

UNIVERZITET U BEOGRADU

ŠUMARSKI FAKULTET

Ivana M. Živanović

**MOGUĆNOST PROCENE KVALITETA DRVETA
U STABLIMA CRVENOG HRASTA (*Quercus rubra* L.)
PRIMENOM AKUSTIČNOG TOMOGRAFA I FRAKTOMETRA**

doktorska disertacija

Beograd, 2025

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF FORESTRY

Ivana M. Živanović

**POSSIBILITY OF ASSESSING WOOD QUALITY IN RED OAK
(*Quercus rubra* L.) TREES USING ACOUSTIC TOMOGRAPH
AND FRACTOMETER**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2025

MOGUĆNOST PROCENE KVALITETA DRVETA
U STABLIMA CRVENOG HRASTA (*Quercus rubra* L.)
PRIMENOM AKUSTIČNOG TOMOGRAFA I FRAKTOMETRA

Ivana Živanović dipl. inž

MENTOR:

dr Nebojša Todorović, red. Prof.
Univerzitet u Beogradu, Šumarski fakultet

ČLANOVI KOMISIJE:

dr Goran Milić, redovni profesor,
Univerzitet u Beogradu – Šumarski fakultet

dr Branko Stajić, redovni profesor,
Univerzitet u Beogradu – Šumarski fakultet

dr Dušan Jokanović, vanredni profesor,
Univerzitet u Beogradu – Šumarski fakultet

dr Aleš Straže, vanredni profesor
Univerzitet u Ljubljani, Biotehnički fakultet

dr Maks Merela, vanredni profesor
Univerzitet u Ljubljani, Biotehnički fakultet

Datum odbrane doktorske disertacije:

Naslov doktorske disertacije: Mogućnost procene kvaliteta drveta u stablima crvenog hrasta (*Quercus rubra* L.) primenom akustičnog tomografa i fraktometra

Izvod: Prema dosadašnjim istraživanjima, drvo crvenog hrasta (*Quercus rubra* L.) predstavlja kvalitetan materijal za preradu u drvnoj industriji, ali svojstva i potencijal ove vrste sa područja Srbije do sada nisu detaljno ispitivani. Osnovni cilj ovog rada bio je: utvrditi osnovna fizičko-mehanička i anatomska svojstva drveta crvenog hrasta sa tri lokaliteta u Srbiji (Bruske šume, Stepin lug i Debeli lug), i istražiti mogućnost primene akustičnog tomografa i fraktometra u proceni kvaliteta drveta u stojećim stablima, kao i kreirati i testirati prediktivne modele za pouzdano predviđanje kvaliteta drvne mase pre seče. Korišćenjem akustičnog tomografa, kao nedestruktivne metode, istražena je mogućnost procene kvaliteta drveta pomoću izmerene brzine zvuka u poprečnom pravcu, dok su iz istih stabala pomoću fraktometra uzeti izvrtci na kojima su određena svojstva i uspostavljeni modeli procene kvaliteta drveta korišćenjem ove poludestruktivne metode. Sa svakog lokaliteta oborena su po 3 stabla iz kojih su izrezani trupčići i koturovi za ispitivanja anatomskih, fizičkih i mehaničkih svojstava drveta. Rezultati pokazuju izraženu varijabilnost anatomskih i fizičko-mehaničkih svojstava drveta crvenog hrasta između lokaliteta, kao i unutar populacija na istom staništu. Utvrđene su značajne razlike u širini godova, udelu kasnog drveta i dužini vlakana između juvenilnog i zrelog drveta, dok se vrednosti gustine i mehaničkih svojstava (MOR i MOE) u velikoj meri poklapaju sa ranije utvrđenim vrednostima za ovu vrstu na prirodnim staništima. Dobijeni modeli, bazirani na fraktometrijskim i akustičnim merenjima, pokazali su visoku korelaciju sa laboratorijskim rezultatima i potvrđuju potencijal primene nedestruktivnih metoda za terensku procenu kvaliteta drveta crvenog hrasta. Utvrđeni rezultati o fizičko-mehaničkim svojstvima pokazuju da se karakteristike drveta crvenog hrasta ne razlikuju značajno od svojstava autohtonih vrsta iz roda *Quercus* – hrasta kitnjaka (*Q. petraea* L.) i lužnjaka (*Q. robur* L.). Za sve lokalitete, vrednost brzine prostiranja zvučnih talasa u radijalnom pravcu u proseku je

iznosila 1551 m/s, dok je brzina prostiranja zvuka u tangencijalnom pravcu iznosila 1533 m/s. Prostom linearnom regresijom zabeleženo je šest uspešnih modela u predviđanju svojstva drveta. Koeficijenti korelacije su iznosili od slabih – za pritisnu čvrstoću (0,143) do umerenih – visokih korelacija (0,825) za gustinu. Dužina drvnih vlakana i procenat učešća kasne zone, umereno su korelisani sa srednjom brzinom zvuka u drugom (1900 – 2800 m/s) i trećem opsegu brzina (2800-3500 m/s, dok su u opsegu sa najmanjim vrednostima brzina (1400 – 1900 m/s) korelacije nisu bile statistički značajne. Istraživana svojstva drveta se mogu uspešno odrediti i na osnovu parametara dobijenih fraktometrom, kao poludestruktivnom metodom. Višestruki regresioni testovi su rezultirali sa četiri modela za svako proučavano svojstvo drveta na osnovu čega se zaključuje da se fraktometrijska merenja mogu uspešno koristiti u proceni kvaliteta drveta u dubecim stablima crvenog hrasta.

Ključne reči : crveni hrast (*Quercus rubra* L.), akustična tomografija, fraktometar, svojstva drveta.

Possibility of assessing wood quality in northern red oak (*Quercus rubra* L.) trees
using acoustic tomograph and fractometer

Abstract:

According to previous studies, northern red oak (*Quercus rubra* L.) is considered a high-quality raw material for wood processing. However, the properties and potential of this species in the territory of Serbia have not been thoroughly investigated. The main objective of this study was to determine the basic physical-mechanical and anatomical properties of red oak wood from three sites in Serbia (Bruske šume, Stepin lug, and Debeli lug), as well as to explore the applicability of acoustic tomography and fractometry in assessing wood quality in standing trees, and to develop and test predictive models for reliable pre-harvest wood quality evaluation. Using an acoustic tomograph as a non-destructive method, the possibility of assessing wood quality based on measured sound velocity in the cross-section was examined. Fractometer measurements were performed on increment cores from the same trees to determine mechanical properties and build predictive models using this semi-destructive method. From each site, three trees were felled and sampled for anatomical, physical, and mechanical testing. The results indicate considerable variability in anatomical and physical-mechanical properties of red oak wood between sites and within populations at the same site. Significant differences were found in ring width, proportion of latewood, and fiber length between juvenile and mature wood. Values of density and mechanical properties (MOR and MOE) largely correspond to those previously reported for this species in its native range. Models based on fractometric and acoustic measurements showed a high correlation with laboratory test results, confirming the potential of these non-destructive methods for in situ wood quality assessment in red oak.

The width of growth rings in the juvenile wood zone ranged from 2.48 to 3.107 mm (with 60–71.9% latewood), while in mature wood it ranged from 2.861 to 5.602 mm (with 53.4–67.7% latewood). The average fiber length was 1.264 mm in mature wood and 1.390 mm in juvenile wood, with an average fiber density of 1944 fibers/mm². Physical and mechanical properties showed no significant deviation from those of native oak species such as sessile oak (*Q. petraea* L.) and pedunculate oak (*Q. robur* L.). Across all sites, the average radial sound velocity was 1551 m/s, and tangential sound velocity averaged 1533 m/s. Simple linear regression yielded six predictive models for wood properties, with correlation coefficients ranging from low – for compressive strength (0.143), to moderate and high – for density (up to 0.825). Fiber length and latewood proportion showed moderate correlations with average sound velocity in the second (1900–2800 m/s) and third range (2800–3500 m/s), while correlations in the lowest range (1400–1900 m/s) were not statistically significant. Fractometric parameters proved to be reliable predictors of wood properties, with multiple regression analysis yielding four models for each wood property studied. These results confirm that fractometry can be successfully used to assess wood quality in standing red oak trees.

Key words: red oak wood (*Quercus rubra* L.), acoustic tomography, fractometer, wood properties.

KLJUČNA DOKUMENTACIONA INFORMACIJA

Redni broj:

Identifikacioni broj (IBR):

Tip dokumenta:

Monografska publikacija

Tip zapisa:

Tekstualni štampani materijal

Vrsta rada (VR):

Doktorska disertacija

Autor (AU):

Ivana Živanović dipl.ing

Mentor/Ko-mentor (MN):

Dr Nebojša Todorović, vanr.prof.

Naslov rada (NR):

Mogućnost procene kvaliteta drveta u stablima crvenog hrasta (*Quercus rubra* L.) primenom zvučnih talasa i fraktometra

Jezik publikacije:

Srpski

Zemlja publikovanja:

Republika Srbija

Godina izdavanja:

2025

Izdavač: Autorski

reprint

Mesto i adresa:

11030 Beograd, Kneza Višeslava 1

Fizički opis rada (br. pgl./strana/lit.navoda /tabela/slika/dod.):

11/239/226/32/39/20

Naučna oblast (NO):

Prerada drveta

Naučna disciplina (DIS):

Primarna prerada drveta

Pred. odred/ključna reč (PO):

crveni hrast (*Quercus rubra* L.), akustična tomografija, fraktometar, svojstva drveta.

UDK:

Čuva se (ČU):

Biblioteka Šumarskog fakulteta, 11030 Beograd,

Kneza Višeslava 1

Primedbe:

Izvod:

Prema dosadašnjim istraživanjima, drvo crvenog hrasta (*Quercus rubra* L.) predstavlja kvalitetan materijal za preradu, ali njegova svojstva u Srbiji do sada nisu bila detaljno ispitivana. Cilj ovog rada bio je da se utvrde osnovna anatomska i fizičko-mehanička svojstva drveta sa tri lokaliteta (Bruske šume, Stepin lug, Debeli lug), te da se ispita mogućnost primene akustičnog tomografa i fraktometra za procenu kvaliteta u stojećim stablima.

Sa svakog lokaliteta oborena su po tri stabla iz kojih su uzeti trupčići i koturovi za ispitivanja.

Rezultati pokazuju izraženu varijabilnost između i unutar lokaliteta, sa značajnim razlikama u širini godova, udelu kasnog drveta i dužini vlakana između juvenilnog i zrelog drveta. Vrednosti gustine i mehaničkih svojstava (MOR, MOE) u velikoj meri se poklapaju sa rezultatima iz prirodnih staništa i ne odstupaju značajno od domaćih vrsta hrastova (*Q. petraea*, *Q. robur*). Prosečne brzine zvuka iznosile su 1551 m/s (radijalno) i 1533 m/s (tangencijalno).

Dobijeni modeli, zasnovani na fraktometrijskim i akustičnim merenjima, pokazali su visoke korelacije sa laboratorijskim vrednostima, posebno za gustinu ($R = 0,825$), dok su slabije veze zabeležene za pritisnu čvrstoću. Višestruka regresiona analiza potvrdila je da se fraktometrijska merenja mogu pouzdano koristiti u proceni kvaliteta drveta crvenog hrasta u dubećim stablima.

Datum prihvatanja teme (DP): 14.09.2021.

KEY WORD DOCUMENTATION

Accession Number (AN):
Indentification number (INO):
Document Type: Monographic publication
Type of Record (TR): Textual printed article
Contains Code (CC): Ph.D. Thesis
Author (AU): Ivana Živanović Bsc
Mentor/Ko-mentor (MN): Dr Nebojša Todorović, Ph.D.
Document Title (DT): Possibility of assessing wood quality in red oak (*Quercus rubra* L.) trees using sound waves and fractometer

Language of Text (LT): Serbian
Country of Publication (CP): Serbia
Publication Year (PY): 2025
Publisher: Author's reprint
Publication Place (PL): Faculty of Forestry, 11030 Belgrade, Kneza Višeslava 1
Physical Description (PD): 11/239/226/32/39/20
Scientific Field (SF): Wood processing
Scientific Discipline (SD): Primary wood processing
Subject/Key words (CX): red oak wood (*Quercus rubra* L.), acoustic tomography, fractometer, wood properties

UDC:
Holding data (HD): Library of Faculty of Forestry, 11030 Belgrade, Kneza Visaslava 1
Note (N)
Abstract (AB): According to previous studies, the wood of northern red oak (*Quercus rubra* L.) is considered a high-quality raw material, but its properties in Serbia have not been thoroughly investigated. The aim of this research was to determine the basic anatomical and physico-mechanical properties of red oak wood from three sites (Bruske šume, Stepin lug, Debeli lug), and to examine the potential of using acoustic tomography and fractometry for assessing wood quality in standing trees. From each site, three trees

were felled, and logs and discs were sampled for analysis.

The results revealed pronounced variability both between and within sites, with significant differences in ring width, latewood proportion, and fiber length between juvenile and mature wood. Values of density and mechanical properties (MOR, MOE) were largely consistent with those reported for this species in its natural range and did not differ substantially from native oak species (*Q. petraea*, *Q. robur*). The average sound propagation velocities were 1551 m/s (radial) and 1533 m/s (tangential).

The models obtained, based on fractometric and acoustic measurements, showed strong correlations with laboratory values, especially for density ($R = 0.825$), while weaker relationships were recorded for compressive strength. Multiple regression analysis confirmed that fractometric measurements can be reliably used to assess red oak wood quality in standing trees.

1. UVOD	1-5
2. PREDMET ISTRAŽIVANJA	6-8
3. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA	9-31
3.1 Crveni hrast (<i>Quercus rubra</i> L.).....	9-21
3.2 Primena fraktometra u proceni kvaliteta drveta.....	21-24
3.3 Primena akustičnih metoda u proceni kvaliteta drveta.....	24-31
4. CILJ ISTRAŽIVANJA	32-33
5. MATERIJAL I METOD RADA	34-59
5.1 Izdvajanje oglednih površina i izbor reprezentativnih stabala.....	35-39
5.2 Merenje akustičnih parametara na dubećim stablima.....	39-42
5.3 Merenje svojstava izvrtaka iz stabala korišćenjem fraktometra.....	42-43.
5.4 Izrada uzoraka iz stabala za laboratorijsko određivanje svojstava drveta.....	44-50
5.4.1 Određivanje makroskopskih i mikroskopskih svojstava drveta.....	44-45
5.4.1.1 Površinsko učešće beljke i srčevine, širina prstena prirasta i učešće kasne zone.....	45-46
5.4.1.2 Širina prstena prirasta.....	46
5.4.1.3 Procentualni odnos rane i kasne zone.....	47
5.4.1.4 Dužina drvnih vlakana (libriforma) i broj drvnih vlakana po jedinici površine (mm ²).....	47-50
5.4.2 Istraživanje fizičkih i mehaničkih svojstava drveta.....	50-53
5.4.2.1 Utvrđivanje osnovnih fizičkih svojstava drveta (gustina drveta)....	51
5.4.2.2 Utvrđivanje osnovnih mehaničkih svojstava drveta (čvrstoća na savijanje i modul elastičnosti pri savijanju).....	51-53

5.5 Statistička obrada podataka, modelovanje i validacije dobijenih modela.....	53-58
6. REZULTATI ISTRAŽIVANJA I DISKUSIJA.....	59-140
6.1 Analiza makroskopskih i mikroskopskih svojstava drveta crvenog hrasta.....	59-86
6.1.1 Analiza širine prstena prirasta.....	59-65
6.1.2 Procentualni udeo rane i kasne zone.....	65-79
6.1.3 Površinsko učešće beljike i srčevine.....	79-81
6.1.4 Dužina drvnih vlakana (libriforma) i broj drvnih vlakana po jedinici površine (mm ²).....	81-86
6.2 Analiza osnovnih fizičkih i mehaničkih svojstava drveta crvenog hrasta.....	87-102
6.2.1 Gustina drveta.....	87-93
6.2.2 Čvrstoća na savijanje i modul elastičnosti pri savijanju.....	93-102
6.3 Analiza svojstava drveta crvenog hrasta merena fraktometrom.....	102-110
6.3.1 Čvrstoća na savijanje izvrtaka.....	102-104
6.3.2 Ugao loma izvrtaka.....	104-106
6.3.3 Čvrstoća na pritisak izvrtaka.....	106-110
6.4 Analiza akustičnih svojstava drveta crvenog hrasta utvrđenih primenom akustičnog tomografa.....	110-118
6.4.1 Brzina zvučnih talasa.....	110-118
6.5 Utvrđivanje korelacije između svojstava drveta i parametara dobijenih pomoću fraktometra.....	118-123
6.6 Utvrđivanje korelacije između svojstava drveta i parametara dobijenih pomoću akustičnog tomografa.....	123-130

6.7 Poređenje dobijenih statističkih modela primenom fraktometra i akustičnog tomografa.....	130
6.7.1 RPD - Odnos performansi prema devijaciji.....	131-135
6.7.2 RPIQ - Odnos performansi prema interkvartilnom opsegu.....	135-139
7. ZAKLJUČCI.....	140-148
8. BUDUĆA ISTRAŽIVANJA.....	149-151
9. LITERATURA.....	152-177
10. PRILOZI.....	178-230
11. BIOGRAFIJA AUTORA.....	231-239

Sadržaj tabela

Tabela 1 – Fizičko-mehanička svojstva drveta crvenog hrasta i srodnih vrsta prema literaturnim izvorima.....	29
Tabela 2 – Dosadašnja istraživanja primene akustične tomografije (AT) i fraktometra (FR) na različitim vrstama drveta.....	29
Tabela 3 – Broj uzoraka po lokalitetu i delu stabla za svako svojstvo.....	51
Tabela 4 – Deskriptivna statistika za širinu prstenova prirasta (mm) u juvenilnom i zreom drvetu crvenog hrasta na tri lokaliteta.....	61
Tabela 5 – Deskriptivna statistika za učešće kasne zone (%) u juvenilnom i zreom drvetu crvenog hrasta na tri lokaliteta.....	67
Tabela 6 – Analiza varijanse (ANOVA) za širinu prstenova prirasta i učešće kasne zone u juvenilnom i zreom drvetu crvenog hrasta na tri lokaliteta po stablu.....	73
Tabela 7 – Analiza varijanse (ANOVA) za širinu prstenova prirasta i učešće kasne zone u juvenilnom i zreom drvetu crvenog hrasta na tri lokaliteta po stablu.....	74
Tabela 8 – Univarijantna analiza (t-test) za širinu prstenova prirasta i učešće kasne zone u juvenilnom i zreom drvetu crvenog hrasta na tri lokaliteta u Srbiji, po trupčiću.....	75
Tabela 9 – Procentualno učešća beljike i srčevine kod drveta crvenog hrasta na tri lokaliteta u Srbiji.....	80
Tabela 10 – Dužina drvnih vlakana kod crveniog hrasta sa tri lokaliteta u Srbiji.....	82
Tabela 11 – Broj drvnih vlakana crvenog hrasta po 1 mm na različitim lokalitetima u Srbiji.....	85
Tabela 12 – Deskriptivna statistika i analiza varijanse (ANOVA) za mehanička svojstva drveta crvenog hrasta na tri lokaliteta u Srbiji.....	87

Tabela 13 – Čvrstoća na savijanje izvrtka [MPa] drveta crvenog hrasta dobijenog pomoću fraktometra na tri lokaliteta u Srbiji.....	103
Tabela 14 – Ugao loma izvrtka drveta crvenog hrasta na tri lokaliteta u Srbiji.....	104
Tabela 15 – Čvrstoće na pritisak izvrtka paralelno sa vlaknima [MPa] drveta crvenog hrasta na tri lokaliteta u Srbiji.....	106
Tabela 16 – Prosečne transversalne brzine zvuka kod drveta crvenog hrasta na tri lokaliteta u Srbiji.....	112
Tabela 17 – Radijalne i tangencijalne brzine zvučnih talasa drveta crvenog hrasta po stablima na lokalitetu Bruske šume.....	113
Tabela 18 – Radijalne i tangencijalne brzine zvučnih talasa drveta crvenog hrasta po stablima na lokalitetu Debeli lug.....	113
Tabela 19 – Radijalne i tangencijalne brzine zvučnih talasa drveta crvenog hrasta po stablima na lokalitetu Stepin lug.....	113
Tabela 20 – Prosečne vrednosti brzine zvučnih talasa drveta crvenog hrasta u radijalnom i tangencijalnom pravcu po lokalitetima i ukupno.....	114
Tabela 21 – Brzine zvučnih talasa kod različitih vrsta drveta (Dackermann, 2014).....	115
Tabela 22 – Srednje vrednosti brzina zvučnih talasa u donjim i gornjim delovima stabala po lokalitetima i ukupno.....	117
Tabela 23 – Dinamički modul elastičnosti drveta crvenog hrasta na tri lokaliteta u Srbiji.....	118
Tabela 23 – Svojstva drveta crvenog hrasta dobijena pomoću fraktometra i svojstva drveta dobijena destruktivnim metodama.....	119
Tabela 24 – Modeli višestrukih regresionih jednačina i prilagođeni koeficijent determinacije za svojstva drveta testirani standardnom destruktivnom metodom i fraktometrom.....	122

Tabela 25 – Pirsonovi koeficijenti korelacije između posmatranih srednjih vrednosti anatomskih i mehaničkih svojstava i srednjih brzina zvuka po lokalitetima.....	124
Tabela 26 – Regresioni modeli mehaničkih svojstava drveta crvenog hrasta na osnovu brzine zvuka po opsezima brzine.....	126
Tabela 27 – Regresioni modeli mehaničkih svojstava drveta crvenog hrasta na osnovu brzine zvuka.....	127
Tabela 28 – pokazatelji pouzdanosti modela (RPD) dobijenih fraktometrom.....	131
Tabela 29 – pokazatelji pouzdanosti (RPD) modela dobijenih zvukom.....	133
Tabela 30 – pokazatelji pouzdanosti modela (RPIQ) dobijenih fraktometrom.....	136
Tabela 31 – pokazatelji pouzdanosti (RPIQ) modela dobijenih zvukom.....	136
Tabela 32 – uporedni pokazatelji pouzdanosti modela fraktometrijskih i akustičnih metoda za procenu fizičko-mehaničkih svojstava crvenog hrasta.....	138

Sadržaj slika

Slika 1 – mapa lokaliteta uzorkovanih stabala.....	34
Slika 2 – stablo crvenog hrasta una lokalitetu Bruske šume.....	35
Slika 3 – izrezani ogledni trupčići u Bruskim šumama.....	35
Slika 4 – stablo crvenog hrasta una lokalitetu Debeli lug.....	36
Slika 5 – poprečni presek oborenog stabla u Debelom lugu.....	36
Slika 6 – stablo crvenog hrasta una lokalitetu Stepin lug.....	37
Slika 7 – izrezani ogledni trupčići u Stepinom lugu.....	37
Slika 8 – radijalni i tangencijalni zvučni talas u odnosu na prstenove prirasta.....	40
Slika 9 – tomografski snimak poprečnog preseka stabla crvenog hrasta.....	40
Slika 10 – tomografski snimak sa brzinama između senzora.....	40
Slika 11 – fraktometar II – uređaj za poludestruktivno ispitivanje drveta (preuzeto prema Rinn, 1994).....	42
Slika 12 – način merenja pritisne čvrstoće paralelno sa vlaknima na izvrtku i merenja savojne čvrstoće na izvrtku (preuzeto prema Rinn, 1994).....	42
Slika 13 – ogledni trupčići.....	43
Slika 14 – izrezivanje na trupčari.....	43
Slika 15 – transport oglednih dasaka.....	43
Slika 16 – ogledne daske u sušari.....	43
Slika 17 – CNC mašina za brušenje koturova.....	44
Slika 18 – brušenje kotura crvenog hrasta.....	44

Slika 19 – ispoliran kotur crvenog hrasta.....	44
Slika 20 – poprečni presek posmatran kroz lupu.....	44
Slika 21 – granice beljike i srčevine na koturu.....	45
Slika 22 – merenje širine prstena prirasta i kasne zone na mikroskopu.....	45
Slika 23 – mehanička priprema uzoraka za proces maceracije.....	46
Slika 24 – hemijska priprema uzoraka za proces maceracije.....	46
Slika 25 – proces maceracije.....	46
Slika 26 – drveno vlakno pod mikroskopskim sočivom uvećanja 40x.....	47
Slika 27 – izmerena dužina drvnog vlakna.....	47
Slika 28 – preparati za mikroskopsku analizu anatomskih svojstava.....	48
Slika 29 – preparati za mikroskopsku analizu.....	48
Slika 30 – mikroskop.....	48
Slika 31 – tangencijalni presek drveta pod mikroskopom.....	48
Slika 32 – aksijalni presek drveta pod mikroskopom.....	48
Slika 33 – vlakna drveta pre brojanja.....	49
Slika 34 – vlakna drveta posle brojanja.....	49
Slika 35 – šema krojenja uzraka.....	50
Slika 36 – proces izrezivanja uzoraka.....	50
Slika 37 – izrezani uzorci određivanje mehaničkih svojstava.....	50
Slika 38 – uređaj za merenje savojne i pritisne čvrstoće.....	52
Slika 39 – uzorci za savijanje.....	52
Slika 40 – uzorci za pritisak.....	52
Slika 41 – prolazak zvučnog talasa kroz uzorke drveta.....	54

Slika 42– prolazak zvučnog talasa kroz uzorke drveta Bruske šume.....	55
Slika 43 – radijalni profil širine goda po lokalitetima.....	59
Slika 44 – radijalni profil procenta kasne zone po lokalitetima.....	66
Slika 45 – Pravougaoni dijagram osnovnih statističkih parametara a) za širinu prstena prirasta i b) za procenat kasnog drveta u prstenu prirasta, u juvenilnoj zoni, za sva tri lokaliteta.....	72
Slika 46 – Pravougaoni dijagram osnovnih statističkih parametara a) za širinu prstena prirasta i b) za procenat kasnog drveta u prstenu prirasta, u zreloj zoni, za sva tri lokaliteta.....	73
Slika 47 – Pravougaoni dijagram osnovnih statističkih parametara za gustinu (g/mm^3) i a) za sva tri lokaliteta i b) za stabla sa lokaliteta Bruske šume c) za stabla sa lokaliteta Debeli lug, za stabla sa lokaliteta Stepin lug.....	89
Slika 48 - Pravougaoni dijagram osnovnih statističkih parametara MOE (MPa) i a) za sva tri lokaliteta i b) za stabla sa lokaliteta Bruske šume c) za stabla sa lokaliteta Debeli lug, za stabla sa lokaliteta Stepin lug.....	94
Slika 49 - Pravougaoni dijagram osnovnih statističkih parametara za MOR (MPa) i a) za sva tri lokaliteta i b) za stabla sa lokaliteta Bruske šume c) za stabla sa lokaliteta Debeli lug, za stabla sa lokaliteta Stepin lug.....	97
Slika 50 - Pravougaoni dijagram osnovnih statističkih parametara za MOR (MPa) i a) za sva tri lokaliteta i b) za stabla sa lokaliteta Bruske šume c) za stabla sa lokaliteta Debeli lug, za stabla sa lokaliteta Stepin lug.....	100
Slika 51 – Tomograf poprečnog preseka.....	111
Slika 52 – Tomograf brzina između senzora.....	111
Slika 53 - Tomograf stabilnosti.....	111
Slika 54 – Tomografski snimak stabla 1.....	123

Slika 55 – Tomografski snimak stabla 2.....	123
Slika 56 – Koeficijent determinacije između merenih vrednosti Hpi vrednosti dobijenih pomoću modela.....	132
Slika 57 – Koeficijent determinacije između merenih vrednosti MOR i vrednosti dobijenih pomoću modela.....	133
Slika 58 – Koeficijent determinacije između merenih vrednosti MOR i vrednosti dobijenih pomoću modela.....	134
Slika 59 – Koeficijent determinacije između merenih vrednosti MOE i vrednosti dobijenih pomoću modela.....	134

Sadržaj priloga

Prilog 1 – Grafici i tabele: stabla 1, 2 i 3, širina prstena prirasta duž poprečnog preseka (a – donji trupčić, b – gornji trupčić), Bruske šume; rezultati deskriptivne statistike za juvenilnu i zrelu zonu.

Prilog 2 – Grafici i tabele: stabla 1, 2 i 3, širina prstena prirasta duž poprečnog preseka (a – donji trupčić, b – gornji trupčić), Debeli lug; rezultati deskriptivne statistike za juvenilnu i zrelu zonu.

Prilog 3 – Grafici i tabele: stabla 1, 2 i 3, širina prstena prirasta duž poprečnog preseka (a – donji trupčić, b – gornji trupčić), Stepin lug; rezultati deskriptivne statistike za juvenilnu i zrelu zonu.

Prilog 4 – Grafici i tabela: širina i učešće kasne zone drveta kod stabala crvenog hrasta, Bruske šume.

Prilog 5 – Grafici i tabela: širina i učešće kasne zone drveta kod stabala crvenog hrasta, Debeli lug.

Prilog 6 – Grafici i tabela: širina i učešće kasne zone drveta kod stabala crvenog hrasta, Stepin lug.

Prilog 7 – Tabela: broj prstenova prirasta obuhvaćen srčevinom i beljikom na dve visine na sva tri lokaliteta.

Prilog 8 – Grafici i tabele: savojna čvrstoća izvrtka u kardinalnim pravcima, Bruske šume.

Prilog 9 – Grafici i tabele: savojna čvrstoća izvrtka u kardinalnim pravcima, Debeli lug.

Prilog 10 – Grafici i tabele: savojna čvrstoća izvrtka u kardinalnim pravcima, Stepin lug.

Prilog 11 – Grafici i tabele: ugao loma izvrtka u kardinalnim pravcima, Bruske šume.

Prilog 12 – Grafici i tabele: ugao loma izvrtka u kardinalnim pravcima, Debeli lug.

Prilog 13 – Grafici i tabele: ugao loma izvrtka u kardinalnim pravcima, Stepin lug.

Prilog 14 – Grafici i tabele: pritisna čvrstoća izvrtka u kardinalnim pravcima, Bruske šume.

Prilog 15 – Grafici i tabele: pritisna čvrstoća izvrtka u kardinalnim pravcima, Debeli lug.

Prilog 16 – Grafici i tabele: pritisna čvrstoća izvrtka u kardinalnim pravcima, Stepin lug.

Prilog 17 – Tabela: srednje vrednosti mehaničkih svojstava uzoraka kroz koje je prošao zvučni talas, srednje vrednosti brzine zvuka i opsezi, sa bojama zona.

Prilog 18 – Tabela: srednje vrednosti anatomskih i mehaničkih svojstava i srednje brzine zvuka složene u opsege.

Prilog 19 – Tomografski snimci (tomogrami) svih stabala na sva tri lokaliteta.

Spisak skraćenica i simbola

AT – akustični tomograf

FR - fraktometar

σ_p - čvrstoća na pritisak paralelno sa vlaknima

MOR – modul loma [MPa]

MOE – modul elastičnosti [MPa]

R^2 – koeficijent determinacije

MOEd - dinamički modul elastičnosti drveta [N/mm^2]

ρ – gustina drveta [g/mm^2]

v – brzina zvuka [m/s]

3D – trodimenzionalni

2D – dvodimenzionalni

Kz – širina kasne zone [mm]

Dp – širina prstena prirasta [mm]

1 col – 2,54 mm

SRPS ISO 13061- standard Republike Srbije – Fizička i mehanička svojstva drveta – Metode ispitivanja za male uzorke drveta bez grešaka

ρ_0 – gustina drveta u apsolutno suvom stanju [g/cm^3]

m_0 – masa uzorka [g]

V_0 – zapremina uzorka [cm^3]

ANOVA – analiza varijanse

LSD – post hoc Fišerov test najmanjih značajnih razlika

p – verovatnoća

σ_{sf} – čvrstoća na savijanje izvrtka [MPa]

Ba F – ugao loma izvrtka [°]

σ_{pf} – čvrstoća na pritisak izvrtka, paralelno sa vlaknima [MPa]

Vr – brzina zvuka u radijalnom pravcu [m/s]

Vt – brzina zvuka u tangencijalnom pravcu [m/s]

Vd – brzina zvuka kod donjih trupčića [m/s]

Vg – brzina zvuka kod gornjih trupčića [m/s]

r – prosečni prečnik trupčića [cm]

Vsr – prosečna brzina zvuka između svih senzora [m/s]

MOEdsr – prosečan dinamički modul elastičnosti

Ks – prosečna vrednost svih varijabli

$\pm SD$ – prosečna standardna devijacija

CV – koeficijent varijacije

MIN – minimalna vrednost posmatranih varijabli

MAX – maksimalna vrednost posmatranih varijabli

\bar{X} – srednja vrednost posmatranih varijabli

WD – gustina drveta [g/mm^2]

Hp – pritisna čvrstoća paralelno sa vlaknima [MPa]

SEP (Standard Error of Prediction) – standardna greška predikcije; meri prosečno odstupanje predikcije od stvarnih vrednosti, korigovano za pristrasnost modela.

Rp² (Coefficient of determination for prediction) – koeficijent determinacije u predikciji; pokazuje koliko dobro model objašnjava varijabilnost zavisne promenljive.

RPD (Residual Predictive Deviation) – odnos standardne devijacije merenih vrednosti i RMSE modela; koristi se kao pokazatelj tačnosti i pouzdanosti modela.

RMSE (Root Mean Square Error) – koren srednje kvadratne greške; meri prosečno odstupanje predikcija modela od stvarnih vrednosti.

IQR (Interquartile Range) – interkvartilni raspon; razlika između 75. i 25. percentila podataka, pokazatelj raspršenosti rezultata.

RPIQ (Ratio of Performance to Interquartile Range) – odnos standardne devijacije predikcije i IQR; pokazuje koliko je model stabilan u poređenju sa varijabilnošću podataka

1. UVOD

Hrast (*Quercus* L., *fam.* Fagaceae Dumort.) je rod koji se sastoji od raznovrsne grupe vrsta drveća koje su najčešće korišćeni lišćari u Evropi i Severnoj Americi (Čufar *et al.*, 2013). Prirodno stanište crvenog hrasta (*Q. rubra* L., syn. *Q. borealis* F. Michx.) obuhvata istočne i centralne delove Sjedinjenih Američkih Država (Uzcategui *et al.*, 2020). U Evropu je uveden 1691. godine (Gubka & Špišak, 2010). Do danas u Srbiji postoje samo male površine pod crvenim hrastom (oko 60 ha), ali u okolini Beograda postoje značajne sastojine ove vrste (Lazarević, 2020). Crveni hrast je pokazao dobre rezultate na staništima kseromezofilnog i kserotermofilnog tipa hrastovih šuma. To je vrsta koja bolje podnosi sušne stanišne uslove od hrasta kitnjaka (*Q. petraea* L.) i manje je zahtevna u pogledu zemljišta. Takođe, lako se prilagođava različitim klimatskim uslovima i dobro podnosi niske temperature. Dekorativnost, visoka vitalnost drveta, kao i otpornost na štetočine, sušu, mrazeve, vetrolome i snegoizvale, čine ovu vrstu veoma pogodnom za uvođenje u hrastove šume posebne namene (Isajev *et al.*, 2006), ali i kvalitetnim materijalom za preradu u drvnoj industriji (Vansteenkiste *et al.*, 2005).

Razvoj drvoprerađivačke industrije izaziva sve veću potražnju za visokokvalitetnim drvnim sirovinama. S trenutnim smanjenjem kvalitetnih šumskih resursa, drveni materijal bi trebalo koristiti efikasnije i u skladu s rezultatima naučnih istraživanja za proizvode od drveta sa visokom dodatnom vrednošću. Osobine drveta uglavnom su određene njegovom strukturom, biološkim i organskim poreklom, ali i uslovima u kojima se drvo koristi i eksploatiše. Crveni hrast je krupno prstenasto - porozna vrsta, velike gustine u kasnom delu prstena prirasta (Šoškić & Popović 2002). Sumirajući različite literarne podatke, isti autori tvrde da su svojstva drveta crvenog hrasta veoma slična svojstvima domaćih vrsta iz roda *Quercus*. S obzirom da kvalitet drveta crvenog hrasta do

sada nije istraživano u Srbiji, bilo bi od naučnog i praktičnog značaja da se prouče svojstva drveta ove veoma otporne i brzorastuće vrste hrasta, na području Srbije.

Nedestruktivne tehnike su veoma brzo i lako našle industrijsku primenu u ispitivanju homogenih i izotropnih materijala poput metala, stakla, plastike ili keramike. Kod takvih proizvoda, čija su svojstva dobro poznata, ove tehnike mogu lako da detektuju određene nepravilnosti, isključe ih iz daljeg procesa proizvodnje ili ih čak ponište. Međutim, nedestruktivno ispitivanje drveta nije pratilo isti trend razvoja, što je prvenstveno posledica anizotropnosti, složene strukture i organskog porekla drveta. Zbog toga se većina nedestruktivnih metoda u drvnoj industriji i dalje razvija i istražuje.

Među najstarijim metodama, istraživanja drveta bez njegovog razaranja, smatra se vizuelno ocenjivanje, koje ima za cilj određivanje kvaliteta proizvoda od drveta na osnovu veličine i rasporeda grešaka na njegovoj površini. Ova metoda se i danas koristi kod procene kvaliteta rezane građe, pri čemu znanje čoveka u primeni standarda igra ključnu ulogu. Kako bi se izbegla subjektivnost pojedinca, istraživači su pre pola veka ispitali i primenili nekoliko nedestruktivnih tehnika za klasifikaciju građevinskih konstrukcija i određivanje kvaliteta ploča na bazi drveta, zahvaljujući tehnološkom napretku (Bell *et al.* 1950; Galiginaitis *et al.* 1954; Jayne 1955; Jayne 1959; Hoyle 1961; Senft *et al.* 1962). Rezultati ovih istraživanja su dobijeni na osnovu postojanja zavisnosti između izmerenih nedestruktivnih parametara i statičkih mehaničkih svojstava drveta.

Prvi je Jayne (1959) postavio najvažnije hipoteze nedestruktivnog ispitivanja i pokazao da svojstva drveta variraju u zavisnosti od istih faktora koji određuju njegovo mehaničko ponašanje. On je uspešno demonstrirao korelaciju između poprečnih vibracija i čvrstoće na savijanje. Pellerin (1965) je uspostavio vezu između oscilacija i dimenzija građe, a Kaiserlik i Pellerin (1977) između podužnih oscilacija i čvrstoće na zatezanje. Galligan (1964) i Ross *et al.* (1998) su klasifikovali

sve nedestruktivne metode ispitivanja svojstava drveta u šest osnovnih kategorija: mehaničke, ultrazvučne, električne, metode zasnovane na zračenju, magnetne i hemijske. Većina metoda određuje svojstva drveta na posredan način, pri čemu su njihovi uređaji konstruisani na osnovu korelacionih zavisnosti između izmerenih i istraživanih svojstava.

U okviru mehaničkih i električnih tehnika razvijeni su prvi komercijalni uređaji za nedestruktivno ispitivanje. Mašine za "stress grading" izrađene su na principu određivanja modula elastičnosti pri savijanju, na osnovu kojeg se, uz poznate korelacione zavisnosti, mogu odrediti čvrstoća na savijanje i/ili druga svojstva drveta (Senft *et al.* 1962; Hoyle 1968; Logan 1978). Kod električnih tehnika istaknut je uređaj za određivanje vlažnosti drveta (elektrovlagomer), koji se zasniva na utvrđenoj korelacionoj zavisnosti između električne otpornosti proticanja jednosmerne struje i vlažnosti drveta.

Metode koje koriste akustična svojstva drveta temelje se na prostiranju i emitovanju zvučnih talasa. Kod prostiranja zvučnih talasa kroz drvo ili proizvode od drveta, postoji visok koeficijent korelacije između dinamičkog modula elastičnosti određenog pomoću gustine, brzine ili frekvencije zvuka i mehaničkih svojstava drveta (Pellerin 1965; Galligan & Courteau 1965; Kaiserlik i Pellerin 1977; Gerhards 1980; Vogt 1985; Casado *et al.*, 2010; Rohanova *et al.*, 2010). Kod procene kvaliteta drveta na osnovu emisije zvučnih talasa značajni rezultati su postignuti u predviđanju mehaničkih svojstava (Groom & Polensek 1987), biološke trajnosti (Beall & Wilcox 1987) i u proceni pukotina u drvetu (Beall 2002; Tiitta *et al.*, 2017).

U grupu mehaničkih svojstava drveta spadaju sva ona svojstva koja se u drvetu manifestuju kada na njega dejstvuju spoljašnje sile mehaničkog karaktera. Kvalitet drveta je složen koncept koji uključuje različite aspekte u vezi sa defektima drveta, anatomijom i fizičkim i mehaničkim svojstvima drveta. Ovi aspekti mogu biti međusobno povezani. Na primer, fizička i mehanička

svojstva su često veoma povezana sa defektima drveta (Romagnoli 2014). Istraživači u šumarstvu dugo pokušavaju da identifikuju lako merljive parametre koji bi mogli biti dobri prediktori rasta i kvaliteta drveta (Romagnoli *et al.* 2014).

Fraktometar je instrument koji se, pored analize izvrtaka u cilju procene brzine rasta i proizvodnje drvene mase, može koristiti i za procenu mehaničkih karakteristika drveta. Ovaj uređaj omogućava merenje pritisne čvrstoće paralelno s vlaknima, savojne čvrstoće u radijalnom smeru i ugla loma pri savijanju uzoraka. Pritisna čvrstoća drveta služi kao indikator kvaliteta i početne degradacije, što je usko povezano sa biološkom degradacijom drveta (Chiu *et al.*, 2006, Rinn *et al.*, 1996).

Prolazak zvučnih talasa kroz drvo i drvene materijale predstavlja dinamički fenomen. Uzdužni, smicajni i površinski talasi su različite vrste talasa koje se mogu osloboditi u drvetu i analizirati, a povezani su sa mehaničkim svojstvima drveta, posebno sa dinamičkim modulom elastičnosti (Beall *et al.*, 2001). Brzina zvučnih talasa koristi se kao nedestruktivna metoda za predviđanje fizičkih, mehaničkih svojstava i unutrašnjih oštećenja drveta. Brojni istraživači istraživali su povezanost između mehaničkih svojstava drveta i brzine talasa (Ishiguri *et al.*, 2012, Tannert *et al.*, 2010, Li *et al.*, 2016, Yue *et al.*, 2019). Brzina zvuka zavisi od vrste drveta i njegovih karakteristika, a potrebno je postaviti referentne brzine za drvo kako bi se utvrdili kriterijumi za svaku vrstu.

Crveni hrast, kao introdukovana vrsta, pokazuje značajan potencijal za uspešan rast na različitim staništima u Srbiji. Njegova otpornost na abiotičke stresove i dekorativna svojstva čine ga pogodnim ne samo za gazdovanje u šumama posebne namene, već i za širu primenu u drvnoj industriji. Istovremeno, upotreba savremenih nedestruktivnih metoda, poput fraktometrije i akustičnih tehnika, omogućava brzu i pouzdanu procenu njegovih fizičko-mehaničkih svojstava.

Na taj način se otvara prostor za racionalnije korišćenje sirovina i bolju valorizaciju kvaliteta drveta u industrijskoj preradi. Ovi aspekti ukazuju da istraživanja crvenog hrasta u Srbiji imaju ne samo naučni, već i praktični značaj, jer pružaju osnovu za donošenje odluka o njegovoj daljoj upotrebi i širem uvođenju u šumarske i drvoprerađivačke prakse.

2. PREDMET ISTRAŽIVANJA

Crveni hrast (*Quercus rubra* L.) je vrsta koja potiče iz Severne Amerike i koja se u Srbiji gaji već više od jednog veka (Tomić *et al.*, 2009). Zbog svog brzog rasta, sposobnosti da se prilagodi različitim stanišnim uslovima i vrednim tehničkim karakteristikama drveta, ova vrsta je postala važan deo plantažnih i mešoviti sastojina u nekim delovima zemlje (Milić *et al.*, 2014; Matić, 2016). Ipak, istraživanja o kvalitetu drveta crvenog hrasta u Srbiji su još uvek prilično retka, posebno ona koja se bave povezivanjem anatomskih i fizičko-mehaničkih svojstava sa rezultatima nedestruktivnih metoda ispitivanja. Istraživanja su sprovedena na crvenom hrastu (*Q. rubra*), obuhvatajući devet stabala slične starosti (preko 40 godina), sa kojih su uzeti trunci i koturovi na dve visine (prsna visina 1,3 m i 4,4 m). Ovaj uzorak pruža reprezentativan pregled osobina drveta kroz radialni i longitudinalni profil stabla.

Savremeni pristupi u nauci o drvetu sve više se oslanjaju na nedestruktivne i poludestruktivne metode koje omogućavaju brzu i pouzdanu procenu svojstava drveta bez potrebe za opsežnim destruktivnim analizama. Akustični tomograf (AT) se u tom smislu pokazao kao jedno od najperspektivnijih sredstava za terensku dijagnostiku, jer meri brzinu kretanja zvučnih talasa u različitim pravcima i omogućava uvid u homogenost i eventualne defekte drveta (Divos & Szalay, 2002; Bucur, 2006; Dackermann *et al.*, 2014). Fraktometar (FR), kao poludestruktivna metoda, omogućava procenu mehaničkih svojstava pomoću malih izvrtaka i pruža podatke o savojnoj čvrstoći i modulu elastičnosti drveta (Straže & Merela, 2017).

Dosadašnja istraživanja primene AT i FR metoda u Srbiji su se uglavnom fokusirala na autohtone vrste, kao što su hrast kitnjaka (*Q. petraea*) i obični jasen (*Fraxinus excelsior*)

(Todorović *et al.*, 2012; Jokanović *et al.*, 2022). Međutim, podaci o introdukovanim vrstama, posebno crvenom hrastu, su i dalje ograničeni, što naglašava potrebu za ovim istraživanjem. Cilj ovog rada je da se, na primeru stabala crvenog hrasta sa tri različita lokaliteta u Srbiji, ispita mogućnost korišćenja akustičnog tomografa i fraktometra za procenu kvaliteta drveta. Stabla su izabrana na tri različita staništa u Srbiji – Bruske šume, Stepin lug i Debeli lug – koja se razlikuju po ekološkim uslovima (urbano okruženje, zagađenje vazduha, hidromorfna zemljišta). Ovi lokaliteti su odabrani kako bi se obuhvatile varijacije u rastu i kvalitetu drveta pod uticajem različitih stanišnih faktora.

Analizirano je ukupno devet stabala slične starosti (preko 40 godina), sa kojih su uzeti trupčići i koturovi na dve visine (prsna visina 1,3 m i visina 4,4 m). Na ovim uzorcima sprovedena su tomografska merenja brzine širenja zvuka u poprečnom preseku, kao i fraktometrijska ispitivanja izvrtaka. Laboratorijskim analizama su utvrđena osnovna fizičko-mehanička svojstva (gustina, pritisna i savojna čvrstoća, modul elastičnosti), kao i anatomske karakteristike drveta (širina prstena prirasta, udeo kasne zone, dužina i debljina vlakana, debljina ćelijskog zida i broj vlakana po jedinici površine). Ovim pristupom obezbeđena je sveobuhvatna analiza koja povezuje strukturu drveta sa njegovim tehničkim svojstvima. Posmatrane varijable uključuju brzine širenja zvuka (radijalne – V_r , tangencijalne – V_t i prosečne – V_d/V_g), fizičko-mehanička svojstva drveta (gustina, pritisna čvrstoća, savojna čvrstoća – MOR i modul elastičnosti – MOE), kao i anatomske karakteristike (širina goda, udeo kasnog drveta, dužina i debljina vlakana, debljina ćelijskog zida i broj vlakana po jedinici površine). Ove informacije pružaju sveobuhvatan uvid u strukturu i kvalitet drveta.

Posebna vrednost ovog istraživanja leži u razvoju i testiranju prediktivnih modela koji se oslanjaju na podatke prikupljene korišćenjem akustičnog tomografa (AT) i fraktometra (FR). Kada su upoređeni sa laboratorijskim merenjima, ovi modeli su pokazali visoku korelaciju sa dobijenim vrednostima, što potvrđuje da se ove metode mogu uspešno koristiti za brzu i relativno pouzdanu terensku procenu kvaliteta drveta crvenog hrasta pre seče. Na taj način, istraživanje ne samo da obogaćuje naše razumevanje svojstava ove vrste u novim staništima Srbije, već takođe donosi praktične koristi za unapređenje dijagnostičkih i upravljačkih metoda u šumarstvu.

Kao izvori prediktora korišćene su dve savremene metode – akustični tomograf (AT) kao nedestruktivna i fraktometar (FR) kao poludestruktivna metoda. Pored terenskih merenja, sprovedene su laboratorijske analize fizičko-mehaničkih i anatomskih svojstava, što je omogućilo validaciju i kreiranje prediktivnih modela zasnovanih na merenjima AT i FR. Iako je uzorak od devet stabala ograničen i ne obuhvata sve moguće varijacije introdukovanih populacija u Srbiji, odabrani lokaliteti i metodologija pružaju dovoljno širok okvir da se dobiju pouzdani zaključci o kvalitetu drveta crvenog hrasta.

Rezultati treba da se tumače u kontekstu specifičnih stanišnih uslova i starosti stabala, uz svest o klsterskoj prirodi podataka koja može uticati na statističke modele. Na ovaj način, predmet istraživanja jasno obuhvata vrstu i uzorke, lokalitete, varijable, korišćene metode i prediktore, kao i granice istraživanja, čime se definiše operativni okvir rada i postavlja osnova za kasniju analizu i diskusiju rezultata.

3. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA

Da bi se što adekvatnije sagledao prethodno obrazložen predmet istraživanja, u ovom delu će se predstaviti, korišćenjem dostupnih podataka iz odgovarajuće literature, raspoložive informacije o istraživanim svojstvima. S obzirom da se većina svojstava crvenog hrasta kao alohtone vrste kod nas kao i primena fraktometra i akustičnog tomografa za predviđanje kvaliteta drveta prvi put izučavaju, deluje najsvrsishodnije izložiti stepen ispitanosti za svaku oblast ponaosob. U okviru ovog poglavlja biće razmotrena do sada dostupna saznanja o svojstvima drveta crvenog hrasta na njegovom prirodnom arealu, kao i o adaptaciji i karakteristikama ove vrste u različitim ekološkim uslovima širom Evrope. Posebna pažnja biće posvećena metodama poludestruktivnog i nedestruktivnog ispitivanja svojstava drveta, s naglaskom na primenu fraktometrije i akustične tomografije. Prikazaće se i osnovni principi rada ovih metoda, kao i rezultati prethodnih istraživanja u kojima su korišćene za procenu fizičko-mehaničkih osobina drveta različitih vrsta.

3.1 Crveni hrast (*Quercus rubra* L.)

Hrastovi igraju ključnu ulogu u umerenim severnoameričkim šumama pružajući stanište i hranu mnogim vrstama divljih životinja i čine veliki procenat drveća na severnoj hemisferi (Aldrich i Cavender-Bares 2011; McShea *et al.*, 2007). Pored toga, hrastovi su ekonomski vredni zbog upotrebe za proizvode od drveta i papira (Lind-Riehl, 2014). Hrastove karakteriše veliki stepen genetičke varijabilnosti i zauzimaju velike areale (Aldrich i Cavender-Bares, 2011). Stope regeneracije hrasta opadaju tokom poslednjih 60 godina, zbog požara, povećanog obima gajenja stočarskih vrsta i konkurencije sa invazivnim biljnim vrstama (Huebner 2003). Međutim, studije

su pokazale održavanje visokog stepena genetičke varjabilnosti uprkos slabijoj stopi regeneracije (Aldrich *et al.*, 2005; Muir *et al.*, 2004).

Postoji približno 400 vrsta hrastova na pet različitih kontinenata koji zauzimaju veliki deo šuma severne hemisfere (Aldrich i Cavender-Bares, 2011). Iako su lokalna adaptacija i genetska prostorna struktura i varijacije u evropskim belim hrastovima (rod *Quercus*) detaljno proučavani (npr. Bacilieri *et al.*, 1996; Brendel *et al.*, 2008; Curtu *et al.*, 2007, 2009; Jimenez *et al.*, 2004; Kremer *et al.* 2002; Lepais *et al.* 2009) studije na severnoameričkim vrstama umerenog pojasa, uključujući crvene hrastove (sekcija *Lobatae*), su ograničene (Cavender-Bares i Pahlich 2009; Craft *et al.* 2002; Dodd i Afzal-Rafii 2004; Moran *et al.* 2012; Penaloza-Ramirez *et al.* 2010; Sork *et al.* 1993). Postoji približno 195 vrsta crvenih hrastova koje se mogu naći samo u Americi (Aldrich i Cavender-Bares, 2011). Trenutne genetske informacije na osnovu razlika u vrstama su mnogo manje u poređenju sa dobro proučenim belim hrastovima, ali je njihov ekološki i ekonomski značaj jednako visok (Aldrich i Cavender-Bares, 2011). *Q. rubra* L. je osnovna vrsta u severnoameričkim umerenim šumama (Ellison *et al.*, 2005). Širokog je rasprostranjenja koje se proteže od istočne obale Severne Amerike do reke Misisipi (Barnes, 2004).

Crveni hrast je vrsta širokolisnog drveća poreklom sa istočne polovine SAD (32–47° severne geografske širine, 62–96° zapadne geografske dužine). To je najsevernija vrsta američkog hrasta (otud *borealis*) a raste na niskim kotama sve do 1680 m u južnim apalačkim planinama (Barnes, 2004; Ellison *et al.*, 2005). U svom prirodnom arealu formira čiste ili mešovite sastojine, zajedno sa drugim lišćarima (*Quercus* sp., *Fraxinus* sp., *Acer* sp., *Populus* sp., *Carya* sp., *Juglans* sp., *Magnolia* sp., *Celtis* sp., itd.) i četinarima (*Pinus* sp., *Thuja* sp.) (Sander, 1965, 1990).

Kada je reč o introdukciji u Evropu, seme ili sadnice crvenog hrasta su najpre unete u Francusku, kada ih je doneo Rolan Baren de La Galisonijer (1646–1737), istaknuti mornarički

oficir, i zasadio u Le Petit Trianon (u blizini Versajske palate) (Goeze, 1916). Od tada, a posebno u 19. veku, vrsta je korišćena u parkovima, baštama, arboretumima, oglednim poljima, kao i šumskim zasadima, širom Evrope, sa izuzetkom najhladnijih zona Skandinavije (Nagel *et al.*, 2015; Vansteenkiste *et al.*, 2005; Brus, 2016). Trenutno se intenzivno koristi za pošumljavanje u Francuskoj, u sklopu nacionalnog programa za unapređenje drveća. Sastojine postavljene u Evropi obično su nepoznatog porekla, ali su sigurno nastale regeneracijom već postojećih introdukovanih šuma, a ne direktnim uvozom semena iz prirodnog područja (Lind-Riehl, 2014).

Crveni hrast pokriva preko 350 000 ha u Evropi, sa najvažnijim šumskim površinama u Ukrajini (192 868 ha), Francuskoj (52 000 ha), Nemačkoj (44 550 ha), Poljskoj (15 261 ha), Mađarskoj (13 174 ha), Sloveniji (11 978 ha), Bugarskoj (9941 ha), Holandiji (8696 ha). U manjem obimu, crveni hrast može se naći i u Češkoj (5586 ha), Rumuniji (oko 2500 ha), Slovačkoj (2193 ha), Litvaniji (1500 ha) i Velikoj Britaniji (700–1000 ha) (Nagel *et al.*, 2015; Vansteenkiste *et al.*, 2005; Brus, 2016). Crveni hrast pruža širok spektar ekosistemskih usluga kao što su zaštita/stabilizacija i unapređenje zemljišta, sekvestracija ugljenika, zatim pruža stanište za divlje životinje (ptice, sisari, retke vrste insekata), kao zaštitni pojas, vetrobrani (ravnice, kontinentalne peščane dine), požarni pojas (borovi regioni) (Nagel *et al.*, 2015; Vansteenkiste *et al.*, 2005; Brus, 2016). Kako ima veliku krunu i listove grimizne boje sa visokom pejzažnom i ukrasnom vrednošću, kao i dobru otpornost na urbano zagađenje, vrsta se koristi u parkovima, javnim zelenim površinama i uobičajeno je drvoredno stablo (Brus, 2011). Crveni hrast može biti alternativa autohtonim hrastovima (lužnjak i kitnjak) na staništima koja su za njih neodgovarajuća, ili pod očekivanim klimatskim promenama kao „vrsta tolerantna na sušu“ kako se smatra u Velikoj Britaniji (Ray *et al.*, 2010).

U prirodnom arealu crvenog hrasta srednja godišnja količina padavina varira između 760 i 2030 mm, dok se srednja godišnja temperatura kreće između 4-16°C. Period bez mraza traje u proseku oko 100 dana godišnje u severnim delovima područja, dok na jugu dostiže i do 220 dana godišnje (Sander, 1965, 1990). U Evropi, gde crveni hrast uglavnom raste na visinama između 250 i 800 m (Nagel, 2015), vrsta pokazuje široku klimatsku toleranciju, kultiviše se u oblastima sa sličnom srednjom temperaturom kao u prirodnom staništu, ali sa znatno nižim srednjim količinama padavina, dostižući minimum od 500–550 mm godišnje (Nagel, 2015). Pokazuje bolju otpornost na sušu od *Q. petraea* i *Q. robur*. Ova otpornost na sušu je posledica činjenice da crveni hrast ima manju potrošnju vode i na njegov rast manje utiče deficit vode. Pored toga, tkiva lista crvenog hrasta imaju visok kapacitet da tolerišu isušivanje, a listovi pokazuju visoku gustinu stoma (višu nego kod *Q. robur* i *Q. petraea*) (Timbal i Dreyer, 1994). Vrsta toleriše veoma niske temperature (do –30, čak –40 oC) tokom zimskih kao i prolećnih mrazeva (Brus, 2016). Crveni hrast je osetljiv na jesenje mrazove što može izazvati račvanje neočvrstlih izdanaka ili grana. Ovu 'nepoželjnu' sklonost ka račvanju, kao i formiranju višestrukih vodećih izdanaka, zbog pojave velikog broja pupoljaka na terminalu pucanja, treba uzeti u obzir pri gazdovanju. Na njega utiče rani gust i lepljiv sneg koji može dovesti do lomljenja debla ili grana, posebno kada je drveće mlado (Nagel *et al.*, 2015; Vansteenkiste *et al.*, 2005; Brus, 2016).

Crveni hrast ima manje zahteva za hranljivim materijama – azotom, fosforom i kalijumom (Miltner *et al.*, 2016, Nagel *et al.*, 2015; Vansteenkiste *et al.*, 2005; Brus, 2016) i manje potrebe za vodom tj. bolju otpornost na sušu u zemljištu od autohtonog hrasta kitnjaka i lužnjaka i zbog toga može biti snažniji i produktivniji na manje plodnim lokalitetima (Brus, 2016). *Q. rubra* može da raste na siromašnim, peskovitim i kiselim zemljištima, ako nisu previše suva, kao i na zemljištima teške teksture, bogatim glinom. Na potonjim zemljištima raste kao *Q. cerris* L. (cer) i

Q. frainetto Ten. (sladun), koji su najbolje prilagođene vrste hrasta pod ovako teškim edafskim faktorima (Nagel *et al.*, 2015; Vansteenkiste *et al.*, 2005; Brus, 2016). Ne raste dobro na suvom, krečnjačkom zemljištu, budući da se njegova brzina rasta smanjuje i dolazi do intenzivnije folijarne hloroze kako se sadržaj kalcijuma povećava (Timbal & Devilder, 1994), iako se čini da se njegova osetljivost na sadržaj kalcijuma smanjuje sa godinama (Broshtilov & Broshtilova, 2013). Generalno, crveni hrast preferira duboka, rastresita, umereno vlažna i kisela zemljišta bez krečnjaka, bez zbijenog horizonta i najmanje umerene plodnosti (Réh & Réh, 1997; Nagel, 2015). Takvi lokaliteti su slični onima na kojima crveni hrast najbolje raste u svom prirodnom staništu (Sander, 1990).

Stabla crvenog hrasta rastu veoma brzo u visinu do 30, 40. godine (Nagel *et al.*, 2015; Vansteenkiste *et al.*, 2005; Brus, 2016), sa vrhuncem u 15–20 godina starosti, tako da prevazilazi sve autohtone hrastove, uključujući *Q. cerris*, koji se smatra vrstom sa najbržim rastom u mladosti među autohtonim evropskim hrastovima (Nagel *et al.*, 2015;). Drveće *Q. rubra* može dostići visinu od 6 m za 10 godina, 8 m sa 12 godina, 21 m sa 35 godina, 30 m sa 80 godina i 35 m na 100 godina (Brus, 2016).

Otporan je na vetar, lako se regeneriše semenom, lako raste dobro prilagođen dinamičnom gazdovanju šumama, uključujući proređivanje i visoko orezivanje. Crveni hrast ima kraći period ophodnje od domaćih vrsta hrastova (oko 30 godina) i proizvodi dragoceno drvo raznih krajnjih namena. Karakterističan je kao vrsta brzog rasta sa visokim nivoom proizvodnje drvne mase (Isajev *et al.*, 2013).

Do sredine 20. veka crveni hrast sađen je u Srbiji uglavnom u Vojvodini. Na širem području Srbije ova vrsta mogla bi biti važna sa ekonomskog i ekološkog aspekta, ali i kao ukrasna vrsta, na staništima domaćih hrastova (Šušić, 2016). Preporučuje se i za unošenje na staništa cera i

sladuna (Isajev *et al.*, 2013.) i potencijalna je vrsta u biomelioracijama (Krstić i Vojinović, 2002). Prema Isajevu *et al.*, (2013), uvođenje crvenog hrasta u staništa cera i sladuna je od specijalnog značaja imajući u vidu visok stepen aklimatizacije, izuzetnu vitalnost, prilagodljivost i naturalizaciju ove vrste i uslove staništa. U Srbiji zasadi crvenog hrasta mogu se naći na Avali, Šupljoj steni, u Stepinom lugu, u REIK-u Kolubara, zatim u okolini Niša, Aleksandrovca, Kragujevca i Kruševca (Lazarević, 2020).

Spada u krupno prstenasto porozne lišćare. Osnovna razlika između prstenasto-poroznih i difuzno-poroznih lišćara ogleda se u rasporedu i veličini traheja – kod prstenasto-poroznih vrsta veliki traheje ranog drveta formiraju jasnu granicu i izraženu razliku u boji između ranog i kasnog drveta, dok kod difuzno-poroznih vrsta traheje približno iste veličine ravnomerno ispunjavaju čitav prsten prirasta, pa su granice između zona manje uočljive (Panshin & de Zeeuw, 1980). Fizičko-mehanička svojstva su mu vrlo dobra u smislu prerade, dobro se mehanički obrađuje i daje visoko kvalitetne proizvode, nameštaj, furnir, građevinsku stolariju, podove. U Evropi se crveni hrast gaji posebno zbog svog vrednog drveta, koje je gušće, ali slabijeg kvaliteta i izdržljivosti od autohtonih hrastova (Brus, 2016).

Prva ocena sposobnosti nekog drveta za mehaničko naprezanje, propusnost za tečnost i gasove i sposobnost da menja dimenzije, oblik i da ukazuje na druga svojstva i mogućnost upotrebe drveta, može se dobiti na osnovu ispitivanja njegove strukture prstenova prirasta (Šoškić i Popović, 2002). Genet *et al.*, (2013) u svojoj studiji navode da je prosečna širina godišnjeg prstena crvenog hrasta 4,4 mm, dok su se vrednosti za širinu godišnjih prstenova kretale u rasponu od 2,8 do 7,1 mm. Širine godišnjih prstenova se povećavala sa starošću tako da su dostizale svoje najveće vrednosti u približno srednjem dobu, a zatim se ponovo smanjivala. Tako su najuži godišnji prstenovi registrovani u blizini srži, a najširi godišnji prstenovi na sredini između kore i srži (Genet

et al., 2013). Ako ove podatke uporedimo sa podacima dobijenim za drvo crvenog hrasta staro 57 godina iz Lipovičke šume nadomak Beograda (srednja veličina prstena rasta je 3,486 mm, a raspon je 0,438–9,379 mm) (Živanović *et al.*, 2022), može se primetiti da je prosečna širina prstena manja, ali i da je veća varijacija u širini prstena. Uočene razlike mogu se pripisati različitim staništima i uslovima u kojima su ispitivana stabla rasla. Prema Zeidler i Boruvka (2016), udeo kasnog drveta iznosi 68,80% do 90,40%, što je više od vrednosti dobijene u istraživanju Živanović *et al.*, (2022) (prosečan udeo kasnog drveta je 69,67%). Pored toga, Uzcategui *et al.*, (2020) dobili su rezultat da prosečan procenat kasnog drveta crvenog hrasta varira između 42,20% i 98,40%, sa srednjom vrednošću 71,30% i koeficijentom varijacije 18,17%. Buiuksarı *et al.*, (2018) izračunali su prosečnu širinu ranog i kasnog drveta i godišnjih prstenova i udeo kasnog drveta kitnjaka za stabla starosti od 190 do 211 godina – kao 0,50 mm, 0,49 mm, 0,99 mm i 49,30%, respektivno. Gursu (1966) je utvrdio da je godišnja širina prstena hrastovog drveta gajenog na području Karabuka 1,58 mm za stabla od 97 do 156 godina, a 0,80 mm za stabla od 186 do 247 godina. Utvrđeno je da je udeo kasnog drveta 66% u *Q. faginea* Lam. (Knapic *et al.*, 2011) i 61% kod *Q. suber* L. (Knapic *et al.*, 2008). Živanović *et al.*, (2022) merili su širine prstenova prirasta na dve visine, 1,4 m i 4,4 m. Prosečna širina prstena prirasta bila je 3,616 mm za donji kotur, i 3,527 mm za gornji kotur. Udeo kasnog drveta bio je u proseku 2,458 mm (68%) za donji, i 2,630 mm (74%) za kotur koji je posečen na 4,4 m iznad zemlje. Vavrčik & Gryc, (2012) su dobili vrednost od 2,1 mm za širinu prstena hrasta lužnjaka i 1,4 mm kod hrasta kitnjaka. Saopštili su da, pri istoj širini prstena, lužnjak ima veći udeo kasnog drveta. Ove razlike mogu biti rezultat uslova rasta, kao što su padavine, temperatura vazduha, izgled, karakteristike tla itd.

Kod crvenog hrasta rast prečnika dostiže maksimum u dobi 20-40 godina, na osnovu istraživanja sprovedenih u Rumuniji, ili 50–60 godina starosti u Belgiji i Francuskoj. To je u

proseku oko 0,5 cm godišnje, ali može dostići i 1 cm godišnje pri veoma povoljnim uslovima staništa i podizanjem odgovarajućih šumskih kultura. Na najpovoljnijim staništima i nakon značajnog proređivanja, srednji prečnici od 40 cm mogu se postići za 50 godina, 55 cm za 80 godina i 60 cm za 100 godina (Nagel *et al.*, 2015; Vansteenkiste *et al.*, 2005; Brus, 2016). Prema Vučkoviću *et al.*, (2008), za crveni hrast sa područja Majdanpečke domene, kulminacija debljinskog prirasta nastupa u 16. godini sa 9 mm, a prosečnog prirasta u 33 godini sa 6 mm. Za ista stabla karakterističan je intenzivan porast visina u mladosti. Tekući prirast kulminira u 10. godini sa 0,9 m, a prosečni u 18. godini sa 0,73 m (Vučković *et al.*, 2008). Prema istraživanju Zelića & Međugorca (2002) kulminacija tekućeg debljinskog prirasta na prelaznom kitnjakovo-bukovom staništu je u 15. godini sa približno jednakim iznosom prirasta. Zelić & Međugorac (2002) su utvrdili takođe kulminaciju tekućeg prirasta u 10. godini, sa praktično jednakim iznosom prirasta i nešto kasniju kulminaciju prosečnog prirasta (u 23. godini), sa iznosom od 0,6 m.

Zapreminski rast sastojina crvenog hrasta u različitim zemljama je relativno veliki u poređenju sa drugim vrstama hrasta, te može biti čak 8–10 m³/ha godišnje. U dobi od 60 godina, pod povoljnim uslovima na lokaciji, crveni hrast u Rumuniji daje prirast koliko i hrast kitnjak sa 140 godina (Haralamb, 1967). U Francuskoj, prirast crvenog hrasta od 30–60 godina starosti sastojine daje duplo veći prirast od sastojine autohtonih hrastova – *Q. robur* i *Q. petraea* (Pillar-Landau, 1984).

Drvo crvenog hrasta je širokih prstenova prirasta, tvrdo, čvrsto, kruto, sa dobrom obradivošću i potencijalom za impregnaciju i cepanje (Nagel *et al.*, 2015; Vansteenkiste *et al.*, 2005; Brus, 2016). Drvo crvenog hrasta je višenamensko i koristi se za građu, nameštaj, furnir, u građevinarstvu, za enterijer završne obrade kuća (npr. zidne obloge, podovi, parket), železničke pragove, zatim kao rudničko drvo, ogrevno drvo, itd. (Réh & Réh, 1997; Vansteenkiste *et al.*,

2005). Crveni hrast se može koristiti i u industriji papira i celuloze, budući da poseduje relativno duga drvena vlakna, sa prosečnom dužinom od oko 1,5 mm, što ga čini pogodnim za proizvodnju papira dobre čvrstoće (Panshin & de Zeeuw, 1980).

Specifična gustina pri sadržaju vlage od 12% kreće se u rasponu od 550 do 980 kg/m³ (Reh & Reh, 1997), a najčešće citirana vrednost je od 680–720 kg/m³ (Stoykov & Andonova, 2008; Zeidler & Boruvka, 2016). Genet (2013) navodi prosečne vrednosti gustine crvenog hrasta u prirodnim sastojinama, i to 585 kg/m³ za zonu ranog drveta, 887 kg/m³ za zonu kasnog drveta i 760 kg/m³ za drvo, pri vlažnosti od 12%. Za stabla iz veštački podignutih sastojina, isti autor navodi nešto niže prosečne vrednosti, i to 542 kg/m³ za zonu ranog drveta, 807 kg/m³ za zonu kasnog drveta i 743 kg/m³. Prema Šoškiću *et al.* (2005), gustina hrasta kitnjaka je 665 kg/m³, a gustina hrasta lužnjaka 650 kg/m³, dok je gustina crvenog hrasta 740 kg/m³. Gustina crvenog hrasta u istraživanju Živanović *et al.* (2020) ne razlikuje se značajno od gustine hrasta kitnjaka i hrasta lužnjaka. Naime, gustina drveta je bila između 670 i 780 kg/m³, sa prosečnom vrednošću od oko 720 kg/m³, a koeficijentom varijacije od 4%. Ova vrednost je u opsegu rezultata prikazanih u literaturi (Vansteenkiste 2005; Genet *et al.* 2013; Zeidler & Boruvka 2016; Uzcategui *et al.* 2020). Uzcategui *et al.* (2020) su dobili gustinu drveta za crveni hrast koja je varirala između 571 i 853 kg/m³, sa prosečnom vrednošću od 699 kg/m³ i koeficijentom varijacije od 8,31%. Klačnja *et al.* (2006) dobili su ukupnu srednju vrednost od 673 kg/m³ za gustinu drveta lužnjaka sušenog u pećnici, sa standardnom devijacijom od 49,785, maksimalnom vrednošću od 769 kg/m³, a minimalnom vrednošću od 573 kg/m³. Stablo crvenog hrasta koje je ispitano u istraživanju Živanović *et al.* (2020) ima za oko 10% veću osnovnu gustinu od autohtonih vrsta hrastova u Srbiji. Međutim, ovo se ne smatra značajnom razlikom.

Raspored drvnih vlakana i njihova dužina od srži ka kori, kao i njihovo učešće, veoma su važni za poznavanje kvaliteta drveta. Najveću površinu u strukturi drveta hrasta lužnjaka imaju vlakna (40- 60 %). U skladu s tim, površina sudova u ranom drvetu iznosi 40%, a u kasnom drvetu 8 %, dok je površina sržnih zraka 15–30 % (Wagrenfuhr i Scheiber, 2006).

Dužine drvnih vlakana kod crvenog hrasta nisu izučavane u onoj meri kao kod ostalih vrsta hrastova. Uticaj lokacije na anatomske karakteristike crvenog hrasta su istraživali Maeglin (1974), Tainter *et al.* (1990) i Tardif *et al.* (2006). Juvenilna zona je deo stabla koji se po svojim anatomskim karakteristikama i svojstvima značajno razlikuje u odnosu na zrelo drvo (Zobel & Buijtenen, 1989; Hernandez *et al.*, 2006). Taylor (1976) je utvrdio (između ostalih vrsta, i za drvo crvenog hrasta) da se u zreloom drvetu nalaze duža drvna vlakna u odnosu na juvenilno drvo. Isti autor je izučavao korelaciju između pozicije u prstenu prirasta po radijusu i dužine drvnih vlakana i utvrdio da postoji funkcionalna kvadratna zavisnost. U nekim radovima (Mladenova *et al.*, 2017; Nazari *et al.*, 2020) istraživane su karakteristike vlakana, uglavnom dužina, u drvetu različitih vrsta hrastova. Dobijeni rezultati su pokazali veliku zavisnost dimenzija vlakana od uslova lokacije. Helińska-Raczkowska & Fabisika (1991) su utvrdili da se dužina vlakana povećava od srži ka kori i da ona kod kitnjaka u juvenilnom drvetu iznosi 0,99 mm, a u zreloom drvetu – 1,13 mm. Isti autori su zabeležili negativnu korelaciju između dužine anatomskih elemenata i širine prstenova prirasta kod vrsta iz roda *Quercus*, a da je ona najjasnija za drvna vlakna. Mladenova *et al.*, (2017) navode da je kod hrasta kitnjaka izmerena dužina vlakana od 1,306 mm, dok za crveni hrast Wagenfuhr i Scheiber (1985) navode dužinu 1,300 mm, a za beli hrast isti autori su publikovali vrednost od 1,360 mm. Nazari *et al.* (2020) su zabeležili da je dužina vlakana u drvetu persijskog hrasta (*Quercus brantii* Lindl.) kraća od 1 mm, dok je prosečna vrednost bila 0,87 mm. Prikazane razlike

su posledica genetskih uticaja i činjenice da anatomske karakteristike drveta mogu varirati čak i unutar iste šumske sastojine i u velikoj meri zavise od mikrokruženja i hidroloških uslova (Gričar *et al.*, 2013; Jokanović *et al.*, 2022), kao i varijacije strukture prstenova prirasta po radijusu (Genet *et al.*, 2013).

Todorović (2006) i Merela & Čufar (2013) su utvrdili da nema značajnih razlika između svojstava drveta beljike i srčevine kod kitnjaka, lužnjaka i cera, ali su zabeležili statistički značajne razlike između svojstava belih hrastova (kitnjaka i lužnjaka) i crvenih hrastova (hrast cer). Ove razlike mogu biti posledica rasporeda zone ranog i kasnog drveta i učešća anatomskih elemenata, što je rezultat delovanja klimatskih i lokacijskih uslova (Carlquist, 1988; Gričar *et al.*, 2013).

Kvalitet drveta određuje se na osnovu njegovih fizičkih, mehaničkih i tehnoloških svojstava, koja međusobno deluju i zajednički definišu potencijal vrste za industrijsku upotrebu. Među njima, gustina se izdvaja kao jedno od ključnih svojstava, jer neposredno utiče na čvrstoću, obradu, trajnost i ponašanje drveta u različitim uslovima eksploatacije. Ujedno se koristi i kao pokazatelj unutrašnje građe, odnosa između ranog i kasnog drveta, kao i anatomskih komponenti koje doprinose kvalitetu materijala. Prema literaturnim podacima, gustina crvenog hrasta u prosušenom stanju iznosi oko 740 kg/m^3 , što je više u poređenju sa gustinom domaćih vrsta hrasta kitnjaka i lužnjaka, kod kojih se prosečne vrednosti kreću oko 650 kg/m^3 . Ova razlika ukazuje na visok potencijal crvenog hrasta za upotrebu u industriji.

Pored fizičkih osobina, mehanička svojstva poput pritisne čvrstoće, savojne čvrstoće i modula elastičnosti igraju važnu ulogu u oceni ukupnog kvaliteta drveta. Njihove vrednosti u velikoj meri zavise od gustine, strukture godova i učešća kasnog drveta, što ukazuje na blisku povezanost između fizičkih i mehaničkih pokazatelja. Literatura potvrđuje da crveni hrast u tom pogledu ispoljava karakteristike uporedive sa najvažnijim autohtonim vrstama, uz određenu

varijabilnost u zavisnosti od lokalnih uslova rasta i starosti stabala. Industrijska vrednost crvenog hrasta dodatno je potvrđena njegovom primenom u proizvodnji nameštaja, podova, furnira, konstrukcionih elemenata i ambalažnog materijala, što ga svrstava među komercijalno najznačajnije vrste u evropskoj drvenoj industriji. Brz rast, dobra obradivost i dekorativne osobine čine ga atraktivnom sirovinom, posebno u uslovima kada je snabdevanje kvalitetnim domaćim vrstama ograničeno. Imajući u vidu sve navedeno, razvijanje efikasnih metoda za ranu procenu kvaliteta drveta u stojećim stablima postaje od suštinske važnosti, kako bi se donose odluke o seči i upotrebi drvene mase temeljile na pouzdanim podacima. Ovim istraživanjem poseban akcenat stavljen je upravo na taj aspekt – povezivanje fizičko-mehaničkih i anatomskih svojstava sa podacima dobijenim nedestruktivnim i poludestruktivnim metodama ispitivanja. Green i McDonald (2007) su utvrdili da crveni hrast ima tvrdoću po Janki od 54,3 MPa, modul elastičnosti od 12,14 MPa i čvrstoću na pritisak od oko 47 MPa.

Kada je reč o mehaničkim svojstavima drveta crvenog hrasta, Živanović *et al.*, (2022) su merili osnovne pokazatelje kvaliteta drveta, čvrstoću na pritisak paralelno sa vlaknima (σ_p), čvrstoću na savijanje upravno na vlakanca (MOR) i modul elastičnosti (MOE).

