

Brzina širenja ultrazvuka kroz drvo razoreno gljivom smeđe truleži

Kesak, Igor

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:108:064243>

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

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



Repository / Repozitorij:

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



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

IGOR KESAK

**BRZINA ŠIRENJA ULTRAZVUKA KROZ DRVO RAZORENO
GLJIVOM SMEĐE TRULEŽI**

DIPLOMSKI RAD

ZAGREB, 2022.

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

**BRZINA ŠIRENJA ULTRAZVUKA KROZ DRVO RAZORENO
GLJIVOM SMEĐE TRULEŽI**

DIPLOMSKI RAD

Diplomski studij: Drvnotehnološki procesi

Predmet: Zaštita drva II

Ispitno povjerenstvo:

1. izv. prof. dr. sc. Marin Hasan, mentor
2. doc. dr. sc. Vinko Paulić, komentor
3. doc. dr. sc. Tomislav Sedlar, član

Student: Igor Kesak

JMBAG: 0068222566

Broj indeksa: 1104/19

Datum odobrenja teme: 04. 05. 2021.

Datum predaje rada: 20. 09. 2022.

Datum obrane rada: 28. 09. 2022.

Zagreb, Rujan, 2022

Dokumentacijska kartica

Naslov	Brzina širenja ultrazvuka kroz drvo razoreno gljivom smeđe truleži
Title	Speed of Ultrasound Propagation through Wood Decayed by Brown Rot Fungus
Autor	Igor Kesak, bacc. ing.
Adresa autora	Završje Loborsko 146, 49253 Lobor
Mjesto izrade	Fakultet šumarstva i drvne tehnologije, Zavod za znanost o drvu Laboratorij za anatomska svojstva i zaštitu drva
Vrsta objave	Diplomski rad
Mentor	Izv. prof. dr. sc. Marin Hasan
Izradu rada pomogao	Doc. dr. sc. Vinko Paulić
Godina objave	2022.
Obujam	Stranica: 31+IX Slika: 23 Tablica: 2 Navoda literature: 22
Ključne riječi	biološka razgradnja, in-situ ispitivanje, nerazorno ispitivanje, zdravost drva
Key words	biological degradation, in-situ testing, nondestructive testing, health of wood
Sažetak	<p>Ultrazvučna ispitivanja danas se vrlo često koriste u dijagnostičke svrhe određivanja zdravosti drva kao nerazorna metoda. Vrlo je malo provedenih ispitivanja utjecaja stupnja biološke razgradnje na brzinu širenja ultrazvuka kroz drvo. Uzorci borovine i bukovine bili su izloženi gljivi smeđe truleži <i>Gloeophyllum trabeum</i> te je određeno nekoliko različitih stupnja razgradnje. Nakon kondicioniranja razorenih uzoraka, izmjerena je brzina širenja ultrazvuka kroz njih u radijalnom i tangentnom smjeru.</p> <p>Povećanjem gubitka mase djelovanjem gljive proporcionalno se smanjuje brzina prolaska ultrazvuka kroz drvo i u radijalnom i u tangentnom smjeru. Bez obzira na vrstu drva i gustoću i najmanji gubitak mase djelovanjem micelija gljive rezultirao je smanjenjem brzine prolaska ultrazvuka kroz drvo u odnosu na zdravo drvo. Porastom gubitka mase djelovanjem micelija gljive brzina prolaska ultrazvuka kroz drvo značajno brže opada u radijalnom nego u tangentnom smjeru.</p>

Abstract

Nowadays, ultrasonic tests are very often used for diagnostic purposes to determine the health of wood as a non-destructive method. Very few studies have been conducted on the influence of the degree of biodegradation on the speed of ultrasound through wood. Pine and beech specimens were exposed to the brown rot fungus *Gloeophyllum trabeum* and several different levels of degradation were determined. After conditioning the decayed specimens, the speed of ultrasound propagation through them was measured in the radial and tangential directions.

By increasing the mass loss due to the action of the fungus, the speed of ultrasound through the wood is proportionally reduced in both the radial and tangential directions. Regardless of the wood species and its density, even the smallest mass loss resulted in a decrease in the speed of ultrasound through the wood compared to healthy wood. With the increase in mass loss, the speed of ultrasound through decayed wood decreases significantly faster in the radial direction than in the tangential direction.

	IZJAVA O IZVORNOSTI RADA	OB ŠF 05 07
		Revizija: 2
		Datum: 29.04.2021

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

vlastoručni potpis

Igor Kesak

U Zagrebu, 19. 09. 2022.

SADRŽAJ

1. Dokumentacijska kartica.....	II
2. SADRŽAJ	V
3. Popis slika	VI
4. Popis tablica	VIII
5. PREDGOVOR	IX
1. UVOD.....	1
2. DOSADAŠNJA ISPITIVANJA.....	3
3. CILJ RADA	6
4. MATERIJALI I METODE	7
4.1. Izrada i označavanje uzoraka	8
4.2. Sortiranje i grupiranje uzoraka	10
4.3. Priprema hranjive podloge i razvoj micelija gljive.....	10
4.4. Izlaganje uzoraka gljivi smeđe truleži.....	12
4.5. Mjerenje brzine prolaska ultrazvuka kroz drvo	13
4.5.1. Princip rada i dijelovi zvučnog tomografa	14
4.6. Priprema uzoraka i mjerenje brzine prolaska ultrazvuka kroz uzorke drva	17
4.6.1. Određivanje gubitka mase djelovanjem gljive, GMG	18
4.6.2. Mjerenje brzine prolaska ultrazvuka kroz uzorke drva.....	18
4.6.3. Izračun brzine prolaska ultrazvuka kroz uzorke	20
5. REZULTATI.....	21
6. ZAKLJUČCI.....	29
7. LITERATURA	30

Popis slika

Slika 1. Shema piljenja četvrtaka i elemenata iz piljenica.....	8
Slika 2. Shema finog piljenja uzoraka iz fino blanjanih elemenata.....	8
Slika 3. Precizna digitalna laboratorijska vaga.....	9
Slika 4. Digitalno pomično mjerilo sa automatskim spremanjem mjernih podataka na računalo.....	9
Slika 5. Hranjiva podloga – krumpirova dekstroza (PDA proizvođača Biolife)	10
Slika 6. Laboratorijska oprema za rad s gljivama: a) autoklav, b) kabinet za rad u čistom	11
Slika 7. Rad u čistom kabinetu: a) ulijevanje hranjive podloge, b) inokulacija gljiva	12
Slika 8. Ispitne flašice s uzorcima izloženima miceliju čiste kulture gljive <i>Gloeophyllum trabeum</i> u mikološkoj klima komori	13
Slika 9. Zvučni tomograf RINNTECH Arbotom – Scientific 2D/3D s oprem	14
Slika 10. Fotografije dijelova tomografa.....	16
Slika 11. Uzorak pritegnut u stolnu stegu s pričvršćenim mjernim sensorima i računalo s programom ARBOTOM 2.0.....	17
Slika 12. Uzorak pričvršćen u stolnu stegu sa antivibracijskom PU podlogom i pričvršćenim mjernim sensorima	19
Slika 13. Uzorak pričvršćen u stolnu stegu s pričvršćenim sensorima i matematičko njihalo s graničnikom otklona postavljeno za pobuđivanje senzora 2	19
Slika 14. Usporedba gustoće uzoraka bukovine i borovine grupiranih u dvije grupe	21
Slika 15. Gubitak mase borovih uzoraka manje gustoće (Pm) djelovanjem gljive <i>Gloeophyllum trabeum</i> , GMG	22
Slika 16. Gubitak mase borovih uzoraka veće gustoće (PM) djelovanjem gljive <i>Gloeophyllum trabeum</i> , GMG	23
Slika 17. Gubitak mase bukovih uzoraka manje gustoće (Bm) djelovanjem gljive <i>Gloeophyllum trabeum</i> , GMG	23

Slika 18. Gubitak mase bukovih uzoraka veće gustoće (BM) djelovanjem gljive Gloeophyllum trabeum, GMG	24
Slika 19 Omjer gubitka mase uzoraka veće i manje gustoće bukovine i borovine kroz vrijeme izlaganja	25
Slika 20. Ovisnost brzine prolaska ultrazvuka kroz drvo bora manje gustoće	26
Slika 21. Ovisnost brzine prolaska ultrazvuka kroz drvo bora veće gustoće.....	26
Slika 22. Ovisnost brzine prolaska ultrazvuka kroz drvo bukve manje gustoće	27
Slika 23. Ovisnost brzine prolaska ultrazvuka kroz drvo bukve veće gustoće	27

Popis tablica

Tablica 1. Fizikalna i mehanička svojstva bijelog bora (<i>Pinus sylvestris</i> ; Horvat i Krpan (1987))	7
Tablica 2. Fizikalna i mehanička svojstva obične bukve (<i>Fagus sylvatica</i> ,L.; Horvat i Krpan (1987), Vergot (2018)).....	7

PREDGOVOR

Ovim putem htio bih se zahvaliti svom mentoru izv. prof. dr. sc. Marinu Hasanu koji je svojom pomoći i stručnim znanjem uvelike doprinio izradi ovog rada. Ujedno bih se htio zahvaliti doc. dr. sc. Vinku Pauliću na opremi za izradu ovog rada i obuci kako se s njome radi. Hvala svim profesorima i asistentima na prenesenom znanju i pomoći tijekom studiranja kao i svim kolegicama i kolegama koji su bili uz mene.

Posebna zahvala roditeljima i obitelji koji su bili podrška kroz cijelo vrijeme studiranja i bez kojih sve ovo ne bi bilo moguće.

1. UVOD

Otkad je čovjeka masivno se drvo koristilo u različite svrhe. Moderno pak čovječanstvo masivno drvo koristi od izrade nosivih konstrukcija i građevina pa do izrade namještaja. Iako je drvo samoobnovljiv prirodni materijal, u današnje se doba, zbog sve većih potreba za cijelovitim drvom, dolazi do problema zbog nedovoljno kvalitetnih vrsta drva, ali i zbog problema varijabilnosti prirodnih svojstava i obilježja drva na koje se ne može utjecati pri rastu stabala. Toj problematici djelomično se doskočilo lameliranjem elemenata pri čemu se elementi manjih dimenzija međusobno lijepe i na taj način se dobivaju elementi velikih dimenzija.

Kroz stoljeća ispitivana su razna svojstva drva kao čvrstoća, tvrdoća, ali i ostala mehanička svojstva. Sve su to metode za koje se trebaju posebno pripremiti ispitni uzorci i kojima se ti isti uzorci trajno razaraju. Kako znanost sve više napreduje tako raste i znanje o drvu kao materijalu, ali se javljaju i sve novije, naprednije, preciznije i pouzdanije metode ispitivanja. Tako se pojavila i ideja o nerazornim metodama ispitivanja drva. Jedna od takvih metoda temelji se na upotrebi ultrazvuka. Ultrazvuk je vrsta mehaničkih valova frekvencije 20 KHz do 10 GHz (www.enciklopedija.hr), a za ispitivanja materijala najčešće se koriste frekvencije od 0,5 MHz do 10 MHz. Ultrazvučnoj metodi ispitivanja posljednjih petnaestak godina daje se sve veće značenje što dokazuju brojni europski, ali i svjetski kongresi kao i časopisi o nedestruktivnim metodama ispitivanja materijala.

