Utjecaj brzine opterećenja na čvrstoću na tlak paralelno sa vlakancima bukovine

Vergot, Tihana

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:108:091097

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

University of Zagreb Faculty of Forestry and Wood Technology

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
ŠUMARSKI FAKULTET
DRVNOTEHNOLOŠKI ODSJEK

PREDDIPLOMSKI STUDIJ
DRVNA TEHNOLOGIJA

TIHANA VERGOT

UTJECAJ BRZINE OPTEREĆENJA NA ČVRSTOĆU NA TLAK PARALELNO SA VLAKANCIMA BUKOVINE

ZAVRŠNI RAD

ZAGREB, RUJAN, 2018.

PODACI O ZAVRŠNOM RADU

AUTOR:	Tihana Vergot 25.1.1997., Karlovac 0068226677
NASLOV:	Utjecaj brzine opterećenja na čvrstoću na tlak paralelno sa vlakancima bukovine
PREDMET:	Tehnička svojstva drva 2
MENTOR:	Prof.dr.sc. Tomislav Sinković
IZRADU RADA JE POMOGAO:	Dr.sc. Kristijan Radmanović
RAD JE IZRAĐEN:	Sveučilište u Zagrebu - Šumarski fakultet
AKAD. GOD.:	2017./2018.
DATUM OBRANE:	14.9.2018.
RAD SADRŽI:	Stranica: 29 Slika: 19 Tablica: 1 Navoda literature: 21

SAŽETAK:

Drvo, kao jedan prirodni polimerni biomaterijal svoju primjenu nalazi u raznim područjima, zbog čega je izrazito bitno poznavati njegova mehanička svojstva. Na mehanička svojstva drva utječe više faktora, a jedan od njih je i brzina nanošenja opterećanja. Norma (DIN EN 408) propisuje brzinu ispitivanja 0,0005l_0 mm/min (l_0 je početna dimenzija uzoraka), a poznato je da drvo u svojoj primjeni bude izloženo i znatno bržim opterećenjima. U ovom završnom radu izvedena su teorijska i eksperimentalna istraživanja utjecaja brzine nanošenja opterećenja na mehanička svojstva drva. Obzirom na heterogenu građu drva, analiziran je utjecaj brzine ispitivanja na mehanička svojstva u longitudinalnom smjeru. Vrsta drva odabrana za analiziranje je bukovina, kao najraširenija vrsta drva u Hrvatskoj. U prvom dijelu rada teorijski je analizirano elastično i plastično područje dijagrama ovisnosti naprezanje deformacija pri tlačnom djelovanju sile u longitudinalnome smjeru. U eksperimentalnom dijelu rada ispitana su tlačna svojstava uzoraka bukovine u longitudinalnome smjeru, a brzina nanošenja opterećenja je varirana od 100 do 500 mm / min.

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

_____

Tihana Vergot

U Zagrebu, 14. rujna 2018.

POPIS OZNAKA

A - površina

a - koeficijent kvadratne jednadžbe

b - koeficijent kvadratne jednadžbe

c - koeficijent kvadratne jednadžbe

Δx - pomak

Δl - promjena duljine

E - modul elastičnosti

e_{el} - specifična energija elastične deformacije

e_{pl} - specifična energija plastične deformacije

ε - deformacija

ε_{max} - maksimalna deformacija

$\varepsilon_{t.p.}$ - deformacija u točki proporcionalnosti

F - sila

k - konstanta opruge

K_{max} - maksimalna vrijednost tangentnog modula

$\overline{K}$ - srednja vrijednost tangentnog modula

l_0 - početna duljina

σ_0 - početno naprezanje

σ_{max} - maksimalno naprezanje

$\sigma_{t.p.}$ - naprezanje u točki proporcionalnosti

x - visina uzorka

y - širina uzorka

z - debljina uzorka

SADRŽAJ

1. UVOD 1
1.1. Mikroskopska i makroskopska građa drva 1
1.2. Mehanička svojstva drva 4
2. CILJ RADA 7
3. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA 8
4. MATERIJALI I METODE (PLAN RADA) 10
4.1. Materijali 10
4.2. Metode 11
4.2.1. Modul elastičnosti 13
4.2.2. Tangentni modul 14
4.2.3. Specifična energija elastične i plastične deformacije 16
4.2.4. Deformacija u točki proporcionalnosti 17
5. REZULTATI 18
6. ZAKLJUČCI 25
7. ZAHVALE 26
LITERATURA 27
POPIS SLIKA 28

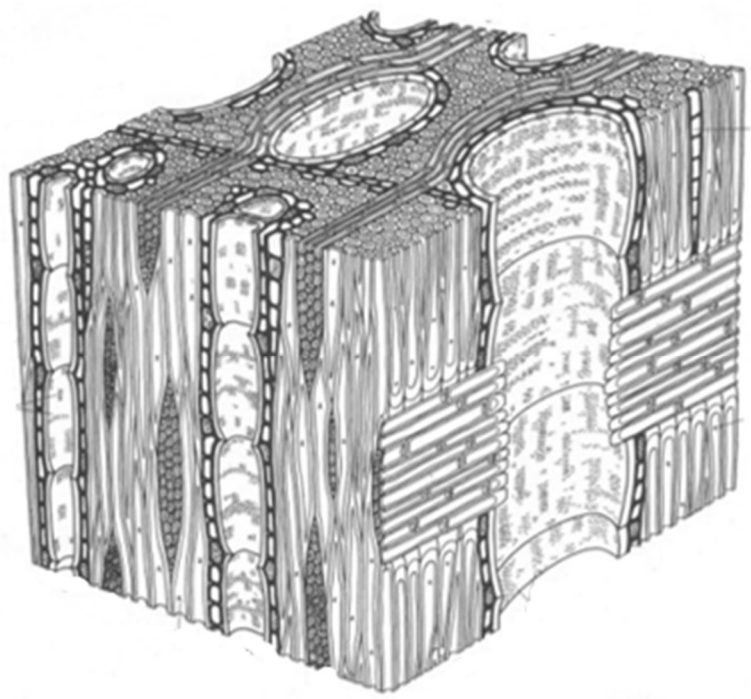
1. UVOD

Drvo je kao materijal za opremanje prostora ili izradu građevinske stolarije jako često korišten, kako zbog svojih estetskih svojstava, tako i zbog mehaničkih i fizičkih svojstava koji ga čine trajnim i otpornim na razne utjecaje. Jedan od utjecaja koji mogu djelovati na drvo u uporabi je tlačno opterećenje, bilo to prilikom hodanja po drvenom parketu ili kod odlaganja predmeta na drvene stolove. U ovome radu biti će opisano drvo kao takvo, te ponašanje drva kod primjene tlačnog opterećenja. Mehanička svojstva koja su predmet ovog rada su modul elastičnosti, tangentni modul, specifična energija te deformacija u točki proporcionalnosti.

1.1. Mikroskopska i makroskopska građa drva

Drvo je materijal izuzetno složene građe koja utječe na fizička i mehanička svojstva drva u uporabi. Građa drva može se promatrati na mikroskopskoj i makroskopskoj razini. Također, u ovisnosti o anatomskoj građi, drvo se dijeli na drvo listača, koje je tvrdo drvo, i drvo četinjača, odnosno meko drvo.

Gledajući mikroskopsku razinu drva listače, koje je predmet istraživanja, drvo se sastoji od traheja ranog i kasnog drva, višerednih i jednorednih homocelularnih lećastih trakova drva, nizova stanica aksijalnog parenhima, libriformskih vlakanca i ograđenih jažica (Špoljarić, 1978) (slika 1).



Slika 1. Prostorni prikaz histološke građe drva listača, povećanje 225x

Izvor: Špoljarić, 1978

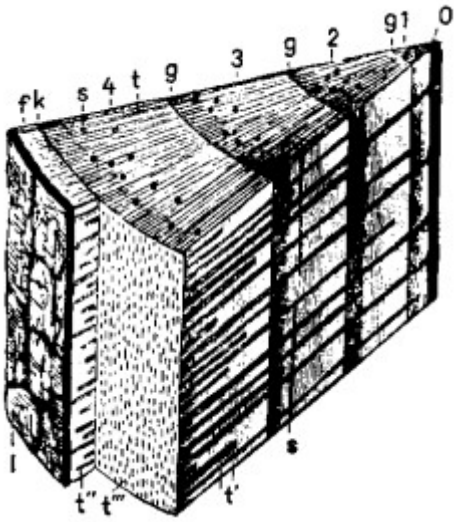
Makroskopske karakteristike drva su one koje zapažamo običnim okom ili uz pomoć povećala do približnih povećanja od 20 puta. Budući da se stvaranjem drva u stablu oblikuje valjkasto tijelo s centralnom uzdužnom osi simetrije, za potpuno upoznavanje građe drva potrebna su tri međusobno okomita presjeka: poprečni, tangentni i radijalni (slika 2). Poprečni je presjek okomit na smjer protezanja uzdužne osi debla i grane. Tangentni i radijalni presjeci paralelni su sa smjerom protezanja osi, pri čemu radijalni presjek prolazi kroz centralnu uzdužnu os, a tangentni presjek dodiruje plašt valjka, odnosno plašt debla ili grane (Trajković i Šefc, 2017).



Slika 2. Shematski prikaz drvnog valjka u tri osnovna presjeka

Izvor: Špoljarić, 1978

Na slici 3 vidljivi su elementi makroskopske građe drva: (0) srčika, (1-4) godovi drva, (f) živa kora-floem, (l) mrtva kora, (g) granica goda, (s) smolenica, (t) drvni traci, (k) kambij (Špoljarić i Petrić, 1980).

