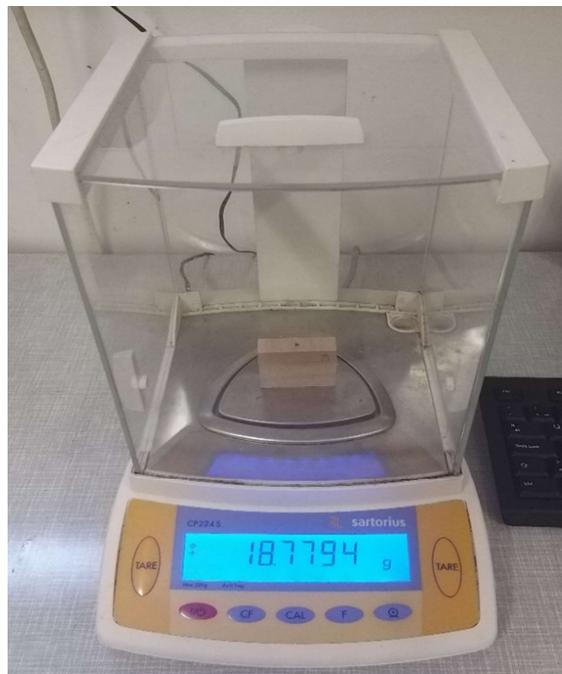


Slika 2. Shematski prikaz finog piljenja uzoraka iz fino blanjanih četvrtaka

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). Uzorci koji su imali približno paralelne godove s obzirom na tangencijalni smjer su izdvojeni te su korišteni u daljnjim fazama istraživanja.

Svi izdvojeni uzorci su izvagani na digitalnoj vagi (slika 3) s točnošću vaganja $\pm 0,1$ mgte 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 odabran je određen broj odgovarajućih uzoraka za daljnje ispitivanje kako je prikazano na slici 5.

Ispitivanja su se obavljala u uvjetima standardne laboratorijske klime na uzorcima kondicioniranim na dva sadržaja vode:

- apsolutno suhim uzorcima, sadržaja vode 0 % i
- kondicioniranim uzorcima na 11 % sadržaja vode.

Ro min						Ro sred						Ro max														
broj uzork	mx	Rx	Tx	Lx	Vx	Ro x	broj uzork	mx	Rx	Tx	Lx	Vx	Ro x	broj uzork	mx	Rx	Tx	Lx	Vx	Ro x						
g	mm	mm	mm	mm	cm ³	g/cm ³	g	mm	mm	mm	mm	cm ³	g/cm ³	g	mm	mm	mm	mm	cm ³	g/cm ³						
1	1	9	19.6021	46.21	46.13	14.52	30.95181	0.63231	1	1	3	19.6908	46.16	46.14	14.27	30.29257	0.647882	1	1	1	19.3538	46.16	45.82	13.85	29.29345	0.660687
10	10	170	17.983	46.01	46.25	13.89	29.5574	0.608400	10	10	33	19.3823	46.16	46	13.93	29.5784	0.655286	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	0.650113	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	19.6043	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	13.91	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	30.054	0.684727
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	29.79909	0.651567	63	63	113	20.635	46.29	46.2	14.11	30.17562	0.68383
72	72	281	18.4928	46.46	46.36	14.16	30.49902	0.616341	72	72	196	19.5308	46.28	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	0.602004	81	81	227	18.8449	46.2	46.26	13.97	28.57452	0.65095	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	29.90996	0.66651
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	0.648816	20	20	45	19.9719	46.1	46.96	13.79	29.21765	0.683556
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	29.58525	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	30.15484	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	0.644539	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	0.68327
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	18.6069	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	46.15	14.03	29.8436	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	29.84982	0.662907
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	46.17	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	46.12	14.08	30.0269	0.684123
52	52	255	17.8628	46.2	46.32	13.67	29.25558	0.610619	52	52	153	19.1326	46.25	46.04	13.94	29.68314	0.644561	52	52	111	20.5702	46.27	46.37	14.11	30.27357	0.679477
61	61	257	18.0673	46.24	46.31	13.87	29.70086	0.608029	61	61	167	19.1191	46.46	46.33	13.59	29.25236	0.653592	61	61	130	20.1668	46.14	46.07	13.95	29.65309	0.680091
70	70	279	18.2756	46.27	46.19	13.98	29.87821	0.61167	70	70	186	18.7701	46.11	46.25	13.38	28.53402	0.657815	70	70	145	19.9938	46.16	46.18	13.96	29.7581	0.671878
79	79	289	18.1598	46.13	46.15	14.09	29.99619	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 provođeno ručno pomoću mjerne lupe povećanja $5 \times$ 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 se dodavala sol uz stalno miješanje do trenutka kad je u otopini ostalo neotopljenog taloga soli. Prije pripreme otopine, kadice su se oprale i dodatno isprale destiliranom vodom. Uzorci su stavljani u sušionik (slika 6) na temperaturu od 25°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 sljedećem izrazu (1):