Čvrstoća ili napon na pritisak predstavlja napon koji se u drvetu javlja pri dejstvu sile koja ga nastoji sabiti paralelno ili upravno na drvena vlakna. Najčešće se maksimalni napon određuje na silu koja uzrokuje lom pri pritisku. Maksimalni napon na pritisak paralelno sa vlakancima varira u širokim granicama i za lišćare on iznosi od 45 do 109 MPa (Šoškić & Popović 2002). Živanović *et al.*, (2022), dobili su vrednosti čvrstoće na pritisak paralelno sa vlaknima od 53,15 do 75,75 MPa, sa prosečnom vrednošću od 64,43 MPa. Uzcategui *et al.*, (2020) su dobili veoma bliske vrednosti za crveni hrast u jugoistočnom delu SAD i one su se kretale od 47 do 80 Mpa, sa prosečnom vrednošću od oko 61 MPa. Green i McDonald (2007) navode nešto niže vrednosti za

pritisnu čvrstoću od oko 43 MPa. Šoškić & Popović (2002) daju podatke za pritisnu čvrstoću lužnjaka i to za minimalnu 54 MPa, maksimalnu 67 MPa i srednju 61 MPa, kao i za kitnjak minimalnu 48 MPa, maksimalnu 70 MPa i srednju 65 MPa. Kod Živanović *et al.*, (2022), među analiziranim svojstvima drveta, MOE ima najveći koeficijent varijacije (21,32%). Ipak, srednja vrednost od 7381,5 MPa bila je nešto niža od onih datih u literaturi (Uzcategui *et al.*, 2020). S druge strane, MOR je pokazao sličnu srednju vrednost od 102,23 MPa kao i one date u literaturi. Na primer, Vansteenkiste *et al.*, (2005) dobili su vrednost od 12500 MPa za MOE i 99 MPa za MOR. Wang i Allison (2008) su dobili 9810 MPa za MOE i 62,1 MPa za MOR. Uzcategui *et al.*, (2020) dobili su 12211 MPa za MOE i 120 MPa za MOR.

Cena trupaca crvenog hrasta u Evropi kreće se između 60 i 100 evra m³, dostižući maksimum u zapadnim zemljama, kao što su Francuska i Nemačka. Međutim, bez obzira na sortiment, cena trupaca crvenog hrasta je i do 2 ili 3 puta niža od cene trupaca lužnjaka ili kitnjaka (Nagel *et al.*, 2015; Vansteenkiste *et al.*, 2005; Brus, 2016).

3.2 Primena fraktometra u proceni kvaliteta drveta

Fraktometar je uređaj za merenje čvrstoće drveta na lom i čvrstoće na savijanje ili pritisak (Rinn *et al.*, 1996) na izvrtku uzetom Preslerovim svrdlom sa određenog dela stabla. Čvrstoća drveta na pritisak je dobar pokazatelj kvaliteta i stanja drvnog tkiva (Chiu *et al.*, 2006; Rinn *et al.*, 1996). Brojne studije sugerišu da se usled razgradnje drveta dejstvom patogena, radijalna čvrstoća smanjuje na isti način kao i longitudinalna čvrstoća (Mattheck *et al.*, 1995; Gruber i Hagermann, 2000). Tang *et al.* (2005) navode visoku korelaciju između čvrstoće na savijanje i pritisne čvrstoće paralelno sa vlakancima. Matsumoto *et al.* (2010) su zaključili da se fraktometar može primeniti za procenu svojstava dubećeg drveta na osnovu visokog koeficijenta determinacije između

čvrstoće na pritisak i gustine. Konačno, Ishiguri je objavio brojne radove o korišćenju fraktometra za analizu svojstava drveta (npr. Ishiguri *et al.*, 2013), a u rezultatima svojih studija naglašava da se mehanička svojstva drveta mogu predvideti korišćenjem ovog instrumenta. Brojne studije su potvrdile zavisnost između rezultata fraktometrijske analize i svojstava drveta (Schwarze *et al.*, 1995; Gruber i Hagermann, 2000; Tang *et al.*, 2005; Matsumoto *et al.*, 2008). Eksperimenti su izvedeni na bukvi (*Fagus* sp.), jeli (*Abies* sp.), topoli (*Populus* sp.) i duglaziji (*Pseudotsuga menziesii* /Mirbel/ Franco), a dobijene jednačine su imale srednje do jake koeficijente korelacije (R^2). Predhodna fraktometarska istraživanja su pokazala da se tangencijalna čvrstoća smanjuje na isti način kao i aksijalna čvrstoća, kao rezultat devastacije drveta. Prikazana istraživanja ukazuju na visoke korelacije izmerenih svojstava i stvarnog kvaliteta drveta. Ove analize čine obradu drveta mnogo jeftinijom, jer se stabla mogu selektovati u skladu sa testovima kvaliteta pre obaranja.

Prvo predstavljanje ispitivanja fraktometrom dao je Mattheck *et al.*, (1995), kao novu metodu koja je obuhvatala vizuelnu procenu stabla na biomehaničkoj osnovi, kao i ispitivanje fraktometra. Brojne *in situ* studije sugerisale su da se radijalna čvrstoća smanjuje na isti način kao i uzdužna čvrstoća zbog procesa truljenja.

Schwarze *et al.*, (1995) testirali su dva uređaja, „Metriguard“ (tajmer akustičnih talasa) i fraktometar, za merenje umanjenja čvrstoće. „Metriguard“ nije uspeo da otkrije patogene u početnoj fazi, ali je otkrio razaranja nastala belom i mrkom truleži u daljim fazama. Fraktometar je pokazao značajan gubitak čvrstoće za sve stadijume napada gljiva (za *Umbilicaria deusta* /L./ Baumg, čak i u ranoj fazi napada). Zipse *et al.*, (1998) su istraživali uticaj vetra na mehanička svojstva 14 izloženih živih stabala bukve (*F. silvatica* L.) koristeći fraktometar. Zaključak studije bio je da stabla izložena vetru razvijaju čvršće drvo i trpe znatno veće napone pre urušavanja.

Matheny *et al.*, (1999) procenili su moment loma i ugao loma izvrtaka sa donjeg dela debla, za 25 vrsta drveća pomoću fraktometra. Otkrili su da su rezultati varirali o vrstama, segmentu izvrtka i lokaciji drveta, s tim da istraživači, koristeći fraktometar, moraju obratiti posebnu pažnju na uzorke uzete sa pojedinih stabala, a ne na tabele standardizovanih rezultata. Prilikom procene gubitka čvrstoće povezane sa truljenjem, rezultati fraktometra moraju se uporediti sa vrednostima iz čistih i zdravih uzoraka sa istog stabla (Matheny *et al.*, 1999).

Tang *et al.*, (2005) istražili su čvrstoće drveta za 25 vrsta drveća u Hong Kongu korišćenjem fraktometra. Radijalna čvrstoća na savijanje testirana je na 2656 uzoraka, a uzdužna pritisna čvrstoća i ugao loma na 4779 uzoraka. Ostvarene su značajne i pozitivne korelacije između radijalne čvrstoće na savijanje i uzdužne pritisne čvrstoće, pokazujući snažnu vezu između radijalne i uzdužne mehaničke čvrstoće. Chiu *et al.*, (2006) upotrebili su fraktometar za merenje čvrstoće na pritisak, s ciljem da lociraju granicu između juvenilnog i zrelog drveta. Linija između juvenilnog i zrelog drveta stabala starih 18–20 godina pronađena je na približnoj udaljenosti od 10,8–13,2 cm od srži. Matsumoto *et al.*, (2008) ispitali su dve japanske četinarske vrste, *Criptomeria japonica* D. Don i *Pinus densiflora* Siebold & Zuc. Stabla su testirana fraktometrom, merene su radijalne promene čvrstoće izvrtaka na savijanje i kompresiju. Takođe su testirani standardni uzorci na svojstva statičkog savijanja i čvrstoću statičke kompresije paralelne sa vlakancima u svežem stanju. Autori nisu pronašli smislenu vezu između čvrstoće na savijanje izvrtaka i statičke čvrstoće na savijanje standardnih uzoraka. Uočili su značajnu korelaciju između pritisne čvrstoće izmerene fraktometrom i čvrstoće na pritisak paralelne sa vlakancima izmerene standardnim metodama po Japanskom industrijskom standardu (JIS). Zaključili su da se svojstva drveta, uglavnom čvrstoća na kompresiju drveta, mogu proceniti čvrstoćom na pritisak izvrtka merenom fraktometrom.

Baza podataka o vrednosti čvrstoće čistog drveta u zdravim stablima pružila bi referentne vrednosti i mogla bi da se koristi kao baza referentnih vrednosti na terenu. Istraživanja o proceni kvaliteta drveta pomoću fraktometra su brojna, ali je potrebno prikupiti više podataka o različitim vrstama drveća.

3.3. Primena akustičnih metoda u proceni kvaliteta drveta

Akustična metoda se već dugo koristi za određivanje kvaliteta drveta. Promene mehaničkih i fizičkih svojstava drveta direktno utiču na način na koji zvuk prolazi kroz materijal. Ovaj princip je osnova jedne od najstarijih i još uvek najčešće korišćenih tehnika za otkrivanje oštećenja unutrašnje građe drveta. Stvaranje zvučnih talasa u drvetu udaranjem o površinu predmetom (obično čekićem) može otkriti nedostatke poput truleži i unutrašnjih pukotina. Promene u tonu zvuka usled udara ukazuju na različita svojstva drveta i mogu ih uočiti i osobe sa umerenim nivoom iskustva. Iako je ova metoda brza i jednostavna za sprovođenje, ona može otkriti samo velike nedostatke i ne pruža nikakvu kvantitativnu meru. Takođe je vrlo subjektivna – nalazi mogu varirati između različitih ispitivača (Dackermann *et al.*, 2013). Danas, zvučna metoda ima naučne osnove i dokazano je da je vreme potrebno za protok zvučnih talasa kroz zdravo drvo kraće nego kroz oštećeno. Odnos između brzine zvuka i gustine drveta je opisana sledećom osnovnom talasnom jednačinom (Bucur 2006):

$$MOEd = \rho * v^2 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

gde je: MOEd – dinamički modul elastičnosti drveta,

ρ – gustina drveta u $[\text{g/mm}^2]$,

a v – brzina zvuka u $[\text{m/s}]$.

Ovo su u svojim radovima dokazali mnogi istraživači na različitim vrstama; na primer, Tsehaye *et al.*, (2000) na vrsti *Pinus radiata* D. Don i Haines & Leban (1997) na smrči (*Picea abies* L. H. Karst.). Primena zvuka je dala odlične rezultate u proceni dinamičkog modula elastičnosti, na osnovu kog se mogu proceniti i druga mehanička svojstva, kao što su statički modul elastičnosti i tvrdoća drveta (Kaiserlik & Pellerin, 1977; Pellerin, 1965; Ross & Pellerin, 1988). Guntekin *et al.*, (2013) sproveli su studiju na brucijskom boru (*Pinus brutia* Ten.) u pokušaju da nađu zavisnost između brzine zvuka i savojne čvrstoće na tri mesta u stablu. Dobili su visok koeficijent korelacije (0.84) između dinamičkog modula elastičnosti, dobijenog na osnovu brzine zvuka i savojne čvrstoće drveta. Rezultat je pokazao da je dinamički modul elastičnost bolji za procenu savojne čvrstoće od statičkog modula elastičnosti. Kraler & Beikircher (2013) testirali su tri nedestruktivne metode za procenu kvaliteta drveta – otpor bušenju, ispitivanje fraktometrom (savojnu i pritisnu čvrstoću paralelno sa vlakancima) i akustičnu metodu (zvučne talase). Ispitivali su kuće napravljene od drvenih oblica i poluoblica smrče i ariša (*Larix decidua* L.). Zaključili su da se ove metode mogu koristiti za rano otkrivanje oštećenja na drvetu. Auty and Achim (2014) sproveli su istraživanje na belom boru (*P. sylvestris* L.) s ciljem da razviju model koji bi na osnovu merenja akustičnim talasima mogao da predvidi kvalitet drveta i koji bi u obzir uzimao i različitu istoriju ispitivanih sastojina. Dobijena je dobra linearna regresiona korelacija između brzine zvučnih talasa i modula elastičnosti (MOE) ($R^2 = 0,53$), kao i između brzine zvučnih talasa i čvrstoće loma (MOR) ($R^2 = 0,59$). Predviđene srednje vrednosti MOE i MOR ukazivale su da su mehanička svojstva čistog drveta od prirodno regenerisanih stabala uporediva sa stablima gajenim na plantažama. Guanghui *et al.* (2016) predložili su analitički model za brzinu talasa u uzdužnoj radijalnoj ravni živog stabla. Sprovedena su i terenska i laboratorijska ispitivanja zvučnih talasa

kako bi se utvrdili obrasci brzine talasa kod zdravih i oštećenih stabla. Analiza obrazaca brzina je ukazala da su izmerene brzine u zdravom drveću u dobroj korelaciji sa teorijskim modelima. Rezultati ove studije pokazali su da se obrasci brzine zvučnih talasa mogu koristiti za procenu unutrašnjih oštećenja urbanog drveća i poboljšavaju tačnost 3D tomografskih slika prilikom pregleda stabala. Xiaoquan *et al.* (2019) poredili su dve nedestruktivne metode – električnu otpornost i akustičnu metodu zvučnih talasa na 80 stabala – 40 jasena (*Fraxinus mandshurica* Rupr.) i 40 topola (*Populus simonii* Carrière). Električna tomografija dala je bolje rezultate od zvučne tomografije u ranim fazama degradacije, dok se tomografija zvučnog talasa može efikasno koristiti u kasnijim fazama oštećenja. Predlaže se da se obe tehnike koriste u praksi za istraživanje degradacije stabala na osnovu faza oštećenja i radnih uslova.

Različita svojstva statičke elastičnosti i čvrstoće drveta su u korelaciji sa dinamičkim modulom elastičnosti zasnovanom na brzini kojom se šire longitudinalni naponski talasi kroz njega (Smulski, 1989). Gerhards (1982) je citirao petnaest istraživanja u kojima su pronađene značajne korelacije između modula naponskih talasa i modula zatezanja, pritiska ili savijanja (MOE) ili čvrstoće na savijanje (MOR) drveta ili furnira. Takođe je sumirao efekte različitih faktora drveta koji utiču na brzinu naponskih talasa, koja se kreće od 3000 do 6000 m/s paralelno sa vlaknima u drvetu bez oštećenja pri sadržaju vlage od 9 do 15%. Zaključio je da brzina talasa opada obrnuto sa povećanjem ugla pružanja vlakana, temperature drveta ili sadržaja vlage. Konstatovao je i da je brzina naponskih talasa veća u kasnom nego u ranom drvetu, kao i da je niža u devastiranom (trulom) drvetu. Vrednosti modula elastičnosti određene pomoću naponskih talasa su obično oko 10 do 20 % više od onih koje su određene statičkim testovima. Gerhards (1989) je zaključio da je za puno drvo modul naponskih talasa u visokoj korelaciji sa statičkim modulom elastičnosti, ali ipak samo umereno korelisan sa statičkom snagom.

Mnogi istraživači su proučavali upotrebu naponskih talasa (ultrazvuka ili zvučnih talasa) za otkrivanje devastacije drveća. (McCracken, 1985; Mattheck i Bethge, 1993; Yamamoto *et al.*, 1998; Lin *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 2004). Koncept detekcije oštećenja pomoću ove metode zasniva se na konstataciji da je proces širenje naponskog talasa osjetljiv na prisustvo degradacije u drvetu. Brzina naponskog talasa je direktno povezana sa fizičkim i mehaničkim svojstvima drveta. Uopšteno govoreći, naponski talasi putuju sporije u trulom ili oštećenom drvetu nego u zdravom drvetu. Isto tako, putuju oko šupljina, čime se povećava vreme prenosa između dve tačke ispitivanja. Prva oprema ovog tipa koja se koristila za detekciju degradacije bio je sistem sa dve sonde koji je merio vreme prenosa talasa na jednoj putanji. Ovaj pristup pokazao se ograničenim jer brzina talasa naprezanja kroz stablo drveta varira čak i kod zdravih stabala i standardne referentne vrednosti brzina za interpretaciju podataka nisu primenjive (Wang *et al.*, 2005). Poslednjih godina razvijene su tehnike tomografije koje su se pokazale pogodnim za primenu u dubecim stablima. Analize stabala u gradskim sredinama dale su dobre rezultate u primeni tomografije za otkrivanje unutrašnje devastacije drveta. Nikolotti *et al.*, (2003) primenili su tri različite vrste tomografskih metoda (električni, ultrazvučni i georadarski) na stablima i imali su različit stepen uspešnosti. Od tri procenjene tehnologije, zvučna tomografija se pokazala kao najefikasniji alat za otkrivanje unutrašnje degradacije, lociranje položaja grešaka i procenu njihove veličine, oblika i karakteristika u pogledu mehaničkih svojstava. Gilbert i Smiley (2004) koristili su akustični tomograf za kvantifikaciju degradacije belog hrasta (*Q. alba* L.) i hikorija (*Carya* spp.). Akustična tomografija i vizuelni pregled su korišćeni za procenu 27 poprečnih preseka iz 13 stabala. Gilbert & Smiley (2004) su prijavili visoku korelaciju između kvantiteta devastacije koju je detektovao tomograf i količine koja je stvarno prisutna u poprečnim presecima ($R^2 = 0,94$) za sve poprečne preseke. Prosečna tačnost po uzorku bila je 89%.

Primena fraktometra je dala dobre rezultate kod ispitivanja čvrstoće na pritisak u poprečnom smeru i sa tim su se složili skoro svi istraživači koji su se bavili ovom problematikom, dok su kod čvrstoće na savijanje i ugla loma stavovi različiti (Matheny, 1999; Tang, 2016; Ganesan, 2010). Kod primene fraktometra, kao poludestruktivne metode, dobija se mogućnost utvrđivanja korelacije između mehaničkih karakteristika izvrtka i fizičko-mehaničkih svojstava drveta u stablu. S druge strane, kod upotrebe zvuka bi se utvrdila korelacija između dinamičkog modula elastičnosti i kvaliteta drveta nedestruktivnim putem. Poređenje poludestruktivne i nedestruktivne metode bi dalo dovoljno podataka za preciznu procenu kvaliteta drveta živih stabala i prednost određene metodologije u odnosu na drugu u praksi.

Ishiguri (2012) i Matsumoto (2010) su objavili značajne studije o primeni ove dve metode na egzotama. Nakon brojnih ispitivanja autori su istakli da su obe analize veoma pogodne za procenu kvaliteta drveta živih stabala i da su zadovoljavajuće preciznosti, ali se modeli procene moraju istražiti za svaku vrstu.

U cilju jasnijeg prikaza dosadašnjih saznanja o fizičko-mehaničkim svojstvima drveta crvenog hrasta i srodnih vrsta, kao i mogućnosti njihove procene primenom nedestruktivnih i poludestruktivnih metoda, izrađene su dve sintezne tabele. Tabela 1 prikazuje osnovne fizičko-mehaničke parametre za crveni hrast u poređenju sa domaćim vrstama hrastova i bukvom.

Tabela 1. Fizičko-mehanička svojstva drveta crvenog hrasta i srodnih vrsta prema literaturnim izvorima

Vrsta	Gustina (kg/m ³)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	Pritisna čvrstoća (MPa)	Izvor
<i>Quercus rubra</i>	585–887 (rano/kasno drvo); 743–760 prosek	102–120	9810–12500	47–80 (61 prosek); 53–75 (Srbija)	Genet et al., 2013; Uzcategui et al., 2020; Vansteenkiste et al., 2005; Živanović et al., 2022
<i>Quercus rubra</i>	740 (prosek)	110	11000	53	Šoškić & Popović, 2002
<i>Quercus rubra</i> (Srbija, Lipovica)	670–780 (720 prosek)	100–110	7380 (prosek)	64 (prosek)	Živanović et al., 2020; Živanović et al., 2022
<i>Quercus rubra</i> (SAD)	571–853 (699 prosek)	62–120	9810–12211	47–80	Uzcategui et al., 2020; Wang & Allison, 2008
<i>Quercus robur</i>	650	95	10000	48	Šoškić et al., 2005
<i>Quercus robur / petraea</i> (uporedno)	650–665	95–105	10000–10800	48–67	Šoškić et al., 2005; Vavrčik & Gryc, 2012
<i>Quercus robur/petraea</i> (poređenje)	650–665	95–105	10000–12500	54–70	Klašnja et al., 2006; Vansteenkiste et al., 2005
<i>Quercus petraea</i>	670	105	10800	50	Romagnoli, 2014
<i>Quercus cerris</i>	600	85	9200	43	Stoykov & Andonova, 2008
<i>Fagus sylvatica</i>	720	110	11500	54	Zeidler & Boruvka, 2016

Podaci ukazuju da crveni hrast poseduje konkurentne vrednosti gustine, modula elastičnosti i savojne čvrstoće u odnosu na autohtone vrste. Posebno se ističe većom gustinom i MOR-om, što potvrđuje njegov potencijal kao industrijske sirovine. Uprkos varijacijama između lokaliteta i starosti, crveni hrast može zauzeti značajno mesto u industriji drveta Evrope, naročito u situacijama kada je snabdevanje domaćim vrstama ograničeno.

Tabela 2. Dosadašnja istraživanja primene akustične tomografije (AT) i fraktometra (FR) na različitim vrstama drveta

Vrsta	Metod	Ciljna svojstva	Rezultati	Izvor
<i>Quercus robur</i>	AT	Gustina, MOE	R ² = 0,71–0,83	Todorović et al., 2012
<i>Quercus robur</i>	AT+FR	Gustina, MOR, MOE	R ² = 0,70–0,80	Divos & Szalay, 2002
<i>Quercus rubra</i>	AT+FR	Gustina, MOR, MOE, pritisna čvrstoća	R ² do 0,825 za gustinu	Živanović et al., 2022
<i>Quercus alba, Carya ovata</i>	AT	Gustina, defekti stabla	Kvalitativna evaluacija	Gilbert & Smiley, 2004
<i>Fagus sylvatica</i>	AT	Gustina, MOE, MOR	R ² = 0,75–0,82	Mattheck & Bethge, 1993; Rinn, 1996
<i>Fagus sylvatica</i>	FR	MOR, MOE	RMSE nisko; dobra predikcija	Straže & Merela, 2017
<i>Pinus radiata</i>	AT	Gustina, MOE	R ² do 0,80	Tsehaye et al., 2000
<i>Pinus sylvestris</i>	AT	Gustina, MOE	R ² = 0,73–0,82	Auty & Achim, 2014
<i>Picea abies</i>	AT	Gustina, MOE	R ² = 0,72–0,85	Haines & Leban, 1997
<i>Picea abies</i>	AT+FR	MOE, MOR	R ² ≈ 0,80	Tannert et al., 2010
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	AT	MOE, MOR	R ² ≈ 0,70	Matsumoto et al., 2008
<i>Larix decidua</i>	AT	Gustina, MOE	R ² ≈ 0,78	Kraler & Beikircher, 2013
Više vrsta (pregled)	AT, FR	Različita svojstva	Sumarni podaci	Dackermann et al., 2014

Tabela 2 daje pregled istraživanja u kojima su primenjene AT i FR metode na različitim vrstama drveta. Dok se kod lišćara, posebno kod hrastova i bukve, pokazala visoka pouzdanost metoda u proceni gustine, modula elastičnosti i savojne čvrstoće, istraživanja na četinaru takođe daju dobre korelacije, ali često sa nešto manjom preciznošću. Najbolji rezultati za crveni hrast dobijeni su u domaćim istraživanjima ($R^2 = 0,825$ za gustinu), što potvrđuje njegov potencijal, iako je broj studija još uvek ograničen. Razlika između lišćara i četinaru ogleda se u strukturi drveta, što utiče na preciznost metoda, ali ukupno gledano, i jedna i druga grupa vrsta potvrđuju primenljivost ovih metoda.

Istraživanja pokazuju da crveni hrast (*Quercus rubra* L.), iako nije domaća vrsta u Evropi, ima fizičko-mehanička svojstva slična ili čak bolja od domaćih hrastova i bukve. Njegova gustina i savojna čvrstoća čine ga vrednom sirovinom za industriju, dok brz rast i otpornost na različite uslove dodatno potvrđuju njegov značaj. Međutim, svojstva crvenog hrasta mogu varirati u zavisnosti od porekla, starosti i uslova rasta, pa je potrebno pažljivo razmotriti ove faktore u praksi.

Kada je reč o metodama procene kvaliteta drveta, fraktometar i akustična tomografija pokazali su se kao pouzdani alati, sa brojnim studijama na autohtonim evropskim lišćarima i četinaru. Najbolji rezultati za crveni hrast postignuti su u istraživanjima sprovedenim u Srbiji, gde je kombinovana primena ovih metoda dala visok koeficijent determinacije ($R^2 = 0,825$) za gustinu drveta. Uprkos tome, primena ovih tehnika na crveni hrast u svetskoj literaturi i dalje je retka, dok su podaci za lužnjak, kitnjak, bukvu i različite četinare daleko obimniji.

Strukturne razlike između lišćara i četinaru utiču na tačnost procene, ali obe grupe potvrđuju da su AT i FR metode korisne u praksi. Podaci sa drugih vrsta pomažu da se bolje razumeju rezultati za crveni hrast. Ovi nalazi pokazuju da je crveni hrast još uvek nedovoljno

istražen kada je reč o nedestruktivnim metodama, ali postoji veliki potencijal za razvoj modela za procenu njegovog kvaliteta.

Na osnovu pregleda dosadašnjih istraživanja može se zaključiti da crveni hrast, zahvaljujući kombinaciji brzog rasta, otpornosti i solidnih fizičko-mehaničkih svojstava, predstavlja perspektivnu vrstu za šumarsku i drvnu industriju. Istovremeno, postoji potreba za daljim istraživanjima koja bi dopunila postojeće podatke i omogućila pouzdanije procene kvaliteta drveta u stojećim stablima.

4. CILJ ISTRAŽIVANJA

Istraživanje u ovom radu se zasniva na utvrđivanju osnovnih anatomskih i fizičko-mehaničkih svojstava drveta crvenog hrasta, kao i na mogućnosti procene kvaliteta drveta u dubećim stablima koristeći fraktometar i akustični tomograf. S obzirom da crveni hrast ima značajan prirast i kraći period ophodnje u poređenju s drugim vrstama hrastova, bilo bi veoma korisno za šumarsku i drvnoindustrijsku nauku i praksu da se istraže svojstva ovog drveta i uporede sa kvalitetom najvažnijih domaćih vrsta iz roda *Quercus*, kao što su kitnjak i lužnjak.

Osnovni zadaci ovog istraživanja uključuju:

1. Utvrđivanje makroskopskih (širina prstenova prirasta, udeo beljike i srčevine, procentualni odnos rane i kasne zone), mikroskopskih (dužina drvnih vlakana i broj drvnih vlakana po jedinici površine), fizičkih (gustina) i mehaničkih (pritisna čvrstoća paralelno sa vlaknima, čvrstoća na savijanje i modul elastičnosti pri savijanju) svojstava crvenog hrasta kao alohtone vrste u Srbiji;
2. Istraživanje zavisnosti između parametara dobijenih fraktometrom i analiziranih fizičko-mehaničkih svojstava drveta crvenog hrasta;
3. Utvrđivanje veze između brzine zvučnih talasa i analiziranih fizičko-mehaničkih svojstava drveta crvenog hrasta;
4. Razvijanje pouzdanih statističkih modela za procenu kvaliteta drveta u dubećim stablima crvenog hrasta, koristeći fraktometar i zvučne talase.

Na osnovu definisani ciljeva postavljene su sledeće polazne hipoteze:

H1: Postoji statistički značajna linearna zavisnost između brzine zvučnih talasa u radijalnom i tangencijalnom pravcu i savojne čvrstoće drveta crvenog hrasta.

H2: Postoji statistički značajna korelacija između vrednosti pritisne čvrstoće dobijene fraktometrom i laboratorijski određene pritisne čvrstoće za uzorke crvenog hrasta.

H3: Modeli zasnovani na podacima sa fraktometra objašnjavaju veću varijansu modula elastičnosti drveta crvenog hrasta u poređenju sa modelima zasnovanim na akustičnoj tomografiji.

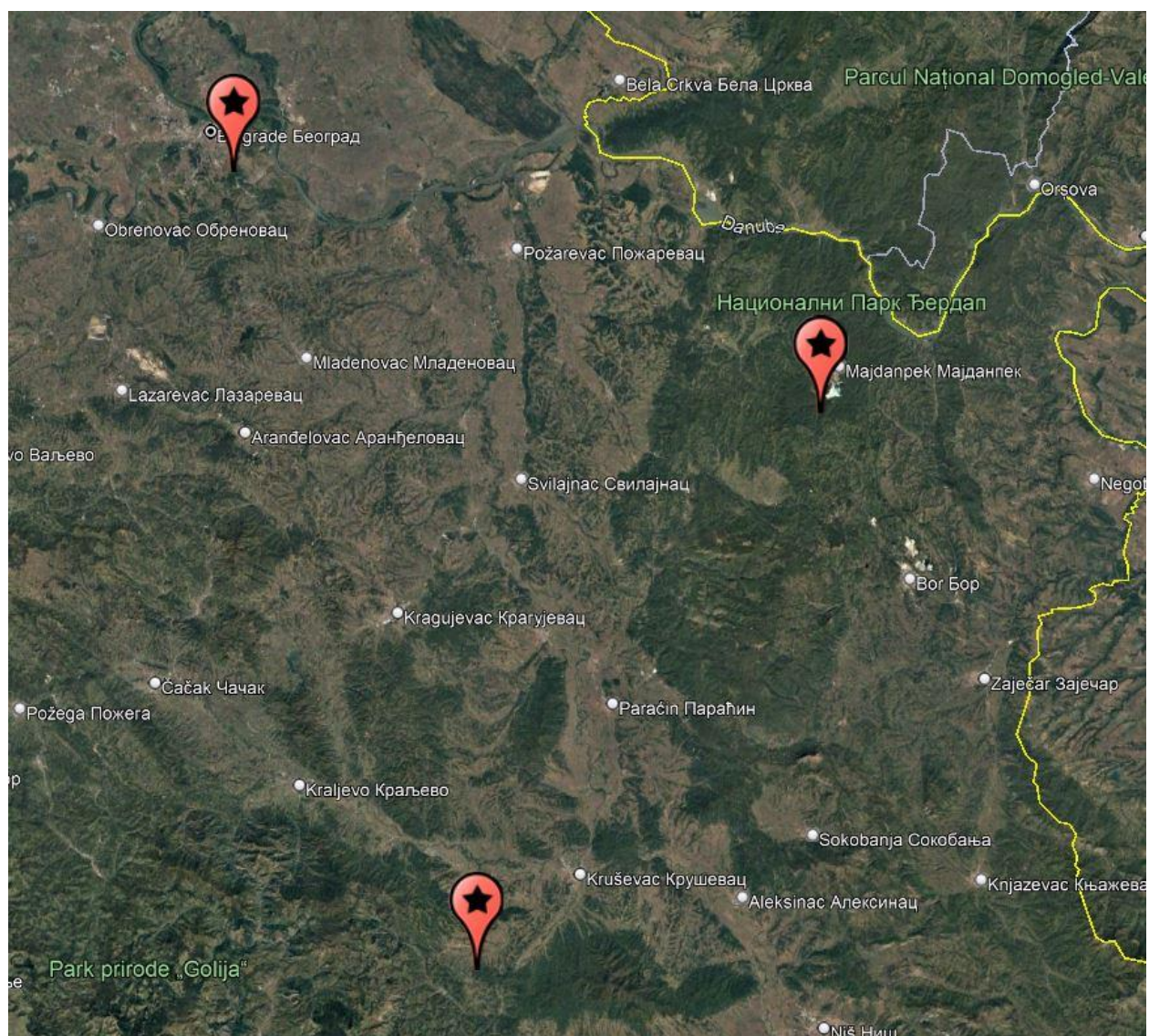
H4: Udaljenost brzine zvuka od srednjih vrednosti (V_r i V_t) značajno se razlikuje u zavisnosti od anatomske zone (juvenilno/zrelo drvo) i povezana je sa dužinom i brojem drvnih vlakana ($p < 0,05$).

H5: Kombinovani modeli koji uključuju varijable iz fraktometrije i akustične tomografije imaju viši stepen pouzdanosti u proceni kvaliteta drveta (izražen kroz MOR, MOE i gustinu), nego modeli bazirani samo na jednoj grupi prediktora ($R^2_{\text{kombinovani}} > R^2_{\text{pojedinačni}}$).

5. MATERIJAL I METOD RADA

5.1 Izdvajanje oglednih površina i izbor reprezentativnih stabala

Iz baze podataka JP „Srbija Šume” prikupljene su informacije o svim sastojinama severnog crvenog hrasta u Republici. Izabrana su tri lokaliteta koji su se najviše razlikovali po nadmorskoj visini, orijentaciji i vrsti zemljišta a na kojima su stabla ujedno bili približne starosti. U obzir je uzeta i pristupačnost terena. Na mapi su obeleženi lokaliteti sa kojih su uzeta uzorkovana stabla.



Slika 1 - Mapa lokaliteta uzorkovanih stabala

Prva grupa uzoraka uzeta je iz GJ Bruske šume (odeljenje 144, odsek e, gazdinska klasa 10469313). Površina sastojine iznosi 1,20 ha. Šuma se nalazi na strani i na strmom terenu ujednačenog nagiba od 11° do 15°. Nadmorska visina iznosi 620–675m, a ekspozicija je zapad–jugozapad. Geološka podloga ove sastojine su kristalasti škriljci u raspadanju (slabo raspadnuti). Zemljište je distično smeđe ili kiselo smeđe, srednje duboko (41–80 cm), polurastresito, suvo. Mrtvi pokrivač je srednje zastupljen, proces humifikacije je povoljan. Nema prizemne vegetacije, nema žbunja ni zakorovljenosti. Ceno-ekološka grupa šuma kitnjaka i cera (*Quercion petraeae-cerris*) na različitim smeđim zemljištima, lesu, silikatnim stenama i krečnjacima. Šuma spada u veštački podignute sastojine crvenog hrasta i to je jednodobna (srednjedobna) sastojina. Sastojina je očuvana i čista. U celini zdravstveno stanje sastojine je osrednje i predstavlja srednje negovanu sastojinu. Osnovna namena sastojine je proizvodnja tehničkog drveta, a starost sastojine je 42 godine. Na slici 2 je Stablo crvenog hrasta na lokalitetu bruske šume pripremljeno za merenje brzine zvuka, a na slici 3 je oboreno stablo isečeno u trupčice za analizu.



Slika 2 – stablo crvenog hrasta na lokalitetu Bruske šume



Slika 3 – izrezani ogleđni trupčici u Bruskim šumama

Druga grupa uzoraka uzeta je iz GJ Debeli Lug (odeljenje 17, odsek c, 19476661). Površina sastojine je 3,78 ha. Šuma se nalazi na strani i na strmom terenu valovitog nagiba od 11° do 15°. Nadmorska visina je 350–390 m jugoistočne ekspozicije. Mrtvi pokrivač je obilno zastupljen u tankom sloju, a proces humifikacije je nepovoljan. Prizemna vegetacija je retka, zastupljeno je gusto žbunje i nema zakorovljenosti. Tip acidofilne šume bukve sa bekicom (*Lasio-Fagetum moesiaca montanum*) na kiselim smeđim zemljištima. Ovo je veštački podignuta mešovita jednodobna (srednjedobna), očuvana sastojina crnog bora. Sastojina je mešovita stablimično, gustog sklopa (0,8–0,9). U celini, zdravstveno stanje sastojine je osrednje i po kvalitetu spada u srednjevredne sastojine. Od 21–40% drvne mase spada u tehničko drvo. Procenjena je jaka ugroženost od požara i jaka ugroženost od insekata. Sastojina je nenegovana. Starost sastojine je oko 50 godina. Na slici 4 vidi se stablo crvenog hrasta u sumi u Debelom lugu a na slici 5 je poprečni presek posečenog stabla.

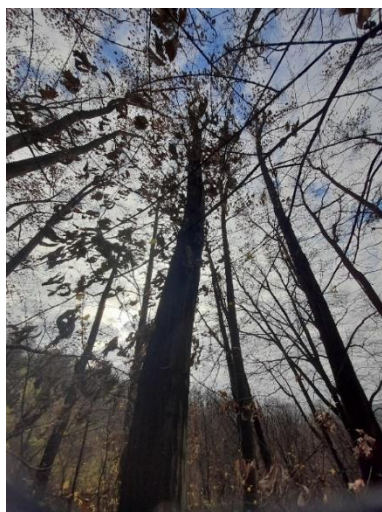


Slika 4 - Stablo crvenog hrasta na lokalitetu Debeli lug



Slika 5 – Poprečni presek oborenog stabla u Debelom lugu

Treća grupa uzoraka uzeta je iz GJ Stepin lug (odjeljenje 17, odsek g, gazdinska klasa 26469212). Površina sastojine iznosi 0,99 ha. Šuma se nalazi na strani i na srednje strmom terenu ujednačenog nagiba od 6° do 10°. Nadmorska visina iznosi 185 do 215 m, a ekspozicija jug-jugoistok. Geološka podloga su ilovače (peskovite gline) u raspadanju (slabo raspadnut). Zemljište je eutrično smeđe ili gajnjača, srednje duboko (41-80 cm), sveže. Mrtvi pokrivač je obilno zastupljen u tankom sloju, a proces humifikacije je povoljan. Prizemna vegetacija je srednje gusta, žbunje je srednje gusto, kao i zakorovljenost. Ceno-ekološka grupa je šuma sladuna i cera (*Quercion frainetto*) na smeđim i lesiviranim zemljištima. Ceno-ekološka jedinica je tipična šuma sladuna i cera (*Quercetum frainetto-cerris typicum*) na smeđim lesiviranim zemljištima. I ovo je veštački podignuta sastojina crvenog hrasta i ostalih lišćara i predstavlja jednodobnu, dozrevajuću sastojinu. Sastojina je razređena, mešovita sastojina stablimično, nepotpunog sklopa (0.5–0.6). U celini zdravstveno stanje sastojine je osrednje i spada u srednje negovane sastojine. Starost sastojine je oko 50 godina. Na slici 6 su stabla crvenog hrasta na lokalitetu Stepin lug a na slici 7 se mogu videti odvojeni trupčići posečenog stabla namenjeni daljoj analizi.



Slika 6 - Stablo crvenog hrasta na lokalitetu Stepin lug



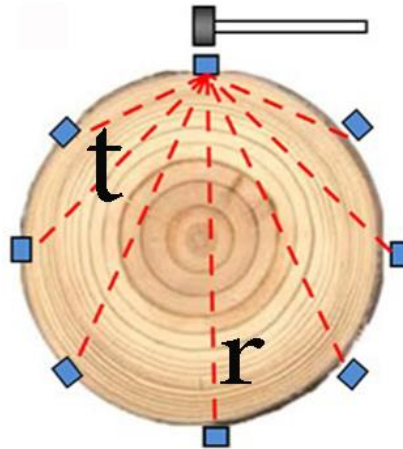
Slika 7 - Izrezani ogledni trupčići crvenog hrasta u Stepinom lugu

Posle vizuelnog pregleda sastojine i stabala, odabrana su po tri stabla iz svake sastojine. Kako bi se ocenila biološka zdravost izabranih stabala izmerene su brzine protoka zvuka na prsnoj visini svakog stabla. Stabla crvenog hrasta prvo su podvrgnuta merenju akustičnom tomografijom (AT) na visini od 1,3 m iznad tla. Nakon snimanja, sa iste visine su izvađeni uzorci fraktometrom (FR) sa četiri glavne strane stabla. Zatim su stabla oborena, a sa mesta snimanja je izvađen trupčić visine 50 cm i pripadajući kotur debljine 10 cm. Na visini od 4 m, postupak je ponovljen, pri čemu je takođe izvađen trupčić visine 50 cm i kotur debljine 10 cm. Odmah nakon obaranja, na gornjem trupčiću je izvršeno dodatno snimanje akustičnim tomografom. Sa četiri glavne strane ovog trupčića su izvađeni uzorci za fraktometrijsko ispitivanje. Izvrsci su spakovani u hidrofobne folije i analizirani po povratku u laboratoriju. Ovaj raspored merenja omogućio je da se podaci dobijeni AT i FR metodama uporede sa fizičko-mehaničkim i anatomskim analizama izvedenim na koturovima. Tako je obezbeđen uvid u longitudinalne promene svojstava drveta između prsne visine i visine od 4 m. Kombinovanjem nedestruktivnih i poludestruktivnih metoda sa laboratorijskim analizama, dobijena je sveobuhvatna slika kvaliteta drveta crvenog hrasta. Rezultati su korišćeni za izradu modela predikcije svojstava drveta u stojećim stablima.

5.2 Merenje akustičnih parametara na dubećim stablima

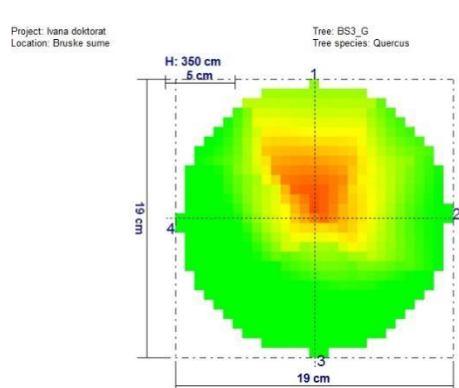
U ovom istraživanju korišćen je uređaj za akustičnu tomografiju stabala, Arbotom 2D Impulse Tomograph, koji je razvio nemački proizvođač Rinntech. Ovaj savremeni sistem omogućava vizualizaciju unutrašnje strukture stabala, oslanjajući se na analizu brzine širenja mehaničkih impulsa kroz drvo. Uređaj koristi mrežu piezoelektričnih senzora, obično između 6 i 24, koji se postavljaju oko stabla na istoj visini. Mehanički impulsi se generišu udarcem u svaki senzor, a zatim se beleži vreme dolaska talasa do ostalih senzora. Na osnovu vremena putovanja zvučnih talasa kroz drvo, izračunava se brzina njihovog širenja i kreira se dvodimenzionalna

tomografska slika preseka stabla. Prikupljeni podaci se obrađuju uz pomoć pratećeg softvera koji prikazuje mapu brzine zvuka kroz stablo u boji. Niže brzine, koje ukazuju na potencijalna oštećenja poput truleži, šupljina ili pukotina, prikazuju se hladnijim tonovima (plava, ljubičasta), dok zdrave i guste zone drveta imaju visoke brzine i prikazuju se toplijim bojama (crvena, narandžasta). Prostorna rezolucija zavisi od broja i rasporeda senzora, a algoritmi za interpolaciju omogućavaju detaljan prikaz unutrašnjih promena u strukturi drveta. Uređaj je lagan i jednostavan za korišćenje na terenu, a za rad mu je potreban samo prenosivi računar povezan preko USB-a, bez dodatnog napajanja. Podaci se mogu izvoziti u različitim formatima, a softver omogućava analizu više preseka na različitim visinama, što doprinosi sveobuhvatnijem uvidu u stanje stabla. Arbotom predstavlja visoko pouzdanu nedestruktivnu dijagnostičku metodu koja omogućava brzu, kvantitativnu i vizuelno preglednu procenu zdravstvenog stanja i unutrašnje stabilnosti stabala. Na početku snimanja, pomoću kompasa određena je severna strana stabla, gde je postavljen prvi senzor, a zatim i svi ostali na rastojanju od minimum 15 cm po obimu debla, u pravcu kazaljke na satu. U zavisnosti od prečnika, stabla su analizirana sa 3, 4, 5 ili 6 senzora. Tako se pojedini senzori nalaze jedan naspram drugog i zvučni talas između njih prolazi kroz sam centar stabla, odnosno u radijalnom pravcu. Senzori, koji se nalaze jedan pored drugog, emituju i primaju zvučni talas koji prolazi tangencijalnim pravcem (slika 8).

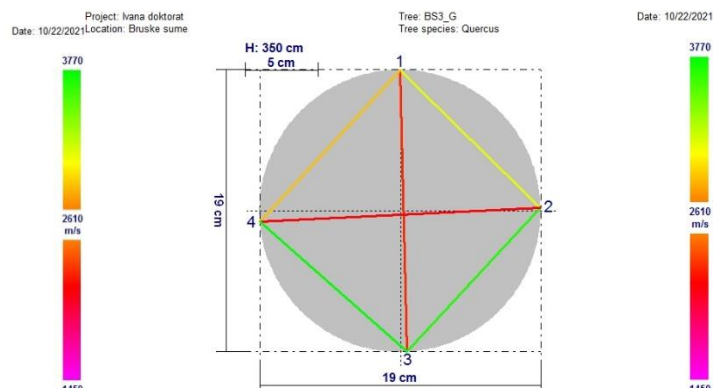


Slika 8 – Radijalni i tangencijalni zvučni talas u odnosu na prstenove prirasta

Tomografski snimci poprečnih preseka analizirani su po bojama. Površine obojene istom bojom imaju istu srednju brzinu zvuka između svih parova senzora (slike 9 i 10).



Slika 9 – Tomografski snimak poprečnog preseka stabla crvenog hrasta



Slika 10 - Tomografski snimak sa brzinama između senzora

Brzina zvuka između parova senzora može se očitati na skali sa desne strane snimka, na osnovu boje linije između tih senzora na tomogramskom snimku. Pri analizi brzine zvuka, senzori arbotoma postavljaju se u krug oko stabla, u smeru kazaljke na satu, na najmanjem međusobnom rastojanju od 15 cm. Statističkom analizom srednjih vrednosti mehaničkih svojstava uzoraka koji su se u trupcu nalazili u zoni sa istom bojom, sa brzinom zvuka koja koja je predstavljena bojom

na skali razvijeni su statistički modeli koji na osnovu brzine zvuka mogu dati predviđanja mehaničkih svojstava.

5.3. Merenje svojstava izvrtaka iz stabala korišćenjem fraktometra

Iz oborenih stabala iskrojena su po dva trupčića dužine 50 cm i po dva kotura debljine 5 cm. Prvi trupčić odsečen je u zoni prsne visine, a drugi u polovini zone tehnički najvrednijeg dela debla. Gornji trupčići su obeleženi, a zatim je i na njima izvršena analiza parametara zvuka akustičnim tomografom i izvađeni su izvrci iz 4 kardinalna pravca, koji su zatim skladišteni u hidrofobnu ambalažu radi očuvanja početne vlažnosti.

U laboratoriji su, neposredno po uzorkovanju, na uzorcima drveta prečnika 5 mm izvršena fraktometrijska ispitivanja korišćenjem uređaja Fractometer II, proizvođača Rinntech (Nemačka). Ovaj uređaj predstavlja poludestruktivnu dijagnostičku metodu namenjenu za procenu mehaničkih svojstava drveta na malim cilindričnim uzorcima (izvrcima) koji se prethodno uzimaju iz stabala u terenskim uslovima.

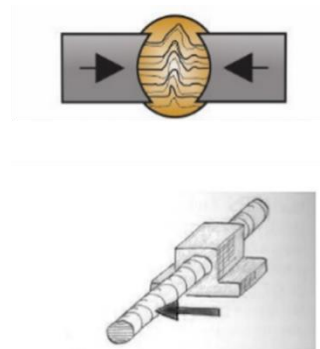
Fraktometar omogućava određivanje tri osnovna parametra: pritisne čvrstoće paralelno sa vlaknima (compressive strength parallel to grain), savojne čvrstoće u radijalnom pravcu (radial bending strength) i ugla loma pri savijanju. Izvrci su postavljeni u specijalizirani nosač uređaja, a merenja su vršena automatski putem ugrađenog senzorskog sistema. Ugao i sila su simultano registrovani tokom testa pomoću elektronskih merača sile i ugla pomeranja, čime se obezbeđuje visoka preciznost i ponovljivost rezultata. Pritisna čvrstoća određivana je pomoću silaznog opterećenja na krajevima uzorka, dok je savojna čvrstoća merenja savijanjem uzorka oko oslonaca na standardnoj dužini. Ugao loma beležen je kao trenutak maksimalne deformacije pre loma vlakana.

Svi uzorci su ispitivani u serijama od kore ka srži, čime je omogućeno praćenje promene mehaničkih svojstava po radijalnom pravcu. Podaci su automatski eksportovani i obrađeni uz pomoć softvera povezanog sa uređajem. Zahvaljujući ovoj metodi, dobijene vrednosti pružaju dobar uvid u fizičko-mehaničko stanje drveta i mogu se koristiti za razvoj prediktivnih modela u cilju procene kvaliteta drvne mase bez potrebe za sečom stabala. Fraktometar se pokazao kao veoma koristan alat za pouzdano laboratorijsko testiranje osobina drveta u kontekstu poljskih i istraživačkih analiza.

Na slici 11 je mehanički uređaj fraktometar koji meri savojnu aksijalnu i pritisnu čvrstoću paralelno sa vlaknima. Na slici 12 prikazan je način merenja pritisne čvrstoće paralelno sa vlaknima na izvrtku i merenja savojne čvrstoće na izvrtku.



Slika 11 - Fraktometar II – uređaj za poludestruktivno ispitivanje drveta (preuzeto prema Rinn, 1994).



Slika 12 - način merenja pritisne čvrstoće paralelno sa vlaknima na izvrtku i merenja savojne čvrstoće na izvrtku (preuzeto prema Rinn, 1994).

5.4 Izrada uzoraka iz stabala za laboratorijsko određivanje svojstava drveta

Radi merenja fizičkih i mehaničkih svojstava drveta crvenog hrasta, trupčići dužine 500 mm, odsečeni sa oglednih stabala, odneti su u preduzeće Sagadrvo D.O.O.(slika 13). Iz trupčića su na tračnoj testeri trupčari izrezane daske debljina 25 mm. Daske su rezane od severne ka južnoj strani (slika 14). Nakon toga dobijene daske odnete su (slika 15) na Šumarski fakultetu u Beogradu gde su sušene u klasičnoj konvencionalnoj sušari Nigos MC 3000 do vlažnosti od oko 10% (slika 16).



Slika 13-ogledni trupčići Slika 14-izrezivanje na trupčari Slika 15-transport oglednih dasaka Slika 16-ogledne daske u sušari

5.4.1 Određivanje makroskopskih i mikroskopskih svojstava drveta

Za određivanje makroskopskih karakteristika drveta korišćeni su koturovi čije su površine obrađene na CNC mašini na Šumarskom fakultetu – Univerziteta u Beogradu (slika 17), a zatim su površine koturova brušene granulacijama 50–300 i na kraju polirane (slika 18). Na slici 19 je prikazan ispolirani kotur drveta crvenog hrasta sa lokaliteta Stepin lug sa jasno vidljivim prstenovima prirasta (Slika 20).



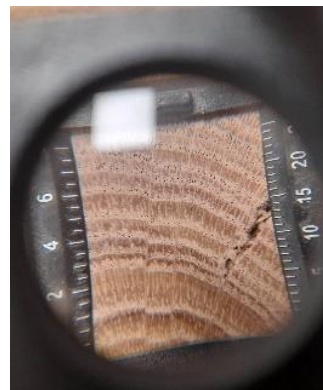
Slika 17 – CNC mašina za brušenje koturova



Slika 18 – Brušenje kotura crvenog hrasta



Slika 19 – Ispoliran kotur crvenog hrasta



Slika 20 – Poprečni presek crvenog hrasta posmatran kroz lupu

5.4.1.1 Površinsko učešće beljke i srčevine, širina prstena prirasta i učešće kasne zone

Utrđivanje odnosa beljike i srčevine (Slika 21) kod jedričavih vrsta može značajno ukazati na kvalitet i ponašanje drveta. U ovom radu površinsko učešće srčevine mereno je odnosom površine srčevine i ukupne površine kotura sa korom prema sledećem obrascu (Popović & Todorović 2006):

$$P_s = \frac{r_s^2}{r^2} \cdot 100(\%)$$

gde je:

r_s – poluprečnik srčevine u mm, i

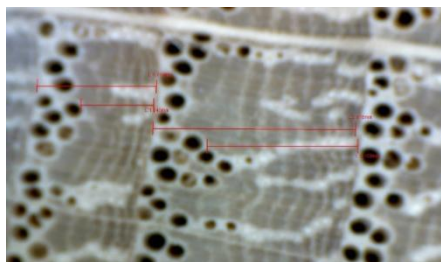
r - poluprečnik kotura u mm.



Slika 21 – granica beljike i srčevine na koturu

5.4.1.2. - Širina prstenova prirasta

Širine prstenova prirasta i kasne zone, merene su pomoću mikroskopa. Na koturovima su izbrojani prstenovi prirasta golim okom i uz pomoć lupe. Za određivanje širine prstenova prirasta i kasne zone unutar prstena korišćen je mikroskop (Digital Microscope with stand INSIZE) sa uvećanjem do 200 puta i milimetarski papir kako bi se kalibrirao mikroskop. Merenje je izvršeno na uzorku s južne strane (Slika 22).



Slika 22– Merenje širine prstena prirasta i kasne zone na drvetu crvenog hrasta pomoću mikroskopa (Digital Microscope with stand INSIZE)

5.4.1.3 Procentualni odnos rane i kasne zone

Procentualni odnos rane i kasne zone izračunate su iz rezultata merenja širine prstena, gde je ujedno merena i širina kasne zone, jednostavnom formulom:

$$Kz (\%) = \frac{Kz}{Dp} * 100$$

gde je :

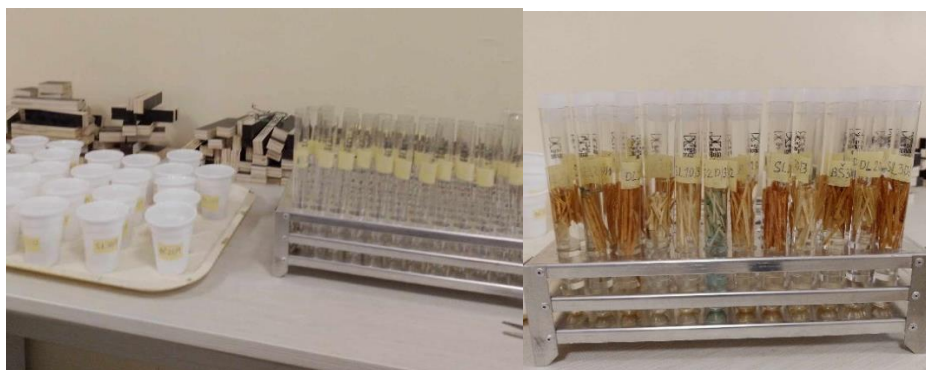
Kz širina kasne zone, a Dp širina prstena prirasta u mm.

5.4.1.4 Dužina drvnih vlakana (libriforma) i broj drvnih vlakana po jedinici površine (mm²)

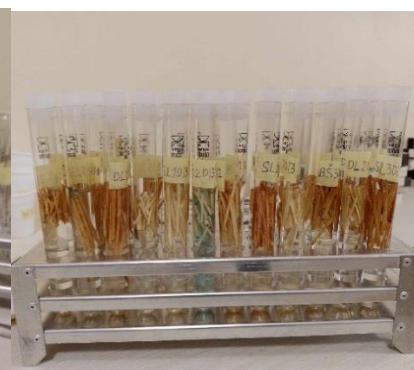
Za ispitivanje osnovnih anatomskih svojstava (dužina vlakana i debljina ćelijskog zida) sa svakog kotura, odsečeni su uzorci iz tri zone – beljike, zrelog drveta i juvenilnog dela. Uzorci su isečeni nožem i čekićem na dimenzije čačkalice (slika 23), a zatim je izvršena maceracija – uzorci su potopljeni u mešavinu 30% vodonik-peroksida i glacijalne sirćetne kiseline (1:1) (Slike 24 i 25).



Slika 23 – Mehanička priprema uzoraka crvenog hrasta za proces maceracije



Slika 24 – Hemijska priprema uzoraka za proces maceracije

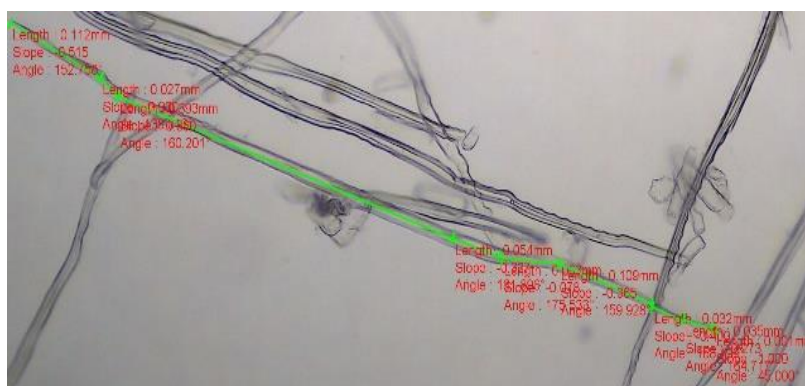


Slika 25 – Proces maceracije

Nakon 48h provedenih u pećnici, na 65 °C (Franklin 1964 modifikovana metoda), uzorci su isprani destilovanom vodom, dok se pojedinačna vlakna drveta nisu odvojila. Dužina vlakana je zatim merena na mikroskopu *Insize* pomoću softvera *ISM PRO* (Slika 26 i 27). Izmereno je po 30 vlakana sa svakog uzorka što je ukupno 810 vlakana.

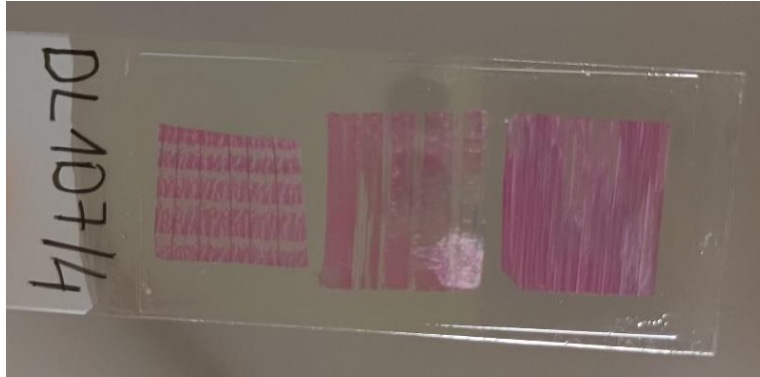


Slika 26 - Drvno vlakno pod mikroskopskim sočivom uvećanja 40x



Slika 27 – Podaci o dužini drvnog vlakna crvenog hrasta

Utvrđivanje broja mehaničkih elemenata po jedinici površine vršeno je na uzorcima iz svakog stabla. Uzorci su pripremljeni tako da su jasno definisana sva tri anatomska pravca – aksijalni, radijalni i tangencijalni. Preparati su izrađeni u laboratoriji Šumarskog fakulteta u Ljubljani (Slike 28 i 29).



Slika 28 – preparati za mikroskopsku analizu anatomskih svojstava analizu



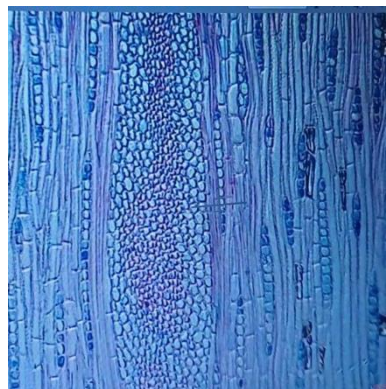
Slika 29 – preparati za mikroskopsku

Broj drvnih vlakana po jedinici površine meren je na ukupno 19 različitih uzoraka – 7 iz Bruskih šuma, 6 iz Debelog luga i 6 iz Stepinog luga. Iz svakog od po tri ispitivana stabla po lokalitetu uzeto je po dva uzorka sa različitog mesta. Brojena su drvena vlakna u kasnoj zoni drveta.

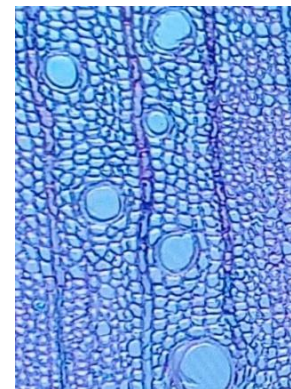
Preparati su pregledani na mikroskopu (BioBlue) proizvođača Eurowax (Slika 30) u laboratoriji Šumarskog fakulteta, Katedre za primarnu preradu drveta, u Beogradu. Brojanje drvnih vlakana vršeno je na po 1 mm² svakog uzorka, pomoću softwera kojim su snimljene i fotografije uvećanjem od 40 puta. Na slikama 31 i 32 su snimci poprečnih preseka drvnih vlakana i traheja.



Slika 30 – mikroskop



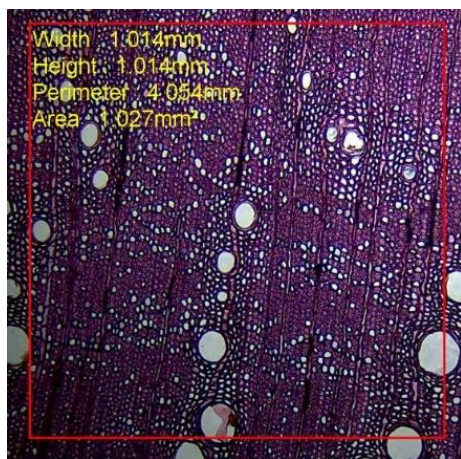
Slika 31 – tangencijalni presek drveta pod mikroskopom



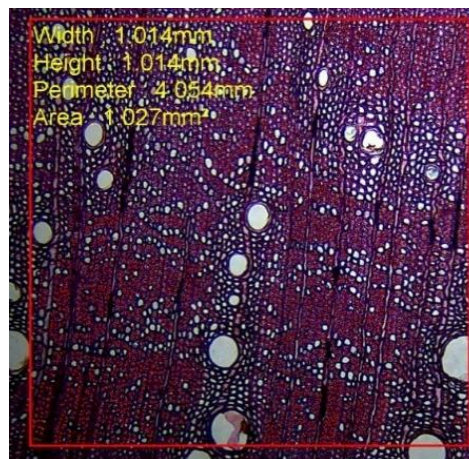
Slika 32 – aksijalni presek

Na slici 32 se jasno vidi granica između rane i kasne zone drveta, kao i krupni provodni elementi traheja. Okolo traheja prostiru se ćelije paratrahealnog parenhima. U kasnoj zoni, traheje

su sitnije, ima mnogo više drvnih vlakana a manje parenhimskih ćelija – crvene tačkice su obeležena vlakna koje softver broji automatski (slika 33 i 34)



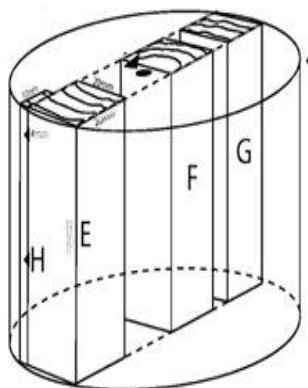
Slika 33 – vlakna drveta pre brojanja



Slika 34 – vlakna drveta posle brojanja

5.4.2 Određivanje fizičkih i mehaničkih svojstava drveta

Posle sušenja, iz obrađenih dasaka su iskrojani uzorci (Slike 35, 36 i 37) za dalje analize fizičkih i mehaničkih svojstava (SRPS ISO 13061). Iz radijalnih dasaka je izrezano ukupno 600 uzoraka dimenzija 20 x 20 x 320 mm, koji su grupisani prema visini stabla i anatomskom pravcu (Slika 36). Pre testiranja, svi uzorci su kondicionirani, tri nedelje, na $21 \pm 2^\circ\text{C}$ i relativnoj vlažnosti od $65 \pm 5\%$ do uspostavljanja konstantne mase. Iz uzoraka, na kojima je izmerena savojna čvrstoća i modul elastičnosti pri savijanju, izrezani su uzorci dimenzija na 20 x 20 x 40 mm (slika) na kojim je određena vlažnost, gustina drveta i čvrstoća na pritisak paralelno sa vlakancima.



Slika 35 – šema krojenja uzraka



Slika 36 – proces izrezivanja uzoraka u laboratoriji



Slika 37 – Izrezani uzorci za određivanje mehaničkih svojstava

5.4.2.1 Utvrđivanje osnovnih fizičkih svojstava drveta

Posle merenja mase i dimenzija u sva tri anatomsko pravca, uzorci su sušeni u laboratorijskoj sušnici na $103 \pm 2^\circ\text{C}$ do postizanja konstantne mase. Posle ponovnog merenja mase i dimenzija na uzorcima je određena gustina drveta u apsolutno suvom stanju vlažnosti (ρ_0) prema sledećem (SRPS ISO 13061-2):

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0} [\text{g}/\text{cm}^3];$$

gde je: m_0 masa uzorka pri 0% sadržaja vlage u drvetu (g) i, V_0 je zapremina uzorka pri 0% sadržaja vlage u drvetu (cm^3).

5.4.2.2 Utvrđivanje osnovnih mehaničkih svojstava drveta (čvrstoća na savijanje, modul elastičnosti pri savijanju, pritisna čvrstoća paralelno sa vlakancima)

Posle kondicioniranja na vlažnost od oko 12%, savojna čvrstoća (*eng. modulus of rupture* – MOR) i modul elastičnosti pri savijanju (*eng. modulus of elasticity* - MOE) izmereni su na ukupno 602 uzorka sa sva tri lokaliteta.

U ovom istraživanju, mehanička svojstva su ispitana na VT4 – Universal Wood Testing Machine. Određeni su čvrstoća na savijanje i modul elastičnosti pri savijanju (three-point bending test) prema standardu SRPS EN 408:2014.

Brzina opterećenja tokom merenja bila je konstantna i iznosila je 2 mm/min, što je u skladu sa preporukama za ispitivanje drveta pri kontroli deformacija. Sila je primenjivana kontinuirano do momenta loma, dok su deformacije registrovane u realnom vremenu putem sistema senzora visokog stepena preciznosti. Uzorci su prethodno kondicionirani do postizanja stabilne sadržine vlage, u skladu sa laboratorijskim uslovima, kako bi svi rezultati mogli biti izraženi u standardizovanom režimu za uporedivost sa literaturnim podacima. Dobijeni podaci predstavljaju osnovu za evaluaciju fizičko-mehaničkih karakteristika drveta crvenog hrasta i upoređivanje sa vrednostima dobijenim pomoću fraktometra i akustične tomografije (Slika 38). Posle merenja savojnih svojstava (Slika 39) izrezani su uzorci dimenzija na 20 x 20 x 40 mm (Slika 40), na kojim je određena vlažnost, gustina drveta i čvrstoća na pritisak paralelno sa vlakancima, savojna čvrstoća, MOE i MOR.

Tabela 3 - Broj uzoraka po lokalitetu i delu stabla za svako svojstvo

Lokalitet	Deo stabla	Gustina (g/mm ³)	MOE (MPa)	MOR (Mpa)	Pritisna čvrstoća (Mpa)	Savojna čvrstoća (Mpa)
Bruske šume	gornji	53	49	49	39	53
	donji	32	28	28	21	32
Debeli lug	gornji	135	132	132	132	135
	donji	172	160	160	160	172
Stepin lug	gornji	99	98	98	98	99
	donji	138	135	135	135	138
Ukupno		629	602	602	585	629

Ukupno je za Bruske šume obrađeno 85 uzoraka gustine, 77 MOE, 77 MOR, 60 pritisne i 85 savojne čvrstoće. Za Debeli lug je obezbeđeno 307 uzoraka gustine, dok je za Stepin lug 237 uzoraka gustine. Ukupno, u svim lokalitetima analizirano je 629 uzoraka gustine, 602 MOE, 602

MOR, 585 pritiskne i 629 savojne čvrstoće. Od toga je u gornjim delovima stabala 287 uzoraka gustine, dok je u donjim 342.



Slika 38 – uređaj za merenje savojne i pritiskne čvrstoće



Slika 39 – uzorci za savijanje



Slika 40 – uzorci za pritisak

Čvrstoća na pritisak paralelno sa vlakancima je dobijena pomoću sledeće formule:

$$\sigma_p = \frac{F_p}{A} \text{ [MPa]}$$

gde je: F_p – sila koja je prouzrokovala lom (N), a

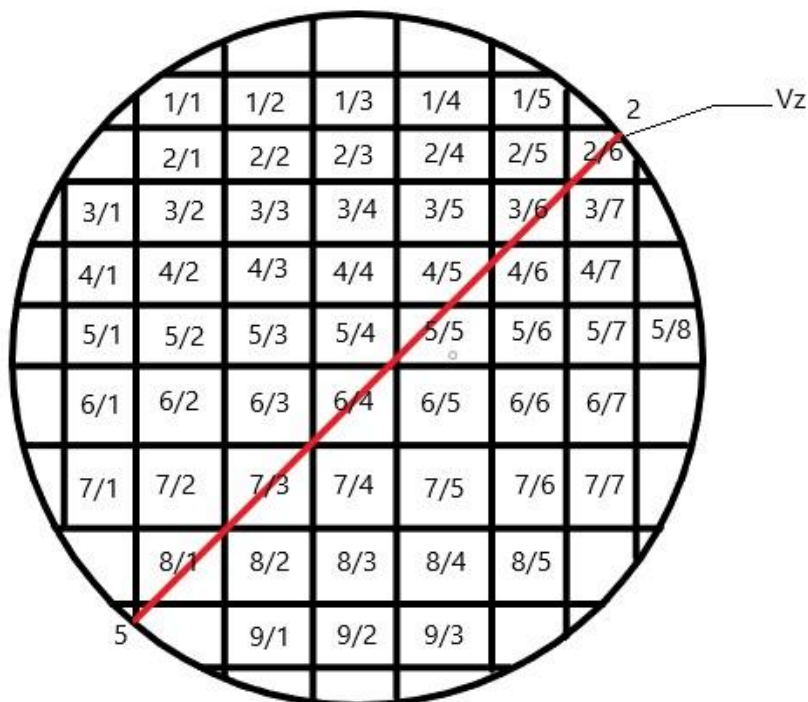
A - površina na koju je sila delovala (mm^2).

5.5 Statistička obrada podataka, statističko modelovanje i validacije dobijenih modela

Rezultati merenja osnovnih anatomskih i fiziko-mehaničkih svojstava su obrađeni primenom deskriptivnih i univarijantnih statističkih metoda. Deskriptivna statistička analiza je obuhvatila određivanje sledećih statističkih parametara: veličina uzorka (broj merenja), srednja vrednost (\bar{X}), standardna devijacija (SD), koeficijent varijacije (CV, %), minimalna vrednost (MIN), maksimalna vrednost (MAX) i raspon vrednosti. Značajnost statističkih razlika između srednjih vrednosti na različitim lokalitetima, i u okviru istog lokaliteta (po stablima), ustanovljena je analizom varijanse (ANOVA) i *post hoc* Fišerovim testom najmanjih značajnih razlika (LSD),

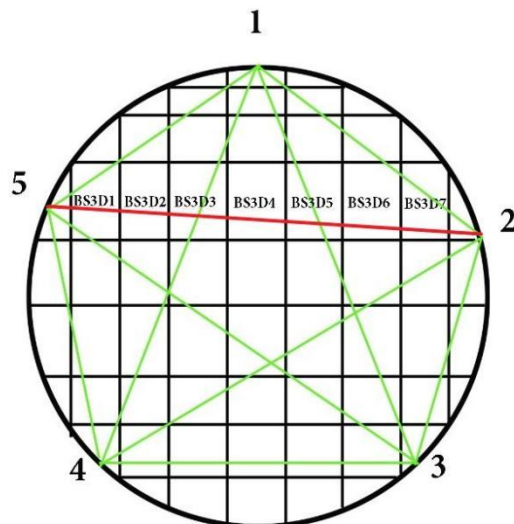
ili primenom Studentovog t-testa (za srednje vrednosti po trupčicu). Analizama je prethodila provera normalnosti raspodele podataka. U slučaju promenljivih čiji su podaci odstupali od normalne raspodele, iz analize su isključene vangranične vrednosti koje su rezultat tehničkih grešaka i nedostataka u kvalitetu drveta; u ostalim slučajevima, podaci su podvrgnuti transformaciji podataka prema Box i Cox (1964).

Za analizu korelacije između svojstava drveta i brzine zvuka uzete su srednje vrednosti svojstava svih uzoraka kroz koje je zvučni talas prošao (slika 41), kao i brzina zvuka između pojedinačnih senzora. Veoma je važno istaći da nije uzet u obzir ugao talasa u odnosu na površinu drveta, već je istaknuto da poprečni presek uzoraka drveta bude anatomski i geometrijski ispravan, tj. da imamo što definisane anatomske pravce na poprečnom preseku. Isto tako, prilikom analize uzeta je u obzir i činjenica da ne postoji značajna razlika između brzine zvuka u radijalnom i tangencijalnom smeru (uzete su u obzir boja i njena srednja vrednost na skali tomograma). Uzorci kroz koje je prošao talas obeležen istom bojom, grupisani su u odnosu na srednje brzine određene pomoću boje. Korišćena je srednja vrednost njihovih anatomskih i mehaničkih svojstava za poređenje sa srednjim vrednostima brzina za tu grupu uzoraka.



Slika 41 - Prolazak zvučnog talasa kroz uzorke drveta

Na konkretnom primeru, zvučni talas između senzora 2 i 5, obeležen crvenom bojom prošao je kroz uzorke 2/6, 3/6, 4/6, 4/5, 5/5, 6/4, 7/3 i 8/1. Za poređenje i izradu modela korišćena je brzina zvuka izmerena između senzora 2 i 5 (V_z) i srednja vrednost svih pojedinačnih izmerenih fizičkih i mehaničkih svojstava ove grupe uzoraka. Za dužinu vlakana i procentualno učešće kasne zone, uzete su srednje vrednosti grupa uzoraka za koje je ova analiza rađena, iz juvenilne i zrele zone stabla. Srednja brzina zvuka u stablu predstavlja aritmetičku sredinu brzina koje su izmerene između parova senzora akustičnog tomografa postavljenih oko obima stabla. Dobija se tako što se zbir svih izmerenih brzina podeli sa ukupnim brojem parova senzora. Na ovaj način se eliminišu ekstremne vrednosti pojedinačnih merenja i dobija reprezentativna vrednost za ceo presek stabla.



Slika 42 – Prolazak zvučnog talasa kroz uzorke drveta Bruske šume

Na slici 42 prikazan je primer stabla sa lokaliteta Bruske šume. U ovom slučaju, talas prolazi kroz celu dasku broj 3 te je za analizu modela uzeta srednja vrednost svih uzoraka izrezanih iz daske broj 3 i brzina zvuka između senzora 2 i 5.

Brzina zvučnih talasa poređena je sa prethodno izmerenim vrednostima dužine vlakana, procentualnim učešćem kasne zone, gustine drveta, modula elastičnosti i modula loma kao i pritiskne čvrstoće. Ova anatomska, fizička i mehanička svojstva korišćena su u analizi moguće procene kvaliteta drveta na osnovu brzine zvuka, zato što po brojnim autorima predstavljaju pokazatelje kvaliteta drveta. (Zink-Sharp, 2003; Arriaga *et al.*, 2023; Christoforo, 2024; Nowak *et al.*, 2024).

Za poređenje svojstava drveta utvrđenih standardnim destruktivnim metodama (WD, Hp, MOR, MOE, Lv, Pkz) i onih utvrđenih primenom fraktometra (σ_F , σ_S , Ba F) i akustičnog tomografa (Vsr), dobijeni numerički podaci obrađeni su deskriptivnim i multivarijantnim statističkim analizama. Pre izvođenja analize višestruke regresije, varijable su testirane na normalnost i kolinearnost, čime je utvrđeno da je za dalju obradu podataka moguće primeniti

multivarijantne metode (bez transformacije podataka). Odnos između svojstava drveta dobijenog standardnom destruktivnom metodom i vrednosti utvrđenih fraktometrom i akustičnim tomografom identifikovan je korišćenjem Pirsonovog testa linearne korelacije. U skladu sa literaturom (Kelley *et al.*, 2004; Kristian 2009; Ozcan & Korkmaz 2019; Nowak *et al.*, 2021; Arriaga *et al.*, 2023;) jakom korelacijom smatrani su Piersonovi koeficijenti u opsegu 0,70–0,99, umerenom 0,30–0,69, a slabom korelacijom smatrani su koeficijenti sa vrednostima nižim od 0,30. Da bi se generisali prediktivni modeli na nivou uzorka za WD, Hp, MOR, MOE, Lv i Pkz na osnovu σ_F , $\sigma_{F, Ba}$ i V_{sr} , njihov odnos je analiziran metodom *stepwise* višestruke regresije (sa isključenom konstantom) prema metodologiji koju su razvili Toong *et al.*, (2014). Statistički modeli su uspostavljeni na osnovu merenih podataka dobijenih iz 164 uzorka uzeta sa devet stabala, na dve visine i iz četiri kardinalna pravca. Radi testiranja, modeli su korišćeni za izračunavanje svojstava drveta i predviđene vrednosti su korelisane s vrednostima svojstava drveta zabeleženim na 54 uzorka, koristeći Pirsonov test linearne korelacije. Koeficijent determinacije (R^2), standardna greška predviđanja (SEP) i predviđanje odstupanja (RPD) su izračunati i korišćeni za poređenje modela. Sve statističke analize su izvedene korišćenjem računarskog programa Statgraphics Centurion, ver. XVI.I. (2009; Statpoint Technologies, Inc., Varenton, Virdžinija, SAD). Uzimajući u obzir da se predviđanje vrši na nivou stabla, njihov broj je dovoljan da modeli imaju široke intervale pouzdanosti za primenu na druga stabla ili lokalitete. Takođe, broj uzoraka (sa dve visine stabla) omogućava da se utvrdi koja se svojstva drveta mogu pouzdano proceniti pomoću nedestruktivne odnosno poludestruktivne metode. Utvrđena heterogenost unutar i između stabala odnosno lokaliteta može biti korisna jer pokriva širok spektar uslova i dovoljna je da obezbedi međustabalnu varijabilnost i preoniosovost rezultata.

Procena statističkih modela je urađena na osnovu RPD, a preporuke za klasifikaciju su preuzete od Schimleck *et al.*, (2001) i Sandak *et al.*, (2016b). Formirane su tri grupe za klasifikaciju modela: preliminarni skrining, $1,5 \leq RPD \leq 2,0$; skrining, $2,0 < RPD \leq 5,0$; i kontrola kvaliteta, $5,0 < RPD \leq 8,0$.

RPD - odnos performansi prema devijaciji:

$$RPD = \frac{SD}{SEP}$$

Gde je :

SD – standardna devijacija vrednosti dobijenih pomoću modela,

SEP – standardna greška predviđanja:

$$SEP = \sqrt{\frac{(x_2 - x_1)^2}{N - 1}}$$

Gde je:

x_2 – vrednost dobijena laboratorijski,

x_1 – vrednost dobijena pomoću modela,

N – broj uzoraka u validacionoj grupi.