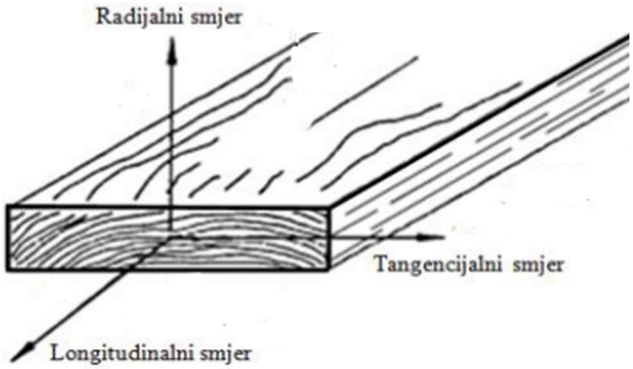


Slika 3. Isječak iz četverogodišnje stabljike bijelog bora (Pinus sylvestris) sa tri osnovna presjeka

Izvor: Špoljarić i Petrić, 1980

1.2. Mehanička svojstva drva

Obzirom na građu, drvo se može svrstati u ortotropne[1] materijale (FPL, 1999) čija su mehanička svojstva izražena u tri istaknuta smjera: longitudinalnom, tangencijalnom i radijalnom (4).

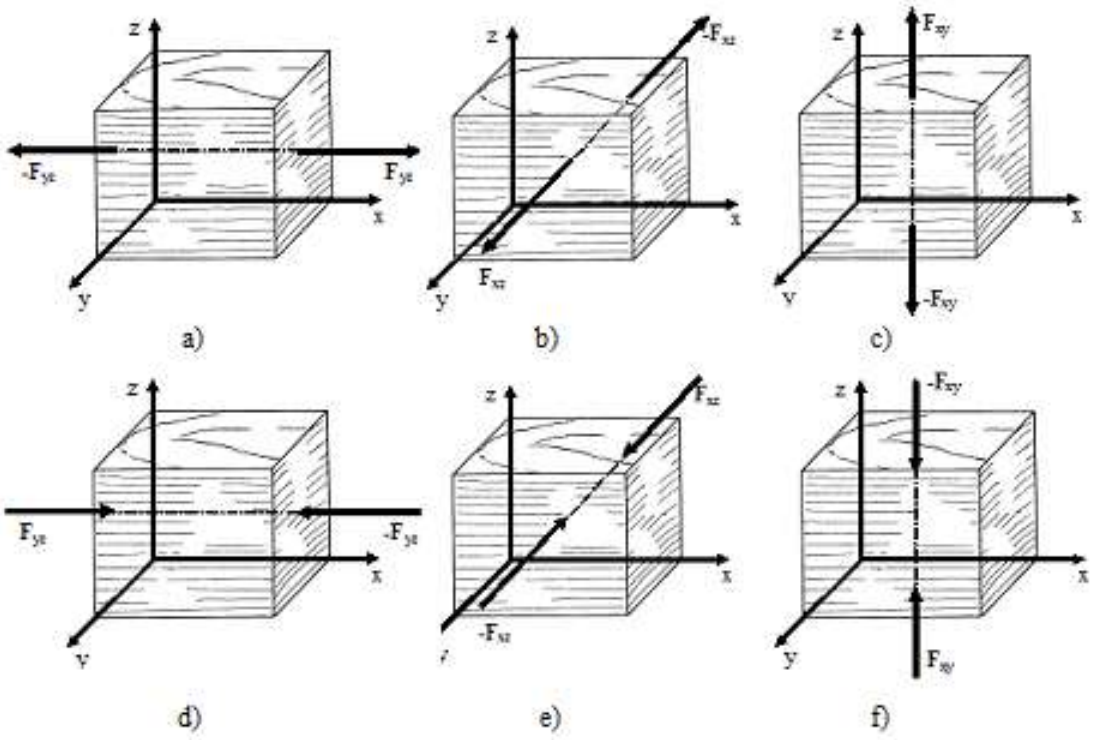


Slika 4. Smjerovi u drvu

Izvor: FPS, 2010

Vanjska sila koja djeluje na uzorak drva mijenja oblik tog uzorka, a samim time i njegove dimenzije. Sila na drvo može djelovati tlačno i vlačno (slika 5); ukoliko smjer sile zatvara kut od 0° s jednim istaknutim smjerom radi se o vlačnom djelovanju sile, a ako smjer djelovanja sile zatvara kut od 180° s jednim istaknutim smjerom, tada se radi o tlačnom djelovanju sile. Također, ako sila djeluje u jednom smjeru, tada se radi o jednoosnom stanju naprezanja, dok sila koja djeluje u tri istaknuta smjera uzrokuje troosno stanje naprezanja.

[1] Ortortopni - ortogonalno izotropni, materijal kojemu se svojstva razlikuju obzirom na smjerove, a svojstva u određenim smjerovima su ista



Slika 5. Prikaz djelovanja sile okomito na površinu drva: a) vlačno naprezanje u longitudinalnom smjeru, b) vlačno naprezanje u radijalnom smjeru, c) vlačno naprezanje u radijalnom smjeru, d) tlačno naprezanje u longitudinalnom smjeru, e) tlačno naprezanje u radijalnom smjeru, f) tlačno naprezanje u radijalnom smjeru

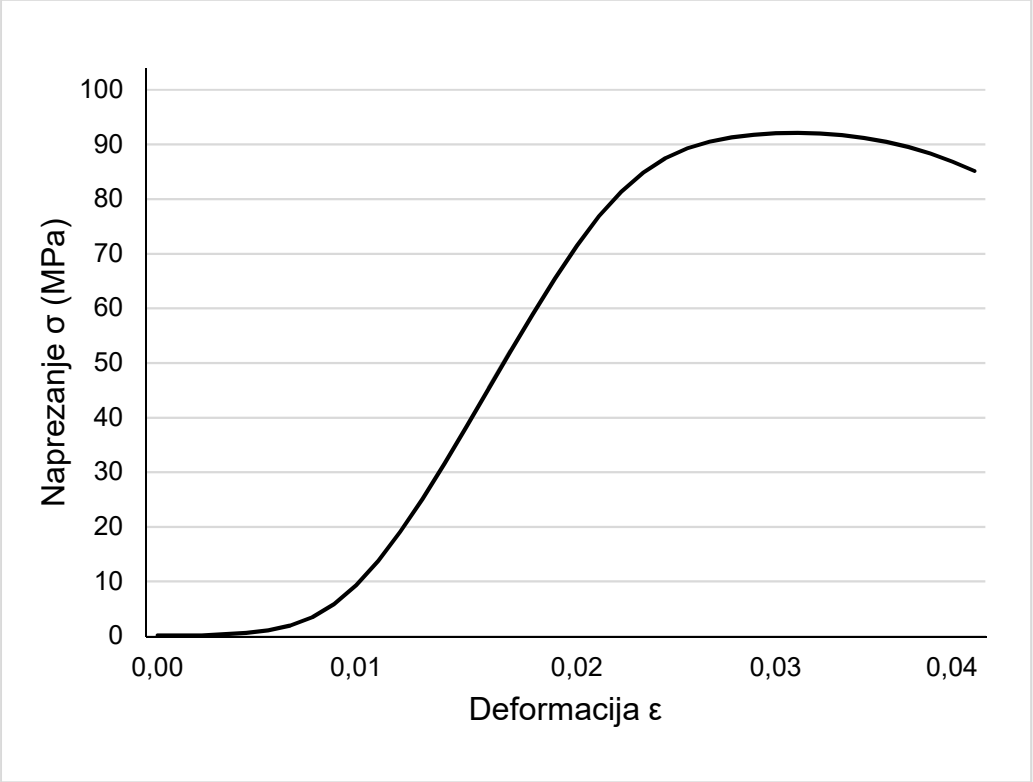
Izvor: Radmanović, 2015

Predmet ovog istraživanja bilo je tlačno naprezanje u longitudinalnom smjeru koje uzrokuje elastičnu, odnosno plastičnu deformaciju. Elastičnost je svojstvo materijala da se uslijed deformacije uzrokovane djelovanjem vanjskog naprezanja vrati u svoj prvobitni oblik nakon prestanka djelovanja naprezanja (Vadlja, 2011.). Hookeovim zakonom pomoću konstante opruge i pomaka opruge opisana je sila, te glasi:

$$F = -k \times \Delta x. \qquad (1)$$

Plastičnost se opisuje kao deformacija materijala uslijed djelovanja vanjskih sila na takav način da se on ne može vratiti u svoj prijašnji oblik, odnosno kao trajna deformacija materijala koja uzrokuje promjenu oblika i volumena uzorka (Basar, 2000) do kojeg dolazi zbog specifične građe drva, u odnosu na druge materijale.

Iz dijagrama međuovisnosti naprezanja i deformacije (slika 6) mogu se saznati mehanička svojstva ispitivanog uzorka drva.



Slika 6. Dijagram međusobne ovisnosti naprezanja i deformacija pri tlačnom djelovanju sile u longitudinalnom smjeru

Na dijagramu prikazanom na slici 6 apscisu predstavlja deformacija koja se definira kao omjer promjene duljine uzorka i početne duljine uzorka, te se opisuje izrazom:

$$\varepsilon = \frac{|-\Delta l|}{l_0} \tag{2}$$

Na ordinati se nalaze vrijednosti naprezanja koje se definira kao omjer sile i površine na koju sila djeluje, odnosno opisuje izrazom:

$$\sigma = \frac{|-F|}{A} \tag{3}$$

2. CILJ RADA

Hipoteza:

- mehanička svojstva drva ovisna su o brzini nanošenja opterećenja,
- elastično područje dijagrama naprezanje – deformacija može se aproksimirati linearnom funkcijom,
- dio plastičnog područja dijagrama naprezanje – deformacija može se aproksimirati funkcijom drugog reda.

Ciljevi rada:

- određivanje linearne funkcije u elastičnom području dijagrama naprezanje – deformacija,
- određivanje funkcije drugog reda u plastičnom području dijagrama naprezanje – deformacija,
- određivanje ovisnosti elastičnih svojstava bukovine (modul elastičnosti, specifična energija i snaga elastične deformacije) o brzini nanošenja opterećenja,
- određivanje ovisnosti plastičnih svojstava bukovine (tangentni modul i specifična energija plastične deformacije) o brzini nanošenja opterećenja.

3. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Svojstva drva i uvjeti pod kojima se ona mijenjaju važan su faktor kod odabira vrste drva za određenu svrhu ili kod odabira alata za obradu tog drva. Na temu promjene svojstava drva u ovisnosti o promjeni načina, brzine i ostalih parametara prilikom nanošenja tlačnog ili vlačnog opterećenja napravljena su brojna istraživanja.