$$U_r = \frac{m_k - m_0}{m_k} * 100[\%] \quad (1)$$

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

Brzina prolaska ultrazvuka kroz drvo mjerio se zvučnim tomografom (slika 7). Za pobuđivanje senzora i davanje impulsa ultrazvuka u drvo bilo je korišteno matematičko njihalo (slika 11).



Slika 7. Tomograf

4.3.4.1. 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 zvuka u krutom mediju ovisi o vrsti zvučnog vala te o elastičnosti i gustoći materijala a formula glasi (2):

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

v – brzina zvučnog vala (m/s)

ρ – 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 prvi senzor)
- dodataka: čavlići za senzore, čekić, kliješta
- kablaska 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:

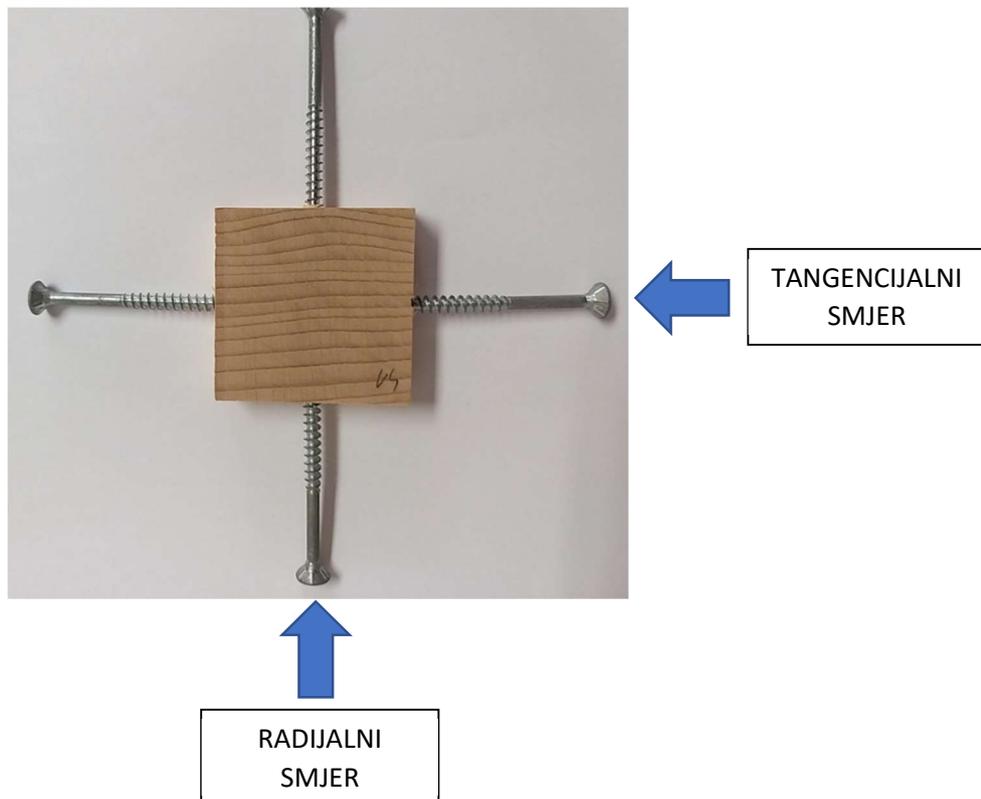
- pozicije senzora

- udaljenosti
- vrijeme putovanja zvučnog impulsa
- brzine
- postotne pogreške izmjere.

Sensor	1	2
1		338
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		340
1		338
1		340
1		332
2	367	
2	365	
2	388	
2	388	
2	388	
2	383	
2	378	
2	383	
2	361	
2	388	
2	391	
2	365	
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) pažljivo su 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 analizu (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 su pričvršćeni senzori za ispitivanje.



