

Utjecaj dimenzije i gustoće uzoraka na mehanička svojstva drva pri tlačnom djelovanju sile u longitudinalnom smjeru

Lončar, Franko

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:108:222374>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-15**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE
DRVNOTEHNOLOŠKI ODSJEK

PREDDIPLOMSKI STUDIJ

DRVNE TEHNOLOGIJE

FRANKO LONČAR

UTJECAJ DIMENZIJE I GUSTOĆE UZORAKA NA
MEHANIČKA SVOJSTVA DRVA PRI TLAČNOM DJELOVANJU
SILE U LONGITUDINALNOM SMJERU

ZAVRŠNI RAD

ZAGREB, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE
DRVNOTEHNOLOŠKI ODSJEK

**UTJECAJ DIMENZIJE I GUSTOĆE UZORAKA NA
MEHANIČKA SVOJSTVA DRVA PRI TLAČNOM DJELOVANJU
SILE U LONGITUDINALNOM SMJERU**

ZAVRŠNI RAD

Preddiplomski studij:	Drvena tehnologija
Predmet:	Fizika
Mentor	doc. dr. sc. Kristijan Radmanović
Student:	Franko Lončar
JMBAG:	0068234852
Datum odobrenja teme:	19. 04. 2022.
Datum predaje rada:	20.9.2022.
Datum obrane rada:	23.9.2022.


Zagreb, rujan, 2022.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Naslov:	Utjecaj dimenzije i gustoće uzoraka na mehanička svojstva drva pri tlačnom djelovanju sile u longitudinalnom smjeru
Autor:	Franko Lončar
Adresa autora:	Srijemska ulica 20, Zagreb
Mjesto izradbe:	Fakultet šumarstva i drvne tehnologije Sveučilišta u Zagrebu
Vrsta objave:	Završni rad
Mentor:	doc. dr. sc. Kristijan Radmanović
Izradu rada pomogao:	Mag. ing. techn. lign. Krešimir Balaško
Godina objave:	2022.
Opseg:	32 str., 19 slika, 2 tablica i 14 navoda literature
Ključne riječi:	Deformacija, naprezanje, modul elastičnosti, mehanička svojstva
Sažetak:	<p>Određivanje tlačnih svojstava drva provodi se prema normi (DIN EN 408) u kojoj su specificirani uvjeti izvođenja eksperimenta i dimenzije samih uzoraka. Obzirom da je drvo heterogeni biopolimerni materijal, njegova mehanička svojstva ovise o dimenzijama samog uzorka. U ovom završnom radu određena su tlačna svojstva za tri različite vrste drva (hrastovina, bukovina i jelovina), te je unutar svake vrste drva određena ovisnost tlačnih svojstava o dimenzijama uzorka.</p>

BASIC DOCUMENTATION CARD

Title:	Impact of dimension and density of specimens on mechanical properties of wood under compressive force acting in the longitudinal direction
Author:	Franko Lončar
Address of Author:	Srijemska ulica 20, Zagreb
Thesis performed at:	Faculty of Forestry and Wood Technology, University of Zagreb
Publication Type:	Undergraduate thesis
Supervisor:	doc. dr. sc. Kristijan Radmanović
Preparation Assistant:	mag. ing. techn. lign. Krešimir Balaško
Publication year:	2022.
Volume:	32 pages, 2 tables, 19 figures and 14 references
Key words:	Strain; Stress; Modulus of elasticity, Mechanical properties
Abstract:	<p>The determination of the compressive properties of wood is carried out according to the standard (DIN EN 408), which specifies the conditions for performing the experiment and the dimensions of the samples themselves. Given that wood is a heterogeneous biopolymer material, its mechanical properties depend on the dimensions of the sample itself. In this final paper, the compressive properties were determined for three different types of wood (oak, beech and fir), and within each type of wood, the dependence of the compressive properties on the dimensions of the sample was determined.</p>

	IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI	OB ŠF 05 07
		Revizija: 2
		Datum: 2.2.2021.

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

Zagreb, 23.9.2022. godine

vlastoručni potpis

Franko Lončar

SADRŽAJ

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA.....	I
BASIC DOCUMENTATION CARD	II
SADRŽAJ.....	IV
POPIS SLIKA.....	V
POPIS TABLICA.....	VI
PREDGOVOR ILI ZAHVALA	VII
1. UVOD.....	1
2. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA	3
3. CILJ ISTRAŽIVANJA.....	4
4. MATERIJALI I METODE ISTRAŽIVANJA.....	5
4.1 MATERIJALI	5
4.2 METODE	8
5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM.....	11
6. ZAKLJUČAK	21
LITERATURA.....	22

POPIS SLIKA

<i>Slika 1: Prikaz djelovanje tlačnih i vlačnih sila na drvo u longitudinalnom, radijalnom i tangentskom smjeru (Radmanović, 2015)</i>	<i>1</i>
<i>Slika 2: Prikaz različitih dimenzija uzoraka (Lončar F., 2022)</i>	<i>6</i>
<i>Slika 3: Napuknuti drveni uzorak. L' je duljina uzorka nakon tlačnog djelovanja sile, R je dimenzija u radijalnom smjeru, T je dimenzija u tangentskom smjeru i ovalna oznaka je mjesto loma.</i>	<i>8</i>
<i>Slika 4: Naprezanje – deformacija dijagram u longitudinalnom smjeru. Tri dijelova se mogu vizualno razlikovati: 1. dio - nelinearni, 2. dio. - linearni i 3. dio. - djelomično nelinearni</i>	<i>9</i>
<i>Slika 5: Naprezanje – deformacija dijagram nakon translacije početne točke</i>	<i>10</i>
<i>Slika 6: Dijagram odnosa gustoća uzoraka za različite volumene uzoraka hrastovine</i>	<i>11</i>
<i>Slika 7: Dijagram odnosa gustoća uzoraka za različite volumene uzoraka bukovine</i>	<i>11</i>
<i>Slika 8: Dijagram odnosa gustoća uzoraka za različite volumene uzoraka jelovine.....</i>	<i>12</i>
<i>Slika 9: Dijagram odnosa maksimalnih naprezanja uzoraka za različite volumene uzoraka hrastovine</i>	<i>12</i>
<i>Slika 10: Dijagram odnosa maksimalnih naprezanja uzoraka za različite volumene uzoraka bukovine.....</i>	<i>13</i>
<i>Slika 11: Dijagram odnosa maksimalnih naprezanja uzoraka za različite volumene uzoraka jelovine.....</i>	<i>14</i>
<i>Slika 12: Dijagram odnosa modula elastičnosti (E) s povećanjem volumena uzoraka hrastovine</i>	<i>14</i>
<i>Slika 13: Dijagram odnosa modula elastičnosti (E) za različite volumene uzoraka bukovine</i>	<i>15</i>
<i>Slika 14: Dijagram odnosa modula elastičnosti (E) za različite volumene uzoraka jelovine</i>	<i>15</i>
<i>Slika 15: Dijagram odnosa δ_ϵ za različite volumene uzoraka hrastovine</i>	<i>16</i>
<i>Slika 16: Dijagram odnosa δ_ϵ za različite volumene uzoraka bukovine.....</i>	<i>16</i>
<i>Slika 17: Dijagram odnosa δ_ϵ za različite volumene uzoraka jelovine.....</i>	<i>17</i>
<i>Slika 18: Dijagrami odnosa maksimalnih naprezanja za različite površine uzoraka drva (lijevi dijagrami), dijagrami odnosa konačnih naprezanja za različite površine uzoraka drva (desni dijagrami), oak- hrastovina, beech – bukovina, fir - jelovina.....</i>	<i>18</i>
<i>Slika 19: Dijagram (gornji) energije deformacije za različite površine uzoraka hrastovine, bukovine i jelovine, dijagram (donji) gustoća deformacijske energije.....</i>	<i>19</i>

POPIS TABLICA

Tablica 1: Prosječne dimenzije, mase i gustoće uzoraka. H1 – hrastovina volumena 1 cm³, H2 – hrastovina volumena 8 cm³, H3 – hrastovina volumena 27 cm³, B1 – bukovina volumena 1 cm³, B2 – bukovina volumena 8 cm³, B3 – bukovina volumena 27 cm³, J1 – jelovina volumena 1 cm³, J2- jelovina volumena 8 cm³, J3 – jelovina volumena 27 cm³, L – dimenzija uzoraka u longitudinalnom smjeru (mm), R – dimenzije uzoraka u radijalnom smjeru (mm), T – dimenzije uzoraka u tangetnom smjeru (mm), m – masa uzoraka, ρ – gustoća uzoraka (g / cm³) 7

Tablica 2: Podaci o tlačnim svojstvima modula elastičnosti i maksimalnih naprezanja (Wood handbook—Wood as an engineering material, David W. Green i suradnici, 2010)..... 7