RPIQ - Odnos performansi prema interkvartilnom opsegu:

Za procenu tačnosti prediktivnog modela koristi se rezidualni prediktivni interkvartilni opseg (RPIQ). Ova statistička mera omogućava evaluaciju kvaliteta modela u situacijama sa malom varijacijom podataka, oslanjajući se na raspodelu podataka umesto prosečne greške. RPIQ

vrednosti ispod 1.5 označavaju loš model koji nije pogodan za pouzdane predikcije, dok vrednosti između 1.5 i 2.0 ukazuju na prihvatljiv model koji može poslužiti za grubu procenu. Ako se RPIQ kreće između 2.0 i 2.5, model se smatra dobrim i koristan je za približne predikcije, dok vrednosti između 2.5 i 3.0 označavaju vrlo dobar model sa značajnom prediktivnom moći. Kada RPIQ premaši 3.0, model se klasifikuje kao odličan, sposoban za precizne i pouzdane predikcije (Bellon-Maurel et al. 2010).

RPIQ se računa kao odnos između interkvartilnog opsega (IQR) i standardne greške predviđanja (RMSE):

$$\text{RPIQ} = \frac{\text{IQR}}{\text{RMSE}}$$

Gde je:

IQR – interkvartilni opseg, koji opisuje raspon između trećeg (Q3) i prvog kvartila (Q1) podataka:

$$\text{IQR} = \text{Q3} - \text{Q1}$$

RMSE – Koristi se za procenu prosečnog odstupanja prediktivnih vrednosti od stvarnih laboratorijskih podataka:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (y - y_1)^2}$$

Ova metoda obezbeđuje robustnu procenu performansi modela, jer je manje osetljiva na ekstremne vrednosti u skupu podataka. Dodatno, omogućava standardizovanu procenu i upoređivanje modela koji koriste različite skupove podataka.

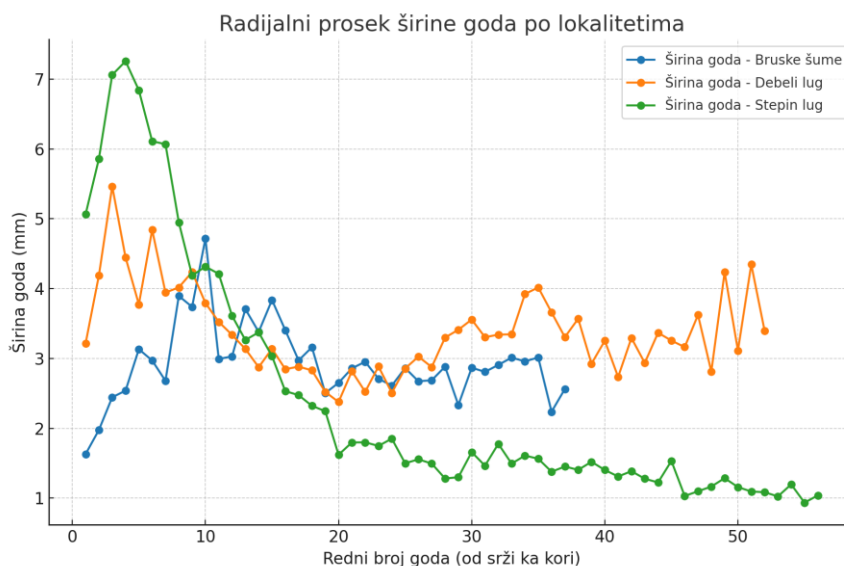
6. REZULTATI ISTRAŽIVANJA I NJIHOVA DISKUSIJA

6.1. Analiza makroskopskih i mikroskopskih svojstava drveta crvenog hrasta

6.1.1 Analiza širine prstena prirasta

Vrednosti širine prstena prirasta za stabla iz Bruskih šuma kreće su se od 0,43 do 6,62 mm sa srednjom vrednošću od 2,95 mm i koeficijentom varijacije 50,61%. Srednja vrednost prstenova prirasta ima slične vrednosti u gornjim i donjim delovima stabala tako da se može konstatovati da je dužinom debla uglavnom konstantna. Na graficima (Prilog 1, 2, i 3) se može videti promena širine prstenova od srži ka kori na obe posmatrane visine a u tabelama (Prilog 1,2,3 tabele 1-6) rezultati deskriptivne statistike za širine prstena prirasta juvenilnog i zrllog dela drveta na svim lokalitetima.

Na slici 43 dat je radijalni profil širine goda (*Quercus rubra* L.), dobijen na osnovu prosečnih vrednosti za tri lokaliteta (Bruske šume, Stepin lug i Debeli lug).



Slika 43 – radijalni profil širine goda po lokalitetima

Na grafikonu (slika 43) su prikazane promene širine goda po radijusu stabla za tri lokaliteta. Debeli lug se izdvaja sa najvećim prosečnim vrednostima, stabilnijim tokom i širim prstenovima, što ukazuje na povoljnije stanišne uslove. Bruske šume beleže najuže prstenove, dok Stepin lug zauzima srednji položaj, sa umerenim vrednostima i oscilacijama koje ukazuju na heterogenost staništa. Dobijeni obrasci potvrđuju da lokalitet ima ključnu ulogu u formiranju prirasta.

Rezultati analize radijalnog profila širine goda i procenta kasne zone kod crvenog hrasta pokazuju vrednosti koje se u velikoj meri uklapaju u literaturne okvire, ali i značajne razlike među lokalitetima. Dobijeni podaci potvrđuju opšte zakonitosti rasta ove vrste, pri čemu širina prstena raste od srži ka sredini radijusa, a zatim se smanjuje prema kori, dok procenat kasne zone održava stabilnije vrednosti, uz lokalne varijacije. Ovakvi obrasci u saglasnosti su sa nalazima Genet *et al.* (2013), Uzcategui *et al.* (2020) i Živanović *et al.* (2022), koji navode da *Q. rubra* pokazuje izraženu varijabilnost u zavisnosti od starosti stabla i ekoloških uslova.

Upoređivanjem dobijenih vrednosti sa literaturom može se zaključiti da crveni hrast u Srbiji ostvaruje prosečne širine prstenova nešto niže nego u prirodnom arealu, ali sa većom varijabilnošću (Živanović *et al.* 2022). U Debelom lugu rezultati se uklapaju u opseg naveden od strane Uzcategui *et al.* (2020), dok Stepin lug pokazuje odstupanja ka nižim vrednostima usled urbanog stresa. Bruske šume se odlikuju umerenim vrednostima i ukazuju na srednje povoljne uslove. Ovime je potvrđeno da stanišni faktori snažno oblikuju radijalne obrasce rasta kod *Q. rubra*. Analizirani radijalni profil jasno pokazuje tipičnu dinamiku – širenje prstenova u juvenilnoj fazi, maksimalne vrednosti u srednjem dobu i sužavanje ka kori, uz varijacije u udelu kasne zone. Takav obrazac već je zabeležen i kod drugih vrsta hrastova, uključujući *Q. robur*, *Q. petraea* i *Q. garryana* (Lei *et al.* 1996; Vavrčik & Gric, 2012), što dodatno potvrđuje pouzdanost rezultata ovog istraživanja.

Na kraju, radijalni profil širine goda kod crvenog hrasta pokazuje da ova vrsta u uslovima Srbije zadržava osnovne zakonitosti razvoja, uz jasne razlike među lokalitetima. Debeli lug se ističe najpovoljnijim uslovima rasta, Stepin lug beleži ograničen razvoj usled urbanog stresa, dok Bruske šume zauzimaju međupoložaj. Dobijeni rezultati potvrđuju važnost stanišnih faktora u proceni kvaliteta drveta i predstavljaju osnovu za dalje poređenje sa domaćim i introdukovanim vrstama hrastova.

Tabela 4 prikazuje prosečne vrednosti, standardne devijacije, koeficijente varijacije, kao i minimalne i maksimalne vrednosti širine prstenova prirasta. Podaci su analizirani posebno za juvenilnu i zrele zonu drveta na tri lokaliteta (Bruske šume, Debeli lug i Stepin lug), kako bi se jasnije sagledale razlike u prirastu između različitih razvojnih faza i stanišnih uslova. Izdvojeno posmatranje ovih zona omogućava bolje razumevanje dinamike rasta – od juvenilne faze, u kojoj prstenovi pokazuju veću širinu i veću varijabilnost, do zrelog drveta, gde se prosečne vrednosti smanjuju, a stabilnost prirasta postaje izraženija.

Tabela 4. Deskriptivna statistika za širinu prstenova prirasta (mm) u juvenilnom i zreлом drvetu crvenog hrasta na tri lokaliteta

Lokalitet	Bruske šume		Debeli Lug		Stepin lug	
	Juvenilna zona	Zrelo drvo	Juvenilna zona	Zrelo drvo	Juvenilna zona	Zrelo drvo
\bar{X}	3,11	2,86	4,11	3,11	5,60	1,68
SD	1,33	0,93	1,30	0,96	1,90	0,88
CV (%)	42,76	32,44	31,53	30,92	33,87	52,37
MIN	0,43	0,70	1,41	1,20	2,78	0,48
MAX	6,62	5,36	7,58	6,56	11,25	5,49
opseg	6,19	4,66	6,17	5,36	8,48	5,01

Rezultati prikazani u tabeli 4 jasno potvrđuju da postoje značajne razlike u širini prstenova prirasta između juvenilne i zrele zone kod crvenog hrasta na sva tri analizirana lokaliteta. Ove razlike su u skladu sa poznatim obrascima razvoja drveta – juvenilna zona obično pokazuje šire prstenove i izraženiju varijabilnost, dok zrele zone karakteriše stabilniji, ali užiji prirast.

U Bruskim šumama izmerene su najmanje vrednosti prosečne širine prstena: 3,11 mm u juvenilnoj zoni i 2,86 mm u zreloj zoni, što predstavlja najniže srednje vrednosti među sva tri lokaliteta. Na ovom lokalitetu prstenovi prirasta pokazuju relativno niske vrednosti, sa umerenim varijacijama, što ukazuje na ograničene stanišne uslove i slabiji porast u odnosu na Debeli lug i Stepin lug. Iako su vrednosti niže, one se ipak nalaze unutar raspona zabeleženog u literaturi za crveni hrast, ali bliže donjoj granici, što potvrđuje da lokalni ekološki faktori značajno oblikuju radijalni prirast (Prilog 1 tabele 1 i 2).

Na lokalitetu Debeli lug vrednosti su znatno povoljnije i ujednačenije. U juvenilnoj zoni prosečna širina prstena je 4,11 mm, a u zreloj 3,11 mm, uz relativno stabilan koeficijent varijacije (oko 31%). Ovakvi rezultati ukazuju na povoljne uslove rasta, jer se prosečne vrednosti održavaju visoke i u zreloj fazi, što nije slučaj u Stepinom lugu. Ujedno, vrednosti iz Debelog luga u velikoj meri se uklapaju u rezultate Živanović *et al.*, (2022) iz Lipovičke šume kod Beograda, gde je prosečna širina prstena crvenog hrasta bila 3,49 mm, u rasponu od 0,44 do 9,38 mm. Dakle, Debeli lug pokazuje stabilniji i ravnomerniji porast u odnosu na Stepin lug, ali sa nešto višim vrednostima nego u Bruskim šumama (Prilog 2 tabele 3 i 4).

Na lokalitetu Stepin lug uočene su najizraženije razlike: prosečna širina prstena u juvenilnoj zoni iznosi 5,60 mm, dok je u zreloj zoni svega 1,68 mm. Ova disproportcija jasno ukazuje na tipičan juvenilni porast u prvim decenijama života stabala, dok su u zreloj fazi uslovi rasta u urbanom okruženju, uz prisutne stresne faktore (zagađenje, manja dostupnost vlage, antropogeni uticaji), doveli do značajnog suženja prstenova. Pritom, koeficijent varijacije u zreloj zoni Stepinog luga (52,37%) pokazuje vrlo izraženu heterogenost između stabala i trupčica, što se ne vidi u ovom stepenu na druga dva lokaliteta. U poređenju sa literaturnim podacima, rezultati iz Stepinog luga odstupaju od nalaza Genet *et al.*, (2013), gde su prstenovi crvenog hrasta u

Francuskoj imali prosečnu širinu od 4,4 mm (raspon 2,8–7,1 mm), sa umerenim varijacijama koje su odražavale stabilnije stanišne uslove. Još veća razlika uočava se u poređenju sa istraživanjem Uzcategui *et al.*, (2020), gde su u autohtonom arealu crvenog hrasta u Severnoj Americi prosečne širine iznosile 7,3 mm, sa maksimalnim vrednostima i do 18,5 mm. Stepin lug, sa vrednostima od 0,48 do 11,25 mm, potvrđuje koliko nepovoljni stanišni uslovi mogu uticati na smanjenje i veliku varijabilnost rasta (Prilog 3 tabele 5 i 6).

Rezultati ovog istraživanja su u velikoj meri usklađeni sa relevantnim podacima iz literature, potvrđujući da širina godišnjeg prirasta crvenog hrasta zavisi od starosti stabla i uslova staništa. Genet *et al.*, (2013) su zabeležili prosečne vrednosti širine prstena od 4,4 mm, s rasponom od 2,8 do 7,1 mm. Autori su pokazali da se širina prstenova povećava sa starošću do sredine životnog ciklusa stabla, nakon čega dolazi do opadanja. Ovaj obrazac je potvrđen i u našem istraživanju, gde su najuži prstenovi zabeleženi u blizini srži, dok su najveće vrednosti zabeležene u srednjim delovima preseka, što ukazuje na tipičan tok akumulacije biomase tokom juvenilne i srednje faze razvoja stabla.

Uzcategui *et al.*, (2020) su u autohtonom staništu crvenog hrasta u Severnoj Americi utvrdili prosečnu širinu prstena od 7,30 mm (raspon 1,10–18,50 mm), uz koeficijent varijacije od 48,52%. Maksimalne vrednosti u tom istraživanju bile su znatno više nego u ovom radu, što je i očekivano s obzirom na to da stabla u prirodnim staništima crvenog hrasta uživaju optimalne ekološke uslove i ostvaruju intenzivniji prirast. Nasuprot tome, na lokalitetu Stepin lug u ovom istraživanju zabeležene su znatno niže vrednosti (0,48–11,25 mm; prosek 2,48 mm; CV 79,05%), što ukazuje na ograničene uslove rasta i izraženu varijabilnost. Ovo jasno pokazuje koliko stanišni faktori (kvalitet zemljišta, vlaga, nadmorska visina) utiču na širinu prstena. Trend promene širine prstenova prirasta od srži ka kori uobičajeno prati obrazac povećanja u početnim fazama rasta

stabla, sve do dostizanja maksimalnih vrednosti u centralnom delu debla, nakon čega dolazi do postepenog smanjenja širine prstenova ka beljici i kori. Ovaj obrazac je posledica fizioloških karakteristika drveta: u juvenilnoj zoni prstenovi su uži i nestabilniji, u srednjem delu stabla dolazi do stabilizacije i maksimalnog prirasta, dok u zoni zrelog drveta i beljike nastaje smanjenje širine prstenova usled starosti stabla i kompeticije za resurse. Slične tendencije uočili su Genet *et al.* (2013), koji su kod crvenog hrasta registrovali najšire prstenove u srednjem delu debla, kao i Lei *et al.* (1996) kod vrste *Quercus garryana*, gde se širina prstenova povećavala prvih 10–20 godina, a potom opadala ka zoni zrelog drveta.

Živanović *et al.*, (2022) su u Lipovičkoj šumi blizu Beograda izmerili prosečnu širinu prstena crvenog hrasta od 3,49 mm, sa rasponom od 0,44 do 9,38 mm. Ovi rezultati se lepo uklapaju sa onima iz Debelog luga i Bruskih šuma u ovom istraživanju, potvrđujući da crveni hrast u Srbiji dostiže prosečne vrednosti koje su malo niže od onih u autohtonim staništima, ali su i dalje unutar poznatih literarnih opsega. Takođe, primećena je veća varijabilnost u Srbiji, što se poklapa sa činjenicom da introdukovane populacije prolaze kroz proces adaptacije i jače reaguju na lokalne uslove.

Podaci iz literature o drugim vrstama hrastova dodatno objašnjavaju ove razlike. Petrović *et al.*, (2016) navode da je kod kitnjaka u Republici Srpskoj prosečna širina prstena 1,62 mm, uz koeficijent varijacije od 45,76%, dok su Roibu *et al.*, (2020) kod lužnjaka u Moldaviji izmerili prosečnu vrednost od $2,98 \pm 1,61$ mm. U poređenju sa ovim vrstama, crveni hrast u Srbiji pokazuje nešto veći prosečan prirast, ali i izraženiju varijabilnost. Kada je reč o belom hrastu (*Quercus alba*), Uzcategui *et al.*, (2020) su utvrdili prosečnu širinu prstena od 9,6 mm, sa rasponom od 1,3 do 23,9 mm i CV od 46,22%, što ukazuje na još jači prirast u optimalnim staništima. Lei *et al.* (1996) su za *Q. garryana* iz Oregona zabeležili veće širine u mladim stablima ($2,5 \pm 0,8$ mm) u

poređenju sa zrelim stablima ($1,2 \pm 0,6$ mm), uz zanimljivo zapažanje da je koeficijent varijacije bio manji kod juvenilnog drveta (32%) nego kod zrelog (50%). Ovo je u suprotnosti sa tendencijom primećenom kod crvenog hrasta u ovom radu, gde je upravo juvenilna zona pokazala veću varijabilnost, što ukazuje na specifičnosti razvoja u introdukovanim staništima.

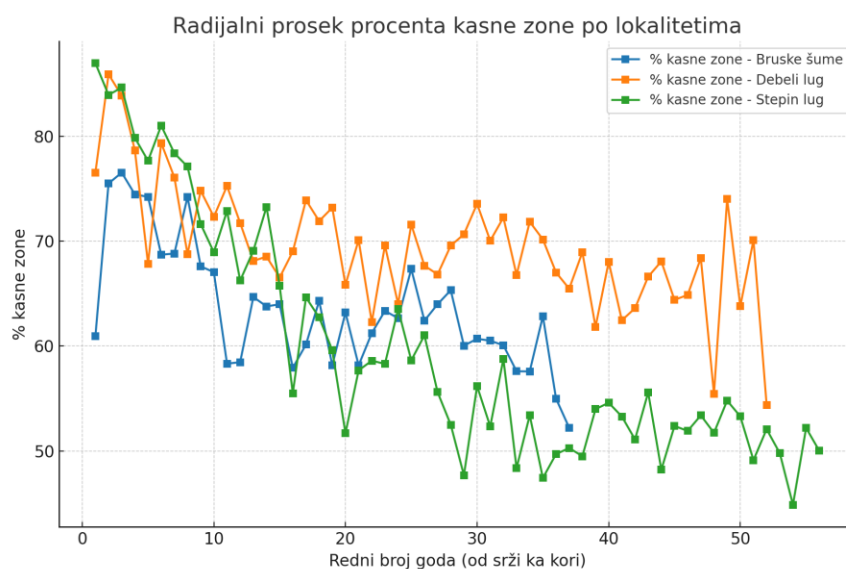
Sličan obrazac smanjenja prirasta sa starošću potvrđuju i starija istraživanja – Gursu (1966) je kod hrasta u Turskoj izmerio prosečnu širinu od 1,58 mm za stabla stara 97–156 godina, dok su starija stabla (186–247 godina) imala prosečno svega 0,80 mm. Ovi nalazi podržavaju zaključak da starost stabala značajno utiče na smanjenje širine prstena, a da stanišni uslovi dodatno modifikuju ovaj obrazac.

Posmatrano u celini, vrednosti dobijene u ovom istraživanju uklapaju se u poznate literaturne opsege, i potvrđuju da crveni hrast u Srbiji zadržava opšti obrazac dinamike prirasta – širi prstenovi u juvenilnom i srednjem delu stabla, a uži u kasnijim fazama. Međutim, izraženija varijabilnost i nešto niže prosečne vrednosti ukazuju na to da ekološki uslovi u introdukovanim populacijama značajno oblikuju njegov rast. Upoređivanje sa autohtonim vrstama hrastova, ali i sa četinara, pokazuje da se kod crvenog hrasta izdvajaju specifičnosti koje ga čine konkurentnim, ali i zahtevnim za precizno modeliranje i planiranje gazdovanja. Time se otvara prostor za dalje istraživanje uticaja staništa na kvalitet i prirast drveta crvenog hrasta, što ima praktičan značaj u kontekstu šumske privrede i drvne industrije.

6.1.2 Procentualni udeo rane i kasne zone

U Bruskim šumama srednja vrednost učešća zone kasnog drveta iznosi 63,34% i ima opseg 24,87–91,16%, sa koeficijentom varijacije 19,99%. Najnižu srednju vrednost procentualnog učešća kasne zone ima gornji trupčić stabla broj 3 i ono iznosi 61,15% a najvišu donji trupčić

stabla broj 2 od 68,09%. (Prilog 4 tabela 7). U Debelom lugu srednja vrednost učešća kasne zone u prstenu prirasta iznosi 67,71%, sa opsegom od 30,12% do 96,06%, i koeficijentom varijacije od 9,34%. Najnižu prosečnu vrednost pokazuje gornji trupčić stabla broj 1 (60,88%), dok je najvišu imao gornji trupčić stabla broj 2 (72,84%). Ovakvi rezultati ukazuju na relativno stabilne uslove rasta i manju varijabilnost u odnosu na Stepin lug. (Prilog 5 tabela 8). Na lokalitetu Stepin lug, prosečno učešće kasne zone u prstenu prirasta iznosi 53,44%, uz opseg od 20,83% do 81,80%, i koeficijent varijacije od 12,04%, što ukazuje na izraženu heterogenost između stabala. Najnižu prosečnu vrednost beleži gornji trupčić stabla broj 3 (43,94%), dok je najviša izmerena na donjem trupčiću stabla broj 1 (59,00%). Ovi rezultati potvrđuju da na ovom lokalitetu nepovoljni uslovi rasta utiču na značajne razlike u udelu kasne zone između pojedinačnih stabala (Prilog 6 tabela 9).



Slika 44 - Radijalni profil procenta kasne zone po lokalitetima

Na slici 44 prikazan je grafik radijalnog profila procenta kasne zone crvenog hrasta (*Quercus rubra*) za tri lokaliteta (Bruske šume, Stepin lug i Debeli lug), čime se jasno uočavaju razlike uslovljene stanišnim karakteristikama. Procenat kasne zone pokazuje različite trendove po lokalitetima. U Debelom lugu vrednosti su najviše i stabilne, krećući se u okvirima literaturnih

nalaza (68–90%; Zeidler & Boruvka, 2016), dok Stepin lug beleži značajno niže vrednosti, što ukazuje na oslabljene fiziološke procese i nepovoljne uslove rasta. Bruske šume imaju posredne vrednosti, sa umerenim oscilacijama. Rezultati se uklapaju u zapažanja Šoškića & Popovića (2002), koji naglašavaju zavisnost učešća kasnog drveta od stanišnih uslova i antropogenih uticaja (tabela 5).

Tabela 5. Deskriptivna statistika za učešće kasne zone (%) u juvenilnom i zreлом drvetu crvenog hrasta na tri lokaliteta

Lokalitet	Bruske šume		Debeli Lug		Stepin lug	
	Juvenilna zona	Zrelo drvo	Juvenilna zona	Zrelo drvo	Juvenilna zona	Zrelo drvo
\bar{X}	69,87	61,14	75,71	67,97	78,06	55,41
SD	12,47	10,52	10,06	9,32	10,11	12,77
CV (%)	17,85	17,21	13,29	13,71	12,95	23,05
MIN	26,33	24,87	36,39	30,12	48,30	20,83
MAX	91,16	84,86	96,06	85,95	96,11	81,80
opseg	64,83	59,99	59,67	55,83	47,81	60,97

Pri proračunu udela kasne zone u prstenu prirasta, odvojeno se posmatraju juvenilna zona i zona zrelog drveta. Na lokalitetu Bruske šume koeficijent determinacije između širine prstena prirasta i širine kasne zone u juvenilnom delu drveta iznosi $R^2 = 0,934$, što ukazuje na vrlo visoku zavisnost ovih parametara. Najvišu srednju vrednost širine kasne zone ima gornji trupčić stabla broj 2 i ona iznosi 2,71 mm, a opseg vrednosti je 1,02–5,79 mm, sa koeficijentom varijacije 50,36%. Najnižu srednju vrednost pokazuje gornji trupčić stabla broj 1 i ona iznosi 1,91 mm sa koeficijentom varijacije 67,62%, minimalnom vrednošću 0,55 mm i maksimalnom 5,25 mm. Ukupno posmatrano za ovaj lokalitet i juvenilne zone svih trupčića, prosečna širina kasne zone u prstenu prirasta iznosi 2,18 mm, a opseg vrednosti je 0,31–5,79 mm, sa koeficijentom varijacije 48,97% (Prilog 4 tabela 7).

Kada govorimo o procentualnom učešću kasne zone u prstenovima prirasta najnižu srednju vrednost ima gornji trupčić stabla broj 3 od 60,01%, a najvišu gornji trupčić stabla 2 od 74,20%. Srednja vrednost procentualnog učešća kasne zone u prstenu prirasta u juvenilnim zonama svih

uzorkovanih trupčića iznosi 68,62%, a vrednosti imaju opseg od 26,33 do 91,16%, sa koeficijentom varijacije 21,15% (Prilog 4 tabela 7).

U zoni zrelog drveta širine kasne zone u prstenu prirasta su niže nego u juvenilnom delu. Najniža prosečna vrednost širine kasne zone zabeležena je u gornjem trupčiću stabla 2 i iznosi 1,11 mm, a opseg je 0,29–1,70 mm i koeficijent varijacije 48,24%. Najvišu srednju vrednost od 2,16 mm ima gornji trupčić stabla broj 3, sa koeficijentom varijacije 29,86%. Srednja vrednost širine kasne zone u prstenu prirasta za zrele delove drveta svih trupčića iznosil 1,767 mm, a opseg vrednosti je 0,29–3,94 mm sa koeficijentom varijacije 43,02%.

Kada se posmatra procentualno učešće kasnog drveta u širini prstena prirasta u zreloom drvetu na ovom lokalitetu najvišu srednju vrednost ima gornji trupčić stabla broj 3 i ona iznosi 66,51% a najmanju donji trupčić istog stabla od 58,11%. Može se primetiti da kod stabala 1 i 3 sa visinom stabla raste učešće kasne zone dok je kod stabla 2 obrnut slučaj. Ukupno učešće kasne zone u prstenu prirasta u zreloom drvetu svih trupčića sa lokaliteta Bruske šume iznosi 61,04% i nalazi se u opsegu 24,87–78,15% sa koeficijentom varijacije 19,42%.

U Debelom lugu srednja vrednost učešća kasne zone iznosi 71,93%, a vrednosti se kreću u opsegu od 54,89 do 83,00%, a širina kasne zone u okviru prstena prirasta iznosi 2,46 mm i kreće se u opsegu od 0,95 do 4,25 mm (Prilog 5 tabela 8).

Kod analize učešća kasne zone u prstenu prirasta na lokalitetu Debeli lug koeficijent korelacije između širine prstena prirasta i širine kasne zone u juvenilnom delu drveta iznosi $R^2 = 0,966$, što na ovom lokalitetu, kao i u Bruskim šumama, potvrđuje vrlo visoku zavisnost varijabli. Najvišu srednju vrednost širine kasne zone ima gornji trupčić stabla broj 1 i ona iznosi 3,90 mm, a vrednosti se kreću u opsegu 2,38–5,68 mm, sa koeficijentom varijacije 24,42%. Najnižu srednju

vrednost ima donji trupčić stabla broj 2 i ona iznosi 2,520 mm sa koeficijentom varijacije 45,17%, minimalnom vrednošću 0,85 mm i maksimalnom 5,04 mm. Ukupno posmatrano za ovaj lokalitet i juvenilne zone svih trupčića, prosečna širina kasne zone u prstenu prirasta iznosi 3,064 mm, a vrednosti se kreću u opsegu 0,60–6,93 mm, sa koeficijentom varijacije 39,63% (Prilog 5 tabela 8).

Što se tiče procentualnog učešća kasne zone u prstenovima prirasta najnižu srednju vrednost beleži donji trupčić stabla broj 1 od 71,14% a najvišu gornji trupčić stabla 2 od 78,84%. Srednja vrednost procentualnog učešća kasne zone u prstenu prirasta u juvenilnim zonama svih uzorkovanih trupčića iznosi 75,85%, a vrednosti imaju opseg od 36,39% do 96,06%, sa koeficijentom varijacije 13,12% (Prilog 5 tabela 8).

U juvenilnoj zoni drveta na ovom lokalitetu, učešće kasne zone drveta je vidno veće od onog na lokalitetu Bruske šume. Imajući u vidu da je širina prstenova veća kod stabala sa lokaliteta Debeli lug, a koeficijent korelacije između širine prstena prirasta i širine kasne zone je vrlo visok, veće učešće kasne zone je očekivano. Ovakve vrednosti širine prstena prirasta mogu biti posledica uslova staništa, ali i posledica anatomskih karakteristika hrastova generalno.

U zoni zrelog drveta širine kasne zone u prstenu prirasta su niže nego u juvenilnom delu. Najviša prosečna vrednost širine kasne zone pokazuje gornji trupčić stabla 2 i iznosi 2,65 mm, a vrednosti su u opsegu 1,24–4,44 mm, sa koeficijentom varijacije 33,22%. Najnižu srednju vrednost od 1,46 mm ima gornji trupčić stabla broj 1 sa koeficijentom varijacije 36,27%. Srednja vrednost širine kasne zone u prstenu prirasta za zrele delove drveta svih trupčića iznosi 2,16 mm, a vrednosti se kreću u opsegu 0,53–4,43 mm i koeficijent varijacije je 39,52%.

Kada se posmatra procentualno učešće kasnog drveta u širini prstena prirasta u zreloom drvetu na ovom lokalitetu, najvišu srednju vrednost ima gornji trupčić stabla broj 2 i ona iznosi

72,84%, a najmanju gornji trupčić stabla broj 1 od 60,88%. Može se primetiti da kod stabala 2 i 3 sa visinom stabla raste učešće kasne zone dok je kod stabla 1 obrnut slučaj. Ukupno učešće kasne zone u prstenu prirasta u zreom drvetu svih trupčića sa lokaliteta Debeli Lug iznosi 67,71% i nalazi se u opsegu 30,12–85,95%, sa koeficijentom varijacije 13,79%.

Na graficima je prikazano kretanje vrednosti širine prstena i širine kasne zone duž poprečnog preseka od srži ka kori (prilozi 4,5,6)

Na lokalitetu Stepin lug srednja vrednost ukupnog procentualnog učešća zone kasnog drveta u prstenovima prirasta za sva stabla iznosi 60,01%, a vrednosti su u opsegu od 20,83 do 96,11%. Najnižu vrednost ima gornji trupčić stabla broj 3, od 52,14%, a najvišu od 65,79% ima gornji trupčić stabla broj 1. Koeficijenti varijacije kreću se od 20,38% do 32,06% (Prilog 6 tabela 9).

Kod analize učešća kasne zone u prstenu prirasta na lokalitetu Stepin lug koeficijent korelacije između širine prstena prirasta i širine kasne zone drveta iznosi $R^2 = 0,989$ i najviši je, ukoliko se uporede lokaliteti. Najvišu srednju vrednost širine kasne zone u juvenilnom delu ima donji trupčić stabla broj 2 - 4,817 mm a vrednosti se krću se u opsegu 1,669-7,655 mm sa koeficijentom varijacije od 46,85%. Najnižu srednju vrednost ima donji trupčić stabla broj 3 i ona iznosi 2,782 mm sa koeficijentom varijacije od 44,84% i minimalnih 0,869 mm a maksimalnih 5,187 mm. Ukupno posmatrano za ovaj lokalitet i juvenilne zone svih trupčića prosečna širina kasne zone u prstenu prirasta iznosi 3,780 mm i kreće se u opsegu 0,869–9,574 mm sa koeficijentom varijacije od 49,72% (Prilog 6 tabela 9).

U juvenilnoj zoni drveta na ovom lokalitetu, učešće kasne zone drveta je veće nego na lokalitetu Bruske šume, ali manje nego na lokalitetu Debeli Lug. Ujedno, ovaj lokalitet dao je i

najveće varijacije vrednosti, kako u pogledu širine prstena prirasta, tako i u pogledu širine i procentualnog učešća kasne zone.

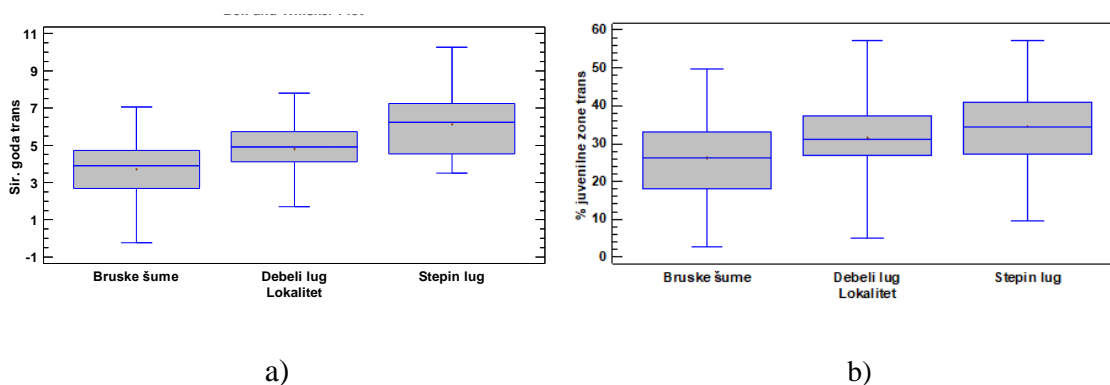
Što se tiče procentualnog učešća kasne zone, u prstenovima prirasta najnižu srednju vrednost pokazuje gornji trupčić stabla broj 2 od 71,28%, a najvišu donji trupčić stabla 1 od 80,80% u juvenilnom delu drveta. Ovo je i trupčić sa najvećim procentualnim učešćem kasne zone u prstenu prirasta u juvenilnom delu drveta, posmatrano na sva tri lokaliteta. Srednja vrednost procentualnog učešća kasne zone u prstenu prirasta u juvenilnim zonama svih uzorkovanih trupčića u Stepinom lugu iznosi 75,29%, a vrednosti se kreću u opsegu od 44,59 do 96,11%, sa koeficijentom varijacije 13,73% (Prilog 6 tabela 9).

Kao i u Debelom lugu, na lokalitetu Stepin lug u zoni zrelog drveta širine kasne zone u prstenu prirasta su niže nego u juvenilnom delu, s tim što je u ovom slučaju razlika uočljivija. Najviša prosečna vrednost širine kasne zone beleži se u gornjem trupčiću stabla 1 i iznosi svega 1,18 mm, vrednosti su u opsegu 0,251–3,228 mm, sa koeficijentom varijacije 53,42%. Najnižu srednju vrednost od 0,49 mm ima gornji trupčić stabla broj 3, sa koeficijentom varijacije 26,64%. Srednja vrednost širine kasne zone u prstenu prirasta za zrele delove drveta svih trupčića iznosi svega 0,82 mm, a vrednosti se kreću u opsegu 0,180–3,228 mm, sa koeficijentom varijacije 59,11% (Prilog 6 tabela 9).

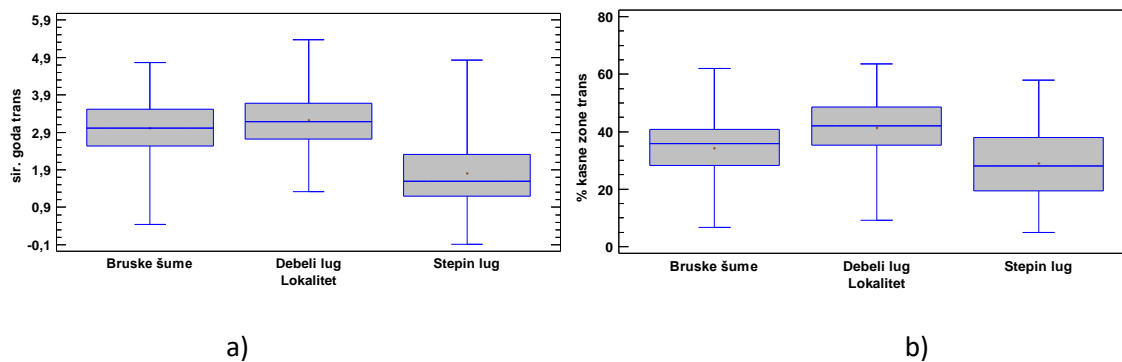
Kod procentualnog učešća kasnog drveta u širini prstena prirasta u zreloom drvetu na ovom lokalitetu najvišu srednju vrednost ima donji trupčić stabla broj 2 i ona iznosi 57,35%, a najmanju gornji trupčić stabla broj 3 od 43,94%. Ono što je na ovom lokalitetu zanimljivo je da je kod svih stabala sa porastom visine primećeno smanjenje učešća kasne zone u prstenu prirasta. Ukupno učešće kasne zone u prstenu prirasta u zreloom drvetu svih trupčića sa lokaliteta Stepin lug iznosi 53,44% i nalazi se u opsegu 20,83–81,80%, sa koeficijentom varijacije 22,53%.

Ako posmatramo sva tri lokaliteta vidi se da najveće ukupno učešće kasnog drveta u prstenu prirasta imaju stabla iz Debelog Luga, a najmanje stabla iz Stepinog luga (tabela 5). U Stepinom lugu, učešće kasnog drveta u juvenilnoj zoni je približnih vrednosti kao u Debelom lugu, ali je učešće u zreлом drvetu vidno manje.

Analizom varijanse (ANOVA) utvrđena je statistički značajna razlika između srednjih vrednosti širine prstenova prirasta stabala na različitim lokalitetima ($p = 0,0000$) (tabela 7). Prema LSD testu, obrazovale su se tri homogene grupe. Prvoj grupi pripada lokalitet Stepin lug, na kojem je prosečna širina prstenova prirasta drveta statistički značajno veća od one koja se odnosi na stabla iz Debelog Luga (druga homogena grupa), kao i Bruskih šuma (treća homogena grupa) (slike 45 i 46).



Slika 45 - Pravougaoni dijagram osnovnih statističkih parametara a) za širinu prstena prirasta i b) za procenat kasnog drveta u prstenu prirasta, u juvenilnoj zoni, za sva tri lokaliteta. Legenda: krstić u sredini pravougaonik – srednja vrednost, vodoravna linija – medijana, pravougaonik – donji i gornji kvartil, uspravne linije – raspon vrednosti.



Slika 46 - Pravougaoni dijagram osnovnih statističkih parametara a) za širinu prstena prirasta i b) za procenat kasnog drveta u prstenu prirasta, u zreloj zoni, za sva tri lokaliteta. Legenda: krstić u sredini pravougaonik – srednja vrednost, vodoravna linija – medijana, pravougaonik – donji i gornji kvartil, uspravne linije – raspon vrednosti.

Tabela 6 Analiza varijanse (ANOVA) za širinu prstenova prirasta i učešće kasne zone u juvenilnom i zreloj drvetu crvenog hrasta na tri lokaliteta

Zona		Juvenilna zona		Zrelo drvo	
Svojtvo		Širina goda (mm)	Učešće kasne zone (%)	Širina goda (mm)	Učešće kasne zone (%)
ANOVA	F	46,39	11,31	191,19	75,12
	<i>p</i>	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Napomena. Masnim brojkama su označene vrednosti $p < 0,05$.

U tabeli 6, ANOVA pokazuje da ne postoji statistički značajna razlika između srednjih vrednosti širine prstenova prirasta stabala na lokalitetu Bruske šume ($p = 0,2454$). Prema t-testu, nisu ustanovljene statistički značajne razlike u širini prstenova prirasta između donjih i gornjih trupčica stabala ($p = 0,1952$) (tabela 7). S druge strane, na lokalitetu Debeli Lug postoji statistički značajna razlika između srednjih vrednosti širine prstenova prirasta stabala ($p = 0,0435$). Prema LSD testu, obrazovale su se dve homogene grupe. Prvoj grupi pripada stablo 1, tako da je prosečna širina prstenova prirasta ovog stabla statistički značajno veća od onih ustanovljenih za stabla 3 i 2 (tabela 5). Takođe, prema t-testu, postoji statistički značajna razlika između srednjih vrednosti širine prstenova prirasta donjih i gornjih trupčica stabala sa ovog lokaliteta ($p = 0,0084$), na način da je prosečna širina prstenova prirasta kod gornjih trupčica veća od one kod donjih trupčica (tabela 7). U Stepinom lugu ne postoji statistički značajna razlika između srednjih vrednosti širine

prstenova prirasta stabala ($p = 0,0848$) (tabela 6). Takođe, prema t-testu, između srednjih vrednosti širine prstenova prirasta drveta gornjih i donjih trupčica stabala na ovom lokalitetu ne postoje statistički značajne razlike ($p = 0,8950$) (tabela 7).

Tabela 7. Analiza varijanse (ANOVA) za širinu prstenova prirasta i učešće kasne zone u juvenilnom i zrelo drvetu crvenog hrasta na tri lokaliteta po stablu

Lokalitet		Bruske šume				Debeli Lug				Stepin lug			
Zona		Juvenilna zona		Zrelo drvo		Juvenilna zona		Zrelo drvo		Juvenilna zona		Zrelo drvo	
Svojstvo		Širina prstena prirasta (mm)	Učešće kasne zone (%)	Širina prstena prirasta (mm)	Učešće kasne zone (%)	Širina prstena prirasta (mm)	Učešće kasne zone (%)	Širina prstena prirasta (mm)	Učešće kasne zone (%)	Širina prstena prirasta (mm)	Učešće kasne zone (%)	Širina prstena prirasta (mm)	Učešće kasne zone (%)
ANOVA	F	1,43	6,36	6,40	0,68	3,28	1,05	10,67	33,11	2,57	5,30	15,93	15,98
	p	0,2454	0,0317	0,0023	0,5065	0,0435	0,3544	0,0000	0,0000	0,848	0,0075	0,0000	0,0000

Napomena. Masnim brojkama su označene vrednosti $p < 0,05$.

Analizom varijanse (ANOVA) utvrđena je statistički značajna razlika između srednjih vrednosti procenta juvenilne zone stabala na različitim lokalitetima ($p = 0,0000$) (tabela 5). Prema LSD testu, obrazovale su se dve homogene grupe. Prvoj grupi pripadaju lokaliteti Stepin lug i Debeli Lug, na kojima je prosečni procenat juvenilne zone drveta statistički značajno veći od onog koji se odnosi na stabla iz Bruskih šuma (druga homogena grupa).

U tabeli 5, ANOVA pokazuje da postoji statistički značajna razlika između srednjih vrednosti procenta učešća kasne zone u juvenilnom drvetu zone na lokalitetu Bruske šume ($p = 0,0317$) (tabela 7). Prema LSD testu, obrazovale su se dve homogene grupe, tako da prvoj grupi pripadaju stabla 2 i 1, koja se odlikuju većim prosečnim vrednostima procenta juvenilne zone od stabla 3 (druga homogena grupa) (tabela 6). S druge strane, prema t-testu, nisu ustanovljene statistički značajne razlike u procentima juvenilne zone između donjih i gornjih trupčica stabala sa ovog lokaliteta ($p = 0,3166$) (tabela 7). Za Debeli Lug, ANOVA pokazuje da ne postoji statistički značajna razlika između srednjih vrednosti procenata juvenilne zone stabala ($p = 0,3544$) (tabela 6). Takođe, prema t-testu, ne postoji statistički značajna razlika između srednjih vrednosti procenata juvenilne zone donjih i gornjih trupčica stabala sa ovog lokaliteta ($p = 0,4333$) (tabela

7). Kada je reč o Stepinom lugu, ANOVA pokazuje da postoji statistički značajna razlika između srednjih vrednosti procenta juvenilne zone stabala ($p = 0,0075$). Prema LSD testu, obrazovale su se dve homogene grupe, pri čemu prvoj grupi pripada stablo 1 i odikuje se većom srednjom vrednošću procenta juvenilne zone od stabala 2 i 3 koja pripadaju drugoj grupi (tabela 6). Prema t-testu, između srednjih vrednosti procenta juvenilne zone drveta gornjih i donjih trupčica stabala na ovom lokalitetu ne postoje statistički značajne razlike ($p = 0,2701$) (tabela 7).

Rezultati koje je dala ANOVA pokazuju da postoji statistički značajna razlika između srednjih vrednosti širine prstenova prirasta stabala na istraživanim lokalitetima ($p = 0,0000$). Prema LSD testu, obrazovale su se tri homogene grupe. Prvoj homogenoj grupi pripada lokalitet Debeli Lug, na kojem je srednja vrednost širine prstenova prirasta drveta statistički značajno veća od srednjih vrednosti koje se odnose na stabla iz Bruskih šuma (druga homogena grupa) i Stepinog luga (treća homogena grupa) (tabela 6).

Tabela 8. Univarijantna analiza (*t*-test) za širinu prstenova prirasta i učešće kasne zone u juvenilnom i zreлом drvetu crvenog hrasta na tri lokaliteta u Srbiji, po trupčicu

Lokalitet		Bruske šume				Debeli Lug				Stepin lug			
Zona		Juvenilna zona		Zrelo drvo		Juvenilna zona		Zrelo drvo		Juvenilna zona		Zrelo drvo	
Svojstvo		Širina goda (mm)	Učešće kasne zone (%)	Širina goda (mm)	Učešće kasne zone (%)	Širina goda (mm)	Učešće kasne zone (%)	Širina goda (mm)	Učešće kasne zone (%)	Širina goda (mm)	Učešće kasne zone (%)	Širina goda (mm)	Učešće kasne zone (%)
t-test	t	-1,31	-1,01	1,87	-0,50	-2,71	-0,79	3,11	-1,15	0,13	1,11	0,75	2,11
	p	0,1952	0,3166	0,0639	0,6153	0,0084	0,4333	0,0021	0,2510	0,8950	0,27001	0,4546	0,0357

Napomena. Masnim brojkama su označene statistički značajne vrednosti ($p < 0,05$).

Prema rezultatima u tabeli 8, ANOVA pokazuje da postoji statistički značajna razlika između srednjih vrednosti širine prstenova prirasta stabala u Bruskim šumama ($p = 0,0023$). Prema LSD testu, obrazovale su se dve homogene grupe, tako da prvu homogenu grupu čini stablo 3, sa većom srednjom vrednošću širine prstenova prirasta od one koja je određena za stabla 1 i 2 iz druge homogene grupe. Takođe, prema t-testu, nisu ustanovljene statistički značajne razlike u širini prstenova prirasta između donjih i gornjih trupčica stabala sa ovog lokaliteta ($p = 0,0639$)

(tabela 7). Za lokalitet Debeli Lug, ANOVA pokazuje da postoji statistički značajna razlika između srednjih vrednosti širine prstenova prirasta stabala ($p = 0,0000$). Prema LSD testu, obrazovale su se tri homogene grupe, što znači da se sva stabla međusobom statistički značajno razlikuju prema srednjim vrednostima širine prstenova prirasta (tabela 6). Takođe, prema t-testu, postoji statistički značajna razlika između srednjih vrednosti širine prstenova prirasta donjih i gornjih trupčica stabala sa ovog lokaliteta ($p = 0,0021$), na način da je prosečna širina prstenova prirasta kod donjih trupčica veća od one koja je određena za gonje trupčice (tabela 7). Za Stepin lug, ANOVA pokazuje da postoji statistički značajna razlika između srednjih vrednosti širine prstenova prirasta stabala ($p = 0,0000$). Prema LSD testu, obrazovale su se dve homogene grupe, tako prvoj homogenoj grupi pripada stablo 1, koje se odlikuje većom srednjom vrednošću širine prstenova prirasta od vrednosti koje su određene za stabla 2 i 3 u drugoj homogenoj grupi (tabela 6). S druge strane, prema t-testu, između srednjih vrednosti širine prstenova prirasta drveta gornjih i donjih trupčica stabala na ovom lokalitetu ne postoje statistički značajne razlike ($p = 0,4546$) (tabela 7).

ANOVA je pokazala da postoji statistički značajna razlika između srednjih vrednosti procenta kasne zone stabala na istraživanim lokalitetima ($p = 0,0000$). Prema LSD testu, obrazovale su se tri homogene grupe. Prvoj homogenoj grupi pripada lokalitet Debeli Lug, na kojem je prosečni procenat kasne zone drveta statistički značajno veći od onog koji je određen za stabla iz Bruskih šuma (druga homogena grupa), kao i Stepinog luga (treća homogena grupa) (tabela 7).

Prema rezultatima u tabeli 8, ANOVA pokazuje da ne postoji statistički značajna razlika između srednjih vrednosti procenta kasne zone stabala u Bruskim šumama ($p = 0,5065$). Takođe, prema t-testu, nisu ustanovljene statistički značajne razlike u procentima kasne zone između donjih i gornjih trupčica stabala sa ovog lokaliteta ($p = 0,0639$) (tabela 6). Za Debeli Lug, ANOVA

pokazuje da postoji statistički značajna razlika između srednjih vrednosti procenta kasne zone stabala na ovom lokalitetu ($p = 0,0000$). Prema LSD testu, obrazovale su se dve homogene grupe, tako da prvoj homogenoj grupi pripadaju stabla 2 i 3, koja se odlikuju većom srednjom vrednošću procenta kasne zone od stabla 1 koje čini drugu homogenu grupu (tabela 5). S druge strane, prema t-testu, ne postoji statistički značajna razlika između srednjih vrednosti procenata kasne zone donjih i gornjih trupčica stabala sa ovog lokaliteta ($p = 0,2510$) (tabela 6). Kada je reč o Stepinom lugu, ANOVA pokazuje da postoji statistički značajna razlika između srednjih vrednosti procenta kasne zone stabala na ovom lokalitetu ($p = 0,0000$). Prema LSD testu, obrazovale su se tri homogene grupe, tako da se sva tri stabla međusobno statistički značajno razlikuju prema srednjim vrednostima procenta kasne zone (tabela 5). Prema t-testu, između srednjih vrednosti procenta kasne zone drveta gornjih i donjih trupčica stabala, na ovom lokalitetu postoje statistički značajne razlike ($p = 0,0358$), na način da je prosečni procenat kasne zone statistički značajno veći u drvetu donjih trupčica od onog kod gornjih trupčica (tabela 6).

Prema Šoškiću & Popoviću (2002) u zavisnosti od stanišnih uslova, koleba se i širina prstenova. Pri svemu tome i način podizanja sastojine, genetička struktura vrste, individualne osobine pojedinih stabala, a i položaj godišnjeg sloja u stablu, su od uticaja na širinu prstena prirasta. Na intenzitet radijalnog i visinskog rasta drveta utiču prosečna temperatura vazduha, kao i količina i raspored padavina tokom vegetacionog perioda, zbog čega se javlja kolebanje širine prstenova prirasta i zone kasnog drveta, odnosno njegovog učešća u prstenu prirasta. Širina godišnjeg sloja se menja i po radijusu; u delu bliže srcu prstenovi prirasta su uži, zatim sledi zona širih prstenova i dalje prema kori širina godišnjih slojeva se postepeno smanjuje. U deblu drveta radijalni obrazac promene širine prstenova prirasta tipično pokazuje da su prstenovi uži u zoni uz srž, zatim postaju širi u srednjem delu debla, a potom se njihova širina postepeno smanjuje prema

kori. Ovaj trend povezan je sa fazama razvoja stabla – juvenilnim drvetom, periodom intenzivnog debljinskog rasta i fazom zrelog drveta – i potvrđen je istraživanjima na crvenom hrastu (Genet *et al.*, 2013), kao i na *Q. garryana* (Lei, Milota, & Gartner, 1996). U skladu sa tim, kada se uporede vrednosti za stabla sa triju lokaliteta u Srbiji, može se konstatovati da su stabla u Stepinom lugu imala najnepovoljnije uslove rasta i staništa, verovatno usled blizine prestonice, gde je zagađenje sredine visoko. Prema literaturi (Šoškić & Popović 2002), širina prstenova prirasta se od preseka na panju prema vrhu povećava; međutim, na lokalitetu Stepin lug to nije slučaj. Na sva tri stabla zabeleženo je smanjenje učešća kasne zone u gornjim delovima, što svedoči u prilog tvrdnji da su na ovom lokalitetu stanišni uslovi za crveni hrast nepovoljni.

Prema Zeidler & Boruvka (2016), udeo kasnog drveta kod crvenog hrasta iz okoline rudnika uglja u Češkoj iznosi od 68,80% do 90,40%. Ovaj rezultat je u skladu sa vrednostima dobijenim na lokalitetu Debeli Lug, ali učešće kasne zone je veće nego na lokalitetima Bruske šume i Stepin lug. Uzcategui *et al.* (2020) dobili su rezultat da prosečan procenat kasnog drveta crvenog hrasta varira između 42,20% i 98,40%, sa srednjom vrednošću 71,30%, a koeficijentom varijacije 18,17%. I ovaj podatak ide u prilog rezultatima iz Debelog Luga, dok su vrednosti sa drugih dvaju lokaliteta unekoliko niže. Na osnovu toga, može se konstatovati da su stabla sa lokaliteta Debeli lug imala najpovoljnije uslove rasta i staništa. U istraživanju Živanović *et al.* (2021), na stablu crvenog hrasta iz Lipovičke šume, merene su širine prstenova prirasta na dve visine – 1,4 m i 4,4 m. Udeo kasnog drveta bio je u proseku 2,46 mm (68%) za donji i 2,63 mm (74%) za gornji kotur.

Büyüksarı, *et al.* (2018) izračunali su prosečnu širinu ranog i kasnog drveta i godišnjih prstenova, kao i udeo kasnog drveta hrasta kitnjaka za stabla starosti od 190 do 211 godina, 49,30% učešće ranog drveta, respektivno. Utvrđeno je da je udeo kasnog drveta 66% u *Q. faginea* Lam.

(Knapic *et al.*, 2011) i 61% kod *Q. suber* L. (Knapic *et al.*, 2008). Vavrčik & Gric (2012) su dobili vrednost od 2,1 mm za širinu prstena hrasta lužnjaka i 1,4 mm kod hrasta kitnjaka. Utvrdili su da, pri istoj širini prstena, hrast lužnjak ima veći udeo kasnog drveta. Ove razlike mogu biti rezultat uslova rasta, kao što su padavine, temperatura vazduha, forma stabla, karakteristike zemljišta, itd. Za *Q. garryana* Dougl. starosti 80 godina sa područja Oregona, Lei *et al.* (1996) konstatovali su da je širina ranog drveta bila gotovo konstantna u celom radijalnom pravcu, a širina kasnog drveta se smanjila za oko 10-20 godina ka kori. To je rezultiralo smanjenjem procenta kasnog drveta sa godinama, u skladu sa obrascem koji su i drugi autori primetili za prstenaste porodne vrste (Lei *et al.*, 1996).

U skladu sa prethodno prikazanim rezultatima, kao i literaturnim podacima, može se konstatovati da crveni hrast na svom prirodnom staništu daje drvo sa većim učešćem kasne zone, ali da je to učešće i kod stabala sa naših prostora takođe visoko i kreće se i do 96%. U odnosu na ostale vrste hrastova može se reći da crveni hrast ima veće učešće kasne zone od drugih navedenih vrsta. S obzirom da su stabla sa područja Bruskih šuma vidno užih prstenova prirasta nego na drugim lokalitetima, može se reći da su veliki uticaj na širinu prstenova prirasta i učešće kasne zone imali uslovi staništa, koji su na lokalitetu nepovoljni za ovu vrstu. Na lokalitetu Stepin lug, zabeleženo je najmanje učešće kasne zone i najmanje su vrednosti širine prstenova prirasta, što se takođe može pripisati uslovima staništa, tj. većem zagađenju sredine usled urbanog okruženja i blizine autoputa. U Debelom lugu, vrednosti se kreću u očekivanom opsegu za ovu vrstu i najbližnje su vrednostima koje su u svojim istraživanjima zabeležili drugi autori.

6.1.3 Površinsko učešće beljike i srčevine

Površinsko učešće beljike i srčevine određeno je na poprečnom preseku 9 stabala na dve različite visine po pojedinačnim stablima i lokalitetima i obrađeno deskriptivnom statistikom.

Formiranje srčevine drveta je prirodni proces starenja (Bosshard, 1968); razvoj beljike i srčevine se odvija u relativno uskom delu poprečnog preseka i obuhvata 1 do 2 prstena prirasta (Wilson & White, 1986; Bamber i Fukazava, 1985).

Na lokalitetu Bruske šume prosečno učešće srčevine po poprečnom preseku iznosi 88,84%, a vrednosti se nalazi u opsegu od 84,41 do 94,46%, sa koeficijentom varijacije 3,86%. S druge strane, učešće beljike iznosi 11,15% i ima veći koeficijent varijacije (30,70%) (Prilog 7 tabela 10). U Debelom lugu prosečno učešće srčevine je 91,81%, a utvrđene su vrednosti u opsegu od 89,56 do 94,07%, sa koeficijentom varijacije od svega 1,71%, dok je prosečno učešće beljike 8,19%, a vrednosti su u opsegu od 5,92 do 10,44%, sa nešto većim koeficijentom varijacije (19,15%) (Prilog 7 tabela 10). U Stepinom lugu srednja vrednost učešća srčevine je viša u odnosu na ostale lokalitete i iznosi čak 96,78%, sa koeficijentom varijacije od svega 1,36%, a učešće beljike je srazmerno nisko i u proseku iznosi 3,22%, a kreće se u opsegu od 1,82 do 5,59%, te je i koeficijent varijacije znatno veći (40,91%) (Prilog 7 tabela 10).

Tabela 9 –Procentualno učešća beljike i srčevine kod drveta crvenog hrasta na tri lokaliteta u Srbiji

	Bruske šume		Debeli Lug		Stepin lug	
	Srčevina (%)	Beljika(%)	Srčevina (%)	Beljika(%)	Srčevina (%)	Beljika(%)
\bar{X}	88,84	11,16	91,81	8,19	96,78	3,22
SD	3,4250	3,4250	1,5676	1,5676	1,3190	1,3190
CV (%)	3,86	30,70	1,71	19,15	1,3630	40,91
MIN	84,41	5,54	89,56	5,92	94,41	1,82
MAX	94,46	15,59	94,08	10,44	98,18	5,59
opseg	10,05	10,05	4,52	4,52	3,77	3,77

U tabeli 8 prikazano je procentualno učešća beljike i srčevine kod drveta crvenog hrasta na sva tri lokaliteta. Na svim lokalitetima beljika obuhvata poslednjih 3, 4 ili 5 prstenova prirasta. Najnižu srednju vrednost učešća srčevine imaju stabla sa lokaliteta Bruske šume i ona iznosi 88,84%. Najvišu prosečnu vrednost imaju stabla iz Stepinog luga koja iznosi 96,78%.

Dobijeni podaci ukazuju da analizirana stabla crvenog hrasta imaju značajno manje učešće beljike u odnosu na stabla hrasta kitnjaka (Popović & Todorović 2006). Autori prikazuju da je prosečno procentualno učešće srčevine 58. Rezultati ukazuju da analizirana stabla crvenog hrasta (*Quercus rubra* L.), starosti oko 60 godina, imaju značajno veći procenat srčevine i manji udeo beljike u poređenju sa stablima domaćih vrsta hrastova. U ovom istraživanju prosečno učešće srčevine bilo je izuzetno visoko, što se može dovesti u vezu sa intenzivnijim procesom osržavanja kod crvenog hrasta u poređenju sa hrastom kitnjakom (*Q. petraea*) ili lužnjakom (*Q. robur*), gde je beljika u ovom životnom dobu obično još uvek znatno zastupljenija (Popović & Todorović, 2006).

Šoškić *et al.* (1994) navode da je kod stabala hrasta kitnjaka starosti 143 godine procenat srčevine dostizao i do 80 %, što potvrđuje da se udeo srčevine progresivno povećava sa starošću stabla. Proces osržavanja kod hrastova najčešće započinje između 15. i 25. godine života, ali njegova dinamika zavisi od vrste, stanišnih uslova i individualne vitalnosti stabla (Taylor *et al.*, 2002). Stoga je uočen visok procenat srčevine kod stabala crvenog hrasta u ovom istraživanju od posebnog značaja – jer ukazuje da ova introdukovana vrsta relativno brzo dostiže fiziološku zrelost drveta, što može pozitivno uticati na njenu komercijalnu vrednost, ali istovremeno ukazuje i na razlike u odnosu između beljike i srčevine u poređenju sa autohtonim vrstama u Srbiji.

6.1.4 Dužina drvnih vlakana (libriforma) i broj drvnih vlakana po jedinici površine [mm]

Na uzorku stabala iz Bruskih šuma, srednja vrednost dužine vlakana kod zrelog drveta iznosi 1,18 mm, dok je dužina u juvenilnoj zoni nešto niža i iznosi 1,16 mm. U delu beljike dužina vlakana je 1,17 mm.

Tabela 10 – Dužina drvnih vlakana kod crvenog hrasta sa tri lokaliteta u Srbiji

		Juvenilno drvo [μm]		Zrelo drvo [μm]		Beljika [μm]	
		\bar{X}	SD	\bar{X}	SD	\bar{X}	SD
Bruske šume	\bar{X}	1,1563	0,0048	1,1835	0,0046	1,1700	0,0048
	SD	0,17150	0,00085	0,17400	0,00084	0,17640	0,00076
	CV (%)	14,83	17,63	14,70	18,34	15,08	15,99
	MIN	0,829	0,003	0,811	0,001	0,808	0,003
	MAX	1,517	0,007	1,722	0,007	1,594	0,0075
	opseg	0,688	0,004	0,911	0,006	0,786	0,0045
Debeli lug	\bar{X}	1,1910	0,0046	1,3252	0,0047	1,2063	0,0044
	SD	0,24840	0,00057	0,17500	0,00060	0,15810	0,00083
	CV (%)	20,85	12,50	13,21	12,72	13,11	19,10
	MIN	0,813	0,003	1,002	0,0035	0,826	0,003
	MAX	2,015	0,006	1,753	0,0065	1,681	0,007
	opseg	1,205	0,003	0,751	0,003	0,855	0,004
Stepin lug	\bar{X}	1,1010	0,0045	1,2921	0,00442	1,25001	0,00510
	SD	0,18000	0,00117	0,22000	0,00068	0,19756	0,00088
	CV (%)	16,71	26,31	16,94	15,48	15,80	18,32
	MIN	0,701	0,001	0,920	0,003	0,728	0,003
	MAX	1,562	0,0075	2,183	0,0075	1,679	0,008
	opseg	0,863	0,0070	1,261	0,0045	0,951	0,005

U Debelom lugu, drvena vlakna su nešto duža i u juvenilnom delu drveta srednja vrednost iznosi 1,91 mm, dok je u zreloom drvetu 1,32 mm i u delu beljike 1,21 mm. U poređenju sa drugim lokalitetima, rezultati pokazuju najnižu srednju vrednost dužine drvnih vlakana za lokalitet Stepin lug, koja iznosi 1,10 mm za juvenilni deo stabla, 1,29 mm za zrelo drvo i 1,25 mm za deo beljike. Dužina vlakana najveća je u zreloom drvetu, nešto manja u beljici, a najmanja u zoni juvenilnog drveta, što se vidi u tabeli 9.

Radijalni obrazac promene dužine vlakana sa starošću drveta rezultat je ontogenetskog razvoja stabla i diferencijacije kambijalnih ćelija. U juvenilnom drvetu, koje se formira u prvim godinama rasta u blizini srži, kambijalne ćelije imaju kraći period elongacije i intenzivniju deobu, pa su i vlakna kraća. Kako stablo sazreva i kambijum postaje stabilniji, produžava se trajanje elongacije ćelija, što dovodi do povećanja dužine vlakana u zoni zrelog drveta. U beljici, koja obuhvata prelazni deo između funkcionalnog provodnog tkiva i srževine, dužina vlakana je nešto manja nego u centralnoj zoni zrelog drveta, zbog završnih promena u diferencijaciji i hemijskim modifikacijama tkiva. Ovaj obrazac – kraća vlakna u juvenilnoj zoni i najduža u zoni zrelog drveta – potvrđen je i u brojnim istraživanjima za različite vrste lišćara i četinara (Yang *et al.*, 2020)).

Prosečna vrednost debljine ćelijskog zida iznosi 0,0048 mm sa koeficijentom varijacije 17,63% i vrednostima u opsegu od 0,003 do 0,007 mm (tabela 10).

Dužine drvnih vlakana kod crvenog hrasta nisu izučavane u onoj meri kao kod ostalih vrsta hrastova. Uticaj lokacije na anatomske karakteristike crvenog hrasta su istraživali Maeglin (1984), Tainter *et al.* (1990) i Tardif *et al.* (2006). Maeglin & Quirk (1984) su ispitali razlike u dimenzijama i proporcijama anatomskih elemenata nekoliko vrsta belog i crvenog hrasta. Razlika, između tipova ili vrste (crveni ili beli), u dužini vlakna nije bila značajna. Značajna razlika između crvenih i belih hrastova postojala je u debljini zida; crveni hrast imao je zidove debljine 6 μm , a beli hrast 2,5 μm . Isti autori navode da su dužine vlakana za beli hrast $1,33 \pm 0,18 \mu\text{m}$, a za crveni $1,55 \pm 0,18 \mu\text{m}$ (Maeglin & Quirk 1984). Dakle, navedene vrednosti su nešto više od rezultata istraživanja koje je predmet ovog rada, ali treba uzeti u obzir da su autori ispitivali vrste u svom prirodnom staništu. Neki autori (Mladenova *et al.*, 2017; Nazari *et al.*, 2020) su istraživali karakteristike vlakana, uglavnom dužine vlakana u drvetu različitih vrsta hrastova. Rezultati su ukazali na visoku zavisnost dimenzija vlakana sa uslovima staništa.

Juvenilna zona je deo stabla koji se po svojim anatomskim karakteristikama i svojstvima značajno razlikuje u odnosu na zrelo drvo (Zobel & Buijtenen 1989; Hernandez *et al.* 2006). Tajlor (1976) je za drvo crvenog hrasta utvrdio da se u zreлом drvetu nalaze duža drvena vlakna u odnosu na juvenilno drvo. Do istog zaključka može se doći i na osnovu istraživanja u našem radu, jer su za sva tri lokaliteta zabeležena duža drvena vlakna u zoni zrelog drveta. Isti autor je izučavao i korelaciju između pozicije u prstenu prirasta po radijusu, kao i dužine drvnih vlakana, utvrdivši da između ovih promenljivih postoji funkcionalna kvadratna zavisnost. Lei *et al.* (1996) su ispitivali dužine vlakana na *Q. garryana* L. i na prsnoj visini dobili vrednosti u opsegu 1,1–1,2 μm .

Raczkowska & Fabisika su publikovali da se dužina vlakana povećava od srži ka kori i da kod hrasta kitnjaka u juvenilnom drvetu iznosi 0,99 mm, a u zreom drvetu 1,13 mm. Isti autori su istakli da postoji negativna korelacija između dužine anatomskih elemenata i širine prstena prirasta kod vrsta iz roda *Quercus*, a da je ona najizraženije u drvnih vlakana. Mladenova *et al.* (2017) navode da je prosečna dobijena dužina vlakana za sladun 1,214 mm, a kod hrasta kitnjaka 1,306 mm. Slične vrednosti imaju crveni hrast (1,300 mm) i beli hrast (1,360 mm). Za crveni hrast Wagenfuhr & Scheiber (1985) navode dužinu 1,300 mm, a za beli hrast isti autori su publikovali vrednost od 1,360 mm. U našem istraživanju, na lokalitetu Debeli lug izmerene srednje vrednosti u zreom delu drveta odgovaraju navedenim vrednostima. Na ostala dva lokaliteta vrednosti su nešto niže. Nazari *et al.* (2020) su naveli da je dužina vlakana u drvetu persijskog hrasta kraća od 1 mm, dok je prosečna vrednost bila 0,87 mm. Prikazane razlike su posledica genetskih uticaja i činjenice da anatomske karakteristike drveta mogu varirati čak i unutar iste šumske sastojine, te u velikoj meri zavise od mikrokruženja i hidroloških uslova (Gričar *et al.* 2013; Jokanović *et al.* 2022), kao i varijacije strukture prstenova prirasta po radijusu (Genet *et al.* 2013). Rezultati ovog istraživanja pokazuju tipičan radijalni obrazac – vlakna su najkraća u juvenilnoj zoni, dužina im se povećava ka zreom drvetu gde dostižu maksimum, a zatim se blago smanjuju u beljici. Slične nalaze navode i Jokanović *et al.* (2022), koji su utvrdili da ekološki faktori, posebno hidrološki uslovi, značajno utiču na dimenzije vlakana hrasta lužnjaka, pri čemu su stabla sa plavljenih staništa imala kraća vlakna u poređenju sa stablima iz neplavljenih uslova. Lozjanin *et al.* (2024) takođe potvrđuju da varijacije u dužini i debljini ćelijskih zidova vlakana zavise od ekoloških uslova rasta, naglašavajući da hidrologija staništa oblikuje anatomske karakteristike i sam kvalitet drveta. U poređenju sa tim rezultatima za lužnjak, naši nalazi za crveni hrast ukazuju da su razlike u dužini vlakana između lokaliteta takođe povezane sa hidrološkim uslovima, čime se potvrđuje

univerzalna važnost stanišnih faktora u formiranju radijalnog obrasca anatomskih svojstava kod različitih vrsta hrastova.

Gustina drveta i dužina vlakana su dve karakteristike drveta koje su važne u određivanju kvaliteta drveta za komercijalnu upotrebu. Dužina vlakana crvenog hrasta nije proučavana u istoj meri kao kod drugih vrsta hrastova. U istraživanju Todorović *et al.* (2022) merena je dužina vlakana na trupcu crvenog hrasta iz Lipovičke šume, iz dva kotura, sa dve različite visine. Dobijeni rezultati dužine drvnog vlakna pokazuju da ona varira od 0,99 do 1,33 mm, koliko je izmerena i kod zrelog drveta. Prosečna dužina u zreloj zoni je 1,26 (1,16–1,33) mm, dok je u juvenilnom području prosečna dužina 1,02 (0,85–1,23) mm. Na osnovu poznate dužine drvnih vlakana moguće je procenti gustinu drveta crvenog hrasta. U ovom istraživanju utvrđen je pozitivan uticaj u oba dela stabla, juvenilnom i zreloom, ali je bolja matematička zavisnost dobijena u zreloj zoni (Todorović *et al.*, 2022).

Tabela 11 – Broj drvnih vlakana crvenog hrasta po 1 mm na različitim lokalitetima u Srbiji

	Bruske šume	Debeli lug	Stepin Lug	Prosečno
\bar{X}	2061	1974.333	1779.667	1944.789
SD	315.2745	420.0522	463.9089	413.3205
CV (%)	15.30	21.28	26.07	21.25
MIN	1643	1358	1212	1212
MAX	2435	2382	2227	2435
opseg	792	1024	1015	1223

Na uzorcima sa lokaliteta Bruske šume srednja vrednost broja drvnih vlakana, za dva merenja u sva tri trupca, iznosi 2061 vlakno po 1 mm², sa maksimalnih 2435 i minimalnih 1643 i koeficijentom varijacije 15,30%, što je ujedno lokalitet sa najvećom vrednošću (tabela 11). U Debelom lugu prosečan broj drvnih vlakana je 1974,33, s nešto višim koeficijentom varijacije (21,28%), minimalnom vrednošću 1358 vlakana, a maksimalnom 2382 vlakna po 1mm². U Stepinom lugu ova vrednost je najniža i iznosi u proseku 1779,667 vlakana, s minimalnom 1212 i maksimalnom vrednošću 2227 vlakana po 1mm², kao i na nivou svih lokaliteta najvišim

koeficijentom varijacije koji iznosi 26,07%. Ukupno posmatrano za sva analizirana stabla crvenog hrasta, srednja vrednost broja drvnih vlakana po 1 mm² iznosi 1944,789, sa minimalnih 1212 i maksimalnih 2435 vlakana po 1mm² i koeficijentom varijacije 21,25%. U odnosu na lokalitete, primećuje se da stabla sa Stepinog luga imaju 9,15% niži sadržaj drvnih vlakana po 1 mm² (tabela 10).

Gustina drveta zavisi od dužine i broja mehaničkih elemenata – drvnih vlakana (Šoškić & Popović 2002). Ukupno posmatrano, najveće vrednosti dužine i debljine ćelijskog zida imaju uzorci sa lokaliteta Debeli Lug, nešto niže vrednosti su zabeležene u Bruskim šumama, a najniže na lokalitetu Stepin lug. Premu broju vlakana po jedinici površine, uzorci iz Stepinog luga su dali najniže vrednosti (tabela 13). Vlakna učestvuju sa 30-75% osnovnog volumena tvrdog drveta u zavisnosti od vrste drveta. Kod tvrdog drveta vlakna su manja od vlakana mekog drveta, imaju deblje ćelijske zidove, manje ćelijske lumene i razliku između ranog i kasnog drveta nije tako ekstremna kao kod mekog drveta (Gellerstedt & Henriksson, 2009). Za tehnologiju prerade drveta osim zastupljenosti mehaničkih elemenata u ukupnoj količini anatomskih elemenata građe drveta važan je i odnos dvostruke debljine zidova ćelija i njihovog lumena (Šoškić & Popović, 2002).

6.2 Analiza osnovnih fizičkih i mehaničkih svojstava drveta crvenog hrasta

Deskriptivna statistika i analiza varijanse (ANOVA) za mehanička svojstva drveta crvenog hrasta u Srbiji prikazana je po lokalitetima u tabeli 12 i po stablima u Prilogu 8. u tabeli 11.

Tabela 12. Deskriptivna statistika i analiza varijanse (ANOVA) za mehanička svojstva drveta crvenog hrasta na tri lokaliteta u Srbiji

Svojstvo		Gustina (g/mm ³)	Hp (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	
Lokalitet	Bruske šume	N	100	89	88	86
		\bar{X}	0,724 b	58,915 b	118,416 a	9578,530 a
		SD	0,055	5,550	18,337	1700,680
		CV%	7,602	9,420	15,485	17,755
		MIN	0,608	46,453	72,150	5470,790
		MAX	0,857	73,765	158,250	13150,700
	Debeli Lug	N	307	285	285	285
		\bar{X}	0,720 b	63,644 c	131,808 b	11103,100 b
		SD	0,043	4,576	13,848	2232,340
		CV%	5,983	7,189	10,506	20,106
		MIN	0,631	49,093	97,290	5965,330
		MAX	0,893	72,183	167,170	17005,200
	Stepin lug	N	237	226	229	223
		\bar{X}	0,678 a	56,529 a	120,541 a	10825,200 b
		SD	0,057	6,765	13,652	1496,260
		CV%	8,396	11,961	11,326	13,822
		MIN	0,544	38,547	52,770	5800,910
		MAX	0,855	72,872	156,420	15761,300
ANOVA	F	55,59	103,53	50,76	21,13	
	p	0,0000	0,000	0,0000	0,0000	

Napomena. Srednje vrednosti sa različitim slovnim oznakama u okviru kolone su međusobno statistički značajno različite u nivou poverenja 95%. Masnim brojkama su označene vrednosti $p < 0,05$.

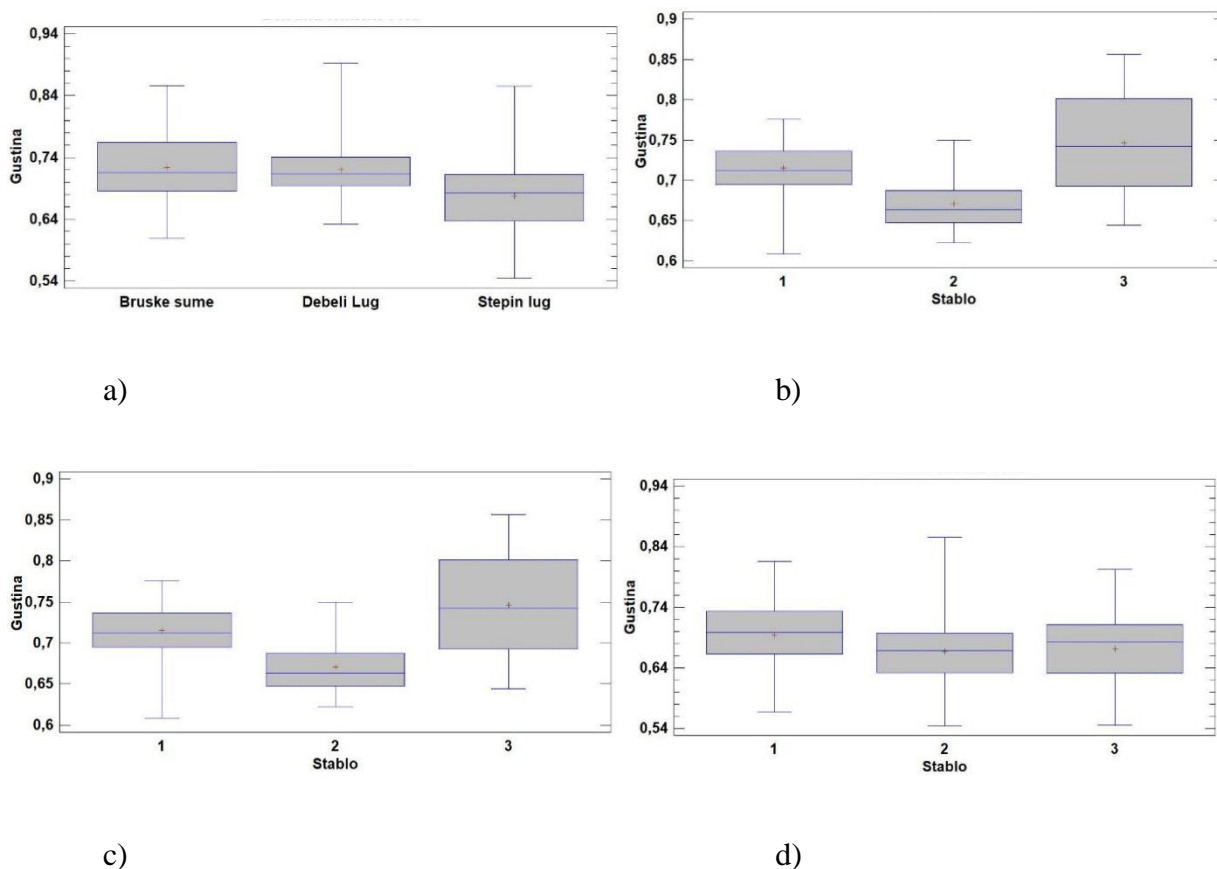
6.2.1 Gustina drveta

Za uzorke uzete sa lokaliteta Bruske šume prosečna vrednost gustine drveta u apsolutno suvom stanju iznosi 0,724 g/cm³, a vrednosti se kreću u opsegu od 0,608 do 0,857 g/cm³, s koeficijentom varijacije 7,587%. Slično tome, u Debelom Lugu srednja vrednost gustine je 0,720 g/cm³, s koeficijentom varijacije 5,983% a vrednosti se kreće u intervalu od 0,631 do 0,893 g/cm³. S druge strane, u Stepinom lugu prosečna gustina je 0,678 g/cm³, i vrednosti se kreću u intervalu od 0,544 do 0,855 g/cm³, s koeficijentom varijacije 8,396%.