Slika 11. Ispitivanje uzorka

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 mikro sekundama (μs) i kao takvi morali su se pretvoriti u m/s po formuli (3):

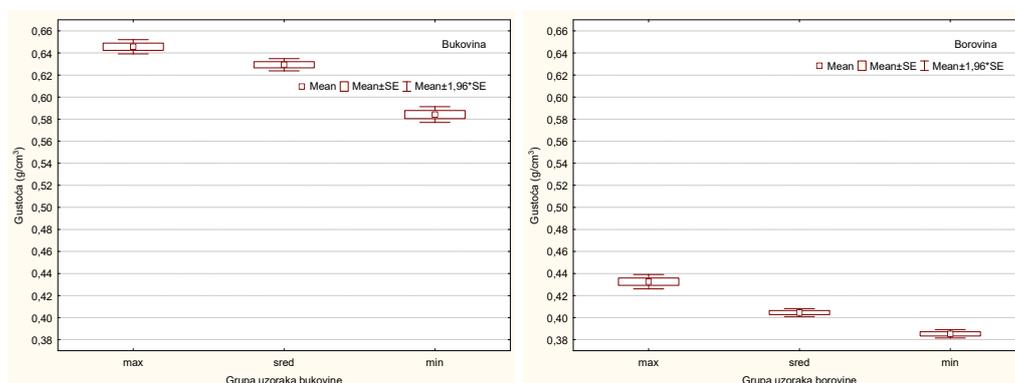
$$v=(d/1000)/(t_u/1000000) \quad (3)$$

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 (μs).

5. REZULTATI I RASPRAVA

5.1. Gustoća drva

Statističkom analizom gustoće drva bukovih i borovih uzoraka, koje su grupirane u tri odvojene grupe, utvrđeno je da postoje statistički značajne razlike u gustoćama u apsolutno suhom stanju između sve tri grupe uzoraka i bukovine i borovine što potvrđuje da je grupiranje izvršeno dobro (tablice 3 i 4). Grupe uzoraka najveće gustoće su imale srednju gustoću bukovine 0,646, a borovine 0,433 g/cm³. Grupe uzoraka srednje gustoće su imale srednju gustoću bukovine 0,629, a borovine 0,405 g/cm³. Grupe uzoraka najmanje gustoće su imale srednju gustoću bukovine 0,584, a borovine 0,385 g/cm³ (slika 12). Uzorci bukovine najmanje gustoće mali su gotovo dvostruko veću gustoću od borovine najveće gustoće.



Slika 12. Gustoća uzorka bukovine lijevo(lijevo) i borovine (desno) u apsolutno suhom stanju

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

		Scheffe Test; Variable: Gustoća (g/cm ³) (Bukovina RO 0 - gustoca) Marked differences are significant at p < ,05000		
Grupa uzorka bukovine		{1}	{2}	{3}
		M=,64561	M=,62929	M=,58414
max	{1}		0,005945	0,000000
sred	{2}	0,005945		0,000000
min	{3}	0,000000	0,000000	

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

		Scheffe Test; Variable: Gustoća (g/cm ³) (Borovina RO 0 - gustoca) Marked differences are significant at p < ,05000		
Grupa uzorka borovine		{1}	{2}	{3}
		M=,43261	M=,40459	M=,38526
max	{1}		0,000000	0,000000
sred	{2}	0,000000		0,000033
min	{3}	0,000000	0,000033	