Büyüksarı, As, Dündar i Sayan (2016) u svom članku su opisivali promjene čvrstoće na savijanje i module elastičnosti bora (*Pinus sylvestris L.*) u ovisnosti o promjeni veličine uzorka koji se ispituje. Uzorke su uzimali iz osam trupca koja su prepilili na visini 0,3 m i na 3,3 m kako bi iz njih dobili piljenice duge 3 m, a debele 6 cm. Veličina standardnog uzorka bila je 20 mm x 20 mm x 360 mm, a veličina mikro uzorka bila je 0,8 - 1,2 mm x 5 mm x 50 mm. Prosječni modul elastičnosti za uzorke standardne veličine iznosio je 9917 MPa, dok je za mikro uzorke iznosio 2884 MPa. I kod čvrstoće na savijanje veći prosječan iznos je izmjeren kod uzorka standardne veličine te iznosi 72,8 MPa, a kod mikro uzoraka 62,4 MPa. Ovim istraživanjem je otkriveno da i standardni i mikro uzorci imaju linearan rast modula elastičnosti i čvrstoće na savijanje, stoga se rezultati dobiveni ispitivanjem mikro uzoraka mogu koristiti za procjenu istih svojstava kod bora, kada nije moguće izvršiti ispitivanje na uzorcima standardnih dimenzija.

Osim samog drva, u praksi se sve više koriste i drvno plastični kompoziti, čija svojstva su u svom članku ispitivali Brandt i Fridley (2003). Četiri uzorka koja su korištena za ispitivanje su kombinacije drva (bor, *Pinus sylvestris L.,* i javor, *Acer spp.*), polivinil klorida ili polietilena te u nekim slučajevima aditiva. Nanošenje opterećenja na uzorke je podijeljeno u dva dijela, od 4,6 mm/min do 62,5 mm/min, te od 62,5 mm/min do 254 mm/min. Zaključeno je da se svojstva uzorcima mijenjaju samo do opterećenja kod 62,5 mm/min, dok se do 254 mm/min mijenjaju neznatno ili ostaju ista. Također, obzirom da se ispitivanje radilo prema metodi ASTM[2] D6109 (1997a) za ispitivanje ojačane i neojačane plastične građe, autori ovog članka ne preporučuju korištenje navedene metode za ispitivanje drvno plastičnih kompozita.

Proučavanjem odnosa naprezanja i apsorbirane energije bavili su se Wouts, Haugou, Oudjene, Coutellier i Morvan (2016). Za istraživanje su odabrali bukvu (*Fagus sylvatica L.*) i smreku (*Picea abies L.*), kao predstavnike mekog i tvrdog drva. Naprezanja

[2] American Society of Testing and Materials

kojima se djelovalo na uzorak su podijeljena su po intenzitetu na malo, srednje i jako veliko naprezanje. Promjeri i visine uzroka su varirali ovisno o naprezanju koje se nanosi na uzorak. Iz ispitivanja se zaključuje da apsorbirana energija u drvu raste povećanjem naprezanja uzorka, što vrijedi i za bukvu kao predstavnika tvrdog drva, i za smreku, odnosno meko drvo.

Istraživanje koje je u svom članku opisao Widehammar (2004) također se radio na drvu smreke (*Picea abies L.*), a odnosi se na ispitivanje faktora koji utječu na odnos naprezanja i deformacije. Ispitivanje je provedeno u ovisnosti o primijenjenoj sili i sadržaju vode u drvu. Korištene tri razine naprezanja (niska, srednja i visoka), te tri razine sadržaja vode u drvu (osušeno u sušioniku na 103°C, kod točke zasićenosti vlakanaca i potpuno mokro) i u tri smjera (tangencijalni, radijalni i longitudinalni). Uzorci su dimenzija (12 x 12 x 12) mm. Na kraju ispitivanja, neki uzorci su imali samo male plastične deformacije, dok su se neki raspali u dijelove, što je ovisilo o uvjetima pod kojima su ispitivani, odnosno koja je od 27 kombinacija bila ispitivana.

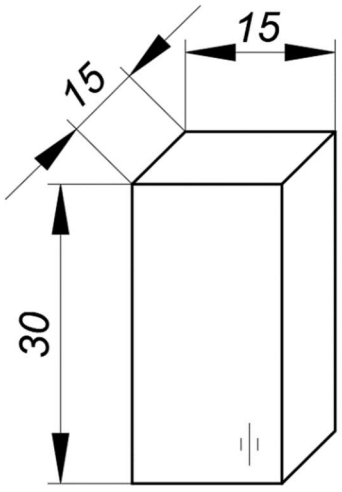
4. MATERIJALI I METODE (PLAN RADA)

Kako bi se provelo zamišljeno istraživanje, određeni su materijali i metode koje će se koristiti pri proučavanju tlačnih svojstava drvenih uzoraka. Preciznije, rad se odnosi na ispitivanje ovisnosti mehaničkih svojstava drva o brzini nanošenja opterećenja.

Za potrebe provođenja istraživanja kojim se bavi ovaj završni rad, prvotno je izvršen odabir, a zatim i priprema uzoraka drva. Tlačno ispitivanje čvrstoće selektiranih i pripremljenih uzoraka drva izvršene je u akreditiranom laboratoriju (Laboratorij za drvo u graditeljstvu) na Šumarskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

4.1. Materijali

Vrsta drva koja je izabrana kao relevantan uzorak za ispitivanje ovisnosti mehaničkih svojstava o brzini nanošenja opterećenja, točnije tlačnog opterećenja je jedna od najraširenijih i najviše korištenih vrsta drva za namještaj u Hrvatskoj, bukovina (*Fagus sylvatica L.*). Prema normi HRN EN 408:2011 dimenzije uzorka za ispitivanje tlačne čvrstoće bi trebale biti 50 mm x 50 mm x 150 mm, no budući da mehanička svojstva drva ovise o dimenzijama ispitivanih uzoraka, nastojalo se raditi na što manjim dimenzijama uzoraka kako bi ih bilo moguće kvalitetno ispitati na kidalici, te kako bi se dobile što reprezentativnije vrijednosti tlačne čvrstoće za potrebe ovog rada. Svi uzorci su izrađeni od jednog elementa drva bez uočljivih nedostataka koji bi eventualno mogli u većoj mjeri utjecati na rezultate ispitivanja s nastojanjem da godovi budu što više paralelni. Dimenzije uzoraka su 15 mm x 15 mm x 30 mm (slika 7), a sadržaj vode je izmjeren elektrootpornim vlagomjerom te je iznosio 9 %.

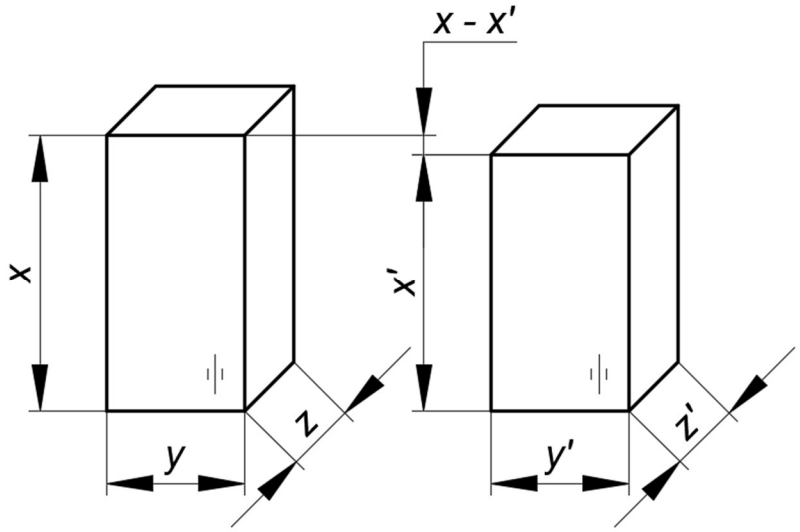


Slika 7. Prikaz uzorka sa dimenzijama

4.2. Metode

Za mjerenje sila i pomaka korištena je kidalica tipa Autograph AG – X, proizvođača Shimadzu. Navedena kidalica koja je korištena pri ispitivanju opremljena je dinamometrom nazivne sile 1000 N. Tijek i postupak ispitivanja programiran je koristeći računalni program Trapezium X, dok je za obradu izmjerenih vrijednosti korišten softverski paket Sigmaplot v.10.0 te Microsoft Excel 2016.

Na slici 8 prikazan je uzorak prije i nakon tlačenja na kidalici, te njegove dimenzije, gdje su: x - početna duljina uzorka, x' - konačna duljina uzorka, y - početna širina uzorka, y' - konačna širina uzorka, z - početna debljina uzorka, te z' - konačna debljina uzorka.



Slika 8. Uzorak prije i nakon tlačenja na kidalici

Pomak (Δx = x - x') se mjeri do trenutka kada sila postiže maksimalnu vrijednost, zbog toga što se radi o malim deformacijama. Bilježena je promjena mehaničkih svojstava drva u ovisnosti o brzini nanošenja opterećenja na uzorka. Brzine s kojima se radilo bile su (100, 200, 300, 400 i 500) mm/min. Za svaku brzinu napravljeno je 5 ispitivanja.