Ultrazvučno ispitivanje temelji se na širenju zvuka kroz materijale i odbijanja od granica materijala koji imaju različita akustična svojstva. Ukoliko u materijalu postoji greška na izlazu će ultrazvučni valovi oslabiti ili se uopće neće pojaviti. Iako posvoji više tehnika ultrazvučnog ispitivanja u praksi se najčešće koristi metoda impuls – odjek ili metoda prozvučavanja, a koriste se ravne i/ili kutne ultrazvučne glave (sonde; Bubalo, 2017).

Ultrazvučna ispitivanja danas se vrlo često koriste za procjenu zdravosti stabala u parkovima i urbanim sredinama gdje svako nezdravo stablo predstavlja opasnost. Osim toga ova se metoda koristi i za određivanje zdravosti nosivih elemenata izrađenih od drva kao i u industrijske svrhe za kontrolu kvalitete gotovih proizvoda.

Mjerenje je i u laboratorijskim i u realnim uvjetima prilično jednostavno te su provedena brojna istraživanja na drvu, ali često sa proturječnim i kontradiktornim rezultatima. No, još uvijek ima mnogo nepoznanica o mnogim utjecajnim čimbenicima kao i o tome kako oni utječu na brzinu prolaska ultrazvuka kroz drvo. Usprkos brojnih istraživanja i provedenih eksperimenata na biološki razgrađenom drvu, malo je pouzdanih podataka o tome kako razaranje drva lignikolnim gljivama truležnicama utječe na brzinu širenja zvuka kroz razoreno drvo. Upravo je to bio razlog odabira ove teme za diplomski rad. U radu će se mjeriti brzina prolaska ultrazvuka kroz drvo dviju različitih vrsti u radijalnom i tangentalnom smjeru na tri različite gustoće. Nakon mjerenja brzine prolaska ultrazvuka kroz zdravo drvo, uzorci će biti izloženi miceliju čiste kulture odabrane lignikolne gljive smeđe truleži različiti vremenski period kako bi se dobili različiti stupnjevi biološke razgradnje drva, a potom će se ponovo mjeriti brzina prolaska ultrazvuka kroz tako razoreno drvo. Ovaj rad je doprinos opsežnim istraživanjima i kreiranju baze podataka odnosno korekcijskih vrijednosti za ultrazvučno određivanje zdravosti drva u uporabi.

2. DOSADAŠNJA ISPITIVANJA

Iako je bilo podosta istraživanja da uzorak može vibrirati bez fizičkog dodira izvora zvuka, određene metode koje su se koristile pokazivale su velike gubitke energije. Stoga je dosadašnja beskontaktna tehnika dobila samo ograničenu primjenu. Sama metoda zvučnog valnog vala obično se koristi na dva različita načina mjereći brzinu zvuka ili vibracijski spektar. Mjerenje brzine zvuka, koje se često koristi za izražavanje dinamičkog modula elastičnosti, koristi se kod proizvoda od drva (Unger i sur., 2001). Razlog njegova korištenja je jednostavnost u korištenju ispitnih instrumenata i računanju. Obično se brzina zvuka pretvara u modul elastičnosti. Unatoč svojoj jednostavnosti, korištenje modula elastičnosti kao nedestruktivnog parametra je imalo svoje određene nedostatke (Thomson, 1981).

S druge strane, spektralnom analizom valnog naprezanja iz kojeg su odabrani nedestruktivni parametri mogu se prevladati mnogi nedostaci koji utječu na brzinu zvuka (Bodig, 1995), kao što su veliki broj neovisnih parametara (maksimalna energija, pomicanje frekvencije, dominantna frekvencija, prigušenje, itd.) te odabir manje utjecajnih parametara s obzirom na nekontrolirane uvjete okoliša (vlaga zraka i materijala, temperatura okoline i temperatura materijala koji se ispituje, itd.).

Beall (1987) je opisao da je analiza naprezanja ultrazvučnog vala slična pristupu analize zvučnog vala osim što se primjenjuje na višim frekvencijama. Ultrazvučna metoda najčešće se koristila kod homogenih, neporoznih materijala za otkrivanje unutarnjih nedostataka ispitivanog materijala (Mal i sur., 1991). Iako se ta metoda koristi i na drvu i drvnim kompozitima, manje je učinkovita zbog nehomogene, porozne i anizotropne prirode drva kao materijala. Do danas su se istraživale mnoge metode i postupci nerazornih ispitivanja prijenosa zvučnih valova kroz drvo i drvene kompozite, a sve su one vodile ka današnjim razvijenijim tehnikama za još bolja, preciznija i pouzdanija ispitivanja pomoću ultrazvuka.

Bilo je pokušaja i ultrazvučnim valovima pred tretirati drvo kod sušenja u kombinaciji sa vakuumom čime su se dobili značajno bolji rezultati nego kod običnog vakuuma sušenja ili nekog drugog postupka. Rezultati su bili slijedeći:

- tijekom postupka vakuumske sušenja, sušenje uzoraka pred tretiranih ultrazvukom bilo je brže od onih uzoraka koji se sušeni bez ultrazvuka,

- uzorci koji su tretirani ultrazvukom imali su veću djelotvornu difuzivnost vode od netretiranih, a ultrazvuk je bio pogodan za vakuumsko sušenje onih vrsta koje imaju sadržaj vode iznad točke zasićenosti vlakanaca,
- konačan zaključak je bio da se ultrazvučna – vakuum metoda sušenja može primijeniti u industriji sušenja i na taj način povećati uštedu energije i kvalitetu proizvoda (Sales, 2005).

U novije vrijeme neka su ispitivanja obavljena na dvije ultrazvučne tehnologije, akustična emisija i akustična ultrazvučna emisija. Svrha je bila pregled u smislu karakteristika i primjene na drvo i materijala na bazi drva. Fokus je stavljen na dvije tehnologije, uključujući učinak širenja zvučnih valova na drvo i osjetljivost na oštećenja i druga svojstva. Ispitivane su ploče iverice na puzanje te kakav je utjecaj ultrazvučnih valova na ljepilo u pločama od drva odnosno na razaranje ljepila te raslojavanje ploča (Beall, 2007).

Saadat-Nia i suradnici (2011) su ispitivali utjecaj gustoće drva na brzinu ultrazvučnog vala. Cilj te studije bio je analizirati utjecaj gustoće na brzinu ultrazvučnog vala koji se širi u uzdužnom smjeru. Eksperiment su proveli na uzorcima od 5 × 5 cm slijedećih vrsta drva: *Pinus Caribea*, *Eucalyptus citriodora*, *Eukaliptus grandis*, *Goupia glabra* i *Hymenaea* sp.. Odnos između gustoće i brzine ultrazvuka analiziran je između i unutar vrsta. Rezultati dobiveni između vrsta, pokazali su da se brzina ultrazvuka povećava sa povećanjem gustoće. Rezultati dobiveni unutar vrsta također su pokazali tendenciju povećanja brzine ultrazvuka porastom gustoće drva, ali odnos nije bio toliko značajan kao što je bio između različitih vrsta drva (Saadat-Nia i sur., 2011).

Do sličnih rezultata da porastom gustoće drva raste brzina širenja ultrazvuka kroz drvo u longitudinalnom smjeru došao i Sales (2005) u svojim ultrazvučnim istraživanjima provedenim na nekoliko različitih brazilskih vrsta drva. Ispitivanja koja su provedena na bijelome boru i običnoj bukvi u Laboratoriju za anatomska svojstva i zaštitu drva također potvrđuju da porastom gustoće linearno raste brzina ultrazvuka i u radijalnom i u tangentalnom smjeru, kako unutar svake vrste isto tako i između njih (Jurišić, 2022; Domitrović, 2020; Paczesniovsky, 2019 i Šporčić, 2019).

Brzina širenja ultrazvučnih valova u glavnim smjerovima drva pri 300 kHz ispitivana je na drvu topole i smreke, u reakcijskom i normalnom drvu (Saadat-Nia i

sur., 2011). Ispitivanje je provedeno na uzorcima $2 \times 2 \times 10$ cm, odabranim od srca do kore. Iste vrijednosti brzine prolaska ultrazvuka izmjerene su u topoli u tenzijskom i normalnom drvu. U kompresijskom drvu brzina valova je bila manja u longitudinalnom smjeru, a veća u lateralnim smjerovima. Ukupne brzine ultrazvuka mjerene u longitudinalnom smjeru u tenzijskom drvu bile su veće nego u normalnom drvu, ali niže vrijednosti su dobivene u kompresijskom drvu spram vrijednosti dobivenih u normalnom drvu. Rezultati su pokazali da strukturna svojstva reakcijskog drva ne utječu značajno na slabljenje valova. Bolji put prijenosa energije valova pronađen je u reakcijskom drvu topole i smreke nego u normalnom drvu. Akustično zračenje u reakcijskom drvu obiju vrsta bilo je niže od razina dobivenih u normalnom drvu u svim smjerovima. Rezultati dobiveni usporedbom reakcijskog drva i normalnog drva obiju vrsta pokazali su da se brzina zvuka smanjuje kako se sadržaj vode u drvu povećava, ali koeficijenti prigušenja se blago povećavaju (Saadat-Nia i sur., 2011).

Zvučnim tomografom, kao nerazornom metodom temeljenom na mjerenju brzine prolaska ultrazvuka kroz drva, danas se vrlo često koriste za procjenu zdravosti stabala u parkovima i urbanim sredinama gdje svako nezdravo stablo predstavlja opasnost. Mnoga ispitivanja su pokazala da je ultrazvučni tomograf vrlo dobar alat za procjenu zdravosti stabala u urbanim sredinama i parkovnim arhitekturama (Paulić i suradnici, 2022; Cristini i sur., 2021; Škarica, 2019).

U istraživanjima Stepinca i suradnika (2017) ispitala se brzina ultrazvuka u drvu, te je nakon pomnog ispitivanja donesen zaključak da se brzina proporcionalno smanjuje s povećanjem temperature i povećanjem sadržaja vode u drvu, s obzirom na utjecaj tih varijabli na modul elastičnosti i gustoću. Također, primjećeno je da se brzina ultrazvuka smanjuje s porastom frekvencije i amplitude vibracija (Stepinac i sur., 2017).

Brzina širenja zvuka u zraku pri standardnom atmosferskom tlaku i temperaturi od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ u prosjeku je iznosila $331,8\text{ m/s}$, a pri tlaku od $1013,25\text{ hPa}$ i sobnoj temperaturi je iznosila 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).