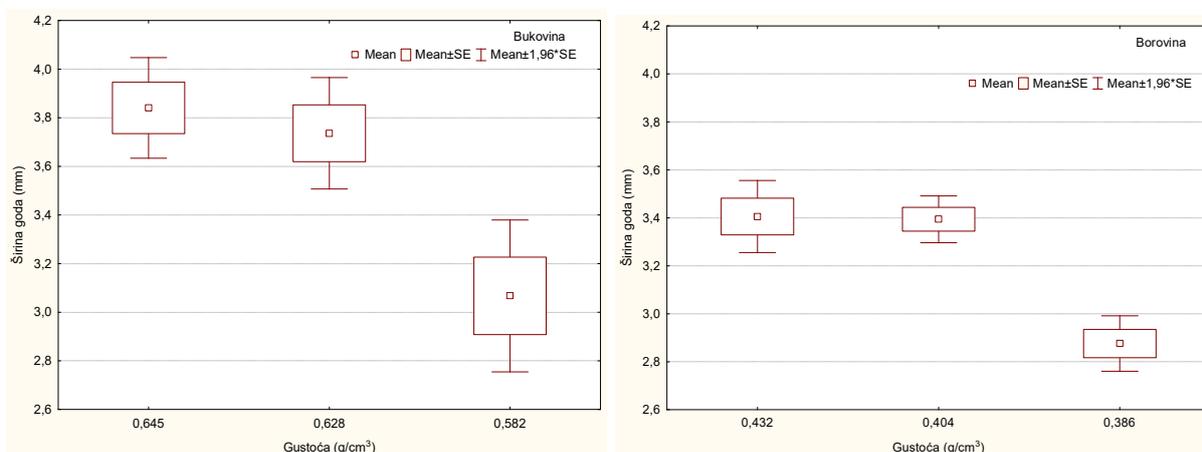
5.2. Širina goda

Grupa uzoraka bukovine najveće gustoće ($0,645 \text{ g/cm}^3$) imala je prosječno najširi god (3,84 mm), grupa uzoraka srednje gustoće ($0,628 \text{ g/cm}^3$) imala je prosječnu širinu goda 3,74 mm, a grupa uzoraka najmanje gustoće ($0,582 \text{ g/cm}^3$) imala je prosječnu širinu goda od 3,07 mm. Iako uzorci najveće gustoće imaju i prosječno najširi god, ne postoje statistički značajne razlike u širini godova između grupe uzoraka najveće gustoće i grupe uzoraka srednje gustoće. Međutim, postoje značajne razlike u širini goda između grupa uzoraka s najvišom i najmanjom gustoćom, kao i između grupa uzoraka sa srednjom i najmanjom gustoćom (slika 13).

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. Stoga porastom širine goda ne može se sa sigurnošću utvrditi raste li ili opada učešće zone kasnog drva u godu, pa zato nema ni pravilnosti da porastom širine goda raste i gustoća drva.

Grupa uzoraka borovine najveće gustoće ($0,432 \text{ g/cm}^3$) imala je prosječno najširi god (3,41 mm). Grupa uzoraka srednje gustoće ($0,404 \text{ g/cm}^3$) imala je godove prosječne širine 3,39 mm, a grupa uzoraka najmanje gustoće ($0,386 \text{ g/cm}^3$) 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.

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 13. Širine godova bukovich (lijevo) i borovich (desno) uzoraka različitih gustoća

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

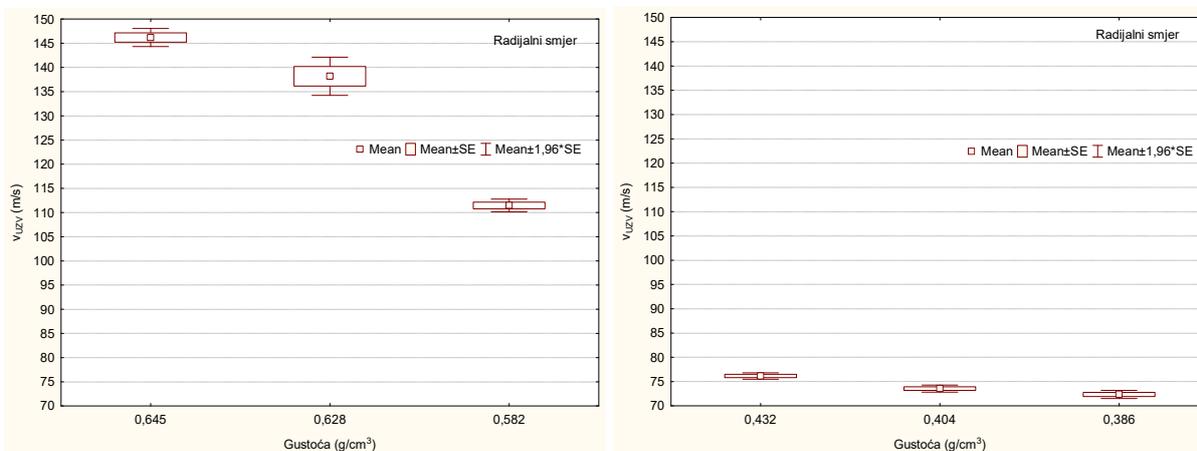
Gustoća (g/cm^3)	Scheffe Test; Variable: Širina goda (mm) (Bukovina širina goda) Marked differences are significant at $p < ,05000$		
	{1}	{2}	{3}
	M=3,8404	M=3,7362	M=3,0671
0,645		0,803000	0,000412
0,628	0,803000		0,003023
0,582	0,000412	0,003023	

Tablica 6. Scheffe test značajnosti razlike širine goda borovine različite gustoće

Scheffe Test; Variable: Širina goda (mm) (Borovina sirina goda)			
Marked differences are significant at $p < ,05000$			
Gustoća (g/cm ³)	{1}	{2}	{3}
	M=3,4057	M=3,3940	M=2,8759
0,432		0,991584	0,000000
0,404	0,991584		0,000000
0,386	0,000000	0,000000	