Za određivanje tlačnog naprezanja korišten je sljedeći izraz:

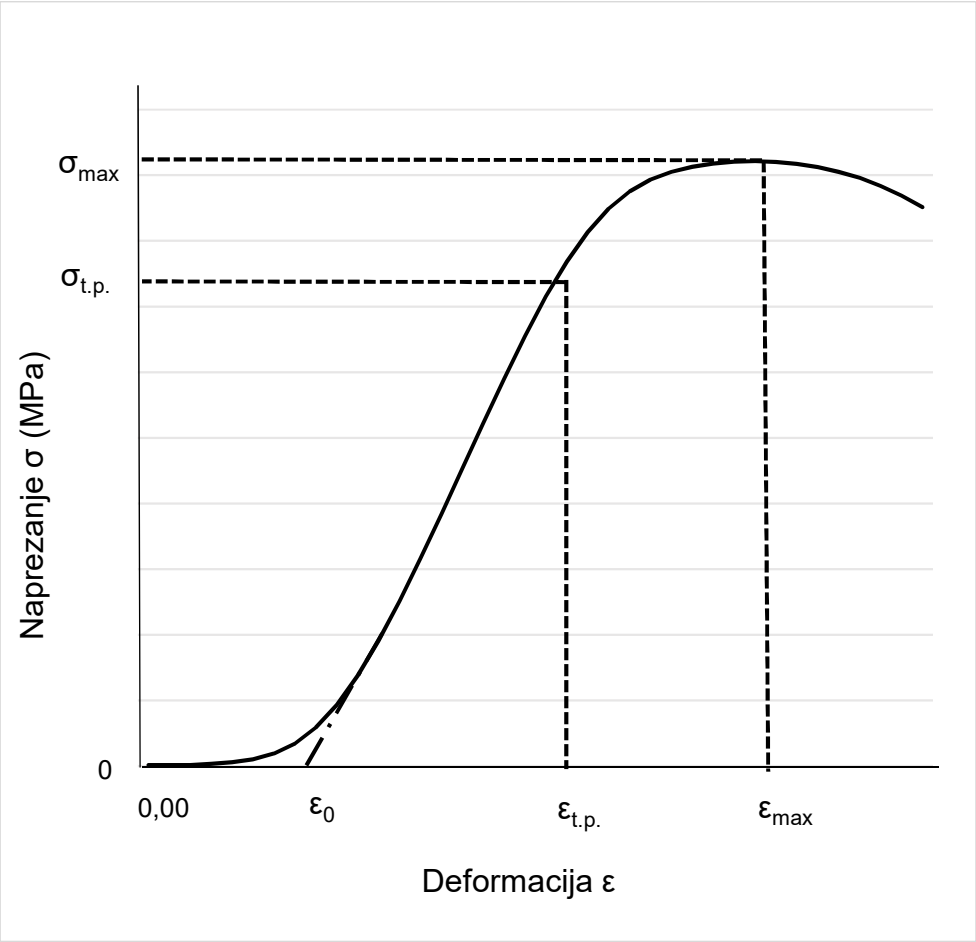
$$\sigma = \frac{F}{y \times z} \tag{4}$$

gdje *y* i *z* iznose 15 mm, a predstavljaju širinu i debljinu uzorka, dok je relativna deformacija određena prema izrazu:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x} \tag{5}$$

gdje x predstavlja duljinu uzorka i iznosi 30 mm, dok Δx predstavlja razliku početne i konačne duljine uzorka.

Iz izmjerenih podataka i izraza 4 i 5 izračunati su naprezanje i relativna deformacija za svako pojedino mjerenje, nakon čega su nacrtani dijagrami međusobnih odnosa naprezanja i deformacija (slika 9).



Slika 9. Dijagram ovisnosti naprezanja i deformacije

Budući da uzorak na početku svakog ispitivanja najprije prolazi fazu namještanja koja je potrebna zbog mikroneravnina koje svaki uzorak ima, a svako ispitivanje ujedno počinje elastičnom deformacijom koja predstavlja linearan odnos naprezanja i deformacije, za početak elastične deformacije se ne uzima ishodište dijagrama, već točka ε_0. Točka proporcionalnosti (*t.p.*) predstavlja granicu elastičnog i plastičnog područja gdje nastaju trajne deformacije. Veza između naprezanja i deformacije u linearnom području može se prikazati izrazom (Požgaj, 1993):

$$\sigma_{el} = \sigma_0 + E \times \varepsilon_{el}, \quad (6)$$

gdje σ_{el} označava svako naprezanje manje od $\sigma_{t.p.}$, ε_{el} svaku deformaciju veću od ε_0 i manju od $\varepsilon_{t.p}$, σ_0 označava odsječak linearne funkcije na ordinati, a *E* označava modul elastičnosti.

Elastično područje dijagrama je opisano izrazom 6, a budući da se u plastičnom području dijagrama nelinearan odnos naprezanja i deformacije, to područje ne možemo opisati linearnom funkcijom kao što je to slučaj kod elastičnog područja. Matematički izraz koji opisuje odnos naprezanja i deformacije u plastičnom području je jednak izrazu za parabolu, te glasi (Gaaf i sur., 2017):

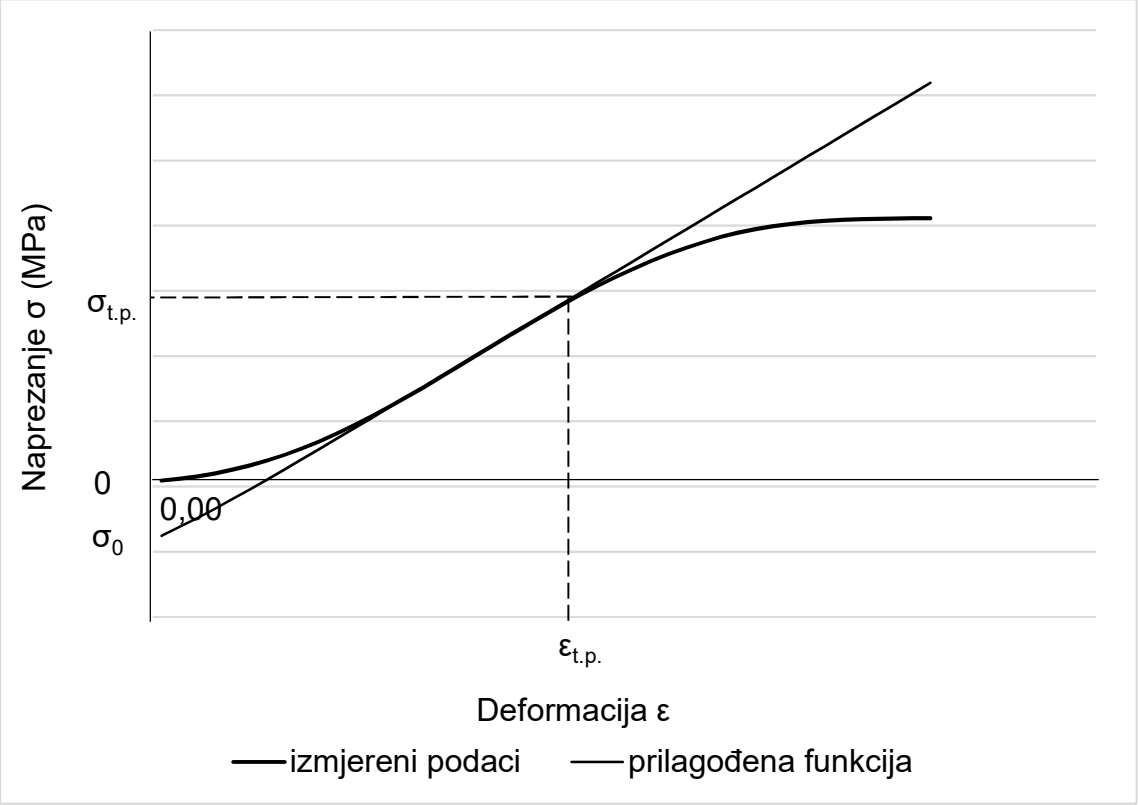
$$\sigma_{pl} = a \times \varepsilon^2 + b \times \varepsilon + c. \quad (7)$$

4.2.1. Modul elastičnosti

Modul elastičnosti predstavlja mjeru krutosti materijala i jednak je omjeru naprezanja (σ) i deformacije (ε) (Dhir, Ghataora, Lynn, 2017) u linearnom ili elastičnom području dijagrama odnosa naprezanja i deformacije. Modul elastičnosti se računa iz veze naprezanja i deformacije u linearnom području opisane izrazom 6, iz čega izraz za modul elastičnosti glasi:

$$E = \frac{\sigma_{el} - \sigma_0}{\varepsilon} \quad (8)$$

Pomoću modula elastičnosti u dijagram naprezanja i deformacije moguće je dodati linearnu funkciju koja odgovara elastičnom području navedenog dijagrama. Modul elastičnosti (*E*) i odsječak linearne funkcije na osi naprezanja (σ_0) određuju se na način da se izmjerenim podacima u elastičnom području dijagrama međuovisnosti naprezanja i deformacije prilagodi izraz 8, što je grafički prikazano na slici 10.



Slika 10. Dijagram međuovisnosti naprezanja i deformacije sa izmjerenim podacima i prilagođenom funkcijom