3. CILJ RADA

Izmjeriti će se brzina prolaska ultrazvuka kroz zdravo drvo, a potom će se uzorci izlagati djelovanju micelija čiste kulture gljive smeđe truleži kroz nekoliko različitih vremenskih intervala. Izmjeriti će se brzina prolaska ultrazvuka kroz uzorke nakon izlaganja gljivi smeđe truleži ovisno o intenzitetu razgradnje i o gustoći drva.

Temeljem dobivenih rezultata cilj rada je utvrditi sljedeće:

- a) utjecaj vremena izlaganja na intenzitet biološke razgradnje testiranih vrsti drva;
- b) utjecaj gustoće drva na intenzitet biološke razgradnje;
- c) utjecaj biološke razgradnje drva odabranom gljivom na brzinu prolaska ultrazvuka kroz drvo;
- d) kakav je odnos brzina prolaska ultrazvuka u radijalnom i tangentskom smjeru između zdravog i biološki razorenog (natrulog) drva?

4. MATERIJALI I METODE

Za ovo ispitivanje korišteni su uzorci bijelog bora (*Pinus sylvestris*) i uzorci obične bukve (*Fagus sylvatica*). Uzorci su dimenzija $46 \times 46 \times 14 \pm 0,2$ mm (R×T×L). U tablicama 1 i 2 prikazani su podaci iz literature osnovnih fizikalnih i mehaničkih svojstva drva bijelog bora i obične bukve.

Tablica 1. Fizikalna i mehanička svojstva bijelog bora (*Pinus sylvestris*; Horvat i Krpan (1987))

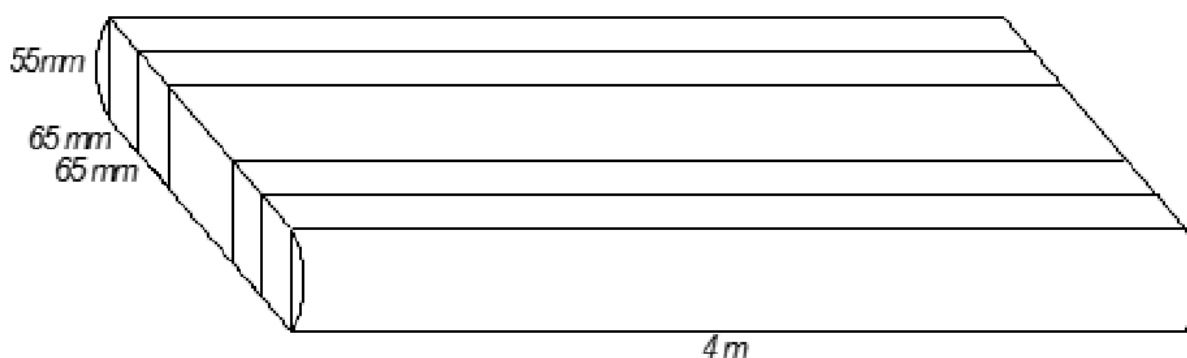
Svojstvo	Minimalna vrijednost	Srednja vrijednost	Maksimalna vrijednost
Gustoća, ρ [g/cm ³]	0,30	0,49	0,86
Utezanje, α [%]			
radijalno		4,0	
tangencijalno		7,7	
longitudinalno		0,4	
volumno		12,4	
Tvrdoća [MPa]		30	
Čvrstoća na tlak [MPa]		47	
Udarna radnja loma [kJ/m ²]		70	

Tablica 2. Fizikalna i mehanička svojstva obične bukve (*Fagus sylvatica*,L.; Horvat i Krpan (1987), Vergot (2018))

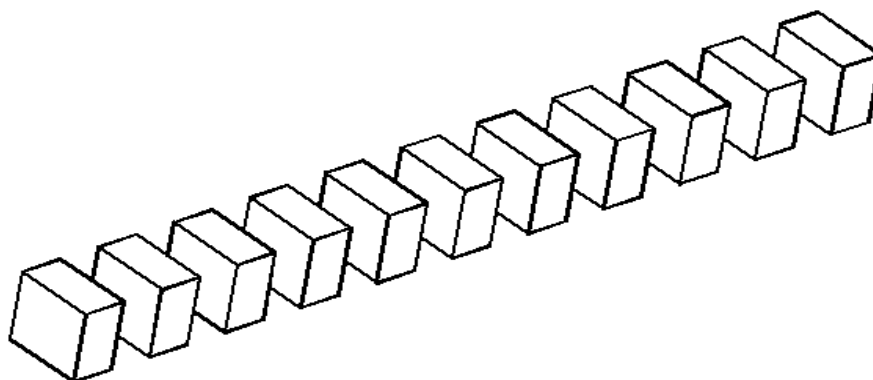
Svojstvo	Minimalna vrijednost	Srednja vrijednost	Maksimalna vrijednost
Gustoća, ρ [g/cm ³]	0,54	0,72	0,91
Utezanje, α [%]			
radijalno		5,8	
tangencijalno	8,3	10,05	11,8
longitudinalno	0,2	0,27	0,34
volumno	14	17,5	21
Tvrdoća [MPa]	54	78	11
Čvrstoća na tlak [MPa]	35	53	84
Udarna radnja loma [kJ/m ²]	30	100	190

4.1. Izrada i označavanje uzoraka

Nakon prirodnog sušenja i dosušivanja u sušionici iz piljenica su ispiljene letve debljine 55 mm, širine 65 mm i dužine 4 m (sl. 1). Bukove letve za uzorke ispiljene su odmah ispod kore, dok su borove letve ispiljene odmah ispod bijeljike. Svaka letva ispiljena je na 4 elementa duljine 1020 mm te nakon toga fino blanjani na elemente debljine 46×46 mm. Nakon blanjanja elementi su ispiljeni na kružnoj pili te smo dobili uzorke konačnih dimenzija 46×46×14 mm ± 0,2 mm (sl. 2)



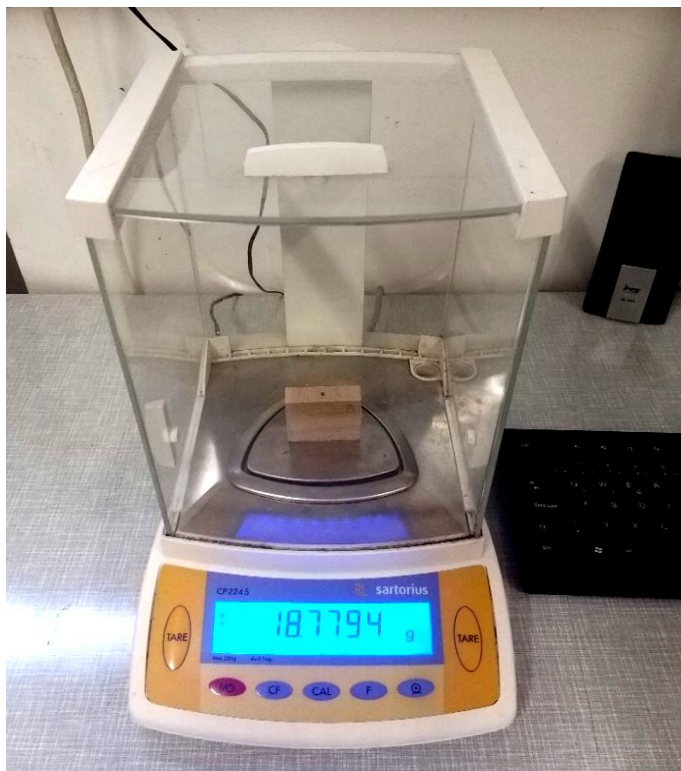
Slika 1. Shema piljenja četvrtaka i elemenata iz piljenica



Slika 2. Shema finog piljenja uzoraka iz fino blanjanih elemenata

Nakon što su uzorci iskrojeni isti su selektirani, grupirani i označeni. Uzorci koji su imali paralelne godove sa jednim bridom kod obje vrste drva koristili su se u daljnjem ispitivanju, dok ostali nisu korišteni. Svim odabranim uzorcima izmjerena je masa na preciznoj laboratorijskoj vagi (točnost očitavanja 0,1 mg) sa automatskim pohranjivanjem izmjerenih vrijednosti na računalo (sl. 3). Potom su digitalnim

pomičnim mjerilom (sl. 4) izmjerene dimenzije u sva tri smjera (RxTxL) svih uzoraka te su se iste automatski spremale na računalo.



Slika 3. Precizna digitalna laboratorijska vaga



Slika 4. Digitalno pomično mjerilo sa automatskim spremanjem mjernih podataka na računalo

4.2. Sortiranje i grupiranje uzoraka

Nakon što su uzorcima izmjerene mase i dimenzije izračunata je gustoća svakog uzorka te su prema gustoći podijeljeni u dvije skupine. Za daljnja ispitivanja, iz svake je skupine odabrano 30 uzoraka.

4.3. Priprema hranjive podloge i razvoj micelija gljive

Za ovo ispitivanje odabrana je čista kultura lignikolne gljive smeđe truleži *Gloeophyllum trabeum*. U destiliranoj vodi prema pravilnim omjerima (42 g na litru vode) otopljena je hranjiva podloga PDA (krumpirova dekstroza) proizvođača Biolife (sl. 5), te je smjesa kuhana dok nije proključala. Nakon toga vruća hranjiva podloga ulivena je u petrijeve zdjelice te sterilizirana u autoklavu na 121 °C, 25 minuta (sl. 6a). Nakon sterilizacije još vruće petrijeve zdjelice s hranjivom podlogom smještene su u kabinet za rad u čistom (sl. 6b i 7a) na hlađenje i otvrdnjavanje (geliranje) hranjive podloge. Kad se hranjiva podloga ohladila, nasaden je micelij čiste kulture lignikolne gljive smeđe truleži (postupak se provodio u sterilnim uvjetima u kabinetu za rad u čistom).