5.3. Brzina prolaska ultrazvuka

Poznato je da se zvuk, a tako i ultrazvuk brže širi kroz materijal veće gustoće. Ova mjerenja su to potvrdila. Naime, i u bukovini i u borovini u apsolutno suhom stanju izmjerene su najveće brzine prolaska ultrazvuka kroz drvo upravo u grupama uzoraka najvećih gustoća. Statistički značajno manje brzine izmjerene su na uzorcima srednjih gustoća, a najmanje brzine izmjerene su na uzorcima najmanjih gustoća (slika 14). Grupa bukovih uzoraka najveće gustoće (0,645 g/cm³) imala je prosječnu brzinu ultrazvuka u radijalnom smjeru 146,19 m/s, dok je grupa borovih uzoraka najveće gustoće (0,432 g/cm³) imala je prosječnu brzinu ultrazvuka u radijalnom smjeru 76,15 m/s. Grupa bukovih uzoraka srednje gustoće (0,628 g/cm³) imala je prosječnu brzinu ultrazvuka u radijalnom smjeru 138,17 m/s, a grupa borovih uzoraka srednje gustoće (0,404 g/cm³) imala je prosječnu brzinu ultrazvuka u radijalnom smjeru 73,56 m/s. Grupa bukovih uzoraka minimalne gustoće (0,582 g/cm³) imala je prosječnu brzinu ultrazvuka u radijalnom smjeru 111,46 m/s, a grupa borovih uzoraka minimalne gustoće (0,386 g/cm³) imala je prosječnu brzinu ultrazvuka u radijalnom smjeru 72,37 m/s (slika 14; tablice 7 i 8).



Slika 14. Brzina prolaska ultrazvuka u radijalnom smjeru kroz drvo bukve (lijevo) i bijelog bora (desno) različitih gustoća pri sadržaju vode od 0 %.

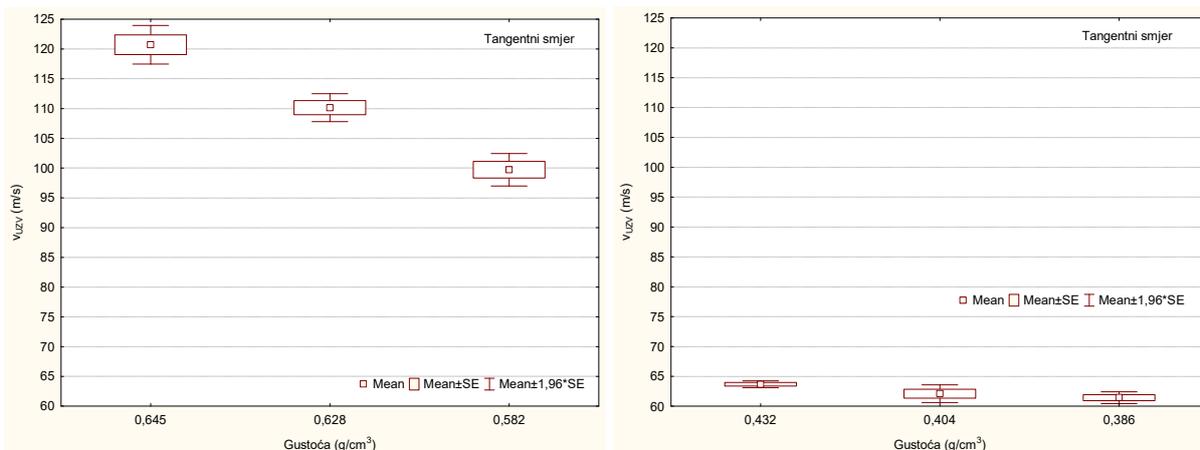
Tablica 7. Scheffe test značajnosti razlike brzine prolaska ultrazvuka u radijalnom smjeru kroz drvo bukve različitih gustoća pri sadržaju vode od 0 %.

Scheffe Test; Variable: v _{uzv} (m/s) (BU-uzvR o gustoci 0)			
Marked differences are significant at $p < ,05000$			
Gustoća (g/cm ³)	{1}	{2}	{3}
	M=146,19	M=138,17	M=111,46
0,645		0,000272	0,00
0,628	0,000272		0,00
0,582	0,000000	0,000000	

Tablica 8. Scheffe test značajnosti razlike brzine prolaska ultrazvuka u radialnom smjeru kroz drvo bijeloga bora različitih gustoća pri sadržaju vode od 0 %.