Gustina drveta uzorkovanih stabala crvenog hrasta na istraživanim lokalitetima varira od 0,542 g/cm³ (donji trupčić stabla 2 u Stepinom lugu) do 0,887 g/cm³ (gornji trupčić stabla 2 u Debelom Lugu). Prema vrednostima koeficijenta varijacije, ovo svojstvo drveta crvenog hrasta odlikuje se niskim stepenom varijabilnosti (0–10%). Srednje vrednosti gustine drveta kretale su se u opsegu od 0,678 g/cm³ na uzorcima iz Stepinog luga do 0,724 g/cm³ u Bruskim šumama. Iako su numerički ove razlike uočljive, statistička obrada podataka nije pokazala značajnu razliku između lokaliteta, uključujući i Debeli Lug, što ukazuje na relativno ujednačene vrednosti gustine drveta crvenog hrasta u analiziranim uslovima. Analizom varijanse (ANOVA) utvrđena je statistički značajna razlika između srednjih vrednosti gustine drveta stabala na različitim lokalitetima ($p = 0,0000$). Prema LSD testu, obrazovale su se dve homogene grupe. Prvoj grupi pripadaju lokaliteti Debeli Lug i Bruske šume, na kojima je prosečna gustina drveta statistički značajno veća od one ustanovljene na stablima iz Stepinog luga – lokaliteta koji pripada drugoj homogenoj grupi prema ispitivanom svojstvu drveta (Prilog 8 tabela 11).

Najmanja srednja vrednost gustine drveta u Bruskim šumama dobija se na uzorcima stabla 2 (0,671 g/cm³), a najveća na uzorcima stabla 3 (0,746 g/cm³). ANOVA i LSD test pokazuju da postoji statistički značajna razlika između srednjih vrednosti gustine drveta svih triju ispitivanih stabala na ovom lokalitetu ($p = 0,0000$). Ovi nalazi potvrđuju da se varijabilnost gustine drveta ne može posmatrati isključivo na nivou populacija ili staništa, već da značajne razlike postoje i među individuama unutar iste sastojine, što ukazuje na snažan uticaj genetske komponente i fenotipske plastičnosti stabala na formiranje anatomskih i fizičko-mehaničkih svojstava drveta. Kada je reč o Debelom Lugu, najmanja srednja vrednost gustine drveta je na uzorcima stabla 3 (0,689 g/mm³), a najveća na uzorcima stabla 2 (0,752 g/cm³). ANOVA i LSD test takođe pokazuju da postoji statistički značajna razlika između srednjih vrednosti gustine drveta svih triju uzorkovanih stabala

na ovom lokalitetu ($p = 0,0000$). U Stepinom lugu je najmanja srednja vrednost je na uzorcima stabla 2 ($0,668 \text{ g/cm}^3$), a najveća na uzorcima stabla 1 ($0,694 \text{ g/cm}^3$). ANOVA pokazuje da postoji statistički značajna razlika između srednjih vrednosti gustine drveta uzorkovanih stabala ($p = 0,0080$). Prema LSD testu, formirale su se dve homogene grupe. Prvoj grupi pripada stablo 1, čija je prosečna gustina drveta statistički značajno veća od one ustanovljene na stablima 2 i 3 iz druge homogene grupe. Između srednjih vrednosti gustine drveta gornjih i donjih trupčića uzorkovanih stabala na istraživanim lokalitetima ne postoje statistički značajne razlike (rezultati nisu prikazani) (Slika 47).



Slika 47 - Pravougaoni dijagram osnovnih statističkih parametara za gustinu (g/mm^3) i a) za sva tri lokaliteta i b) za stabla sa lokaliteta Bruske šume c) za stabla sa lokaliteta Debeli lug, za stabla sa lokaliteta Stepin lug

Legenda: x u pravougaoniku – srednja vrednost, linija u pravougaoniku – medijana, pravougaonik – gornji i donji kvartil, vertikalne linije – raspon vrednosti

Analizirajući rezultate drugih autora, može se reći da su najčešće citirane vrednosti za gustinu drveta crvenog hrasta u rasponu 0,680–0,720 g/cm³ (Stojkov & Andonova, 2008; Majer, 2015; Zeidler & Boruvka, 2016); stoga su rezultati dobijeni u ovom istraživanju u skladu sa drugim istraživanjima. Prema Reh & Reh (1997) specifična gustina crvenog hrasta pri sadržaju vlage od 12% kreće se u rasponu od 0,550 do 0,980 g/cm³.

Genet (2013) navodi da se gustina drveta crvenog hrasta u prirodnim sastojinama, mereno pri 12% sadržaja vlage, kreće od 0,585 g/cm³ za zonu ranog drveta, 0,887 g/cm³ za zonu kasnog drveta, sa prosečnom vrednošću od 0,760 g/cm³. Za stabla iz veštački podignutih sastojina, isti autor navodi nešto niže vrednosti – 0,542 g/cm³ (rano drvo), 0,807 g/cm³ (kasno drvo), i 0,743 g/cm³ u proseku (pri 12% vlažnosti). Prema Šoškiću *et al.* (2005), gustina drveta crvenog hrasta iznosi 0,740 g/cm³ pri 12% vlažnosti, dok je gustina hrasta kitnjaka 0,665 g/cm³, a hrasta lužnjaka 0,650 g/cm³ (takođe pri 12% vlažnosti). U istraživanju Živanović *et al.* (2022), gustina crvenog hrasta merena pri 12% vlažnosti varirala je između 0,670 i 0,780 g/cm³, sa prosečnom vrednošću oko 0,720 g/cm³ i koeficijentom varijacije od 4%, što se poklapa sa literaturnim podacima (Vansteenkiste *et al.*, 2005; Genet *et al.*, 2013; Zeidler & Boruvka, 2016; Uzcategui *et al.*, 2020). Uzcategui *et al.* (2020) su, takođe pri 12% vlažnosti, izmerili gustinu drveta crvenog hrasta u rasponu od 0,571 do 0,853 g/cm³, sa prosečnom vrednošću od 0,699 g/cm³ i koeficijentom varijacije 8,31%. Klašnja *et al.* (2006) su, međutim, gustinu drveta hrasta lužnjaka određivali u apsolutno suvom stanju (0% vlage) i dobili prosečnu vrednost od 0,673 g/cm³, sa standardnom devijacijom 49,785, minimalnom vrednošću 0,573 g/cm³ i maksimalnom vrednošću 0,769 g/cm³. Ova vrednost se ne može direktno uporediti sa rezultatima dobijenim pri 12% vlažnosti zbog uticaja sadržaja vlage na gustinu drveta. Klašnja *et al.* (2006) dobili su ukupnu srednju vrednost od 0,673 g/cm³ za gustinu apsolutno suvog drveta lužnjaka, sa standardnom devijacijom 49,785,

maksimalnom vrednošću 0,769 g/mm³, a minimalnom vrednošću 0,573 g/cm³. Stablo crvenog hrasta ispitano u istraživanju Živanović *et al.* (2021) ima veću osnovnu gustinu od autohtonih vrsta hrastova za oko 10%. Međutim, to se ne smatra značajnom razlikom. Razlika u prosečnim vrednostima po lokalitetima, tačnije stabla iz Stepinog luga imaju nižu prosečnu vrednost gustine od stabala sa ostalih dvaju lokaliteta, može biti posledica nižih vrednosti učešća kasne zone stabala u Stepinom lugu u odnosu na druge lokalitete.

Udeo kasnog drveta unutar godišnjeg prstena predstavlja jedan od ključnih faktora koji direktno utiče na gustinu drveta kod tvrdih lišćara, uključujući i crveni hrast. Kasno drvo, kao što je poznato, karakterišu maneni lumeni, deblji ćelijski zidovi i veći udeo mehaničkih elemenata u odnosu na rano drvo, što rezultira većom masom drveta po jedinici zapremine. Zbog toga se često ističe da veći procenat kasnog drveta u ukupnoj širini prstena vodi ka višim vrednostima gustine (Zobel & van Buijtenen, 1989; Uzcategui *et al.*, 2020). Kod vrsta kao što je crveni hrast, koje formiraju izražene godove, promena u širini prstena — naročito povećanje dela koji zauzima kasna zona — može reflektovati uslove rasta, starost stabla, kao i unutrašnju adaptaciju na stanišne uslove. S obzirom na to da gustina drveta značajno utiče na mehanička svojstva i finalnu upotrebu u drvnoj industriji, razumevanje strukture prstena i učešća kasne zone postaje ključno za selekciju i procenu kvaliteta drvne sirovine. U kontekstu ovog istraživanja, varijabilnost u procentualnom udelu kasnog drveta između lokaliteta može se povezati sa razlikama u stanišnim uslovima i prirašćivanju, što posredno objašnjava i registrovane razlike u gustini drveta. Takođe, linearna regresiona analiza u radu Živanović *et al.*, (2021) pokazala je da širina kasnog drveta ima značajnu korelaciju sa gustinom drveta, čime se potvrđuje da kasna zona ima dominantan doprinos masi drveta u jedinici zapremine.

Gustina drveta zavisi od dužine i broja mehaničkih elemenata – drvnih vlakana (Šoškić & Popović 2002). Ukupno gledano, najveće vrednosti dužine i debljine ćelijskog zida imali su uzorci sa lokaliteta Debeli Lug, nešto niže vrednosti su zabeležene u Bruskim šumama, a najniže na lokalitetu Stepin lug. Na osnovu broja vlakana po jedinici površine, uzorci sa Stepinog luga pokazali su najniže vrednosti gustine vlakana. Ovakav rezultat u skladu je sa očekivanjima, jer je na ovom lokalitetu ranije utvrđena veća dužina drvnih vlakana, što prema zakonitostima anatomije drveta podrazumeva manju brojnost vlakana po preseku (Zobel & Van Buijtenen, 1989). Duža vlakna zauzimaju više prostora, pa ih je po jedinici površine manje, što objašnjava nižu gustinu vlakana. Time se potvrđuje obrnuto proporcionalna veza između dužine i brojnosti vlakana. U skladu s tim, prosečna gustina drveta u Stepinom lugu ($0,678 \text{ g/cm}^3$) bila je značajno niža nego u Bruskim šumama i Debelom lugu. Ovi nalazi se poklapaju i sa rezultatima anatomskih analiza koje su pokazale da prstenovi prirasta na ovom lokalitetu imaju manji udeo kasne zone i tanje ćelijske zidove, što dodatno doprinosi objašnjenju nižih vrednosti gustine.

Sa stanovišta gazdovanja šumama, uslovi rasta i razvoja drveća su od izuzetnog značaja za formiranje drvnog tkiva, kao i za kvalitet drvene sirovine (Premislovska *et al.*, 2008; Tomczak *et al.*, 2013). Neki od najvažnijih spoljnih faktora koji utiču na uslove rasta i razvoja drveća su tip šumskog staništa, biosocijalni položaj stabla, način gazdovanja, kao i klimatske promene (Makinen & Isomaki, 2004, Munoz *et al.*, 2008). Može se pretpostaviti da niske vrednosti za učešće kasne zone, a samim tim i gustinu drveta, mogu biti posledica lokaliteta. Tako se Stepin lug nalazi na području Beograda, gde je prisutna visoka zagađenost sredine (vazduha, vode i zemljišta), te su ekološki uslovi staništa nepovoljni. Tomczak *et al.* (2020) beleže razlike u širini prstenova prirasta i učešću kasne zone u zavisnosti od lokaliteta. S druge strane, Bareges *et al.* (2008) navode da iako na radijalni rast hrasta kitnjaka snažno utiču klima, zemljište i reljef, to nije

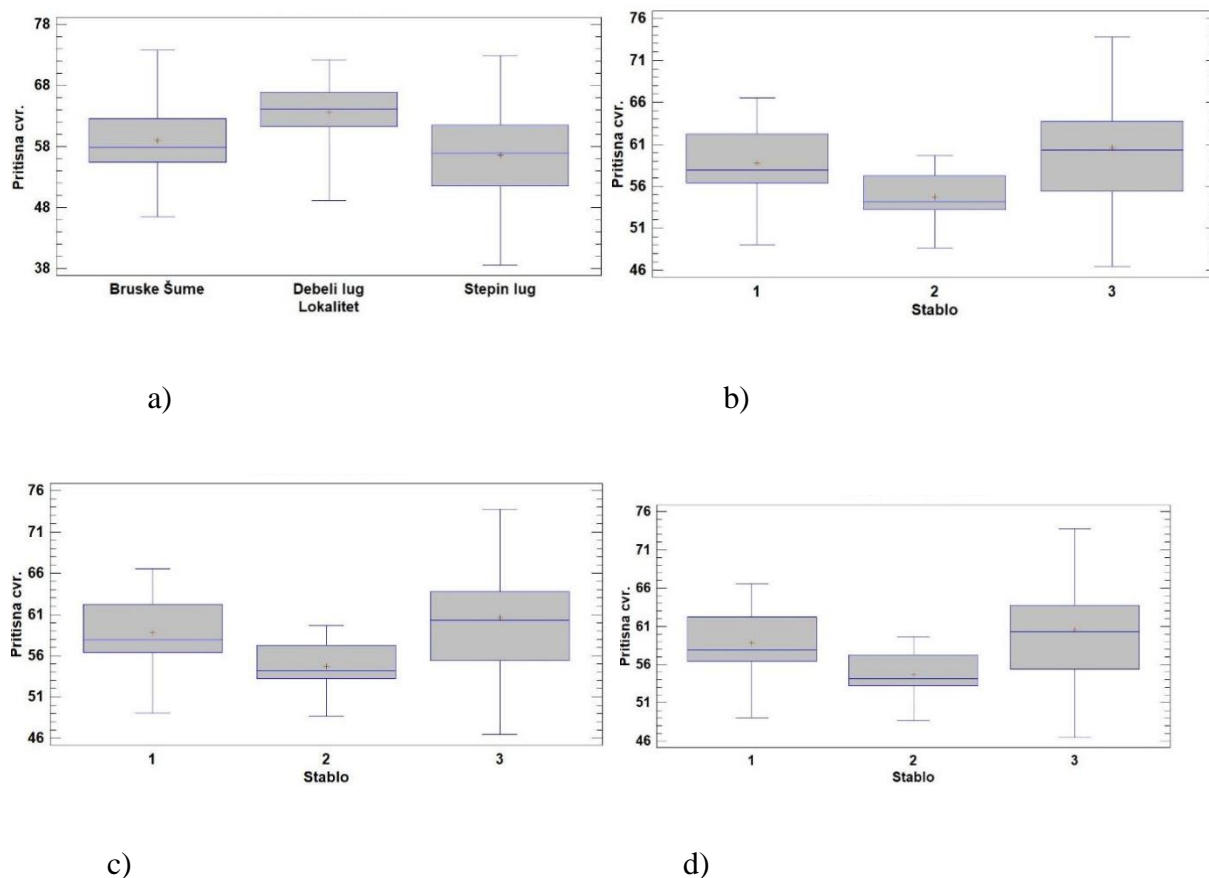
slučaj sa gustinom drveta ove vrste. Istraživanja uticaja ekoloških faktora na gustinu hrasta kitnjaka ili lužnjaka dale su oštro suprotstavljene rezultate sugerišući da su efekti faktora koji utiču na varijabilnost drveta zapravo složeniji od očekivanih (Bareges *et al.*, 2008).

6.2.2 Čvrstoća na pritisak paralelno sa vlakancima (H_p), modul elastičnosti pri savijanju (MOE) i čvrstoća na savijanje (MOR)

Pritisna čvrstoća uzorkovanih stabala crvenog hrasta na istraživanim lokalitetima kreće se od 38,551 MPa (gornji trupčić stabla 2 u Stepinom lugu) do 73,756 MPa (gornji trupčić stabla 3 u Bruskim šumama). Prema vrednostima koeficijenta varijacije, ovo svojstvo drveta crvenog hrasta odlikuje se niskim do umerenim stepenom varijabilnosti (0–10% i 10–20%). Najmanja srednja vrednost pritisne čvrstoće drveta beleži se na uzorcima stabala u Stepinom lugu (56,529 MPa), a najveća na uzorcima stabala u Debelom Lugu (63,644 MPa). Analizom varijanse (ANOVA) utvrđena je statistički značajna razlika između srednjih vrednosti pritisne čvrstoće drveta stabala na različitim lokalitetima ($p = 0,0000$). Prema LSD testu, obrazovale su se tri homogene grupe. Prvoj grupi pripada lokalitet Debeli Lug, na kojem je prosečna pritisna čvrstoća drveta statistički značajno veća od one ustanovljene na stablima iz Bruskih šuma (druga homogena grupa) i Stepinog luga (treća homogena grupa).

Pritisna čvrstoća drveta stabala na lokalitetu Bruske šume ima raspon vrednosti od 46,453 MPa (donji trupčić stabla 3) do 73,765 MPa (gornji trupčić stabla 3). Prema vrednostima koeficijenta varijacije, ovo svojstvo drveta crvenog hrasta u Bruskim šumama odlikuje se niskim stepenom varijabilnosti (0–10%). Najmanja srednja vrednost pritisne čvrstoće drveta dobija se na uzorcima stabla 2 (54,673 MPa), a najveća na uzorcima stabla 3 (60,584 MPa). ANOVA pokazuje da postoji statistički značajna razlika između srednjih vrednosti pritisne čvrstoće drveta ispitivanih stabala na ovom lokalitetu ($p = 0,0006$). Prema LSD testu, obrazovale su se dve homogene grupe.

Prvoj grupi pripadaju stabla 1 i 3, čija je prosečna pritisna čvrstoća drveta statistički značajno veća od one ustanovljene na stablu 2 iz Bruskih šuma (Slika 48).



Slika 48 - Pravougaoni dijagram osnovnih statističkih parametara za pritisnu čvrstoću (MPa) i a) za sva tri lokaliteta i b) za stabla sa lokaliteta Bruske šume c) za stabla sa lokaliteta Debeli lug, za stabla sa lokaliteta Stepin lug. Legenda: x u pravougaoniku – srednja vrednost, linija u pravougaoniku – medijana, pravougaonik – gornji i donji kvartil, vertikalne linije – raspon vrednosti

Pritisna čvrstoća drveta stabala na lokalitetu Debeli Lug varira od 49,093 MPa do 72,183 MPa (obe vrednosti izmerene za gornji trupčić stabla 1). Prema vrednostima koeficijenta varijacije, ovo svojstvo drveta crvenog hrasta u Debelom Lugu ima nizak stepen varijabilnosti (0–10%). Najmanja srednja vrednost pritisne čvrstoće drveta dobija se na uzorcima stabla 2 (62,569 MPa), a najveća na uzorcima stabla 1 (64,631 MPa). ANOVA pokazuje da postoji statistički značajna

razlika između srednjih vrednosti pritisne čvrstoće drveta uzorkovanih stabala na ovom lokalitetu ($p = 0,0046$). Prema LSD testu, obrazovale su se dve homogene grupe, pri čemu između grupa postoji jednostruko preklapanje. Prvoj grupi pripadaju stabla 1 i 3, čija je prosečna pritisna čvrstoća drveta statistički značajno veća od one ustanovljene na stablu 2 iz Debelog Luga.

Najmanja ustanovljena pritisna čvrstoća drveta stabala na lokalitetu Stepin lug iznosi 38,547 MPa (gornji trupčić stabla 2), a najveća – 72,872 MPa (donji trupčić stabla 1). U skladu sa vrednostima koeficijenta varijacije, istraživano svojstvo drveta crvenog hrasta u Stepinom lugu karakteriše se umerenim stepenom varijabilnosti (10–20%). Najmanja srednja vrednost beleži se na uzorcima stabla 3 (55,478 MPa), a najveća na uzorcima stabla 1 (57,714 MPa). ANOVA pokazuje da ne postoji statistički značajna razlika između srednjih vrednosti pritisne čvrstoće drveta uzorkovanih stabala na ovom lokalitetu ($p = 0,1164$). Između srednjih vrednosti pritisne čvrstoće drveta gornjih i donjih trupčića uzorkovanih stabala na istraživanim lokalitetima ne postoje statistički značajne razlike (rezultati nisu prikazani).

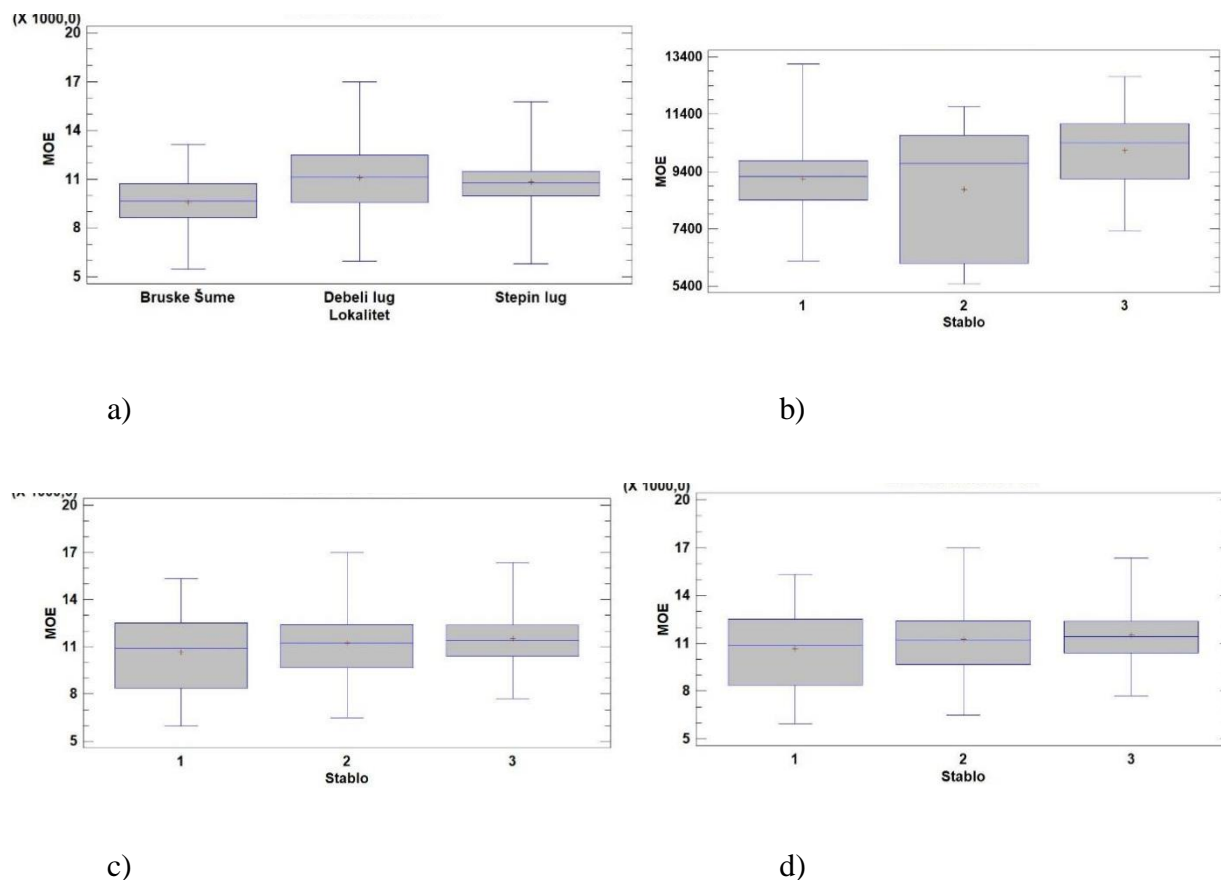
Ukupno gledano za sva tri lokaliteta i sva ispitana stabla, pritisna čvrstoća paralelno sa vlaknima u proseku iznosi 60,258 MPa, s koeficijentom varijacije 10,829% i kreće se u opsegu od 38,547 MPa do 73,765 MPa.

Za crveni hrast, Živanović *et al.* (2022) navode vrednosti čvrstoće na pritisak paralelno sa vlaknima od 53,15 MPa do 75,75 MPa, s prosečnom vrednošću od 64,43 MPa, što je neznatno viša vrednost od one dobijene u istraživanju na lokalitetu Debeli Lug. Uzcategui *et al.* (2020) su dobili veoma bliske vrednosti za ovu vrstu u jugoistočnom delu SAD i one su se kretale od 47 do 80 MPa, s prosečnom vrednošću oko 61 MPa. Navedena vrednost u potpunosti odgovara prosečnoj vrednosti dobijenoj za sva ispitivana stabla sa svih triju lokaliteta u našem istraživanju. Green & McDonald (2007) navode nešto niže vrednosti za pritisnu čvrstoću od oko 33,92 do 43,02 MPa.

Ove vrednosti su prilično niske i odgovaraju minimalnim vrednostima našeg istraživanja. Šoškić & Popović (2002) daju podatke za pritisnu čvrstoću, i to minimalnu vrednost 54 MPa, maksimalnu vrednost 67 MPa i srednju vrednost 61 MPa za hrast lužnjak, kao i minimalnu vrednost 48 MPa, maksimalnu vrednost 70 MPa i srednju vrednost 65 MPa za hrast kitnjak. Prema literaturi, čvrstoća na pritisak paralelno sa vlakancima za sladun prosečno iznosi 67,60 (Popović & Todorović 2007). Čvrstoća drveta na pritisak ostalih vrsta roda *Quercus*, prema Šoškiću & Popoviću (2002), prosečno iznosi 61 MPa. Sve navedene literaturne vrednosti su prilično slične vrednostima dobijenim u ovom istraživanju; stoga, može se konstatovati da je pritisna čvrstoća drveta crvenog hrasta na području Srbije oko 60 MPa.

MOE uzorkovanih stabala crvenog hrasta na istraživanim lokalitetima varira od 5470,790 MPa (gornji trupčić stabla 2 u Bruskim šumama) do 17005,200 MPa (gornji trupčić stabla 2 u Debelom Lugu). Prema vrednostima koeficijenta varijacije, ovo svojstvo drveta crvenog hrasta odlikuje se umerenim stepenom varijabilnosti (10–20%). Najmanja srednja vrednost MOE beleži se na uzorcima stabala u Bruskim šumama (9578,531 MPa), a najveća na uzorcima stabala u Debelom Lugu (11103,102 MPa). Analizom varijanse (ANOVA) utvrđena je statistički značajna razlika između srednjih vrednosti MOE stabala na različitim lokalitetima ($p = 0,0000$). Prema LSD testu, obrazovale su se dve homogene grupe. Prvoj grupi pripadaju lokaliteti Debeli Lug i Stepin lug, na kojima je prosečni MOE statistički značajno veći od onog ustanovljenog na stablima iz Bruskih šuma. MOE stabala na lokalitetu Bruske šume imao je raspon vrednosti od 5470,790 MPa (gornji trupčić stabla 2) do 13150,700 MPa (donji trupčić stabla 1). Prema vrednostima koeficijenta varijacije, ovo svojstvo drveta crvenog hrasta u Bruskim šumama odlikuje se umerenim do visokim stepenom varijabilnosti (10–20% i 20–30%). Najmanja srednja vrednost MOE dobija se na uzorcima stabla 2 (8763,950 MPa), a najveća na uzorcima stabla 3 (10128,200

MPa). ANOVA pokazuje da postoji statistički značajna razlika između srednjih vrednosti MOE ispitivanih stabala na ovom lokalitetu ($p = 0,0060$). Prema LSD testu, obrazovale su se dve homogene grupe. Prvoj grupi pripada stablo 3, čiji je prosečni MOE statistički značajno veći od onog ustanovljenog za stabla 1 i 2 iz Bruskih šuma.



Slika 49 - Pravougaoni dijagram osnovnih statističkih parametara MOE (MPa) i a) za sva tri lokaliteta i b) za stabla sa lokaliteta Bruske šume c) za stabla sa lokaliteta Debeli lug, za stabla sa lokaliteta Stepin lug

Legenda: x u pravougaoniku – srednja vrednost, linija u pravougaoniku – medijana, pravougaonik – gornji i donji kvartil, vertikalne linije – raspon vrednosti

MOE stabala na lokalitetu Debeli Lug varira od 5965,331 MPa (gornji trupčić stabla 1) do 17005,200 MPa (gornji trupčić stabla 2). Prema vrednostima koeficijenta varijacije, ovo svojstvo drveta crvenog hrasta u Debelom Lugu ima umeren do visok stepen varijabilnosti (10–20% i 20–30%). Najmanja srednja vrednost MOE beleži se na uzorcima stabla 1 (10660,100 MPa), a najveća

na uzorcima stabla 3 (11535,600 MPa). ANOVA pokazuje da postoji statistički značajna razlika između srednjih vrednosti MOE uzorkovanih stabala na ovom lokalitetu ($p = 0,0213$). Prema LSD testu, obrazovale su se dve homogene grupe. Prvoj grupi pripadaju stabla 3 i 2, čiji je prosečni MOE statistički značajno veći od onog ustanovljenog na stablu 1 iz Debelog Luga.

Najmanji ustanovljeni MOE stabala na lokalitetu Stepin lug iznosi 5800,910 MPa (gornji trupčić stabla 2), a najveći – 15761,300 MPa (gornji trupčić stabla 3). U skladu sa vrednostima koeficijenta varijacije, ispitivano svojstvo drveta crvenog hrasta u Stepinom lugu karakteriše se umerenim stepenom varijabilnosti (10–20%). Najmanja srednja vrednost je na uzorcima stabla 2 (10160,700 MPa), a najveća na uzorcima stabla 3 (11188,200 MPa). ANOVA pokazuje da postoji statistički značajna razlika između srednjih vrednosti MOE uzorkovanih stabala na ovom lokalitetu ($p = 0,0000$). Prema LSD testu, obrazovale su se dve homogene grupe. Prvoj grupi pripadaju stabla 1 i 3, čiji je prosečni MOE statistički značajno veći od onog ustanovljenog na stablu 2 iz Stepinog luga.

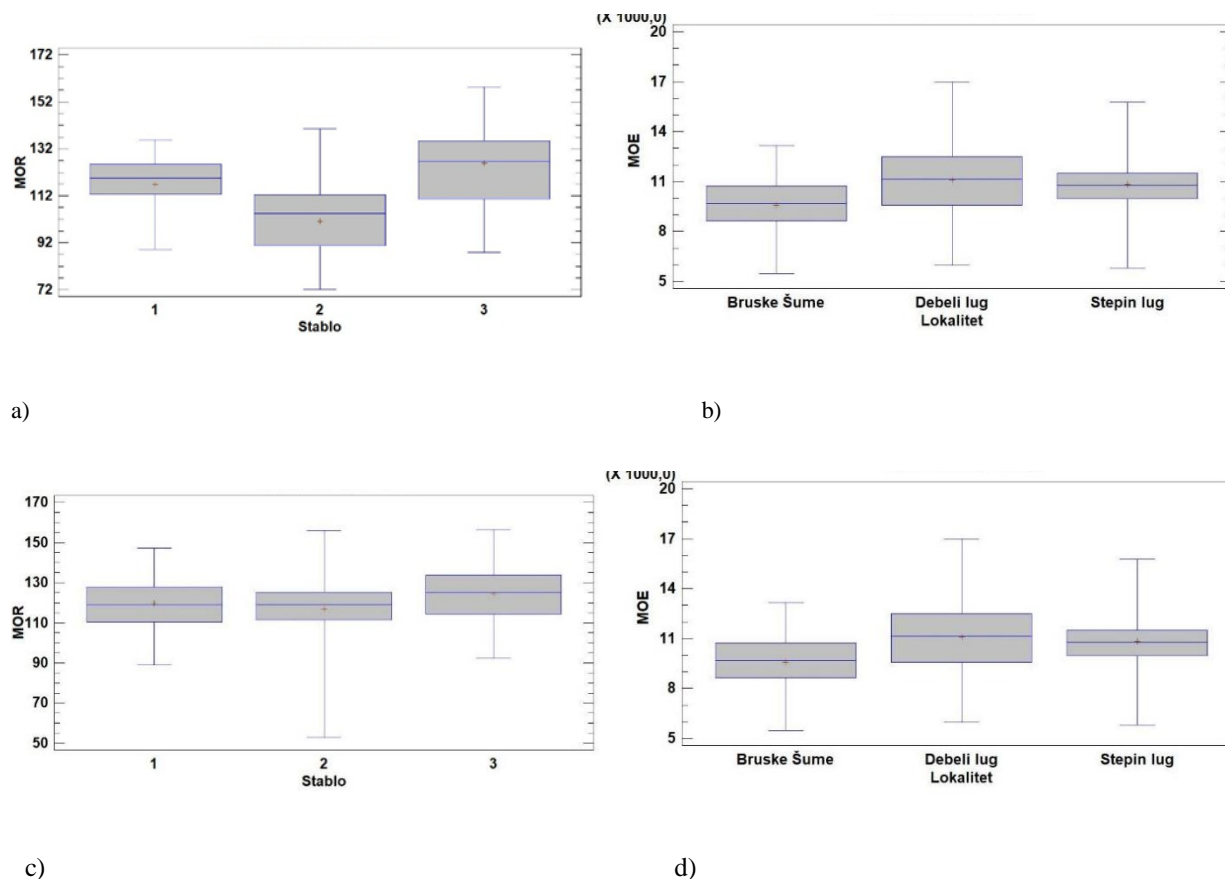
Između srednjih vrednosti MOE gornjih i donjih trupčića uzorkovanih stabala na istraživanim lokalitetima ne postoje statistički značajne razlike (rezultati nisu prikazani).

MOR uzorkovanih stabala crvenog hrasta na istraživanim lokalitetima kreće se od 52,770 MPa (gornji trupčić stabla 2 u Stepinom lugu) do 167,170 MPa (gornji trupčić stabla 2 u Debelom Lugu).

Prema vrednostima koeficijenta varijacije, ovo svojstvo drveta crvenog hrasta odlikuje se umerenim stepenom varijabilnosti (10–20%). Najmanja srednja vrednost MOR određena je na uzorcima stabala u Bruskim šumama (118,416 MPa), a najveća na uzorcima stabala u Debelom Lugu (131,808 MPa). Analizom varijanse (ANOVA) utvrđena je statistički značajna razlika

između srednjih vrednosti MOR stabala na različitim lokalitetima ($p = 0,0000$). Prema LSD testu, obrazovale su se dve homogene grupe. Prvoj grupi pripada lokalitet Debeli Lug na kome je srednja vrednost MOR stabala statistički značajno veća od one ustanovljene na stablima iz Stepinog luga i Bruskih šuma.

MOR stabala na lokalitetu Bruske šume ima raspon vrednosti od 72,150 MPa (gornji trupčić stabla 2) do 158,250 MPa (donji trupčić stabla 3). Prema vrednostima koeficijenta varijacije, ovo svojstvo drveta crvenog hrasta u Bruskim šumama odlikuje se umerenim stepenom varijabilnosti (10–20%). Najmanja srednja vrednost MOR je na uzorcima stabla 2 (101,144 MPa), a najveća na uzorcima stabla 3 (125,822 MPa). ANOVA i LSD test pokazuju da postoji statistički značajna razlika između srednjih vrednosti MOR svih triju ispitivanih stabala na ovom lokalitetu ($p = 0,0000$). MOR stabala na lokalitetu Debeli Lug varira od 97,290 MPa (donji trupčić stabla 2) do 167,170 MPa (gornji trupčić stabla 2). Prema vrednostima koeficijenta varijacije, ovo svojstvo drveta crvenog hrasta u Debelom Lugu ima nizak do umeren stepen varijabilnosti (0–10% i 10–20%). Najmanja srednja vrednost MOR dobija se na uzorcima stabla 3 (128,710 MPa), a najveća na uzorcima stabla 2 (134,122 MPa). ANOVA pokazuje da postoji statistički značajna razlika između srednjih vrednosti MOR uzorkovanih stabala na ovom lokalitetu ($p = 0,0387$). Prema LSD testu, obrazovale su se dve homogene grupe ali sa jednostrukim preklapanjem. Prvoj grupi pripadaju stabla 2 i 1, pri čemu je prosečna vrednost MOR stabla 2 statistički značajno veća od neustanovljene na stablu 3 iz Debelog Luga.



Slika 50- Pravougaoni dijagram osnovnih statističkih parametara za MOR (MPa) i a) za sva tri lokaliteta i b) za stabla sa lokaliteta Bruske šume c) za stabla sa lokaliteta Debeli lug, za stabla sa lokaliteta Stepin lug

Legenda: x u pravougaoniku – srednja vrednost, linija u pravougaoniku – medijana, pravougaonik – gornji i donji kvartil, vertikalne linije – raspon vrednosti

Najmanji ustanovljeni MOR stabala na lokalitetu Stepin lug iznosi 52,770 MPa (gornji trupčić stabla 2), a najveći – 156,420 MPa (gornji trupčić stabla 3). U skladu sa vrednostima koeficijenta varijacije, istraživano svojstvo drveta crvenog hrasta u Stepinom lugu karakteriše se niskim do umerenim stepenom varijabilnosti (0–10% i 10–20%). Najmanja srednja vrednost određena je na uzorcima stabla 2 (116,770 MPa), a najveća na uzorcima stabla 3 (124,387 MPa). ANOVA pokazuje da postoji statistički značajna razlika između srednjih vrednosti MOR uzorkovanih stabala na ovom lokalitetu ($p = 0,0020$). Prema LSD testu, obrazovale su se dve

homogene grupe. Prvoj grupi pripada stablo 3, čiji je prosečni MOR statistički značajno veći od onog ustanovljenog na stablima 1 i 2 iz Stepinog luga.

Između srednjih vrednosti MOR gornjih i donjih trupčica uzorkovanih stabala na istraživanim lokalitetima ne postoje statistički značajne razlike (rezultati nisu prikazani).

U istraživanju Živanović *et al.* (2022), među analiziranim svojstvima drveta, MOE ima najveći koeficijent varijacije (21,32%). Ipak, srednja vrednost (7381,5 MPa) bila je niža od one vrednosti koje su naveli drugi autori (Uzategui *et al.* 2020). Vrednost MOE za stabla crvenog hrasta iz Lipovičke šume je takođe prilično niska i niža je od prosečnih vrednosti sa svih lokaliteta u ovom istraživanju. U Bruskim šumama vrednost MOE u proseku iznosi 9578,53 MPa i kreće se u rasponu od 5470,79 do 13150,7 MPa, s koeficijentom varijacije 17,75%, što je lokalitet sa najnižom srednjom vrednošću MOE. S druge strane, u istraživanju Živanović *et al.* (2022) na stablu crvenog hrasta iz Lipovičke šume MOR je imao srednju vrednost (102,23 MPa) koja je približna vrednostima navedenim u literaturi, ali ipak niža u poređenju sa vrednostima za stabla ostalih dvaju lokaliteta u ovom istraživanju (Bruske šume 118,42 MPa, Debeli lug 131,81 MPa, Stepin lug 120,54 MPa). Na primer, Vansteenkiste *et al.* (2005) su dobili vrednost 12500 MPa za MOE i 99 MPa za MOR. Vang & Allison (2008) su dobili 9810 MPa za MOE i 62,1MPa za MOR. Uzategui *et al.* (2020) su dobili 12211 MPa za MOE i 120 MPa za MOR. Turkot *et al.* (2020) objavio je rezultate za MOE crveni i beli hrast, gde se MOE kretao od 11148 do 11475 Mpa, a MOR od 112,68 do 113,87 MPa. Modul elastičnosti za sva ispitivana stabla u našem istraživanju u proseku iznosi 10778,0 MPa i kreće se u rasponu 5470,79–17005,2 MPa, s koeficijentom varijacije 18,32%. Zatim, savojna čvrstoća u proseku iznosi 125,56 MPa, nalazi se u opsegu od minimalnih 52,77 MPa do maksimalnih 167,17 MPa a koeficijent varijacije za ovo svojstvo je 12,48%. Svi ovi rezultati su u skladu sa navodima drugih autora u literaturi. Ako uporedimo ova

svojstva crvenog hrasta sa drugim komercijalnim vrstama hrasta u Srbiji (npr, lužnjak i kitnjak), može se primetiti da su srednje vrednosti vrlo bliske vrednostima dobijenim u ovom istraživanju. Na primer, Horvat (2020) navodi vrednosti pritiskne čvrstoće paralelno sa vlakancima od 50 MPa do 180 MPa i srednju vrednost oko 90 MPa, vrednosti MOE 11700 MPa i vrednosti MOR od 60 MPa do 100 MPa i srednju vrednost oko 94 MPa za hrast lužnjak. Za hrast kitnjak pritiskna čvrstoća paralelno sa vlaknima kod istog autora iznosi kao i za lužnjak (50–180 MPa, sa srednjom vrednošću oko 90 MPa) MOR je 60–100 MPa sa srednjom vrednošću oko 94 MPa, dok je MOE nešto veći kod kitnjaka i iznosi oko 13000 MPa. Za drvo hrasta sladuna MOR prosečno iznosi 135,30 (94,37–170,64) MPa, a MOE 9379,90 (7154,77-12690,82) MPa (Popović, Todorović 2007). Prema Šoškiću & Popoviću (2002) prosečna vrednost MOR za hrast lužnjak iznosi 115MPa, a za hrast kitnjak, a prema Šoškić *et al.* (2005), prosečan MOR iznosi oko 110 MPa. Na osnovu svega navedenog, može se konstatovati da crveni hrast sa teritorije naše zemlje ima približno jednake, ili čak nešto veće, prosečne vrednosti modula elastičnosti i savojne čvrstoće – modula loma, što ga može svrstati u ekonomski značajnu vrstu za preradu drveta.

6.3 Analiza svojstava drveta crvenog hrasta merena fraktometrom

6.3.1 Čvrstoća na savijanje izvrtaka

Prilikom testiranja savojne čvrstoće izvrtaka (σ_{sf}) na lokalitetu Bruske šume dobija se srednja vrednost 9,39 MPa, sa opsegom od minimalnih 3 MPa do maksimalnih 21 MPa. Koeficijent varijacije iznosi 46%. U Debelom lugu ova vrednost iznosi u proseku 9,98 MPa, od minimalnih 3 MPa do maksimalnih 23 MPa, dok je u Stepinom lugu srednja vrednost savojne čvrstoće izvrtka iznosi 8,51 MPa, u opsegu od 2–15 MPa (Tabela 13).

Tabela 13 – Čvrstoća na savijanje izvrtka [MPa] drveta crvenog hrasta dobijenog pomoću fraktometra na tri lokaliteta u Srbiji

	Bruske šume	Debeli Lug	Stepin Lug
\bar{X}	9,39	9,98	8,51
SD	4,33	4,88	3,24
CV (%)	46,10	48,94	38,11
MIN	3,00	3,00	2,00
MAX	21,00	23,00	15,00
opseg	18,00	20,00	13,00

Kada se posmatraju srednje vrednosti savojne čvrstoće u odnosu na kardinalne pravce i lokalitete može se primetiti da su dobijene vrednosti vrlo ujednačene. Za lokalitet Bruske šume najniža prosečna vrednost savojne čvrstoće izvrtka beleži se sa zapadne strane, a najviša sa istočne strane. Koeficijenti varijacije su vrlo visoki (40–52%).

Posmatrajući po visini stabla dobijene srednje vrednosti za lokalitet Bruske šume su prilično ujednačene, osim kod izvrtaka iz gornjih delova stabala sa zapadne strane gde je ova vrednost nešto niža u odnosu na ostale i iznosi 6,74 MPa. Najvišu vrednost savojne čvrstoće imaju izvrci iz gornjih delova stabala sa istočne strane i ona iznosi 9,78 MPa (Prilog 9 tabela 12).

Na lokalitetu Debeli lug prosečne vrednosti savojne čvrstoće izvrtka su nešto veće nego na prethodnom lokalitetu, ali vrlo ujednačene i kreću se od 8,68 MPa sa zapadne strane do 11,73 MPa sa severne strane stabla (Prilog 10 tabela 13). Koeficijenti varijacije i su takođe prilično visoki (35–50%).

Na lokalitetu Stepin lug prosečne vrednosti savojne čvrstoće izvrtka iznose 8,13 MPa (sa severne strane) do 9,27 MPa (sa zapadne strane) (Prilog 11 tabela 14). U poređenju sa drugim lokalitetima, vrednosti koeficijenta varijacije su na ovom lokalitetu nešto niže i kreću se od 30 do 42%. Na lokalitetu Stepin lug nema značajnih razlika srednjih vrednosti pritisne čvrstoće po visini stabala u odnosu na kardinalne pravce.

Živanović *et al.* (2022) su na lokalitetu Lipovičke šume dobili prosečnu vrednost čvrstoće na savijanje $19,3 \text{ N/mm}^2$, s koeficijentom varijacije 17%. Ova vrednost je skoro dvostruko veća od vrednosti dobijene na sva tri lokaliteta u našem istraživanju. Razlog se može naći u uticaju strukture prstena prirasta, odnosno učešća zone kasnog drveta, o čemu će biti više reči kasnije.

6.3.2 Ugao loma izvrtaka

Ugao loma Ba F [°] testiran je pri određivanju savojne čvrstoće izvrtka. U Bruskim šumama prosečno iznosi $15,63^\circ$, sa opsegom od 8 do 22° i koeficijentom varijacije 20,09%. Ova vrednost za lokalitet Debeli lug iznosi minimalno 8 , a maksimalno 29° , sa prosekom od $17,84^\circ$ i koeficijentom varijacije 24,16%, dok za Stepin lug vrednost ugla loma izvrtka u proseku iznosi $18,06^\circ$, u rasponu od 10 do 32° , i koeficijentom varijacije 18,06% (Tabela 14).

Tabela 14 – Ugao loma izvrtka[°] drveta crvenog hrasta na tri lokaliteta u Srbiji

	Bruske šume	Debeli Lug	Stepin Lug
\bar{X}	15,63	17,84	18,06
SD	3,14	4,31	4,36
CV (%)	20,09	24,16	24,15
MIN	8,00	8,00	10,00
MAX	22,00	26,00	32,00
opseg	14,00	18,00	22,00

Kada se posmatraju izvrci po kardinalnim pravcima i po lokalitetima, u Bruskim šumama ugao loma ima najnižu srednju vrednost na istočnoj strani koja iznosi $14,11^\circ$, dok najveći prosečan ugao loma od $17,36^\circ$ ima severni izvrtak. Koeficijenti varijacije iznose od 25% do 28%. Mathenu i Clark (1999) navode da je srednja vrednost ugla loma za drvo crvenog hrasta $16,70^\circ$, što je u skladu sa rezultatima dobijenim u ovom istraživanju. U istraživanju Živanović *et al.* (2022), na stablu sa lokaliteta Lipovičke šume, srednja vrednost ugla loma iznosila je $21,5^\circ$, što je nešto veća vrednost od srednjih vrednosti ugla loma dobijenih za tri lokaliteta u ovom istraživanju.

Kada se posmatraju vrednosti ugla loma u donjem i gornjem delu stabla u kardinalnim pravcima, ne uočavaju se značajnije razlike. Srednje vrednosti ugla loma kreću se od $14,11^\circ$ na izvrtku sa istočne strane stabla iz donjih delova do $17,36^\circ$ na severnoj strani gornjih delova.

U Debelom lugu vrednosti ugla loma po poprečnom preseku su ujednačenije u odnosu na lokalitet Bruske šume, razlike su neznatne i najnižu srednju vrednost od $17,57^\circ$ ima izvrtak sa južne strane stabla, a najvišu od $18,61^\circ$ ima zapadni izvrtak. Koeficijent varijacije kreće se u rasponu od 21% do 28%. Na graficima su prikazane promene ugla loma duž izvrtaka za sve četiri kardinalne strane na obe analizirane visine (Prilog 12 tabela 15).

U Debelom Lugu najmanju srednju vrednost ugla loma imaju izvrci sa istočne strane iz donjih delova stabala i ona iznosi $15,875^\circ$, a najvišu, od $20,846^\circ$, izvrci iz gornjih delova stabla, takođe sa istočne strane. Na ovom lokalitetu se može primetiti da postoje izvesne razlike u srednjim vrednostima ugla loma sa istočne i zapadne strane, gde su u gornjim delovima stabala one veće za 25–30%, dok sa severne i južne strane nema značajnih razlika među ovim vrednostima (Prilog 13 tabela 16).

Na lokalitetu Stepin lug najnižu srednju vrednost ugla loma pokazuje izvrtak sa zapadne strane stabla i ona iznosi $17,03^\circ$, dok najvišu srednju vrednost ugla loma beleži izvrtak sa južne strane – $19,18^\circ$. Koeficijent varijacije kreće se od 23% do 26%.

Rezultati deskriptivne statistike za lokalitet Stepin lug, po visini stabla u sva četiri kardinalna pravca, prikazani su u tabeli 23. U analizi po visini stabla nisu primećene velike razlike u vrednostima ugla loma. Najnižu srednju vrednost imaju izvrci sa zapadne strane iz donjeg dela stabla i ona iznosi $17,3^\circ$, a najvišu, od $20,993^\circ$, izvrci sa južne strane iz gornjih delova stabala

(Prilog 14 tabela 17). Na graficima je prikazana promena ugla loma duž izvrtka u sve četiri kardinalna pravca (grafik 10, 11 i 12 u prilogu).

Na osnovu prikazanih rezultata se primećuje da su vrednosti ugla loma ujednačene na lokalitetima i da nema razlika između ovih vrednosti na različitim stranama sveta. Vidi se trend opadanja vrednosti u zoni juvenilnog drveta i srži. Isto tako, postoje samo neznatne razlike u gornjim delovima stabala, gde su primećene veće vrednosti ugla loma izvrtaka nego u donjim, ali koje ne prelaze 30%.

6.3.3 Čvrstoća na pritisak izvrtaka paralelno sa vlaknima

Čvrstoća na pritisak izvrtka u Bruskim šumama iznosi u proseku 35,61 MPa, u opsegu od 23,40 do 46,00 MPa i koeficijentom varijacije 13,95%. Ova vrednost za lokalitet Debeli lug je minimalnih 22,00 a maksimalnih 46,60 MPa, sa prosekom 37,83 MPa i koeficijentom varijacije 12,72%, dok je za Stepin lug čvrstoća na pritisak izvrtka u proseku 33,02 MPa, u rasponu od 17,00 MPa do 43,75 MPa i koeficijentom varijacije 16,66% (tabela 15).

Tabela 15 – Čvrstoća na pritisak izvrtka paralelno sa vlaknima [MPa] drveta crvenog hrasta na tri lokaliteta u Srbiji

	Bruske šume	Debeli Lug	Stepin Lug
\bar{X}	35,61	37,83	33,02
SD	4,9679	4,81002	5,5027
CV (%)	13,95	12,72	16,66
MIN	23,40	22,00	17,00
MAX	46,00	46,60	43,75
opseg	22,60	24,60	26,75

Kada se uzmu obzir četiri kardinalna pravca, ne primećuju se velike razlike između vrednosti pritisne čvrstoće. U Bruskim šumama srednje vrednosti kreću se od najnižih 34,81MPa na severnoj strani do najviših 36,19 MPa na južnoj strani. Koeficijenti varijacije su isto tako prilično ujednačeni po kardinalnim pravcima i kreću se od 16% do 19%.

Srednje vrednosti pritisne čvrstoće u donjim i gornjim delovima stabla su približne i među njima se ne uočavaju vidne razlike na ovom lokalitetu. Najvišu srednju vrednost pritisne čvrstoće imaju izvrci sa istočne strane iz donjih delova stabala i ona iznosi 38,559 MPa, a najmanju izvrci sa zapadne strane donjih delova stabala u prsnoj zoni i ona iznosi 33,353 MPa. Rezultati deskriptivne analize za pritisnu čvrstoću na lokalitetu Bruske šume, po kardinalnim pravcima i po visini stabla, dati su u Prilogu 15 tabeli 18.

Na lokalitetu Debeli lug prosečne pritisne čvrstoće po kardinalnim pravcima variraju od najniže - 36,21 MPa i to sa zapadne strane do najviše - 39,74 MPa sa južne strane. Koeficijenti varijacije iznose od 14% do 17%. U poređenju sa drugim lokalitetima, vrednosti pritisne čvrstoće su ovde najviše. Isto tako, one su i najujednačenije, o čemu govori i unekoliko niži koeficijent varijacije u odnosu na druga dva lokaliteta. Ovo se može videti i na grafičkom prikazu rezultata (grafici u prilogu 16).

Deskriptivna analiza srednjih vrednosti pritisne čvrstoće po visini stabala i kardinalnim pravcima prikazana je u tabeli 26. Vrednosti se kreću od najnižih 34,886 MPa, u gornjim delovima stabala sa istočne strane, do najviših 39,888 MPa, u gornjim delovima stabala sa južne strane. Na ovom lokalitetu se može primetiti da postoje izvesne razlike u odnosu na strane sveta, te da izvrci sa severne i južne strane imaju unekoliko veće vrednosti od istočnih i zapadnih izvrtaka, ali ove razlike ne prelaze 15% (Prilog 16 tabela 19).

U Stepinom lugu prosečne vrednosti za pritisnu čvrstoću izvrtka u odnosu na strane sveta iznose od najniže 31,62 MPa sa severne strane do 34,14 MPa sa istočne strane. Koeficijent varijacije kreće se od 16% do 19%. Primećuje se da su vrednosti pritisne čvrstoće izvrtka najniže na lokalitetu Stepin lug, što je u skladu sa prethodnim rezultatima, prema kojima su stabla sa ovog lokaliteta najslabijih mehaničkih svojstva drveta. Na graficima je prikazana promena pritisne

čvrstoće izvrtaka paralelno sa vlaknima od kore ka srži za sva četiri kardinalna pravca (grafici u prilogu 17).

Na lokalitetu Stepin lug srednja vrednost pritisne čvrstoće, posmatrano po visini stabla, najniža je u gornjim delovima stabala, sa severne strane, i iznosi 30,864 MPa, dok je najviša u gornjim delovima sa istočne strane stabala i iznosi 36 MPa. U tabeli 27 su prikazane ostale vrednosti deskriptivne statistike pritisne čvrstoće izvrtaka na lokalitetu, posmatrano po visini stabla i u odnosu na kardinalne pravce (Prilog 17 tabela 20).

U poređenju sa drugim lokalitetima, vrednosti pritisne čvrstoće izvrtaka su najniže na ovom lokalitetu, što je u skladu sa ostalim rezultatima istraživanja, koji su pokazali da stabla sa Stepinog luga imaju najslabija fizičko-mehanička svojstva, o čemu je bilo reči u prethodnim poglavljima.

Na graficima se za sve izvrtke može primetiti da su na početku merenja, u zoni kore i beljike, vrednosti pritisne čvrstoće relativno niske, zatim su uglavnom konstantne, dok pri kraju izvrtka, u zoni juvenilnog drveta i srži, one ponovo opadaju (prilog 15,16 i 17).

Na osnovu merenja fraktometrom, Živanović *et al.*(2022) su za stablo crvenog hrasta na lokalitetu Lipovička šuma dobili prosečnu vrednost pritisne čvrstoće paralelno sa vlakancima koja iznosi 57,5 MPa i ima koeficijent varijacije 11%. Ova vrednost je znatno veća u odnosu na srednje vrednosti čvrstoće na pritisak na trima lokalitetima u ovom istraživanju. U navedenom radu, srednje vrednosti širine prstenova prirasta iznosila su 3,616 mm sa 67,97% učešća kasnog drveta za donji trupčić i 3,527 mm sa 74,56% učešća kasnog drveta za gornji trupčić. Srednja vrednost širine prstenova prirasta za stabla iz Bruskih šuma iznosila je 2,951 mm, a učešće kasne zone 63%. Kada je reč o stablima sa lokaliteta Debeli Lug, srednja vrednost širine prstenova iznosi 3,37 mm, sa učešćem kasne zone 71,93%, dok u Stepinom lugu prstenovi prirasta pokazuju najniže vrednosti

sa srednjom vrednošću 2,48 mm i učešćem kasnog drveta 60,01%. Ove razlike u pritisnoj čvrstoći izvrtaka mogle bi se pripisati nižem procentualnom učešću kasne zone. Međutim, ukoliko se sagledaju rezultati sa lokaliteta Debeli lug, čije su vrednosti širine prstenova prirasta i učešća kasne zone najbližnje rezultatima istraživanja Živanović *et al.* (2022), i dalje se zapažaju relativno niske vrednosti pritisne čvrstoće izvrtaka. Isto se odnosi i na srednju vrednost gustine drveta na ovom lokalitetu, koja u proseku iznosi 0,720 g/cm³ i približna je srednjoj vrednosti gustine dobijenoj u istraživanju Živanović *et al.* (2022) (0,724 g/cm³). Mogući razlog tome je različita vlažnost istraživanih uzoraka (izvrtaka). Naime, vlažnost drveta ima veliki utiaj na mehanička svojstva i što je drvo vlažnije mehanička svojstva daju niže vrednosti (Šoškić & Popović 2002). Mehanička svojstva izvrtaka mere se u sirovom stanju, odmah nakon vađenja izvrtka iz drveta. Poznato je da vlažnost drveta ima značajan uticaj na mehanička svojstva, pri čemu se sa porastom sadržaja vlage u drvetu vrednosti mehaničkih pokazatelja smanjuju (Šoškić & Popović, 2002). U ovom istraživanju mehanička svojstva izvrtaka određivana su u sirovom stanju, neposredno nakon vađenja iz stabala. Iako je uzorkovanje vršeno u jesenjem periodu (oktobar–novembar), kada je sadržaj vlage u drvetu obično nešto viši nego u proleće, ove razlike ne mogu u potpunosti objasniti dobijene vrednosti. Naime, razlike u udelu vlage na nivou sirovog drveta nisu tako velike da bi imale presudan uticaj, te se može zaključiti da na uočene rezultate u većoj meri utiču stanišni uslovi i struktura samog drveta nego sezonske oscilacije u sadržaju vlage. O tome svedoči i činjenica da su rezultati prilično ujednačeni i da postoje relativno male razlike u srednjim vrednostima između ispitivanih lokaliteta. S druge strane, srednje vrednosti modula elastičnosti i savojne čvrstoće u istraživanju Živanović *et al.* (2022) su niže od rezultata za tri lokaliteta u ovom istraživanju. U Debelom Lugu srednje vrednosti MOE i MOR su najviše na posmatranim lokalitetima i one iznose 11103,1 MPa za MOE i 131,81 MPa za MOR, dok su ove vrednosti za stablo iz Lipovičke šume

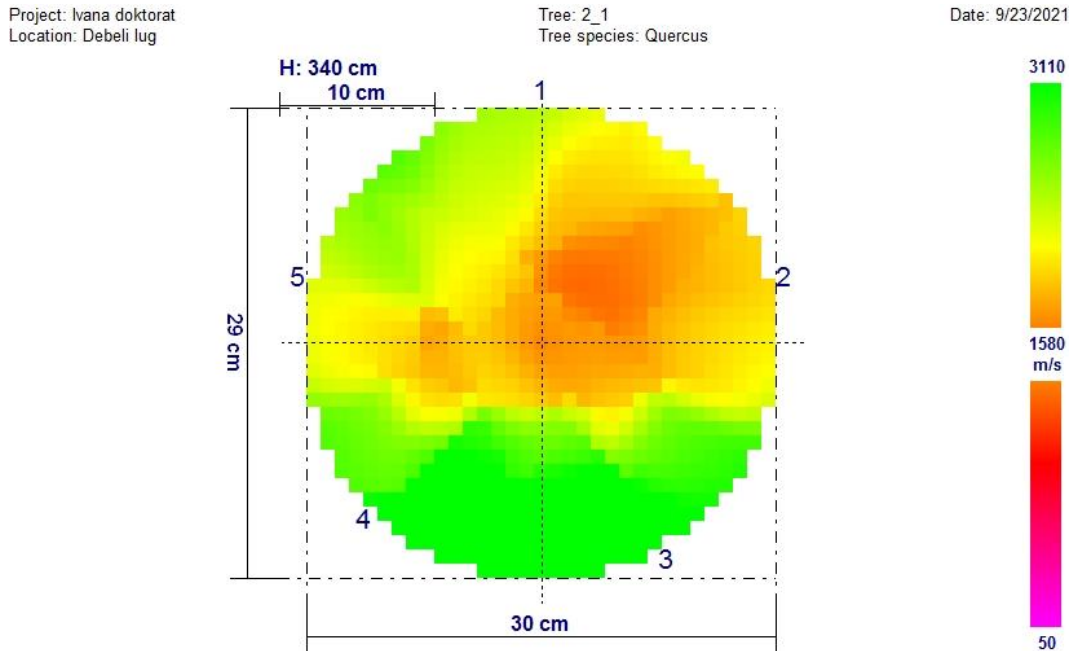
7381,5 MPa za MOE i 102,2 MPa za MOR. Prosečna pritisna čvrstoća je nešto veća na stablu iz Lipovičke šume. Konkretno na lokalitetu Debeli Lug, srednja vrednost čvrstoće na pritisak iznosila je 63,64 MPa, što je i najviša vrednost za posmatrana tri lokaliteta, dok je srednja vrednost u radu Živanović *et al.* (2022) iznosila 64,4 MPa.

Primena fraktometra je dala dobre rezultate kod ispitivanja čvrstoće na pritisak u poprečnom smeru i s tim su se složili skoro svi istraživači koji su se bavili ovom problematikom, dok su kod čvrstoće na savijanje i ugla loma stavovi autora različiti (Matheny, 1999; Tang, 2016; Ganesan, 2010). Primenom fraktometrije, poludestruktivne metode, pruža se mogućnost utvrđivanja korelacije između mehaničkih karakteristika izvrtka i fizičko-mehaničkih svojstava drveta u stablu.

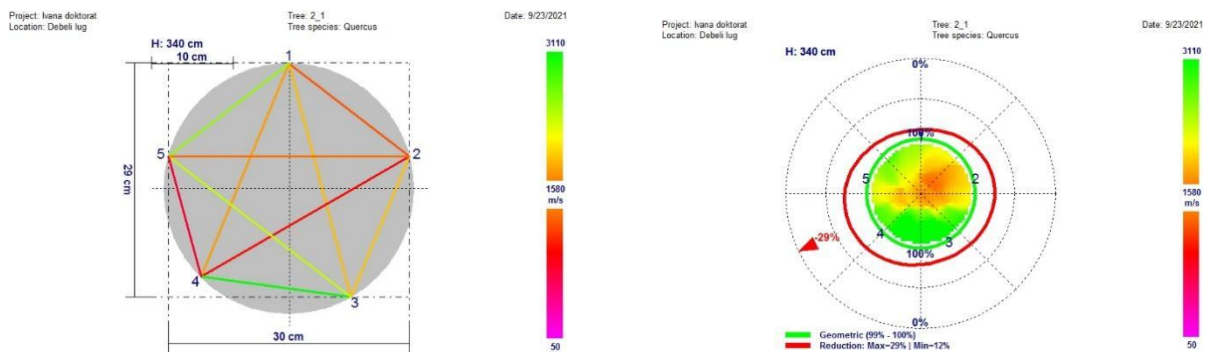
6.4 Analiza akustičnih svojstava drveta crvenog hrasta utvrđenih primenom akustičnog tomografa

6.4.1. Brzina zvučnih talasa

Rezultati dobijeni primenom akustične tomografije predstavljeni su u vidu trodelnih tomograma za svaki presek, čime je omogućena detaljna vizualizacija raspodele brzina zvuka, potencijalnih oštećenja i mehaničke stabilnosti stabala (slike 51,52,53).



Slika 51 - tomograf poprečnog preseka



Slika 52 - tomograf brzina između senzora

Slika 53 - tomograf stabilnosti

U Bruskim šumama ispitivana stabla su pokazuju najviše vrednosti brzina zvuka u transversalnom pravcu. Prosečne vrednosti brzina zvuka stabala iznose 2351,6 m/s za prvo stablo, zatim 1673,1 m/s za drugo i 2197,4 m/s za treće ispitivano stablo. Vrednost izmerenih brzina u svim stablima na lokalitetu Bruske šume iznosi u proseku 2084,3 m/s, i kreće se u intervalu od 142–3692 m/s, sa koeficijentom varijacije od 43,85%. Na lokalitetu Debeli lug, ove vrednosti su nešto niže i za pojedinačna stabla iznose 1320,9 m/s, 1126,1 m/s i 1518,8 m/s, dok je vrednost u

svim stablima na ovom lokalitetu u proseku 1313,85 m/s, kreće se u opsegu od 59,0 do 3498,0 m/s, s koeficijentom varijacije 44,45%. U Stepinom lugu, izmerene brzine zvuka u stablima su približne odgovarajućim vrednostima u Debelom lugu i po stablima u proseku iznose 1585,0 m/s, 1576,5 m/s i 1581,0 m/s. Ove vrednosti su međusobno vrlo ujednačene, tako da brzina za sva stabla na ovom lokalitetu u proseku iznosi 1581,2 m/s, kreće se u opsegu od 279,0 m/s do 2955,0 m/s i ima koeficijent varijacije 35,53%. Kada se posmatraju dobijeni rezultati primećuje se da je najveća srednja vrednost brzine zvuka na lokalitetu Bruske šume, gde su prsni prečnici stabala bili najmanji; obrnuto, najniža srednja vrednost brzine zvuka je zabeležena za lokalitet Debeli Lug, na kome su prečnici analiziranih stabala bili najveći. Brzina prostiranja zvučnih talasa u drvetu obrnuto je povezana sa širinom prstenova prirasta, jer širi prstenovi sadrže veći udeo ranog drveta sa tanjim ćelijskim zidovima i većim lumenima, što smanjuje gustinu i elastičnost tkiva. Nasuprot tome, uži prstenovi sa većim udelom kasnog drveta obezbeđuju veću gustinu i bolju propagaciju zvuka, što dovodi do većih brzina merenih akustičnim metodama (Wessels *et al.*, 2011)(Tabela 16).

Tabela 16 – Prosečne transversalne brzine zvuka kod drveta crvenog hrasta na tri lokaliteta u Srbiji [m/s]

	Bruske šume	Debeli Lug	Stepin Lug
\bar{X}	2084,33	1313,86	1581,23
SD	913,94	583,99	561,84
CV (%)	43,85	44,45	35,54
MIN	142,0	59,0	279,0
MAX	3692,0	3498,0	2955,0
opseg	3550,0	3439,0	2676,0

U tabeli 17 prikazani su rezultati srednjih radijalnih i tangencijalnih brzina na lokalitetu Bruske šume. Kod stabala 1 i 2 vidi se da su brzine u tangencijalnom pravcu znatno veće od brzina u radijalnom pravcu, dok kod stabla 3 to nije slučaj, ali su ove srednje vrednosti približne. Najviše srednje vrednosti radijalnih i tangencijalnih brzina zvuka pokazuje stablo 1, a najniže stablo 2. Ujedno, na lokalitetu beleže se i najviše srednje vrednosti brzine zvuka po pojedinačnim stablima

na svim lokalitetima. Na lokalitetu Debeli lug, srednje vrednosti protoka zvučnih talasa su unekoliko manje od ovih vrednosti na prethodnom lokalitetu. Na stablu 1 srednje vrednosti tangencijalnih brzina su nešto veće od radijalnih, dok su na stablima 2 i 3 srednje vrednosti radijalnih brzina veće u odnosu na tangencijalne brzine. Najniže srednje vrednosti radijalnih i tangencijalnih brzina zvuka imalo je stablo 2, a najviše stablo 3 (tabela 18). U Stepinom lugu, na svim proučavanim stablima, srednje vrednosti brzine zvučnih talasa u tangencijalnom pravcu su veće od srednjih vrednosti brzina u radijalnom pravcu (tabela 19). Najveće srednje vrednosti ima stablo 3, a najmanje stablo broj 1, iako sva tri stabla pokazuju vrlo slične srednje vrednosti brzine kretanja zvučnih talasa.

Tabela 17 – Radijalne(Vr) i tangencijalne(Vt) brzine zvučnih talasa drveta crvenog hrasta po stablima na lokalitetu Bruske šume [m/s]

	Stablo 1		Stablo 2		Stablo 3	
	Vr(m/s)	Vt(m/s)	Vr(m/s)	Vt(m/s)	Vr(m/s)	Vt(m/s)
\bar{X}	2251	2765	1439	1782	2206	2148
SD	1156,10	661,62	693,13	810,21	621,69	235,80
CV (%)	51,37	23,93	48,17	45,47	28,18	10,98
MIN	702	2236	678	718	1208	1944
MAX	3274	3657	2258	2523	3307	2547
opseg	2572	1421	1580	1805	2099	603

Tabela 18– Radijalne(Vr) i tangencijalne(Vt) brzine zvučnih talasa drveta crvenog hrasta po stablima na lokalitetu Debeli lug [m/s]

	Stablo 1		Stablo 2		Stablo 3	
	Vr(m/s)	Vt(m/s)	Vr(m/s)	Vt(m/s)	Vr(m/s)	Vt(m/s)
\bar{X}	1217	1316	1080	1033	1706	1340
SD	286.468	613.094	561.892	537.018	856.790	648.426
CV (%)	23.54	46.60	52.01	51.99	50.23	48.40
MIN	768	557	59	148	1306	331
MAX	1549	1760	1798	1803	2638	2485
opseg	781	1203	1739	1655	1332	2154

Tabela 19 – Radijalne(Vr) i tangencijalne(Vt) brzine zvučnih talasa drveta crvenog hrasta po stablima na lokalitetu Stepin lug [m/s]

	Stablo 1		Stablo 2		Stablo 3	
	Vr(m/s)	Vt(m/s)	Vr(m/s)	Vt(m/s)	Vr(m/s)	Vt(m/s)
\bar{X}	1033	1340	1207	1687	1340	1463
SD	902.975	668.771	68.589	796.734	289.207	799.534
CV (%)	87.46	49.90	5.68	47.22	21.59	54.67
MIN	394	418	1158	1133	1135	279
MAX	1671	2066	1255	2539	1544	2207
opseg	1277	1648	97	1406	409	1928

U pogledu pravca prostiranja zvuka kroz drvo na lokalitetima, može se videti da najveću srednje vrednosti brzine zvuka u radijalnom pravcu od 2025 m/s i koeficijentom varijacije 42,86% imaju stabla sa lokaliteta Bruske šume, dok najnižu, 1193 m/s i koeficijent varijacije 37,36%, stabla sa lokaliteta Stepin lug. Najveću prosečnu tangencijalnu brzinu pokazuju stabla sa lokaliteta Bruske šume i ona iznosi 2225 m/s, s koeficijentom varijacije 30,38%, a najnižu stabla sa lokaliteta Debeli lug i ona iznosi 1215 m/s, sa koeficijentom varijacije 45,43%. Ukupno za sva stabla i sve lokalitete, vrednost brzine prostiranja zvučnih talasa u radijalnom pravcu iznosi u proseku 1551(m/s), s koeficijentom varijacije 46,83%, i kreće se u opsegu 59–3307 m/s, dok brzina prostiranja zvuka u tangencijalnom pravcu u proseku iznosi 1533 m/s, s koeficijentom varijacije 45,38% i kretala se od 148 m/s do 3657 m/s (Tabela 20).

Tabela 20 – Prosečne vrednosti brzine zvučnih talasa drveta crvenog hrasta u radijalnom(Vr) i tangencijalnom(Vt) pravcu po lokalitetima i ukupno

	Vr [m/s]			Vt [m/s]			UKUPNO	
	BŠ	DL	SL	BŠ	DL	SL	Vr[m/s]	Vt[m/s]
\bar{X}	2025	1341	1193	2225	1215	1497	1551	1533
SD	868.043	527.729	446.882	675.999	552.032	572.220	726.126	695.408
CV (%)	42.86	39.35	37.46	30.38	45.43	38.23	46.83	45.38
MIN	678	59	394	718	148	279	59	148
MAX	3307	2638	1671	3657	2485	2539	3307	3657
opseg	2629	2579	1277	2939	2337	2260	3248	3509

Ako se posmatra raspored senzora i kretanje zvučnih talasa u odnosu na prstenove prirasta, može se konstatovati da u radijalnom pravcu zvučni talas prolazi pod pravim uglom na prstenove prirasta i ravnomerno prolazi kroz rane i kasne zone prstenova prirasta. U tangencijalnom pravcu, obrnut je slučaj. Zvučni talas tangira prstenove prirasta i, u zavisnosti od ugla tangente, tangencijalni zvučni talas prolazi kroz određene delove prstenova prirasta. Ukoliko talas zahvati više delova prstenova prirasta sa ranom zonom drveta, koja je manje gustine nego zona kasnog drveta (Šoškić & Popović, 2002), brzine će biti manje jer brzina zvuka zavisi od gustine materijala kroz koji ona prolazi i raste s porastom gustine (Šoškić & Popović 2002). Ugao između orijentacije

godišnjih prstenova prirasta i pravca prostiranja talasa u velikoj meri utiče na vreme prostiranja talasa usled naprezanja u drvetu zbog ćelijske strukture drveta, pa se mora uzeti u obzir pri proceni kretanja zvučnog talasa (Dackermann, 2014). Kao što je već rečeno, brzina zvučnih talasa nastalih poprečnim udarom je između jedne petine i jedne trećine brzine talasa generisanog uzdužnim udarom. Kod poprečnog udara, relativni ugao između smera udara i orijentacije prstena prirasta dalje utiče na brzinu i obrazac kretanja talasa napona zbog nehomogene prirode drveta. Opšte prihvaćeno objašnjenje za ovu pojavu je da, u poprečnom širenju zvučnih talasa, talas može putovati kroz drvo na tri načina – radijalno ili tangencijalno na prstenove rasta, ili preko prstenova pod uglom između 0° i 90° (Dackerman, 2014).

U tabeli 21 date su vrednosti brzina zvučnih talasa uzdužno, duž stabla i poprečno; drugim rečima, duž poprečnog preseka u radijalnom ili tangencijalnom pravcu za neke vrste drveća u dubjećem stanju (Dackermann, 2014). Iz tabele se može videti da se vrednosti brzine zvuka duž poprečnog preseka kod svih vrsta kreću u opsegu od oko 850 m/s do oko 1750 m/s. Za crveni hrast, vrednosti su 1548–1751 m/s. Ovaj podatak je u skladu sa rezultatima dobijenim u ovom istraživanju, gde vrednost brzine prostiranja zvučnih talasa u radijalnom pravcu za sva stabla i lokalitete iznosi u proseku 1551 m/s, dok prosečna brzina prostiranja zvuka u tangencijalnom pravcu u proseku iznosi 1533 m/s.

Tabela 21 - Brzine zvučnih talasa kod različitih vrsta drveta (Dackermann, 2014)

Vrsta	Brzine zvučnih talasa [m/s]	
	Uzdužne	Poprečne
Beli jasen	3.968–5.076	/
Jasen	/	1.162–1.379
Bukva	/	1.670
Crvena bukva	/	1.206–1.412
Breza	4.695–5.747	1.140–1.479
Crna trešnja	4.831–5.435	1.451–1.613
Divlji kesten	/	873–1.557
Pitomi kesten	/	1.215–1.375
Duglazija	/	905–1.675
Ariš	/	1.023–1.490
Javor	/	1.006–1.690
Hrast	/	1.382–1.610
Beli hrast	/	1.258
Crveni hrast	3,311–5,650	1,548–1,751
Bor	/	1.066–1.146
Crna topola	/	869–1.057
Smrča	/	931–1.310

Analizom brzine zvučnih talasa registrovano je da su srednje vrednosti u gornjim delovima stabala u proseku više nego u donjim. Ovakav rezultat može se delimično objasniti smanjenjem prečnika ka vrhu stabla, što doprinosi većoj homogenosti materijala i smanjenom udelu defektnih zona. Međutim, treba naglasiti da brzina zvuka zavisi prvenstveno od gustine i anatomskih karakteristika drveta (tj. odnosa ranog i kasnog drveta, širine godova), te da visina stabla nije uvek dominantan faktor. Wessels *et al.* (2011) su kod vrsta roda *Eucalyptus* zabeležili porast brzine zvuka sa visinom stabla, što su objasnili promenama u gustini i unutrašnjoj ujednačenosti drveta. S druge strane, istraživanja kod lišćara, uključujući hrastove, pokazuju da ovaj trend može biti različit – u zavisnosti od učešća kasnog drveta, brzina zvuka se može i smanjivati sa visinom (Dackermann *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2009). Dobijeni rezultati za crveni hrast u ovom istraživanju stoga treba posmatrati kao pokazatelj specifičnih stanišnih i anatomskih uslova, a ne kao univerzalno pravilo. Najnižu srednju vrednost brzine zvuka posmatrano po visini stabla imaju donji delovi stabala u Debelom lugu i ona je 1116 m/s, a najvišu gornji trupčići stabala u Bruskim šumama i ona iznosi 2276 m/s. Ukupno posmatrano, brzina zvuka u donjim delovima stabala na lokalitetima iznosi u proseku 1388 m/s, s koeficijentom varijacije 47,75% i kreće se u opsegu 148

–3274 m/s, dok srednja vrednost brzine prostiranja zvučnih talasa u gornjim delovima analiziranih stabala iznosi 1701 m/s, sa minimalnom vrednošću 59 m/s i maksimalnom vrednošću 3657 m/s (Tabela 22).

Tabela 22 – Srednje vrednosti brzina zvučnih talasa u donjim (Vd) i gornjim (Vg) delovima stabala po lokalitetima i ukupno [m/s]

	BŠ		DL		SL		UKUPNO	
\bar{X}	1965	2276	1116	1389	1299	1689	1388	1701
SD	782.452	949.973	439.618	639.679	542.556	507.578	662.578	726.285
CV (%)	39.82	41.74	39.39	46.05	41.76	30.05	47.75	42.70
MIN	678	702	148	59	279	1133	148	59
MAX	3274	3657	1803	2638	2416	2539	3274	3657
opseg	2596	2955	1655	2579	2137	1406	3126	3598

Akustični talasi se kreću drugačijim brzinama kroz zdrava stabla u poređenju sa onima koji sadrže oštećenja (McCracken & Vann, 1983; Lawday & Hodges, 2000; Sandoz, 1999). Dostupne su i elektronske verzije zvučnih čekića (npr., Decatricson Meguards, Decai Arsecon Mector ili Talasni tajmer, IML Micro Hammer, Silvatest Duo). Ovi alati određuju brzinu akustičnog talasa dok on prolazi kroz stablo. Mattheck & Bethge (1993) daju tabelu s prikazanim brzinama zvučnih talasa merenim u zelenim i zdravim stablima najzastupljenijih vrsta drveća u Evropi. Za vrste roda *Quercus*, ove brzine se kreću od 1382 do 1610 m/s sa odstupanjem od srednje vrednosti 10–26%. Stoga se može konstatovati da se rezultati merenja brzine prostiranja zvuka u drvetu stabala crvenog hrasta na teritoriji Srbije uklapaju u literaturne navode za ovu vrstu hrasta sa drugih područja, kao i rod hrastova uopšte.