Slika 5. Hranjiva podloga – krumpirova dekstroza (PDA proizvođača Biolife)

Nakon što se gljiva u petrijevim posudicama razvila ponovo se je kuhala hranjiva podloga i ulijevala u staklene isitne bočice koje su prije ulijevanja oprane destiliranom vodom i predzagrijane u sušioniku na 103 ± 2 °C. Kad su se bočice

napunile sa 40 ml hranjive podloge automatskom pipetom, bočice su poklopljene te sterilizirane u autoklavu na 121 °C, 25 minuta. Po završetku sterilizacije, ispitne su bočice prenesene na hlađenje i geliranje u kabinet za rad u čistom. Nakon što se je hranjiva podloga ohladila iz pripremljenih petrijevih posudica precjepljivao se micelij gljive na hranjivu podlogu u ispitne bočice (sl. 7b). Inokulirane bočice s micelijem su odložene u mikološku klima komoru (sl. 8) da se po cijeloj površini hranjive podloge razvije micelij ($24 \pm 0,2$ °C i 75 ± 5 % relativne vlage zraka).



a

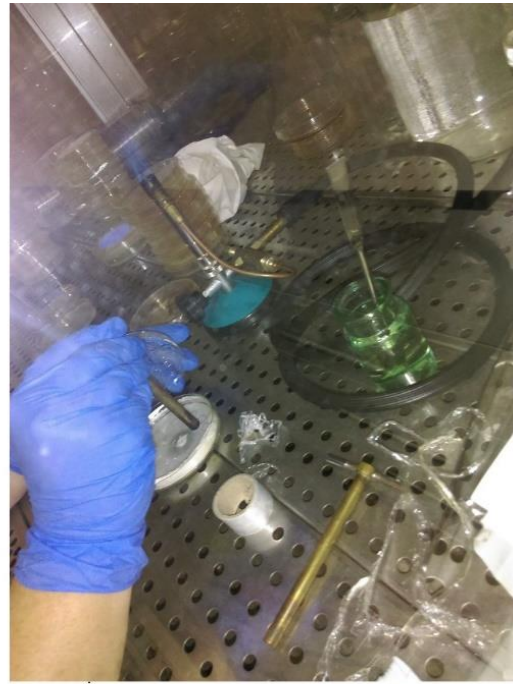


b

Slika 6. Laboratorijska oprema za rad s gljivama: a) autoklav, b) kabinet za rad u čistom



a



b

Slika 7. Rad u čistom kabinetu: a) ulijevanje hranjive podloge, b) inokulacija gljiva

4.4. Izlaganje uzoraka gljivi smeđe truleži

Kada se micelij gljive dovoljno razvio na njih su se stavljali uzorci i to na način da se prvo stavila plastična mrežica kako uzorci ne bi bili u direktnom kontaktu sa micelijem gljive. Na poklopac bočice upisan je datum kada su uzorci stavljeni na micelij kako bi se uzorci na vrijeme skinuli sa iste.

Uzorke je prije stavljanja na micelij gljive potrebno sterilizirati u autoklavu te ih ohladiti prije stavljanja na gljivu, a uzorci su hlađeni u kabinetu za rad u čistom pod UV svjetlom kako bi ostali sterilni.

Mrežica koja se stavljala između gljive u uzorka također je trebala biti sterilizirana. Mrežica se najprije oprala u destiliranoj vodi i zatim dodatno sterilizirala u autoklavu. Prije samo stavljanja mrežice na micelij u ispitne bočice, mrežica se dodatno sterilizirala iznad plamenika u kabinetu za rad u čistom kako bi bili sasvim sigurni da je sve sterilno. Uzorci su izlagani miceliju gljive 3, 5, 7,9 i 11 tjedana u mikološkoj klima komori (sl. 8).



Slika 8. Ispitne flašice s uzorcima izloženima miceliju čiste kulture gljive *Gloeophyllum trabeum* u mikološkoj klima komori

4.5. Mjerenje brzine prolaska ultrazvuka kroz drvo

Sva su mjerenja rađena pri sobnoj temperaturi od $22,5 \pm 0,5$ °C i pri relativnoj vlazi zraka od 60 %. Mjerenja su rađena pomoću zvučnog tomografa RINNTECH Arbotom – Scientific 2D/3D research version (www.rinntech.com). Izmjerena su vremena potrebna za prolaz ultrazvuka kroz uzorke od vrha jednog vijka do vrha drugog na duljini od 35 mm i automatski spremna u računalni program (sl. 9 i 11).



Slika 9. Zvučni tomograf RINNTECH Arbotom – Scientific 2D/3D s oprem

Kao igle za davanje impulsa u uzorke korišteni su čelični inox vijci $\Phi 4,5 \times 60$ mm. Debljina tijela vijaka je 3,15 mm. Vijcima je izbrušen vrh okomito na os (do punog promjera tijela vijka) kako bi svojim vrhom tupo nalijekali na dno izbušenih rupa u uzorcima. Uvijanje vijaka u uzorke izvršeno je akumulatorskim uvijačem AEG BSB14 STX-R. Konstantan pritisak vijka na dno rupe u uzorku osiguran je redukcijom okretnog momenta uvijanja na akumulatorskom uvijaču.

4.5.1. Princip rada i dijelovi zvučnog 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 u urbanim eksterijerima, 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. Mjerni uređaji mjere brzinu zvučnih valova u drvu prema izrazu (1):

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

gdje je:

v – brzina ultrazvučnog vala (m/s)

E – modul elastičnosti (N/mm²)

ρ – gustoća materijala (g/cm³)

4.5.1.1. Dijelovi ultrazvučnog tomografa

Komplet zvučnog tomografa ARBOTOM sastoji se od (sl. 10):

- senzora,
- baterijske jedinice,
- punjača,
- kabela za spajanje senzora,
- glavnog kabela (za baterijsku jedinicu i 1. senzor),
- kabela veza za računalo i baterijsku jedinicu (postoji mogućnost bežične veze),
- ostale dodatne opreme kao čavli za senzore, čekić i kliješta za zabijanje i vađenje čavala, metar i dr.,
- programski paket Arbotom 2.0.



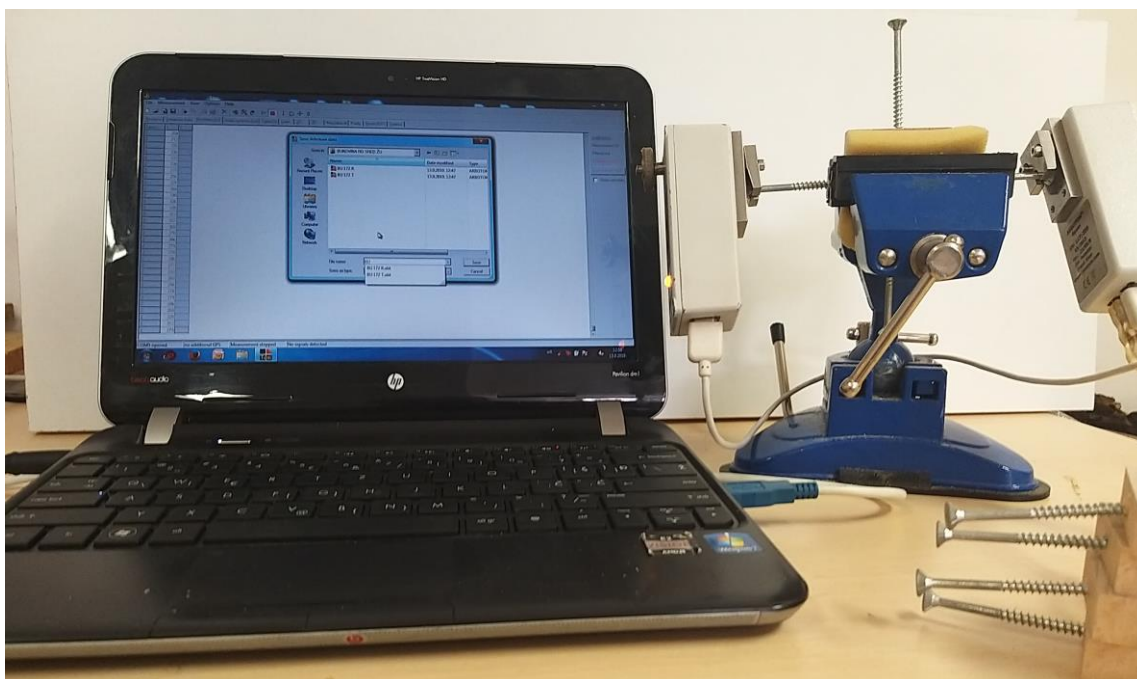
Slika 10. Fotografije dijelova tomografa

4.5.1.2. Računalni program ARBOTOM 2.0

Uređaj radi na način da bilježi podatke koje snima ARBOTOM uređaj i prikazuje ih u obliku matrice, linije ili površinskog grafa (sl. 9). Program je također osmišljen da sprema sva mjerenja, statistički i grafički obrađuje, a po potrebi ih je moguće i ispisati na pisaču.

Vrste podataka koje se bilježe su niže navedene:

- pozicije senzora,
- udaljenosti između senzora,
- vrijeme putovanja zvučnog impulsa između senzora,
- izračunate brzine ultrazvuka,
- postotne pogreške izmjere.



Slika 11. Uzorak pritegnut u stolnu stegu s pričvršćenim mjernim sensorima i računalo s programom ARBOTOM 2.0

4.6. Priprema uzoraka i mjerenje brzine prolaska ultrazvuka kroz uzorke drva

Nakon završetka određenog vremena izlaganja uzorci su izvađeni iz testnih flašica i pažljivo površinski očišćeni od micelija gljiva. Izmjerena im je masa i dimenzije, a zatim se vršilo mjerenje brzine prolaska ultrazvuka kroz natrule uzorke pri sadržaju vode optimalnom za razaranje gljivama (sl. 10 i 13). Nakon završenog mjerenja brzine ultrazvuka, uzorci su kondicionirani u standardnoj klimi ($T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $\varphi=65\%$) iduća 24 sata, a nakon toga su sušeni u sušioniku na $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 12 sati, a zatim na $103 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ i sušeni do konstantne mase (apsolutno suho stanje). Ovakvo postupno sušenje vršeno je kako ne bi došlo do pre naglog sušenja i posljedično mogućeg nepotrebnog raspucavanja uzoraka.

Kada su postigli apsolutno suho stanje, uzorci su ohlađeni u eksikatoru iznad silica-gela nakon čega im je ponovno izmjerena masa i dimenzije te im je tomografom ponovno mjerena brzina prolaska ultrazvuka u radijalnom i tangentalnom smjeru (ponavljajući postupak pripreme i načina ispitivanja).