Gustoća (g/cm ³)	Scheffe Test; Variable: v _{uzv} (m/s) (BO-uzvR o gustoci 0) Marked differences are significant at p < ,05000		
	{1}	{2}	{3}
	M=76,150	M=73,556	M=72,356
0,432		0,000001	0,000000
0,404	0,000001		0,110656
0,386	0,000000	0,110656	

I u tangentnom smjeru je potvrđeno pravilo da uzorci i bukovine i borovine najvećih gustoća imaju i statistički značajno najveće brzine ultrazvuka, a grupe uzoraka najmanjih gustoća imaju statistički značajno najmanju brzinu prolaska ultrazvuka (slika 15). Grupa bukovih uzoraka najveće gustoće (0,645 g/cm³) imala je prosječnu brzinu prolaska ultrazvuka u tangentnom smjeru 120,72 m/s, a grupa uzoraka borovine najveće gustoće (0,432 g/cm³) imala je prosječnu brzinu prolaska ultrazvuka u tangentnom smjeru 63,67 m/s. Grupa bukovih uzoraka srednje gustoće imala je prosječnu brzinu prolaska ultrazvuka u tangentnom smjeru 110,15 m/s, a grupa uzoraka borovine srednje gustoće (0,404 g/cm³) imala je prosječnu brzinu prolaska ultrazvuka u tangentnom smjeru 62,09 m/s. Grupa bukovih uzoraka minimalne gustoće čija je prosječna brzina prolaska ultrazvuka u tangentnom smjeru iznosila 99,73 m/s, a grupa borovih uzoraka minimalne gustoće (0,386 g/cm³) imala je prosječnu brzinu prolaska ultrazvuka u tangentnom smjeru 61,43 m/s (slika 15; tablice 9 i 10).



Slika 15. Brzina prolaska ultrazvuka u tangentnom smjeru kroz drvo bukve (lijevo) i bijeloga bora (desno) različitih gustoća pri sadržaju vode od 0 %.

Tablica 9. Scheffe test značajnosti razlike brzine prolaska ultrazvuka u tangentnom smjeru kroz drvo bukve različitih gustoća pri sadržaju vode od 0 %.

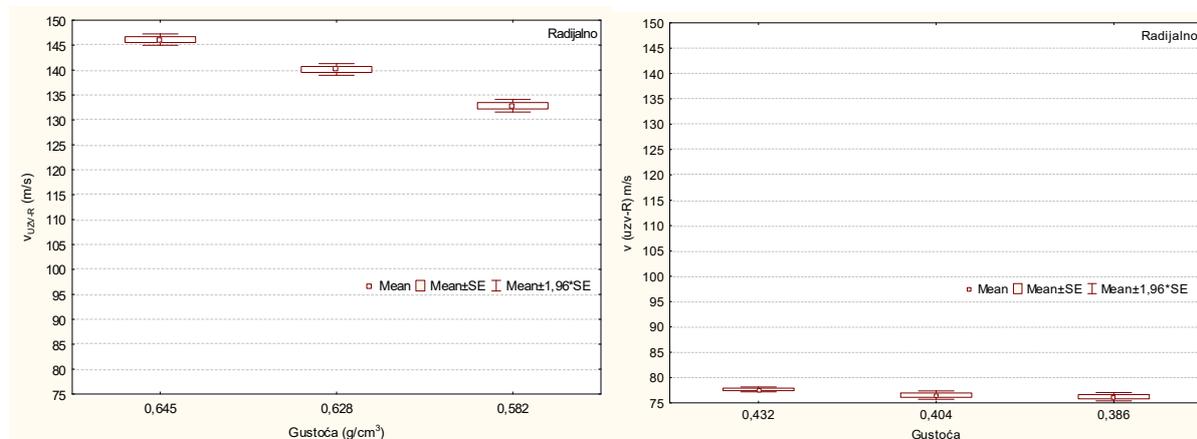
Gustoća (g/cm ³)	Scheffe Test; Variable: v _{uzv} (m/s) (BU-uzvT o gustoci 0) Marked differences are significant at p < ,05000		
	{1}	{2}	{3}
	M=120,72	M=110,15	M=99,725
0,645		0,000001	0,000000
0,628	0,000001		0,000001
0,582	0,000000	0,000001	

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

Scheffe Test; Variable: v _{uzv} (m/s) (BO-uzvT o gustoci 0)			
Marked differences are significant at p < ,05000			
Gustoća (g/cm ³)	{1}	{2}	{3}
	M=63,674	M=62,090	M=61,427
0,432		0,096794	0,024289
0,404	0,096794		0,732244
0,386	0,024289	0,732244	

Nakon kondicioniranja uzoraka na 11 % sadržaja vode izmjerena je ista pravilnost brzine ultrazvuka s obzirom na gustoću i bukovih i borovih uzoraka i to i u radijalnome i u tangentsnome smjeru (slike 16 i 17).