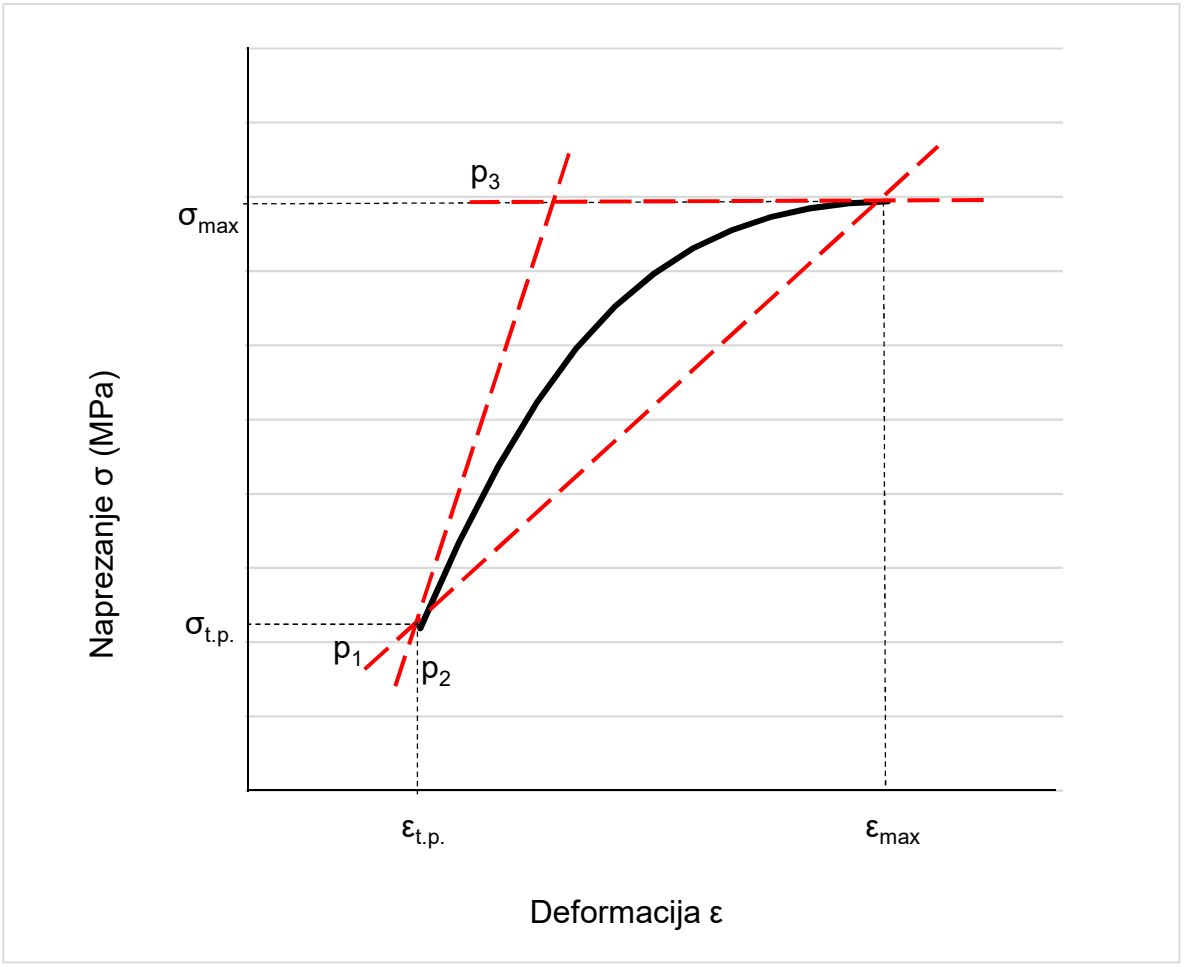
4.2.2. Tangentni modul

Tangentni modul označava odnos naprezanja i deformacije u bilo kojoj točki koja se nalazi na plastičnom području dijagrama, odnosno nagib tangente na krivulju (Basquin, 1924). Plastičnom deformacija je trajna promjena oblika koja se javlja kada se materijal podvrgne opterećenju, rastezanju, savijanju i slično, koji premašuju njegovu čvrstoću i uzrokuju produljenje, komprimiranje, trganje, savijanje ili obrtanje (Pfeifer, 2009), a grafički je plastična deformacija (ε_{pl}) omeđena deformacijom u točki proporcionalnosti ($\varepsilon_{t.p.}$) i maksimalnom postignutom deformacijom (ε_{max}). Plastičnim naprezanjem (σ_{pl}) smatra se svako naprezanje veće od naprezanja u točki proporcionalnosti ($\sigma_{t.p.}$) i manje od maksimalnog naprezanja (σ_{max}). Kako bi se dobila krivulja koja odgovara plastičnom područje krivulje, eksperimentalno izmjerenim podacima prilagođavan je izraz 7 pri čemu su određeni koeficijenti *a*, *b* i *c*:

$$\sigma_{pl} = a \times \varepsilon_{pl}^2 + b \times \varepsilon_{pl} + c. \qquad (9)$$

Tangentni modul (K) opisan je kao prva derivacija jednadžbe krivulje (9) te glasi:

$$K = \frac{d\sigma_{pl}}{d\varepsilon_{pl}} = 2 \times a \times \varepsilon_{pl} + b \tag{10}$$



Slika 11. Plastično područje grafa naprezanja i deformacije sa ucrtanim pravcima p_1, p_2 i p_3

Plastično područje grafa naprezanja i deformacije prikazano je na slici 11. Isti graf prikazuje i tri pravca koji dodiruju, odnosno sijeku krivulju. Pravac p_1, odnosno njegov nagib u odnosu na apscisu, zapravo predstavlja sekantni modul zbog toga što spaja dvije točke, točku proporcionalnosti i točku maksimalnog naprezanja, na dijagramu naprezanja i deformacije. Pravac p_2 siječe krivulju u točki proporcionalnosti, a nagib tog pravca u odnosu na apscisu predstavlja maksimalnu vrijednost tangentnog modula (K_{max}). Pravac p_3 siječe krivulju u točki maksimalnog naprezanja i paralelan je sa apscisom, stoga je vrijednost tangentnog modula jednaka nuli.

Iz navedenog zaključujemo da nagib pravca p_1 predstavlja srednju vrijednost tangentnog modula ($\overline{K}$), a pomoću slike 11 može se odrediti jednadžba za isti:

$$\bar{K} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{t.p.}}{\varepsilon_{max} - \varepsilon_{t.p.}} \tag{11}$$

Iz izraza 11 vidljivo je da na vrijednost tangentnog modula utječu maksimalni iznosi naprezanja (σ_{max}) i deformacije (ε_{max}), te iznosi naprezanja i deformacije u točki proporcionalnosti ($\sigma_{t.p.}$ i $\varepsilon_{t.p.}$).

Za dobivanje iznosa deformacije pri maksimalnom naprezanju potrebno je derivirati jednadžbu krivulje plastičnog područja (9) i izjednačiti ju s nulom, tada izraz za deformaciju pri maksimalnom naprezanju (σ_{max}) glasi:

$$\frac{d\sigma_{pl}}{d\varepsilon_{pl}} = 2 \times a \times \varepsilon_{max} + b = 0 \implies \varepsilon_{max} = -\frac{b}{2 \times a} \tag{12}$$

Nakon uvrštavanja izraza 12 u izraz 9, dobiva se izraz za maksimalno naprezanje koji glasi:

$$\sigma_{max} = a \times \left(-\frac{b}{2 \times a}\right)^2 + b \times \left(-\frac{b}{2 \times a}\right) + c \tag{13}$$

4.2.3. Specifična energija elastične i plastične deformacije

Stlačivanjem uzoraka obavljen je određeni rad koji je jednak promjeni energije. Budući da se radi o stlačivanju, odnosno promjeni odnosa položaja tijela i kidalice, najveći udio rada vanjske sile akumulira se u potencijalnu energiju, a gubici nastali prilikom pretvaranja rada u druge oblike energije su zanemarivi.

Elastična potencijalna energija kao rezultat nanošenja sile ostaje pohranjena u uzorku. Kada sila prestane djelovati na uzorak, elastična potencijalna energija omogućava uzorku da se vrati u prvobitni oblik.[3]

Specifična energija elastične deformacije (e_{el}) definira se kao elementarni deformacijski rad utrošen na elastičnu deformaciju određenog volumena, a opisuje se izrazom:

[3] Izvor: https://www.khanacademy.org/science/physics/work-and-energy/hookes-law/a/what-is-elastic-potential-energy

$$e_{el} = \int_{\varepsilon 0}^{\varepsilon_{t.p.}} \sigma_{el} d\varepsilon_{el} = \sigma_0 \times \left(\varepsilon_{t.p.} \times \varepsilon_0\right) + \frac{E}{2} \times \left(\varepsilon_{t.p.}^2 \times \varepsilon_0^2\right) \tag{14}$$

Ako je energija uzorka nepovratna znači da je došlo do plastične deformacije, čija karakteristika je da se zadržava i nakon prestanka djelovanja opterećenja. Specifična energija plastične deformacije (e_{pl}) se definira kao elementarni deformacijski rad uložen na plastičnu deformaciju jediničnog volumena, a određuje se izrazom:

$$e_{pl} = \int_{\varepsilon_{t.p.}}^{\varepsilon_{max}} \sigma_{pl} d\varepsilon_{pl} = \frac{a}{3} \times \left(\varepsilon_{max}^3 \times \varepsilon_{t.p.}^3\right) + \frac{b}{2} \times \left(\varepsilon_{max}^2 \times \varepsilon_{t.p.}^2\right) + c \times \left(\varepsilon_{max} \times \varepsilon_{t.p.}\right) \tag{15}$$

4.2.4. Deformacija u točki proporcionalnosti

Dijagram odnosa naprezanja i deformacije sastoji se od linearnog (elastičnog) i nelinearnog (plastičnog) područja. Točka koja dijeli elastično od plastičnog područja naziva se točkom proporcionalnosti i ima određenu vrijednost na apscisi i ordinati.

Kako bismo izračunali deformaciju u točki proporcionalnosti ($\varepsilon_{t.p.}$) potrebno je izjednačiti izraze 6 i 7. Tako izjednačen izraz glasi:

$$\sigma_0 + E \times \varepsilon_{el} = a \times \varepsilon^2 + b \times \varepsilon + c, \tag{16}$$

a rješenje dobiveno prethodnim izrazom je kvadratna jednadžba iz koje je izbačen pozitivan korijen kako bi rješenje zadovoljavalo postavljenje uvjete, te glasi:

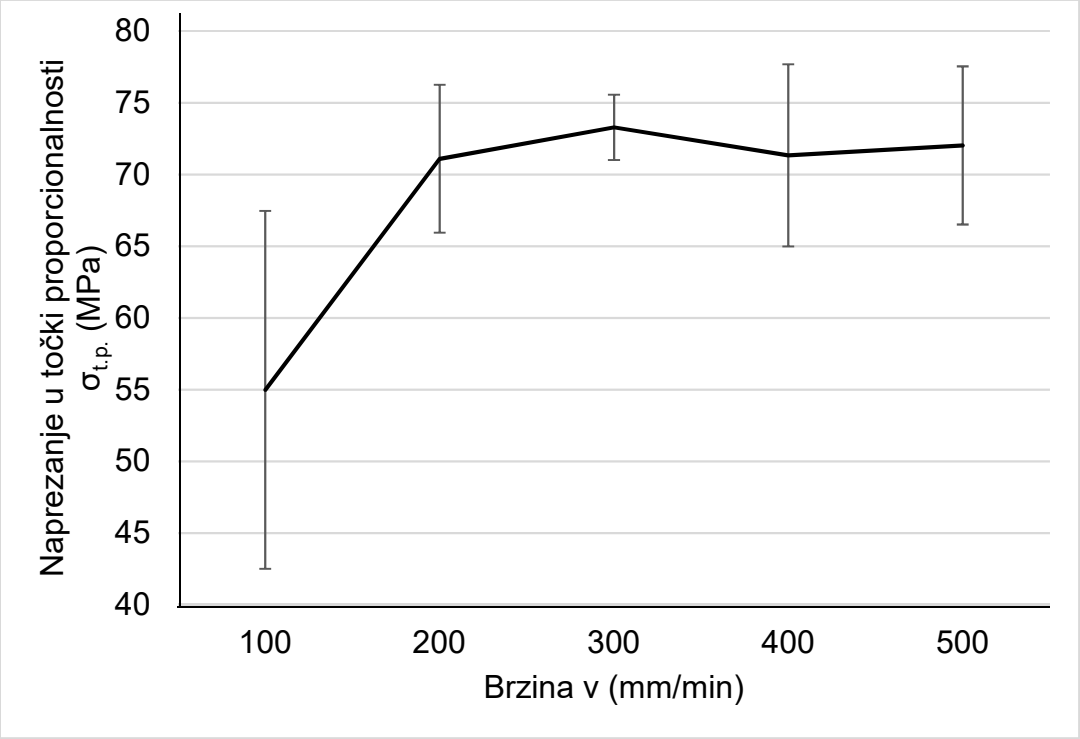
$$\varepsilon_{1,2} = \frac{-(b - E) - \sqrt{(b - E)^2 - 4 \times a \times (c - \sigma_0)}}{2 \times a} \tag{17}$$