Na osnovu izmerenih prosečnih vrednosti brzine zvučnih talasa i gustine drveta, za sva stabla sa svih lokaliteta izračunati su dinamički moduli elastičnosti. Važno je naglasiti da su moduli dobijeni na osnovu brzina u poprečnom pravcu (radijalnom i tangencijalnom), a ne u aksijalnom, što je uticalo na slabiju povezanost sa laboratorijski određenim vrednostima mehaničkih svojstava. Naime, kako brzine u transverzalnim pravcima obuhvataju više faktora (strukturne nehomogenosti, učešće defektnih zona i sl.), očekivano je da njihove korelacije sa npr. MOR i

MOE budu niže. Ipak, brzine u radijalnom (V_r) i tangencijalnom (V_t) pravcu mogu poslužiti kao korisni indikatori u preliminarnim procenama i „screening“ analizama kvaliteta drveta u stojećim stablima. Ovakvi nalazi su u skladu sa literaturom, gde je utvrđeno da su korelacije između aksijalne brzine zvuka i mehaničkih svojstava značajno više nego u poprečnim pravcima (Tannert *et al.*, 2010) (Tabela 23).

Tabela 23 – Dinamički modul elastičnosti drveta crvenog hrasta na tri lokaliteta u Srbiji [MPa]

	Bruske šume	Debeli Lug	Stepin Lug
\bar{X}	3606,07	1358,37	1603,54
SD	2378,473	885,603	1107,607
CV (%)	65,96	65,20	69,07
MIN	302,72	2,70	54,31
MAX	9695,70	4577,13	4568,71
opseg	9392,98	4574,43	4514,40

Kao i kod prosečne brzine zvučnih talasa, najveću vrednost MOEd imaju stabla sa lokaliteta Bruske šume i ona u proseku iznosi 3606,07 MPa, a varira u opsegu od 302,72 MPa do 9695,70 MPa, s koeficijentom varijacije 65,95%. U Debelom lugu vrednost MOEd je najniža i u proseku iznosi 1358,37 MPa, s koeficijentom varijacije 65,20 i opsegom vrednosti 2,70–4577,13 MPa, dok je vrednost MOEd u Stepinom lugu u proseku 1603,54 MPa, s minimalnom vrednošću 54,31 MPa, a maksimalnom vrednošću 4568,71 MPa, i koeficijentom varijacije 69,07%.

6.5 Utvrđivanje korelacije između svojstava drveta i parametara dobijenih pomoću fraktometra

U tabeli 24 prikazana su svojstva dobijena pomoću fraktometra kao i osnovna fizička (gustina drveta) i mehanička svojstva drveta crvenog hrasta pri standardno propisanoj vlažnosti.

Tabela 24 – Svojstva drveta crvenog hrasta dobijena pomoću fraktometra (F) i svojstva drveta dobijena destruktivnim metodama (SD)

Metoda	Svojstvo drveta	Broj uzoraka	\bar{X}	SD	CV (%)	MIN	MAX	Opseg
F	σ_p F (MPa)	218	35.58	5.4688	15.37	17.00	46.60	29.60
F	δ_s F (MPa)	218	9.29	4.3056	46.35	2.00	23.00	21.00
F	Ba F(°)	218	17.33	4.1094	23.71	8.00	28.00	20.00
SD	WD (g/cm ³)	218	0.707	0.0542	7.67	0.545	0.893	0.348
SD	Hp [MPa]	218	60.18	6.9695	11.58	40.12	72.05	31.93
SD	MOR [MPa]	218	119.79	21.6328	18.06	45.49	170.75	125.26
SD	MOE [MPa]	218	10121.94	2450.5271	24.21	4687.17	17283.40	12596.23

Na osnovu prikazanih rezultata, čvrstoća na pritisak paralelno sa vlaknima merena fraktometrom iznosila je u proseku 35,58 MPa, s koeficijentom varijacije 15,37%. Čvrstoća na savijanje upravno na vlakna merena fraktometrom je u proseku 9,29 MPa, s koeficijentom varijacije 46,35% koji je ujedno i najveći koeficijent u ovoj analizi (tabela 23). Jedini raspoloživi podaci u literaturi za analizirana svojstva su oni iz istraživanja Živanović *et al.* (2021), u kome je čvrstoća na pritisak u proseku iznosila 57,466 MPa, s koeficijentom varijacije 10,99%, dok čvrstoća na savijanje upravno na vlakna je u proseku bila 19,317 MPa, s koeficijentom varijacije 16,61%. (Živanović *et al.*, 2021). Za ugao loma, sem ovog rada, dostupno je još jedno istraživanje. Matheny & Clark (1999) su objavili da je srednja vrednost ugla loma iznosila 16,70°, što je nešto niže od vrednosti dobijene u ovom istraživanju (17,33°). U istraživanju Živanović *et al.* (2021) ugao loma je bio 21,46°. U poređenju sa ostalim analiziranim osobinama drveta, gustina drveta je imala najmanji koeficijent varijacije (7,67%), a srednja vrednost je iznosila 0,71 kg/m³. Ove vrednosti su u opsegu merenja navedenih u literaturi (npr., Vansteenkiste, 2005; Genet *et al.*, 2013; Zeidler & Boruvka, 2016; Marli *et al.*, 2020).

Vrednosti čvrstoće na pritisak paralelno sa vlaknima kretale su se od 40,12 MPa do 72,05 MPa, sa srednjom vrednošću 60,18 MPa, kao i koeficijentom varijacije 11,58% (tabela 39). Ove vrednosti su približne onima koje je dobio Marli (2020) za istu vrstu u jugoistočnom delu SAD. Od ostalih analiziranih svojstava drveta, MOE ima najveći koeficijent varijacije (24,21%); pritom

je srednja vrednost (10121,94 MPa) znatno veća u odnosu na onu iz prethodnih istraživanja. S druge strane, MOR je imao veću srednju vrednost (119,79 MPa) od onih datih u literaturi. Na primer, Vansteenkiste (2005) je dobio 12.500 MPa za MOE i 99 MPa za MOR. Wang *et al.* (2008) su dobili 9,810 MPa za MOE i 62,1 Mpa za MOR. Marey *et al.* (2020) dobili su 12.211 MPa za MOE i 120 MPa za MOR. S obzirom da svojstva drveta zavise od mnogih faktora, kao što su klima, zemljište, orografski faktori, a rezultati potiču iz različitih delova sveta, ovakve varijacije su očekivane.

Postoji samo nekoliko istraživanja u kojima su upoređena fraktometarska merenja i standardna ispitivanja svojstava drveta. Rezultati naših istraživanja su uporedivi sa onima koje su dobili Gruber i Hagerman (2000). Autori su istraživali čvrstoću na savijanje 24 uzorka (1 m dužine) stabljika vrsta *Fagus silvatica*, *Populus spp.*, *Picea abies* i *Pseudotsuga menziesii*, koristeći DIN 52186 i metod fraktometrije. Autori nisu pronašli korelisanost između čvrstoće na savijanje DIN i merenja fraktometrom. Rezultati istraživanja Živanović *et al.* (2021) pokazuju da postoji značajna pozitivna korelacija između aksijalne čvrstoće na savijanje i uzdužne pritisne čvrstoće drveta. Na primer, grupa autora (Lin *et al.*, 2003) je analizirala radijalne promene u živim stabalima *Taiwania criptomerioides* i utvrdila da se razlike u čvrstoći lomljenja u poprečnom pravcu povećavaju od srži do kore. Analiza varijanse i korelacije su pokazale da je vrednost radijalne razlike u čvrstoći na pritisak manja od varijacije između stabala. Druga grupa autora (Matsumoto *et al.* 2010) je ispitivala svojstva drveta pet indonežanskih vrsta i zaključila da se čvrstoća na pritisak merena fraktometrom može primeniti na svojstva živog drveta na osnovu visokog koeficijenta determinacije između ove čvrstoće na pritisak i gustine drveta.

S druge strane, višestruki regresioni testovi pokazali su četiri uspešna modela za svako istraživano svojstvo drveta, što je prikazano u tabeli 38. Dobijene vrednosti koeficijenata determinacije bile su visoke i ukazuju na to da se pojedinačna fraktometrijska merenja, kao i njihova kombinacija, mogu koristiti za procenu svojstava drveta. Najviša vrednost koeficijenta determinacije ostvarena je pri proceni gustine drveta ($R^2 = 0,9778$), dok je najniža zabeležena pri određivanju modula elastičnosti ($R^2 = 0,9321$).

Ipak, važno je naglasiti metodološko ograničenje: analizirano je ukupno 218 uzoraka koji potiču iz 9 stabala sa tri lokaliteta. Takva klasterska struktura podataka znači da merenja nisu u potpunosti međusobno nezavisna. Kao posledica toga, standardne greške su verovatno potcenjene, dok p-vrednosti i procenjeni koeficijenti mogu biti optimističniji nego što bi bili u situaciji nezavisnih posmatranja (Genet *et al.*, 2013; Wessels *et al.*, 2011). Stoga rezultate regresione analize treba posmatrati indikativno, kao pokazatelj potencijala primene fraktometrijskih metoda, a ne kao definitivno potvrđene odnose.

Statističkom analizom je utvrđeno da su čvrstoća na pritisak paralelno s vlaknima i ugao loma izvrta važne varijable na osnovu kojih se mogu proceniti svojstva drveta, dok se za aksijalnu čvrstoću na savijanje pokazalo da nije značajna varijabla. Ovakvi rezultati se poklapaju sa onima koje su dobili Matsumoto *et al.* (2010). S druge strane, Tang *et al.* (2016) navode da su najbolji pokazatelji čvrstoće drveta, određeni fraktometrom, čvrstoća na pritisak paralelno sa vlaknima i čvrstoća na savijanje. Isti autori su istakli zavisnost između ova dva svojstva i zavisnost njihovog odnosa od vrste drveća. U tabeli 25 dati su modeli višestrukih regresionih jednačina i prilagođeni koeficijent determinacije za svojstva drveta testirani standardnom destruktivnom metodom i fraktometrom.

Tabela 25 - Modeli višestrukih regresionih jednačina i prilagođeni koeficijent determinacije za svojstva drveta testirani standardnom destruktivnom metodom i fraktometrom.

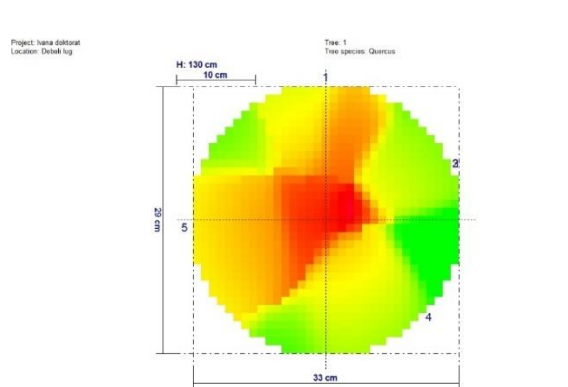
Svojstvo drveta	Višestruki regresioni model (Stepwise metoda; Konstanta isključena)		Prilagođeni koeficijenti determinacije (prilagođen r^2)	Standardna greška procene
Gustina (WD)	$y_{WD} =$	$0,0154942 \cdot \sigma F + 0,00777194 \cdot Ba F$	0,9778	0,11
Čvrstoća na pritisak paralelno sa vlaknima (Hp)	$y_{Hp} =$	$1,17149 \cdot \sigma F + 0,954319 \cdot Ba F$	0,9704	10,36
Čvrstoća na savijanje (MOR)	$y_{MOR} =$	$2,7286 \cdot \sigma F + 1,16089 \cdot Ba F$	0,9621	23,74
Modul elastičnosti (MOE)	$y_{MOE} =$	$230,591 \cdot \sigma F + 96,75 \cdot Ba F$	0,9321	2721,77

Na osnovu dobijenih rezultata može se konstatovati da se vrednosti ispitivanih svojstava nalaze u intervalu literaturnih podataka za ispitivanu vrstu (Živanović *et al.*, 2021). Utvrđene vrednosti čvrstoće su slične podacima u literaturi za kitnjak i lužnjak, dok prosečne vrednosti gustine i modula elastičnosti odstupaju, ali ne značajno. Statistička analiza je pokazala da se aksijalna čvrstoća na savijanje ne može koristiti kao pouzdan parametar u proceni kvaliteta drveta, dok je odnosom čvrstoće na pritisak i ugla loma i svojstava drveta crvenog hrasta dobijena višestruka regresiona zavisnost sa koeficijentom determinacije koji je bio u intervalu od 0,9321 do 0,9778. Primarna prednost dobijenih modela je mogućnost predviđanja kvaliteta drveta pre seče stabala, što može pozitivno uticati na optimalnu i dalju eksploataciju drveta. Prikazani rezultati ukazuju koji parametri mereni na živom stablu daju najbolju sliku o kvalitetu drveta. Uzimajući u obzir veoma oskudnu literaturu u Srbiji o svojstvima drveta crvenog hrasta, dato istraživanje doprinosi poznavanju varijabilnosti fizičko-mehaničkih svojstava drveta ove introdukovane vrste hrasta, kao i povezanosti mehaničkih svojstava drveta i fraktometrijskih merenja uspostavljenih na stablima hrasta.

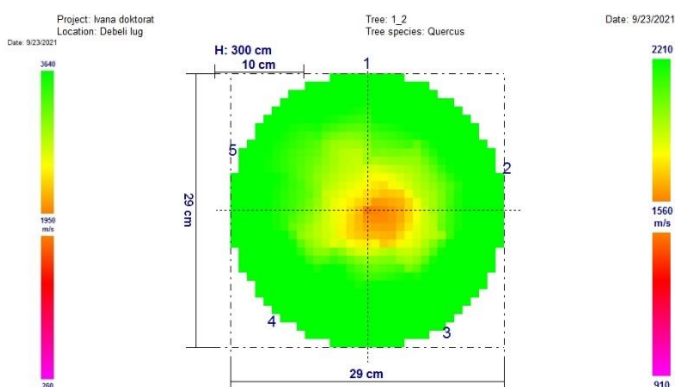
Na osnovu upoređivanja rezultata može se konstatovati da vrednosti fizičko-mehaničkih i anatomskih svojstava drveta, dobijene fraktometrijskim i akustičnim metodama, u najvećem broju slučajeva ne odstupaju značajno od rezultata ostvarenih u laboratorijskim uslovima. Ovo potvrđuje da su primenjene nedestruktivne metode pouzdane i dovoljno precizne za procenu kvaliteta drveta crvenog hrasta, što ih čini praktičnim alatom za terenska istraživanja i brzu dijagnostiku u šumskoj i drvnoj industriji.

6.6 Utvrđivanje korelacije između svojstava drveta i parametara dobijenih pomoću akustičnog tomografa

U tabeli (prilog 16) su date srednje vrednosti mehaničkih svojstava uzoraka kroz koje je prošao zvučni talas, srednja vrednost brzine zvuka i opsezi, i boja kojom je obojena zona u kojoj se uzorak nalazio. Ukoliko je postojalo više površina pod različitom bojom, uzimane su vrednosti za sve opsege.



Slika 54 – Tomografski snimak stabla 1



Slika 55 – Tomografski snimak stabla 2

Na slici 54. je stablo iz Debelog luga koje ima srednju prosečnu brzinu 1950 m/s i veliki deo poprečnog preseka mu je u crvenoj zoni, gde su te brzine manje. Na slici 55 je stablo, čija je

prosečna brzina 1560 m/s i ima značajno manje crvene zone. Ipak vrednosti crvene zone za oba stabla kreću se u opsegu 1500–2000 m/s.

U tabeli 25 su prikazani Pirsonovi koeficijenti korelacije između posmatranih srednjih vrednosti anatomskih i mehaničkih svojstava i srednjih brzina zvuka.

Tabela 25 - Pirsonovi koeficijenti korelacije između posmatranih srednjih vrednosti anatomskih i mehaničkih svojstava i srednjih brzina zvuka po lokalitetima

Lokalitet	Svojstva drveta – destruktivno	Pirsonovi koeficijenti korelacije
Bruske šume	WD	0.708
	MOE	0.835
	MOR	0.769
	Lv	0.587
	% kasne	0.812
Debeli lug	WD	0.594
	Hp	-0.401
	MOE	0.710
	MOR	-0.336
Stepin lug	WD	0.735
	Hp	0.685
	MOE	0.564
	MOR	0.650
	Lv	0.505
	% kasne	0.790

Najveću zavisnost pokazuje MOE koji ima vrednosti koeficijenata korelacije od 0,564 do 0,853 a zatim gustina gde se koeficijenti kreću od 0,594 do 0,735, te se može reći da su to umerene do jake korelacije. Ipak, anatomska svojstva, dužina vlakana i procenat učešća kasne zone daju slabije zavisnosti na lokalitetu Bruske šume, a umerene pa čak i jake korelacije na druga dva lokaliteta. Hp i MOR na lokalitetu Stepin lug daju umerene korelacije sa srednjom brzinom zvuka, dok na druga dva lokaliteta korelacije nisu statistički značajne. Svojstva koja nisu u tabeli dala su koeficijente korelacije koji se mogu smatrati slabim.

Kada se ovi podaci urede po zaokruženim vrednostima srednje brzine zvuka, od najmanje do najveće, mogu se izdvojiti 3 opsega u kojima postoje određene korelacije posmatranih svojstava i brzine zvuka. U tabeli 40 su prikazane srednje vrednosti koreliranih svojstava i opsezi brzina.

U tabeli 21 u prilogu 18 su podaci o srednjim vrednostima anatomskih i mehaničkih svojstava, kao i srednje brzine zvuka za uzorke označene na svakom tomogramu istom bojom i opsezi brzina kojima pripadaju. Može se primetiti da u opsegu najnižih prosečnih brzina nema uzoraka iz Bruskih šuma, što znači da su tamo izmerene veće brzine nego na druga dva lokaliteta. Ovo bi se moglo objasniti time da ja na ovom lokalitetu najveća gustina drveta, a prečnici su najmanji. Doun & Hasegava (2024) destruktivno su analizirali anatomska i mehanička svojstva drveta *Acacia mangium* Willd., kao i brzine naponskih talasa zvuka, pri čemu su statistički značajne korelacije utvrđene između dužine vlakna i brzine zvučnih talasa ($r = 0,44$; $p < 0,05$). U ovom istraživanju vrednost r ima opseg od 0,293 do 0,587.

Tabela 26 – Regresioni modeli mehaničkih svojstava drveta crvenog hrasta na osnovu brzine zvuka po opsezima brzine

Raspon srednjih brzina (m/s)	Svojstvo drveta	Prosti linearni regresioni model		Koeficijent korelacije	Standardna greška procene
1400 – 1900	Gustina (WD)	yWD =	0.571783 + 0.0000797368*Vsr	0,825	0,009
	Čvrstoća na pritisak paralelno sa vlaknima (Hp)	yHp =	38.9384 + 0.0138132*Vsr	0,510	4,149
	Modul loma (MOR)	yMOR =	147510 - 83.2527*Vsr	-0,319	43952,5
	Modul elastičnosti (MOE)	yMOE =	4121.73 + 3.61506*Vsr	0,658	735,462
1900 – 2800	Gustina (WD)	yWD =	0.592316 + 0.0000488134*Vsr	0,704	0,014
	Čvrstoća na pritisak paralelno sa vlaknima (Hp)	yHp =	43.1862 + 0.00728106*Vsr	0,523	3,278
	Modul loma (MOR)	yMOR =	105.043 + 0.00808998*Vsr	0,483	4,103
	Modul elastičnosti (MOE)	yMOE =	5462.68 + 2.08927*Vsr	0,474	1085,45
	Procentualno učešće kasne zone (Pkz)	yPkz =	26.4896 + 0.0151519*Vsr	0,602	5,619
2800 – 3500	Gustina (WD)	yWD =	0.51126 + 0.000067318*Vsr	0,753	0,015
	Čvrstoća na pritisak paralelno sa vlaknima (Hp)	yHp =	23.2522 + 0.0105333*Vsr	0,606	3,444
	Modul loma (MOR)	yMOR =	96.1309 + 0.0108203*Vsr	-0,483	4,887
	Modul elastičnosti (MOE)	yMOE =	8371.65 + 0.917419*Vsr	0,336	641,332
	Dužina drvnih vlakana (Lv)	yLv =	0.271172 + 0.000275862*Vsr	0,380	0,167
	Procentualno učešće kasne zone (Pkz)	yPkz =	27.3341 + 0.0124494*Vsr	0,470	9,5,829

Napomena: Masnim brojkama su označene statistički značajne vrednosti.

Vrednosti Pirsonovih koeficijenata korelacije se kreću od slabih (za pritisnu čvrstoću i brzinu zvučnog talasa) (0,143) do umerenih i visokih korelacija (za gustinu) (0,825). Korelacije koje spadaju u opseg slabih ($r < 0,3$) nisu razmatrane. Što se tiče anatomskih svojstava, vrednosti dužina drvnih vlakana i procenat učešća kasne zone daju slabe do umerene korelacije sa brzinom zvuka u drugom i trećem opsegu brzina, koje se kreću od 0,380 do 0,244 za dužinu drvnih vlakana i 0,470 do 0,602 za procentualno učešće kasne zone u prstenu prirasta, dok u opsegu sa najmanjim vrednostima brzina daju slabe korelacije – 0,244 za dužinu vlakana i 0,143 za procenat kasnog drveta. Najviši koeficijent korelacije beleži se između gustine i srednje brzine zvučnog talasa. Pirsonovi koeficijenti kreću se od 0,704 do 0,825. Za MOE vrednosti daju umerene korelacije gde

se vrednosti koeficijenta korelacije kreću od 0,336 do 0,658. Koeficijenti korelacije između modula loma i srednje brzine zvučnog talasa daju umereno jake koeficijente korelacije, ali u prvom i trećem opsegu brzina zavisnost je negativna, a u drugom pozitivna. Umereno značajna korelacija postoji i kod pritiskne čvrstoće gde se Pearsonovi koeficijenti korelacije kreću od 0,510 do 0,606 (tabela 26).

U tabeli 27 prikazani su regresioni modeli zavisnosti pojedinih mehaničkih svojstava drveta crvenog hrasta i brzine zvuka, za sve obrađene podatke, ukupno. Može se videti da postoji značajna korelacija između gustine drveta ($r=0,705$) i MOE ($r=0,603$), u odnosu na brzinu zvuka dok su ostala posmatrana svojstva pokazuju niske vrednosti koeficijenta korelacije, pri proračunu baziranom na svim podacima. Ovo ukazuje da postoji potreba da se uzmu u obzir opsezi brzina zvuka pri procenjivanju mehaničkih svojstava pomoću zvučnih talasa. Kao i u prethodnim analizama, slabiji koeficijenti korelacija ($r<0,3$) nisu uzeti u razmatranje.

Tabela 27 – Regresioni modeli mehaničkih svojstava drveta crvenog hrasta na osnovu brzine zvuka

Svojstvo drveta	Prosti linearni regresioni model	Koeficijent korelacije	Standardna greška procene
Gustina (WD)	$y_{WD} = 0,649335 + 0,0000246251 \cdot V_{sr}$	0,705	0,015
Modul elastičnosti (MOE)	$y_{MOE} = 7714,66 + 1,13413 \cdot V_{sr}$	0,603	933,1
Procentualno učešće kasne zone (Pkz)	$y_{Pkz} = 51,7135 + 0,00471298 \cdot V_{sr}$	0,385	7,015

Napomena: Masnim brojkama su označene statistički značajne vrednosti.

Duong *et al.* (2018) su ispitivali radijalne i aksijalne varijacije u brzini uzdužnog ultrazvučnog talasa unutar stabala 17 i 19-godišnje *Melia azedarach* L. zasađene na dve različite lokacije u severnom Vijetnamu. Izmerili su brzinu ultrazvuka dužinu vlakana, gustinu u vazdušno suvom stanju i čvrstoću na pritisak pri sadržaju vlage približno 12%. Prosečna brzina talasa za dve lokacije je pokazala minimalnu vrednost u blizini srži od oko 3700 m/s. Jaka pozitivna linearna veza vidi se kod dužine vlakana ($r = 0,69$, $p < 0,001$) i gustine drveta ($r = 0,67$, $p < 0,001$). Postoji i značajna pozitivna linearna korelacija između pritiskne čvrstoće i srednje brzine ultrazvuka i to

sugerirše da je brzina ultrazvuka koristan prediktor pritisne čvrstoće. Njihovi rezultati ukazuju da brzina zvuka u mnogome zavisi od dužine vlakana i gustine drveta za vrstu *M. azedarach*.

Doung i Hasegawa (2024) dobili su značajnu korelaciju između akustične brzine i mehaničkih svojstava merenih destruktivnim ispitivanjima za MOE ($r = 0,94$; $P < 0,001$). Nije dobijena zavisnost gustine drveta i brzine akustičnog talasa. Ovaj rezultat ukazuje na to da postoji mogućnost procene anatomskih i mehaničkih svojstava koja ukazuju na kvalitet drveta, pomoću brzine zvuka.

Wang *et al.* (2008) su ispitivali brzinu zvuka u trupcima crvenog hrasta i na osnovu analize glavnih komponenti, zasnovane na matrici korelacije, saopštili su da postoje pozitivni odnosi između akustičkih vrednosti, mehaničkih svojstava i relativne količine čistog drveta. Pri tome je potrebno uzeti u obzir vlažnost drveta, iz razloga što voda sporije provodi zvuk od samog drveta, tako da sa povećanjem sadržaja vode u drvetu brzina zvuka opada (Šoškić & Popović 2002). Ovo je u istraživanju na crvenom hrastu potvrdio i Simpson (1998), zaključivši da je brzina zvuka osetljiva na promene vlage, te da ta osetljivost počinje pri sadržaju vlage iznad 30%.

Auty & Achim (2014) sproveli su istraživanje na belom boru s ciljem da razviju model koji bi na osnovu merenja akustičnim talasima mogao da predvidi kvalitet drveta i koji bi u obzir uzimao i različitu istoriju ispitivanih sastojina. Dobijena je dobra linearna regresiona korelacija između brzine zvučnih talasa i modula elastičnosti (MOE) ($R^2 = 0,53$), kao i između brzine zvučnih talasa i čvrstoće loma (MOR) ($R^2 = 0,59$). Predviđene srednje vrednosti MOE i MOR ukazivale su na to da su mehanička svojstva čistog drveta od prirodno regenerisanih stabala uporediva sa stablima gajenim na plantažama.

U ovoj doktorskoj disertaciji, prostom linearnom regresijom su dobijene jednačine, tj. modeli, kojima bi se mogla predvideti atomska i mehanička svojstva drveta crvenog hrasta koja ukazuju na kvalitet drveta na osnovu brzine zvuka. Modeli su izračunati za sva tri opsega brzina zvuka. Kao što se vidi u tabeli 43, regresiona analiza je rezultirala sa šest uspešnih modela – za svako proučavano svojstvo drveta. Ustanovljene vrednosti koeficijenta determinacije (R^2) pokazuju da je moguća individualna procena mehaničkih svojstava drveta crvenog hrasta, na osnovu izmerenih prosečnih brzina zvuka. Najveći R^2 , s prosečnom brzinom zvuka u aksijalnom pravcu, imala je gustina drveta ($R^2=0,825$). Pritom, potrebno je naglasiti uticaj lokaliteta i staništa, s obzirom da su svi parametri izračunati za uzorke sa svih lokaliteta. Vrednosti R^2 ukazuju na to da su ovi modeli potencijalno uspešni u određivanju mehaničkih svojstava drveta crvenog hrasta, ali je to neophodno proveriti i za druge vrste drveća. Stoga, rezultati budućih istraživanja bi trebalo da potraže odgovor na pitanje efikasnosti i tačnosti prediktivnih modela.

Sonderegger *et al.* (2008) su ispitivali gustinu, MOE i MOR drveta smrče i formirali linearne regresione modele za svako pojedinačno svojstvo. Njihova analiza mehaničkih svojstava otkriva da MOE i MOR mogu vrlo uspešno da se predvide linearnom funkcijom gustine drveta. De Oliveira *et al.* (2006) su radili eksperimente na uzorcima drveta ($5 \times 5 \times 5$ cm) iz nekoliko vrsta (*Pinus caribea* var. *caribea*, *Eucaliptus citriodora* Hook., *E. glauca*, *Himenaea* sp.). Analizirali su odnos gustine i brzine zvuka, između i unutar vrsta. Rezultati koje su dobili između vrsta pokazuju da ultrazvučna brzina ima tendenciju povećanja s povećanjem gustine. Rezultati unutar vrsta su takođe pokazali trend povećanja ultrazvučne brzine s povećanjem gustina drveta, ali taj odnos nije bio toliko značajan kao onaj među vrstama.

Smulski (1989) je na osnovu analize vrste *M. azedarach* zaključio da su različita svojstva statičke elastičnosti i čvrstoće drveta u korelaciji sa dinamičkim modulom elastičnosti, zasnovano

na brzini kojom se šire longitudinalni naponski talasi kroz drvo. Dalje, Gerhards (1982) je sumirao rezultate petnaest istraživanja – u kojima su pronađene značajne korelacije između modula naponskih talasa (MOEd) i modula zatezanja, pritiska ili savijanja (MOE), ili čvrstoće na savijanje (MOR) drveta i furnira. Takođe je sagledao efekte različitih faktora drveta koji utiču na brzinu naponskih talasa – u opsegu od 3000 m/s do 6000 m/s, paralelno sa vlaknima u drvetu, bez oštećenja pri sadržaju vlage od 9 do 15%. Utvrdio je da brzina talasa opada obrnuto s povećanjem ugla pružanja vlakana, temperature drveta ili sadržaja vlage. Konstatovao je i da je brzina naponskih talasa veća u kasnom nego u ranom drvetu, kao i da je niža u devastiranom (trulom) drvetu. Vrednosti modula elastičnosti, određene pomoću naponskih talasa, obično su oko 10–20% veće od onih koje su određene statičkim testovima. Autor je zaključio da je za puno drvo modul naponskih talasa u visokoj korelaciji sa statičkim modulom elastičnosti, ali je ovaj modul ipak umereno korelisan sa statičkom čvrstoćom.

6.7 Poređenje dobijenih statističkih modela primenom fraktometra i akustičnog tomografa

Nakon izrade matematičkih modela za procenu mehaničkih i anatomskih svojstava drveta, korišćen je proračun RPD faktora - odnos performansi prema devijaciji (*eng. ratio performance deviation*) preporučenog od Schimleck *et al.* (2001) i Sandak *et al.* (2016). RPD faktor se koristi za procenu pouzdanosti modela i računa se pomoću standardne devijacije (SD) i standardne greške predviđanja (SEP).

Urađena je i procena na osnovu rezidualnog prediktivnog interkvartilnog opsega – RPIQ faktora, koji predstavlja statističku meru koja se koristi za procenu tačnosti modela predviđanja, posebno u situacijama kada podaci imaju malu varijaciju. Umesto da se oslanja samo na prosečnu grešku, RPIQ omogućava procenu kvaliteta modela na osnovu raspodele podataka. RPIQ se računa kao odnos između interkvartilnog opsega (IQR) i rezidualne greške predviđanja (RMSE).

6.7.1 Poređenje modela prema vrednosti RPD

SEP ili srednja kvadratna greška predviđanja (RMSEP) je parametar koji se za opis sposobnosti predviđanja modela (Todorović *et al.* 2022). Očekivane vrednosti RPD se mogu naći u opsezima koji označavaju: preliminarni skrining - $1,5 \leq RPD \leq 2,0$; skrining - $2,0 < RPD \leq 5,0$; i kontrolu kvaliteta - $5,0 < RPD \leq 8,0$ (Schimleck *et al.* 2001).

Za analizu fraktometrom provereni su multivarijantni modeli koji su na osnovu tri parametra dali predviđene vrednosti mehaničkih svojstava. Za analizu zvukom, istraživani su linearni modeli gde je procena kvaliteta drveta rađena pomoću jednog parametra – srednje brzine zvuka.

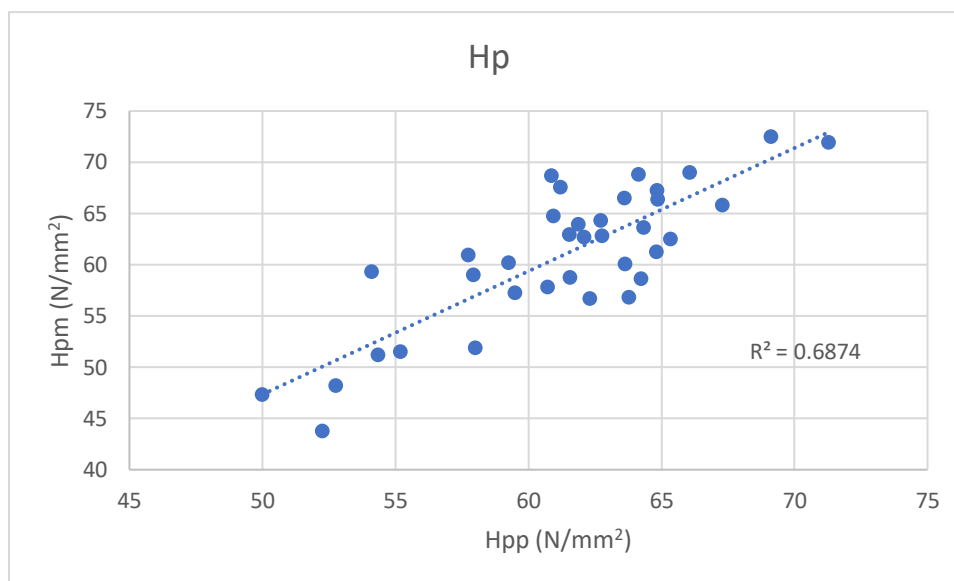
U tabeli 28 prikazani su rezultati ovih vrednosti za analizu pomoću fraktometra.

Tabela 28 – pokazatelji pouzdanosti modela (RPD) dobijenih fraktometrom

	Broj uzoraka	SEP	Rp ²	RPD
Gustina (WD)	39	0,052	0,553	1,53
Čvrstoća na pritisak paralelno sa vlaknima (Hp)	36	3,973	0,687	1,73
Modul loma (MOR)	46	11,968	0,611	1,56
Modul elastičnosti (MOE)	49	1284,266	0,663	1,06

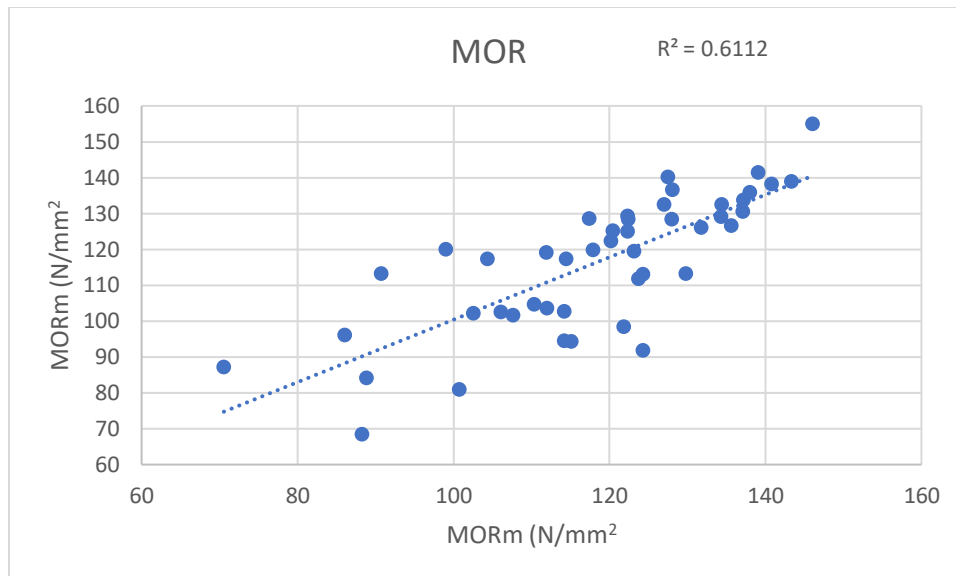
Prilikom formiranja regresionih modela, izvršena je kontrola kvaliteta podataka i uklanjanje ekstremnih vrednosti (outliers), koje su odstupale od uobičajenog raspona merenja. Ova korekcija je bila neophodna kako bi se izbegla pristrasnost modela i obezbedila stabilnost statističkih pokazatelja kao što su RPIQ (Ratio of Performance to Interquartile Distance) i RPD (Residual Prediction Deviation). Uklanjanjem ekstremnih vrednosti postignuto je da modeli daju realističnije i pouzdanije procene, iako to znači da se broj uzoraka razlikuje između pojedinih svojstava. Ovakav pristup je uobičajen u istraživanjima ovog tipa, jer obezbeđuje veću upotrebljivost modela u praktičnoj primeni.

Najveću vrednost koeficijenta determinacije između merenih i predviđenih vrednosti ima model koji predviđa H_p i on iznosi $R^2 = 0,687$ a i najvišu vrednost RPD 1,7 te ulazi u opseg preliminarnog skrininga $1,5 \leq RPD \leq 2,0$; (slika 54).



Slika 56 – koeficijent determinacije između merenih vrednosti $H_p(N/mm^2)$ i vrednosti dobijenih pomoću modela

Modeli za predviđanje vrednosti WD i MOR imaju približne vrednosti RPD i spadaju u opseg preliminarnog skrininga, dok model za MOE ima RPD 1,06 i to ga čini nedovoljno pouzdanim. Koeficijent determinacije između merenih i predviđenih vrednosti za MOR iznosi $R^2=0,611$ (slika 56).



Slika 57 – koeficijent determinacije između merenih vrednosti MOR(N/mm²) i vrednosti dobijenih pomoću modela

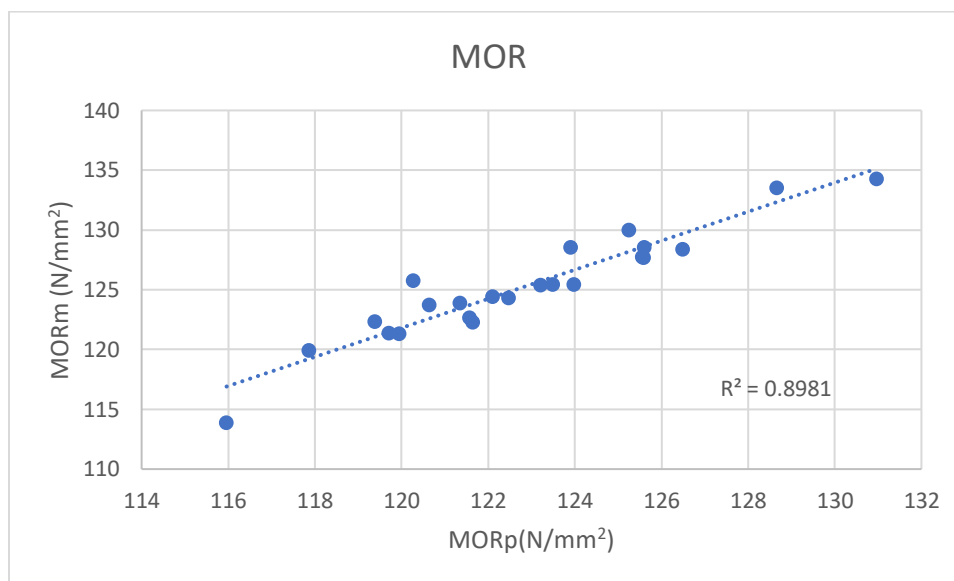
U tabeli 29 prikazani su rezultati provere pouzdanosti modela dobijenih na osnovu brzine zvučnih talasa. Primećuje se da svi modeli dobijeni na osnovu srednje brzine zvuka mogu se koristiti za preliminarni skrining i predviđanje proučavanih svojstava. Naime, sve vrednosti RDP nalaze se u opsegu $1.5 \leq RPD \leq 2.0$. Najvišu vrednost koeficijent determinacije podataka dobijenih proverom modela i srednjih brzina zvuka ima model koji predviđa vrednosti MOR i on iznosi $R^2=0,891$.

Tabela 29 - pokazatelji pouzdanosti (RPD) modela dobijenih zvukom

	Broj uzoraka	SEP	Rp ²	RPD
Gustina (WD)	24	0,0085	0,666	1,57
Čvrstoća na pritisak paralelno sa vlaknima (Hp)	28	0,5573	0,738	1,56
Modul loma (MOR)	23	2,950	0,898	1,51
Modul elastičnosti (MOE)	24	325,282	0,632	1,61
Dužina drvnih vlakana (Lv)	15	0,146	0,724	1,51
Procentualno učešće kasne zone (Pkz)	15	1,403	0,828	1,51

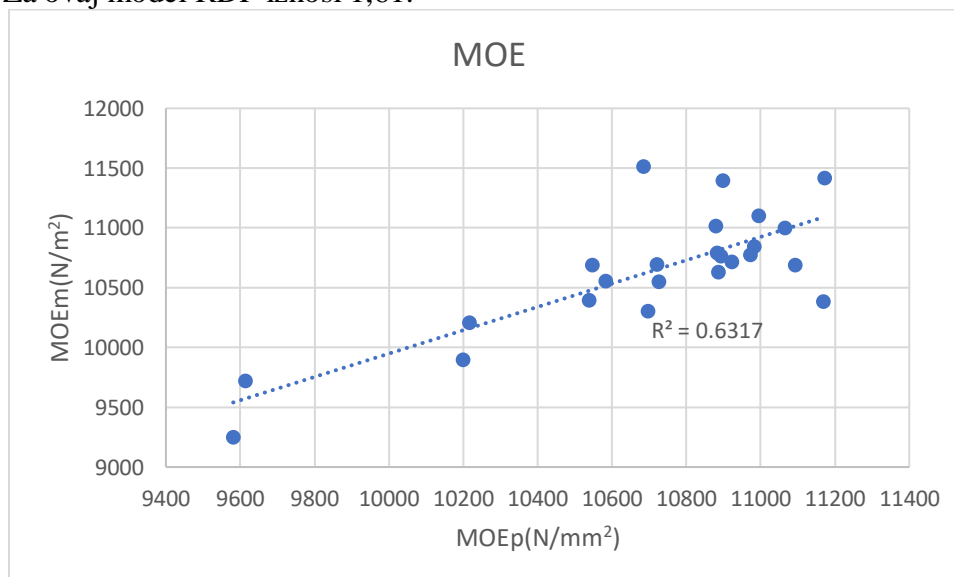
Na slici 57 su prikazane izmerene (MORm) i predviđene (MORp) vrednosti za modul loma. Može se konstatovati dobra linearna zavisnost ove dve vrednosti. Ipak i pored dobre linearne zavisnosti,

vrednost RPD iznosi samo 1,51, što ovaj model stavlja na sam početak opsega preliminarnog skrininga.



Slika 58 – koeficijent determinacije između merenih vrednosti MOR(N/mm²) i vrednosti dobijenih pomoću modela

Najnižu vrednost koeficijenta determinacije ima model za procenu MOE i ona iznosi $R^2 = 0,632$ (slika 59). Za ovaj model RDP iznosi 1,61.



Slika 59 – koeficijent determinacije između merenih vrednosti MOE(N/mm²) i vrednosti dobijenih pomoću modela

Kada se uporede vrednosti za procenu pouzdanosti modela dobijenih pomoću fraktometra i zvuka može se reći da se dobijaju prilično ujednačene vrednosti RDP ali i da modeli dobijeni

korišćenjem fraktometra imaju niže vrednosti R^2 od modela dobijenih zvučnom metodom. Ovo se može objasniti činjenicom da su modeli dobijeni, fraktometrijskom analizom, multivarijantni, i dobijeni su na osnovu 3 izmerena parametra, dok su modeli rađeni na osnovu zvuka linearni, i dobijeni su na osnovu samo jednog parametra – srednje brzine zvuka. Ipak, obe ove analize pokazuju da se na osnovu ovakvih, nedestruktivnih analiza mogu predvideti mehanička i neka anatomska svojstva drveta.

Važno je napomenuti da prilikom određivanja graničnih vrednosti ovih opsega pouzdanosti RDP-a nije korišćena statistička osnova za određivanje. Drugi istraživači dali su prilično različite (tj. mnogo veće) opsege. Reeves III & Smith (2009) se nisu složili sa ovim fiksnim opsezima. Prema njihovim rečima, mnogi istraživači su otkrili da su modeli prilično pouzdani i sa vrednostima RPD znatno nižim od predloženih standarda.

6.7.2 Poređenje prema vrednosti RPIQ

RPIQ je statistička mera koja omogućava procenu kvaliteta modela u situacijama sa malom varijacijom podataka, oslanjajući se na raspodelu podataka umesto prosečne greške. (Hans & Allison, 2021). RPIQ ispod 1.5 označava loš model, dok vrednosti od 1.5 do 2.0 ukazuju na prihvatljiv model za grubu procenu. Interval od 2.0 do 2.5 označava dobar model za približne predikcije, a od 2.5 do 3.0 vrlo dobar model sa praktičnom prediktivnom moći. Vrednosti iznad 3.0 ukazuju na odličan i pouzdan model (Bellon-Maurel *et al.* 2010).

U analizi fraktometrom primenjeni su multivarijantni modeli, koji su koristeći tri parametra omogućili predikciju mehaničkih svojstava drveta. Kod analize zvukom, istraženi su linearni modeli, pri čemu se procena kvaliteta drveta zasnivala na jednom parametru – srednjoj brzini zvuka.

U tabeli 30 prikazani su rezultati ovih vrednosti za analizu pomoću fraktometra.

Tabela 30 – pokazatelji pouzdanosti modela (RPIQ) dobijenih fraktometrom

	Broj uzoraka	IQR	RMSE	RPIQ
Gustina (WD)	39	0.12	0.05	2.27
Čvrstoća na pritisak paralelno sa vlaknima (Hp)	36	8.52	3.92	2.18
Modul loma (MOR)	46	26.68	7.82	3.41
Modul elastičnosti (MOE)	49	2639.28	1421.49	1.86

U tabeli 30 predstavljeni su rezultati procene pouzdanosti modela zasnovanih na analizi brzine zvučnih talasa. Uočava se da svi modeli bazirani na srednjoj brzini zvuka omogućavaju pouzdan preliminarni skrining i predviđanje proučavanih svojstava drveta. Rezultati pokazuju da su RPIQ vrednosti za analizirane parametre u rasponu od 1.86 do 3.41, pri čemu MOR ima najvišu vrednost (3.41), što ukazuje na odličnu prediktivnu sposobnost modela za procenu modula loma. Gustina (WD) i čvrstoća na pritisak (Hp) imaju RPIQ vrednosti 2.27 i 2.18, što ih svrstava u kategoriju dobrih modela za predikciju. MOE, sa RPIQ vrednošću 1.86, pokazuje nešto slabiju prediktivnu moć, ali je i dalje u prihvatljivom opsegu za preliminarni skrining. Prema referentnim vrednostima iz literature, RPIQ između 2.0 i 2.5 ukazuje na dobar model, dok vrednosti iznad 3.0 označavaju odličan model za predikciju (Hiziroglu, 2016; Green 1999.) Ovi rezultati sugerišu da su modeli za MOR najpouzdaniji, dok je MOE na granici prihvatljivosti za predikciju mehaničkih svojstava drveta.

Tabela 31 - pokazatelji pouzdanosti (RPIQ) modela dobijenih zvukom

	Broj uzoraka	IQR	RMSE	RPIQ
Gustina (WD)	24	0.01	0.01	1.16
Čvrstoća na pritisak paralelno sa vlaknima (Hp)	28	1.00	0.55	1.82
Modul loma (MOR)	23	5.07	2.89	1.76
Modul elastičnosti (MOE)	24	457.00	318.43	1.44
Dužina drvnih vlakana (Lv)	15	0.39	0.14	2.73
Procentualno učešće kasne zone (Pkz)	15	3.18	1.36	2.34

Rezultati u tabeli 31 pokazuju da RPIQ vrednosti variraju u zavisnosti od analiziranih parametara, pri čemu dužina drvnih vlakana (L_v) ima najvišu vrednost (2.73), što ukazuje na vrlo dobru prediktivnu sposobnost modela za ovaj parametar. Procentualno učešće kasne zone (Pkz) takođe pokazuje solidnu prediktivnu moć sa $RPIQ = 2.34$ (Gao & Huang 2022).

Čvrstoća na pritisak paralelno sa vlaknima (H_p) i MOR imaju vrednosti 1.82 i 1.76, što ih svrstava u kategoriju prihvatljivih modela, dok MOE i gustina (WD) imaju niže vrednosti 1.44 i 1.16, što ukazuje na ograničenu prediktivnu sposobnost.

Prema klasifikaciji Gao & Huang (2022), modeli sa RPIQ između 1.5 i 2.0 mogu se koristiti za preliminarni skrining, dok vrednosti iznad 2.5 označavaju vrlo dobar model za predikciju. Ovi rezultati sugerišu da su modeli za L_v i Pkz najpouzdaniji, dok su MOE i WD na granici prihvatljivosti za predikciju mehaničkih svojstava drveta.

U poređenju sa time, akustična tomografija pokazala je slabije performanse, naročito u proceni modula elastičnosti (MOE), gde je $R^2 = 0,81$ i $RPD = 1,79$, što se svrstava u kategoriju „ograničene upotrebljivosti“ (Preston *et al.*, 2014). Prema kriterijumima koje navode Williams & Norris (2001) i Schimleck *et al.* (2019), RPD veći od 2 ukazuje na dobru, a veći od 3 na veoma dobru prediktivnu sposobnost. Stoga se može zaključiti da fraktometrija, naročito kod MOR-a, postiže vrlo dobar nivo tačnosti, dok akustična tomografija pokazuje zadovoljavajuće, ali manje pouzdane rezultate.

Posebno je zanimljivo da su kod gustine razlike između metoda uočljive: fraktometar daje $R^2 = 0,95$, dok zvuk ima 0,82, što potvrđuje da akustična metoda može da uhvati trendove, ali je manje precizna u apsolutnim predikcijama. Ovakvi nalazi u skladu su sa ranijim istraživanjima (Wessels *et al.*, 2011; Rinn, 2012; Grabner *et al.*, 2011), gde se pokazalo da fraktometrija ima

prednost u direktnoj vezi sa strukturnim svojstvima drveta, dok je akustika pogodnija za brze terenske procene i detekciju defektnih zona.

Tabela 32 - Usporedni pokazatelji pouzdanosti modela fraktometrijskih i akustičnih metoda za procenu fizičko-mehaničkih svojstava crvenog hrasta

Metod	R ²	RMSE	RPIQ	RPD
Fraktometar – Gustina	0.95	0.023	2.41	2.50
Zvuk – Gustina	0.82	0.041	1.95	2.01
Fraktometar – MOR	0.96	7.22	3.41	3.45
Zvuk – MOR	0.85	10.15	2.18	2.23
Fraktometar – MOE	0.93	850	1.86	1.92
Zvuk – MOE	0.81	1250	1.74	1.79

Rezultati prikazani u tabeli 32 ukazuju da su modeli bazirani na fraktometrijskim merenjima generalno davali bolje predikcione performanse od modela zasnovanih na brzini zvuka. Koeficijenti determinacije (R²) za fraktometar kreću se između 0,93 i 0,96, dok su kod akustičnih metoda vrednosti u rasponu 0,81–0,85. Najbolje slaganje dobijeno je kod predikcije MOR-a fraktometrijom (R² = 0,96; RPIQ = 3,41; RPD = 3,45), što potvrđuje visoku osetljivost ove metode za procenu savojne čvrstoće.

Posebno se ističu rezultati za MOR, gde je RPIQ dostigao vrednost od 3.41, što ga svrstava u kategoriju odličnog modela za predikciju. S druge strane, MOE pokazuje nešto slabiju prediktivnu moć, sa RPIQ od 1.86, ali je i dalje u granicama prihvatljivosti za preliminarne procene. Dužina drvnih vlakana (Lv) i procentualno učešće kasne zone (Pkz) imaju solidne RPIQ vrednosti (2.73 i 2.34), što ukazuje na njihovu pouzdanost u predikciji anatomskih karakteristika drveta.

Dobijeni rezultati potvrđuju da su oba pristupa, fraktometrijski i zvučni modeli, pogodni za nedestruktivnu procenu mehaničkih svojstava drveta, pri čemu svaki metod ima specifične

prednosti i ograničenja. Fraktometrijski modeli omogućavaju dublju analizu zasnovanu na više parametara, dok su zvučni modeli korisni za brzu, praktičnu procenu kvaliteta drveta.

Iako su svi razvijeni modeli pokazali zadovoljavajući nivo prediktivne pouzdanosti, primećuje se da je za MOE dobijen nešto niži koeficijent determinacije i vrednosti RPD i RPIQ faktora u poređenju sa MOR-om i gustinom. Ovakvi rezultati mogu se objasniti višestrukim uzrocima. Najpre, modul elastičnosti je svojstvo koje zavisi od većeg broja strukturalnih faktora drveta, uključujući odnos ranog i kasnog drveta, varijabilnost širine prstenova i gustinu ćelijskih zidova (Zobel & Van Buijtenen, 1989; Šoškić & Popović, 2002). Neujednačena struktura prstenova, naročito na lokalitetima sa izraženijim ekološkim stresom, može značajno uticati na disperziju rezultata.

Pored toga, sadržaj vlage u drvetu može doprineti varijabilnosti rezultata, jer se MOE pokazuje osetljivijim na promene vlažnosti nego MOR ili pritisna čvrstoća (Ross *et al.*, 1999). Još jedan potencijalni izvor neslaganja je metodološke prirode: tokom fraktometrijskih i akustičnih merenja, manja odstupanja u pozicioniranju senzora ili varijacije u kvalitetu kontakta mogu povećati grešku merenja, što se naročito odražava na parametre koji zahtevaju visoku preciznost, kao što je MOE (Grabner *et al.*, 2011).

Vrednosti RPIQ i RPD faktora pokazuju da su modeli za MOR najpouzdaniji, dok MOE zahteva poboljšanja u prediktivnim kapacitetima. Ovi podaci mogu poslužiti kao osnova za buduća istraživanja, koja bi uključivala optimizaciju algoritama ili kombinaciju više pristupa radi poboljšanja tačnosti modela predikcije.

8. ZAKLJUČCI

Imajući u vidu predmet i cilj ove doktorske disertacije, i na osnovu dobijenih rezultata istraživanja koji se odnose na ispitivanje fizičkih i mehaničkih svojstva drveta crvenog hrasta, kao egzote u Srbiji, te mogućnosti predviđanja svojstava drveta ove vrste pomoću akustičnih talasa i metodom fraktometrije, moguće je izvesti sledeće zaključke:

- Širina prstenova prirasta stabala u juvenilnoj zoni iznosi u proseku 3,107 mm za lokalitet Bruske šume, 3,37 mm za Debeli Lug i 2,48 mm za Stepin lug. Širina prstenova prirasta u zoni zrelog drveta iznosi 2,861 mm za lokalitet Bruske šume, 4,111 mm za Debeli Lug i 5,602 mm za Stepin lug. U Stepinom lugu uočene su najizraženije razlike između juvenilne i zrele zone. U juvenilnoj zoni stabla pokazuju najšire prosečne prstenove (5,60 mm), dok su u zoni zrelog drveta prosečne vrednosti najuže među svim lokalitetima (2,48 mm). Ovakav kontrast ukazuje na specifične stanišne uslove i izraženu varijabilnost prirasta na ovom lokalitetu. i najmanje učešće kasne zone u prstenu prirasta, verovatno kao posledica stanišnih uslova koji su na ovom lokalitetu najnepovoljniji. U literaturi postoje velike varijacije u širini prstenova prirasta različitih vrsta hrastova sa različitih staništa, pri čemu ispitivana stabla spadaju u sve ove opsege.

- Učešće zone kasnog drveta u proseku iznosi 63,34% za Bruske šume, 71,93% u Debelom Lugu i 60,01% u Stepinom lugu. U juvenilim zonama svih trupčica prosečna širina kasne zone u prstenu prirasta iznosi 2,180 mm za Bruske šume, 3,064 mm za Debeli Lug i 3,780 mm za Stepin lug. Ukupno učešće kasne zone u prstenu prirasta u zreloom drvetu svih trupčica iznosi 61,04% za lokalitet Bruske šume, 67,71% za Debeli Lug i 53,44% za Stepin lug. U poređenju sa literaturnim vrednostima se može zaključiti da crveni hrast u svom prirodnom staništu daje drvo sa većim učešćem kasne zone, ali da je to učešće i kod stabala

sa naših prostora relativno veliko i kreće se do 96%. U odnosu na ostale vrste hrastova može se zaključiti da crveni hrast ima veće učešće kasne zone.

- Učešće srčevine na poprečnom preseku u proseku iznosi 88,84% za lokalitet Bruske šume, 91,81% za Debeli Lug i 96,78% za Stepin lug, što navodi na zaključak da je učešće srčevine u Stepinom lugu veće u odnosu na ostale lokalitete. Učešće beljike je u proseku 11,15% za Bruske šume, 8,19% za Debeli Lug i 3,22% za Stepin lug, odnosno, slično je učešću kod drugih vrsta hrastova našeg podneblja.

- Dužina vlakana iznosila je u proseku 1,183 mm u zreloom drvetu, 1,156 mm u juvenilnoj zoni i 1,170 mm u delu beljike stabala iz Bruskih šuma, 1,32 mm u zreloom drvetu, 1,91 mm u juvenilnom delu drveta i 1,21 mm u delu beljike stabala u Debelom Lugu, kao i 1,29 mm za zrelo drvo, 1,10 mm za juvenilni deo i 1,25 mm za deo beljike stabala u Stepinom lugu, na osnovu čega se može zaključiti da su vrednosti dužine drvnih vlakana najveće u Debelom Lugu, a najmanje na lokalitetu Stepin lug. Broj drvnih vlakana je u proseku 2061 vlakno/mm² za lokalitet Bruske šume, 1974,33 vlakna/mm² za Debeli Lug, kao i 1779,667 vlakana/mm² za Stepin lug, što navodi na zaključak da je ova vrednost najveća u Bruskim šumama, dok je najmanja u Stepinom lugu. Ukupno posmatrano za sva analizirana stabla crvenog hrasta u ovom istraživanju, ova vrednost u proseku iznosi 1944,789 vlakana/mm². U poređenju sa literaturom, navedene vrednosti odgovaraju podacima za crveni hrast koje su dali drugi autori. Nešto lošije rezultate pokazala su stabla sa lokaliteta Stepin lug, pa se može zaključiti da je ovo stanište najnepovoljnije za ovu vrstu u odnosu na preostala dva lokaliteta.

- Gustina drveta u apsolutno suvom stanju iznosi u proseku $0,724 \text{ g/cm}^3$ za uzorke uzete sa lokaliteta Bruske šume, $0,720 \text{ g/cm}^3$ za Debeli Lug i $0,678 \text{ g/cm}^3$ za Stepin lug, pri čemu je najniža prosečna vrednost zabeležena na lokalitetu Stepin lug

- Pritisna čvrstoća paralelno s vlaknima uzorkovanih stabala crvenog hrasta na istraživanim lokalitetima je u proseku iznosila $58,92$ za Bruske šume, $63,64 \text{ MPa}$ za Debeli Lug i $56,53 \text{ MPa}$ za Stepin lug, a ukupno gledano za sva tri lokaliteta ona u proseku iznosi $60,26 \text{ MPa}$. Modul elastičnosti (MOE) u proseku iznosi $9578,53 \text{ MPa}$ na lokalitetu Bruske šume, dok $11103,1 \text{ MPa}$ u Debelom Lugu i $10825,2 \text{ MPa}$ na lokalitetu Stepin Lug, a ukupno na svim lokalitetima u proseku je $10778,0 \text{ MPa}$. Modul loma (MOR) u proseku iznosi $118,42 \text{ MPa}$ u Bruskim šumama, $131,81 \text{ MPa}$ u Debelom lugu i $120,54 \text{ MPa}$ u Stepinom lugu, a na sva tri lokaliteta savojna čvrstoća u proseku iznosi $125,56 \text{ MPa}$. U poređenju sa literaturnim vrednostima za ostale hrastove, može se zaključiti da crveni hrast sa teritorije naše zemlje ima približno jednake, ili malo veće prosečne vrednosti modula elastičnosti kao i savojne čvrstoće, što ga može svrstati u ekonomski značajnu vrstu za preradu drveta.

- Savojna čvrstoća izvrtaka testirana fraktometrom u proseku iznosi $9,39 \text{ MPa}$ na lokalitetu Bruske šume, $9,998 \text{ MPa}$ u Debelom Lugu, kao i $8,51 \text{ MPa}$ u Stepinom lugu, pri čemu je zaključeno da se ovaj parametar ne može koristiti za pouzdanu procenu kvaliteta drveta, pošto nije visoko korelisan s mehaničkim svojstvima.

- Ugao loma izvrtaka testiran fraktometrom u proseku iznosi $15,63^\circ$ za Bruske šume, $17,84^\circ$ za Debeli Lug i $18,06^\circ$ za Stepin lug, pri čemu je zaključeno da je ugao loma izvrtka pri savijanju koristan parametar za procenu kvaliteta drveta.

- Čvrstoća na pritisak izvrtaka paralelno s vlaknima testirana fraktometrom iznosila je u proseku 35,61 MPa u Bruskim šumama, 37,83 MPa za lokalitet Debeli lug i 33,02 MPa za Stepin lug, pri čemu je na osnovu statističkih analiza zaključeno da je čvrstoća na pritisak izvrtka paralelno s vlaknima vrlo koristan parametar za procenu kvaliteta drveta.

- Najveću srednju vrednost brzine zvuka u radijalnom pravcu od 2025 m/s imaju stabla sa lokaliteta Bruske šume, a najnižu vrednost, 1193 m/s, stabla s lokaliteta Stepin lug. Najveću prosečnu tangencijalnu brzinu pokazala su stabla s lokaliteta Bruske šume (2225 m/s), a najnižu vrednost – stabla s lokaliteta Debeli lug (1215 m/s). Za sve lokalitete, vrednost brzine prostiranja zvučnih talasa u radijalnom pravcu u proseku iznosi 1551 m/s, dok je brzina prostiranja zvuka u tangencijalnom pravcu 1533 m/s. Zaključuje se da, u proseku, brzina prostiranja zvuka kroz stabla crvenog hrasta iz Srbije odgovara navodima u literaturi za crveni hrast sa drugih lokaliteta. Kao i kod prosečne brzine zvučnih talasa, dinamički modul elastičnosti (MOEd) najveći je za stabla s lokaliteta Bruske šume i u proseku iznosi 3606,07 MPa, dok je najniži u Debelom lugu i iznosi 1358,37 MPa. Anatomska svojstva su dale dobre korelacije na lokalitetima Bruske šume i Stepin lug dok u Debelom lugu korelacija nije značajna. Najbolje korelacije srednje brzine zvuka i mehaničkih svojstava drveta su na lokalitetu Bruske šume i one iznose $r = 0,812$ za gustinu, $r = 0,835$ za MOE i $R^2 = 0,769$ za MOR. Za Debeli lug, korelisanost između gustine i srednje brzine zvuka je umereno značajna ($R^2 = 0,594$), dok MOR i Hp nisu značajno korelisane. Na lokalitetu Stepin lug, korelacije između svih analiziranih svojstava drveta i brzine zvuka daju umerene do jake korelacije.

- Za mehanička svojstva procenjena na osnovu srednjih brzina vrednosti Pirsonovih koeficijenata korelacije su se kretale od slabih – za pritisnu čvrstoću i brzinu zvučnog talasa

(0,143) do umerenih – visokih korelacija (0,825) za gustinu. Anatomska svojstava, vrednosti dužina drvnih vlakana i procenat učešća kasne zone, umereno su korelisani sa srednjom brzinom zvuka u drugom (1900 – 2800 m/s) i trećem opsegu brzina (2800-3500 m/s, dok su u opsegu sa najmanjim vrednostima brzina (1400 – 1900 m/s) korelacije nisu bile statistički značajne. Najviši koeficijent korelacije dobijen je između gustine i srednje brzine zvučnog talasa. Pirsonovi koeficijenti kretali su se od 0,704 do 0,825. Za MOE i MOR su umereno korelisani sa srednjom brzinom zvuka. korelacija postoji i kod pritiska čvrstoće gde se Pirsonovi koeficijenti korelacije kreću od 0,510 do 0,606.

- Svojstva drveta se mogu uspešno odrediti na osnovu parametara dobijenih fraktometrom. Višestruki regresioni testovi su rezultirali sa četiri modela za svako proučavano svojstvo drveta, pri čemu su proverom modela ustanovljene prihvatljive vrednosti koeficijenta determinacije za tri modela, na osnovu čega se zaključuje da se fraktometrijska merenja mogu uspešno koristiti u proceni kvaliteta drveta crvenog hrasta.

- Svojstva drveta su korelisana s parametrima dobijenim pomoću akustičnog tomografa. Prostom linearnom regresijom razvijene su formule modela kojima bi se mogla proceniti mehanička svojstva drveta crvenog hrasta. Regresioni testovi su rezultirali sa šest uspešnih modela za svako proučavano svojstvo drveta, na osnovu čega se zaključuje da je na osnovu izmerenih prosečnih brzina zvuka u drvetu moguća procena mehaničkih svojstava drveta crvenog hrasta.

- Poređenjem rezultata ovih proračuna, može se konstatovati da modeli za procenu kvaliteta drveta imaju ujednačenu pouzdanost ali modeli dobijeni pomoću akustične metode imaju nešto više koeficijente determinacije. Svi modeli, osim jednog daju zadovoljavajuću pouzdanost pri proceni mehaničkih i anatomskih svojstava drveta. Dobijeni rezultati jasno

ukazuju na visok potencijal fraktometrijskih i zvučnih modela za nedestruktivnu procenu mehaničkih svojstava drveta, pri čemu svaki metod donosi specifične prednosti i izazove. Fraktometrijski modeli, zasnovani na višestrukim parametrima, omogućavaju dublju analizu strukture drveta, pružajući sveobuhvatniji uvid u njegove mehaničke osobine. Nasuprot tome, zvučni modeli, iako zasnovani na jednom parametru, srednjoj brzini zvuka, pokazuju efikasnost u brzom proceni kvaliteta drveta, čineći ih korisnim za brzu i praktičnu primenu na terenu.

Naučni doprinos doktorske disertacije obuhvata poznavanje makroskopskih, mikroskopskih, fizičkih i mehaničkih svojstava drveta crvenog hrasta u Srbiji, njihovo poređenje sa svojstvima domaćih vrsta hrastova koji su najzastupljeniji u regionalnoj drvnoj industriji, određivanje kvaliteta drveta crvenog hrasta fraktometrom i akustičnim metodama, kao i uspostavljanje statističkih modela za procenu kvaliteta njegovog drveta na osnovu ovih rezultata, što može poslužiti kao osnova za buduća istraživanja i primenu na drugim vrstama drveća, uz prethodnu modifikaciju. Multidisciplinarni pristup istraživanja omogućava detaljno razumevanje karakteristika drveta crvenog hrasta u Srbiji i otvara put ka unapređenju njegove upotrebe u različitim sektorima lokalne drvne industrije.

Na osnovu sprovedenih istraživanja koja su obuhvatila anatomske analize, ispitivanje fizičko-mehaničkih svojstava, kao i primenu metoda akustične tomografije i fraktometrije, može se izvesti niz zaključaka koji potvrđuju ili delimično potvrđuju postavljene hipoteze. Rezultati su razmotreni u kontekstu postojeće literature i ukazuju na značajne implikacije kako u naučnom, tako i u praktičnom smislu upravljanja šumama i industrijske prerade drveta.

Prva hipoteza (H1) polazila je od pretpostavke da postoji statistički značajna linearna zavisnost između brzine zvučnih talasa u radijalnom i tangencijalnom pravcu i savojne čvrstoće drveta crvenog hrasta. Dobijeni rezultati potvrdili su ovu hipotezu, jer su korelacije između brzina i MOR bile statistički značajne, sa najvišim vrednostima u zoni zrelog drveta. Iako je primećena određena varijabilnost između lokaliteta, prosečne vrednosti pokazuju konzistentnu vezu između zvučnih merenja i savojne čvrstoće, što potvrđuje praktičnu upotrebljivost akustične metode.

Druga hipoteza (H2) odnosila se na povezanost vrednosti pritisne čvrstoće dobijene fraktometrom i laboratorijski određenih vrednosti ovog svojstva. Rezultati su pokazali visoku korelaciju ($R^2 > 0,80$), što jasno potvrđuje hipotezu. Time je dokazano da fraktometar, iako poludestruktivan, pouzdano reflektuje realna mehanička svojstva drveta, čime se opravdava njegova primena u terenskim uslovima.

Treća hipoteza (H3) bila je da modeli zasnovani na podacima sa fraktometra objašnjavaju veću varijansu modula elastičnosti (MOE) u odnosu na modele koji koriste podatke iz akustične tomografije. Rezultati su ovu hipotezu potvrdili, jer su R^2 vrednosti za fraktometrijske modele bile u proseku više (0,93) nego kod akustičnih (0,81). Ovo znači da fraktometrijska merenja daju robusnije prediktore za MOE, dok zvučna metoda može biti korisna kao dopuna.

Četvrta hipoteza (H4) pretpostavljala je da se udaljenost brzine zvuka od srednjih vrednosti (V_r i V_t) značajno razlikuje u zavisnosti od anatomske zone i da je povezana sa dužinom i brojem vlakana. Analize su pokazale da u juvenilnom drvetu, gde su vlakna kraća i gušće

raspoređena, brzine zvuka odstupaju od onih u zreloom drvetu. Dobijeni rezultati potvrdili su značajne razlike ($p < 0,05$), čime je hipoteza potvrđena. Ovo ukazuje da akustična merenja reflektuju i unutrašnje anatomske osobine drveta.

Peta hipoteza (H5) polazila je od pretpostavke da kombinovani modeli, koji uključuju varijable iz fraktometrije i akustične tomografije, imaju viši stepen pouzdanosti u proceni kvaliteta drveta od modela zasnovanih samo na jednoj metodi. Rezultati su pokazali da integrisani modeli postižu najviše vrednosti determinacije ($R^2 > 0,97$), dok pojedinačni modeli ostaju niži ($R^2 = 0,82-0,95$). Time je potvrđeno da kombinovanje različitih prediktora daje veću preciznost i stabilnost procene, što ima praktičan značaj za unapređenje metodologije procene kvaliteta drveta u praksi.

Ovo ukazuje na to da longitudinalna pozicija u stablu ima veći uticaj na mehanička svojstva nego radialna orijentacija. Rezultati ovde dobijeni pružaju dodatni doprinos razumevanju raspodele mehaničkih svojstava unutar stabala.

Sveukupno, rezultati istraživanja su potvrdili većinu postavljenih hipoteza, uz određena ograničenja vezana za klastersku strukturu podataka i varijabilnost staništa. Dobijeni podaci ne samo da proširuju postojeća znanja o crvenom hrastu u uslovima Srbije, već i ukazuju na značaj integracije anatomskih, fizičko-mehaničkih i nedestruktivnih metoda u savremenim istraživanjima drveta.

Analiza RPIQ i RPD faktora dodatno osvetljava pouzdanost ovih modela, pri čemu MOR pokazuje najvišu prediktivnu sposobnost, dok MOE zahteva dalju optimizaciju radi unapređenja tačnosti procene. Ovi rezultati ne samo da potvrđuju validnost korišćenih

metoda, već otvaraju nove puteve za buduća istraživanja. Posebno bi bilo korisno sprovesti dalja unapređenja algoritama i kombinovati različite pristupe, kako bi se dobila još preciznija procena mehaničkih i anatomskih svojstava drveta.

Doprinos ovih metoda jasno pokazuje da nedestruktivne analize mogu igrati ključnu ulogu u proceni i očuvanju kvaliteta drveta, nudeći pouzdane alternative destruktivnim testovima i omogućavajući bržu i efikasniju primenu u praksi.

Uzimajući u obzir oskudnost literature o svojstvima drveta crvenog hrasta u Srbiji, istraživanje doprinosi poznavanju varijabilnosti fizičko-mehaničkih svojstava i povezanosti mehaničkih svojstava drveta i akustičnih i fraktometrijskih merenja uspostavljenih na ispitanim stablima ove egzote. Na osnovu zavisnosti svojstava dobijenih fraktometrom i akustičnim metodama sa mehaničkim svojstvima drveta i razvijanjem modela za procenu kvaliteta drveta u dubecim stablima crvenog hrasta, zaključuje se da su osnovne hipoteze ove doktorske disertacije potvrđene.

8. BUDUĆA ISTRAŽIVANJA

Rezultati ovog istraživanja predstavljaju značajan doprinos razumevanju fizičko mehaničkih svojstava crvenog hrasta (*Quercus rubra* L.) i mogućnostima njihove procene primenom akustične tomografije i fraktometrije. Ipak, dobijeni nalazi otvaraju brojna nova pitanja, pa je opravdano razmatrati pravce daljih istraživanja koja bi dopunila i proširila postojeće znanje, kako o ovoj vrsti, tako i o primenjenim metodama.

Prvi pravac odnosi se na proširenje istraživanja na druge vrste drveća. Akustična tomografija i fraktometrija pokazale su se veoma korisnim u proceni gustine, čvrstoće i elastičnosti kod crvenog hrasta, ali bi njihova vrednost bila još veća kada bi se primenile i na autohtonim vrstama, kao što su hrast lužnjak (*Quercus robur*), hrast kitnjak (*Quercus petraea*) i bukva (*Fagus sylvatica*). Poređenje rezultata na ovim vrstama omogućilo bi uočavanje specifičnosti crvenog hrasta u uslovima njegove introdukcije i doprinelo boljem razumevanju njegovih ekoloških i tehnoloških potencijala. Još širu perspektivu pružila bi istraživanja na četinarima, kao što su smrča (*Picea abies*), jela (*Abies alba*) ili bor (*Pinus sylvestris*), gde bi anatomske razlike mogle dovesti do drugačijih obrazaca povezanosti između akustičnih i mehaničkih svojstava.

Drugi pravac odnosi se na praćenje istih stabala tokom dužeg vremenskog perioda. Samo takva istraživanja mogu pokazati na koji način se svojstva drveta menjaju tokom vremena i pod uticajem klimatskih promena. Pitanja poput toga da li se introdukovane populacije crvenog hrasta vremenom menjaju u pogledu brzine rasta, strukture godova ili

otpornosti na spoljne faktore ostaju otvorena i veoma su značajna za održivo upravljanje šumama.

Treći pravac istraživanja usmeren je na povezivanje anatomskih analiza sa rezultatima fraktometrije i akustične tomografije. Već je pokazano da dužina vlakana i udeo kasne zone imaju značajan uticaj na gustinu i čvrstoću drveta. Uvođenje sistematskih anatomskih merenja i njihovo povezivanje sa nedestruktivnim metodama otvorilo bi mogućnost razvoja preciznijih modela predikcije, naročito za modul elastičnosti, gde su u ovom istraživanju dobijeni nešto slabiji rezultati.

Četvrti pravac odnosi se na unapređenje metodoloških i statističkih pristupa. Modeli dobijeni u ovom istraživanju zasnovani su na velikom broju uzoraka iz relativno malog broja stabala, što može dovesti do klusterske strukture podataka i potcenjivanja standardnih grešaka. Buduća istraživanja mogla bi uključiti naprednije statističke metode – kao što su mešoviti modeli ili hijerarhijska analiza – kao i savremene tehnike mašinskog učenja, radi povećanja tačnosti i pouzdanosti predikcija.

Pored toga, potrebno je razmotriti i primenu novih nedestruktivnih metoda, kao što su mikrodenzitometrija, CT skeniranje ili vibracione tehnike. Njihovo kombinovanje sa akustičnom tomografijom i fraktometrijom obezbedilo bi multidisciplinarni okvir i omogućilo detaljniju procenu kvaliteta drveta – kako na nivou pojedinačnih stabala, tako i na nivou čitavih sastojina.

Posebnu važnost imaju istraživanja u urbanim i degradiranim staništima. S obzirom na to da je crveni hrast prisutan u parkovima i gradskim drvoredima, neophodno je ispitati

kako faktori poput zagađenja vazduha, ograničenog prostora za rast i klimatskog stresa utiču na njegov prirast i mehanička svojstva. Takva istraživanja pružila bi dragocene informacije za planiranje ozelenjavanja urbanih sredina i očuvanje vitalnosti stabala u uslovima povećanog antropogenog pritiska.

Na kraju, buduća istraživanja trebalo bi povezati sa potrebama drvne industrije. Razumevanje svojstava crvenog hrasta i mogućnost njihove brze i nedestruktivne procene bilo bi od velike koristi za praktičnu primenu u pilanskoj i furnirskoj proizvodnji. Na taj način uspostavila bi se direktna veza između naučnih istraživanja i stvarnih potreba tržišta, što predstavlja jedan od ključnih ciljeva savremene šumarske nauke.

Sve navedeno pokazuje da prostor za buduća istraživanja nije samo širok, već i neophodan. Ona treba da integrišu anatomske, fizičko–mehaničke i ekološke aspekte, uz primenu savremenih tehnologija i analitičkih metoda, kako bi se dobila što preciznija i pouzdanija slika o kvalitetu drveta crvenog hrasta i njegovom potencijalu u šumarskoj praksi i industriji

9. LITERATURA

1. Albert, D. A., Minc., L.D., (1987). The natural ecology and cultural history of the Colonial Point red oak stands.
2. Aldrich, P. R., Cavender-Bares, J. (2011). *Quercus*. In Wild crop relatives: Genomic and breeding resources: Forest trees (pp. 89-129). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
3. Aldrich, P. R., Michler, C. H., Sun, W., Romero-Severson, J. (2002). Microsatellite markers for northern red oak (*Fagaceae: Quercus rubra*). *Molecular Ecology Notes*, 2(4), 472- 474.
4. Arriaga, F., Wang, X., Íñiguez-González, G., Llana, D. F., Esteban, M., & Niemz, P. (2023). Mechanical properties of wood: A review. *Forests*, 14(6), 1202.
5. Auty, D., Achim, A., (2008). The relationship between standing tree acoustic assessment and timber quality in Scots pine and the practical implications for assessing timber quality from naturally regenerated stands. *Forestry*, 81(4), 475-487.
6. Bacilieri, R., Ducouso, A., Kremer, A., (1996). Comparison of morphological characters and molecular markers for the analysis of hybridization in sessile and pedunculate oak. In *Annales des sciences forestières* (Vol. 53, No. 1, pp. 79-91). EDP Sciences.
7. Bamber, R. K.; Fukazawa, K., (1985). Sapwood and heartwood: a review. 0F *Forestry Abstracts* 1987 048 04165;1F *Forest Products Abstracts* 1987 010 01425, 46 (9):567-580.
8. Barnes, B. V., (2004). *Michigan trees, revised and updated: a guide to the trees of the Great Lakes region*. University of Michigan Press.
9. Bauer, F., (1953). *Quercus borealis. Quercus borealis*.
10. Beall, F.C., (2002). Acoustic emission and acousto-ultrasonic. *Nondestructive Evaluation of Wood*, R.F.Pellerin and R.J. Ross (eds.), Forest Product Society, Madison WI USA, p. 37-48.