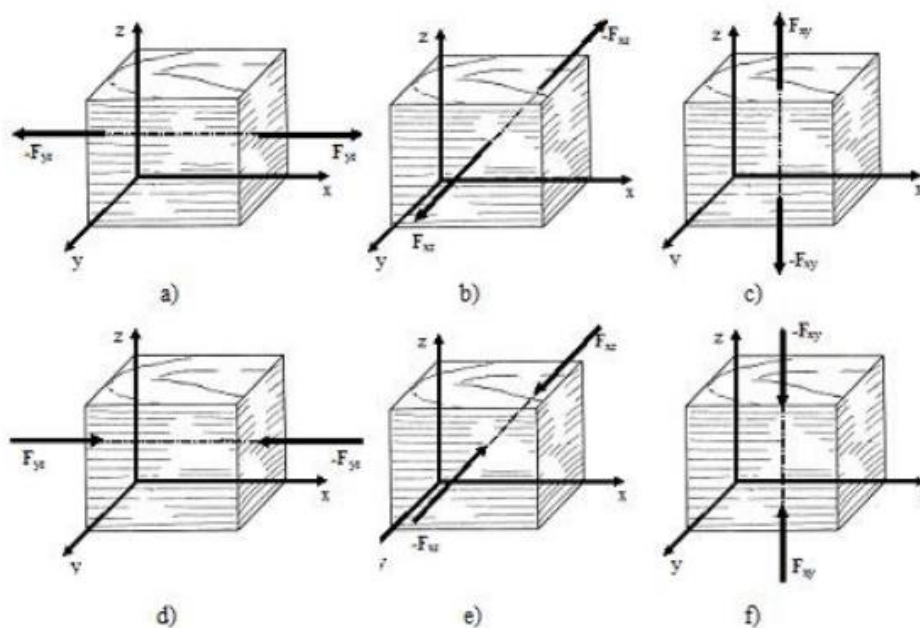
PREDGOVOR ILI ZAHVALA

Ja, Franko Lončar, htio bih se zahvaliti svome mentoru dr. sc. Kristijanu Radmanoviću i asistentu mag. ing. techn. lign. Krešimiru Balašku što su mi predložili temu te svojim trudom i radom me usmjeravali na uspješnost pisanja završnog rada. Zahvalio bih se također svojoj obitelji, pogotovo roditeljima koji su me potaknuli na nastavak k višljem obrazovanju.

1. UVOD

Drvo je materijal organskog podrijetla koji je tijekom svoga rasta konstantno pod utjecajem atmosferilija (voda, sunce, vjetar, sl.). Ovisno o vrsti, staništu i starosti, drvo ima veliku devijaciju mehaničkih svojstava. Svojstva se također razlikuju s obzirom na smjer protezanja drvnih vlaknaca u longitudinalnom, radijalnom i tangentskom smjeru, te između ranog i kasnog drva (Petrić i suradnici, 1985). Zbog varijabilnosti drva, svaki dio drva se promatra kao jedinstveni materijal. Drvo kao heterogeni anizotropni materijal u drvenoj industriji predstavlja prednost nad ostalim materijalima, međutim odluka mjesta uporabe drva izazovan je postupak gdje znanje stručnjaka od iznimne važnosti.

Mehanička svojstva predstavljaju odgovor drva na djelovanje vanjske sile. Obzirom da je sila vektorska veličina, njezinom orijentacijom definirana su vlačna i tlačna svojstva, a njezinom orijentacijom definiraju se svojstva u longitudinalnom, radijalnom i tangentskom smjeru.



Slika 1: Prikaz djelovanje tlačnih i vlačnih sila na drvo u longitudinalnom, radijalnom i tangentskom smjeru (Radmanović, 2015)

Na slici 1 su prikazani smjerovi djelovanja sile na drvo. Vlačna sila, koje je pozitivna (F_{zy}), djeluje u radijalnom smjeru (a). Vlačna sila (F_{xz}) koje djeluju u tangentskom smjeru (b). Vlačna sila (F_{xy}) koja djeluje u longitudinalnom smjeru (c). Čvrstoća na vlak paralelno na vlaknaca (longitudinalni smjer) iznimno veća je nego čvrstoća na vlak okomito na vlaknaca u radijalnom i tangentskom smjeru. Listače imaju skoro dva puta veću čvrstoću na vlak od četinjača u radijalnom i tangentskom smjeru (Horvat i Krpan, 1967).

Tlačna sila, koja je negativna ($-F_{zy}$), djeluje u radijalnom smjeru (slika 1d). Tlačna sila ($-F_{xz}$) koja djeluje u tangetnom smjeru (e). Tlačna sila ($-F_{xy}$) koja djeluje u longitudinalnom smjeru (f). Čvrstoća na tlak paralelno s vlakancima je iznimno veća od čvrstoće na tlak okomito na vlakanca u radijalnom i tangetnom smjeru, međutim, tangetni smjer je veći od radijalnog smjera. Čvrstoća na tlak paralelno s vlakancima i okomito na vlakanca se razlikuje od jedne vrste drva do druge.

Drvo, po svojoj anatomskoj građi, dijeli se na neporozno (četinjače) i porozno (listače) drvo. Neporozno drvo po svojoj strukturalnoj građi je jednostavnija i pravilnija nego porozno drvo te zbog toga mehanička svojstva bitno se razlikuju. U znanstvenoj literaturi pronalazi se za četinjače i naziv *meko drvo* dok za listače naziv *tvrd drvo*. To govori da je četinjača poput jele mekša po tvrdoći i lakša, odnosno ima manju gustoću nego listača poput hrasta. Broj i razmak između godova, srž ili bjeljika, je li uzorak bočnica ili blistača bitno utječu na mehanička svojstva.

Istraživanje mehaničkih svojstava od iznimne je važnosti jer iz njih možemo doznati koju vrstu drva ćemo koristiti za određenu namjenu. Što smo bolje upoznati s mehaničkim svojstvima drva, to će se ono moći bolje iskoristiti. Kod drva se često ispituje čvrstoća, tvrdoća i modul elastičnosti. Čvrstoća se ispituje na tlak, vlak (paralelno s vlakancima i okomito na vlakanca), na savijanje, na smik, na cijepanje (radijalno i tangetno). Tvrdoća se ispituje po Jankovoj i Brinellovoj metodi.

2. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA

Mehanička svojstva drva predmet su izučavanja dugi niz godina, ali sve stroži zahtjevi u proizvodnji, ekološka komponenta korištenja drva i razvoj eksperimentalnog postava čine ta istraživanja atraktivnima danas.

S početkom prošlog stoljeća, mehanička svojstva su u uzajamnim odnosima s gustoćom (Newlin and Wilson, 1919). S porastom gustoće drva, mehanička svojstva rastu (Zhang, 1994) no gustoća nije glavni čimbenik mehaničkih svojstva u longitudinalnom smjeru (Krauss, 2009). Djelovanje tlačne sile na bukovinu u longitudinalnom smjeru, pokazalo je da porastom tlačne sile, modul elastičnosti (E) raste (Radmanović i suradnici, 2021). Sadržaj vode izravno smanjuje tlačnost, povećanjem 1% sadržaja vode, tlačnost se smanjuje za 3,1% za uzorke hrastovine kojima sadržaji vode iznose 8 – 20% (Korkmaz and Büyüksarı, 2019). Pozitivne korelacije su utvrđene između manjih uzoraka i standardnih uzoraka kod ispitivanja mehanička svojstva na *Quercus Petraea* (Büyüksarı et al., 2017). Veličina uzoraka *Quercus Robur*-a u radijalnom smjeru za uzorke 10x10x10 mm i 25x25x25 mm pokazali su male razlike u korist manjih uzoraka naspram standardnih uzoraka (Afshar, 2022). Tlačnim djelovanjem drva se lakše savija u longitudinalnom smjeru. Većina listača s 20% sadržaja vode mogu biti stlačeni za modifikaciju drva (Báder, 2015; Howard i Giovanelli, 2004). Utjecaj dimenzija i geometrije drva na mehanička svojstva objavljeni su od (Wolcott i suradnici, 2007). Utjecaj visine uzoraka na Youngov modul (ϵ) je ustanovljeno od Boding i Kunesh acc. (Wolcott et al., 2007). Modul elastičnosti (E), koja pokazuje koliko se uzorak može opteretiti i vratiti u početno stanje, raste orastom visine uzoraka. U ovom završnom radu, ispituje se utjecaj promjena dimenzija uzoraka drva na tlačna svojstva u longitudinalnom smjeru. Određena tlačna svojstva su: modul elastičnosti (E), maksimalno naprezanje (σ_{maks}), konačno naprezanje (σ_{final}) i energija rada (e).

3. CILJ ISTRAŽIVANJA

Hipoteza:

- mehanička svojstva drva ovisna su o dimenzijama ispitivanih uzoraka,
- drvo, kao prirodni biopolimerni materijal može se promatrati kao elastoplastični materijal
- elastično područje dijagrama naprezanje – deformacija može se aproksimirati linearnom funkcijom,

Ciljevi rada:

- određivanje linearne funkcije u elastičnom području dijagrama naprezanje – deformacija,
- određivanje ovisnosti kompresivnih mehaničkih svojstava (modul elastičnosti, početna elastična deformacija, maksimalno naprezanje, konačno naprezanje, deformacija kod maksimalnog naprezanja, konačna deformacija i energija deformacije) uzoraka hrastovine, bukovine i jelovine o dimenzijama ispitivanih uzoraka

4. MATERIJALI I METODE ISTRAŽIVANJA

4.1 MATERIJALI

Uzorci korišteni za istraživanje su drvene masivne gredice različitih dimenzija i vrsta drva. Vrste drva korišteni za istraživanje su hrastovina lužnjak *Quercus robur*, obična bukovina *Fagus sylvatica* i obična jelovina *Abies alba Mill.* iz područja Slavonije. Slavonska hrastovina je prstenasto porozno drvo iznimne kakvoće zbog jednoličnih uskih godova. Uporaba bukovine, koja je rastresito porozno bukuljavo drvo, širolika je zbog svojih iznimno kvalitetnih mehaničkih i tehnoloških svojstava. Kod obične jelovine koja je četinjača, godovi su uočljivi s postupnim prijelazom ranog u kasno drvo (Despot i suradnici, 2019).