5. REZULTATI

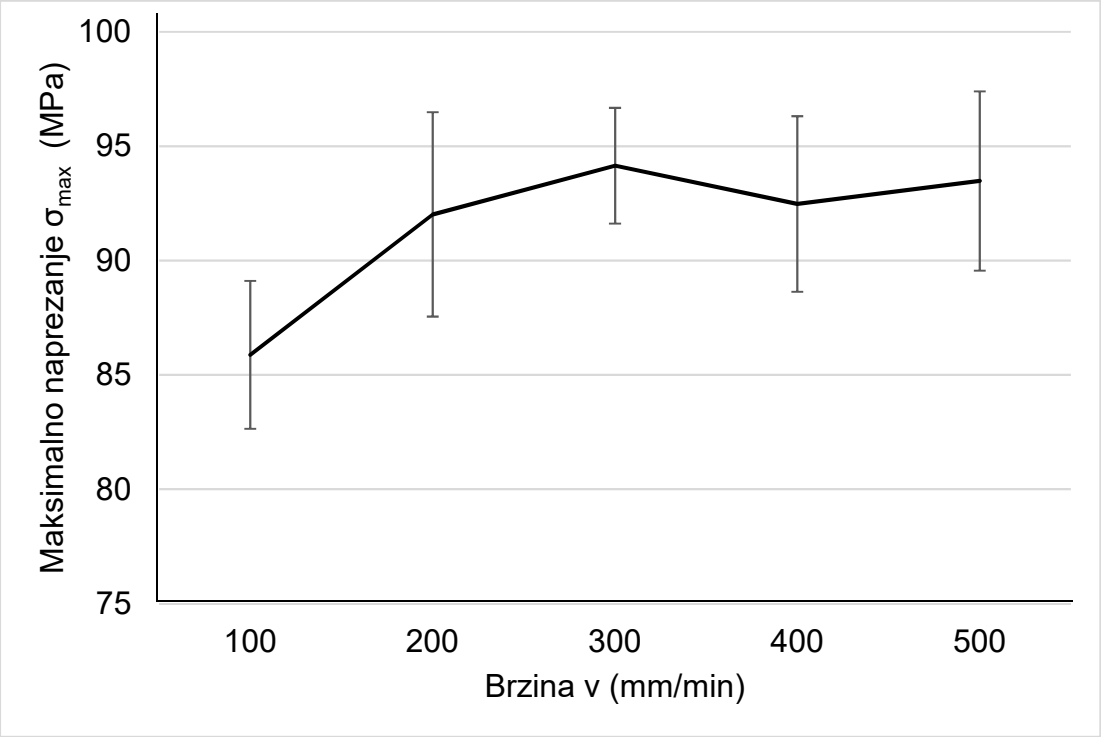
Vrijednosti dobivene kidanjem na kidalici su iskorištene za računanje referentnih podataka za naprezanje i deformaciju. Budući da zbog malog broja ponavljanja na podacima nisu rađeni statički testovi, izračunate su im srednje vrijednosti i standardne devijacije.

Vrijednosti koje su karakteristične za naprezanje su naprezanje u točki proporcionalnosti ($\sigma_{t.p.}$) i maksimalno naprezanje (σ_{max}).

Na dijagramima odnosa srednjih vrijednosti naprezanja u točki proporcionalnosti (slika 12) i maksimalnog naprezanja (slika 13) očit je trend porasta navedenih srednjih vrijednosti u odnosu na porast brzine. Prema Horvat i Krpan (1967) maksimalno naprezanje u smjeru vlakanaca za listače iznosi od 4 do 106 MPa, a u tom rasponu se nalaze rezultati ovog istraživanja.



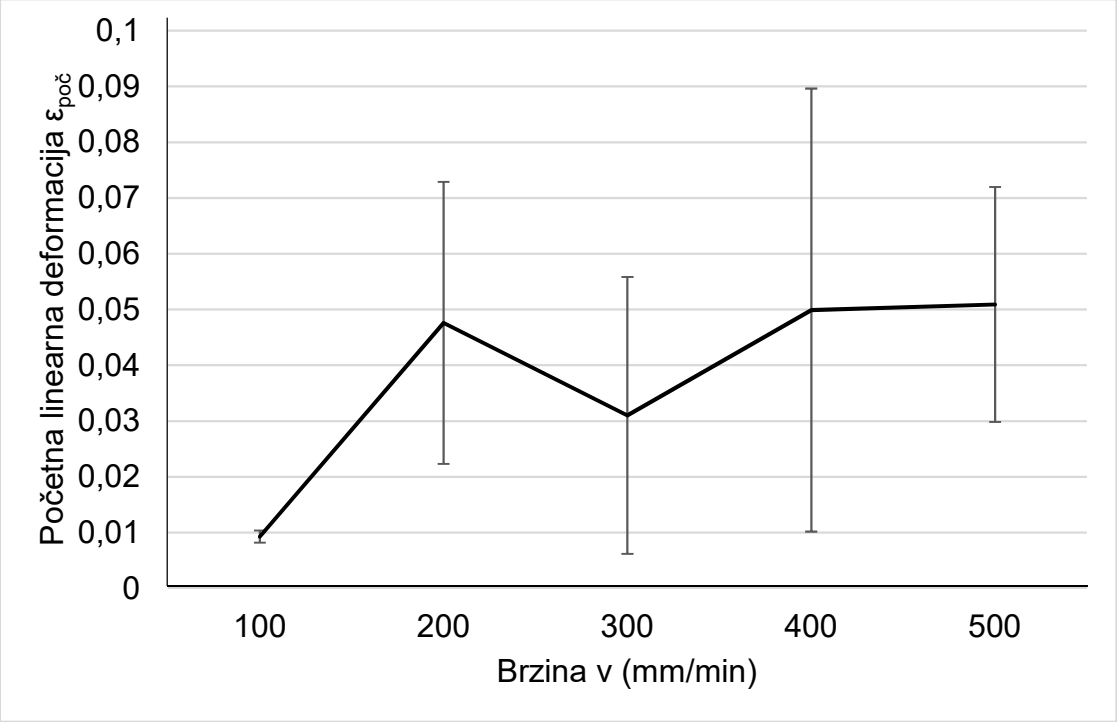
Slika 12. Dijagram odnosa srednjih vrijednosti naprezanja u točki proporcionalnosti i brzine



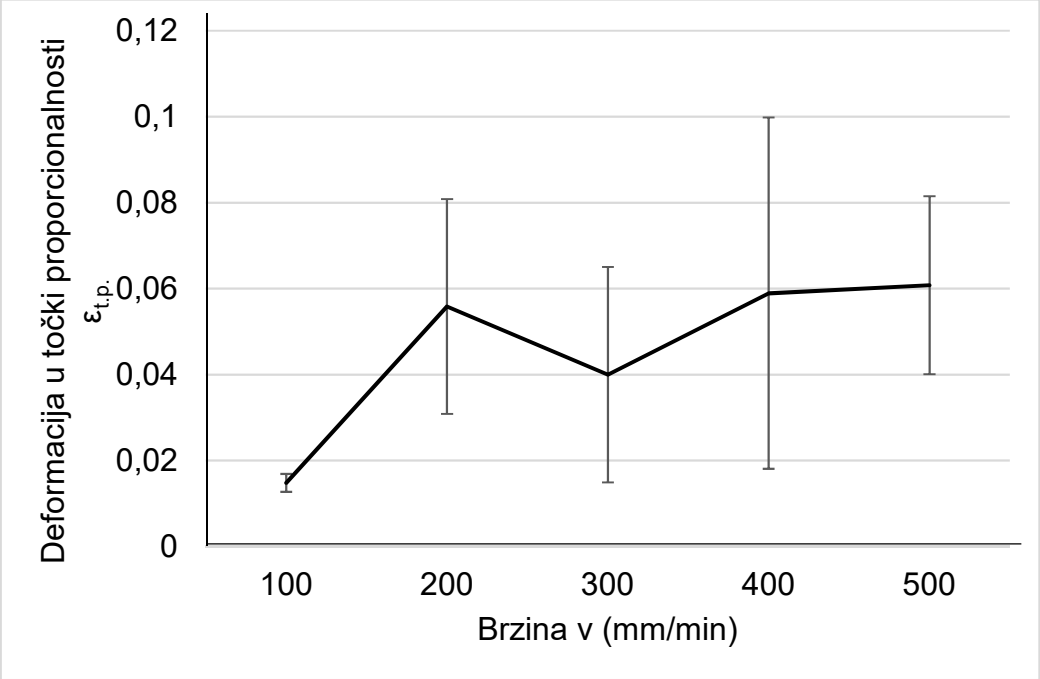
Slika 13. Dijagram odnosa srednjih vrijednosti maksimalnog naprezanja i brzine

Deformaciju karakteriziraju njene vrijednosti na početku linearne deformacije ($\varepsilon_{poč}$), u točki proporcionalnosti ($\varepsilon_{t.p.}$) i u trenutku kada naprezanje postiže maksimalnu vrijednosti (ε_{max}).