4.6.1. Određivanje gubitka mase djelovanjem gljive, GMG

Gubitak mase djelovanjem micelija gljive, GMG određivan je prema izrazu (2):

$$GMG = ((m_0 - m_2) / m_0) \times 100 [\%] \quad (2)$$

gdje je:

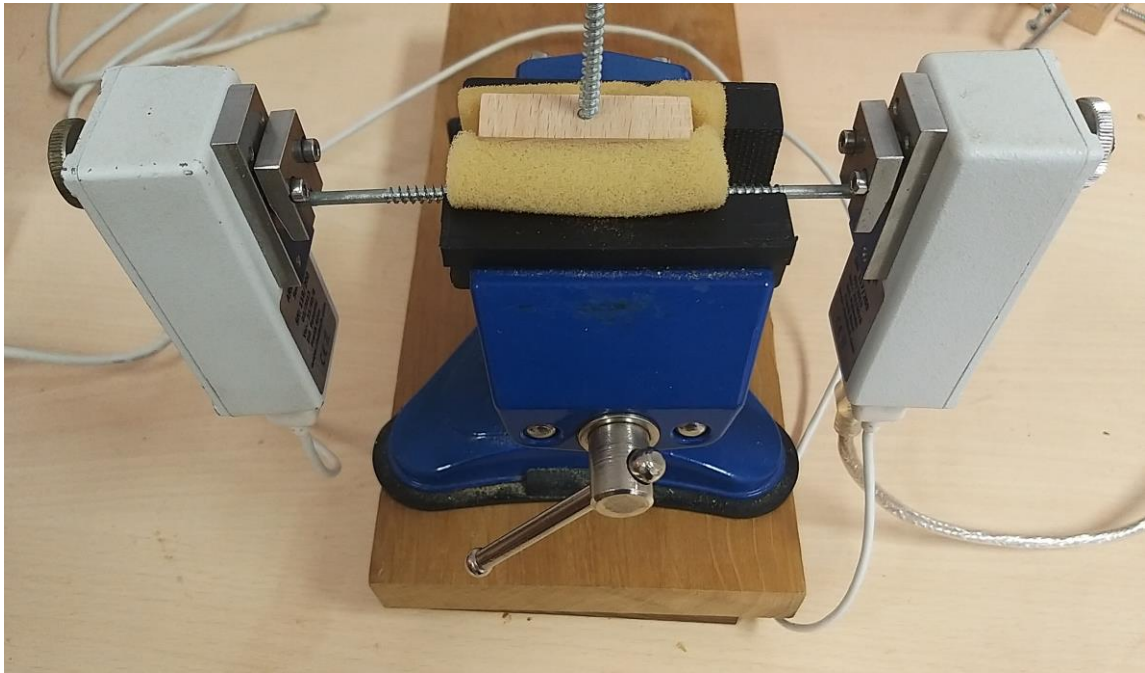
GMG – gubitak mase uzorka djelovanjem gljive (%),

m_0 – masa apsolutno suhog uzorka prije izlaganja gljivi (g) i

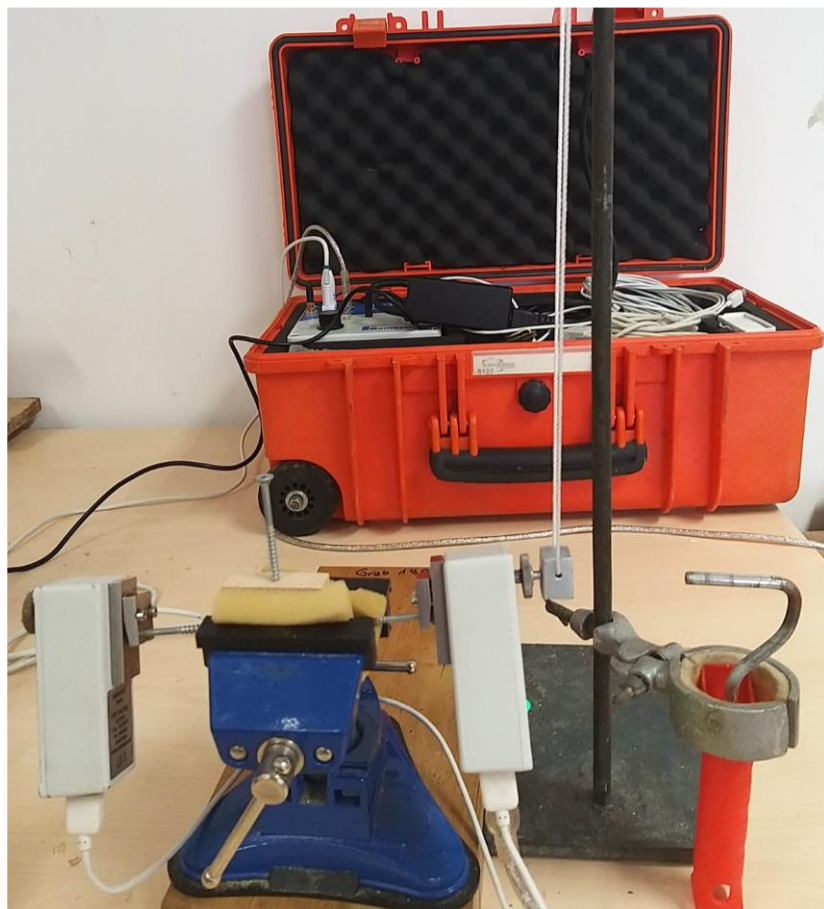
m_2 – masa apsolutno suhog uzorka nakon izlaganja gljivi (g).

4.6.2. Mjerenje brzine prolaska ultrazvuka kroz uzorke drva

Na vijke koji su na nasuprotnim stranama uzorka pričvršćen senzor, a zatim se uzorak pomoću PU spužve pričvršćuje u stolnu stegu (sl. 12). PU spužva služila je kao anti-vibracijska zaštita kako se ultrazvuk ne bi širio preko stege. Kako bi se osigurala jednaka pritisna sila na uzorke prilikom pričvršćavanja uzorka u stegu brojani su brojevi okretaja vijka stege. Kada su senzori postavljeni na vijke u uzorku spojen je cjelokupni mjerni lanac. Senzori su pobuđivani matematičkim njihalom mase utega 32,43 g. Duljina niti iznosila je 300 mm, a otklon od donje mrtve točke bio je 50 mm. Njihalo je postavljeno tako da je udarac utega njihala u senzor bio u donjoj mrtvoj točki njihala (sl. 13). Brzina prolaza ultrazvuka je ispitivana od jednog senzora na drugi i obrnuto kako bi se dobili pravilni i vjerodostojni podaci za daljnju analizu. Svaki senzor je pobuđen oko 100 puta, a mjereno je vrijeme prolaza ultrazvuka u radijalno i tangentialnom smjeru.



Slika 12. Uzorak pričvršćen u stolnu stegu sa antivibracijskom PU podlogom i pričvršćenim mjernim senzoriama



Slika 13. Uzorak pričvršćen u stolnu stegu s pričvršćenim senzorima i matematičko njihalo s graničnikom otklona postavljeno za pobuđivanje senzora 2

4.6.3. Izračun brzine prolaska ultrazvuka kroz uzorke

Rezultati mjerenja spremeni su za svaki uzorak posebno u programu, a zatim su preneseni u Ms Excel gdje su sortirani po vremenskom periodu izlaganja, gustoći, sadržaju vode i smjeru ispitivanja (radijalni ili tangentni) te prema vrsti drva. Dobiveni rezultati izraženi su u mikro sekundama (μs), a udaljenost između vijaka iznosila je 35 mm. Brzina prolaska ultrazvuka izražena je u metrima u sekundi(m/s), a dobivena je prema izrazu (3):

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

gdje su:

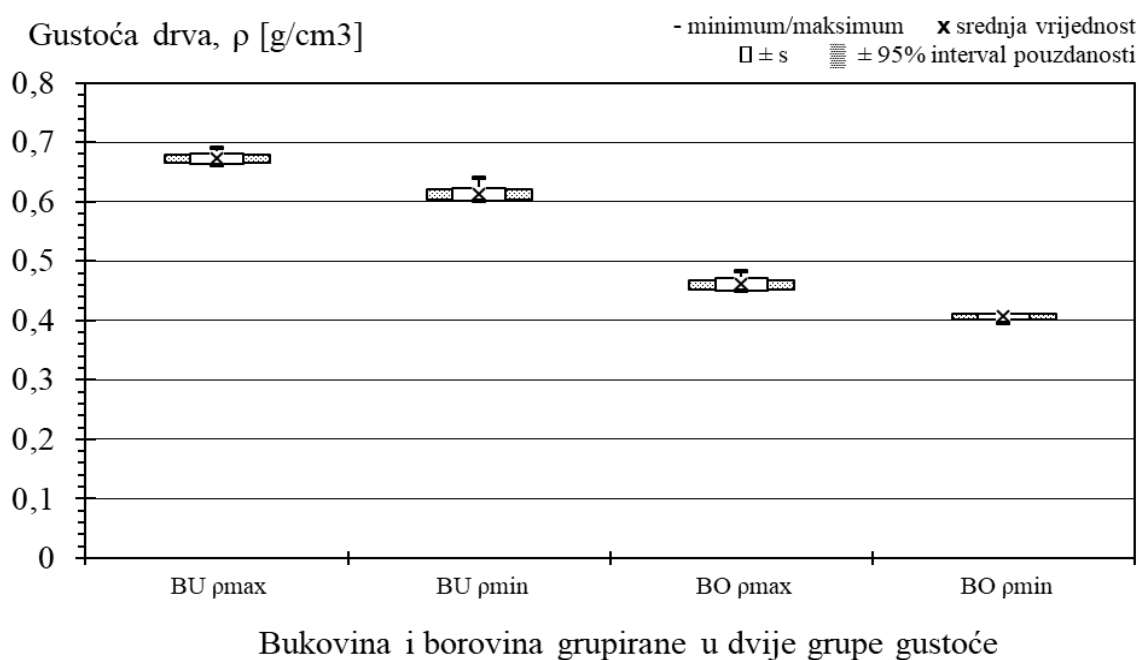
v – brzina ultrazvuka u m/s,

d – udaljenost između vrhova vijaka (put koji utrazvuk prođe od senzora 1 do 2 i obrnuto) izraženo u mm,

t_u – vrijeme potrebno da utrazvuk prođe od senzora 1 (2) do 2 (1) izraženo u μs .

5. REZULTATI

Uzorci i bukovine i borovine su grupirani u po dvije grupe sa statistički značajnom razlikom gustoće. Gustoća uzoraka bukovine na kojima se vršilo ispitivanje iznosila je 0,67 i 0,61 g/cm³, a gustoća borovine je iznosila 0,46 i 0,41 g/cm³ (sl. 14). Podaci gustoće uzoraka dobiveni ovim mjerenjem sukladni su podacima iz literature (tab. 1 i 2).