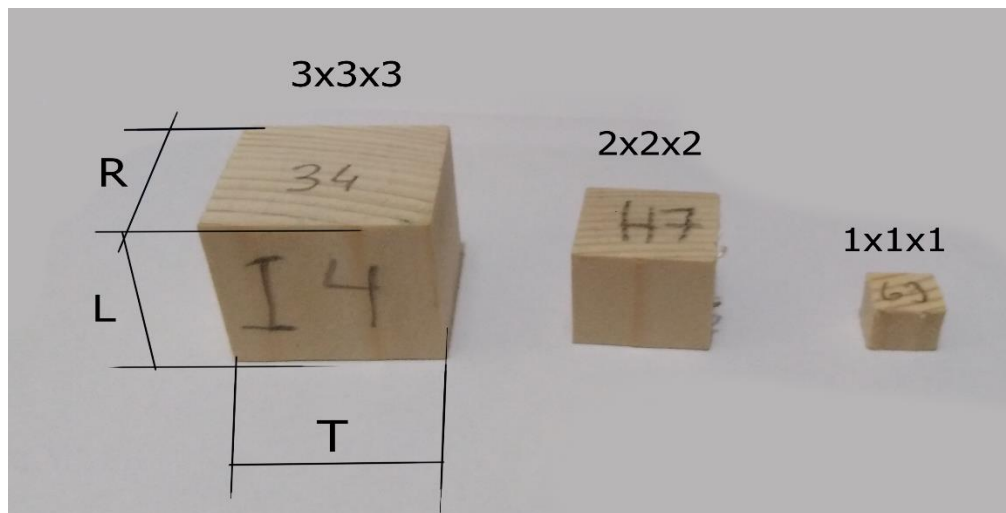
Visina, širina i debljina uzorka su jednaki te postoje sljedeće kombinacije (slika 2): uzorak od 1 cm³; uzorak od 8 cm³; uzorak od 27 cm³; koji su ujedno i volumeni uzoraka. Za svaku vrstu drva imamo 36 uzoraka (ukupno 108 uzoraka): 12 uzoraka volumena od 1 cm³; 12 uzorka volumena od 8 cm³; 12 uzorka volumena od 27 cm³. Uzorci na kojima se pokazuje greške tijekom ispitivanja ne koriste se dalje u istraživanju.

Uzorci su uzeti iz istih stabala bukve, hrasta i jele iz područje Slavonije. Uzorci su dostavljeni u obliku okrajčenih piljenica koji su ispiljeni kružnom pilom na navedene dimenzije uz što manje grešaka na uzorcima, što pravilnijih rasporeda kasnog i ranog drva kod godova i bez tolerancija na dimenzijskim odstupanjima. Površine su brušene finim brusnim papirom prije i nakon piljenja. Svaki uzorak je bio označen šifrom s obzirom na vrstu drva, dimenzije uzorka i broju komada uzorka pod određenom dimenzijom. Točnost dimenzija provjerava se električnim pomičnim mjerilom.

Mase uzoraka mjere se pomoću elektroničke vage. Uzorci se postave na vagu i tariraju i masa uzoraka (m) automatski se zapisuje u *Excel* programu. Na izmjerenom uzorku zapisuje se šifra grafitnom olovkom s podacima o masi (m) i volumenu (V) računa se gustoća uzoraka (ρ) prema sljedećem izrazu (jednadžba 1)

$$\rho = \frac{m}{V} \left(\frac{g}{cm^3} \right). \quad (1)$$

Izmjereni podaci dimenzija i mase uzoraka nalaze se u tablici 1 gdje su izračunate gustoće navedenih vrsta drva. U tablici 2, nalaze se podaci o tlačnim svojstvima modula elastičnosti i maksimalnih naprezanja za navedene vrste drva, međutim, treba uzeti u obzir da su to prijašnji izmjereni podaci iz drugih radova te će se koristiti kao usporedba s rezultatima istraživanja ovoga rada.



Slika 2: Prikaz različitih dimenzija uzoraka (Lončar F., 2022)

4. MATERIJALI I METODE ISTRAŽIVANJA

Tablica 1: Prosječne dimenzije, mase i gustoće uzoraka. H1 – hrastovina volumena 1 cm³, H2 – hrastovina volumena 8 cm³, H3 – hrastovina volumena 27 cm³, B1 – bukovina volumena 1 cm³, B2 – bukovina volumena 8 cm³, B3 – bukovina volumena 27 cm³, J1 – jelovina volumena 1 cm³, J2- jelovina volumena 8 cm³, J3 – jelovina volumena 27 cm³, L – dimenzija uzoraka u longitudinalnom smjeru (mm), R – dimenzije uzoraka u radialnom smjeru (mm), T – dimenzije uzoraka u tangetnom smjeru (mm), m – masa uzoraka, ρ – gustoća uzoraka (g / cm³)

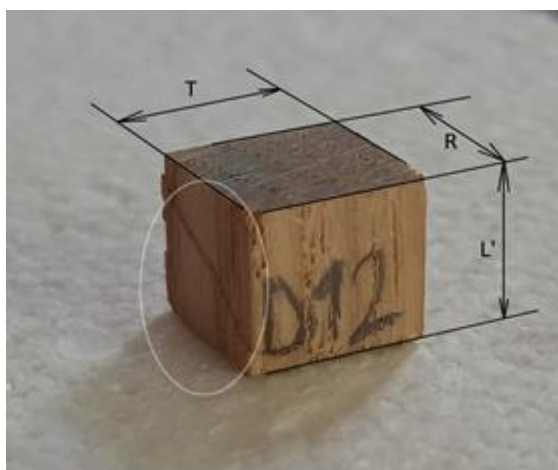
Vrsta drva	Uzorci	L (mm)	R (mm)	T (mm)	m (g)	ρ (g / cm ³)
Hrastovina	H1	10,03 ± 0,07	10,03 ± 0,09	10,08 ± 0,05	0,67 ± 0,02	0,66 ± 0,02
	H2	20,14 ± 0,11	20,15 ± 0,17	20,44 ± 0,08	5,53 ± 0,11	0,66 ± 0,01
	H3	29,89 ± 0,13	30,46 ± 0,07	30,55 ± 0,14	18,58 ± 0,59	0,66 ± 0,02
Bukovina	B1	9,90 ± 0,05	10,04 ± 0,02	10,23 ± 0,04	0,74 ± 0,01	0,73 ± 0,01
	B2	20,16 ± 0,06	20,19 ± 0,14	20,71 ± 0,10	6,08 ± 0,14	0,72 ± 0,02
	B3	29,97 ± 0,10	30,34 ± 0,21	30,96 ± 0,22	19,66 ± 1,17	0,69 ± 0,04
Jelovina	J1	9,94 ± 0,11	9,96 ± 0,07	10,15 ± 0,09	0,38 ± 0,01	0,38 ± 0,01
	J2	20,20 ± 0,03	20,26 ± 0,07	20,36 ± 0,23	3,42 ± 0,10	0,41 ± 0,01
	J3	30,18 ± 0,06	30,22 ± 0,12	30,61 ± 0,25	11,52 ± 0,56	0,41 ± 0,02

Tablica 2: Podaci o tlačnim svojstvima modula elastičnosti i maksimalnih naprezanja (Wood handbook—Wood as an engineering material, David W. Green i suradnici, 2010)

Vrsta drva	Modul elastičnosti E (MPa)	Maksimalno naprezanje (kPa)
Hrastovina	8900 - 13100	20700 - 48500
Bukovina	9500 – 11900	24500 - 50300
Jelovina	9800 - 12100	21600 - 44200

4.2 METODE

Tlačna svojstva uzoraka u longitudinalnom smjeru bila su određena veličinom uzoraka. Ispitivanje se provelo u laboratoriju Fakulteta šumarstva i drvne tehnologije. Tijekom ispitivanja, brzina opterećenja je bila konstantna, iznosila je 2 mm/min. Ispitivanje je provedeno na *Shimadzu* ispitnom stroju s tlačnom silom od 10 kN za uzorke volumena od 1 cm³ i silom od 100 kN za uzorke volumena od 8 cm³ i 27 cm³. Na stroju se stavlja uzorak postavljen tako da je poprečni presjek uzorka usmjeren prema pritisknom tijelu. Mjerenje pomaka ($\Delta L = L - L'$) je bilo programirano u softveru *Trapezium X*, *Shimadzu* do trenutka loma uzorka (slika 3). Sile su bile izmjerene s točnošću od 0,001 N i pomak je bio obrađen u *Sigma Plot* (Verzija 10.0).



Slika 3: Napuknuti drveni uzorak. L' je duljina uzorka nakon tlačnog djelovanja sile, R je dimenzija u radialnom smjeru, T je dimenzija u tangენტnom smjeru i ovalna oznaka je mjesto loma.