Naime, grupa bukovih uzoraka najveće gustoće (0,645 g/cm³) imala je prosječnu brzinu ultrazvuka u radijalnom smjeru 146,12 m/s, dok je grupa borovih uzoraka najveće gustoće (0,432 g/cm³) imala prosječnu brzinu ultrazvuka u radijalnom smjeru 77,67 m/s. Grupa bukovih uzoraka srednje gustoće (0,628 g/cm³) imala je prosječnu brzinu ultrazvuka u radijalnom smjeru 140,13 m/s, a grupa borovih uzoraka srednje gustoće (0,404 g/cm³) imala je prosječnu brzinu ultrazvuka u radijalnom smjeru 76,54 m/s. Grupa bukovih uzoraka minimalne gustoće (0,582 g/cm³) imala je prosječnu brzinu ultrazvuka u radijalnom smjeru 132,84 m/s, dok je grupa borovih uzoraka minimalne gustoće (0,386 g/cm³) imala prosječnu brzinu ultrazvuka u radijalnom smjeru 76,22 m/s (slika 16; tablica 11 i 12).



Slika 16. Brzina prolaska ultrazvuka u radijalnom smjeru kroz drvo bukve (lijevo) i bijelog bora (desno) različitih gustoća pri sadržaju vode od 11 %.

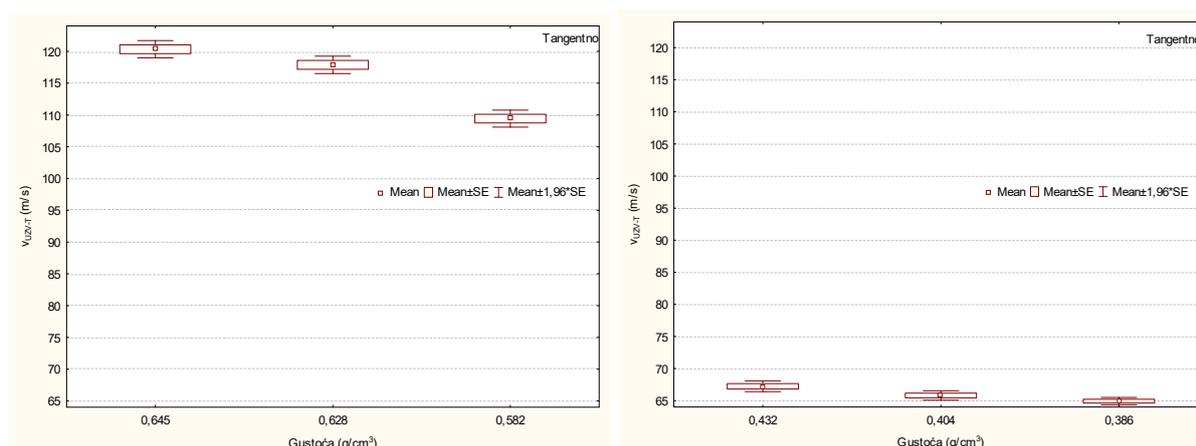
Tablica 11. Scheffe test značajnosti razlike brzine prolaska ultrazvuka u radijalnom smjeru kroz drvo bijeloga bora različitih gustoća pri sadržaju vode od 11 %.

Scheffe Test; Variable: v _{uzv-R} (m/s) (BU-uzvR o gustoci 11)			
Marked differences are significant at p < ,05000			
Gustoća (g/cm ³)	{1}	{2}	{3}
	M=146,12	M=140,13	M=132,84
Bu-ro-max {1}		0,000000	0,000000
Bu-ro-sred {2}	0,000000		0,000000
Bu-ro-min {3}	0,000000	0,000000	

Tablica 12. Scheffe test značajnosti razlike brzine prolaska ultrazvuka u radialnom smjeru kroz drvo bijeloga bora različitih gustoća pri sadržaju vode od 11 %.

Scheffe Test; Variable: v (uzv-R) m/s (BO-uzvR o gustoci 11) Marked differences are significant at p < ,05000			
Gustoća	{1}	{2}	{3}
	M=77,673	M=76,538	M=76,222
Bo-ro-max {1}		0,097312	0,023719
Bo-ro-sred {2}	0,097312		0,835073
Bo-ro-min {3}	0,023719	0,835073	

Grupa bukovih uzoraka najveće gustoće (0,645 g/cm³) imala je prosječnu brzinu ultrazvuka u tangentskom smjeru 120,34 m/s, a grupa borovih uzoraka najveće gustoće (0,432 g/cm³) imala je prosječnu brzinu ultrazvuka u tangentskom smjeru 67,230 m/s. Grupa bukovih uzoraka srednje gustoće (0,628 g/cm³) imala je prosječnu brzinu ultrazvuka 117,88 m/s, a grupa borovih uzoraka srednje gustoće (0,404 g/cm³) imala je prosječnu brzinu ultrazvuka 65,802 m/s. Grupa bukovih uzoraka minimalne gustoće (0,582 g/cm³) imala je prosječnu brzinu ultrazvuka u tangentskom smjeru 109,43 m/s, dok je grupa borovih uzoraka minimalne gustoće (0,386 g/cm³) imala prosječnu brzinu ultrazvuka u tangentskom smjeru 64,920 m/s (slika 17; tablica 13 i 14).