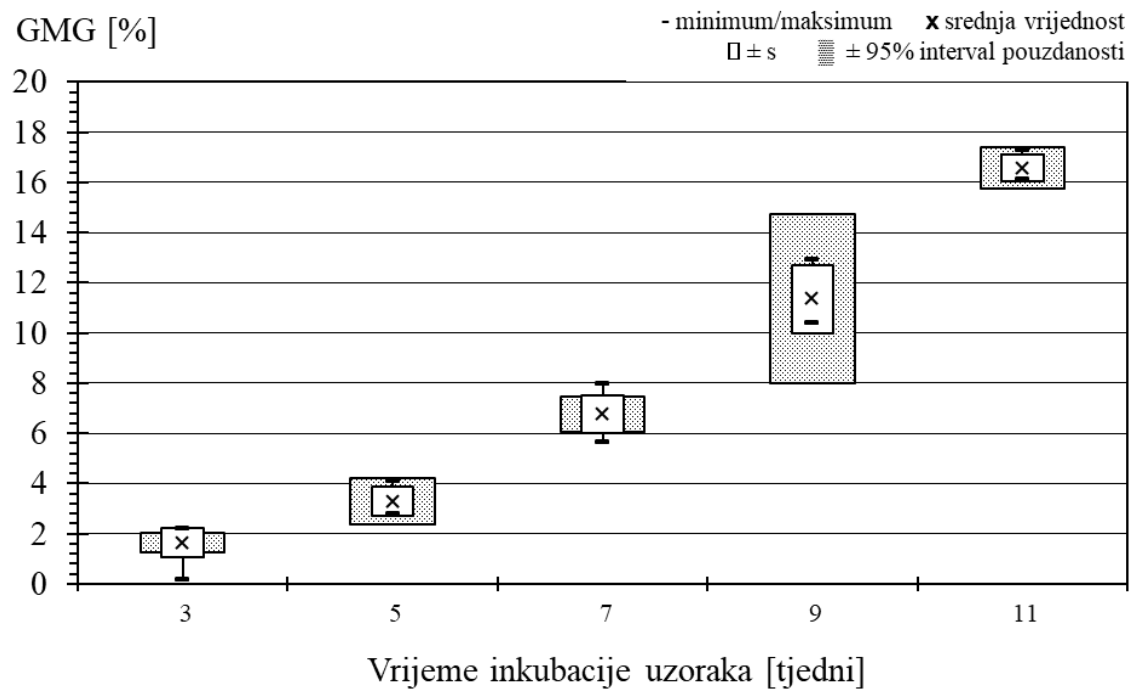
Slika 14. Usporedba gustoće uzoraka bukovine i borovine grupiranih u dvije grupe

Produljenjem vremena izlaganja uzoraka miceliju gljive gotovo linearno se povećava i gubitak mase djelovanjem gljiva (GMG) kod svih grupa uzoraka. Utvrđena je statistički značajna razlika u GMG između svih grupa uzoraka izlaganih djelovanju čiste kulture lignikolne gljive smeđe truleži *Gloeophyllum trabeum* (sl. 15-18).

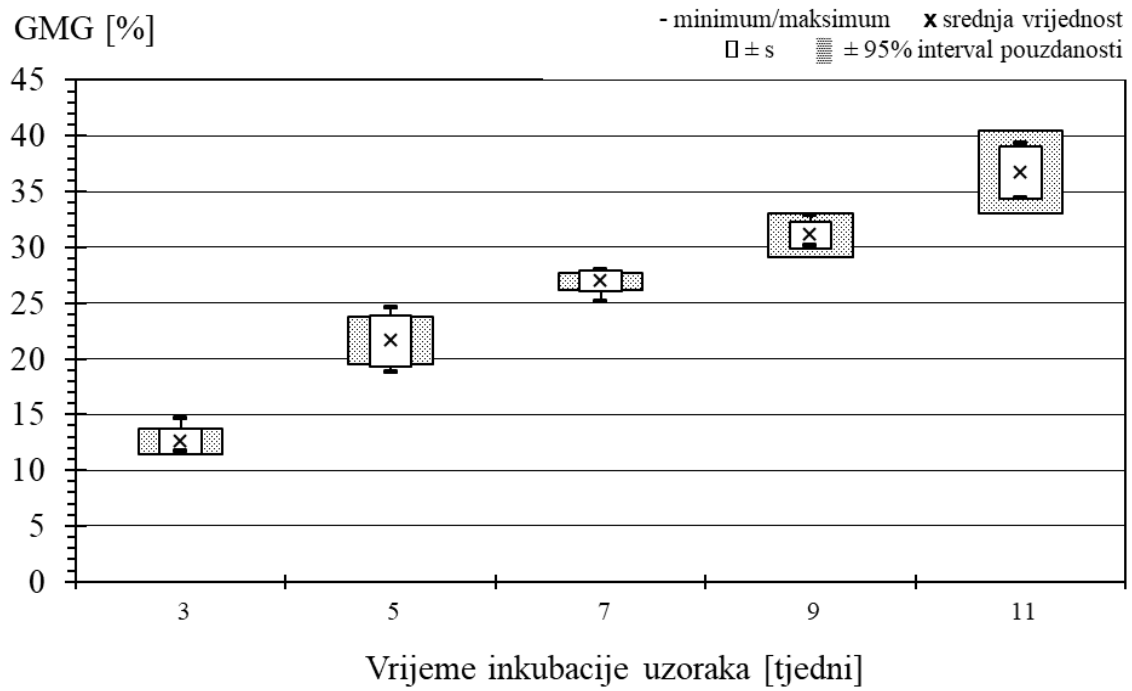
Uzorci borovine veće gustoće prosječno su izgubili redom 12,6; 21,6; 26,1; 29,9 i 36,7 % svoje početne mase za 3, 5, 7, 9 i 11 tjedana izlaganja navedenoj gljivi. Uzorci borovine manje gustoće redom su izgubili prosječno 1,6; 3,3; 6,8; 11,4 i 16,1 % svoje početne mase u istim vremenskim intervalima inkubacije (sl. 15 i 16).

Uzorci bukovine veće gustoće prosječno su izgubili redom 9,3; 14,5; 21,3; 25,4 i 28,6 % početne mase za 3, 5, 7, 9 i 11 tjedana izlaganja odabranom gljivi smeđe

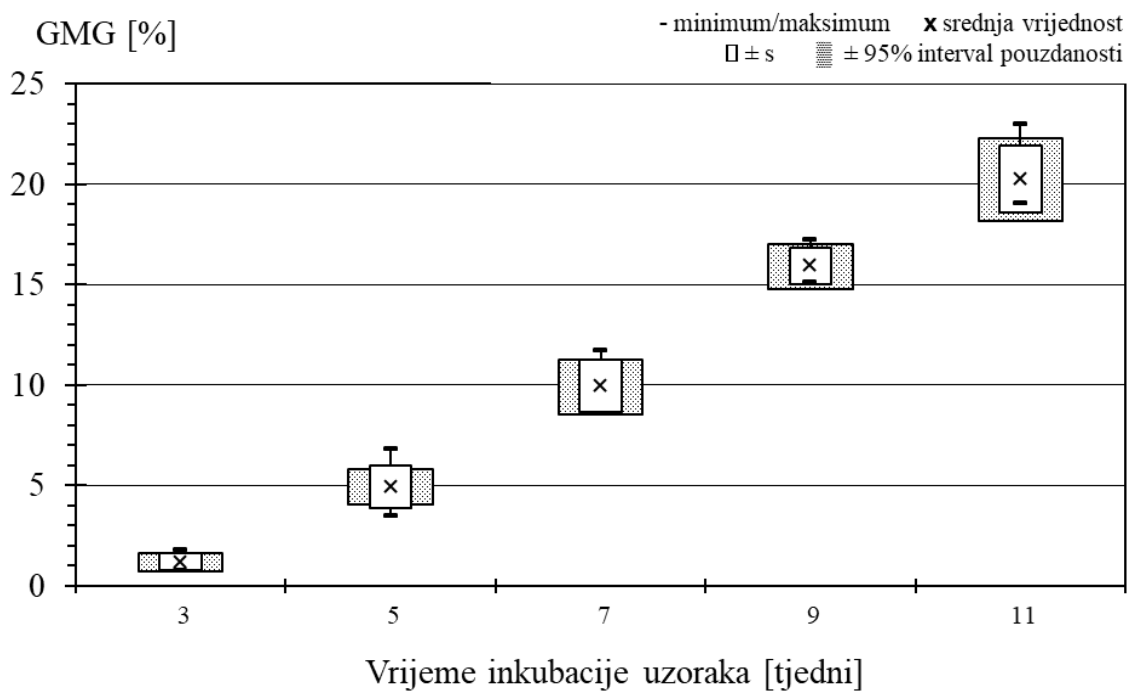
truleži. U isto vrijeme uzorci bukovine manje gustoće prosječno su izgubili redom 0,75; 5,0; 9,9; 15,9 i 20,3 % svoje početne mase (sl. 17 i 18).



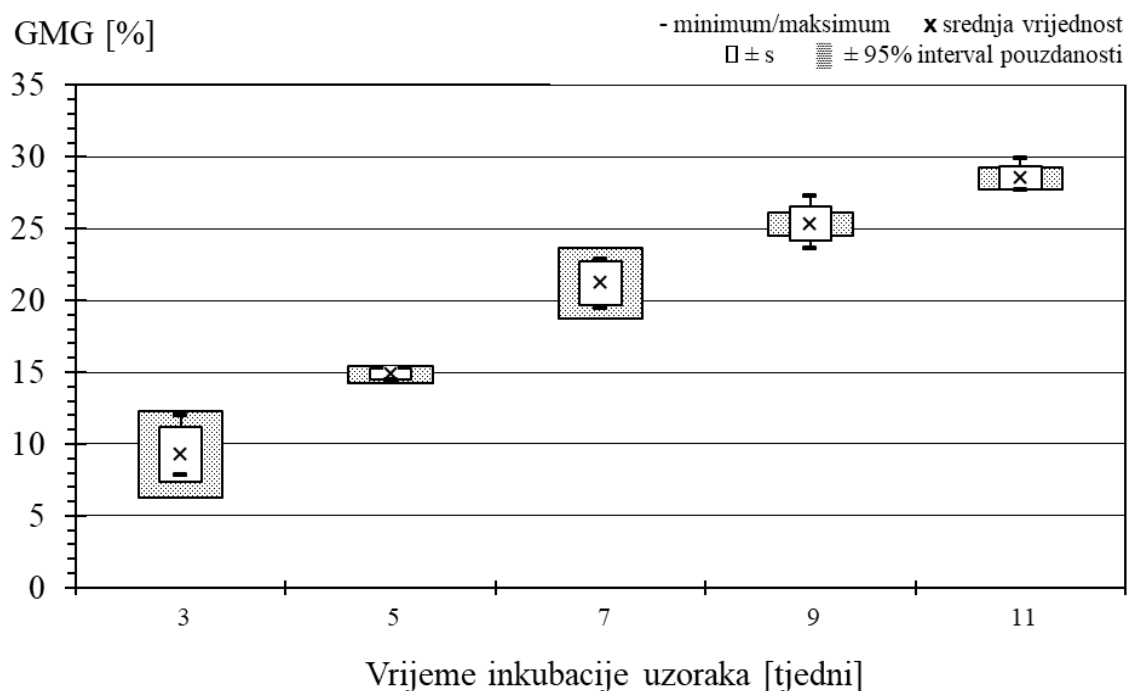
Slika 15. Gubitak mase borovih uzoraka manje gustoće (Pm) djelovanjem gljive *Gloeophyllum trabeum*, GMG



Slika 16. Gubitak mase borovih uzoraka veće gustoće (PM) djelovanjem gljive *Gloeophyllum trabeum*, GMG