11. Beall, F. C. (2001). Wood products: Nondestructive evaluation. Encyclopedia of materials: science and technology, 9702-9707.
12. Beall, F.C., Wilcox, W.W., (1987). Relationship of acoustic emission during radial compression to mass loss from decay. For. Prod.J. 37 (4), 38-42. 20.
13. Bell, E.R., Peck, E.C., Krueger, N.T., (1950). Youngs modulus of wood determined by a dynamic method. Report 1775. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI.
14. Bergès, L., Nepveu, G., Franc, A. (2008). Effects of ecological factors on radial growth and wood density components of sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) in Northern France. Forest Ecology and Management, 255(3-4), 567-579.
15. Bosshard, H. H., (1968). On the formation of facultatively coloured heartwood in *Beilschmiedia tawa*. Wood science and technology, 2: 1-12. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00366408>.
16. Brashaw, B. K., Bucur, V., Divos, F., Goncalves, R., Lu, J., Meder, R., Yin, Y., (2009). Nondestructive testing and evaluation of wood: A worldwide research update. Forest products journal, 59(3),
17. Brashaw, B.K., Wang, X., Ross, R.J., Pellerin, R.F., (2004). Relationship between stress wave. Breeding Resources. In: Kole C (ed). Springer Berlin Heidelberg, pp 89-129.
18. Brendel, O., Le Thiec, D., Scotti-Saintagne, C., Bodénès, C., Kremer, A., Guehl, J. M., (2008). Quantitative trait loci controlling water use efficiency and related traits in *Quercus robur* L. Tree Genetics & Genomes, 4(2), 263-278.

19. Brites, R. D., Lourenço, P. B., Machado, J. S., (2012). A semi-destructive tension method for evaluating the strength and stiffness of clear wood zones of structural timber elements in-service. *Construction and Building Materials*, 34, 136-144.
20. Broshtilov, K. & Broshtilova, M., (2013). Results from the introduction of the red oak in the North-Eastern Bulgaria. Report of Jubilee International Scientific Conference ‘85 Years Forest Research Institute at BAS’ (no editor), Sofia, 1–2 October 2013, pp. 62 (in Bulgarian).
21. Brus, R., (2016, October). Current occurrence of non-native tree species in European forest. In Presentation to the Joint WG Meeting of COST Action Non-native tree species for European forests—experiences, risks and opportunities (NEXT), Lisbon (Vol. 4).
22. Bucur, V. (2006). *Acoustics of wood* (2nd ed.). Springer.
23. Büyüksarı, Ü., As, N., & Dündar, T. (2018). Intra-ring properties of earlywood and latewood sections of sessile oak (*Quercus petraea* L.) wood. *BioResources*, 13(1), 836-845.
24. Carlquist, S. (1988): Wood anatomy and relationships of Duckeodendraceae and Goetzeaceae. *IAWA journal*, 9(1), 3-12.
25. Casado, M., Acuña, D., Vecilla, E. Relea., Basterra., A., Ramón G., & López, G., (2010). The influence of size in prediction the elastic modulus of *Populus x euramericana* timber using vibration techniques. *Struct. and Archit.* 2025-2032.
26. Cavender-Bares, J., Pahlich, A., (2009). Molecular, morphological, and ecological niche differentiation of sympatric sister oak species, *Quercus virginiana* and *Q. geminata* (*Fagaceae*). *American Journal of Botany*, 96(9), 1690-1702.

27. Chiu, C. M., Wang, S. Y., Lin, C. J., Yang, T. H. & Jane, M. C., (2006). Application of the fractometer for crushing strength: juvenile-mature wood demarcation in Taiwan (*Taiwania cryptomerioides*). *Journal of wood science*, 52, 9-14.
28. Christoforo, A. L. (2024). Wood Quality and Mechanical Properties. *Forests* (19994907), 15(11).
29. Forrest, G. I.,; Lowe, A. J., (2003). Comparison of fine-scale genetic structure using nuclear microsatellites within two British oakwoods differing in population history. *Forest Ecology and Management*, 176(1-3), 287-303.
30. Craft, K. J., Ashley, M. V., & Koenig, W. D., (2002). Limited hybridization between *Quercus lobata* and *Quercus douglasii* (Fagaceae) in a mixed stand in central coastal California. *American Journal of Botany*, 89(11), 1792-1798.
31. Curtu, A. L., Gailing, O., Finkeldey, R., (2009). Patterns of contemporary hybridization inferred from paternity analysis in a four-oak-species forest. *BMC Evolutionary Biology*, 9(1), 1-9.
32. Čufar, K., Velušček, A., & Kromer, B. (2013). Two decades of dendrochronology in the pile dwellings of the Ljubljansko barje, Slovenia. *Dendro: Chronologie Typologie Ökologie: Festschrift für André Billamboz zum 65. Geburtstag*, 35-40.
33. Dackermann, U., Crews, K., Kasal, B., Li, J., Riggio, M., Rinn, F., Tannert, T., (2014). In situ assessment of structural timber using stress-wave measurements. *Materials and structures*, 47, 787-803.

34. Dackermann, U., Li, J., & Crews, K. (2014). Non-destructive evaluation techniques for timber structures: State of the art review. *Construction and Building Materials*, 101, 990–1001. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.111>
35. Dahle, G., Carpenter, A., DeVallance, D., (2016). Non-destructive measurement of the modulus of elasticity of wood using acoustical stress waves. *Arboric Urban For*, 42, 227- 233.
36. Dahms, K. G., (1991) Nordamerikanische Exporthölzer. DRW-Verlag.
37. De Oliveira, F. G. R., & Sales, A., (2006). Relationship between density and ultrasonic velocity in Brazilian tropical woods. *Bioresource Technology*, 97(18), 2443-2446.
38. Diaz-Maroto, I., and Vila-Lameiro, P., (2006). Litter production and composition in natural stands of *Quercus robur* L. (Galicia, Spain). *Polish journal of Ecology* 54.3: 429-439.
39. Divos, F., & Toshinari, T., (2005). Relation between static and dynamic modulus of elasticity of wood. Kapcsolat a faanyag statikus és dinamikus rugalmassági modulusza között. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 2005(1), 105-110.
40. Divos, F., & Szalay, L. (2002). Determination of rotational modulus of elasticity of beams by longitudinal vibration and static bending tests. *Wood Science and Technology*, 36(1), 79–88. <https://doi.org/10.1007/s00226-001-0121-1>
41. Dodd, R. S., Afzal-Rafii, Z., (2004). Selection and dispersal in a multispecies oak hybrid zone. *Evolution*, 58(2), 261-269.
42. Dražić, D., Bojović, S., Jovanović, L., & Čokeša, V., (2004). Northern red oak (*Quercus borealis* L.) in the area of Belgrade, Serbia and Montenegro.
43. Duong, D. V., Schimleck, L., Dinh, T. T., & Tran, C. V. (2021). Radial variation in cell morphology of *Melia azedarach* planted in northern Vietnam. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 23.

44. Dupuy, L., Fourcaud, T., Stokes, A., (2005). A numerical investigation into the influence of soil type and root architecture on tree anchorage. *Plant and soil*, 278, 119-134.
45. Ellison, A. M., Bank, M. S., Clinton, B. D., Colburn, E. A., Elliott, K., Ford, C. R., ... & Webster, J. R., (2005). Loss of foundation species: consequences for the structure and dynamics of forested ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 3(9), 479-486.
46. FAO. (2010) Global forest resources assessment. Forestry Department. FAO, Rome. <http://www.fao.org/docrep/013/i1757e/i1757e.pdf>>
47. Fenning, T.M., and Gershenzon, J., (2002). Where will the wood come from? Plantation forests and the role of biotechnology. *Trends in Biotechnology* 20(7): 291-296.
48. Galiginaitis, S.V., Bell, E.R., Fine, A.M., Auer, G., and Roy, J., (1954). Nondestructive testing of wood laminates. Final Report, Office of Naval Research, University of Louisville, Institute of Industrial Research. 63.
49. Galligan, W. (1964). A status report... Nondestructive testing in wood. *For. Prod. J.* 14(5): 221-227 62.
50. Galligan, W. C., and Courteau, R. W. (1965). Measurement of elasticity of lumber with longitudinal stress waves and the piezoelectric effect of wood. Proceedings of the second symposium on the nondestructive testing of wood. Washington State University, Pullman, WA
51. Ganesan, S. K., and Abdul Hamid, M., (2010). Survey of wood strength properties of urban trees in Singapore using the Fractometer II. *Journal of tropical forest science*: 97-105.
52. Gao, S., Wang, X., Brashaw, B. K., Ross, R. J., & Wang, L., (2012). Rapid assessment of wood density of standing tree with nondestructive methods—A review. In *Proceedings of 2012 International Conference on Biobase Material Science and Engineering* (pp. 262-267). IEEE.

53. Genet, A., Auty, D., Achim, A., Bernier, M., Pothier, D., & Cogliastro, A., (2013). Consequences of faster growth for wood density in northern red oak (*Quercus rubra* Liebl.). *Forestry*, 86(1), 99-110.
54. Gerhards, C., (1982). Longitudinal stress waves for lumber stress grading: Factors affecting applications: State of the art. *Forest Prod. J.* 32(2):20-25.
55. Gilbert, E.A., Smiley E.T., (2004). PiCUS Sonic Tomography for the quantification of decay in white oak (*Quercus Alba*) and hickory (*Carya* spp.). *Journal of Arboriculture* 30(5):277–280.
56. Goeze, E., (1916). List of introduced trees and shrubs in the gardens and parks of Europe since the 16th century. *Mitteilungen der Deutschen Dendrologischen Gesellschaft* 25, 129–201. (in German)
57. Goh, C. L., Rahim, R. A., Rahiman, M. H. F., Talib, M. T. M., Tee, Z. C., (2018). Sensing wood decay in standing trees: A review. *Sensors and Actuators A: Physical*, 269, 276-282.
58. Green, D. W., McDonald, K. A., (2007). Investigation of the mechanical properties of red oak 2 by 4. *Wood and fiber science* 25.1: 35-45.
59. Gričar, J., De Luis, M., Hafner, P., and Levanič, T. (2013): Anatomical characteristics and hydrologic signals in tree-rings of oaks (*Quercus robur* L.). *Trees*, 27(6), 1669-1680
60. Groom, L., Polensek, A., (1987). Nondestructive prediction of load-deflection relations for lumber. *Wood and fiber science*, 298-312.
61. Gruber, F., & Hagemann, H. (2000). Comparison of the bending solidities of European beech, Black poplar, Norway spruce and Douglas fir using DIN 52186 and fractometer 1 methods.
62. Gubka, K., Špišák, J., (2010). Prirodzená obnova duba červeného (*Q. rubra* L.) na výskumných plochách Semerovce (LS Šahy). In Knott R., Peňáz J., Vaněk P. (eds). *Pěstování lesů v nižších vegetačních stupních*. Brno, Mendel University in Brno, 30–34.

63. Guntekin, E., Emiroglu, Z. G., & Yilmaz, T. (2013). Prediction of bending properties for turkish red Pine (*Pinus brutia* Ten.) lumber using stress wave method. *BioResources*, 8(1), 231-237.
64. Gursu, I. (1966). Anatomical, physical and mechanical properties of the Sessile Oak (*Quercus petraea*) from the Karabuk region.
65. Haines, D. W., & Leban, J. M. (1997). Evaluation of the MOE of Norway spruce by the resonance flexure method. *Forest products journal*, 47(10), 91.
66. Haralamb, A. T. (1967). Culture of forest species. Agro-Silvică Ed., Bucharest (in Romanian).
67. Helińska-Raczkowska, L., Fabisiak, E., (1991). Radial variation and growth rate in the length of the axial elements of sessile oak wood. *IAWA Journal*, 12(3), 257-262
68. Hernández, R. E., & Pontin, M. (2006). Shrinkage of three tropical hardwoods below and above the fiber saturation point. *Wood and fiber science*, 474-483.
69. Hoyle, R. J., (1968). Background to Machine Stress Rating. *Forest Prod. J.*18(4):87-97, 1968.
70. Hoyle, R.J., (1961). A nondestructive test for stiffness of structural lumber. *For. Prod. J.* 11(6), 251-254. 91.
71. Hu, W., Li, S., & Liu, Y. (2021). Vibrational characteristics of four wood species commonly used in wood products. *BioResources*, 16(4), 7101.
72. Huebner, C. D., (2003). Vulnerability of oak-dominated forests in West Virginia to invasive exotic plants: temporal and spatial patterns of nine exotic species using herbarium records and land classification data. *Castanea*, 1-14.
73. Isajev, V., Vukin, M., Ivetić, V., (2006). Unošenje drugih vrsta drveća u hrastove šume sa posebnom namenom u Srbiji. *Šumarstvo*, 58(3), 29-46.

74. Isajev, V., (2013). Predlog vrsta drveća pri obnavljanju šuma sladuna i cera. Zbornik radova, Obnavljanje hrastovih šuma - Obnavljanje sladuna i cera, Seminar, Okrugli sto, UŠITS, Beograd: 25-38.
75. Ishiguri, F., Matsumoto, K., Kuwano, M., Ohno, H., Kameyama, Y., Iizuka, K., & Yoshizawa, N. (2012). Relationship between compressive strength of core samples measured by Fractometer and compressive properties of full size short columns in sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don). Bulletin of the Utsunomiya University Forests, (47), 35-40.
76. Ishiguri, F., Diloksumpun, S., Tanabe, J., Iizuka, K., Yokota, S., (2013). Stress-wave velocity of trees and dynamic Young's modulus of logs of 4-year-old *Eucalyptus camaldulensis* trees selected for pulpwood production in Thailand. Journal of Wood Science, 59, 506-511.
77. Ivković, M., Gapare, W. J., Abarquez, A., Ilic, J., Powell, M. B., Wu, H. X., (2009). Prediction of wood stiffness, strength, and shrinkage in juvenile wood of radiata pine. Wood Science and Technology, 43, 237-257.
78. Jayne, B.A., (1955). A nondestructive test of glue bond quality. Forest Product Journal. 5(5),294-301.
79. Jayne. B.A. (1959). Vibrational properties of wood as indices of quality. Forest Product Journal. 9(11), 413-416.
80. Jeronimidis, G., (2013). Wood quality and its biological basis. Ed. J. R. Barnett. Blackwell.
81. Jiménez, P., U. López de Heredia, C. Collada, Z. Lorenzo, L. Gil. (2004). High variability of chloroplast DNA in three Mediterranean evergreen oaks indicates complex evolutionary history. Heredity 93, no. 5 510-515.

82. Jokanović, D., Ćirković-Mitrović, T., Nikolić Jokanović, V., Lozjanin, R., Ištok, I. (2022). Wood fibre characteristics of pedunculate oak (*Quercus Robur* L.) growing in different ecological conditions. *Drvna industrija*, 73(3), 317-325.
83. Jokanović, D., Milić, G., Stajić, B., Todorović, N., Straže, A., & Merela, M. (2022). Correlation between sonic tomography and mechanical properties of ash wood. *Wood Research*, 67(1), 75–88.
84. Kaiserlik, J. H., and Pellerin, R. F., (1977), Stress wave attenuation as an indicator of lumber strength. *Forest Prod. J.*, 27(6):39–43.
85. Kane, B., (2014). Determining parameters related to the likelihood of failure of red oak (*Quercus rubra* L.) from winching tests. *Trees* 28.6: 1667-1677.
86. Kasal, B. (2008). RILEM TC 215 AST" In-situ assessment of structural timber". In RILEM symposium on On site assessment of concrete, masonry and timber structures—SACoMaTiS (pp. 1033-1037).
87. Kelley, S. S., Rials, T. G., Snell, R., Groom, L. H., & Sluiter, A. (2004). Use of near infrared spectroscopy to measure the chemical and mechanical properties of solid wood. *Wood Science and Technology*, 38, 257-276.
88. Klačnja, B., Galić, Z., Orlović, S., & Pap, P. (2006). Some properties of pedunculate oak wood from forestry of Ravni Srem. *Topola*, (177-178), 80-87.
89. Knapic, S., Louzada, J. L., Leal, S., & Pereira, H. (2008). Within-tree and between-tree variation of wood density components in cork oak trees in two sites in Portugal. *Forestry*, 81(4), 465-473.

90. Knapic, S., Louzada, J. L., & Pereira, H. (2011). Variation in wood density components within and between *Quercus faginea* trees. Canadian journal of forest research, 41(5), 1212-1219. Symposium on On site assessment of concrete, masonry and timber structures—SACoMaTiS (pp. 1033-1037).
91. Kollmann, F., (1951). Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe Zweiter Band: Holzschutz, Oberflächenbehandlung, Trocknung und Dämpfen, Veredelung, Holzwerkstoffe, Spanabhebende und Spanlose Holzbearbeitung Holzverbindungen.
92. Konnerth, J., Eiser, M., Jäger, A., Bader, T. K., Hofstetter, K., Follrich, J., & Wimmer, R., (2010). Macro-and micro-mechanical properties of red oak wood (*Quercus rubra* L.) treated with hemicellulases.
93. Kraler, A., Beikircher, W., (2013). Non-destructive and semi-destructive test methods for strength determination of aged wood. In Advanced Materials Research (Vol. 778, pp. 385-392). Trans Tech Publications Ltd.
94. Kremer, A., Dupouey, J. L., Deans, J. D., Cottrell, J., Csaikl, U., Finkeldey, R., & Badeau, V. (2002). Leaf morphological differentiation between *Quercus robur* and *Quercus petraea* is stable across western European mixed oak stands. Annals of Forest Science, 59(7), 777-787.
95. Kristian, B. D. (2009). Mechanical properties of clear wood from Norway spruce.
96. Krstić, M., Vojinović, N., (2002). Variability of some morphological traits of one-year old red oak, black walnut, birch and wild pear seedlings in the nurseries of Jastrebac region. Glasnik Sumarskog fakulteta, (86), 147-160.
97. Lazarević, V., (2020). Forestry in the Republic of Serbia in 2019. Statistical Office of the Republic of Serbia. Belgrade.

98. Lawday, G., Hodges, P. A., (2000). The analytical use of stress waves for the detection of decay in standing trees. *Forestry*, 73, 447–456.
99. Lei, H., Milota, M. R., Gartner, B. L., (1996). Between-and within-tree variation in the anatomy and specific gravity of wood in Oregon white oak (*Quercus garryana* Dougl.). *IAWA journal*, 17(4), 445-461.
100. Lepais, O., Gerber, S., (2011). Reproductive patterns shape introgression dynamics and species succession within the European white oak species complex. *Evolution*, 65(1), 156-170.
101. Li, Y., Semple, K., Huang, J., Zhang, W., & Dai, C. (2024). Acoustic wave method for non-destructive evaluation of flattened bamboo veneers. *Construction and Building Materials*, 428, 136317.
102. Lin, C-J, Chiu, C-M, Wang, S-Y., (2000). Application of ultrasound in detecting wood decay in squirrel-damaged standing trees of Luanta Chin fir. *Taiwan Forest Science* 15(2):267–279.
103. Lind, J. F., Gailing, O., (2013). Genetic structure of *Quercus rubra* L. and *Quercus ellipsoidalis* EJ Hill populations at gene-based EST-SSR and nuclear SSR markers. *Tree genetics genomes*, 9, 707-722.
104. Lind-Riehl, J. F., (2014). Genetic variation, local adaptation and population structure in North American red oak species, *Quercus rubra* L. and *Q. ellipsoidalis* EJ Hill. Michigan Technological University.
105. Lind-Riehl, J. F., Sullivan, A. R., & Gailing, O., (2014). Evidence for selection on a CONSTANS-like gene between two red oak species. *Annals of Botany*, 113(6), 967-975.
106. Logan, J. D., (1978). Machine stress rating, proceedings of the fourth nondestructive testing of wood symposium. Washington State University, Pullman, WA. 1978.

107. Maharani, R., Nugroho, W. D., Suryawan, A., & Nurrohmah, S. H. (2020). Anatomical properties and their relationship with wood density in fast-growing tree species. *Forests*, 11(9), 1003.
108. Madhoushi, M., & Boskabadi, Z., (2019). Relationship between the dynamic and static modulus of elasticity in standing trees and sawn lumbers of *Paulownia fortune* planted in Iran. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 21(1), 35-44.
109. Madhoushi, M., Daneshvar, S., (2016). Predicting the static modulus of elasticity in eastern cottonwood (*Populus deltoides*) using stress wave non-destructive testing in standing trees. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74, 885-892.
110. Maeglin, R. R., (1974). The effect of site factors and growth rate on the anatomical proportions of northern red oak (*Quercus rubra* L.) wood. Purdue University.
111. Maeglin, R. R., Quirk, J. T., (1984). Tissue proportions and cell dimensions for red and white oak groups. *Canadian Journal of Forest Research*, 14(1), 101-106.
112. Mäkinen, H., Isomäki, A., (2004). Thinning intensity and growth of Scots pine stands in Finland. *Forest Ecology and Management*, 201(2-3), 311-325.
113. Marković, M. S., (2013). Sukcesije biljnih zajednica na požarištima planine Vidlič (Doctoral dissertation, Универзитет у Крагујевцу, Природно-математички факултет).
114. Matheny, N. P., Clark, J. R., Attewell, D., Hillery, K. A., Graham, W., & Posner, G., (1999). Assessment of fracture moment and fracture angle in 25 tree species in the United States using the Fractometer. *Journal of Arboriculture*, 25, 18-23.
115. Matic, V. (2016). Ekološki i uzgojni aspekti introdukovanih vrsta hrastova u Srbiji. *Topola*, 197, 55–67.

116. Mattheck, C. (1995). Wood—the internal optimization of trees. *Arboricultural Journal*, 19(2), 97-110.
117. Matsumoto, K., Ishiguri, F., Wahyudi, I., Takashima, Y., Shimizu, K., Iizuka, K., & Yoshizawa, N., (2010). Application of fractometer for wood property evaluation in five Indonesian plantation species. *Bulletin of the Utsunomiya University Forests*, (46), 1-6.
118. Mattheck, C.G.; Bethge, K.A., (1993). Detection of decay in trees with the Metriguard Stress Wave Timer. *Journal of Arboriculture*. 19(6):374–378.
119. Mattheck, C. G., (1995). Use of the Fractormeter to determine the strength of wood with uncipliant decay. *J Arboriculture* 21: 105-112.
120. McCracken, F. I., Vann, S.R., (1983). Sound can detect decay in standing hardwood trees. (Research Paper SO 195). NewOrleans, LA: USDA Forest Service, Southern Forest Experiment Station.
121. McCracken, F.I., (1985). Using sound to detect decay in standing hardwood trees. In: *Proceedings, 5th Symposium on Nondestructive Testing of Wood*. September 9–11, 1985; Pullman, WA: Washington State University. 281–287.
122. McShea, W. J., Healy, W. M., Devers, P., Fearer, T., Koch, F. H., Stauffer, D., & Waldon, J., (2007). Forestry matters: decline of oaks will impact wildlife in hardwood forests. *The Journal of Wildlife Management*, 71(5), 1717-1728
123. McShea, W. J., Healy, W. M., Devers, P., Fearer, T., Koch, F. H., Stauffer, D., Waldon, J., (2007). Forestry matters: decline of oaks will impact wildlife in hardwood forests. *The Journal of Wildlife Management*, 71(5), 1717-1728.
124. Meier, E., (2015) The wood database. <http://www.wood-database.com/scots-pine/>

125. Merela, M., Čufar, K., (2013). Density and mechanical properties of oak sapwood versus heartwood in three different oak species. *Drvena industrija*, 64(4), 323-334
126. Merela, M., Katarina K., (2014). Gustoća i mehanička svojstva drva bjeljike hrasta u usporedbi s drvom srži. *Drvena industrija: Znanstveni časopis za pitanja drvne tehnologije* 64.4: 323-334.
127. Milić, G., Todorović, N., & Stajić, B. (2014). Growth characteristics and wood quality of red oak plantations in Serbia. *Šumarstvo*, 66(1–2), 45–56.
128. Miltner, S. and Kupka, I., (2016). Silvicultural potential of northern red oak and its regeneration – Review. *J. For. Sci.* 62, 145–152.
129. Miltner, S., Kupka, I. and Trestik, M., (2016). Effects of Northern red oak (*Quercus rubra* L.) and sessile oak (*Quercus petraea* /Mattusch/. Liebl.) on the forest soil chemical properties. *For. J.* 62, 157–160. (German).
130. Missanjo, E., & ; Matsumura, J., (2016). Wood density and mechanical properties of *Pinus kesiya* Royle ex Gordon in Malawi. *Forests*, 7(7), 135.
131. Mladenova, D., Todorova, A., Bardarov, N., (2017). Study on the length of fibers of oak wood. *Management of Sustainable Development*, 63(19), 61-64.
132. Molteberg, D., Høibø, O., (2006). Development and variation of wood density, kraft pulp yield and fibre dimensions in young Norway spruce (*Picea abies*). *Wood Science and Technology* 40.3 (2006): 173-189.
133. Moran, E. V., Clark, J. S., (2012). Between-site differences in the scale of dispersal and gene flow in red oak. *PLoS one*, 7(5), e36492.

134. Muir G., Fleming, C.C., Schlötterer, C., (2001). Three divergent rDNA clusters predate the species divergence in *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. and *Quercus robur* L. *Mol Biol Evol* 18:112-119
135. Muir, G., Lowe, A. J., Fleming, C. C., Vogl, C., (2004). High nuclear genetic diversity, high levels of outcrossing and low differentiation among remnant populations of *Quercus petraea* at the margin of its range in Ireland. *Annals of Botany*, 93(6), 691-697.
136. Muñoz, G. R., Cañas, M. A. S., & Soalleiro, R. R., (2008). Physical properties of wood in thinned Scots pines (*Pinus sylvestris* L.) from plantations in northern Spain. *Annals of Forest Science*, 65(5), 1.
137. Nagel, R. V., (2015). Northern red oak. In: Potentials and risks of introduced tree species. Vor T., Spellmann H., Bolte A. and Ammer C. (eds). *Göttinger Forstwissenschaften* 7, pp. 219–267. (in German)
138. Nazari, N., Bahmani, M., Kahyani, S., Humar, M., and Koch, G., (2020). Geographic variations of the wood density and fiber dimensions of the Persian oak wood. *Forests*, 11(9), 1003
139. Nicolotti, G., Socco, L.V., Martinis, R., Godio, A., Sambuelli, L. (2003). Application and comparison of three tomographic techniques for detection of decay in trees. *Journal of Arboriculture* 29(2):66–78.
140. Niemz, P., (1993). *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Vol. 243. Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verlag.

141. Niemz, P., Sonderegger, W., (2003). Untersuchungen zur Korrelation ausgewählter Holzeigenschaften untereinander und mit der Rohdichte unter Verwendung von 103 Holzarten| Analysis of the correlation between selected wood properties among each other and the density of 103 wood species. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 154.12: 489-493.
142. Niklas, K. J., (1997). The evolutionary biology of plants. University of Chicago Press.
143. Niklas, K.J., Spatz, H.C., (2010). Worldwide correlations of mechanical properties and green wood density. American Journal of Botany 97.10: 1587-1594.
144. Nowak, T., Patalas, F., & Karolak, A. (2021). Estimating mechanical properties of wood in existing structures—selected aspects. Materials, 14(8), 1941.
145. Ozcan, C., & Korkmaz, M. (2019). Determination of relationship between thermal and mechanical properties of wood material. Journal of the Korean Wood Science and Technology, 47(4), 408-417.
146. Panshin, A. J., & de Zeeuw, C. (1980). Textbook of Wood Technology (4th ed.). New York: McGraw-Hill.
147. Pellerin, R. F., 1965, A vibrational approach to nondestructive testing of structural lumber. Forest Prod. J., 15(3):93–101.
148. Peñaloza-Ramírez, J. M., González-Rodríguez, A., Mendoza-Cuenca, L., Caron, H., Kremer, A., & Oyama, K., (2010). Interspecific gene flow in a multispecies oak hybrid zone in the Sierra Tarahumara of Mexico. Annals of botany, 105(3), 389-399.
149. Petrović, D., Radulović, D., Dukić, V., (2016). Širine prstenova prirasta i gustina drveta hrasta kitnjaka (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) na Prosari. Glasnik Šumarskog fakulteta Univerziteta u Banjoj Luci, (25), 5-14.

150. Pilar-Landeau, B., (1984). Northern red oak: sites, production and silviculture in the south-west of France. Mémoire de stage 3e année de l'ENITEF. Laboratoire INRA de Sylviculture et Ecologie, Nancy, 65 pp. (in French)
121. Pötzelsberger, E., Spiecker, H., Neophytou, C., Mohren.
151. Popović, Z., Todorović, N., (2006). Makroskopske karakteristike debla hrasta kitnjaka iz izdanačkih šuma NP "Đerdap". Glasnik Šumarskog fakulteta 93, 155-163.
152. Přemyslovská, E., Šlezingerová, J., Gandelová, L., (2008). Tree ring width and basic density of wood in different forest types. Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology.
153. Probett, P., Craig, C., Probett, B., (2013). In Situ Structural Timber Strength Measurement Advances Using Qualitative Resistography and Quantitative Resisto-Fractometry. In 18th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium—Madison, WI.
154. Ray, D., Morison, J. Broadmeadow, M., (2010). Climate change: impacts and adaptation in England's woodlands. Forest Research, Forestry Commission Research Note 201, 16 pp.
155. Reeves III, J. B., & Smith, D. B. (2009). The potential of mid-and near-infrared diffuse reflectance spectroscopy for determining major-and trace-element concentrations in soils from a geochemical survey of North America. Applied Geochemistry, 24(8), 1472-1481.
156. Rédei, K., Csiha, I., Keserű, Z., Rásó, J., Győri, J. (2010). Management of red oak (*Quercus rubra* L.) stands in the Nyírség forest region (Eastern Hungary). Hungary Agricultural Research, 3, 13-17.
157. Réh, J. and Réh, R., (1997). Red oak (*Quercus rubra* L.), development, structure and growth processes in consequence of thinning and its utilization possibility in wood-processing industry. Technická univerzita, Zvolen, 71 pp. (in Slovak)

158. Rinn, F., Schweingruber, F. H., & Schär, E. (1996). Resistograph and X-ray density charts of wood. Comparative evaluation of drill resistance profiles and X-ray density charts of different wood species.
159. Roibu, C. C., Sfeclă, V., Mursa, A., Ionita, M., Nagavciuc, V., Chiriloaei, F., ... Popa, I., (2020). The climatic response of tree ring width components of ash (*Fraxinus excelsior* L.) and common oak (*Quercus robur* L.) from Eastern Europe. *Forests*, 11(5), 600.
160. Romagnoli, M., Cavalli, D., Spina, S., (2014). Wood quality of chestnut: Relationship between ring width, specific gravity, and physical and mechanical properties. *BioResources*, 9(1), 1132-1147.
161. Rohanová, A. (2020). Non-destructive penetration method for determining the quality of structural spruce wood (*Picea abies* Karst. L.) In situ. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen res Publica Slovaca*, 62(1), 113-123.
162. Ross, R. J., Pellerin, R. F., (1994). Nondestructive testing for assessing wood members in structures. Forest Products Laboratory.
163. Sander, I.L., (1965). Northern red oak (*Quercus rubra* L.) in Silvics of forest trees of the United States. Fowells H.A. (ed). (Coord.) United States Department of Agriculture, Forest Service, Agriculture Handbook no. 271, pp. 588–592.
164. Sander, I.L., (1990). Northern red oak (*Quercus rubra* L.). In *Silvics of North America*. Vol. 2. Hardwoods.
165. Sandberg, D., Kutnar, A. and Mantanis, G. (2017) Wood modification technologies – a review. *Forest*, 10, 895–908.

166. Sandoz, J. L., (1999). Standing tree quality assessments using ultrasound. In M. Lemattre, P. Lemattre, F. Lemaire (Eds.), International symposium on urban tree health, Acta Horticulturae, 496, 269–277.
167. Schimleck, R., Evans, R. and Ilic, J., (2001) Estimation of *Eucalyptus delegatensis* wood properties by near infrared spectroscopy. Canadian Journal of Forest Research, 31(10), 1671–1675.
168. Schwarze, F. W. M. R., Lonsdale, D., & Mattheck, C., (1995). Detectability of wood decay caused by *Ustulina deusta* in comparison with other tree-decay fungi. European Journal of Forest Pathology, 25(6-7), 327-341.
169. Senft, J. F., Suddarth, S. K., and Angleton, R.D., (1962). A new approach to stress grading of lumber, For. Prod. J. 12(4), 83-186.
170. Simpson, W. T., (1998). Relationship between speed of sound and moisture content of red oak and hard maple during drying. Wood and fiber science, 405-413.
171. Simpson, W. T., (1984). Process for rapid conversion of red oak logs to dry lumber.
172. Smulski, S. J., (2007). Relationship of stress wave-and static bending-determined properties of four northeastern hardwoods. Wood and Fiber Science 23.1: 44-57.
173. Sonderegger, W., Mandallaz, D., Niemz, P., (2008). An investigation of the influence of selected factors on the properties of spruce wood. Wood Science and Technology, 42, 281-298.
174. Sork, V. L., Stowe, K. A., Hochwender, C., (1993). Evidence for local adaptation in closely adjacent subpopulations of northern red oak (*Quercus rubra* L.) expressed as resistance to leaf herbivores. The American Naturalist, 142(6), 928-936. species succession within the European white oak species complex. Evolution 65:
175. Straže, A., & Merela, M., (2017). Fractometer method for assessment of bending strength of wood. Wood Research, 62(3), 409–420.

176. Syofyan, I. (2019). Contribution of fibre dimensions to the variation of wood density of some tropical trees (*Fabaceae*). *KnE Engineering*, 2019, 158–164.
<https://doi.org/10.18502/keg.v4i3.5812>
177. Šoškić, B., & Popović, Z., (2002). Svojstva drveta. Šumarski fakultet, Beograd.
178. Šoškić, B., Popović, Z., & Todorović, N. (2005). Svojstva i mogućnost upotrebe drveta hrasta kitnjaka (*Quercus sessiliflora* Salisb.) (Properties and utilisation potentials of sessile oak (*Quercus sessiliflora* Salisb.) wood).
179. Štefančík, I., (2011). Structure and development of red oak (*Quercus rubra* L.) stand with different functions. *Lesnícky Časopis – Forestry Journal* 1, 32–41. (in Slovak).
180. Stoykov, H. Andonova, E., (2008). Some properties of wood from dead northern red oak (*Quercus rubra* L.) trees. *Nauka za gorata* 2, 57–64. (in Bulgarian)
181. Strategija razvoja šumarstva Republike Srbije (Forestry development strategy of the Republic of Serbia) (2013) Ministarstvo poljoprivrede, šumarstva i vodoprivrede, str. 1-91.
(<https://upravazasume.gov.rs/wp-content/uploads/2015/12/Strategija-razvoja-sumarstva.pdf>)
182. Šušić, N., Bobinac, M., Kerkez, I., Bauer-Živković, A., Vojinović, N., (2016). Height growth characteristics of one-year-old northern red oak seedlings (*Quercus rubra* L.): In full light conditions. *Reforesta*, 1(2), 32-38.
183. Tainter, F. H., Retzlaff, W. A., Starkey, D. A., Oak, S. W., (1990). Decline of radial growth in red oaks is associated with short-term changes in climate. *European Journal of Forest Pathology*, 20(2), 95-105
184. Tannert, T., Müller, A., & Vogel, M. (2010, September). Structural health monitoring of timber bridges. In *International Conference on Timber Bridges (ITCB 2010)*. Lillehammer, Norway (pp. 12-15).

185. Tang, A. M. C., Chu, P. P. L., Leung, M. W. K., Chu, L. M., Liao, W. H., (2016). Evaluating wood strength properties of subtropical urban trees using fractometer II. *Journal of Tropical Forest Science*, 249-259.
186. Tardif, J. C., Conciatori, F., (2006). Influence of climate on tree rings and vessel features in red oak and white oak growing near their northern distribution limit, southwestern Quebec, Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 36(9), 2317-2330
187. Taylor, F. W., (1976). Fiber length variation within growth rings of certain angiosperms. *Wood and Fiber Science*, 116-119.
189. Thompson, J. R., (1991). Influence of root system morphology and site characteristics on development of transplanted northern red oak (*Quercus rubra* L.) seedlings.
190. Timbal, J. and Dreyer, E., (1994). Water consumption and drought resistance. In *Le chêne rouge d'Amérique*. Timbal J., Kremer A., Le Goff N. And Nepveu G. (eds). INRA éditions, pp. 85–90. (in French).
191. Timbal, J., and Aussenac, G., (1996). An overview of ecology and silviculture of indigenous oaks in France. In *Annales des sciences forestieres* (Vol. 53, No. 2-3, pp. 649-661). EDP Sciences.
192. Tiitta, M., Tomppo, L., Möttönen, V., Marttila, J., Antikainen, J., Lappalainen, R., & Heräjärvi, H. (2017). Predicting the bending properties of air dried and modified *Populus tremula* L. wood using combined air-coupled ultrasound and electrical impedance spectroscopy. *European Journal of Wood and Wood Products*, 75, 701-709.
193. Todorović N., (2006). Aksijalno utezanje drveta bukve (*Fagus moesiaca* L.), hrasta kitnjaka (*Quercus sessiliflora* L.) i smrče (*Picea excelsa* L), magistarski rad, Šumarski fakultet Beograd.

194. Todorović, N., Popović, Z., Milić, G., Veizović, M., & Popadić, R. (2022). Quality evaluation of heat-treated sessile oak (*Quercus petraea* L.) wood by colour and FT-NIR spectroscopy. *Wood Material Science & Engineering*, 17(3), 202-209.
195. Todorović, N., Milić, G., & Stajić, B. (2012). Primena akustičnih metoda u proceni kvaliteta drveta hrasta kitnjaka. *Šumarstvo*, 64(1–2), 23–34.
196. Tomczak, A., Jelonek, T., (2013) Radial variation in the wood properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) grown on former agricultural soil (In Polish). *Leśne Pr Badaw* 74: 171–177.
197. Tomczak, K., Mania, P., Tomczak, A., (2022). Wood density and annual ring width pedunculate oak from stands grown on former agricultural land. *Wood Research*, 67(5), 718-730.
198. Tomić, Z., Milić, G., & Stajić, B. (2009). Introdukcija i adaptacija crvenog hrasta (*Quercus rubra* L.) u Srbiji. *Glasnik Šumarskog fakulteta*, 100, 9–20.
199. Toong, W., Ratnasingam, J., Roslan, M. K. M., Halis, R., (2014). The prediction of wood properties from anatomical characteristics: the case of common commercial Malaysian timbers. *BioResources*, 9(3), 5184-5197.
200. Tsehaye, A., Buchanan, A. H., & Walker, J. C. F. (2000). Sorting of logs using acoustics. *Wood science and technology*, 34(4), 337-344.
201. Tsoumis, G., (1991). Science and technology of wood: structure, properties, utilization. Vol. 115. New York: Van Nostrand Reinhold.
202. Turkot, C. G., Seale, R. D., Entsminger, E. D., França, F. J. N., Shmulsky, R., (2020). Nondestructive evaluation of red oak and white oak species. *Forest Products Journal*, 70(3), 370-377.
203. Uzcategui, M. C., Seale, R. D., & França, F. N. (2020). Physical and mechanical properties of clear wood from red oak and white oak. *BioResources*, 15(3), 4960.

204. Van Duong, D., & Hasegawa, M. (2024). Relationship between acoustic wave velocity and mechanical properties in *Acacia mangium* wood. *Maderas: Ciencia y tecnología*, 26(1), 4.
205. Vansteenkiste, D., De Boever, L., Van Acker, J., (2005). Alternative processing solutions for red oak (*Quercus rubra*) from converted forests in Flanders, Belgium. In Proceedings of the COST Action E44 Conference on Broad Spectrum Utilization of Wood at BOKU Vienna, Austria, June 14-15, 2005 (pp. 13-26). Universität für Bodenkultur Wien.
206. Vavrčik, H., & Gryc, V. (2012). Analysis of the annual ring structure and wood density relations in English oak and Sessile oak. *Wood research*, 57(4), 573-580.
207. Vučković, M., Stajić B., Nedeljković J., (2008). Karakteristike rasta crvenog hrasta na području Majdanpečke domene.
208. Wagenführ, R., and Scheiber, C., (1974). *Holzatlas* (p. 690). Leipzig: Fachbuchverlag.
209. Wang, X., Stelzer, H. E., Wiedenbeck, J., Lebow, P. K., & Ross, R. J., (2009). Assessing wood quality of borer-infested red oak logs with a resonance acoustic technique. *Wood and Fiber Science*, 180-193.
210. Wang, X., Allison, R. B. (2008). Decay detection in red oak trees using a combination of visual inspection, acoustic testing, and resistance microdrilling. *Arboriculture and Urban Forestry*, 34(1), 1.
211. Wang, X., Wiedenbeck, J., Ross, R.J., Forsman, J.W., Erickson, J.R., Pilon, C., Brashaw, B.K., (2005). Nondestructive evaluation of incipient decay in hardwood logs. Res. Pap. FPL–GTR–162. WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 11 p.

212. Wang, X., Divos, F., Pilon, C., Brashaw, B.K., Ross, R.J., Pellerin, R.F., (2004). Assessment of decay in standing timber using stress wave timing nondestructive evaluation tools: A guide for use and interpretation. Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–147. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 12 p.
213. Wilson, K., White, D. J. B., (1986). The anatomy of wood its diversity and variability. London, Stobart; Son Ltd.
214. Yang, J., Evans, R., & Downes, G. (2020). Longitudinal variation in wood density and fibre properties of *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens*. *Forests*, 11(5), 575. <https://doi.org/10.3390/f11050575>
215. Yamamoto, K., Sulaiman, O., Hashim, R., (1998). Nondestructive detection of heart rot on *Acacia Mangium* trees in Malaysia. *Forest Products Journal* 48(3):83–86.
216. Youngs, R. L., (1957). The perpendicular-to-grain mechanical properties of red oak as related to temperature, moisture content, and time.
217. Yue, X., Wang, L., Wacker, J. P., & Zhu, Z. (2019). Electric resistance tomography and stress wave tomography for decay detection in trees—a comparison study. *PeerJ*, 7, e6444.168. Zeidler, A., and Borůvka, V., (2016). Wood density of northern red oak and pedunculate
218. Živanović, I., Poduška, Z., Rakonjac, L., & Jovanović, F., (2019). Potentials of the evaluation of the wood quality in living trees by using semi-and non-destructive methods in order to reduce wood-processing costs. *Sustainable Forestry: Collection*, (79-80), 115-126.
219. Živanović, I., Jovanović, F., Šurjanac, N., Todorović, N., Milić, G., (2021). Properties of the northern red oak (*Quercus rubra* L.) wood determined by fractometric measurements—preliminary results. *Glasnik Sumarskog fakulteta*, (124), 125-136.

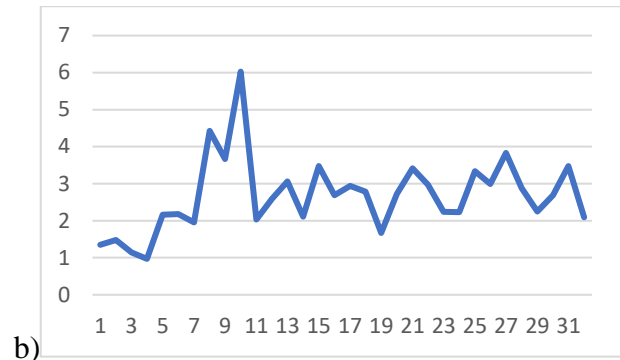
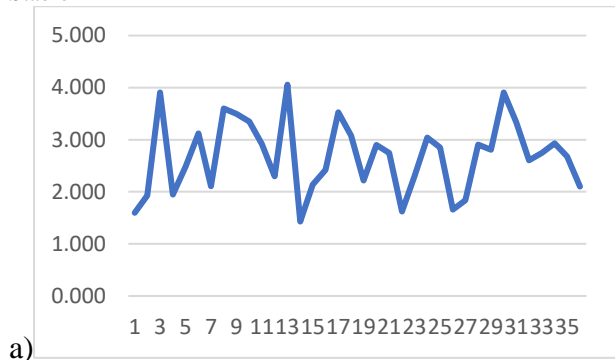
220. Živanović, I., Todorović, N., Šurjanac, N., Kabiljo, M., Jovanović, F., (2022). Physical and mechanical properties of wood of northern red oak in the vicinity of Belgrade (Serbia). *Sustainable Forestry: Collection*, (83-84), 93-1
221. Zeidler, A. and Boruvka, V. 2016 Wood Density of Northern Red Oak and Pedunculate Oak Grown in Former Brown Coal Mine in the Czech Republic. *BioResources* 4, 9373–9385.
222. Zelić, J., and Međugorac, K. (1989). Prilog poznavanju gospodarenja crvenim hrastom (*Quercus borealis maxima* Sarg.).
223. Ziemińska, K., Butler, D. W., Gleason, S. M., Wright, I. J., & Westoby, M. (2013). Fibre wall and lumen fractions drive wood density variation across 24 Australian angiosperms. *AoB Plants*, 5, plt046. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plt046>
224. Zink-Sharp, A. (2003). The mechanical properties of wood. *Wood Quality and its Biological Basis*. Blackwell Publishing-CRC Press. Biological Sciences Series. Boca Raton, Fla., EUA, 187-210.
225. Zipse, A., Mattheck, C., Gräbe, D., & Gardiner, B. (1998). The effect of wind on the mechanical properties of the wood of beech (*Fagus sylvatica* L.) growing in the borders of Scotland. *Arboricultural Journal*, 22(3), 247-257.
226. Zobel, B. J., & Buijtenen, J. P. V., (1989). Wood variation and wood properties in wood variation (pp. 1-32). Springer, Berlin, Heidelberg

10. PRILOZI

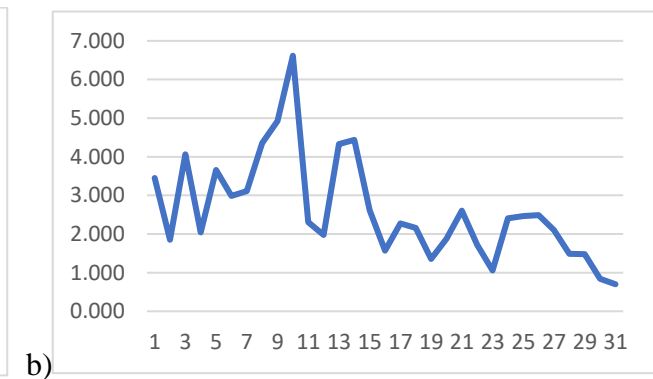
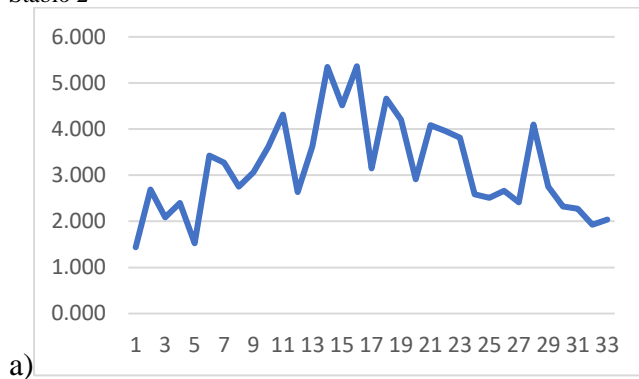
Prilog 1 - Grafici - stabla 1,2 i 3 širina prstena prirasta duž poprečnog preseka: a-donji trupčić, b- gornji trupčić Bruske šume;

Tabele - Rezultati deskriptivne statistike za širinu prstena prirasta juvenilne i zrele zone stabala sa lokaliteta Bruske šume

Stablo 1



Stablo 2



Stablo 3

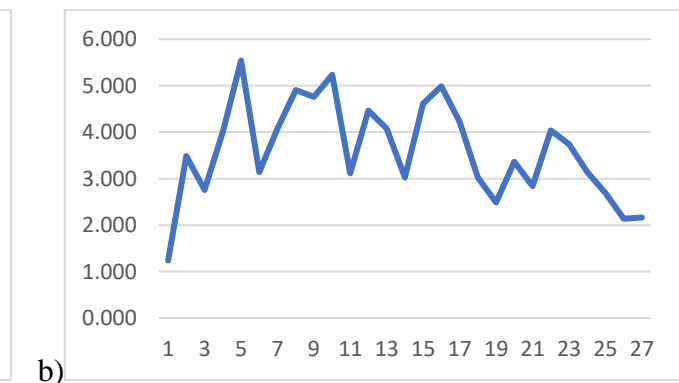
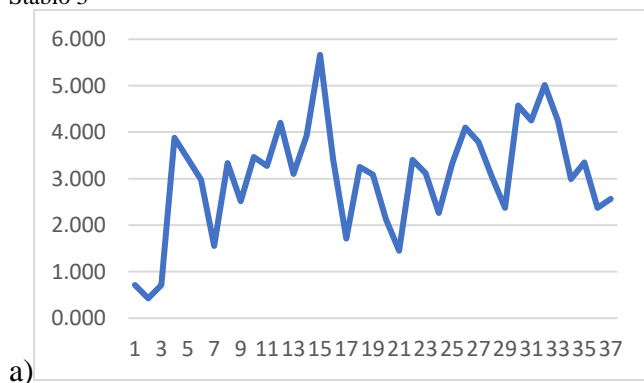


Tabela 1 - Rezultati deskriptivne statistike za širinu prstena prirasta juvenilne zone stabala sa lokaliteta Bruske šume

Juvenilno drvo	BŠ 1D	BŠ 1G	BŠ 2D	BŠ 2G	BŠ 3D	BŠ 3G	BŠ ukupno
	Širina goda	Širina goda	Širina goda	Širina goda	Širina goda	Širina goda	Širina goda
\bar{X}	2,832	2,575	3,014	3,579	2,877	3,895	3,107
SD	0,821	1,367	1,278	1,587	1,463	1,123	1,329
CV (%)	28,98	53,08	42,39	44,35	50,85	28,83	42,76
MIN	1,599	0,970	1,438	1,849	0,425	1,238	0,425
MAX	4,057	6,026	5,351	6,616	5,664	5,540	6,616
opseg	2,458	5,056	3,913	4,767	5,239	4,302	6,191

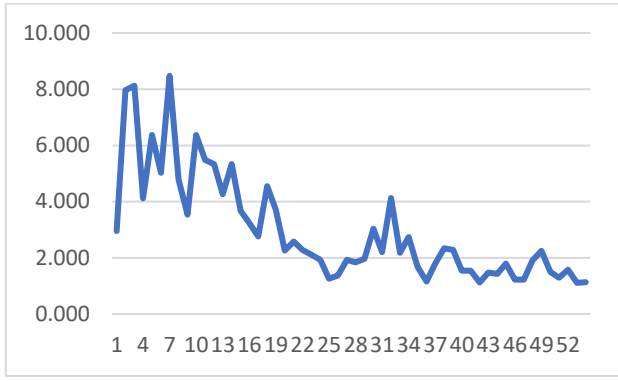
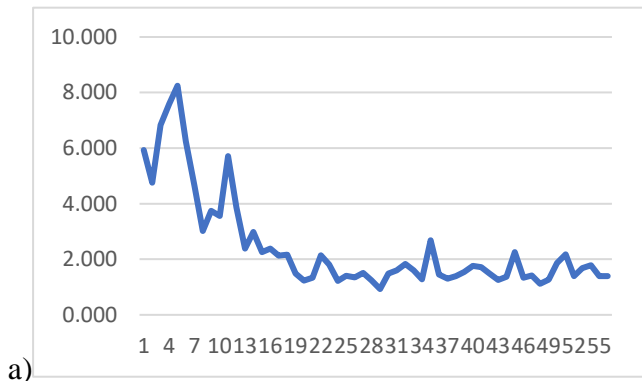
Tabela 2- Rezultati deskriptivne statistike za širinu prstena prirasta zrele zone stabala sa lokaliteta Bruske šume

Zrelo drvo	BŠ 1D	BŠ 1G	BŠ 2D	BŠ 2G	BŠ 3D	BŠ 3G	BŠ ukupno
	Širina goda	Širina goda	Širina goda	Širina goda	Širina goda	Širina goda	Širina goda
\bar{X}	2,599	2,777	3,277	1,836	3,173	3,236	2,861
SD	0,622	0,561	1,017	0,742	0,921	0,873	0,928
CV (%)	23,93	20,19	31,05	40,42	29,03	26,99	32,44
MIN	1,429	1,669	1,925	0,700	1,450	2,138	0,700
MAX	3,907	3,827	5,363	2,618	5,013	4,988	5,363
opseg	2,478	2,158	3,438	1,918	3,563	2,850	4,663

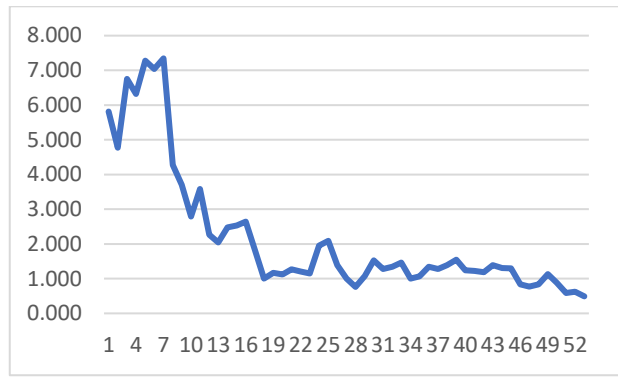
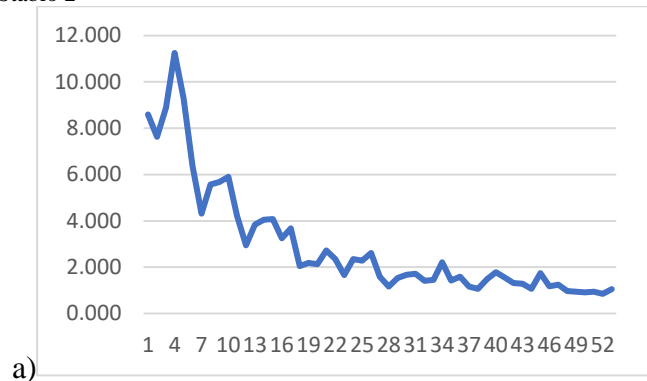
Prilog 2 - Grafici - stabla 1,2 i 3 širina prstena prirasta duž poprečnog preseka: a-donji trupčić, b- gornji trupčić Debeli lug;

Tabele - Rezultati deskriptivne statistike za širinu prstena prirasta juvenilne i zrele zone stabala sa lokaliteta Debeli lug

Stablo 1



Stablo 2



Stablo 3

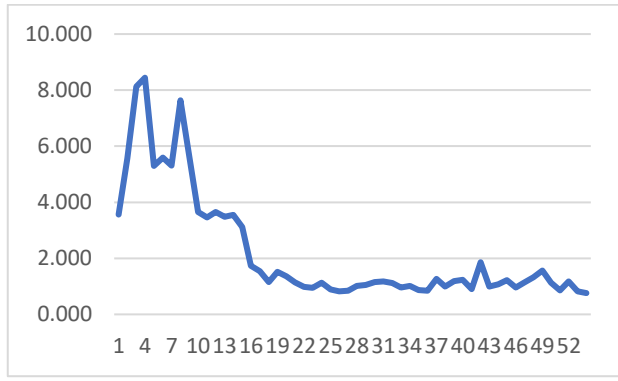
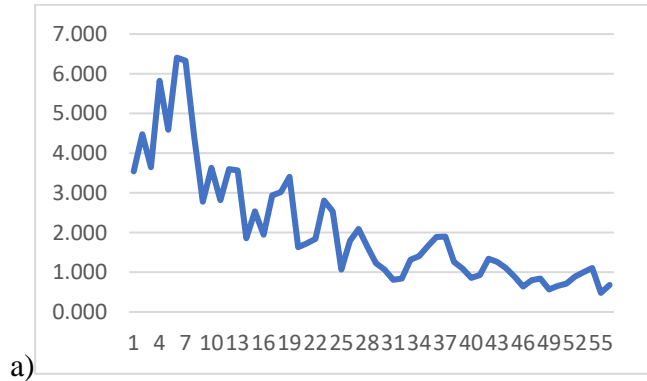


Tabela 3 - Rezultati deskriptivne statistike za širinu prstena prirasta juvenilne zone stabala sa lokaliteta Debeli lug

Juvenilno drvo	DL 1D	DL 1G	DL 2D	DL 2G	DL 2D	DL 3G	DL ukupno
	Širina goda	Širina goda	Širina goda	Širina goda	Širina goda	Širina goda	Širina goda
\bar{X}	4,203	5,048	3,560	4,158	3,514	4,269	4,111
SD	1,333	0,903	1,188	1,555	1,172	1,192	1,296
CV (%)	31,73	17,89	33,37	37,40	33,37	27,93	31,53
MIN	1,609	3,688	2,069	2,328	1,409	2,528	1,409
MAX	6,226	6,934	5,946	7,575	5,037	6,216	7,575
opseg	4,617	3,246	3,877	5,247	3,628	3,688	6,166

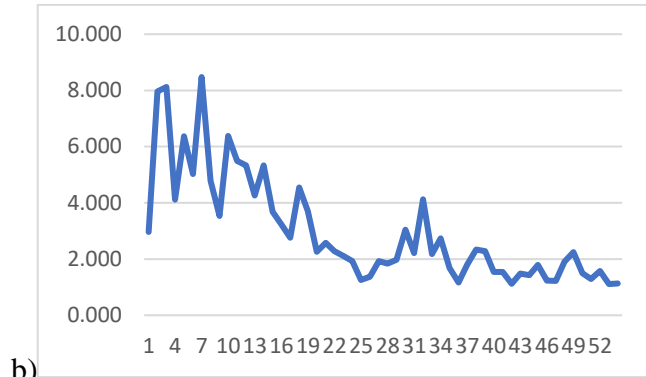
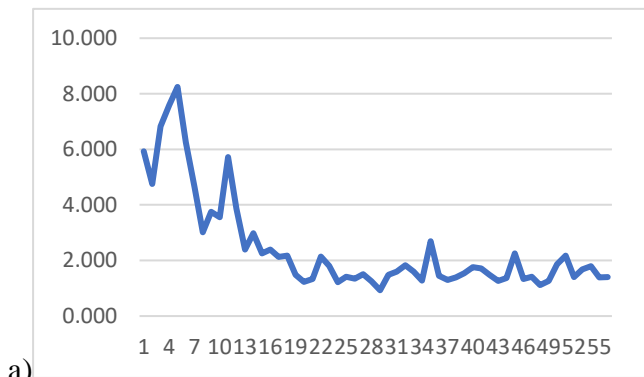
Tabela 4 - Rezultati deskriptivne statistike za širinu prstena prirasta juvenilne zone stabala sa lokaliteta Debeli lug

Zrelo drvo	DL 1D	DL 1G	DL 2D	DL 2G	DL 2D	DL 3G	DL ukupno
	Širina goda	Širina goda	Širina goda	Širina goda	Širina goda	Širina goda	Širina goda
\bar{X}	3,120	2,350	3,476	3,515	3,299	2,839	3,107
SD	0,736	0,599	1,169	1,060	0,938	0,603	0,961
CV (%)	23,60	25,47	33,63	30,14	28,42	21,24	30,92
MIN	1,749	1,199	1,509	1,919	1,679	1,719	1,199
MAX	4,627	3,718	5,636	6,556	5,117	4,027	6,556
opseg	2,878	2,519	4,127	4,637	3,438	2,308	5,357

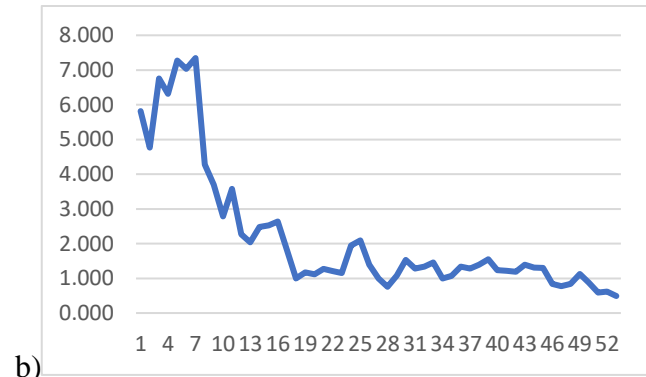
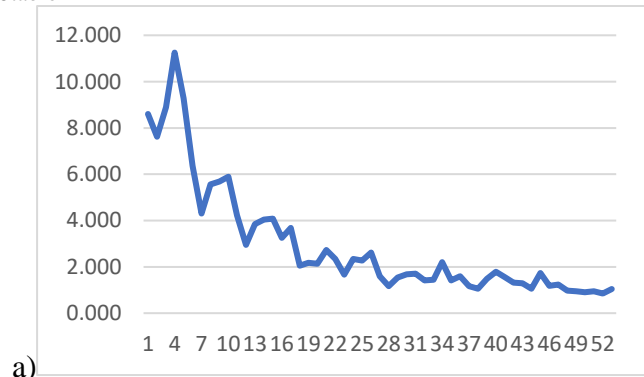
Prilog 3 - Grafici - stabla 1,2 i 3 širina prstena prirasta duž poprečnog preseka: a-donji trupčić, b- gornji trupčić Stepini lug

Tabele - Rezultati deskriptivne statistike za širinu prstena prirasta juvenilne i zrele zone stabala sa lokaliteta Stepini lug

Stablo 1



Stablo 2



Stablo 3

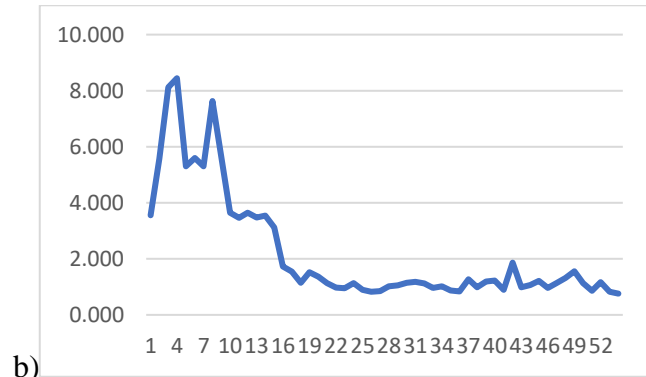
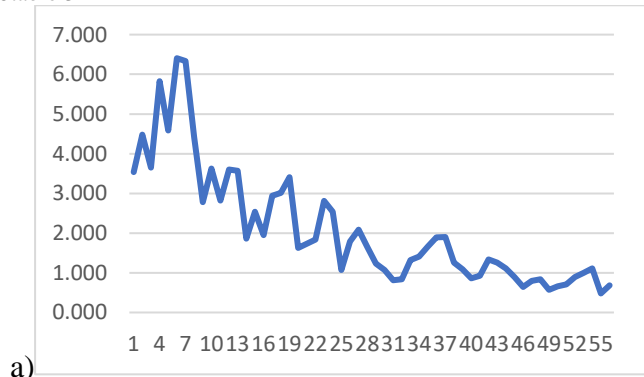


Tabela 5 - Rezultati deskriptivne statistike za širinu prstena prirasta juvenilne zone stabala sa lokaliteta Stepin lug

Juvenilno drvo	SL 1D	SL 1G	SL 2D	SL 2G	SL 3D	SL 3G	SL ukupno
	Širina goda	Širina goda	Širina goda	Širina goda	Širina goda	Širina goda	Širina goda
\bar{X}	5,479	5,773	6,908	5,384	4,492	5,673	5,602
SD	1,694	1,987	2,300	1,743	1,336	1,759	1,897
CV (%)	30,92	34,42	33,29	32,38	29,73	31,00	33,87
MIN	3,018	2,958	4,217	2,788	2,778	3,458	2,778
MAX	8,245	8,475	11,253	7,345	6,406	8,444	11,253
opseg	5,227	5,517	7,036	4,557	3,628	4,986	8,475

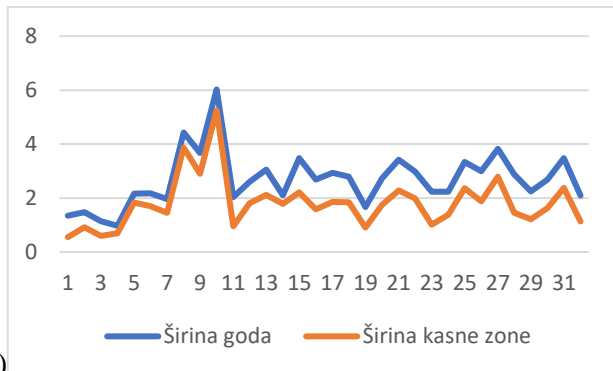
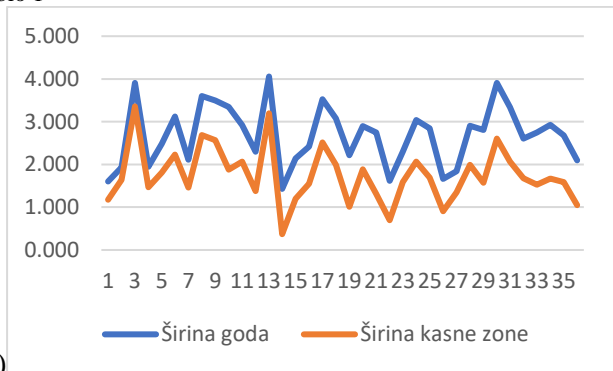
Tabela 6 - Rezultati deskriptivne statistike za širinu prstena prirasta juvenilne zone stabala sa lokaliteta Stepin lug

Zrelo drvo	SL 1D	SL 1G	SL 2D	SL 2G	SL 3D	SL 3G	SL ukupno
	Širina goda	Širina goda	Širina goda	Širina goda	Širina goda	Širina goda	Širina goda
\bar{X}	1,705	2,353	1,868	1,333	1,539	1,281	1,684
SD	0,552	1,208	0,888	0,516	0,841	0,640	0,882
CV (%)	32,37	51,34	47,52	38,69	54,64	49,97	52,37
MIN	0,929	1,110	0,849	0,490	0,480	0,759	0,480
MAX	3,868	5,486	4,077	2,639	3,598	3,548	5,486
opseg	2,939	4,376	3,228	2,149	3,118	2,789	5,006

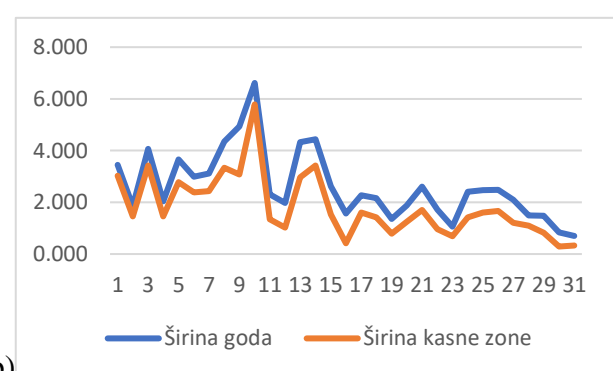
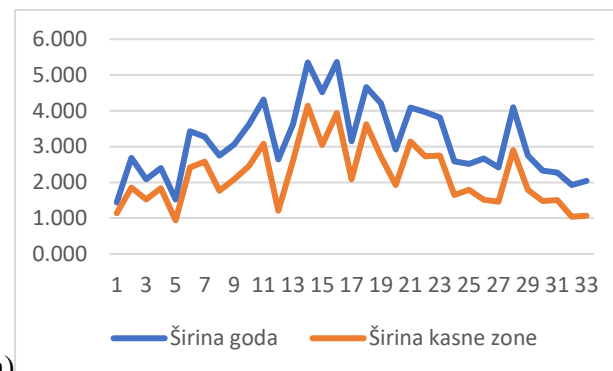
Prilog 4 - Grafici - stabla 1,2 i 3 širina prstena prirasta i kasne zone duž poprečnog preseka: a-donji trupčić, b- gornji trupčić Bruske šume

Tabela - širina i učestalost kasne zone drveta kod stabala crvenog hrasta sa lokaliteta Bruske šume

Stablo 1



Stablo 2



Stablo 3

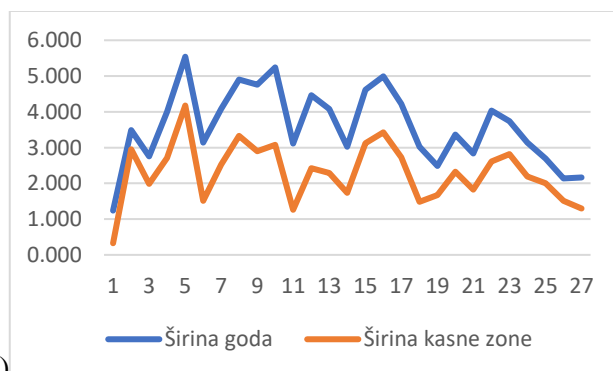
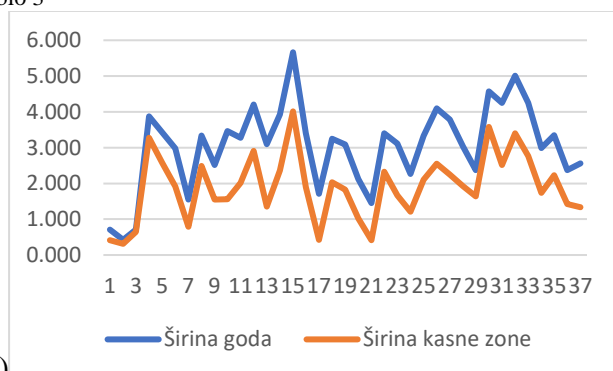


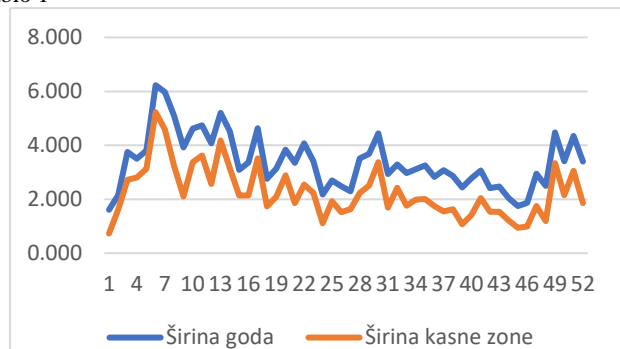
Tabela 7 – Širina i učešće kasne zone drveta kod stabala crvenog hrasta sa lokaliteta Bruske šume

Zona poprečnog preseka	Makroskopska svojstva drveta	Stablo-trupčić	1D	1G	2D	2G	3D	3G	ukupno
Juvenilna zona	Širina kasne zone u mm	\bar{X}	2,071	1,909	2,115	2,709	1,879	2,422	2,180
		SD	0,700	1,291	0,986	1,364	1,085	0,951	1,068
		CV (%)	33,81	67,62	46,63	50,36	57,74	39,26	48,97
		MIN	1,179	0,549	0,938	1,019	0,313	0,326	0,313
		MAX	3,358	5,246	4,138	5,786	4,013	4,176	5,786
		opseg	2,179	4,697	3,200	4,767	3,700	3,850	5,473
Juvenilna zona	Procentualno učešće kasne zone u prstenu prirasta	\bar{X}	72,88	70,10	69,61	74,20	65,62	60,01	68,62
		SD	8,311	14,587	19,789	21,765	13,457	14,351	14,510
		CV (%)	11,40	20,81	28,43	29,33	20,51	23,91	21,15
		MIN	56,12	40,70	45,98	51,50	43,53	26,33	26,33
		MAX	85,95	87,58	79,14	87,82	91,16	84,60	91,16
		opseg	29,83	46,88	33,16	36,33	47,63	58,27	64,83
Zrelo drvo	Širina kasne zone u mm	\bar{X}	1,560	1,731	2,217	1,107	1,921	2,158	1,767
		SD	0,541	0,526	0,862	0,534	0,798	0,644	0,760
		CV (%)	34,69	30,36	38,87	48,24	41,55	29,86	43,02
		MIN	0,370	0,909	1,038	0,290	0,413	1,300	0,290
		MAX	2,608	2,789	3,938	1,699	3,576	3,426	3,938
		opseg	2,238	1,880	2,900	1,409	3,163	2,126	3,648
Zrelo drvo	Procentualno učešće kasne zone u prstenu prirasta	\bar{X}	58,59	61,25	66,14	58,39	58,11	66,51	61,04
		SD	10,916	7,552	6,955	18,225	12,140	6,963	11,852
		CV (%)	18,63	12,33	10,51	31,21	20,89	10,47	19,42
		MIN	25,89	45,06	52,16	26,77	24,87	49,17	24,87
		MAX	73,36	72,88	77,76	73,81	78,15	75,25	78,15
		opseg	47,46	27,81	25,60	47,04	53,28	26,08	53,28

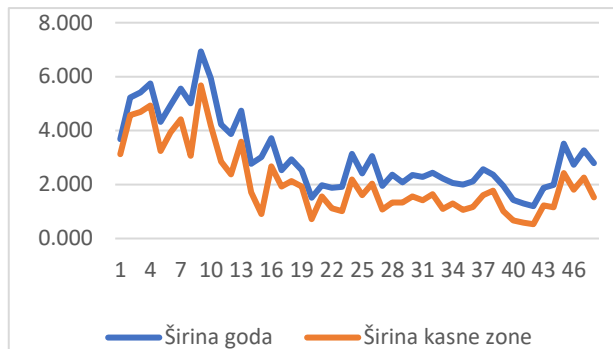
Prilog 5 - Grafici - stabla 1,2 i 3 širina prstena prirasta i kasne zone duž poprečnog preseka: a-donji trupčić, b- gornji trupčić Debeli lug

Tabela 8 - širina i učešće kasne zone drveta kod stabala crvenog hrasta sa lokaliteta Debeli lug

Stablo 1

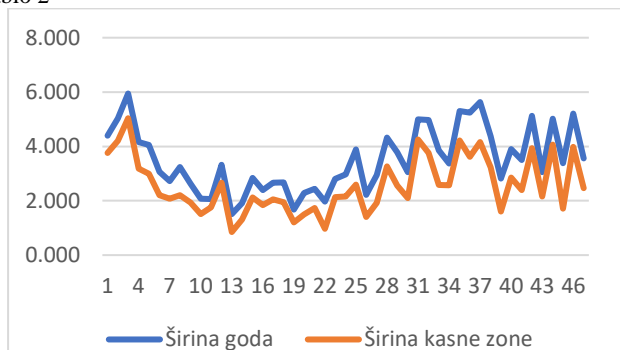


a)

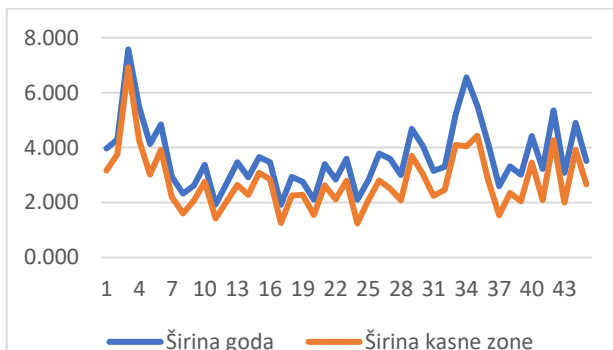


b)

Stablo 2

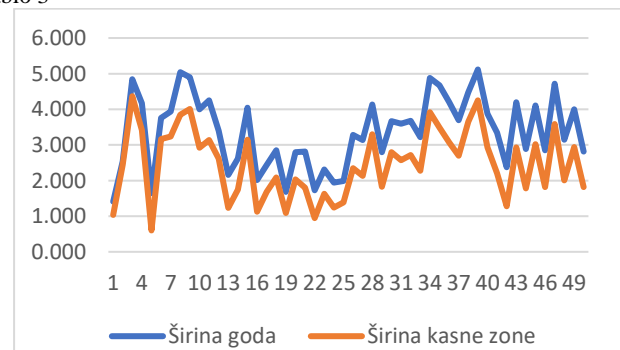


a)

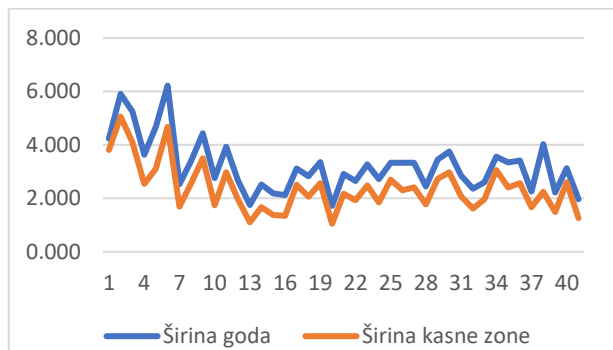


b)

Stablo 3



a)



b)

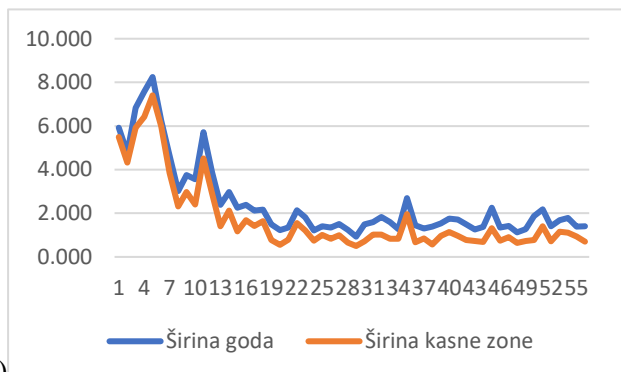
Tabela 8 – Širina i učešće kasne zone drveta kod stabala crvenog hrasta sa lokaliteta Debeli lug