Slika 17. Brzina prolaska ultrazvuka u tangentskom smjeru kroz drvo bukve (lijevo) i bijeloga bora (desno) različitih gustoća pri sadržaju vode od 11 %.

Tablica 13. Scheffe test značajnosti razlike brzine prolaska ultrazvuka u tangentskom smjeru kroz drvo bukve različitih gustoća pri sadržaju vode od 11 %.

Scheffe Test; Variable: v _{UZV-T} (m/s) (BU-uzvT o gustoci 11) Marked differences are significant at p < ,05000			
Gustoća (g/cm ³)	{1}	{2}	{3}
	M=120,34	M=117,88	M=109,43
Bu-ro-max {1}		0,040833	0,000000
Bu-ro-sred {2}	0,040833		0,000000
Bu-ro-min {3}	0,000000	0,000000	

Tablica 14. Scheffe test značajnosti razlike brzine prolaska ultrazvuka u tangენტnom smjeru kroz drvo bijeloga bora različitih gustoća pri sadržaju vode od 11 %.

Scheffe Test; Variable: v _{UZV-T} (m/s) (BO-uzvT o gustoci 11)			
Marked differences are significant at p < ,05000			
Gustoća (g/cm ³)	{1}	{2}	{3}
	M=67,230	M=65,802	M=64,920
Bo-ro-max {1}		0,023104	0,000063
Bo-ro-sred {2}	0,023104		0,237744
Bo-ro-min {3}	0,000063	0,237744	

Rezultati ispitivanja ukazuju na činjenicu da je statistički značajno veća brzina prolaska ultrazvuka kroz drvo u radijalnom smjeru nego u tangენტnom i to bez obzira na vrstu drva, gustoću ili sadržaj vode. Prema poznatoj činjenici da se zvuk širi brže kroz materijal ujednačene i veće gustoće za očekivati je bilo da će ultrazvuk brže prolaziti kroz drvo u tangენტnome smjeru prvenstveno kroz zone kasnog drva goda koje se neprekinuto protežu od jedne bočne plohe uzorka do druge nasuprotne plohe. S druge pak strane, naizmjenično izmjenjivanje većih i manjih gustoća drva kroz zone kasnog i ranog drva godova u radijalnome smjeru nesumnjivo radi prepreke prolasku ultrazvuka i očekivalo se da će se ultrazvuk raspršivati svaki puta pri nailasku na veću odnosno na manju gustoću, čime se logično očekivala manja brzina prolaska ultrazvuka u radijalnome smjeru, to se nije dogodilo. Ovakva spoznaja odnosno dobiveni rezultati i njihova pravilnost u pojavi upućuju na zaključak da se ultrazvuk u radijalnome smjeru najvjerojatnije širio najbrže kroz staničje drvnih trakova (koje se u radijalnome smjeru proteže longitudinalno), s obzirom na poznatu činjenicu da se ultrazvuk u longitudinalnom smjeru širi 3,5 do 5 puta brže nego u transferzalnim smjerovima.

6. ZAKLJUČCI

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

- brzina ultrazvuka u drvu mijenja se s obzirom na vrstu drva, gustoću drva i smjer kojim se kroz drvo širi,
- porastom gustoće drva proporcionalno se povećava i brzina prolaska ultrazvuka kroz drvo,
- brzina ultrazvuka u radijalnom i tangentskom smjeru pri sadržaju vode od 0% je veća kod bukovine u odnosu na borovinu 1,5 – 2 puta,
- brzina ultrazvuka u radijalnom i tangentskom smjeru pri sadržaju vode od 11% je veća kod bukovine u odnosu na borovinu za 1,7 – 1,9 puta,

Svi dobiveni rezultati upućuju na zaključak da je brzina prolaska ultrazvuka kroz drvo veća u radijalnom smjeru nego u tangentskom zato što se u radijalnom smjeru kreće kroz drvene trakove te vrlo vjerojatno ovisi o udjelu i gustoći drvnih trakova.

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. Rabe, C., Ferner, D., Fink, S., Schwarze, F. W.M.R. (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., Bar-Cohen, Y (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. (2017): 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. (2006): 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*.