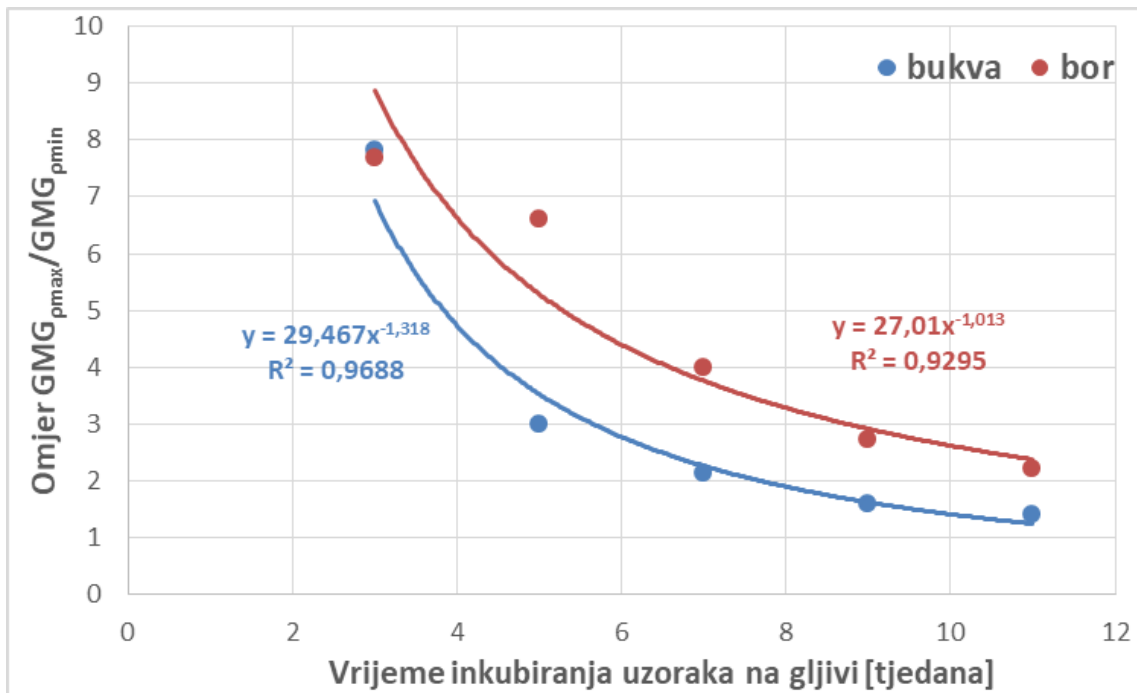


Slika 17. Gubitak mase bukovih uzoraka manje gustoće (Bm) djelovanjem gljive *Gloeophyllum trabeum*, GMG



Slika 18. Gubitak mase bukovih uzoraka veće gustoće (BM) djelovanjem gljive *Gloeophyllum trabeum*, GMG

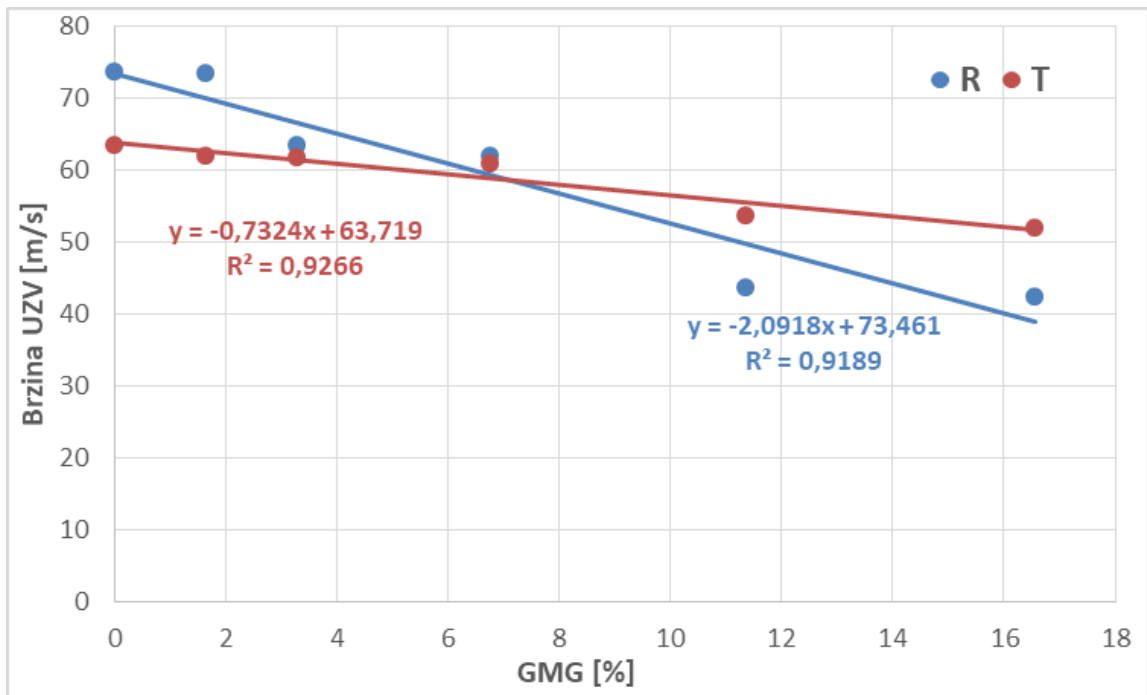
Ako se usporedi omjer gubitka mase djelovanjem gljive GMG uzoraka veće gustoće i GMG uzoraka manje gustoće za sve promatrane intervale inkubacije dobije se degresivna krivulja za obje vrste drva i to sa relativno velikim R^2 . Krivulje i za borovinu i za bukovinu vrlo su slične te je njihov odnos tj. pozicija kroz sve vremenske intervale inkubiranja gotovo konstantan. Ovakav rezultat vrlo je logičan ako se uzme u obzir mehanizam razgradnje drva lignikolnim gljivama smeđe truleži odnosno djelovanju egzo-enzima. Što je drvo gušće, učinkovitost razgradnje drva egzo-enzimima je veća pri optimalnim uvjetima za razgradnju drva gljivama (sl. 19).



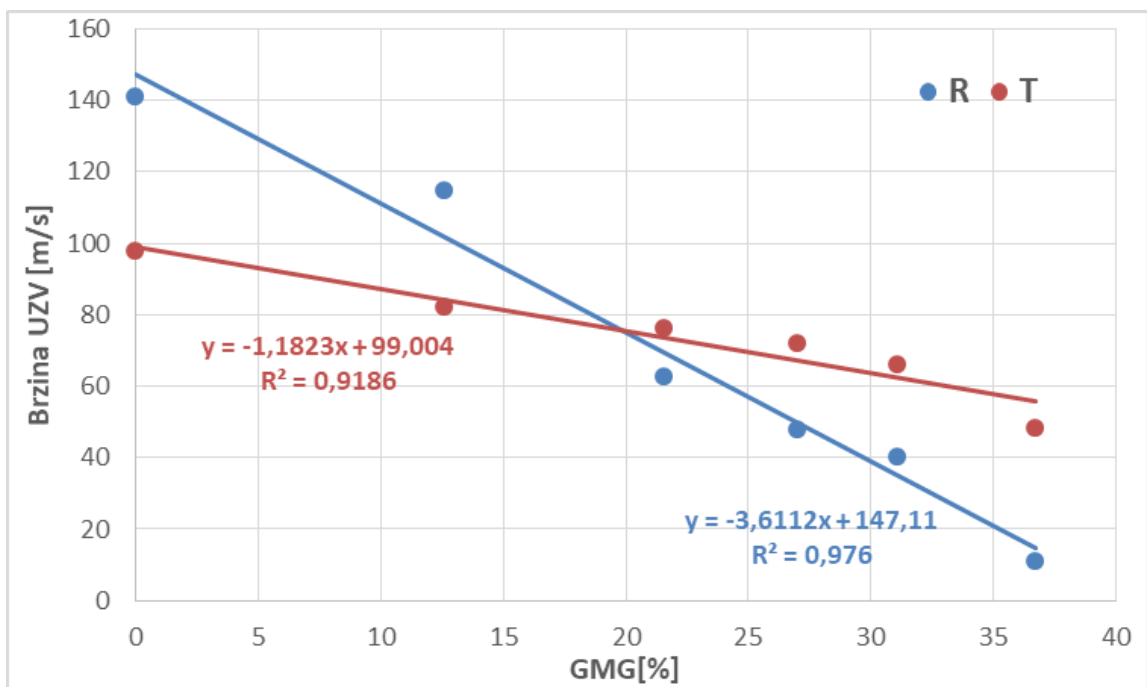
Slika 19 Omjer gubitka mase uzoraka veće i manje gustoće bukovine i borovine kroz vrijeme izlaganja

Prezentirani rezultati brzine prolaska ultrazvuka mjereni su na uzorcima u apsolutno suhom stanju.

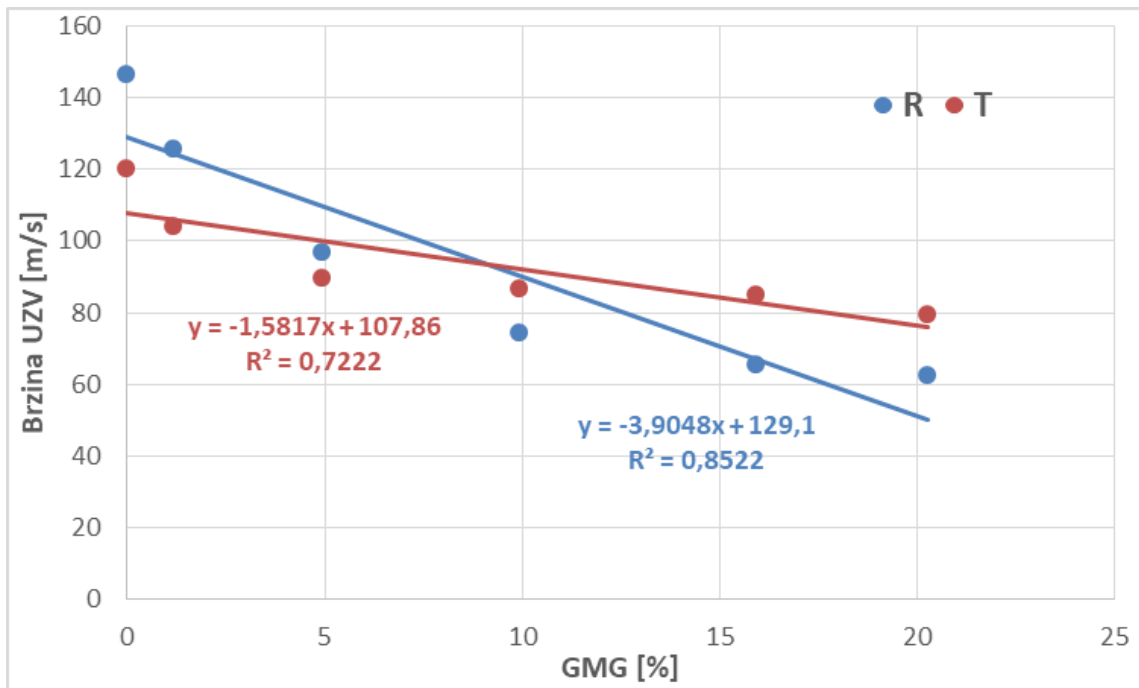
Povećanjem gubitka mase djelovanjem gljiva GMG linearno se smanjuje brzina prolaska ultrazvuka kroz drvo što je dokazano sa svim grupama uzoraka i borovine i bukovine (sl. 20 - 23). Na svim grupama uzoraka pokazalo se da je pad brzine prolaska ultrazvuka kroz drvo povećanjem GMG-a veći u radialnom smjeru nego u tangentialnom. Uzorcima i borovine i bukovine većih gustoća točka presijecanja pravaca brzine je pri gubitku mase oko 20 odnosno 25 %, a uzorcima manje gustoće ta točka presijecanja je kod značajno manjeg GMG-a, između 7 i 8 % (sl. 20-23).