Deformacija je promjena oblika i dimenzija uslijed naprezanja koja može biti elastična i plastična. Naprezanje i deformacija posljedice su opterećenja na uzorak. Naprezanje su unutarnje sile koje odupiru se vanjskim opterećenjima koje mogu biti statične i dinamične. Statično opterećenje kontinuirano je djelovanje sile na uzorak bez promjene veličine dok je dinamično opterećenje promjena veličine i / bez promjene smjera sile. U ovom istraživanju radi se statičko opterećenje. Naprezanje se može usporediti s tlakom P . Naprezanje ima negativan predznak jer se po definiciji protivi opterećenju, to jest, tlaku. Tlačno naprezanje računa se po sljedećoj jednadžbi (jednadžba 2):

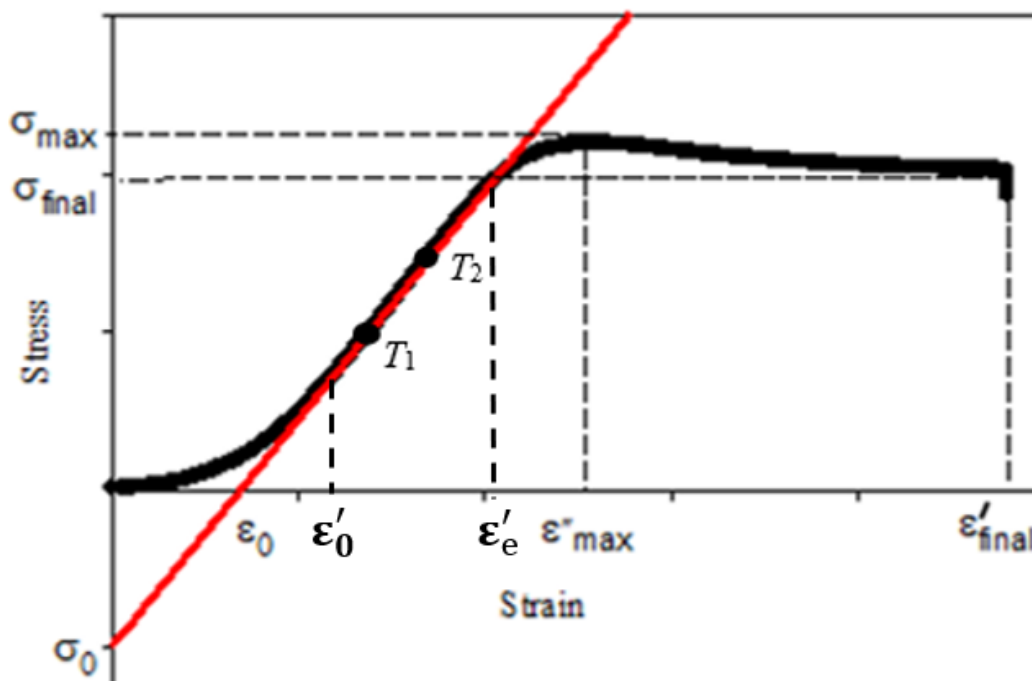
$$\sigma = \frac{-F}{R \cdot T} \quad (2)$$

Gdje σ je tlačno naprezanje (Pa), F je sila (N) koja je negativna, R je duljina uzorka (m), T je širina uzorka (m). Sukladno tome, deformacija se računa po jednadžbi 3.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3)$$

4. MATERIJALI I METODE ISTRAŽIVANJA

ε je relativna deformacija, ΔL je promjena dimenzije uzoraka (m) koja je negativna, a L_0 je početna dimenzija uzoraka. Nakon određivanja napreznja i relativnih deformacije, napravljen je $\sigma - \varepsilon$ dijagram. (slika 4).



Slika 4: Napreznje – deformacija dijagram u longitudinalnom smjeru. Tri dijelova se mogu vizualno razlikovati: 1. dio - nelinearni, 2. dio. - linearni i 3. dio. - djelomično nelinearni

Uzimajući u obzir os deformacije, napreznje – deformacija dijagram se može podijeliti u četiri dijela. U prvom dijelu dijagrama kad je ($0 < \varepsilon < \varepsilon'_0$), odnos između napreznja i deformacije je nelinearni. Ova nelinearnost je rezultat činjenice da u početnom dijelu, uz tlačno napreznje uzoraka, bilo je podešavanje uzoraka na držaču zbog neravnih površina samih uzoraka. U drugom dijelu dijagrama kad je ($\varepsilon'_0 < \varepsilon < \varepsilon'_e$), odnos između napreznja i deformacije je linearna (elastično područje). Deformacije u tome dijelu su reverzibilne. U trećem dijelu dijagrama kad je ($\varepsilon'_e < \varepsilon < \varepsilon'_{max}$), odnos između napreznja i deformacije je nelinearni (plastično područje). Deformacije u tome dijelu su ireverzibilne. U četvrtom dijelu dijagrama, kad je ($\varepsilon'_{max} < \varepsilon < \varepsilon'_{final}$), odnos između napreznja i deformacije je nelinearni, događa se popuštanje materijala, smanjuje se napreznje i na kraju kad je ($\varepsilon = \varepsilon'_{final}$), događa se lom uzoraka.

U prvom dijelu dijagrama, deformacija ε ($0 \ll \varepsilon'_0$) je suma deformacije uzrokovano početnim stiskom uzoraka pritiskim tijelom i početnim elastičnim napreznjem. S ciljem određivanje deformacije uzrokovano namještanjem uzoraka na stroju, područje kod dijagrama, gdje odnos između napreznja i deformacije je linearni (elastično područje), odabrane su dvije točke (T_1 i T_2) kroz koje je određena linearna funkcija oblika.

$$\sigma_{el} = \sigma_0 + E \cdot \varepsilon''_e, \quad (4)$$

4. MATERIJALI I METODE ISTRAŽIVANJA

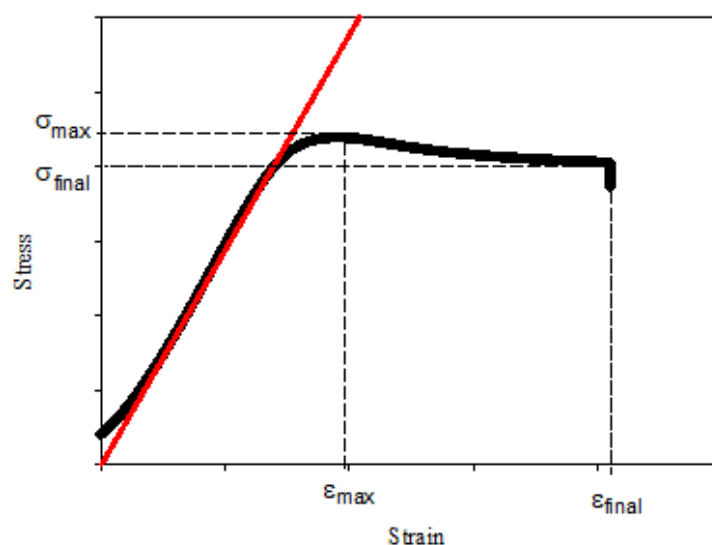
σ_{el} je elastično naprezanje (Pa), ε'_e je elastična deformacija i E je modul elastičnosti (Pa). Izjednačavanjem linearne funkcije s nulom, početno naprezanje određuje se (jednadžba 5)

$$\varepsilon_0 = -\frac{\sigma_0}{E} . \quad (5)$$

ε_0 je sekcija linearne funkcije na x osi. Deformacija u intervalu $[0, \varepsilon_0]$ rezultat je namještanja uzorka (Radmanović at all).

Naprezanje – deformacija dijagram je transliran lijevo.

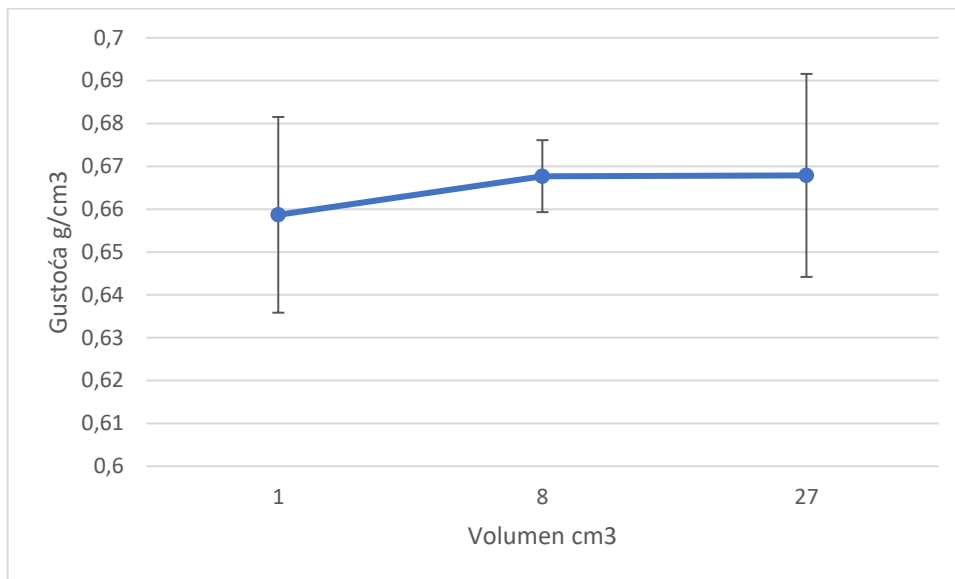
$$\varepsilon_0 \rightarrow 0, \sigma_0 \rightarrow 0, \varepsilon_{max} = \varepsilon'_{max} - \varepsilon_0 \text{ and } \varepsilon_{final} = \varepsilon'_{final} - \varepsilon_0 . \quad (6)$$