Zona poprečnog preseka	Makroskopska svojstva drveta	Stablo-trupčić	1D	1G	2D	2G	3D	3G	ukupno
Juvenilna zona	Širina kasne zone (mm)	\bar{X}	3,073	3,897	2,520	3,010	2,900	3,141	3,064
		SD	1,163	0,952	1,138	1,364	1,121	1,118	1,214
		CV (%)	37,84	24,42	45,17	45,31	38,67	35,59	39,63
		MIN	0,730	2,378	0,849	1,419	0,600	1,689	0,600
		MAX	5,227	5,676	5,037	6,925	4,367	5,057	6,925
		opseg	4,497	3,298	4,188	5,506	3,767	3,368	6,325
Juvenilna zona	Procentualno učešće kasne zone u prstenu prirasta (%)	\bar{X}	71,14	76,69	75,40	78,84	77,25	74,85	75,85
		SD	11,251	9,182	7,858	5,836	14,616	7,838	10,021
		CV (%)	15,82	11,97	10,42	7,40	18,92	10,47	13,21
		MIN	45,37	61,15	56,26	68,69	36,39	63,05	36,39
		MAX	83,95	87,37	85,44	91,42	96,06	90,09	96,06
		opseg	38,58	26,22	29,18	22,73	59,67	27,03	59,67
Zrelo drvo	Širina kasne zone (mm)	\bar{X}	1,864	1,460	2,591	2,654	2,329	2,069	2,161
		SD	0,645	0,530	0,973	0,882	0,860	0,559	0,854
		CV (%)	34,59	36,27	37,55	33,22	36,92	27,03	39,52
		MIN	0,720	0,530	0,969	1,239	0,949	1,049	0,530
		MAX	3,518	2,679	4,257	4,437	4,247	3,058	4,437
		opseg	2,798	2,149	3,288	3,198	3,298	2,009	3,907
Zrelo drvo	Procentualno učešće kasne zone u prstenu prirasta (%)	\bar{X}	62,55	60,88	70,73	72,84	69,58	71,94	67,71
		SD	9,754	10,813	7,830	6,682	7,277	7,123	9,337
		CV (%)	15,59	17,76	11,07	9,17	10,46	9,90	13,79
		MIN	30,12	30,12	49,21	58,75	53,78	55,82	30,12
		MAX	3,073	3,897	2,520	3,010	2,900	3,141	3,064
		opseg	1,163	0,952	1,138	1,364	1,121	1,118	1,214

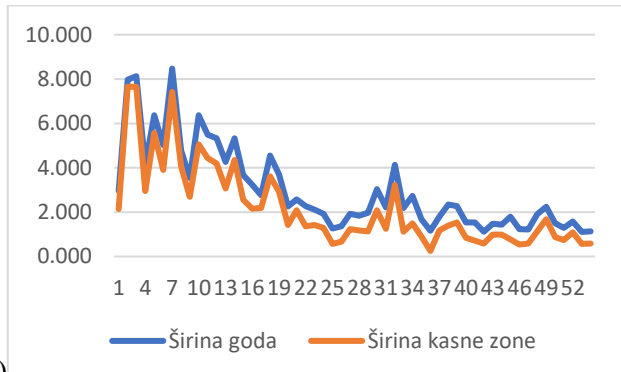
Prilog 6 - Grafici - stabla 1,2 i 3 širina prstena prirasta i kasne zone duž poprečnog preseka: a-donji trupčić, b- gornji trupčić Stepin lug

Tabela 9 - širina i učesće kasne zone drveta kod stabala crvenog hrasta sa lokaliteta Stepin lug

Stablo 1

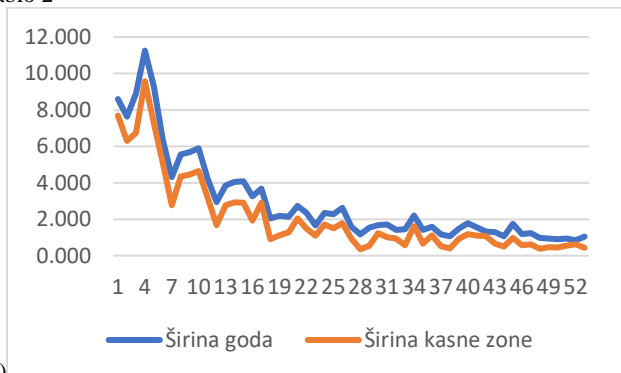


a)

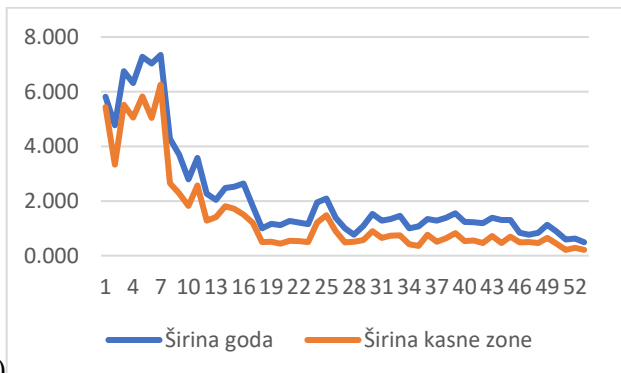


b)

Stablo 2

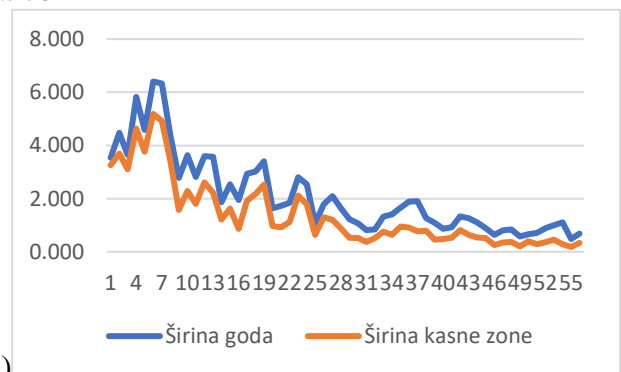


a)

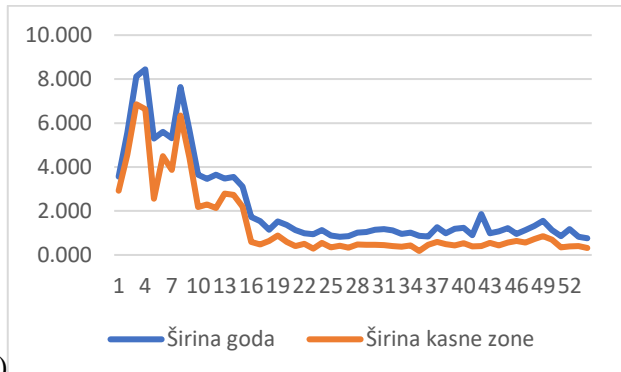


b)

Stablo 3



a)



b)

Tabela 9 – Širina i učešće kasne zone drveta kod stabala crvenog hrasta sa lokaliteta Stepin lug

Zona poprečnog preseka	Makroskopska svojstva drveta	Stablo-trupčić	1D	1G	2D	2G	3D	3G	ukupno
Juvenilna zona	Širina kasne zone (mm)	\bar{X}	4,145	4,202	4,817	3,216	2,782	3,800	3,780
		SD	1,866	1,842	2,257	1,850	1,247	1,691	1,879
		CV (%)	45,01	43,84	46,85	57,54	44,84	44,50	49,72
		MIN	1,409	2,139	1,669	1,199	0,869	2,139	0,869
		MAX	7,405	7,655	9,574	6,256	5,187	6,855	9,574
Juvenilna zona	Procentualno učešće kasne zone u prstenu prirasta (%)	\bar{X}	5,996	5,516	7,905	5,057	4,318	4,716	8,705
		SD	80,80	79,69	75,82	71,28	71,71	73,45	75,29
		CV (%)	10,357	8,069	8,041	10,102	11,490	10,710	10,338
		MIN	12,82	10,13	10,61	14,17	16,02	14,58	13,73
		MAX	59,00	66,68	56,61	56,39	44,59	48,30	44,59
		opseg	95,68	96,11	89,30	93,47	92,09	84,38	96,11
Zrelo drvo	Širina kasne zone (mm)	\bar{X}	36,67	29,43	32,68	37,07	47,50	36,08	51,52
		SD	0,962	1,177	1,002	0,594	0,678	0,488	0,817
		CV (%)	0,333	0,629	0,562	0,249	0,420	0,145	0,483
		MIN	34,63	53,42	56,06	41,92	62,01	29,64	59,11
		MAX	0,500	0,251	0,350	0,210	0,180	0,181	0,180
		opseg	1,959	3,228	2,908	1,480	2,119	0,879	3,228
Zrelo drvo	Procentualno učešće kasne zone u prstenu prirasta (%)	\bar{X}	59,00	58,84	57,35	49,79	51,41	43,94	53,44
		SD	8,706	11,819	13,451	9,393	10,888	9,951	12,038
		CV (%)	14,76	20,09	23,45	18,87	21,18	22,65	22,53
		MIN	41,04	21,64	29,94	33,64	25,25	20,83	20,83
		MAX	75,56	80,64	81,80	70,85	75,46	65,69	81,80
		opseg	34,53	59,01	51,86	37,20	50,21	44,86	60,98

Prilog 7 - broj prstenova prirasta obuhvaćen srčevinom i beljikom na dve visine na sva tri lokaliteta

Tabela 10 – Broj prstenova prirasta obuhvaćen srčevinom i beljikom na dve visine na sva tri lokaliteta

Broj prstenova prirasta i njihova širina	Lokalitet	Mesto preseka stabala u m					
		Stablo 1		Stablo 2		Stablo 3	
Broj prstenova prirasta na dve visine		1.3 [m]	4.5 [m]	1.3 [m]	4.5 [m]	1.3 [m]	4.5 [m]
Beljike		4	5	5	4	5	4
Srčevine		32	27	28	27	32	23
Ukupno	Bruske šume	36	32	33	31	37	27
Širina (mm) srčevine i beljike na dve visine		1.3 [m]	4.5 [m]	1.3 [m]	4.5 [m]	1.3 [m]	4.5 [m]
Beljike		86,139	72,453	93,143	76,820	97,434	87,133
Srčevine		10,453	13,381	11,313	4,507	15,528	10,127
Ukupno		96,592	85,834	104,456	81,327	112,962	97,26
Broj prstenova prirasta na dve visine		1.3 [m]	4.5 [m]	1.3 [m]	4.5 [m]	1.3 [m]	4.5 [m]
Beljike		4	4	4	3	3	4
Srčevine		48	44	43	42	47	37
Ukupno	Debeli lug	52	48	47	45	50	41
Širina (mm) srčevine i beljike na dve visine		1.3 [m]	4.5 [m]	1.3 [m]	4.5 [m]	1.3 [m]	4.5 [m]
Beljike		160,694	135,588	147,221	153,119	158,196	120,799
Srčevine		15,631	12,303	17,170	11,504	9,963	11,343
Ukupno		176,325	147,891	164,391	164,623	168,159	132,142
Broj prstenova prirasta na dve visine		1.3 [m]	4.5 [m]	1.3 [m]	4.5 [m]	1.3 [m]	4.5 [m]
Beljike		5	4	3	4	5	4
Srčevine		51	50	50	49	51	50
Ukupno	Stepin lug	56	54	53	53	56	54
Širina (mm) srčevine i beljike na dve		1.3 [m]	4.5 [m]	1.3 [m]	4.5 [m]	1.3 [m]	4.5 [m]
Beljike		129,325	156,152	153,311	113,044	113,545	116,176
Srčevine		7,655	5,107	2,838	2,579	4,158	3,607
Ukupno		136,980	161,259	156,149	115,623	117,703	119,783

Prilog 9 - deskriptivna statistika i analiza varijanse homogenih grupa za za mehanička svojstva drveta crvenog hrasta na tri lokaliteta u Srbiji, po stablu

Tabela 15. Deskriptivna statistika (N – broj merenja, \bar{X} – srednja vrednost, SD – standardna devijacija, CV% – koeficijent varijacije, MIN – minimalna vrednost, MAX – maksimalna vrednost) i analiza varijanse (ANOVA) homogenih grupa za za mehanička svojstva drveta crvenog hrasta na tri lokaliteta u Srbiji, po stablu

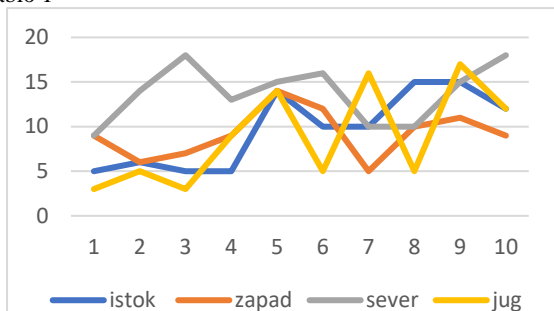
Lokalitet		Bruske šume				Debeli Lug				Stepin lug				
Svojstvo		Gustina (g/mm ³)	Hp (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	Gustina (g/mm ³)	Hp (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	Gustina (g/mm ³)	Hp (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	
Stablo	1	N	29	27	26	27	115	111	111	110	79	76	76	75
		\bar{X}	0,715 b	58,80 3 b	116,90 2 b	9135,360 a	0,711 b	64,63 1 b	131,79 4 ab	10660,10 0 a	0,694 b	57,71 4 b	119,80 4 a	11081,50 0 b
		SD	0,034	3,802	12,457	1593,990	0,028	4,872	13,418	2270,120	0,054	6,554	11,838	1244,400
		CV%	4,821	6,466	10,656	17,449	3,871	7,538	10,182	21,296	7,719	11,35 6	9,881	11,230
		MIN	0,608	49,05 8	89,200	6273,100	0,646	49,09 3	97,850	5965,330	0,567	40,51 0	88,990	8557,600
		MAX	0,776	66,50 8	135,81 0	13150,70 0	0,782	72,18 3	165,82 0	15321,10 0	0,816	72,87 2	147,25 0	15052,20 0
	2	N	18	17	17	15	112	99	100	102	75	69	70	71
		\bar{X}	0,671 a	54,67 3 a	101,13 9 a	8763,950 a	0,752 c	62,56 9 a	134,11 6 b	11271,20 0 b	0,668 a	56,45 7 ab	116,77 3 a	10160,70 0 a
		SD	0,035	3,294	17,507	2321,360	0,045	4,346	15,451	2461,730	0,059	6,495	13,981	1387,660
		CV%	5,222	6,024	17,309	26,488	6,040	6,946	11,520	21,841	8,886	11,50 5	11,973	13,657
		MIN	0,622	48,64 5	72,150	5470,790	0,657	49,75 3	97,290	5965,330	0,544	38,54 7	52,770	5800,910
		MAX	0,75	59,67 2	140,37 0	11673,20 0	0,893	70,80 3	167,17 0	15321,10 0	0,855	67,28 5	155,93 0	13408,40 0
	3	N	53	45	45	44	80	75	74	73	83	81	83	77
		\bar{X}	0,746 c	60,58 4 b	125,81 7 c	10128,20 0 b	0,689 a	63,60 2 ab	128,71 2 a	11535,60 0 b	0,671 a	55,47 8 a	124,39 3 b	11188,20 0 b
		SD	0,057	6,269	17,103	1372,660	0,026	4,128	11,572	1680,550	0,055	7,071	14,068	1627,010
		CV%	7,587	10,34 7	13,593	13,109	3,821	6,491	8,991	14,568	8,206	12,74 6	11,309	14,542
		MIN	0,644	46,45 3	87,940	7318,760	0,631	50,54 4	99,210	7726,840	0,545	43,16 4	92,360	8236,500
		MAX	0,857	73,76 5	158,25 0	12720,50 0	0,756	69,99 3	148,75 0	16368,70 0	0,802	70,35 6	156,42 0	15761,30 0
ANOV A	F	17,31	8,15	14,92	5,45	81,37	5,49	3,29	3,90	4,93	2,17	6,37	11,33	
	p	0,0000	0,000 6	0,0000	0,0060	0,000	0,046	0,0387	0,0213	0,0080	0,116 4	0,0000	0,0000	

Napomena. Srednje vrednosti sa različitim slovnim oznakama u okviru kolone su međusobno statistički značajno različite u nivou poverenja 95%. Masnim brojkama su označene vrednosti $p < 0,05$.

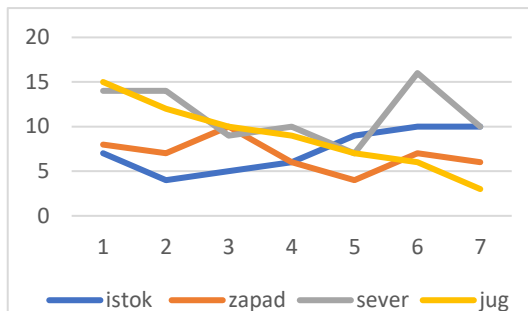
Prilog 9 - Grafici - stabla 1,2 i 3 savojna čvrstoća izvrtka u kardinalnim pravcima za: a-donji trupčić, b-gornji trupčić Bruske šume

Tabela - čvrstoća na savijanje izvrtka drveta crvenog hrasta na lokalitetu Bruske šume

Stablo 1

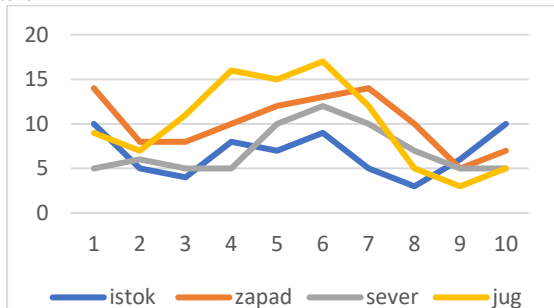


a)

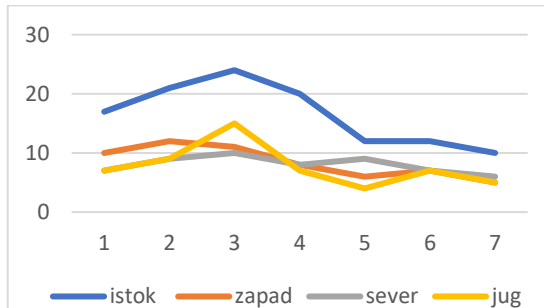


b)

Stablo 2

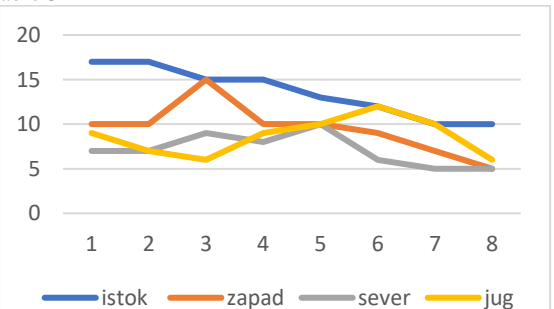


a)

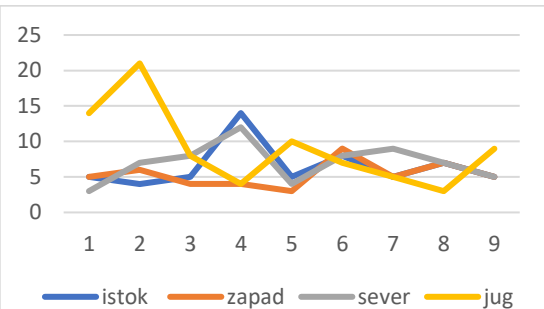


b)

Stablo 3



a)



b)

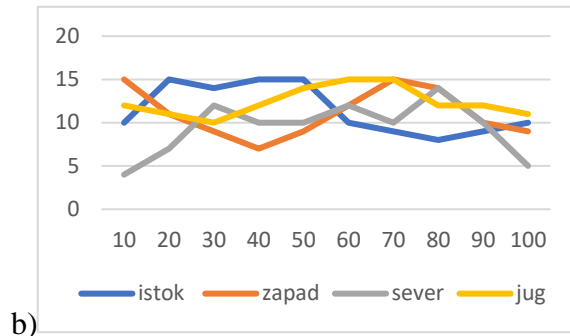
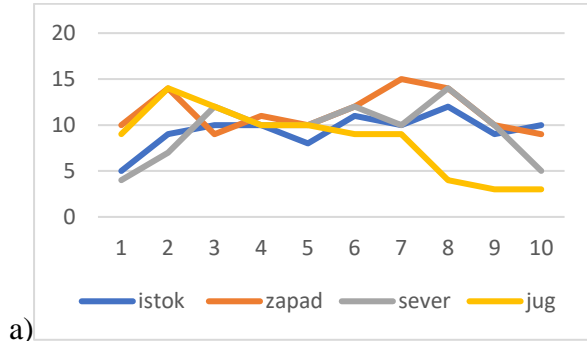
Tabela 12– Čvrstoća na savijanje [MPa] izvrtka drveta crvenog hrasta na lokalitetu Bruske šume

Statistički pokazatelji	Kardinalni pravci							
	Istok		Zapad		Sever		Jug	
	Položaj po visini stabla							
	Donji	Gornji	Donji	Gornji	Donji	Gornji	Donji	Gornji
\bar{X}	9,75	9,78	9,61	6,74	9,46	8,65	9,21	8,57
SD	4,24	6,21	2,83	2,72	4,19	3,54	4,44	4,67
CV (%)	43,48	63,50	29,48	40,34	44,32	40,97	48,21	54,54
MIN	3,00	4,00	5,00	3,00	5,00	3,00	3,00	3,00
MAX	17,00	24,00	15,00	12,00	18,00	16,00	17,00	21,00
opseg	14,00	20,00	10,00	9,00	13,00	13,00	14,00	18,00

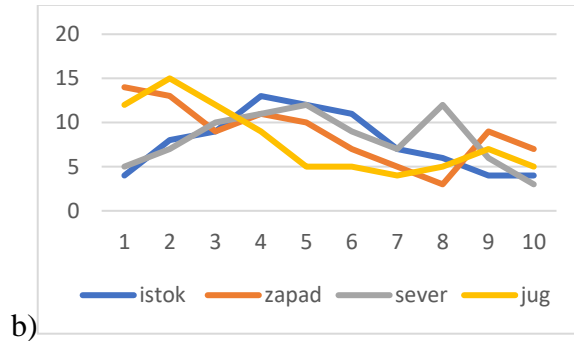
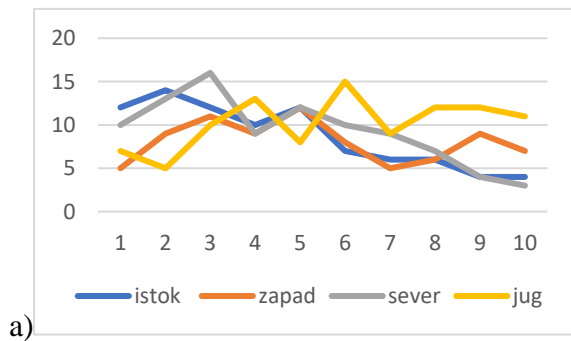
Prilog 10 - Grafici - stabla 1,2 i 3 savojna čvrstoća izvrtka u kardinalnim pravcima za: a-donji trupčić, b- gornji trupčić Debeli lug

Tabela - čvrstoća na savijanje izvrtka drveta crvenog hrasta na lokalitetu Debeli lug

Stablo 1



Stablo 2



Stablo 3

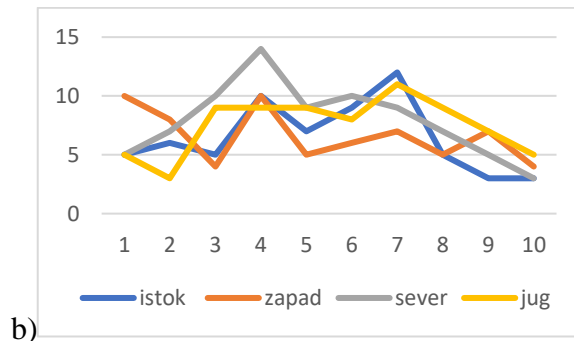
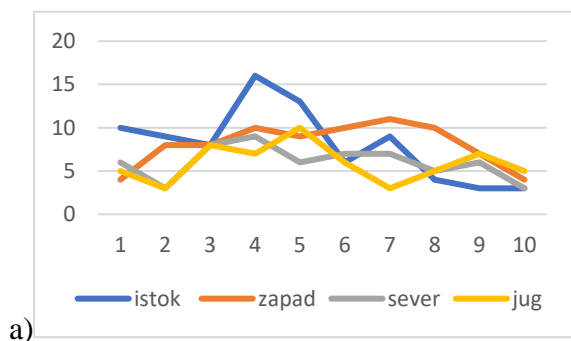


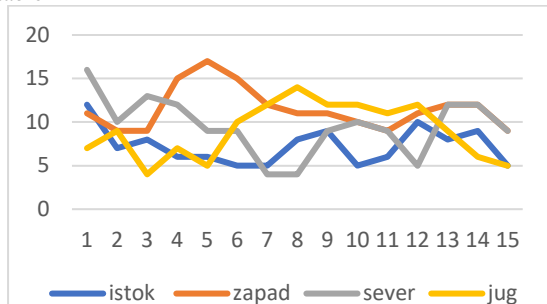
Tabela 13 – Čvrstoća na savijanje [MPa] izvrtka drveta crvenog hrasta po visini stabla na lokalitetu Debeli lug

Statistički pokazatelji	Kardinalni pravci							
	Istok		Zapad		Sever		Jug	
	Položaj po visini stabla							
	Donji	Gornji	Donji	Gornji	Donji	Gornji	Donji	Gornji
\bar{X}	10,27	10,58	8,68	9,08	11,73	9,78	9,17	11,15
SD	4,58	6,53	3,60	3,80	5,62	3,95	3,48	5,95
CV (%)	44,63	61,70	41,52	41,86	47,91	40,41	37,92	53,33
MIN	3,00	3,00	3,00	4,00	2,00	3,00	4,00	2,00
MAX	21,00	23,00	17,00	20,00	22,00	18,00	16,00	23,00
opseg	18,00	20,00	14,00	16,00	20,00	15,00	12,00	21,00

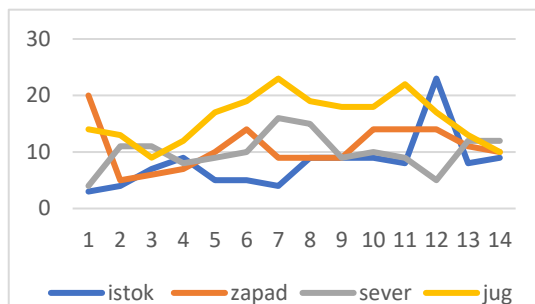
Prilog 11 - Grafici - stabla 1,2 i 3 savojna čvrstoća izvrtka u kardinalnim pravicima za: a-donji trupčić, b- gornji trupčić Stepin Lug

Tabela – Čvrstoća na savijanje izvrtka drveta crvenog hrasta po visini stabla na lokalitetu Stepin lug

Stablo 1

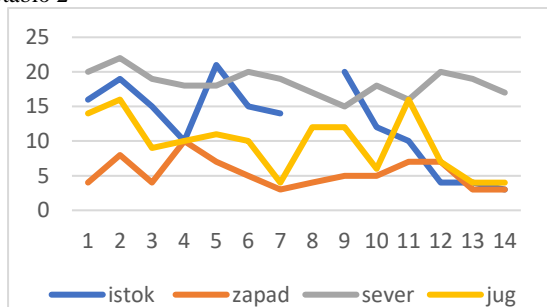


a)

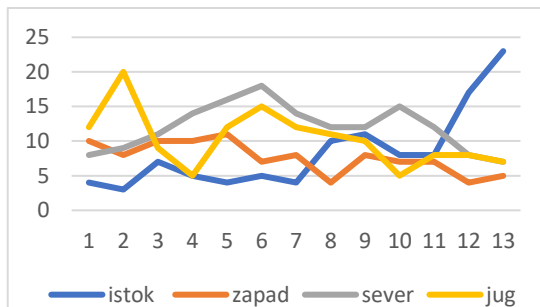


b)

Stablo 2

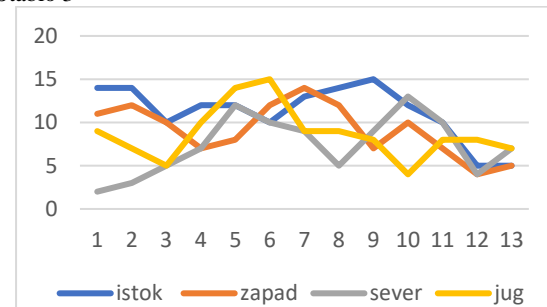


a)

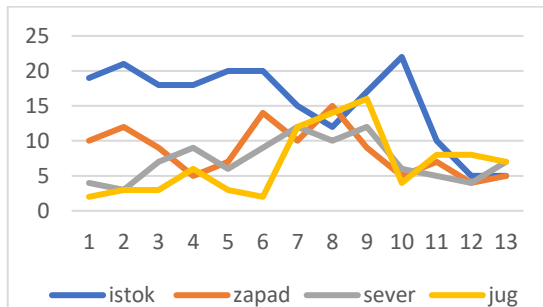


b)

Stablo 3



a)



b)

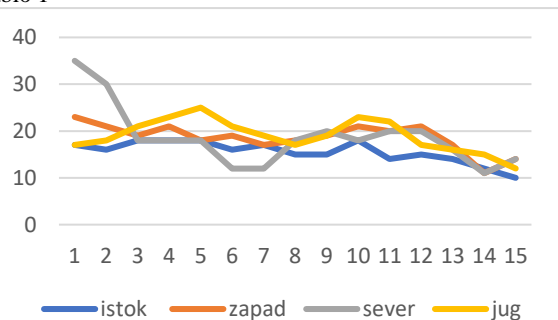
Tabela 14 – Čvrstoća na savijanje izvrtka [MPa] drveta crvenog hrasta po visini stabla na lokalitetu Stepin lug

Statistički pokazatelji	Kardinalni pravci							
	Istok		Zapad		Sever		Jug	
	Položaj po visini stabla							
	Donji	Gornji	Donji	Gornji	Donji	Gornji	Donji	Gornji
\bar{X}	8,73	8,60	9,20	8,83	8,23	8,50	8,13	9,27
SD	3,37	3,68	2,77	3,33	3,42	3,10	3,45	3,54
CV (%)	38,62	42,81	30,13	37,73	41,55	36,52	42,44	38,23
MIN	3,00	3,00	4,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
MAX	16,00	15,00	15,00	15,00	16,00	14,00	15,00	15,00
opseg	13,00	12,00	11,00	12,00	13,00	11,00	12,00	12,00

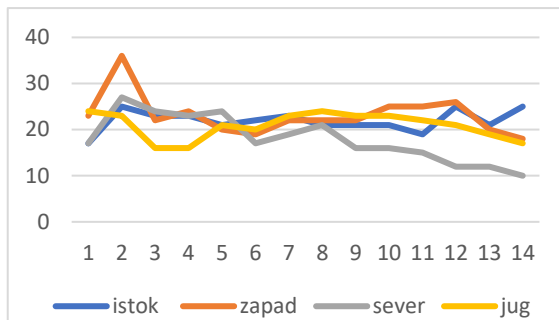
Prilog 12 - Grafici - stabla 1,2 i 3 ugao loma izvrtka u kardinalnim pravcima za: a-donji trupčić, b-gornji trupčić Bruske šume

Tabela – ugao loma izvrtka drveta crvenog hrasta po visini stabla na lokalitetu Bruske šume

Stablo 1

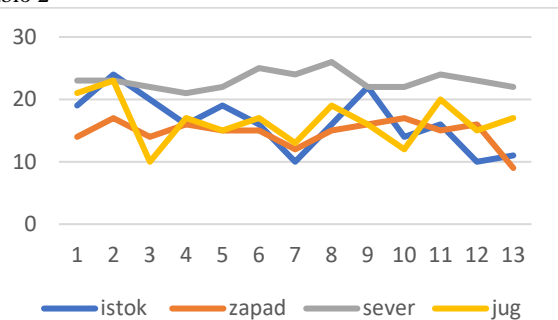


a)

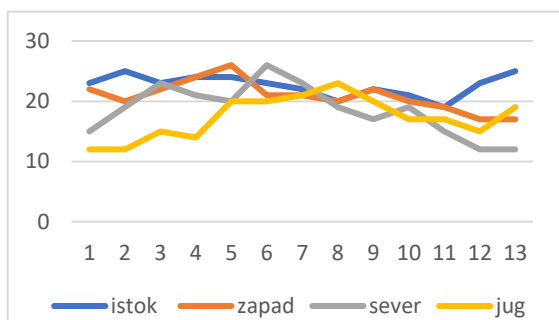


b)

Stablo 2

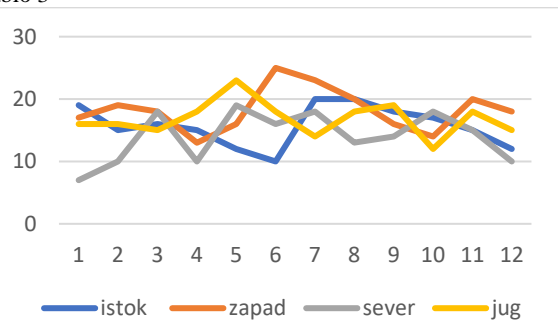


a)

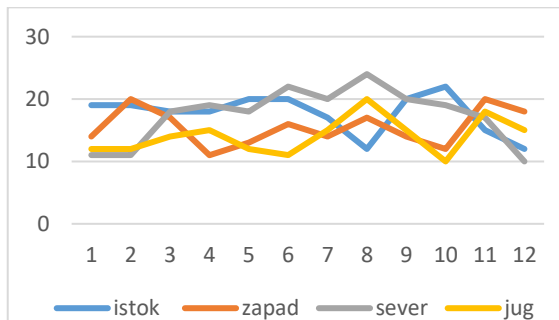


b)

Stablo 3



a)



b)

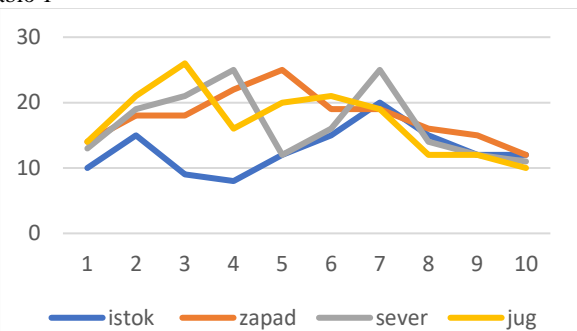
Tabela 15 – Ugao loma^[0] izvrтка drveta crvenog hrasta po visini stabla na lokalitetu Bruske šume

Statistički pokazatelj	Kardinalni pravci							
	Istok		Zapad		Sever		Jug	
	Položaj po visini stabla							
	Donji	Gornji	Donji	Gornji	Donji	Gornji	Donji	Gornji
\bar{X}	14,11	17	14,25	14,67	17,36	16,59	15,82	15,86
SD	2,86	6,65	3,31	4,18	4,99	4,44	3,88	4,71
CV (%)	20,27	39,09	23,21	28,46	28,80	26,79	24,51	29,67
MIN	9,00	9,00	7,00	10,00	12,00	11,00	10,00	10,00
MAX	20,00	28,00	21,00	21,00	38,00	22,00	25,00	25,00
opseg	11,00	19,00	14,00	11,00	26,00	11,00	15,00	15,00

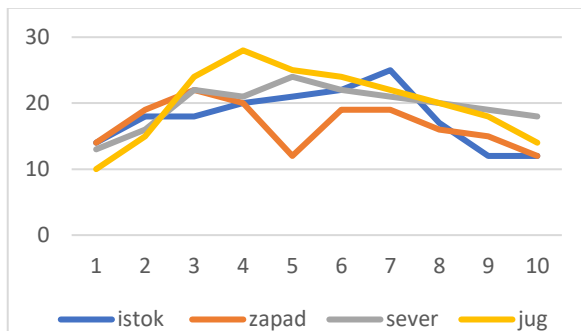
Prilog 13 - Grafici - stabla 1,2 i 3 ugao loma izvrtka u kardinalnim pravcima za: a-donji trupčić, b-gornji trupčić Debeli lug

Tabela - Ugao loma[o] izvrtka drveta crvenog hrasta po visini stabla na lokalitetu Debeli lug

Stablo 1

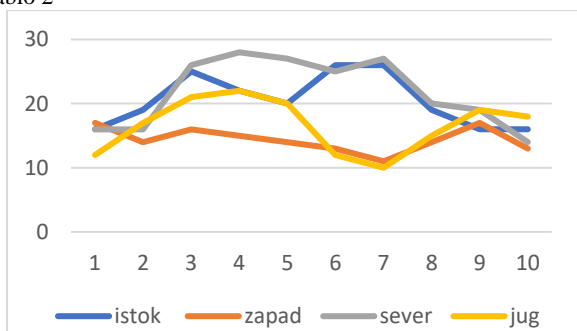


a)

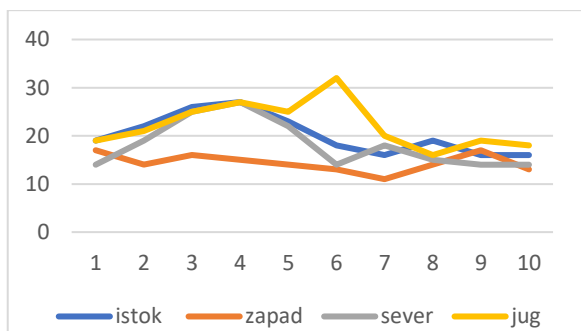


b)

Stablo 2

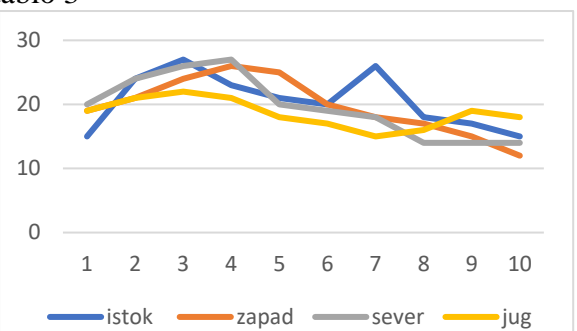


a)

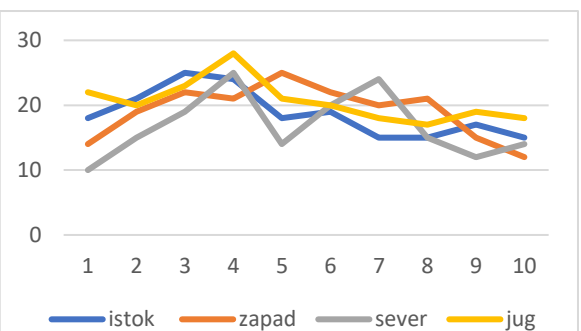


b)

Stablo 3



a)



b)

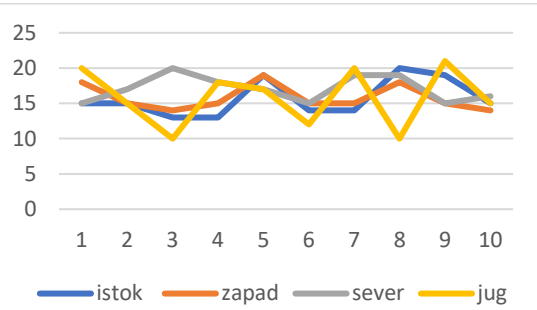
Tabela 16 – Ugao loma^[0] izvrtka drveta crvenog hrasta po visini stabla na lokalitetu Debeli lug

Statistički pokazatelji	Kardinalni pravci							
	Istok		Zapad		Sever		Jug	
	Položaj po visini stabla							
	Donji	Gornji	Donji	Gornji	Donji	Gornji	Donji	Gornji
\bar{X}	15,875	20,846	17,225	20,026	18,675	18,026	17,55	17,590
SD	4,118	5,531	4,279	5,556	6,374	5,325	4,394	4,928
CV (%)	25,94	26,53	24,84	27,745	34,13	29,54	25,04	28,016
MIN	10,00	12,00	9,00	11,00	7,00	10,00	10,00	10,00
MAX	24,00	25,00	25,00	36,00	35,00	27,00	25,00	24,00
opseg	14,00	13,00	16,00	25,00	28,00	17,00	15,00	14,00

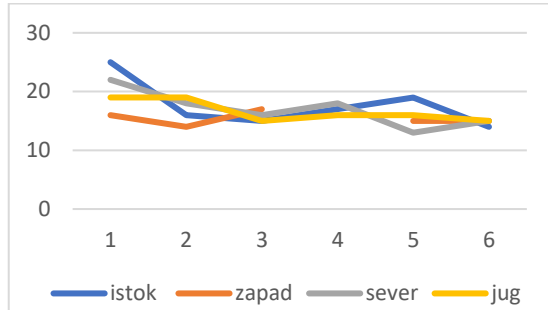
Prilog 14 - Grafici - stabla 1,2 i 3 ugao loma izvrtka u kardinalnim pravcima za: a-donji trupčić, b-gornji trupčić Stepin lug

Tabela - deskriptivna analiza ugla loma pri savijanju izvrtka na lokalitetu Stepin lug po visini stabla

Stablo 1

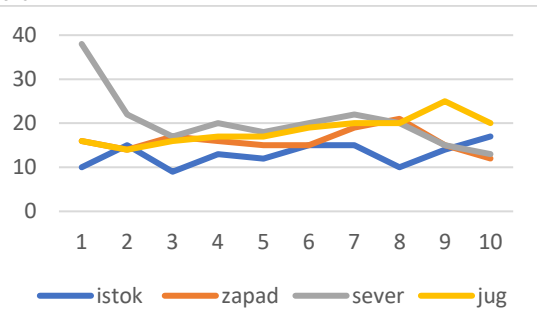


a)

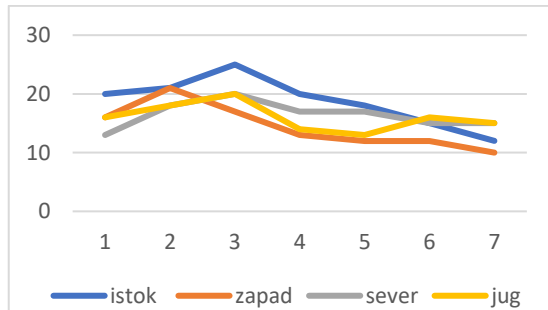


b)

Stablo 2

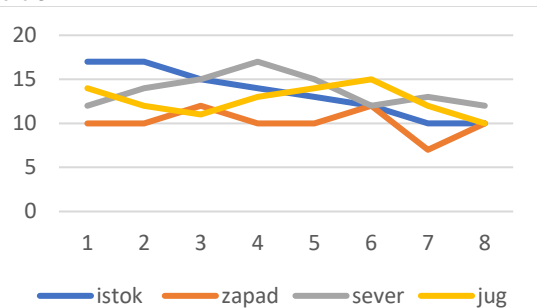


a)

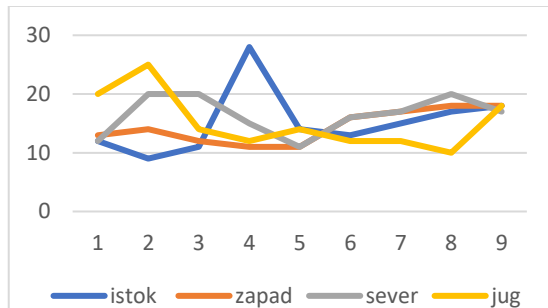


b)

Stablo 3



a)



b)

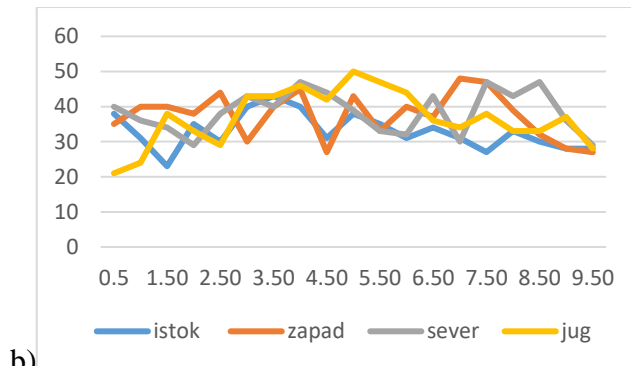
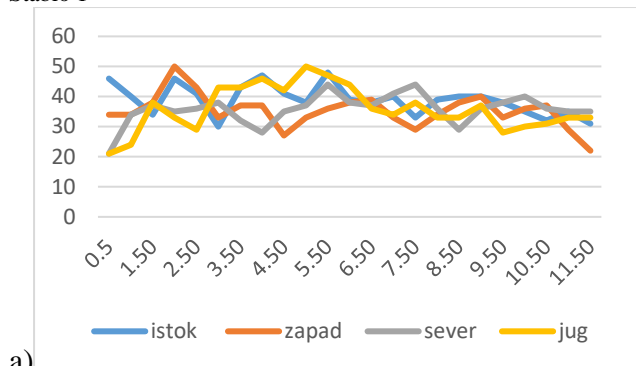
Tabela 17 – deskriptivna analiza ugla loma pri savijanju izvrtka [°] na lokalitetu Stepin lug po visini stabla

Statistički pokazatelji	Kardinalni pravci							
	Istok		Zapad		Sever		Jug	
	Položaj po visini stabla							
	Donji	Gornji	Donji	Gornji	Donji	Gornji	Donji	Gornji
\bar{X}	17,967	18,933	17,3	16,767	19,4	18,2	17,433	20,933
SD	5,359	4,000	4,103	3,739	5,437	4,467	3,980	4,646
CV (%)	29,831	21,12	23,72	22,30	28,03	24,55	22,83	22,19
MIN	8,00	12,00	11,00	11,00	11,00	10,00	10,00	10,00
MAX	27,00	27,00	26,00	25,00	28,00	27,00	26,00	32,00
opseg	19,00	15,00	15,00	14,00	17,00	17,00	16,00	22,00

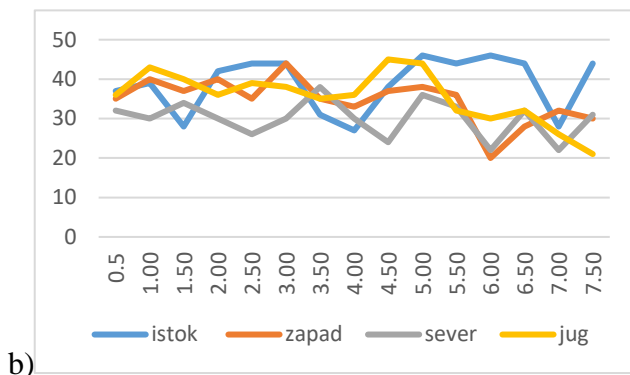
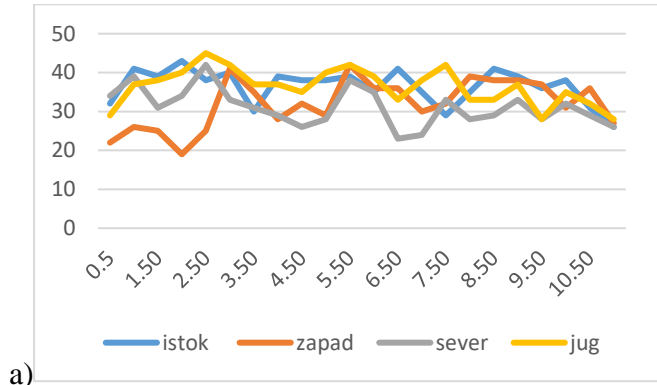
Prilog 15- Grafici - stabla 1,2 i 3 pritiska čvrstoća izvrtka u kardinalnim pravcima za: a-donji trupčić, b- gornji trupčić Bruske šume

Tabela - deskriptivna analiza čvrstoće na pritisak izvrtka paralelno sa vlaknima na lokalitetu Debeli lug po visini stabla

Stablo 1



Stablo 2



Stablo 3

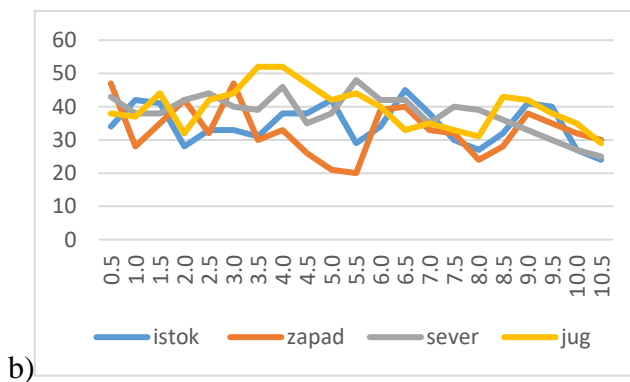
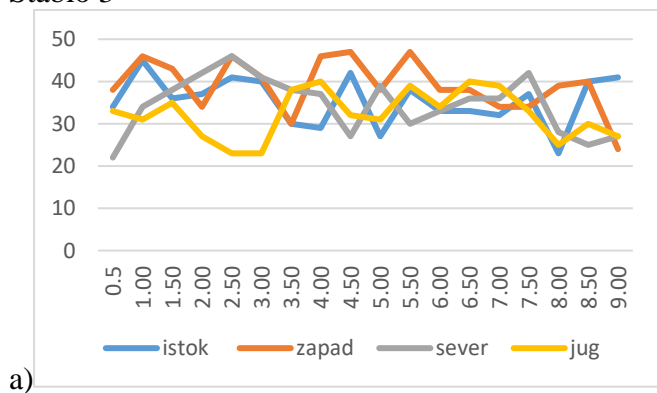


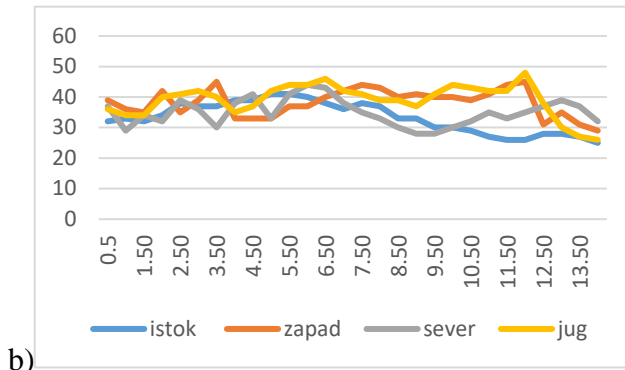
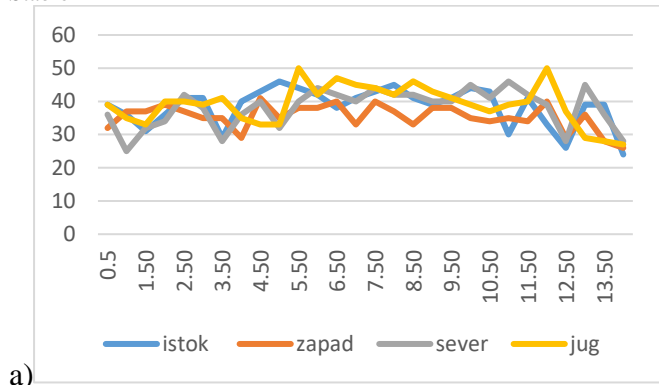
Tabela 18 – deskriptivna analiza čvrstoće na pritisak izvrtka paralelno sa vlaknima [MPa] na lokalitetu Debeli lug po visini stabla

Statistički pokazatelji	Kardinalni pravci							
	Istok		Zapad		Sever		Jug	
	Položaj po visini stabla							
	Donji	Gornji	Donji	Gornji	Donji	Gornji	Donji	Gornji
\bar{X}	38,559	35,182	33,353	35,000	34,912	36,000	36,706	37,545
SD	4,634	6,345	6,714	6,880	5,029	6,683	6,609	7,123
CV (%)	12,02	18,04	20,13	19,66	14,41	18,56	18,006	18,97
MIN	30,00	23,00	19,00	20,00	21,00	22,00	21,00	21,00
MAX	45,00	46,00	47,00	48,00	46,00	48,00	45,00	52,00
opseg	15,00	23,00	28,00	28,00	25,00	26,00	24,00	31,00

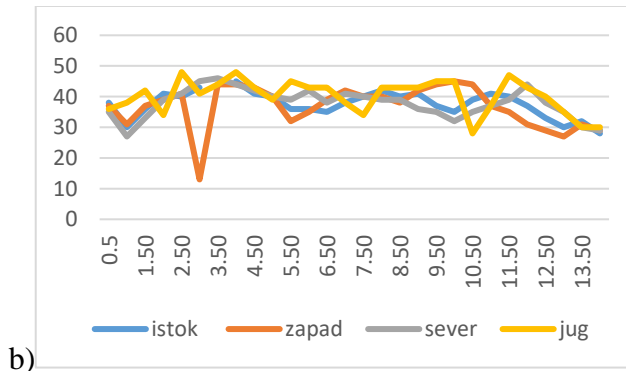
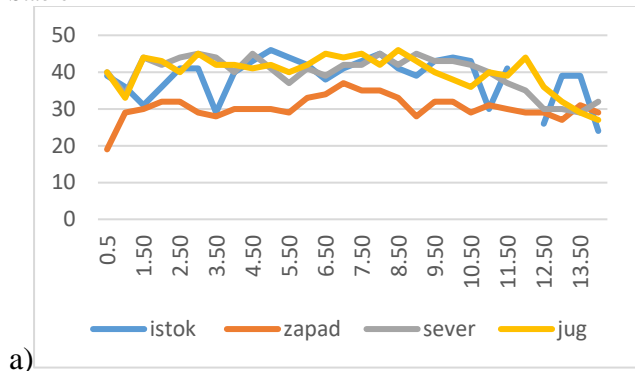
Prilog 16 - Grafici - stabla 1,2 i 3 pritisna čvrstoća izvrtka u kardinalnim pravcima za: a-donji trupčić, b- gornji trupčić Debeli lug

Tabela - Čvrstoća na pritisak izvrtka paralelno sa vlaknima kod drveta crvenog hrasta na lokalitetu Debeli lug

Stablo 1



Stablo 2



Stablo 3

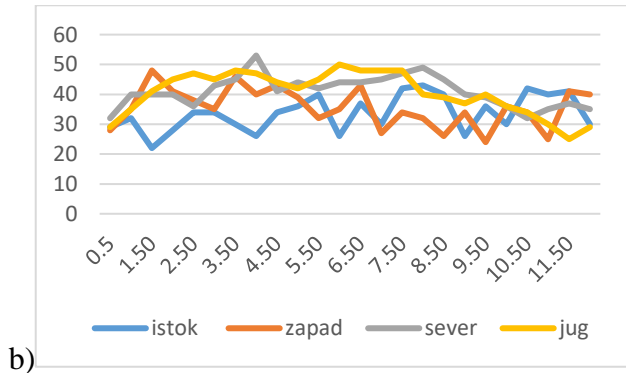
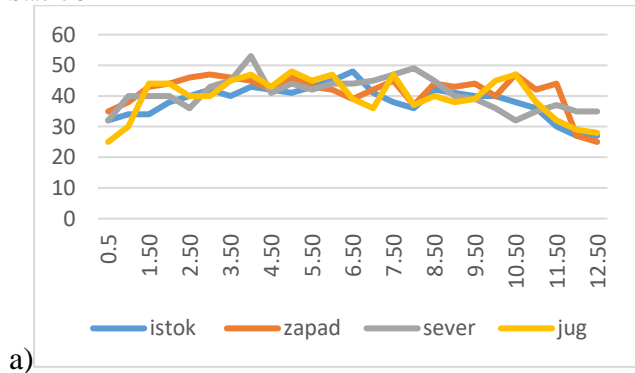


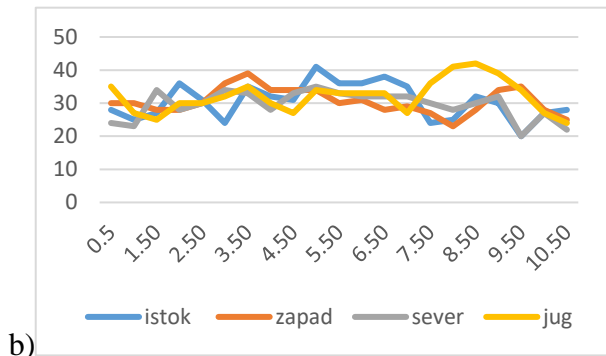
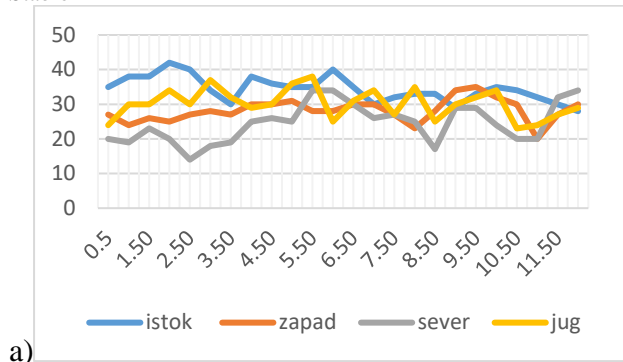
Tabela 19 – Čvrstoća na pritisak izvrtka paralelno sa vlaknima [MPa] kod drveta crvenog hrasta na lokalitetu Debeli lug

Statistički pokazatelj	Kardinalni pravci							
	Istok		Zapad		Sever		Jug	
	Položaj po visini stabla							
	Donji	Gornji	Donji	Gornji	Donji	Gornji	Donji	Gornji
\bar{X}	38,358	34,886	35,519	36,925	39,494	37,788	39,593	39,888
SD	5,620	6,658	6,161	7,342	5,392	6,762	5,796	7,389
CV (%)	14,65	19,08	17,34	19,88	13,65	17,89	14,64	18,52
MIN	24,00	22,00	19,00	13,00	25,00	27,00	25,00	25,00
MAX	48,00	45,00	47,00	48,00	53,00	53,00	50,00	50,00
opseg	24,00	23,00	28,00	35,00	28,00	26,00	25,00	25,00

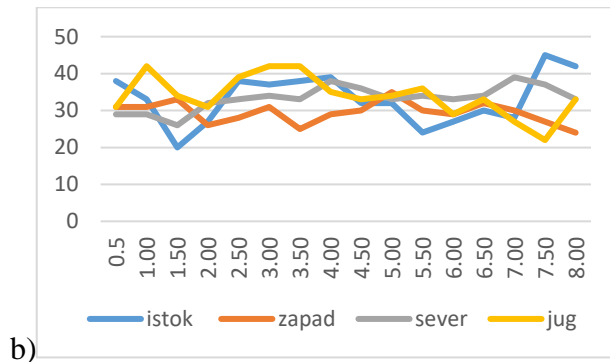
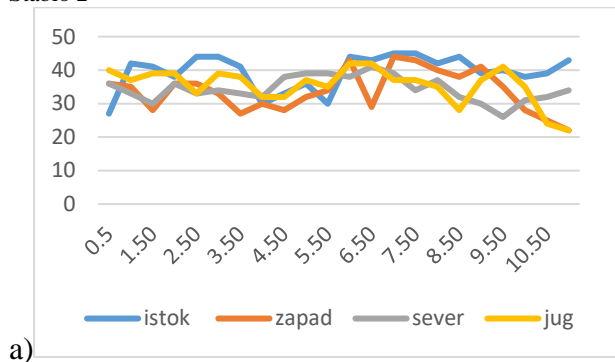
Prilog 17 - Grafici - stabla 1,2 i 3 pritisna čvrstoća izvrtka u kardinalnim pravcima za: a-donji trupčić, b- gornji trupčić Stepin lug

Tabela deskriptivna analiza čvrstoće na pritisak izvrtka paralelno sa vlaknima na lokalitetu Stepin lug po visini stabla

Stablo 1



Stablo 2



Stablo 3

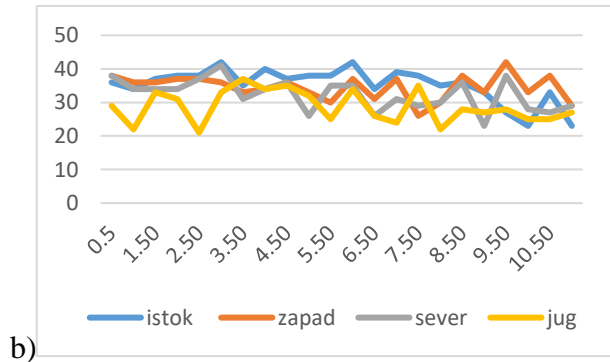
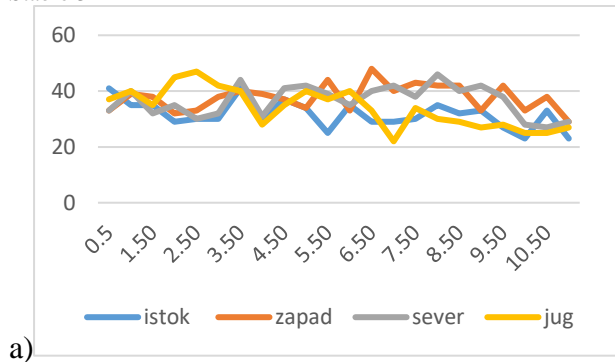


Tabela 20 – deskriptivna analiza čvrstoće na pritisak izvrtka paralelno sa vlaknima [MPa] na lokalitetu Stepin lug po visini stabla

Statistički pokazatelji	Kardinalni pravci							
	Istok		Zapad		Sever		Jug	
	Položaj po visini stabla							
	Donji	Gornji	Donji	Gornji	Donji	Gornji	Donji	Gornji
\bar{X}	35,13	36,00	33,09	32,34	31,63	30,86	33,13	34,00
SD	5,58	5,25	6,22	6,06	7,33	7,13	5,96	5,80
CV (%)	15,89	14,58	18,80	18,75	23,17	23,10	18,00	17,07
MIN	23,00	25,00	20,00	20,00	14,00	14,00	22,00	22,00
MAX	45,00	45,00	48,00	48,00	46,00	44,00	47,00	47,00
opseg	22,00	20,00	28,00	28,00	32,00	30,00	25,00	25,00

Prilog 18

Tabela 21 - srednje vrednosti mehaničkih svojstava uzoraka kroz koje je prošao zvučni talas, srednja vrednost brzine zvuka i opsezi, i boja kojom je obojena zona u kojoj se uzorak nalazio

	Gustina	Hp	MOE	MOR	Dužina vlakana	% kasne zone	Opseg brzina	Zaokreženi opseg brzina	Zaokružena Vsr	Boja
BŠ1D	0.697	58.65	8843.34	112.24	0,910	53,41	1810 - 2645	1800 - 2600	2200	žuta
	0.698	60.85	8198.98	122.79	0,973	56,12	2030 - 2610	2000 - 2600	2300	crvena
BŠ1G	0.730	55.57	11094.89	129.31	0,938	70,90	2645 - 3480	2600 - 3500	3050	zelena
BŠ2D	0.712	58.96	10104.97	126.58	0,945	60,01	2788 - 3240	2800 - 3200	3000	zelena
	0.717	57.70	9300.14	104.54	0,829	48,83	2795 - 3610	2800 - 3600	2200	zelena
BŠ2G	0.743	57.65	10089.19	128.42	1,044	65,89	2832 - 3700	2800 - 3700	3250	zelena
BŠ3D	0.717	53.41	11125.48	135.84	1,213	66,05	3110 - 3750	3100 - 3750	3400	zelena
	0.743	54.65	11089.19	135.42	1,117	64,06	2832 - 3700	2800 - 3700	3250	zelena
BŠ3G	0.768	64.29	12504.48	126.35	1,259	71,37	3190 - 3770	3200 - 3800	3500	zelena
	0.718	64.57	10128.47	126.45	1,094	54,62	1965 - 2832	2000 - 2800	2400	žuta
	0.715	58.25	8778.90	122.56	1,144	65,47	1980 - 2795	2000 - 2800	2400	žuta
DL1D	0.71	64.36	10127.06	122.47	1,015	68,68	1105 - 1950	1100 - 2000	1550	crvena
	0.674	63.2	8577.5	113.22	1,326	61,73	1235 - 1560	1200 - 1600	1400	crvena
DL1G	0.692	52.3	8656.63	116.54	0,987	60,44	1692 - 2210	1700 - 2200	1950	zelena
DL2D	0.701	64.61	10595.59	128.56	1,224	57,88	1885 - 2210	1900 - 2200	2050	zelena
	0.697	58.45	11060.3	126.17	1,097	59,24	1875 - 2360	1900 - 2400	2150	zelena
DL2G	0.765	60.94	11731.19	125.05	1,285	70,77	2345 - 3110	2300 - 3100	2700	zelena
DL3D	0.705	53.79	11501.54	125.73	1,392	58,12	2525 - 3260	2500 - 3300	2900	zelena
	0.719	55.49	11624.58	138.91	1,304	78,29	2795 - 3640	2800 - 3600	3200	zelena
DL3G	0.688	57.17	8690.57	123,96 7	1,056	64,71	1175 - 1692	1200 - 1700	1450	žuta
	0.697	64.52	9415.52	125.28	1,288	79,78	1390 - 1875	1400 - 1900	1650	žuta
	0.711	65.03	10955.93	125.79	1,493	64,73	1560 - 1885	1600 - 1900	1750	žuta
SL1D	0.682	56.39	9487.54	124.7	1,157	60,49	1757 - 2445	1800 - 2400	2100	crvena
	0.674	54.13	9074.49	112,63	1,114	52,75	1070 - 1757	1000 - 1800	1400	ljubičasta
SL1G	0.714	59.1	10537.25	128.54	0,966	51,32	1590 - 1990	1600 - 2000	1800	zelena
SL2D	0.67	53.78	10726.1	119.55	0,828	55,88	1665 - 2130	1700 - 2100	1900	zelena
	0.693	56.88	9824.64	128.42	0,889	57,05	1915 - 2292	1900 - 2300	2100	zelena
SL2G	0.709	63.61	10248.72	128.14	1,054	60,49	2155 - 2580	2200 - 2600	2400	zelena
SL3D	0.712	60.52	10951.85	126.83	1,233	70,04	2550 - 3000	2600 - 3000	2800	zelena
	0.734	61.99	11063.98	132.4	1,221	68,69	3132 - 3820	3100 - 3800	3450	zelena
SL3G	0.695	55.28	10422.23	118,98	0,945	57,30	1190 - 1590	1200 - 1600	1400	žuta
	0.703	62.77	8332.06	121.56	1,099	59,06	1730 - 2155	1700 - 2200	1950	žuta
	0.704	61.9	11363.05	126.22	0,908	73,75	2292 - 2670	2300 - 2700	2500	žuta

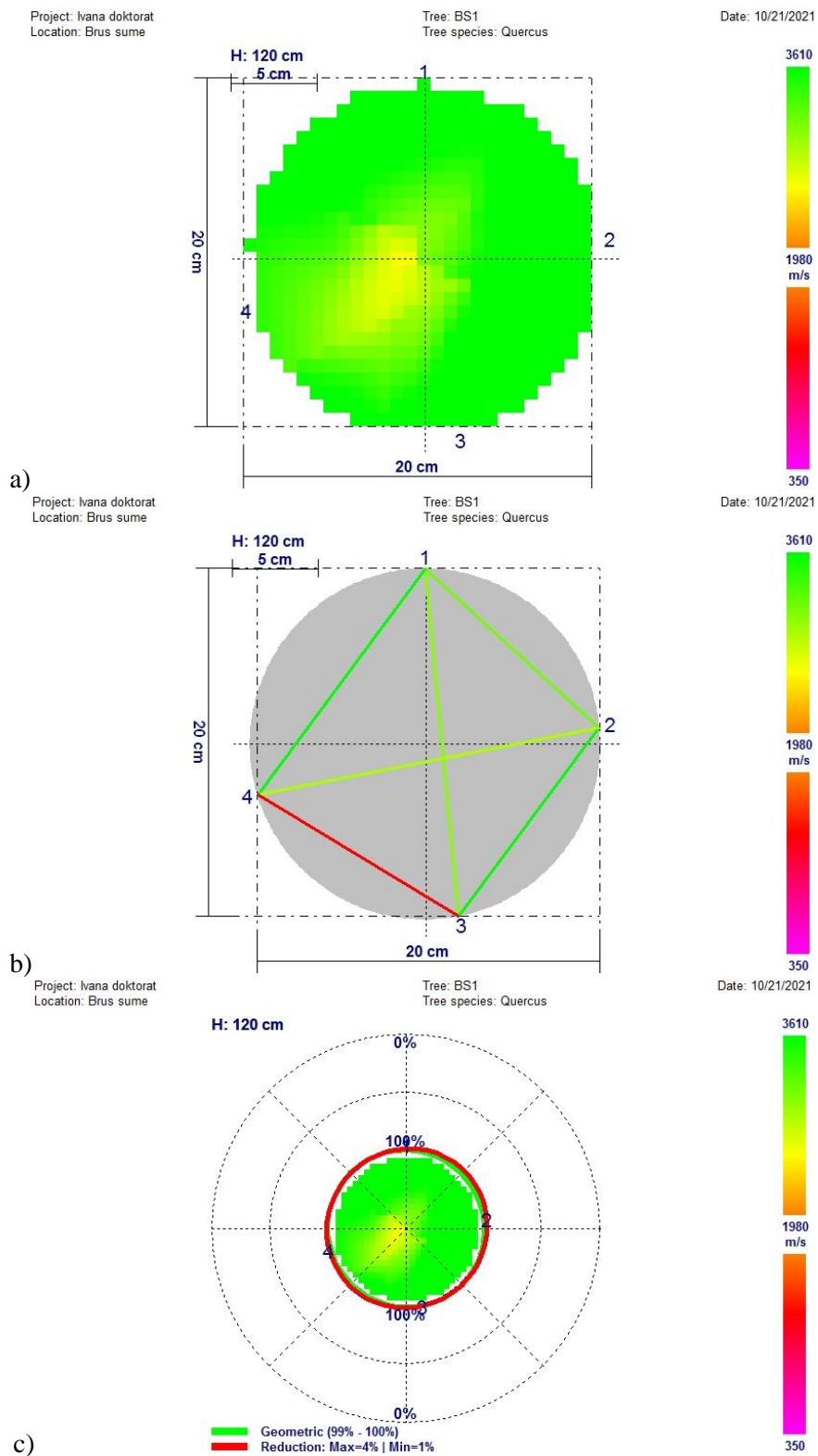
Prilog 19 – srednjevrednosti anatomskih i mehaničkih svojstava i srednje brzine zvuka složene u opsege

	Gustina [g/mm ³]]	Hp [MPa]]	MOE [MPa]	MOR [MPa]	Opseg brzina [m/s]	Dužina vlakana [mm]	Učeešće kasne zone [%]	Zaokružen opseg brzina [m/s]	Vsr [m/s]]	Boja
1.	0.674	63.2	8577.5	113.2 2	1235 - 1560	1.326	61.73	1200 - 1600	1400	crvena
2.	0.674	54.13	9074.49	112,6 3	1070 – 1757	1.114	52.75	1000 – 1800	1400	ljubičasta
3.	0.695	55.28	10422.23	118,9 8	1190 - 1590	0.945	57.30	1200 - 1600	1400	žuta
4.	0.688	57.17	8690.57	123,9 67	1175 - 1692	1.056	64.71	1200 – 1700	1450	žuta
5.	0.71	64.36	10127.06	122.4 7	1105 - 1950	1.015	68.68	1100 - 2000	1550	crvena
6.	0.697	64.52	9415.52	125.2 8	1390 - 1875	1.288	79.78	1400 – 1900	1650	žuta
7.	0.711	65.03	10955.93	125.7 9	1560 - 1885	1.493	64.73	1600 – 1900	1750	žuta
8.	0.714	59.1	10537.25	128.5 4	1590 - 1990	0.966	51.32	1600 - 2000	1800	zelena
9.	0.67	53.78	10726.1	119.5 5	1665 - 2130	0.828	55.88	1700 - 2100	1900	zelena
10.	0.692	52.3	8656.63	116.5 4	1692 - 2210	0.987	60.44	1700 - 2200	1950	zelena
11.	0.695	52.46	11343.68	115.9 9	1580 - 2345	0.814	59.99	1600 – 2300	1950	žuta
12.	0.703	62.77	8332.06	121.5 6	1730 - 2155	1.099	59.06	1700 - 2200	1950	žuta
13.	0.701	64.61	10595.59	128.5 6	1885 - 2210	1.224	57.88	1900 - 2200	2050	zelena
14.	0.682	56.39	9487.54	124.7	1757 – 2445	1.157	60.49	1800 – 2400	2100	crvena
15.	0.693	56.88	9824.64	128.4 2	1915 - 2292	0.889	57.05	1900 - 2300	2100	zelena
16.	0.697	58.45	11060.3	126.1 7	1875 - 2360	1.097	59.24	1900 - 2400	2150	zelena
17.	0.696	60.12	10090.75	119.6 5	1790 - 2525	1.322	55.56	1800 - 2500	2150	žuta
18.	0.687	61.70	10300.14	124.5 4	2795 – 3610	0.829	48.83	2800 – 3600	2200	zelena
19.	0.697	58.65	8843.34	112.2 4	1810 - 2645	0.910	53.41	1800 - 2600	2200	žuta
20.	0.698	60.85	8198.98	122.7 9	2030 – 2610	0.973	56.12	2000 – 2600	2300	crvena
21.	0.709	63.61	10248.72	128.1 4	2155 -2580	1.054	60.49	2200 - 2600	2400	zelena
22.	0.718	64.57	10128.47	126.4 5	1965 - 2832	1.094	54.62	2000 - 2800	2400	žuta
23.	0.715	58.25	8778.90	122.5 6	1980 – 2795	1.144	65.47	2000 – 2800	2400	žuta
24.	0.714	62.21	10703.61	124.1 5	1950 - 2795	1.232	73.74	2000 - 2800	2400	žuta
25.	0.704	61.9	11363.05	126.2 2	2292 – 2670	0.908	73.75	2300 - 2700	2500	žuta
26.	0.765	60.94	11731.19	125.0 5	2345 - 3110	1.285	70.77	2300 - 3100	2700	zelena
27.	0.712	62.96	12636.36	127.6 3	2445 - 3132	1.123	64.10	2400 – 3100	2750	žuta

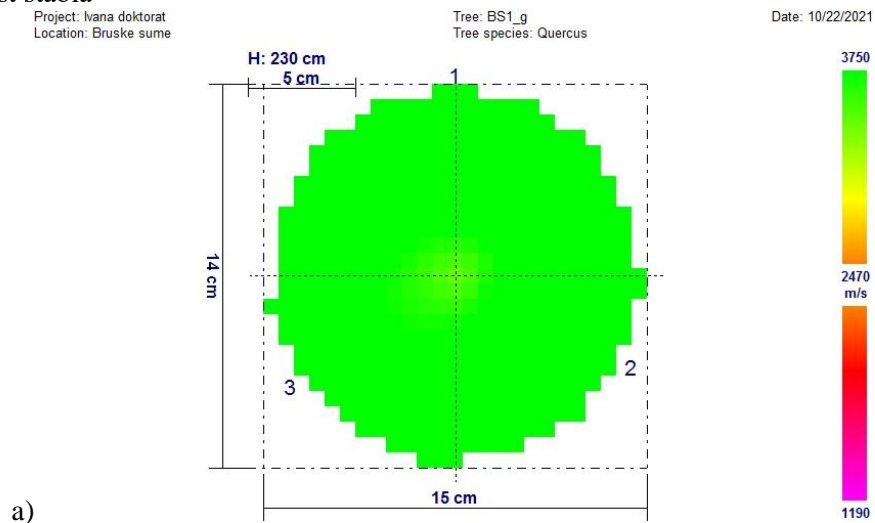
28 .	0.712	60.52	10951.85	126.8 3	2550 - 3000	1.233	70.04	2600 - 3000	2800	zelena
29 .	0.705	53.79	11501.54	125.7 3	2525 - 3260	1.392	58.12	2500 - 3300	2900	zelena
30 .	0.702	52.90	11519.81	124.6 4	2610 - 3190	0.955	65.18	2600 - 3200	2900	žuta
31 .	0.712	58.96	10104.97	126.5 8	2788 - 3240	0.945	60.01	2800 - 3200	3000	zelena
32 .	0.730	55.57	11094.89	129.3 1	2645 - 3480	0.938	70.90	2600 - 3500	3050	zelena
33 .	0.719	55.49	11624.58	138.9 1	2795 - 3640	1.304	78.29	2800 - 3600	3200	zelena
34 .	0.743	54.65	11089.19	135.4 2	2832 - 3700	1.117	64.06	2800 - 3700	3250	zelena
35 .	0.717	53.41	11125.48	135.8 4	3110 - 3750	1.213	66.05	3100 - 3750	3400	zelena
36 .	0.734	61.99	11063.98	132.4	3132 - 3820	1.221	68.69	3100 - 3800	3450	zelena
37 .	0.768	64.29	12504.48	126.3 5	3190 - 3770	1.259	71.37	3200 - 3800	3500	zelena

Prilog 20 – tomografski snimci – tomogrami, svih stabala

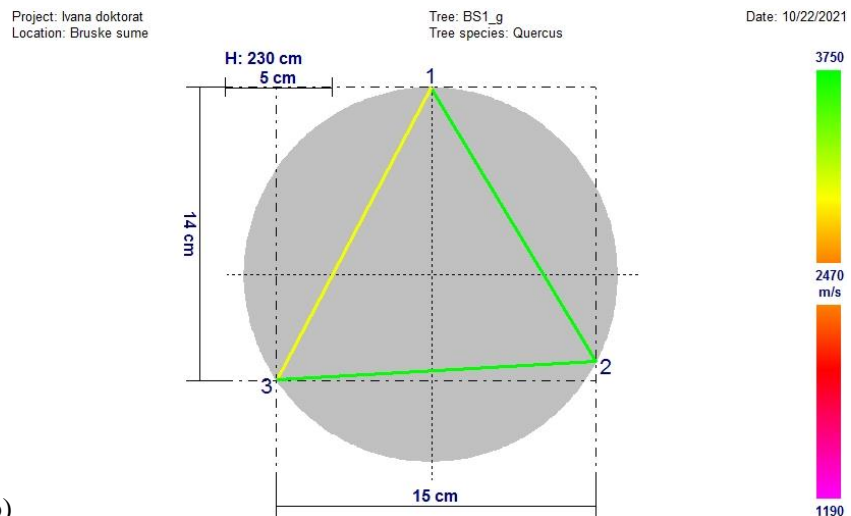
Bruske šume – stablo 1 – donji trupčić – a) raspored brzina po preseku, b) brzine između pojedinačnih senzora, c) statička stabilnost stabla