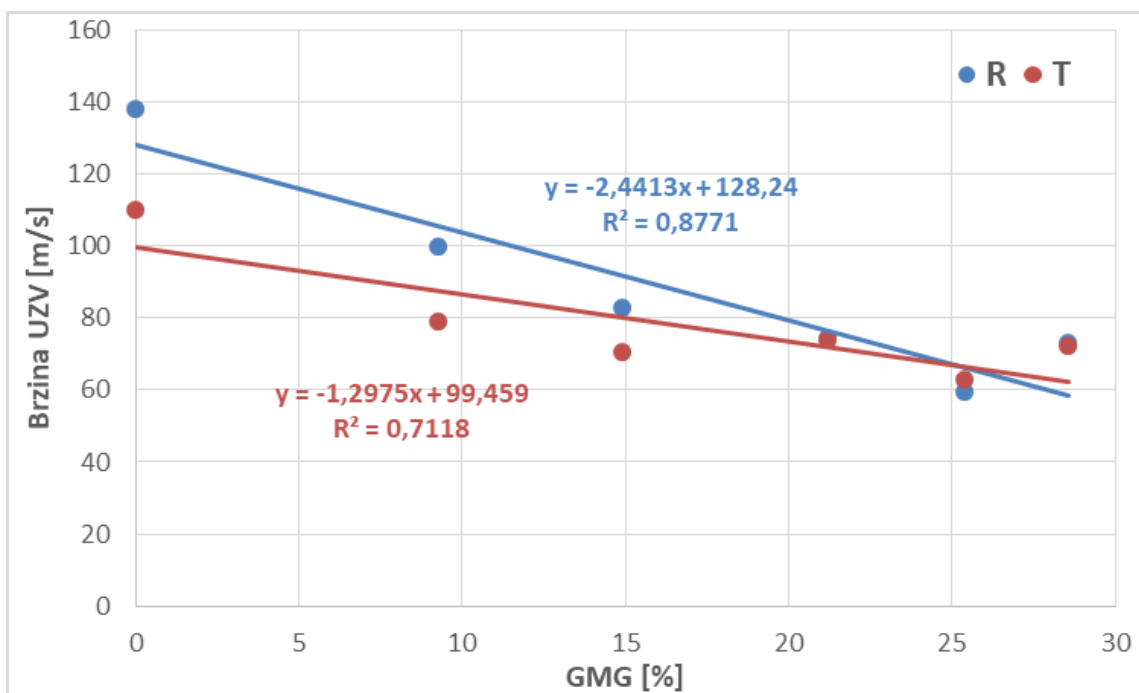
Slika 20. Ovisnost brzine prolaska ultrazvuka kroz drvo bora manje gustoće



Slika 21. Ovisnost brzine prolaska ultrazvuka kroz drvo bora veće gustoće



Slika 22. Ovisnost brzine prolaska ultrazvuka kroz drvo bukve manje gustoće



Slika 23. Ovisnost brzine prolaska ultrazvuka kroz drvo bukve veće gustoće

Wegst (2006) je utvrdila, a Jurišić (2022) je potvrdio da se ultrazvuk kroz drvo značajno brže širi u longitudinalnom sjeru u odnosu i na radijalni i na tangentalni. Jurišić (2022), Domitrović (2020), Paczesniovsky (2019) i Šporčić (2019) su u svojim radovima utvrdili statistički značajno veće brzine prolaska ultrazvuka kroz drvo u

radijalnome smjeru nego u tangentnome. Promatrajući anatomsku građu drva, bilo bi logično da se ultrazvuk širi brže kroz neisprekidano gušće kasno drvo u tangentnom smjeru nego u radijalnom gdje ultrazvuk stalno nailazi na razike u gustoći između ranog i kasnog drva. Ovakvi rezultati upućuju na zaključak da se ultrazvuk širi preko drvnih trakova (značajno brže, jer se zvuk širi u longitudinalnome smjeru) što u konačnici rezultira većom brzinom prolaska ultrazvuka u radijalnom smjeru nego u tangentnom. Poznata je činjenica da sve gljive u početnoj fazi razaranja drva prvenstveno razaraju lako dostupne tvari u parenhimskom staničju drvnih trakova, odnosno gljive truležnice razaraju tkivo drvnih trakova. Ta činjenica podupire dobivene rezultate značajno bržeg smanjenja brzine prolaska ultrazvuka u radijalnom smjeru povećanjem GMG-a nego u tangentnom obje ispitivane vrste drva bez obzira na gustoću.

6. ZAKLJUČCI

Temeljem dobivenih rezultata donose se slijedeći zaključci:

1. Produljenje vremena izlaganja uzoraka miceliju odabrane gljive truležnice rezultira značajno sve većim gubitkom mase uzoraka obiju vrsti drva.
2. Uzorci veće gustoće (obiju ispitivanih vrsti drva) u istim su vremenskim intervalima izlaganja gubili značajno veću masu spram uzoraka manje gustoće.
3. Povećanjem gubitka mase djelovanjem gljive proporcionalno se smanjuje brzina prolaska ultrazvuka kroz drvo i u radijalnom i u tangentnom smjeru.
4. Bez obzira na vrstu drva i gustoću i najmanji gubitak mase djelovanjem micelija gljive rezultirao je smanjenjem brzine prolaska ultrazvuka kroz drvo u odnosu na zdravo drvo. Porastom gubitka mase djelovanjem micelija gljive brzina prolaska ultrazvuka kroz drvo značajno brže opada u radijalnom smjeru nego u tangentnom.

7. LITERATURA

1. Beall, F.C. 1987: Acousto-ultrasonic monitoring of glueline curing. *Wood and Fiber Science*. 19(2): 204-214.
2. Beall, F.C. 2007: Industrial applications and opportunities for nondestructive evaluation of structural wood members. *Ciencia y Tecnología*. 9(2): 127-134.
3. Bodig, J. (1995): Quantification of Biodegradation in Poles and Piles. *Proceedings of the International Conference on Wood Poles and Piles*. Colorado State University, Ed.: Collins, M.F., Colorado, USA, pp. 337-352.
4. Bubalo, L. 2017: Dijagnostika ultrazvukom, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
http://repositorij.fsb.hr/7413/1/Bubalo_2017_završni_prediplomski.pdf.pdf
5. Cristini, V., Tippner, J., Vojáčková, B., Paulić, V. 2021: Comparison of variability in results of acoustic tomographs in pedunculate oak (*Quercus robur* L.). *BioResources* 16(2): 3046-3058.
6. Domitrović, M. 2020: Utjecaj vrste drva na brzinu širenja ultrazvuka kroz drvo, Završni rad, Šumarski fakultet, Zagreb
7. Horvat, I., Krpan, J. 1967: *Drvno Industrijski priručnik, Tehnička knjiga* Zagreb, 1967.
8. Jurišić, M. 2022: Brzina prolaska ultrazvuka kroz drvo bijelog bora i obične bukve u različitim smjerovima. Diplomski rad. Fakultet šumarstva i drvne tehnologije, Zgareb, 2022. str. 34.
9. Mal, A.K., Yin, C.C., , Bar-Cohen, Y. 1991: Ultrasonic nondestructive evaluation of cracked composite laminates. *Composites Engineering*. 1(2): 85-101. doi: [https://doi.org/10.1016/0961-9526\(91\)90029-R](https://doi.org/10.1016/0961-9526(91)90029-R)
10. Paczesniovski, Z. 2019: Utjecaj sadržaja vode na brzinu širenja ultrazvuka u drvu, Diplomski rad, Šumarski fakultet, Zagreb
11. Paulić, V., Škarica, T., Drvodelić, D., Oršanić, M. 2022: Prosudba truleži stabala hrasta kitnjaka zvučnim tomografom. *Šumarski list* 146 (1-2): 19-30.
12. Saadat-Nia et al. 2011: Ultrasonics of reaction wood. *BioResources*. 6(2):1172-1185.
13. Sales, A. 2005: in *Bioresource Technology* 97 (2006): Relationship between density and ultrasonic velocity in Brazilian tropical woods. Department of Civil

Engineering, UFSCar-Federal University of Sao Carlos, CEP: 13565-905, Sao Carlos, Sao Paulo, Brazil.

14. Stepinac, M., Rajčić, V., Barbalić, J. 2017: Inspekcija i procjena stanja postojećih drvnih konstrukcija. Građevinar, 69(9): 861-873, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.1994.2017>
15. Škarica, T. 2019: Procjena površine zdravog drva zvučnim tomografom kod stabala hrasta kitnjaka u parku Maksimir. Diplomski rad. Šumarski fakultet Zagreb. str. 31.
16. Šporčić, P. 2019: Utjecaj gustoće na brzinu širenja ultrazvuka u drvu, Završni rad, Šumarski fakultet, Zagreb
17. Thomson, W.T. 1981: Theory of Vibration with Applications. Second Edition. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, USA.
18. Unger, A., Schniewind, A.P., Unger, W. 2001: Conservation of Wood Artifacts. A Handbook. 1st Edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001.
19. Vergot, T. 2018: Utjecaj brzine opterećenja na čvrstoću na tlak paralelno sa vlakancima bukovine, Završni rad, Šumarski fakultet, Zagreb
20. Wegst, U.G.K., 2006: Wood for Sound. American Journal of Botany 93(10): 1439–1448. <https://doi.org/10.3732/ajb.93.10.1439>
21. * * * 2022: RINNTECH. internet stranica – osnovne informacije. pristupljeno 24. 8. 2022. <http://www.rinntech.de/content/view/7/35/lang,english/index.html>
22. * * * 2021: Ultrazvuk. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. pristupljeno 8. 7. 2022. <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=63120>