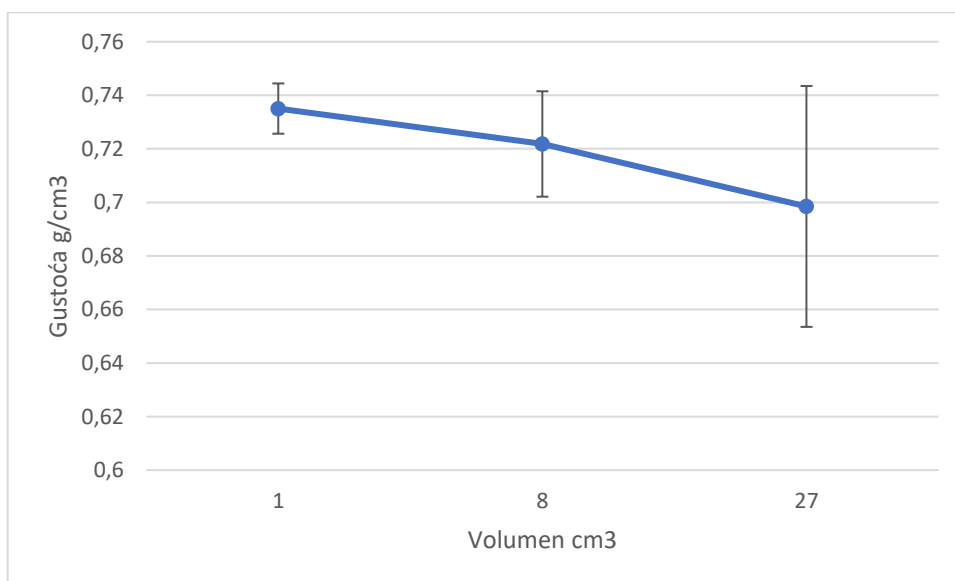
Slika 5: Naprezanje – deformacija dijagram nakon translacije početne točke

5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM

Slike 6, 7 i 8 prikazuju odnose gustoća uzoraka drva s porastom volumena uzoraka. Na slici 6, vidljivo je kod hrastovine, da porastom volumena, gustoća pomalo raste, ali skoro da se ne mijenja, što se vidi kroz standardne devijacije. Na slici 7, vidljivo je kod bukovine da porastom volumena, gustoća pomalo raste gledajući srednje vrijednosti, ali standardna devijacija nam prikazuje da se u stvari gustoća ne mijenja. Na slici 8 vidljivo je kod jelovine da porastom volumena raste gustoća.

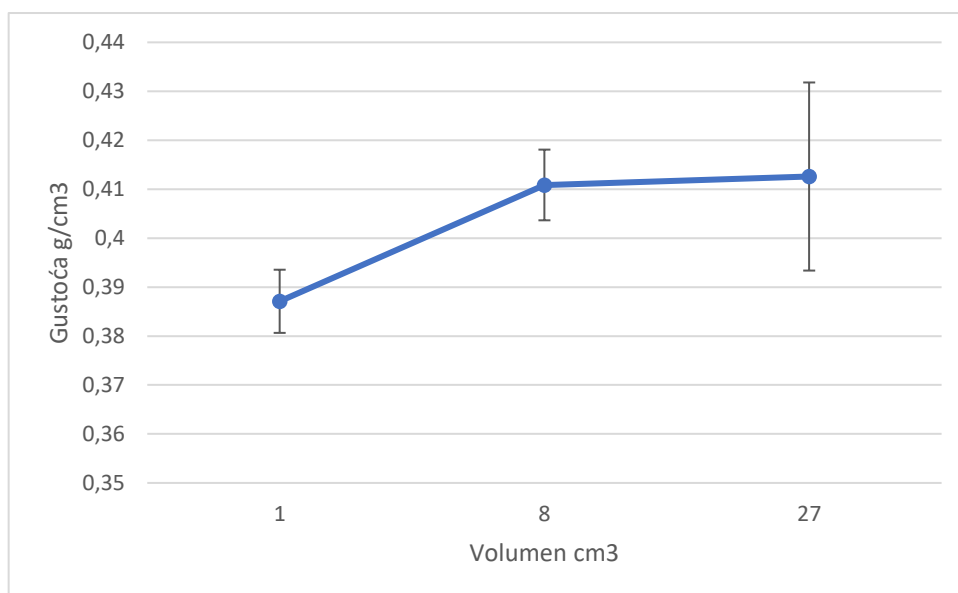


Slika 6. Dijagram odnosa gustoća uzoraka za različite volumene uzoraka hrastovine



Slika 7. Dijagram odnosa gustoća uzoraka za različite volumene uzoraka bukovine

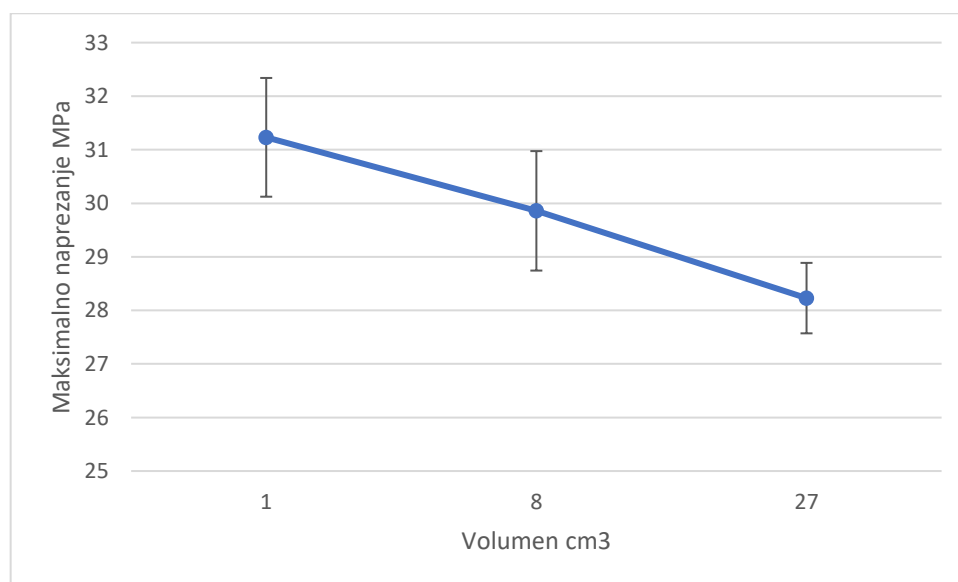
5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM



Slika 8. Dijagram odnosa gustoća uzoraka za različite volumene uzoraka jelovine

Najveću gustoću među uzorcima imaju uzorci bukovine, a najmanju uzorci jelovine. Kod jelovine, gustoća je manja zbog mase, koja se može objasniti njezinom mikroskopskim sadržajem, to jest, četinjače po strukturi nisu porozne i jednostavnije su građene.

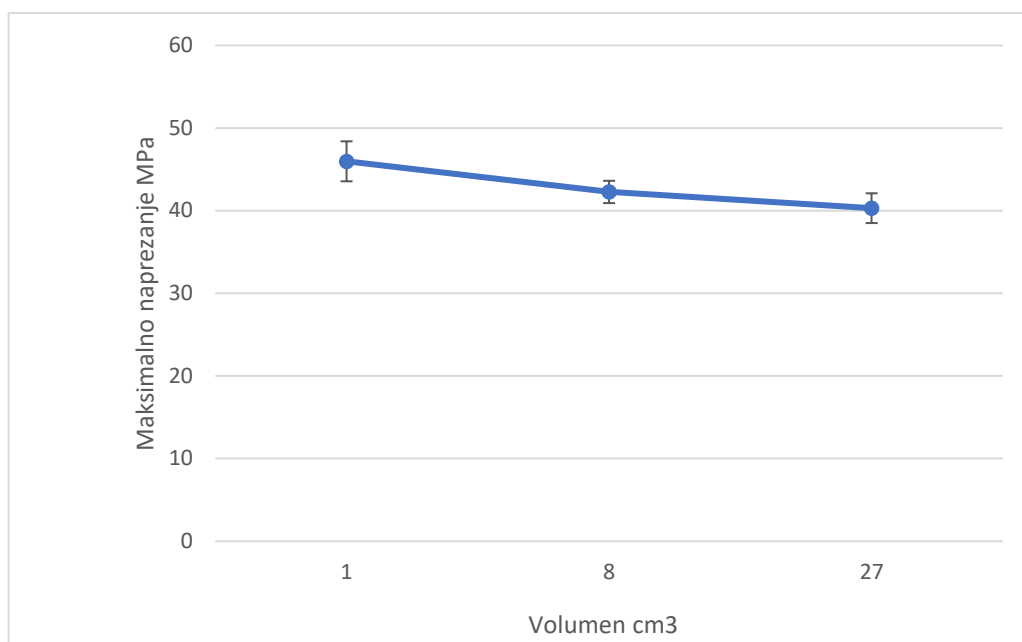
Slike 9, 10 i 11 prikazuju odnose maksimalnih napreznja pri određenim volumenima uzoraka. Vrijednost maksimalnog napreznja kod hrastovine (slika 9) pada što su volumeni uzoraka veći.