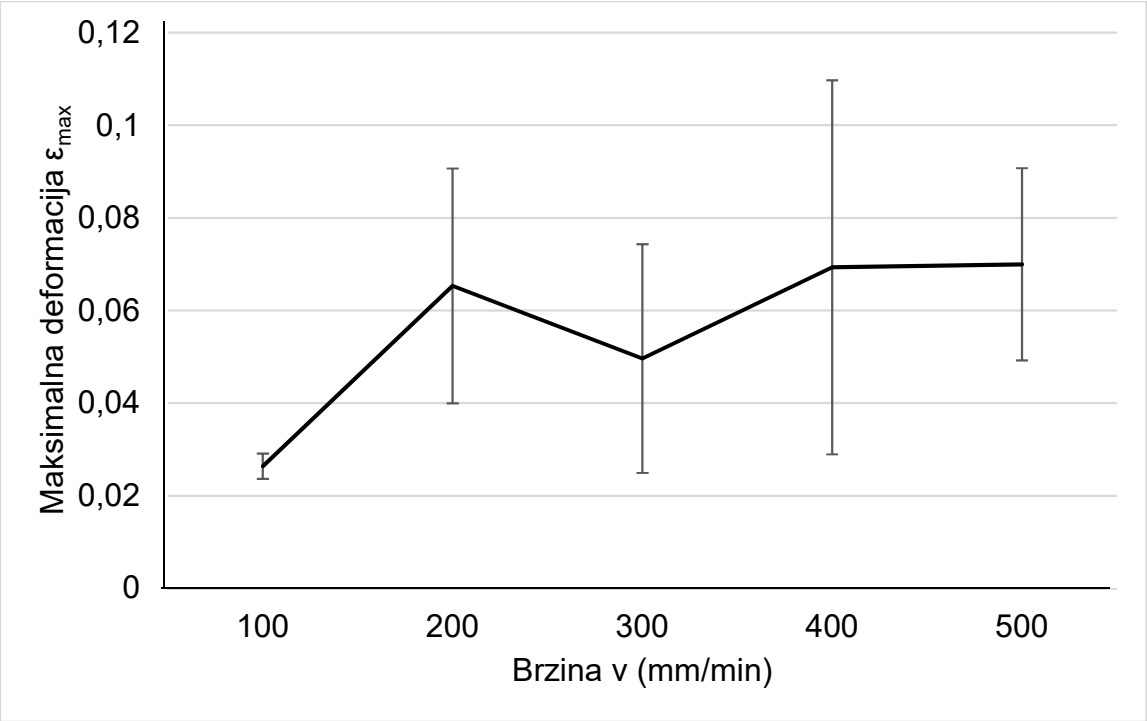
Na slikama 14, 15 i 16 prikazani su dijagrami ovisnosti srednje vrijednosti početne deformacije, deformacije u točki proporcionalnosti i maksimalne deformacije u ovisnosti o brzini nanošenja opterećenja sa pripadajućim standardnim devijacijama. U sva tri slučaja primjećuje se trend rasta srednjih vrijednosti sa porastom brzine. Također, u sva tri slučaja brzina od 300 mm/min bilježi pad u odnosu na brzinu 200 mm/min. Ta činjenica bi se mogla pripisati pogreški u određenom uzorku ili eventualnoj pogreški načinjenoj prilikom kidanja na kidalici i mjerenja.



Slika 14. Dijagram odnosa srednjih vrijednosti početne linearne deformacije i brzine



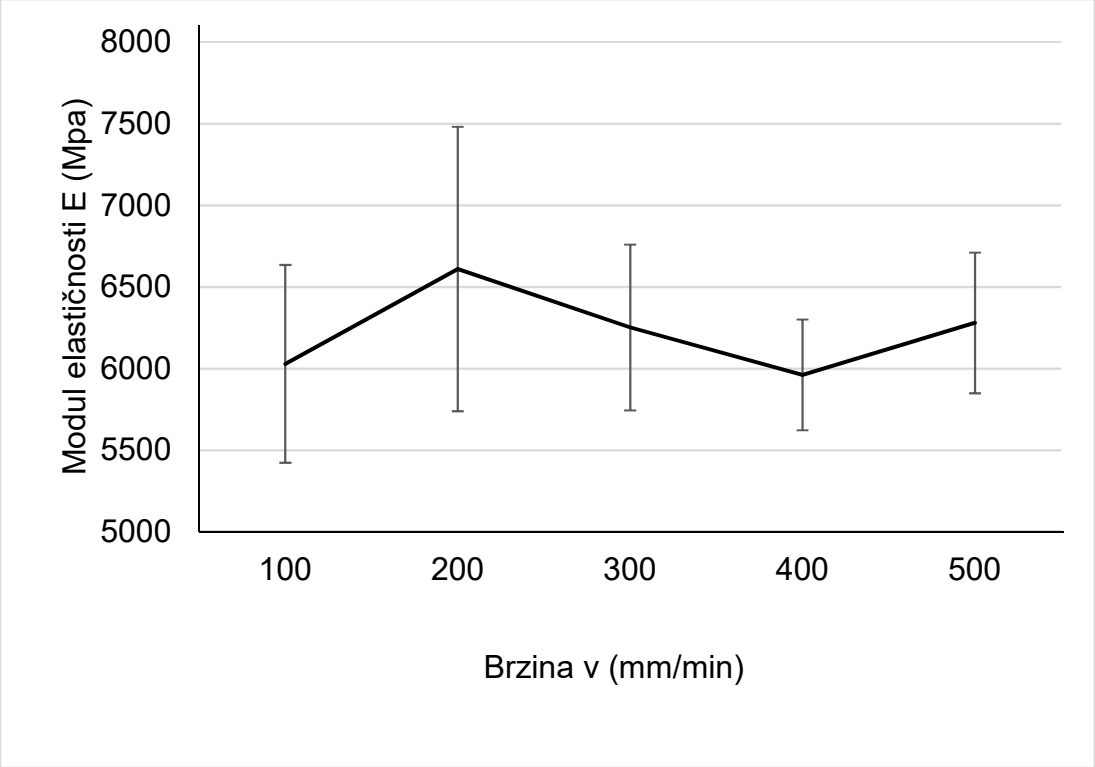
Slika 15. Dijagram odnosa srednjih vrijednosti deformacija u točki proporcionalnosti i brzine



Slika 16. Dijagram odnosa maksimalnih deformacija i brzine

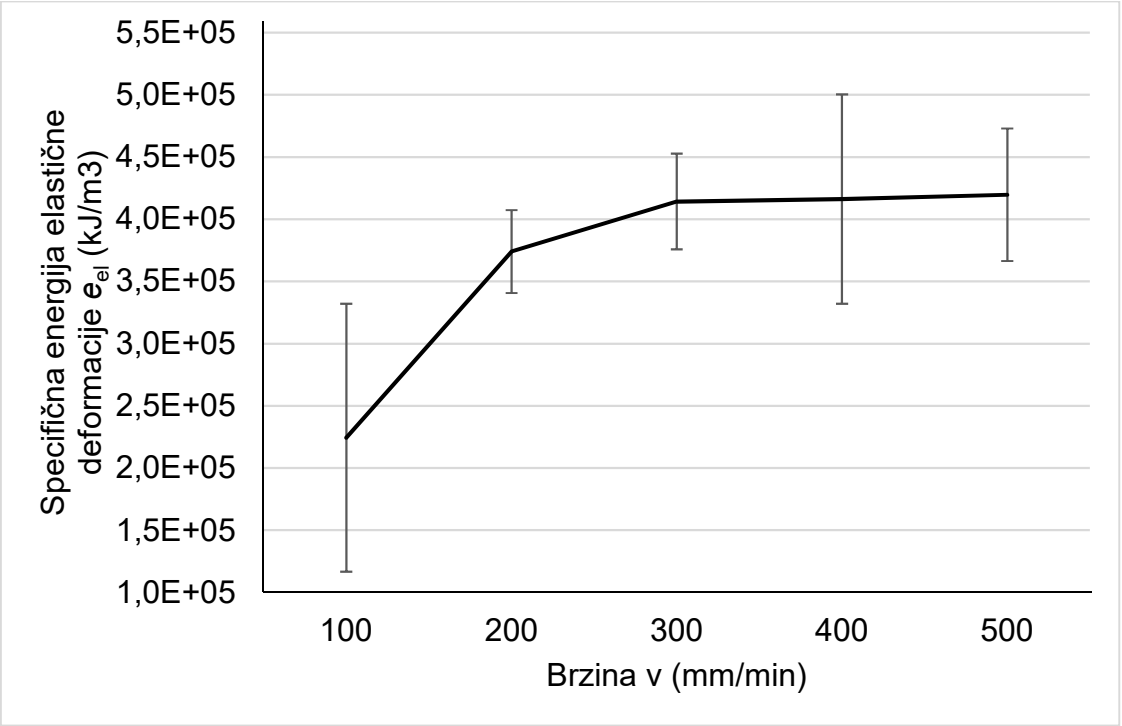
Slika 17 prikazuje dijagram odnosa srednjih vrijednosti modula elastičnosti i brzine, na kojemu je vidljivo da srednje vrijednosti modula elastičnosti rastu do brzine 200 mm/min, zatim je uočljiv trend pada srednjih vrijednosti do brzine 400 mm/min, nakon čega slijedi ponovni rast do brzine 500 mm/min. Modul elastičnosti bukovine vlažnosti 12% u longitudinalnom smjeru kod standardiziranih ispitivanja iznosi 11 900 MPa (FPS, 2010).

Vrijednosti koje su izračunate nakon mjerenja su i specifične energije plastične i elastične deformacije. Pomoću srednjih vrijednosti izračunatih za brzine od 100 do 500 mm/min nacrtani su dijagrami u ovisnosti o brzini nanošenja opterećenja.