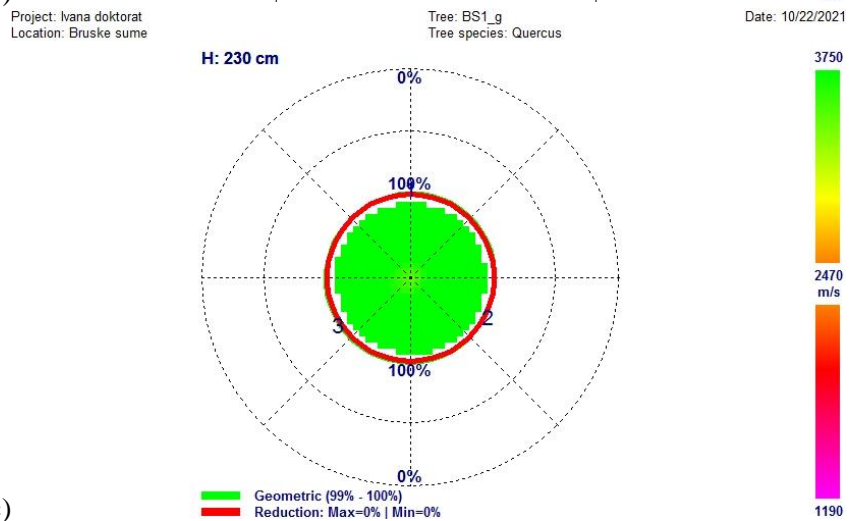
Bruske šume – stablo 1 – gornji trupčić – a) raspored brzina po preseku, b) brzine između pojedinačnih senzora, c) statička stabilnost stabla



a)

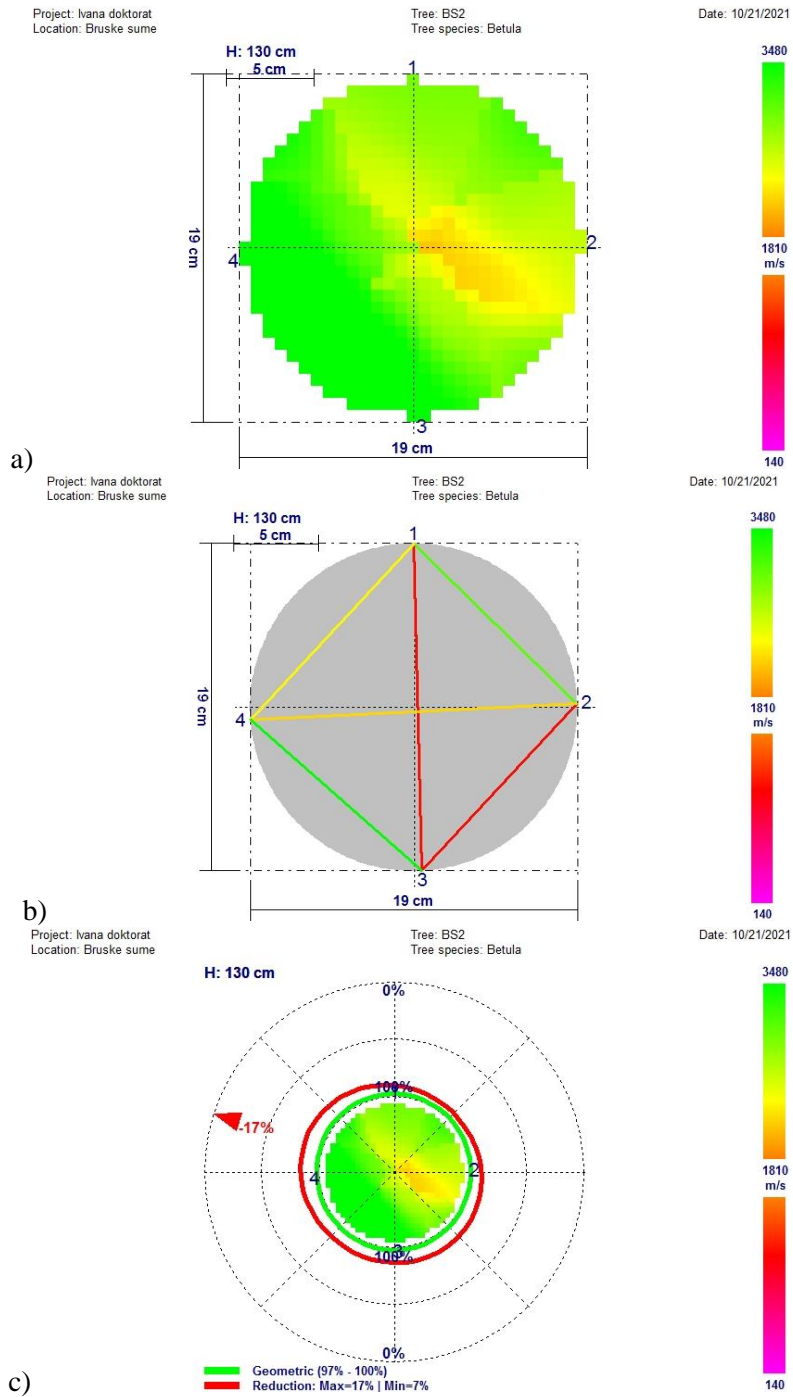


b)

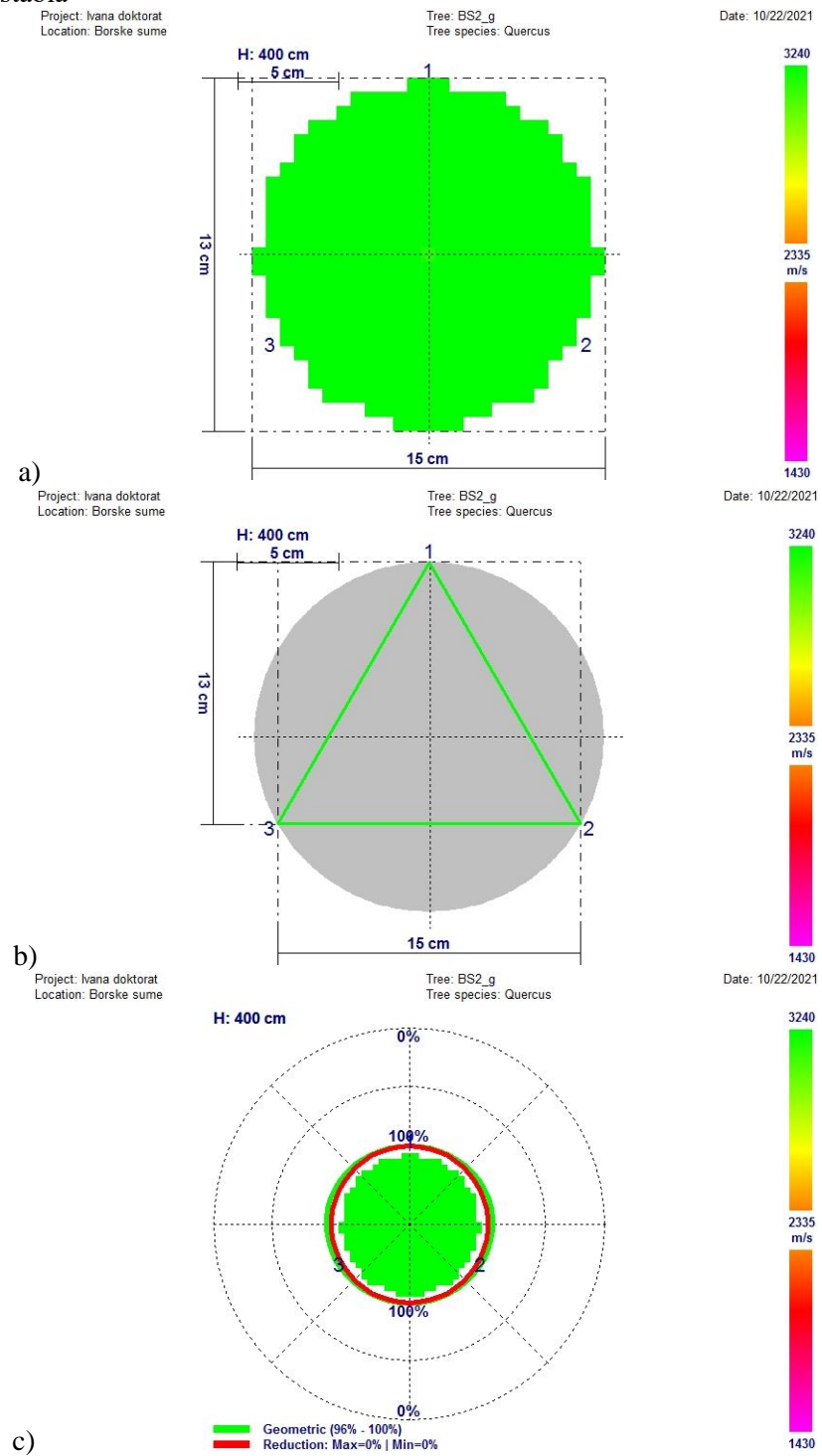


c)

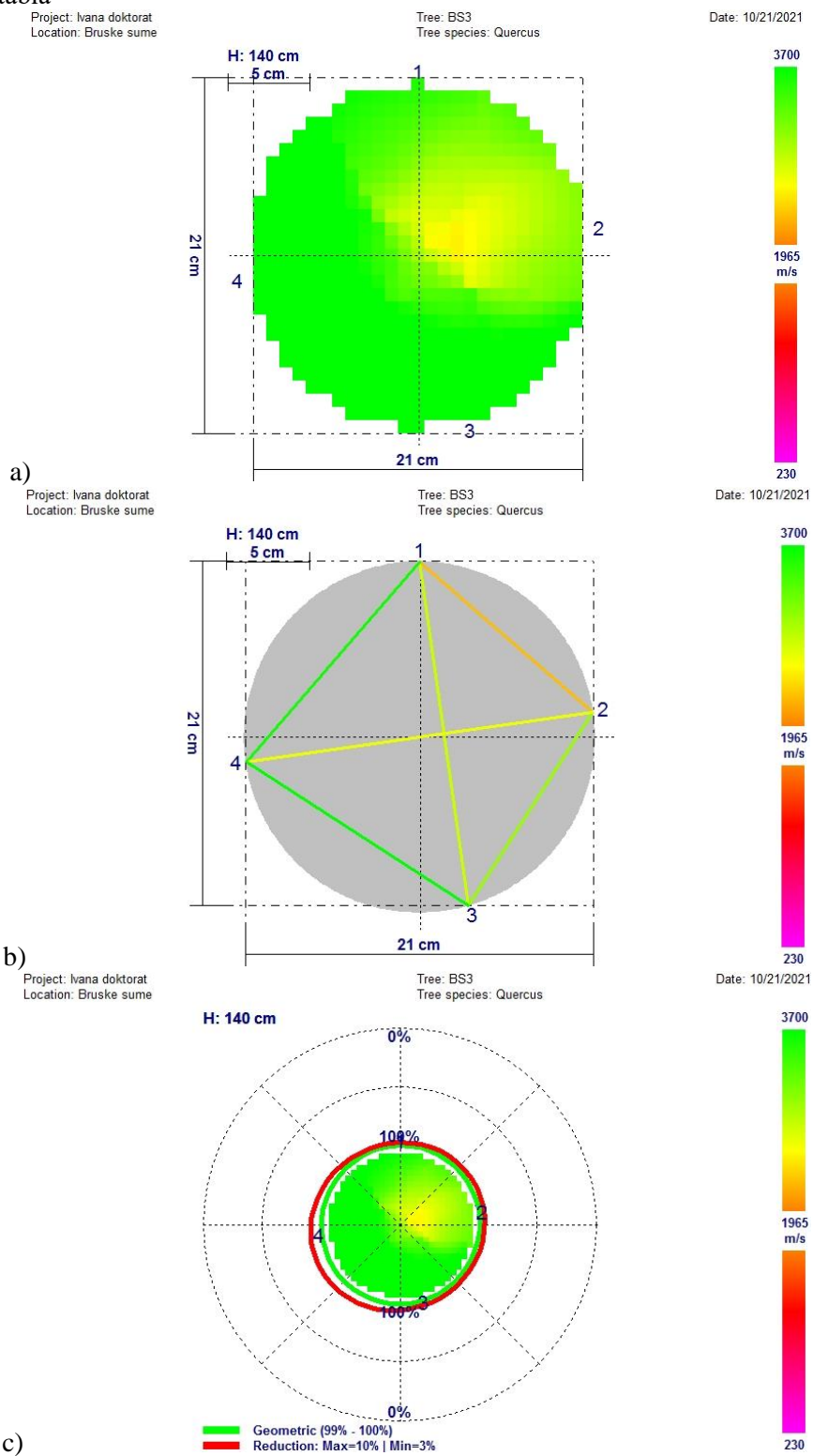
Bruske šume – stablo 2 – donji trupčić – a) raspored brzina po preseku, b) brzine između pojedinačnih senzora, c) statička stabilnost stabla



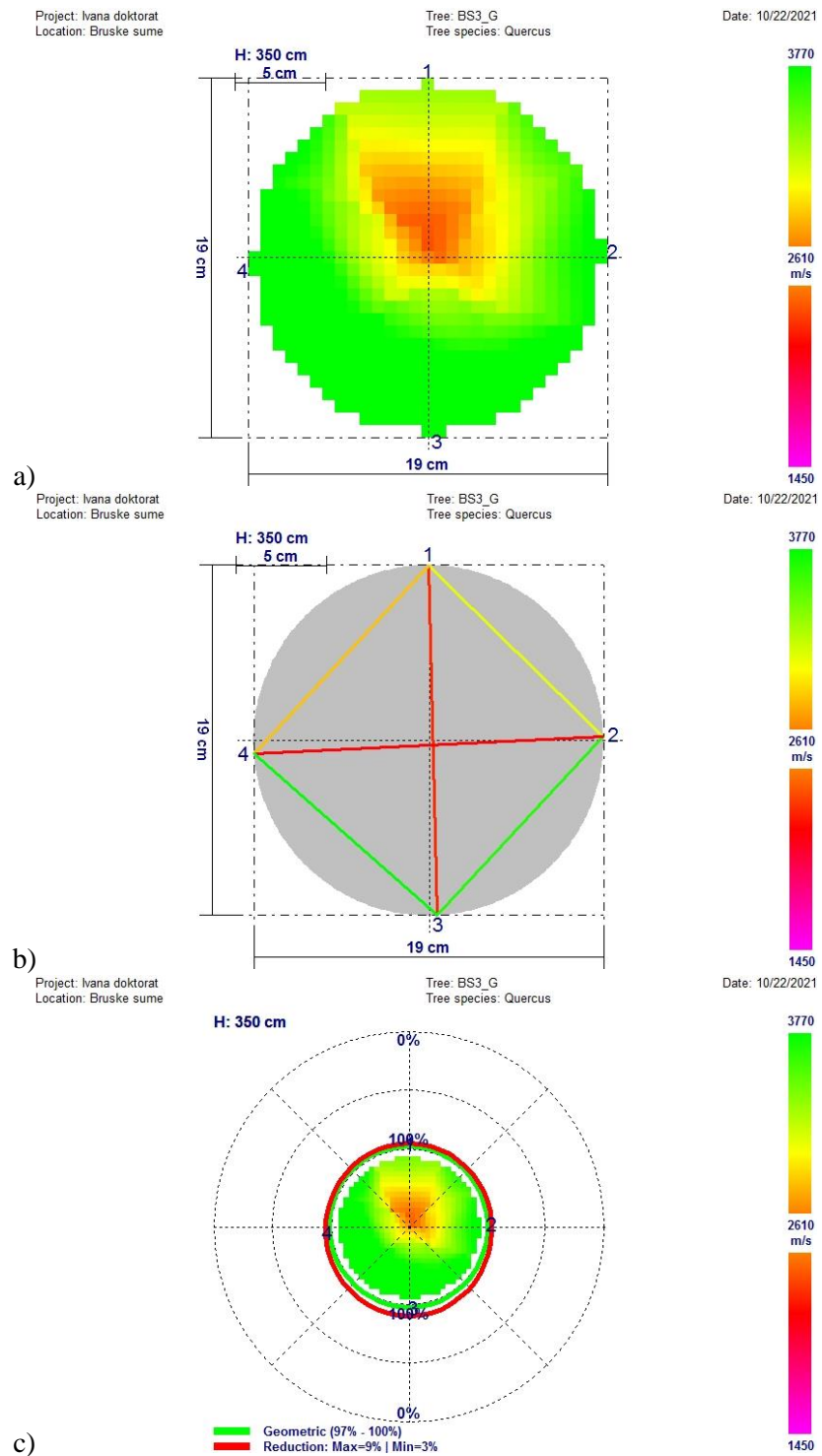
Bruske šume – stablo 2 – gornji trupčić – a) raspored brzina po preseku, b) brzine između pojedinačnih senzora, c) statička stabilnost stabla



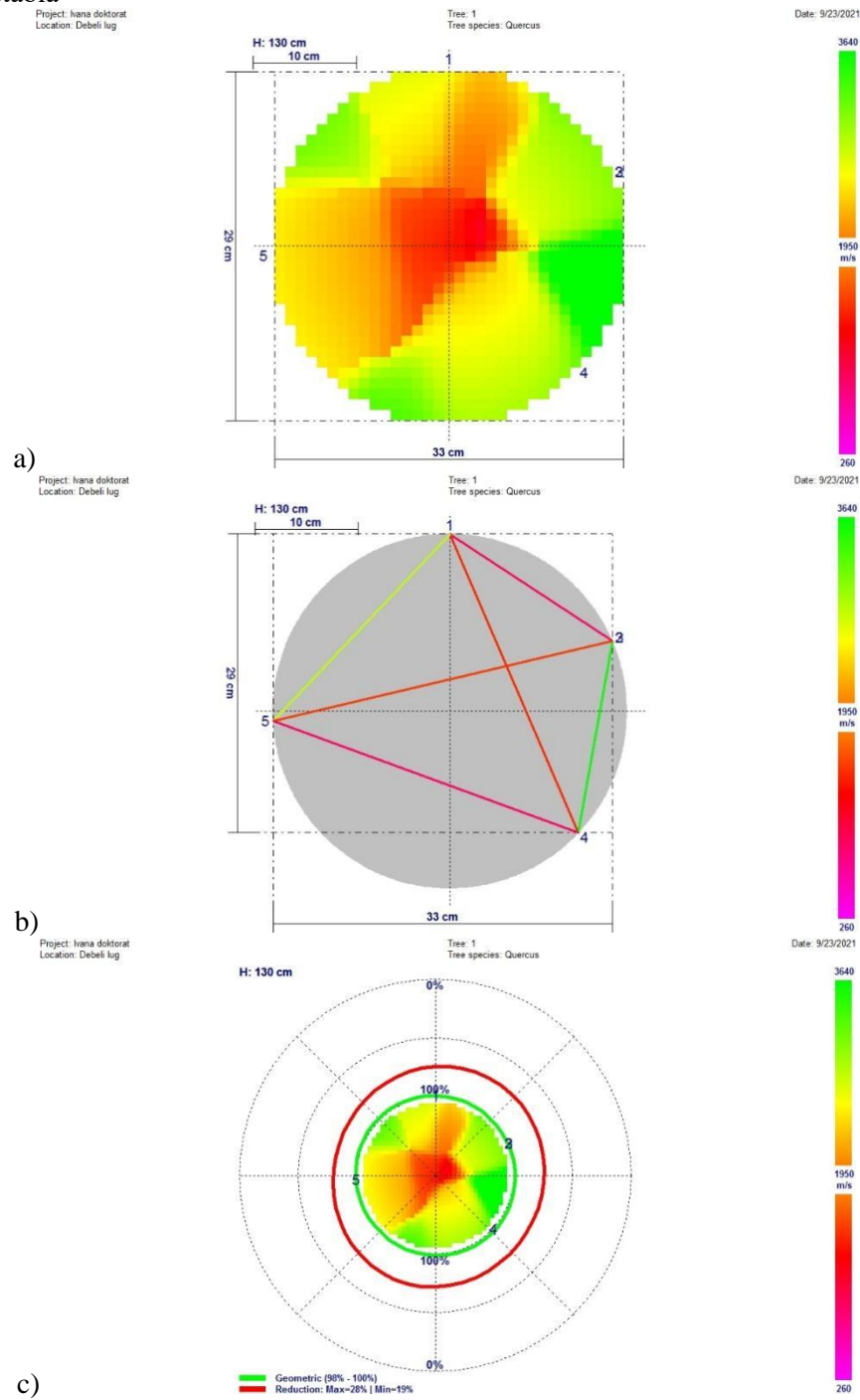
Bruske šume – stablo 3 – donji trupčić – a) raspored brzina po preseku, b) brzine između pojedinačnih senzora, c) statička stabilnost stabla



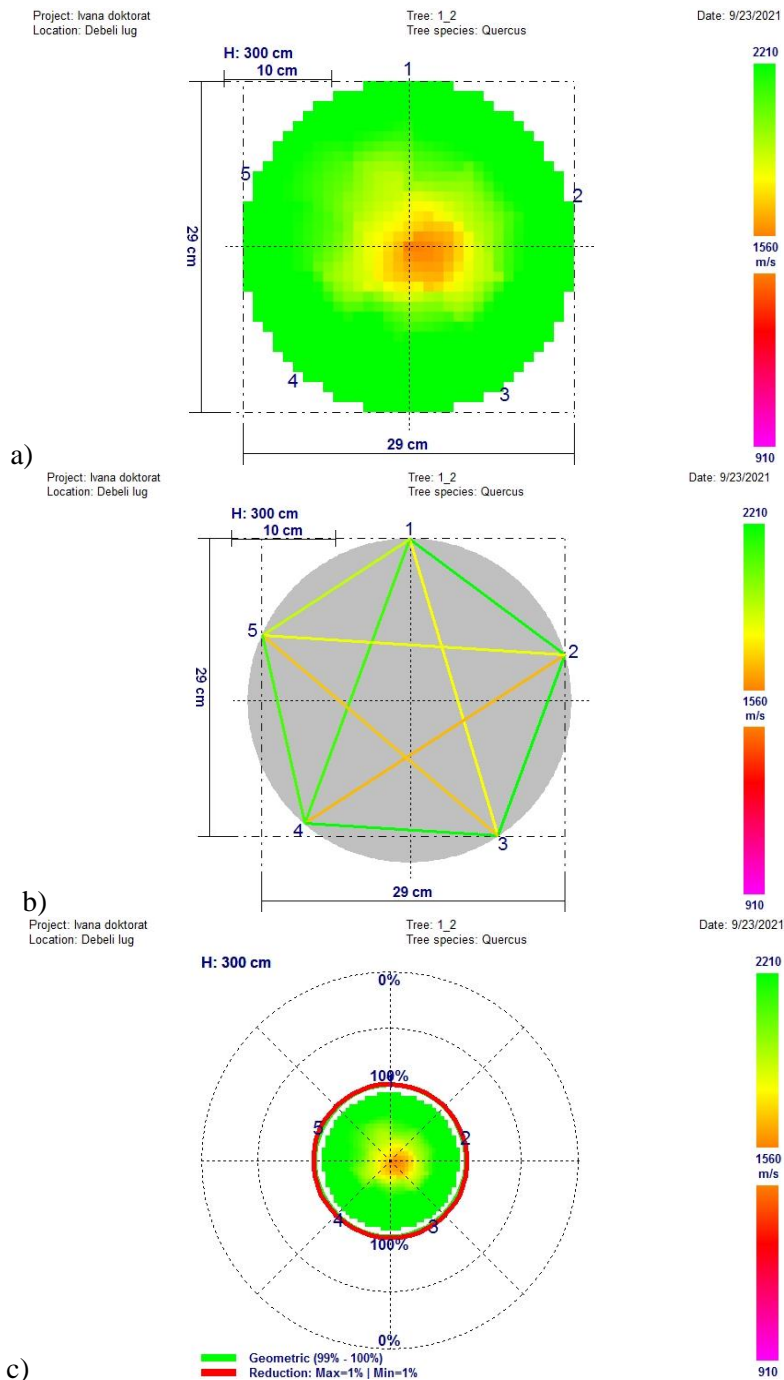
Bruske šume – stablo 3 – gornji trupčić – a) raspored brzina po preseku, b) brzine između pojedinačnih senzora, c) statička stabilnost stabla



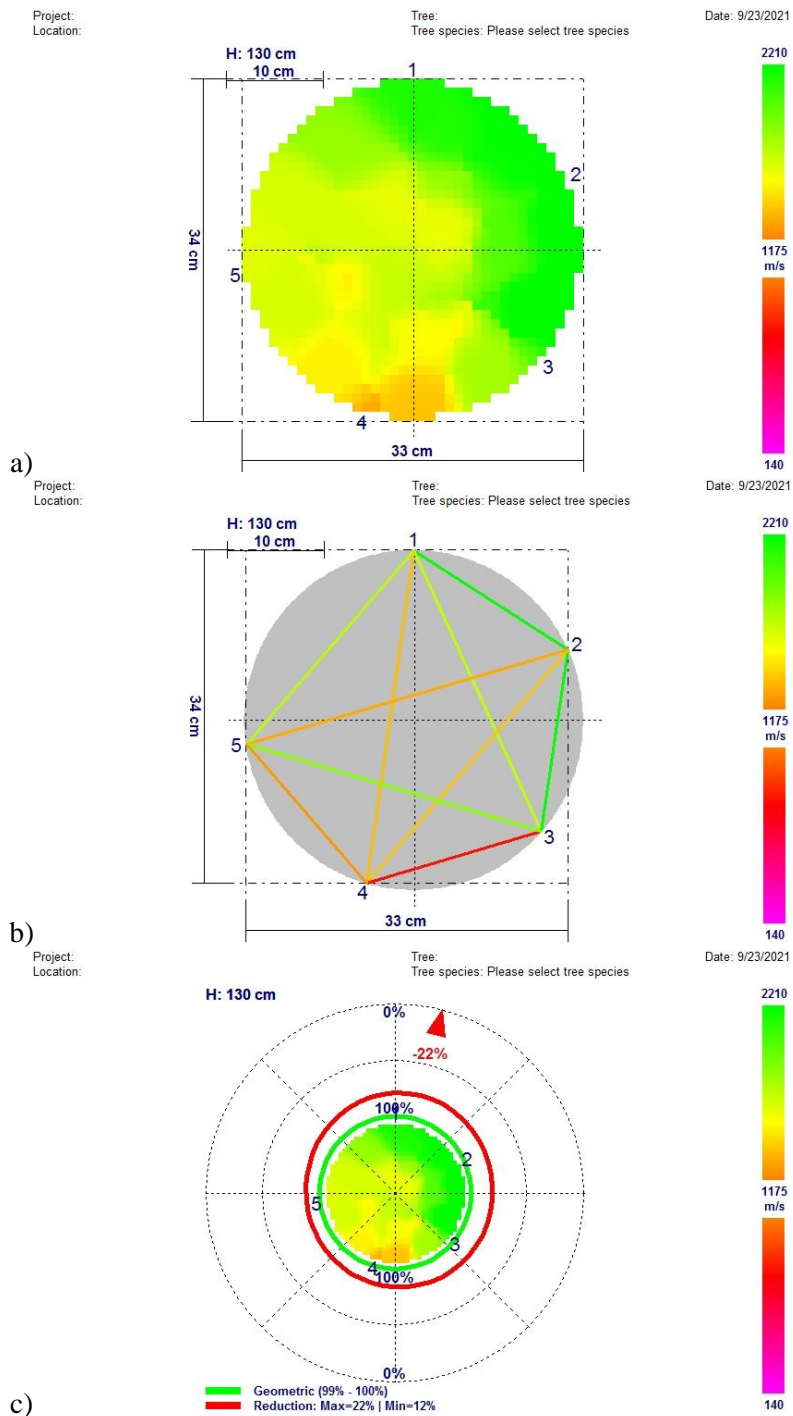
Debeli lug – stablo 1 – donji trupčić – a) raspored brzina po preseku, b) brzine između pojedinačnih senzora, c) statička stabilnost stabla



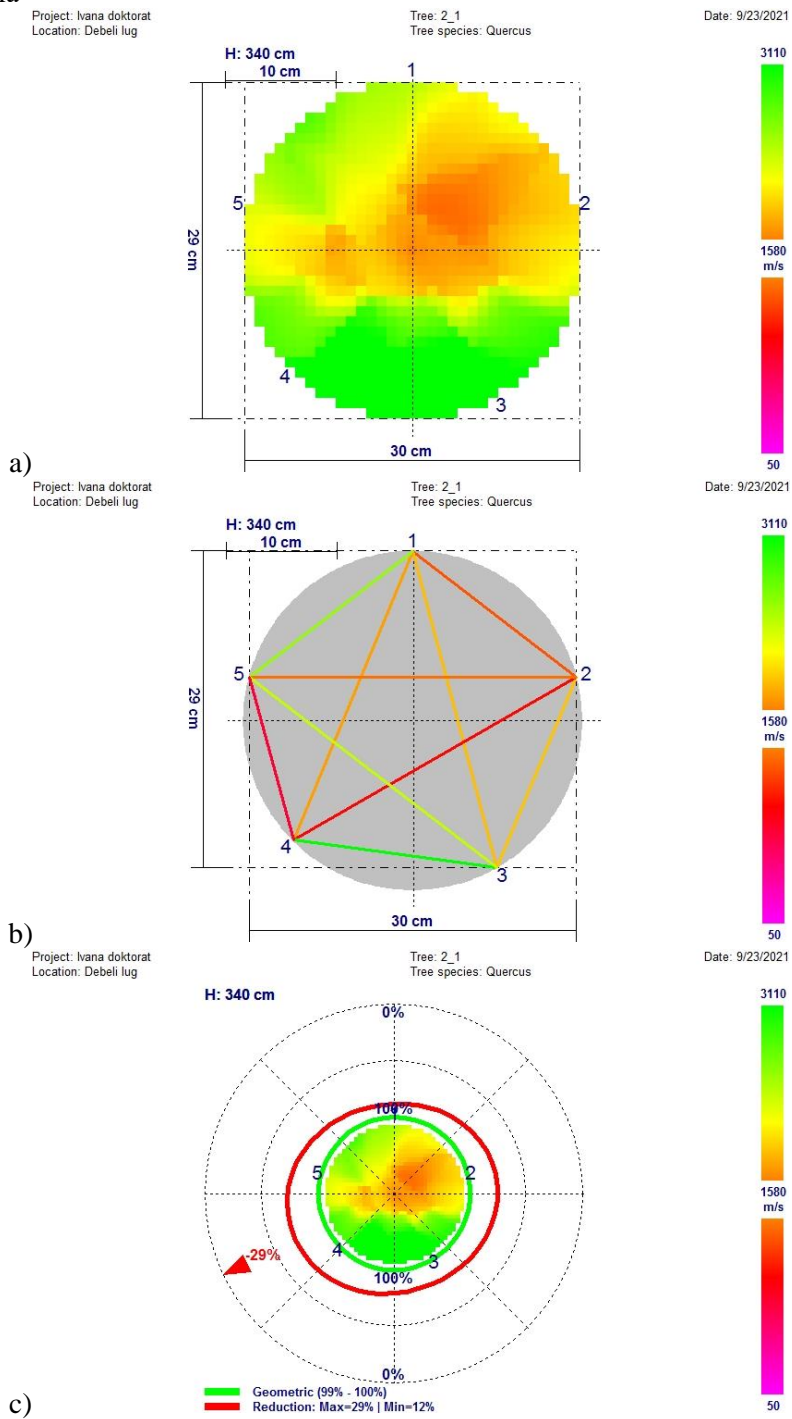
Debeli lug – stablo 1 – gornji trupčić – a) raspored brzina po preseku, b) brzine između pojedinačnih senzora, c) statička stabilnost stabla



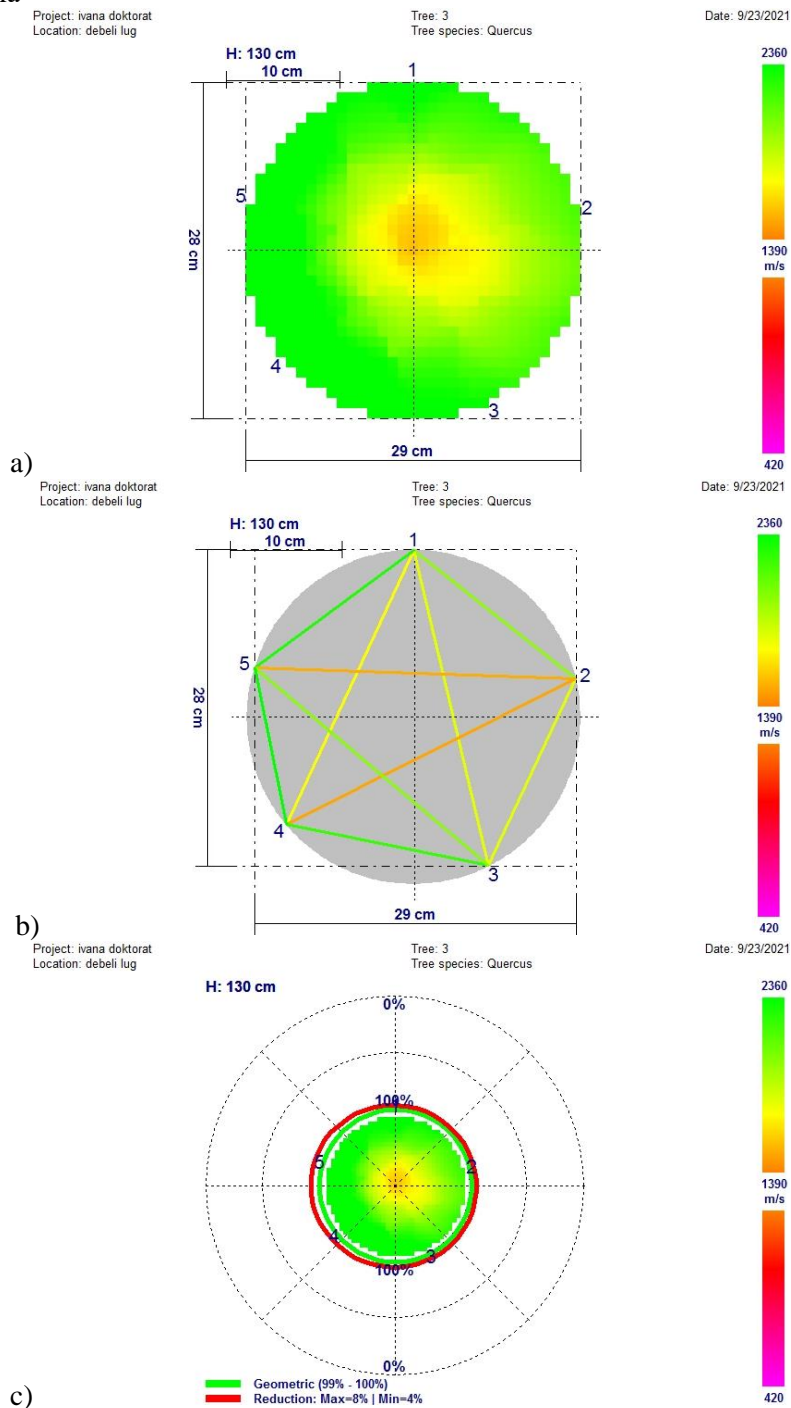
Debeli lug – stablo 2 – donji trupčić – a) raspored brzina po preseku, b) brzine između pojedinačnih senzora, c) statička stabilnost stabla



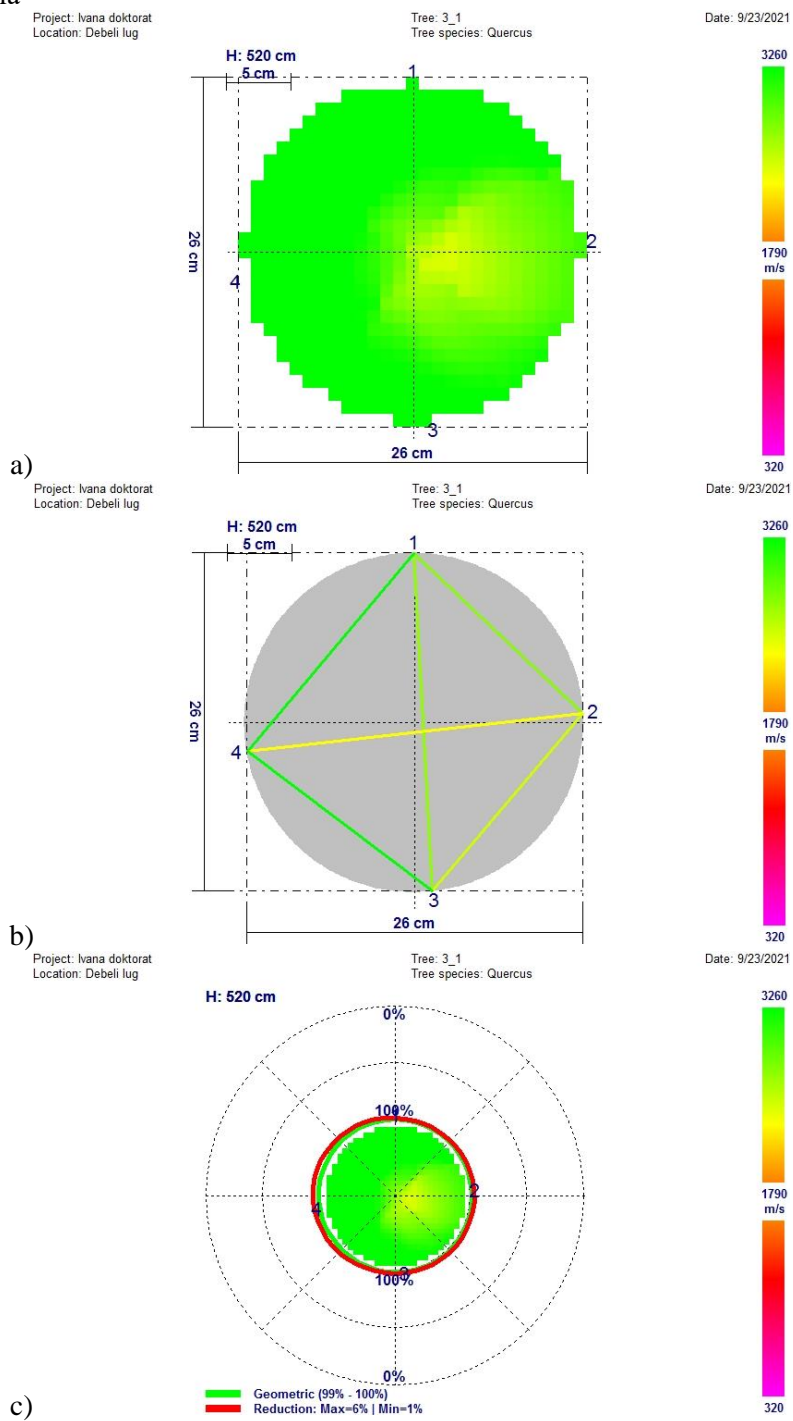
Debeli lug – stablo 2 – gornji trupčić – a) raspored brzina po preseku, b) brzine između pojedinačnih senzora, c) statička stabilnost stabla



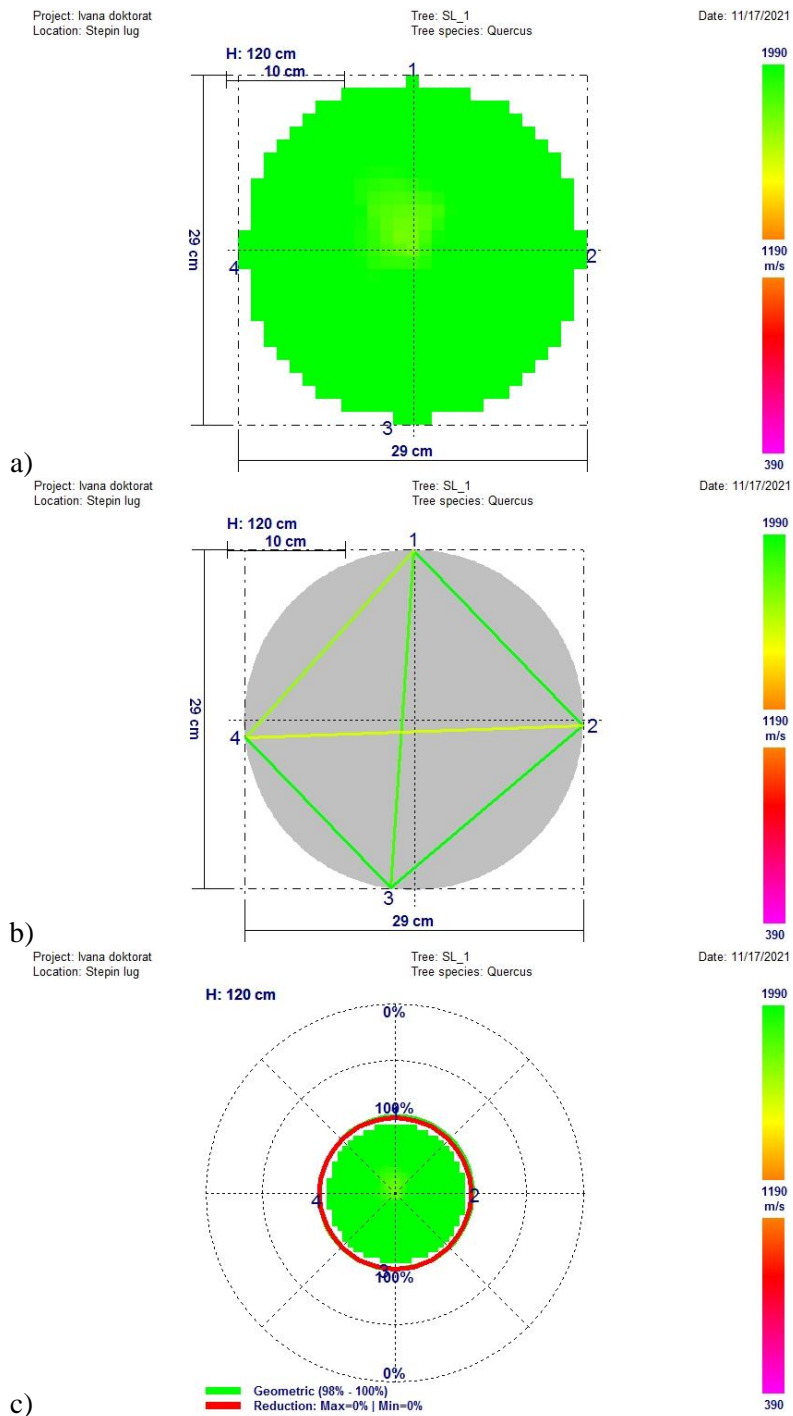
Debeli lug – stablo 3 – donji trupčić – a) raspored brzina po preseku, b) brzine između pojedinačnih senzora, c) statička stabilnost stabla



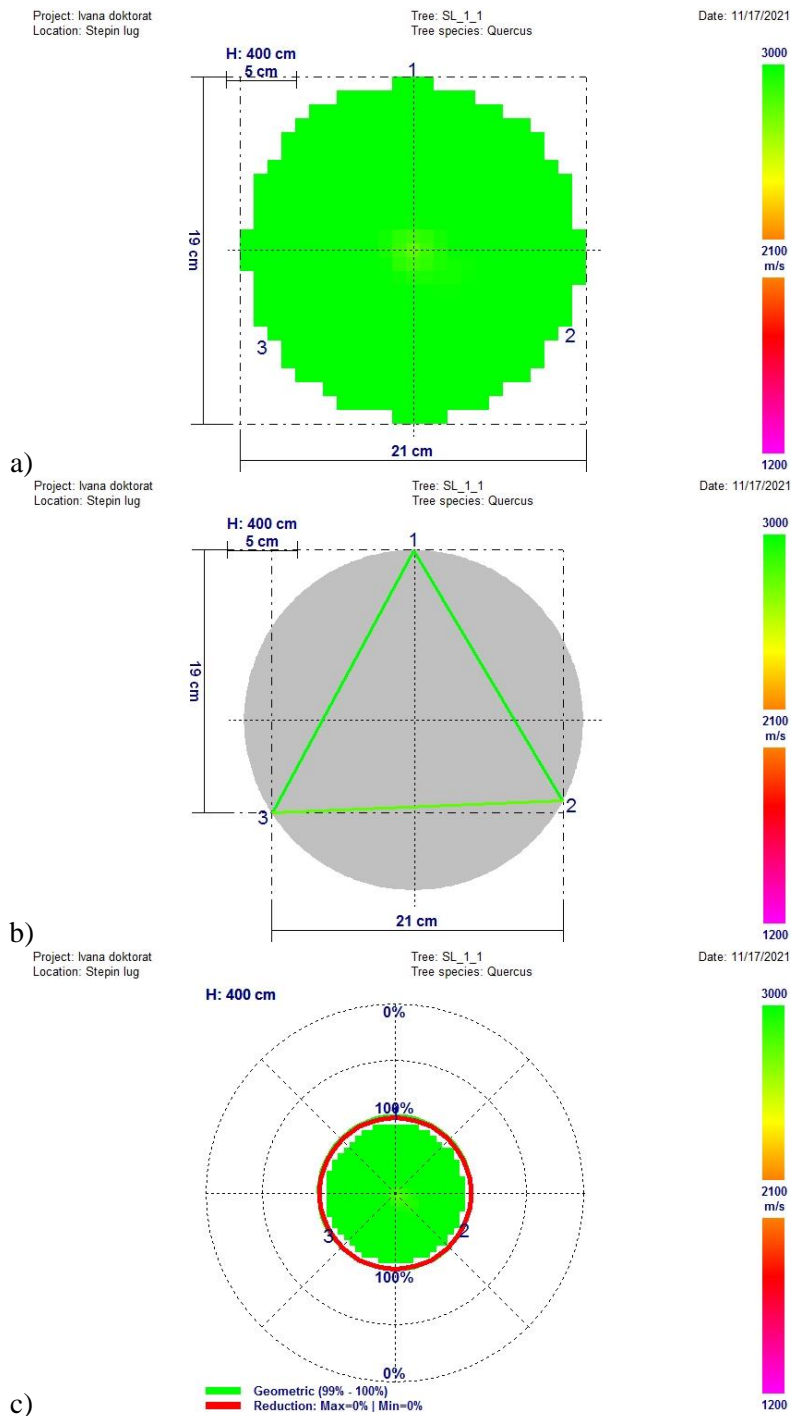
Debeli lug – stablo 3 – gornji trupčić – a) raspored brzina po preseku, b) brzine između pojedinačnih senzora, c) statička stabilnost stabla



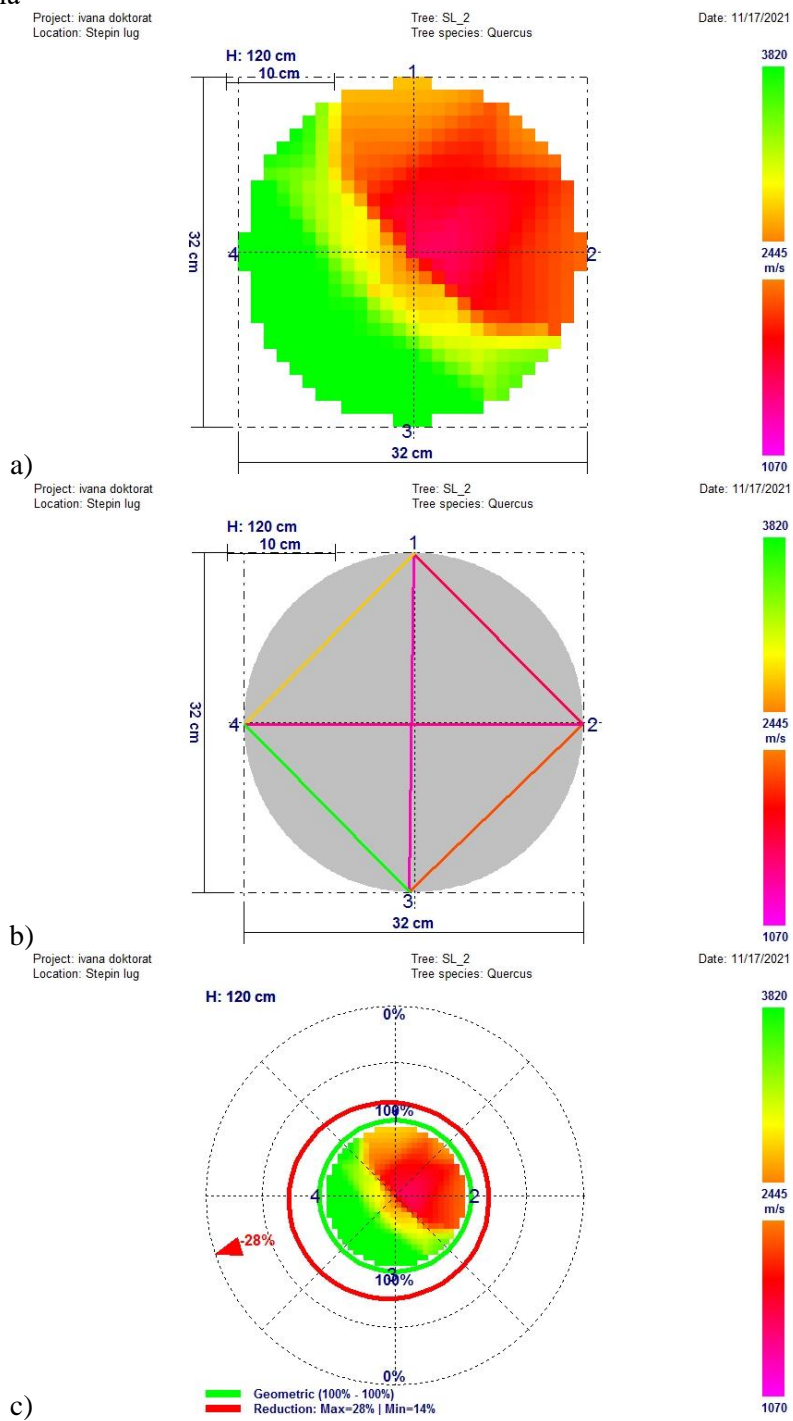
Stepin lug – stablo 1 – donji trupčić – a) raspored brzina po preseku, b) brzine između pojedinačnih senzora, c) statička stabilnost stabla



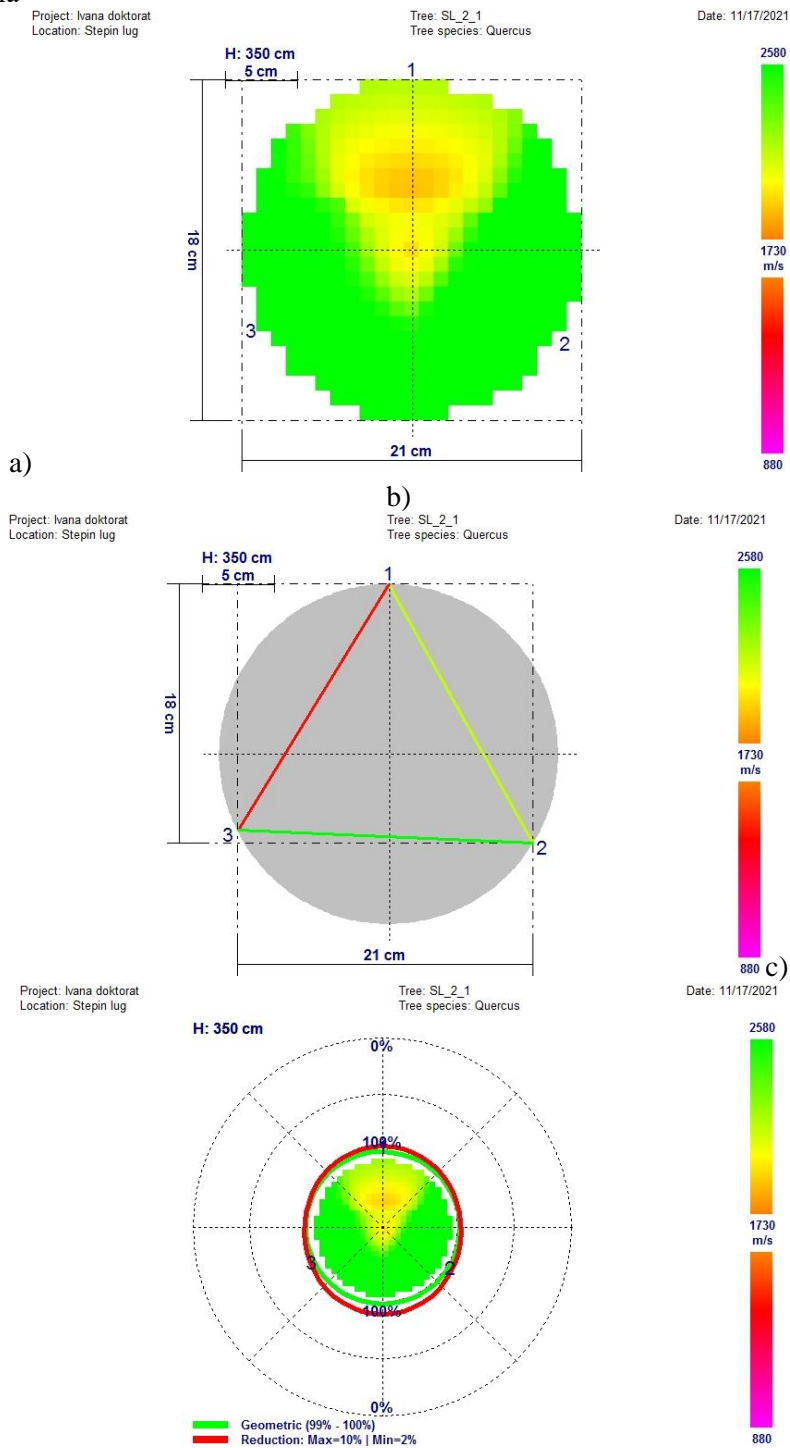
Stepin lug – stablo 1 – gornji trupčić – a) raspored brzina po preseku, b) brzine između pojedinačnih senzora, c) statička stabilnost stabla



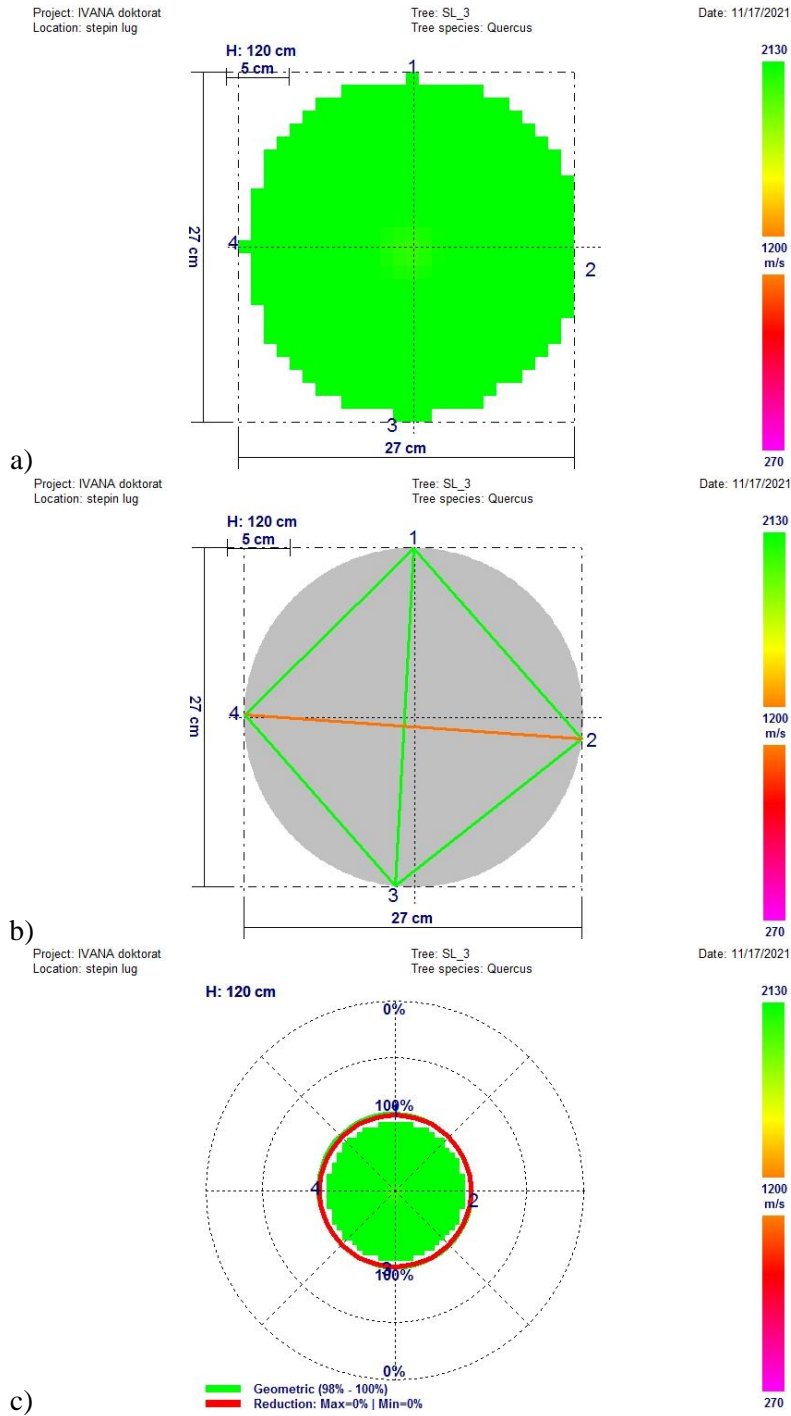
Stepin lug – stablo 2 – donji trupčić – a) raspored brzina po preseku, b) brzine između pojedinačnih senzora, c) statička stabilnost stabla



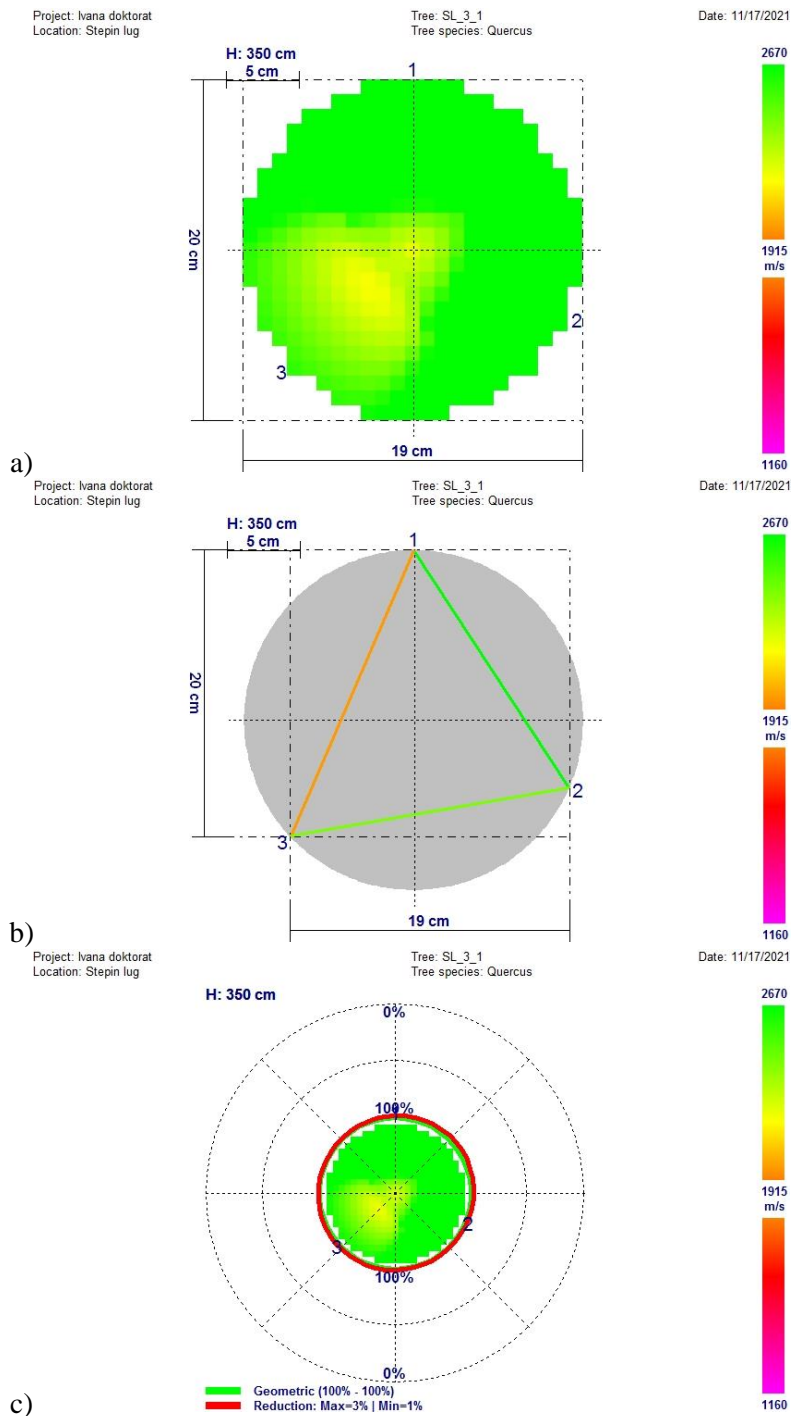
Stepin lug – stablo 2 – gornji trupčić – a) raspored brzina po preseku, b) brzine između pojedinačnih senzora, c) statička stabilnost stabla



Stepin lug – stablo 3 – donji trupčić – a) raspored brzina po preseku, b) brzine između pojedinačnih senzora, c) statička stabilnost stabla



Stepin lug – stablo 3 – gornji trupčić – a) raspored brzina po preseku, b) brzine između pojedinačnih senzora, c) statička stabilnost stabla



11. BIOGRAFIJA AUTORA

Ivana M. Živanović je istraživač na Institutu za šumarstvo u Beogradu, gde se bavi nedestruktivnim metodama analize živih stabala. Rođena je 1977. godine u Beogradu, gde je završila osnovno i srednje obrazovanje, uključujući XIV gimnaziju, prirodni smer.

Nakon što je 2003. godine diplomirala na Šumarskom fakultetu Univerziteta u Beogradu, stekla je višegodišnje iskustvo kao rukovodilac proizvodnje u preradi drveta, što joj je omogućilo praktičan uvid u preradu drveta. Sa tim iskustvom je 2013. godine prešla u nauku, gde se posvetila istraživanjima u oblasti neinvazivne dijagnostike stabala.

Od 2017. godine, aktivno primenjuje svoje istraživačko znanje u praksi, unapređujući metode procene zdravlja stabala i doprinoseći ekološkoj održivosti urbanih prostora.

Doktorske studije je započela 2017. godine pod mentorstvom profesora dr Nebojše Todorovića na odseku primarne prerade drveta, s fokusom na nedestruktivne metode analize drveta. Njeno istraživanje doprinosi razvoju savremenih dijagnostičkih pristupa za procenu kvaliteta drveta u živim stablima, čime se omogućava optimizacija šumskih resursa i smanjenje troškova prerade.

Ivana je autor i koautor 24 naučna rada, uključujući tri publikacije indeksirane na SCI listi, koje doprinose razvoju savremenih dijagnostičkih metoda u analizi kvaliteta drveta i ekološkoj održivosti šumskih ekosistema. Njena istraživanja kombinuju teorijska saznanja i primenu nedestruktivnih metoda, omogućavajući precizniju procenu vitalnosti stabala u urbanim i prirodnim sredinama.

Ivana M. Živanović aktivno učestvuje u istraživačkim projektima koji se bave procenom uticaja klimatskih promena i zagađenja na šumske ekosisteme, kao i unapređenjem dijagnostičkih metoda za poboljšanje zdravlja urbanih stabala. Njena istraživanja doprinose razvoju adaptivnih mera u šumarstvu i optimizaciji tehnoloških postupaka za održivo upravljanje šumskim resursima.

Bibliografija:

1. Miletić, Z., Tabaković-Tošić, M., Stajić, S., Radulović, Z., Eremija, S., Milosavljević, M., & Živanović, I. (2014). Chemical characteristics of gypsy moth larvae excrement and their possible impact on soil properties in the total defoliation period. *Sustainable Forestry: Collection*. <https://doi.org/10.5937/sustfor1469041m>
2. Gagić-Serdar, R. P., Milosavljević, M., Živanović, I., Poduška, Z., Đorđević, I., Češljarić, G., & Stefanović, T. (2014). Seed predation in woody leguminous host plants – New record of *Bruchidius*, *Megabruchidius* and *Zabrotes* weevils (*Coleoptera: Chrysomelidae: Bruchinae*) as new species to the Serbian fauna. *VII Congress on Plant Protection “Integrated Plant Protection Knowledge – Based Step Towards Sustainable Agriculture, Forestry and Landscape Architecture”*. Zlatibor, Serbia, pp. 278-280.
3. Stefanović, T. P., Gagić-Serdar, R. P., Đorđević, I. Đ., Češljarić, G. D., Momirović, N. R., Nevenić, R. V., & Živanović, I. M. (2017). Studies of defoliation on ICP sample plots level I for the period 2012-2016 in Republic of Serbia. *Book of abstracts: Sustainable Forestry: Fact or Fiction?*. Ss. Cyril and Methodius University, Faculty of Forestry Skopje. http://www.sf.ukim.mk/70_godini/UKiM_FoF_70_Conference_Abstract_book.pdf
4. Gagić-Serdar, R. P., Stefanović, T. P., Đorđević, I. Đ., Češljarić, G. D., Milosavljević, M. D., Momirović, N. R., Poduška, Z. B., & Živanović, I. M. (2017). First record of the parasitoid (*Hymenoptera: Eulophidae*) as natural enemy of honey locust seed beetle *Megabruchidius tonkineus* (Pic, 1904). *Book of Abstracts, VIII International Scientific Agriculture Symposium, Jahorina “AGROSYM”*.

5. Stefanović, T. P., Gagić-Serdar, R. P., Đorđević, I. Đ., Češljarić, G. D., Momirović, N. R., Nevenić, R. V., & Živanović, I. M. (2017). Studies of defoliation on ICP sample plots level I for the period 2012-2016 in Republic of Serbia. *Book of abstracts: "Sustainable Forestry: Fact or Fiction?"*. Ss. Cyril and Methodius University, Faculty of Forestry Skopje.
http://www.sf.ukim.mk/70_godini/UKiM_FoF_70_Conference_Abstract_book.pdf
6. Jovanović, F., Obratov-Petković, D., Bjedov, I., Živanović, I., Braunović, S., Ćirković-Mitrović, T., & Tomović, G. (2018). Morphological variability of snowdrops in the central part of the Balkan Peninsula. *HortScience*. <https://doi.org/10.21273/hortsci13135-18>
7. Poduška, Z., Jovanović, F., & Živanović, I. (2018). Attitudes of employees about conflicts in the forestry sector. *Sustainable Forestry: Collection*. <https://doi.org/10.5937/sustfor1877123p>
8. Gagić-Serdar, R. P., Živanović, I. M., Stefanović, T. P., Spasojević, B., Momirović, N. R., Poduška, Z. B., & Rakonjac, L. B. (2019). Parasitoid complex of *Bruchidius terrenus* in biocontrol of Fabaceae host plants and its spermatophagous entomofauna. *Proceedings of the X International Scientific Agricultural Symposium "Agrosym 2019"*. Jahorina.
https://agrosym.ues.rs.ba/article/showpdf/BOOK_OF_PROCEEDINGS_2019_FINAL.pdf
9. Ratknić, T. M., Ratknić, M., Poduška, Z., Živanović, I., Lazarević, N., & Hadrović, S. (2019). The effects of climate characteristics on the diameter increment of Douglas-fir in the city of Belgrade (Serbia). *Proceedings of the X International Scientific Agricultural Symposium "Agrosym 2019"*. Faculty of Agriculture, Jahorina.
https://agrosym.ues.rs.ba/article/showpdf/BOOK_OF_PROCEEDINGS_2019_FINAL.pdf
10. Živanović, I. M., Poduška, Z., & Jovanović, F. (2019). Potentials of the evaluation of the wood quality in living trees by using semi- and non-destructive methods in order to reduce wood-processing costs. *Sustainable Forestry: Collection*. Institut za šumarstvo Beograd.
<https://doi.org/10.5937/sustfor1979115q>

11. Gagić-Serdar, R. P., Živanović, I., Poduška, Z. B., Đorđević, I., Češljarić, G. D., Momirović, N. R., Stefanović, T. P., & Rakonjac, L. B. (2019). Seed preserving as a resource through biological methods of using the most effective Bruchine subfamily seed beetles in Serbia - Stored product insects pests management through natural enemies as favorable leguminous host plant traits. *Book of abstracts: YOURS 2019*. Institut za istraživanja i projektovanje u privredi, Beograd.
12. Pavlović, B., Čokeša, V., Jović, Đ., Živanović, I., Jovanović, F., & Poduška, Z. (2019). Selection of potential areas for establishing forest plantations for satisfaction of energy needs – the example of Lazarevac Municipality. *YOURS 2019 Abstract Proceedings - Young Researchers Conference 2019*. Institut za istraživanja i projektovanje u privredi, Beograd. Retrieved from http://www.matf.bg.ac.rs/files/Zbornik_rezimea_YOURS_2019.pdf
13. Ratknić, T. M., Ratknic, M., Poduška, Z., Živanović, I., Lazarević, N., & Hadrović, S. (2019). The effects of climate characteristics on the diameter increment of Douglas-Fir in the city of Belgrade (Serbia). *Proceedings of the X International Scientific Agricultural Symposium "Agrosym 2019"*. Faculty of Agriculture, Jahorina. Retrieved from http://agrosym.ues.rs.ba/article/showpdf/BOOK_OF_PROCEEDINGS_2019_FINAL.pdf
14. Živanović, I., Todorović, N., Rakonjac, L., & Jovanović, F. (2020). Potentials of the assessment of the wood quality in standing trees by applying acoustic methods. *Sustainable Forestry: Collection*. Institut za šumarstvo Beograd. <https://doi.org/10.5937/sustfor2081121q>
15. Živanović, I., Jovanović, F., Šurjanac, N., Todorović, N., & Milić, G. (2021). Properties of the northern red oak (*Quercus rubra* L.) wood determined by fractometric measurements – Preliminary results. *Glasnik šumarskog fakulteta*. Šumarski fakultet Beograd. <https://doi.org/10.2298/GSF2124125Z>

16. Živanović, I., Todorović, N., Šurjanac, N., Kabiljo, M., & Jovanović, F. (2021). Physical and mechanical properties of wood of northern red oak in the vicinity of Belgrade (Serbia). *Zbornik radova Instituta za šumarstvo*. <https://doi.org/10.5937/sustfor2183093z>
17. Todorović, N., Živanović, I., Vilotić, D., & Milić, G. (2022). Radial variability of wood density and fibre length in the red oak trees (*Quercus rubra* L.). *Sustainable Forestry: Collection*. <https://doi.org/10.5937/SustFor2285075T>
18. Živanović, I., Todorović, N., & Petrović, D. (2022). Transverse stress wave velocity in northern red oak tree: assessment of the wood quality. *Book of abstracts - International Scientific Conference "Forestry Science for Sustainable Development - FORS2D"*. Faculty of Forestry, University of Banja Luka, Banja Luka, Republic of Srpska, Bosnia and Herzegovina, 29–30 September 2022. Retrieved from https://www.sf.unibl.org/wp-content/uploads/2022/11/Knjiga-apstrakata_FINAL_sa-CIP_last.pdf
19. Šurjanac, N., Milčanović, V., Polovina, S., Cvetković, J., & Živanović, I. (2022). Application of multispectral sensor in quantification of Soil Protection Coefficient (Xa) in Erosion Potential Method. *Sustainable Forestry: Collection*. Centre for Evaluation in Education and Science (CEON/CEES). <https://doi.org/10.5937/sustfor2285169s>
20. Jovanović, F., Braunović, S., Momirović, N., Rakonjac, L., & Živanović, I. (2023). Variability of two-year-old seedlings of *Ginkgo biloba* L. grown from seed collected in the city area of Belgrade (Serbia). *Book of Proceedings - XIV International Scientific Agriculture Symposium "AGROSYM 2023"*. University of East Sarajevo, Faculty of Agriculture.
21. Živanović, I., Šurjanac, N., Jovanović, F., & Todorović, N. (2023). Modeling quality of northern red oak (*Quercus rubra* L.) wood using fractometric measurements. *Fresenius Environmental Bulletin and Advances in Food Sciences*.

22. Živanović, I., Jovanović, F., Šurjanac, N., Filipović, Đ., & Lučić, A. (2023). Condition of northern red oak trees in the urban environment of Belgrade (Serbia). *Sustainable Forestry: Collection*, 87-88. Institut za šumarstvo Beograd. <https://doi.org/10.5937/SustFor2388089Z>
23. Poduška, Z., Jovanović, F., Živanović, I., & Hadrović, S. (2023). Neinvazivni uređaj za prikupljanje padavinskih voda koja se sliva niz stablo. *Spis malog patenta*. Zavod za intelektualnu svojinu. Retrieved from<http://pub.zis.gov.rs/rspubserver/pdfdocument?PN=RS1797%20RS%201797&iDocId=104013&iepoch=.pdf>
24. Jovanović, F., Živanović, I., Šurjanac, N., Filipović, Đ., Jović, Đ., & Lučić, A. (2024). Condition of Douglas fir trees in the urban area of Belgrade (Serbia). *Sustainable Forestry: Collection*. <https://doi.org/10.5937/SustFor2490109J>
25. Česljar, G. D., Baković, Z., Djordjevic, I. Dj., Eremija, S. M., Lučić, A. Ž., Živanovic, I. M., & Konatar, B. (2025). Impact of Short-Term and Prolonged (Multi-Year) Droughts on Tree Mortality at the Individual Tree and Stand Levels. *PLANTS-BASEL*, 14(13), 1904–1904. <https://doi.org/10.3390/plants14131904>

Učešće na projektima

- Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije. (TP 31070). Razvoj tehnoloških postupaka u šumarstvu u cilju realizacije optimalne šumovitosti. Projekat iz oblasti tehnološkog razvoja.(2017)
- Sekretarijat za zaštitu životne sredine Grada Beograda. (2018). Primena adaptivnih mera u prilagođavanju šumskih ekosistema klimatskim promenama na području grada Beograda.
- Uprava za šume Republike Srbije. (2019). Procena i praćenje uticaja zagađenja vazduha i efekata istog u šumskim ekosistemima na teritoriji Republike Srbije ("Ispitivanje zdravstvenog stanja stabala na bioindikacijskim tačkama").
- Sekretarijat za zaštitu životne sredine Grada Beograda. (2019/2021). Unapređenje stanja životne sredine na teritoriji grada Beograda davanjem predloga mera za unapređenje zdravstvenog stanja stabala i sadnju sadnica u dvorištima javnih ustanova – GO Savski venac.
- Sekretarijat za zaštitu životne sredine Grada Beograda. (2022/2024). Unapređenje stanja životne sredine na teritoriji Grada Beograda davanjem predloga mera za unapređenje zdravstvenog stanja stabala na površinama kojima upravlja JP Ada Ciganlija.
- Sekretarijat za zaštitu životne sredine Grada Beograda. (2025/2027). Unapređenje stanja životne sredine na teritoriji Grada Beograda davanjem predloga mera za unapređenje zdravstvenog stanja stabala i sadnju sadnica u dvorištima javnih ustanova – GO Rakovica i GO Vračar.

ZAHVALNICA

Posebnu zahvalnost dugujem svom mentoru, prof. dr Nebojši V. Todoroviću, na nesebičnoj podršci, stručnim savetima i strpljenju tokom celokupnog istraživačkog procesa i izrade disertacije.

Zahvaljujem se članovima komisije:

- prof. dr Goran Milić, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu – Šumarski fakultet
- prof. dr Branko Stajić, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu – Šumarski fakultet
- prof. dr Dušan Jokanović, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu – Šumarski fakultet
- prof. dr Aleš Straže, vanredni profesor, Univerzitet u Ljubljani, Biotehnički fakultet
- prof. dr Maks Merela, vanredni profesor, Univerzitet u Ljubljani,

Posebnu zahvalnost dugujem direktoru Instituta za šumarstvo, dr Ljubinku Rakonjcu, kao i njegovom zameniku, dr Aleksandru Lučiću, koji su mi pružili podršku tokom celokupnog procesa istraživanja i izrade rada.

Neizmerno sam zahvalna našem kolegi dr Filipu Jovanoviću, višem naučnom saradniku, i dipl. ing. šumarstva Nenadu Šurjancu, čija je pomoć u istraživanju i izradi rada bila od neprocenjivog značaja. Takođe, zahvaljujem se zaposlenima u Laboratoriji za svojstva drveta na Šumarskom fakultetu u Beogradu, posebno Goranu Cvijetičaninu i Bojani Stanković, na njihovoj podršci i stručnosti.

Zahvalnost dugujem kolegi Vladu Čokeši, kao i Šumskim gazdinstvima Brus, Debeli lug i Beograd – Stepin lug, koji su omogućili realizaciju istraživanja. Takođe, zahvaljujem se Laboratoriji za anatomiju drveta Šumarskog fakulteta u Ljubljani na njihovoj pomoći i saradnji.

Zahvalnost i preduzeću Saga Drvo d.o.o. i kolegi Marku Jovanoviću na nesebičnoj pomoći oko izrade uzoraka.

Na kraju, najdublju zahvalnost upućujem svojoj porodici, koja mi je bila najveća podrška tokom celokupnog procesa izrade ovog rada. Njihova nesebična podrška, strpljenje i motivacija bili su ključni za uspešan završetak disertacije.

Mojoj deci...

Prilog 1.

Izjava o autorstvu

Potpisani-a _____ Ivana M. Živanović
broj indeksa _____ 4/2017

Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

Mogućnost procene kvaliteta drveta u stablima crvenog hrasta (*Quercus rubra* L.)
primenom akustičnog tomografa i fraktometra

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predložena disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova,
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio/la autorska prava i koristio intelektualnu svojinu drugih lica.

U Beogradu, 02.09.2025.

Potpis doktoranda



Prilog 2.

Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora: Ivana Živanović
Broj indeksa: 4/2017
Studijski program: Prerada drveta
Naslov rada: Mogućnost procene kvaliteta drveta u stablima
crvenog hrasta (*Quercus rubra* L.) primenom akustičnog tomografa i fraktometra

Mentor: dr Nebojša Todorović, redovni profesor

Potpisani/a Ivana Živanović

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao/la za objavljivanje na portalu Digitalnog repozitorijuma Univerziteta u Beogradu.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

U Beogradu, 02.09.2025.

Potpis doktoranda

Ivana Živanović

Prilog 3.

Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

Mogućnost procene kvaliteta drveta u stablima crvenog hrasta (*Quercus rubra* L.) primenom akustičnog tomografa i fraktometra

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim priložima predao/la sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio/la.

1. Autorstvo
2. Autorstvo – nekomercijalno
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima
5. Autorstvo – bez prerade
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci. Kratak opis licenci dat je na poledini lista.)

U Beogradu, 02.09.2025.

Potpis doktoranda