Slika 9: Dijagram odnosa maksimalnih napreznja uzoraka za različite volumene uzoraka hrastovine

Vrijednost maksimalnog napreznja kod bukovine (slika 10) pada što su volumeni uzoraka veći.

5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM

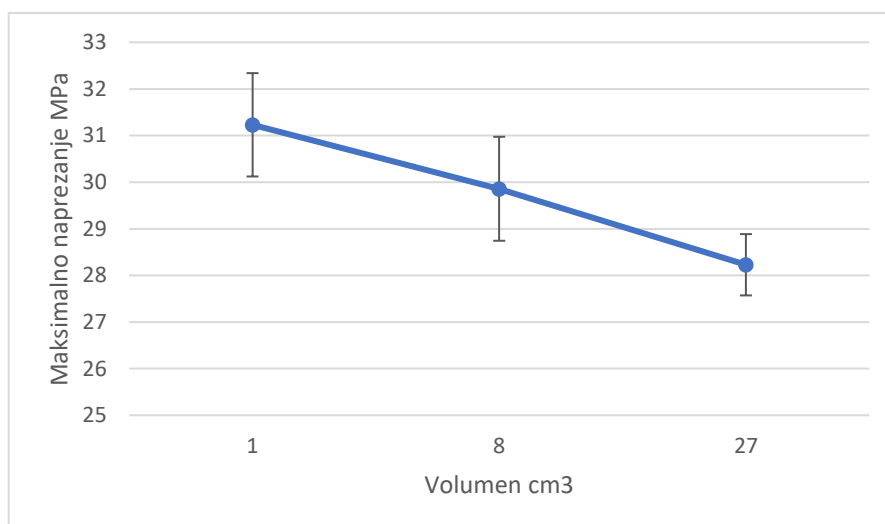


Slika 10: Dijagram odnosa maksimalnih naprezanja uzoraka za različite volumene uzoraka bukovine

Vrijednost maksimalnog naprezanja kod jelovine (slika 11) pada što su volumeni uzoraka veći, ali za razliku od hrastovine i bukovine, standardne devijacije su veće. Obzirom da je jelovina četinjača, koja ima jednostavniju anatomsku strukturu od hrastovine i bukovine, koje su listače, moglo bi se pretpostaviti da jelovina zbog te strukture ima manji otpor naprezanju, te time dolazi do veće devijacije. Naprezanje koja se računa po formuli a, vidljivo je da povećanjem površine uzorka na kojem djelujemo silom F , koja je proporcionalno povećavala, smanjuje se naprezanje, a i time maksimalno naprezanje.

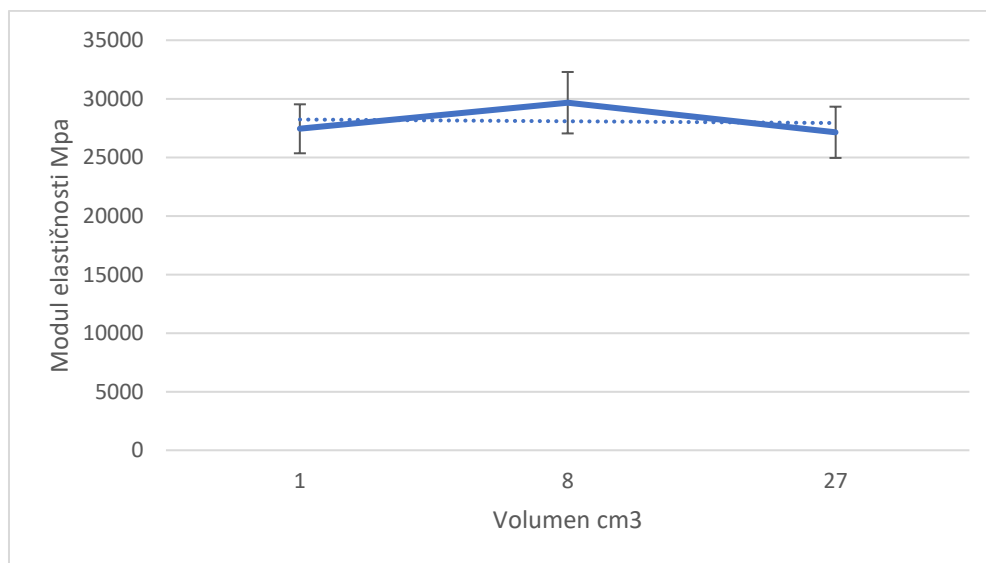
Maksimalna naprezanja kod jelovine (slika 11) su najmanji te imaju najveće standardne devijacije. Odnosi maksimalnih naprezanja s povećanjem volumena uzoraka kod hrastovina i bukovina su prilično jednaki.

5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM



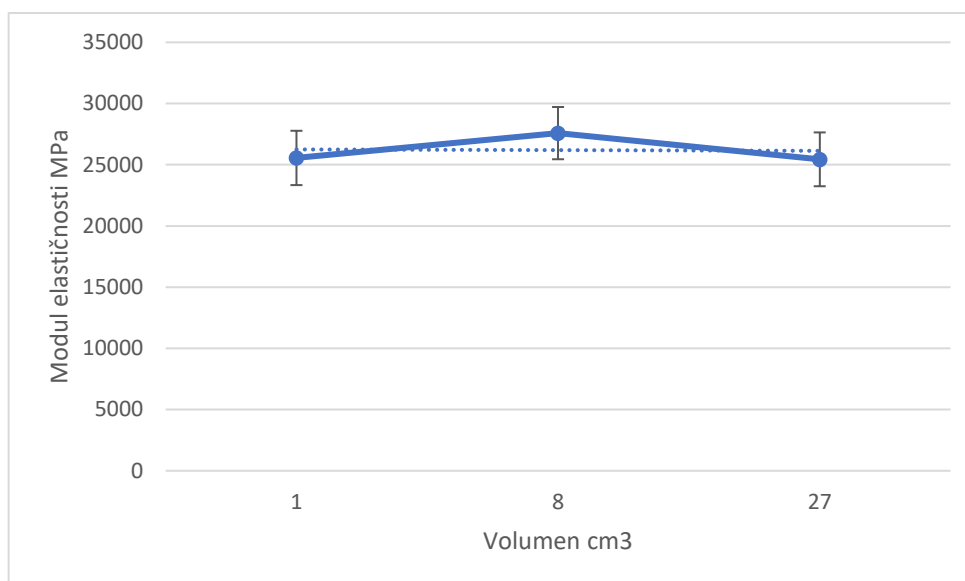
Slika 11: Dijagram odnosa maksimalnih napreznja uzoraka za različite volumene uzoraka jelovine

Slike 12, 13 i 14 prikazuju odnose module elastičnosti s povećanjem volumena uzoraka te njihove standardne devijacije. Na slikama je vidljivo da kod uzoraka od 8 cm³ moduli elastičnosti rastu, ali kod uzoraka volumena od 27 cm³ padaju. Razlozi nisu istraživani u ovom završnom radu.



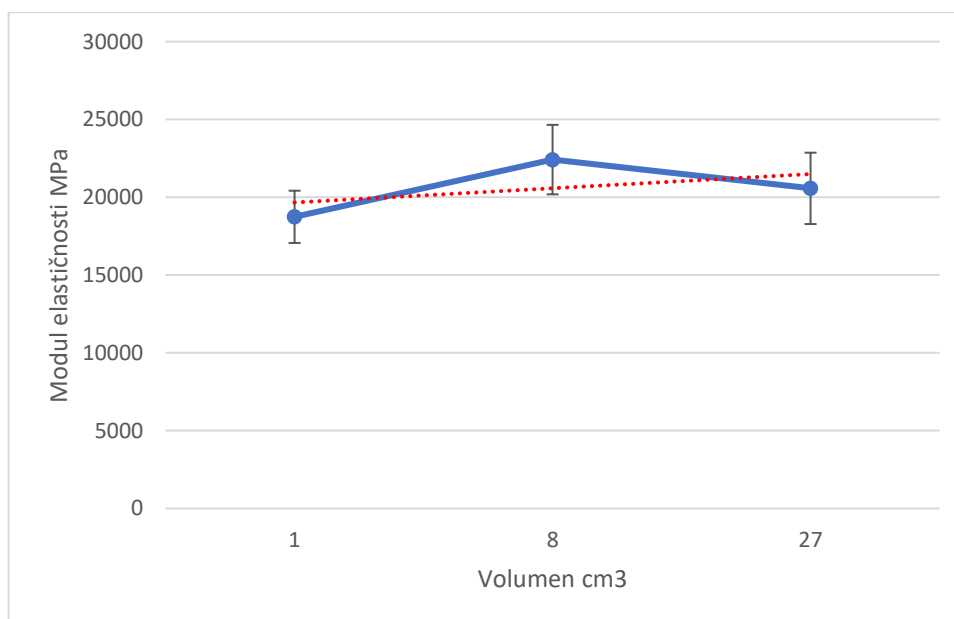
Slika 12: Dijagram odnosa modula elastičnosti (E) s povećanjem volumena uzoraka hrastovine

5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM



Slika 13: Dijagram odnosa modula elastičnosti (E) za različite volumene uzoraka bukovine

Najveći moduli elastičnosti su kod hrastovine volumena od 8 cm³, a najmanji kod jelovine volumena od 1 cm³ (slika 14). Kod jelovine, vidljiv je pozitivan trend rasta dok kod listača nejasno je li trend pozitivan ili negativan.



Slika 14: Dijagram odnosa modula elastičnosti (E) za različite volumene uzoraka jelovine

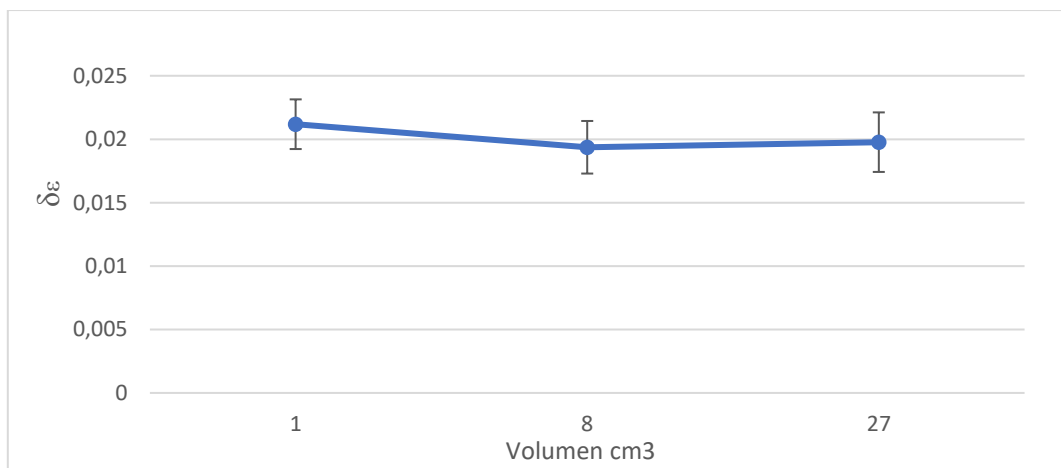
Razlika maksimalne deformacije ϵ_{maks} i početne deformacije $\epsilon_{\text{poč}}$ se računa prema jednadžbi 7, gdje je δ_ϵ pokazuje koliko će pravac tangente biti nagnut. Što je razlika manja, to pravac teži pravom kutu, što je razlika veća, kut pravca će biti manji, a time modul elastičnosti veći što je prikazano jednadžbom 8.

5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM

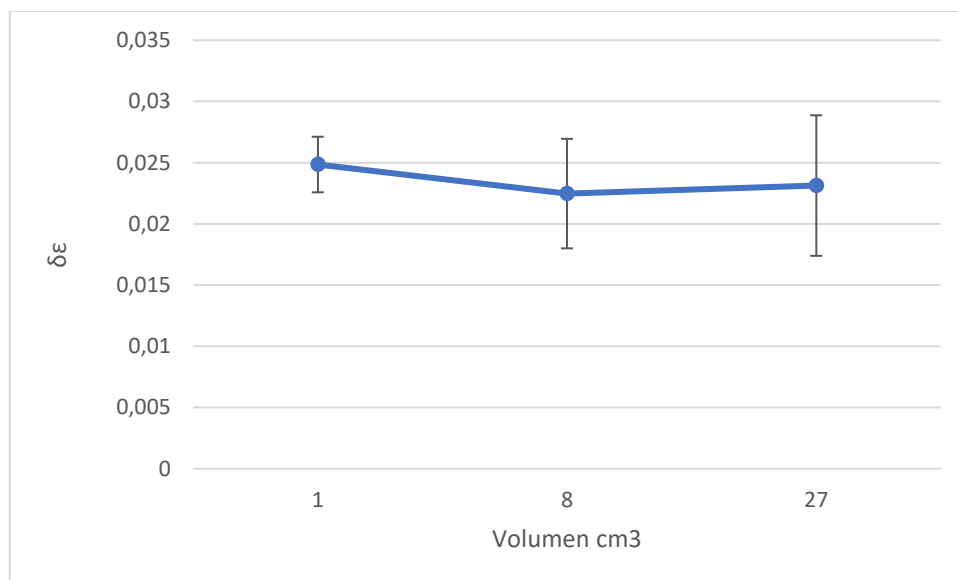
$$\delta_\varepsilon = \varepsilon_m - \varepsilon_{poč} \quad (7)$$

$$E = \tan \alpha \quad (8)$$

Slike 15, 16 i 17 prikazuju odnose δ_ε s povećanjem volumena uzoraka. Na slici 15, vidljivo je da kod hrastovine, δ_ε opada, ali ne drastično. Na slici 16, vidljivo je da kod bukovine, δ_ε opada, ali ne drastično. Na slici 17, vidljivo je da kod jelovine, δ_ε opada, ali ne drastično.

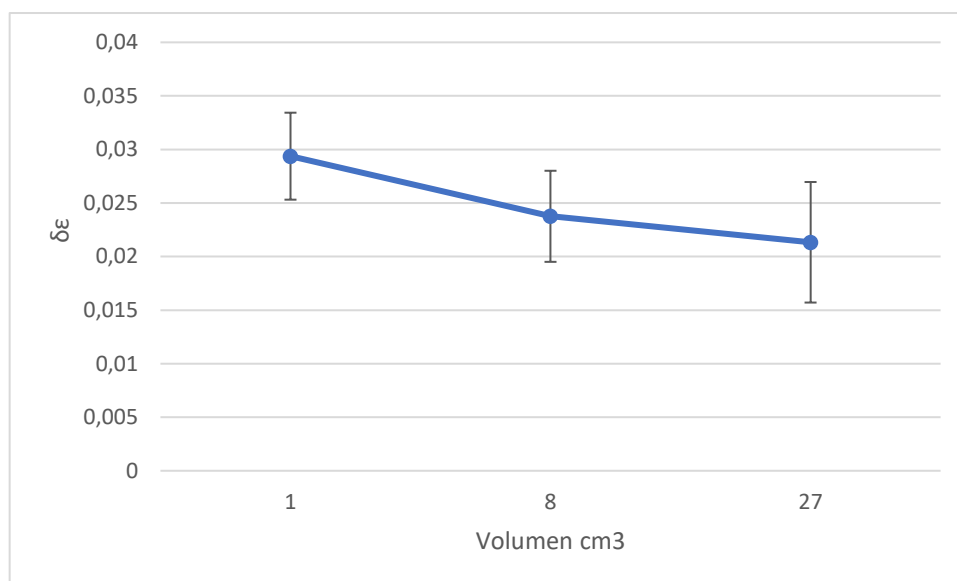


Slika 15: Dijagram odnosa δ_ε za različite volumene uzoraka hrastovine



Slika 16: Dijagram odnosa δ_ε za različite volumene uzoraka bukovine

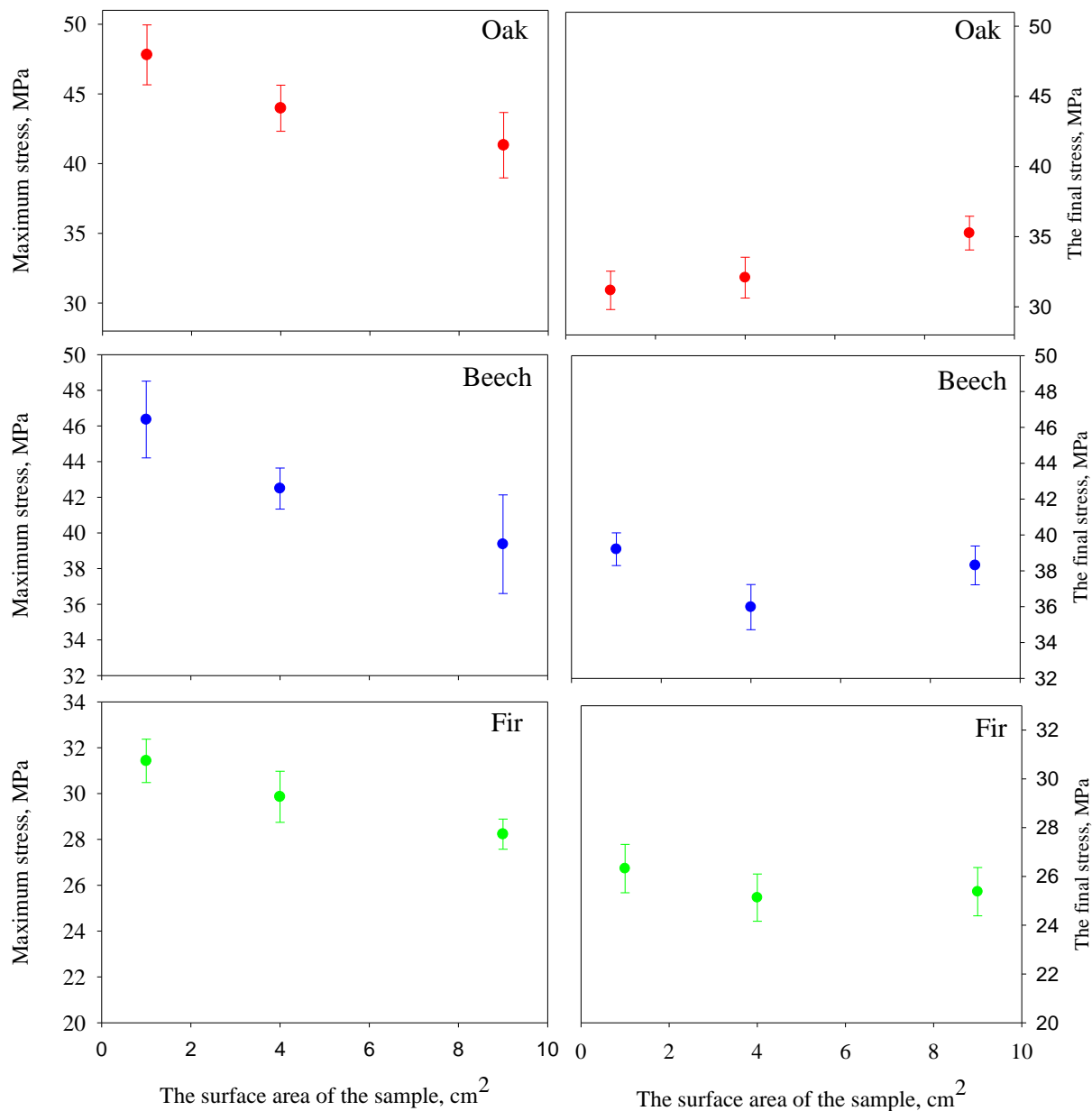
5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM



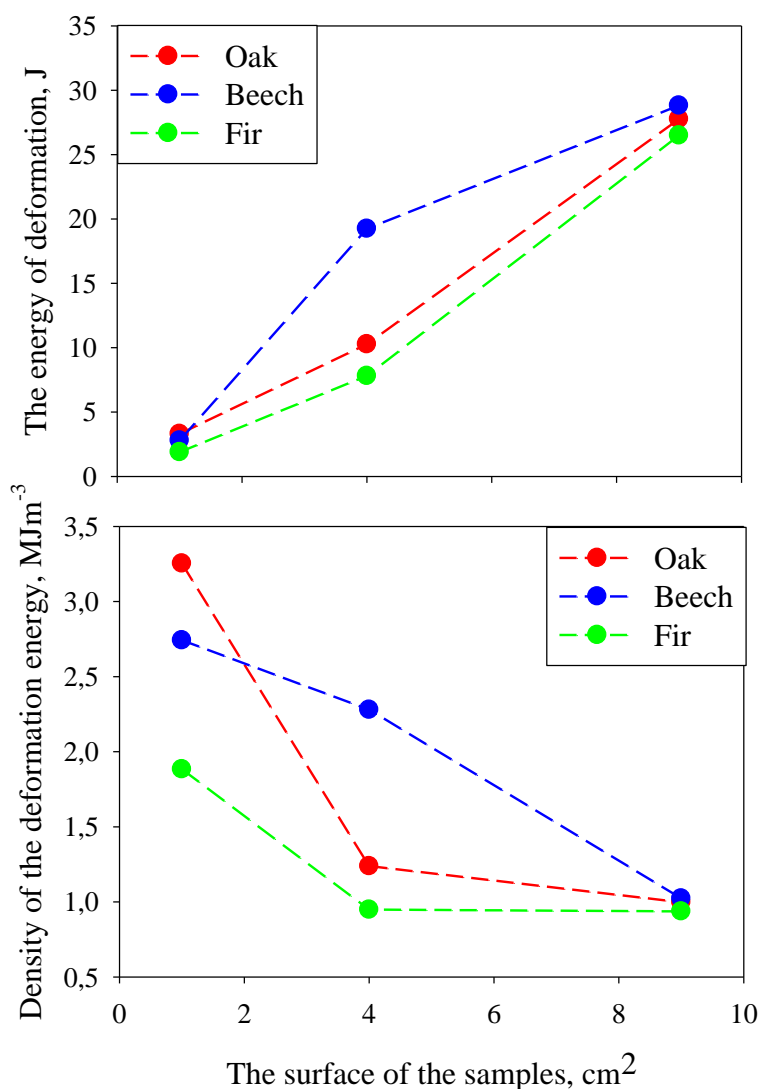
Slika 17: Dijagram odnosa δ_ϵ za različite volumene uzoraka jelovine

Najveće i najmanje iznose standardnih devijacija δ_ϵ imaju uzorci jelovine. U prosjeku kod svih vrsta drva δ_ϵ opada što je veći volumen uzorka.

5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM



Slika 18: Dijagrami odnosa maksimalnih naprezanja za različite površine uzoraka drva (lijevi dijagrami), dijagrami odnosa konačnih naprezanja za različite površine uzoraka drva (desni dijagrami), oak-hrastovina, beech – bukovina, fir - jelovina



Slika 19: Dijagram (gornji) energije deformacije za različite površine uzoraka hrastovine, bukovine i jelovine, dijagram (donji) gustoća deformacijske energije

Na slici 18 vidljivo je kod hrastovine da se konačno naprezanje uzastopno povećava što su veće dimenzije uzoraka. Uzorci bukovine površina od 4 cm² imaju manje konačno naprezanje nego od uzoraka bukovine površina od 1 cm². Uzorci jelovine imaju najmanje izmjereno konačno naprezanje dok uzorci bukovine imaju najveću. Uzorci jelovine s porastom površine uzoraka, drastično se ne mijenjaju.

Na slici 19 vidljivo je da porastom dimenzije uzoraka, potrebna je što veća energija da se uzorak deformira. Najveću energiju su postigli uzorci bukovine, a najmanju uzorci jelovine. Može se još primijetiti da početne i krajnje točke uzoraka svih vrsta drva prilično imaju iste iznose energije. U donjem dijagramu vidljivo je da se gustoća deformacijske energije smanjuje s porastom dimenzije uzoraka. Gustoća deformacijske energije pokazuje koliko su gusto čestice deformacijske energije zbijene i po tome se može zaključiti da što je manji uzorak, prostor da se čestice rasprše je manji, i time gustoća deformacijske energije je veća. Najveću gustoću deformacijske

5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM

energije imali su uzorci hrastovine, a time i veliki pad gustoće. Kod uzoraka bukovina, pad je postepen, gdje kod dimenzija od 4 cm² ima najveću gustoću deformacijske energije za razliku od hrastovina i jelovina. Najmanju gustoću deformacijske energije imaju uzorci jelovina koji su svi manji nego hrastovine i bukovine u svim dimenzijama uzoraka. Krajnje točke uzoraka dimenzija od 9 cm² su prilično istih iznosa za sve vrste drva.

6. ZAKLJUČAK

1. Tlačna svojstva drva ovise o volumena uzoraka.
2. Povećanjem volumena uzoraka, gustoća hrastovine i bukovine se gotovo ne mijenja dok kod jelovine raste.
3. Povećanjem volumena uzoraka, opada maksimalno naprezanje.
4. Povećanjem volumena uzoraka, modul elastičnosti raste.
5. Povećanjem volumena uzoraka, δ_ϵ opada.
6. Povećanjem volumena uzoraka, konačno naprezanje raste.
7. Povećanjem volumena uzoraka, potrebna je veća energija da se uzorak deformira.
8. Povećanjem volumena uzoraka, smanjuje se gustoća deformacijske energije.

LITERATURA

1. Angst, V.; Arne Malo, K., 2012.: Effect of self-tapping screws on moisture induced stresses in glulam. *Engineering Structures*, 45: 299-306.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.06.048>
2. FOREST PRODUCTS LABORATORY., 1999., Wood handbook—Wood as an engineering material. Gen. Tech. Rep. FPL—GTR—113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 463 p.
3. Horvat I., Krpan J., 1967., *Drveno industrijski priručnik*, Tehnička knjiga Zagreb.
4. Petrić B., Špoljarić Z., Opačić I., Horvat I., Krpan J., 1987., *Osnovne nauke o drvu i izrada proizvoda iz masivnog i usitnjenog drva*, Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, str. 50.
5. Petrić B.; Trajković J., 2019., *Drvena industrija*, 70: str. 9.
6. Požgaj A.; Chovanec D.; Kurjatko S.; Babiak M, 1993.: *Štruktúra a vlastnosti dreva*, PRÍRODA a.s., Bratislava, str 295 – 386.
7. Radmanović K., 2015., *Utjecaj mehaničkih svojstava drva na snagu potrebnu za odvajanje čestice pri ortogonalnom rezanju*, Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
8. Sliker A., 1972., *Young's modulus parallel to the grain in wood as a function of strain rate, stress level and mode of loading*, Department of Forestry, Michigan State University
9. Trajković J., Despot R., 2019., *Drvena industrija*, 70, str. 23 i 47.
10. Korkmaz, O., Büyüksarı, Ü., 2019. *Effects of Moisture Content on Mechanical Properties of Micro-size Oak Wood*. *BioResources*; Vol 14, No 4 (2019).
11. Krauss, A., 2009. *On some aspects of a relation between density and mechanical properties of wood in longitudinal direction*. *Acta Scientiarum Polonorum Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria* 8, 55–65.
12. Newlin, J.A., Wilson, T.R.C., 1919. *The relation of the shrinkage and strength properties of wood to its specific gravity*. U.S. Dept. of Agriculture, Forest Products Laboratory Medison.
13. Wolcott, M.P., Kasal, B., Kamke, F.A., Dillard, D.A., 2007. *Testing small wood specimens in transverse compression*. *Wood and Fiber Science* 21, 320–329.
14. Zhang, S., 1994. *Mechanical Properties In Relation To Specific Gravity In 342 Chinese Woods*. *Wood and Fiber Science* 26, 512–526.