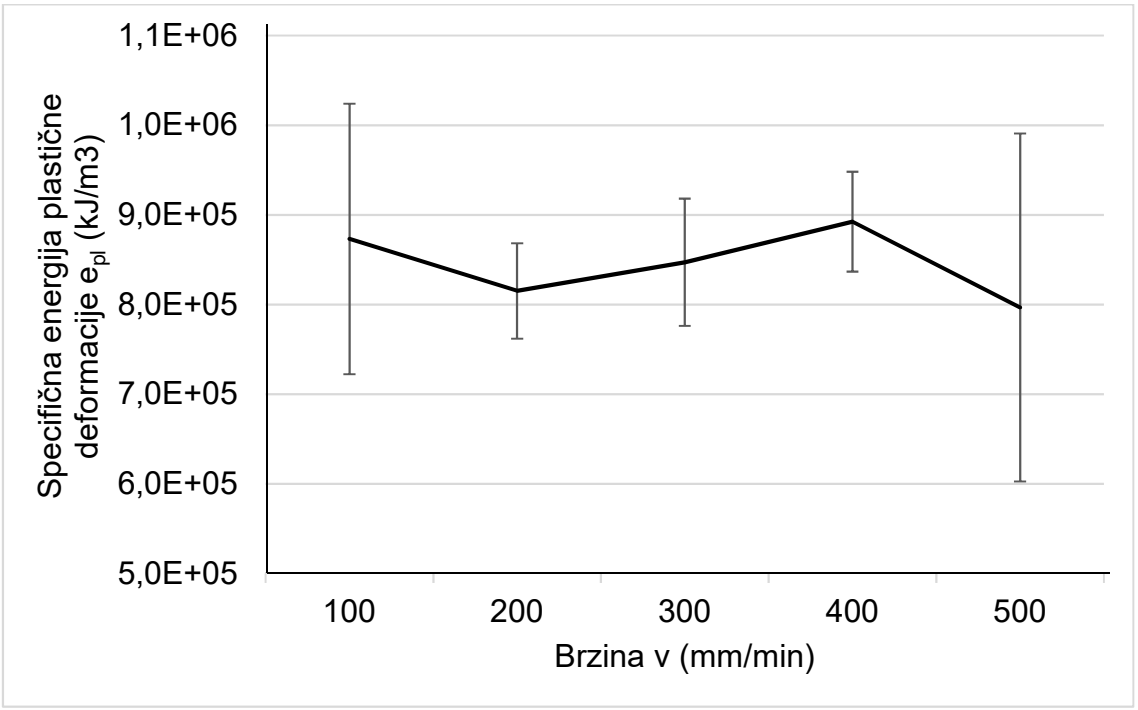


Slika 17. Dijagram odnosa srednjih vrijednosti modula elastičnosti i brzine

Na slikama 18 i 19 prikazani su dijagrami srednjih vrijednosti specifičnih energija o brzini nanošenja opterećenja. Trend porasta očit je kod dijagrama na kojem su prikazane srednje vrijednosti specifičnih energija elastične deformacije, dok kod dijagrama sa srednjim vrijednostima specifičnih energija plastične deformacije se uočava trend pada koji oscilira kod brzine 200 mm/min.



Slika 18. Dijagram ovisnosti srednjih vrijednosti specifične energije elastične deformacije o brzini



Slika 19. Dijagram ovisnosti srednjih vrijednosti specifične energija plastične deformacije o brzini

Tangentni modul predstavlja nagib pravca na os x, što ovisi o točkama koje pravac siječe. U longitudinalnom smjeru računaju se maksimalni (K_{max}) i srednji ($\overline{K}$) tangentni modul zbog toga što je minimalni tangentni modul paralelan s osi x te iznosi 0. U tablici 1

prikazane su vrijednosti tangentnih modula i odgovarajućih standardnih devijacija, te je vidljivo da su najveće vrijednosti srednjeg i maksimalnog tangentni modul pri brzini 100 mm/min, a najmanji su pri brzini 400 mm/min.

Tablica 1. Ovisnosti srednjih vrijednosti maksimalnog i srednjeg tangentnog modula o brzini sa pripadajućim standardnim devijacijama

brzina v (mm/min)	K_{max} (MPa)	Standardna devijacija od K_{max} (Mpa)	$\overline{K}$ (MPa)	Standardna devijacija od $\overline{K}$ (Mpa)
100	5900,46	1183,33	2652,68	518,72
200	5202,93	689,88	2203,13	320,52
300	4892,17	586,36	2185,03	284,33
400	4520,89	316,42	2031,79	121,60
500	4983,83	361,42	2416,91	485,55

6. ZAKLJUČCI

Prema postavljenim ciljevima u ovom istraživanju došlo se do značajnih spoznaja o mehaničkim svojstvima bukovine u longitudinalnome smjeru pri većim brzinama nanošenja opterećenja. Obzirom na mali broj ponovljenih mjerenja podaci se nisu testirali statističkim testovima što ostavlja prostora za daljnje istraživanje. Analiza izmjerenih podataka može se sažeti u nekoliko zaključaka:

1. Iz predstavljenih rezultata istraživanja može se zaključiti da brzina nanošenja opterećenja utječe na izmjerena mehanička svojstva bukovine.
2. Elastično područje dijagrama ovisnosti naprezanje deformacija može se aproksimirati linearnom, a promatrani dio plastičnog područja kvadratnom funkcijom.
3. Parametri koji ograničavaju elastično područje (početna deformacija te naprezanje i deformacija u točki proporcionalnosti) pokazuju tendenciju rasta sa porastom brzine nanošenja opterećenja.
4. Parametri koji ograničavaju plastično područje (maksimalno naprezanje i deformacija pri maksimalnom naprezanju) također pokazuju tendenciju rasta sa porastom brzine nanošenja opterećenja.
5. Modul elastičnosti i tangentni modul ne pokazuju jasnu tendenciju povećanjem brzine nanošenja opterećenja.

7. ZAHVALE

Zahvaljujem Šumarskom fakultetu u Zagrebu na ustupljenom Laboratoriju za drvo u graditeljstvu za ispitivanje tlačne čvrstoće uzoraka drva.

Zahvaljujem višem asistentu dr. sc. Branimiru Šafranu i višem asistentu dr. sc. Matiji Jugu što su pripremili uzorke bukovine, te višem asistentu dr. sc. Tomislavu Sedlaru koji rukovao kidalicom i popratnim programom za vizualizaciju podataka tijekom eksperimentalnog dijela istraživanja.

Posebno hvala višem asistentu dr. sc. Kristijanu Radmanoviću koji mi je pomogao prilikom izrade ovog rada.

LITERATURA

1. Basar, Y.; Weichert, D., 2000: Nonlinear Continuum Mechanics of Solids. Fundamental. mathematical and physical concepts Springer
2. Basquin, O. H., 1924: Tangent modulus and the strength of steel columns in tests, Technologic papers of the bureau of standards, No. 263, Department of commerce, USA
3. Brandt, C. W., Fridley, K. J., 2003: Effect od load rate on flexural properties of wood-plastic composites, Wood and fiber science, V. 35(1)
4. Büyüksarı, Ü., As, N., Dündar, T., Sayan, E., 2016: Comparison of Micro- and Standard-Size Specimens in Evaluating the Flexural Properties of Scots Pine Wood, BioResources 11(4), 10540-10548
5. Dhir, R., Ghataora G., Lynn C., 2017: Sustainable Construction Materials, Woodhead Publishing, ISBN 978-0-08-100987-1
6. 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.
7. Forest Product Society, 2010: Wood Handbook - Wood as an engineering material
8. Gaaf i sur. (2017.)
9. Goglia, V., 1994: Strojevi i alati za obradu drva, Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, ISBN 953 - 6307 - 00 - 6, Zagreb, Hrvatska
10. Horvat, I.; Krpan, J., 1967: Drvno industrijski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb
11. HRN EN 208:2011
12. Koch, P., 1968: Wood Machining Processes, New York: Ronald Press
13. Petrić, B.; Špoljarić, Z., 1980: DRVO - Anatomija drva, Šumarska enciklopedija, svezak I, JLZ, Zagreb
14. Pfeifer, M., 2009: Materials enabled designs, Butterworth - Heinemann, ISBN 978-0-7506-8287-9
15. Požgaj, A., Chovanec, D., Kurjatko, S., Babiak, M., 1993: Štruktura a vlasntnosti dreva, Priroda a. S., Bratislava, ISBN 80 – 07 – 00600 - 1
16. Radmanović, K., 2015: Utjecaj mehaničkih svojstava drva na snagu potrebnu za odvajanje čestice pri ortogonalnom rezanju, Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
17. Šefc, B.; Trajković, J., 2017: Anatomija drva, Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, Hrvatska

18. Špoljarić, Z., 1978: Anatomija drva, Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, Hrvatska
19. Vadlja, M., 2011: Modeliranje i simulacija deformabilnih objekata, Fakultet elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, Hrvatska
20. Wouts, J., Haugou, G., Oudjene, M., Coutellier, D., Morvan, H., 2016: Strain rate effects on the compressive response of wood and energy absorption capabilities, Composite Structures, 149 (2016) 315-328
21. *** KhanAcademy: What is elastic potential energy? (online), https://www.khanacademy.org/science/physics/work-and-energy/hookes-law/a/what-is-elastic-potential-energy (pristupljeno: srpanj, 2018.)

POPIS SLIKA

Slika 1. Prostorni prikaz histološke građe drva listača, povećanje 225x 2

Slika 2. Shematski prikaz drvnog valjka u tri osnovna presjeka.....3

Slika 3. Isječak iz četverogodišnje stabljike bijelog bora (Pinus sylvestris) sa tri osnovna presjeka 3

Slika 4. Smjerovi u drvu 4

Slika 5. Prikaz djelovanja sile okomito na površinu drva: a) vlačno naprezanje u longitudinalnom smjeru, b) vlačno naprezanje u radijalnom smjeru, c) vlačno naprezanje u radijalnom smjeru, d) tlačno naprezanje u longitudinalnom smjeru, e) tlačno naprezanje u radijalnom smjeru, f) tlačno naprezanje u radijalnom smjeru.....5

Slika 6. Dijagram međusobne ovisnosti naprezanja i deformacija pri tlačnom djelovanju sile u longitudinalnom smjeru 6

Slika 7. Prikaz uzorka sa dimenzijama.....10

Slika 8. Uzorak prije i nakon tlačenja na kidalici 11

Slika 9. Dijagram ovisnosti naprezanja i deformacije.....12

Slika 10. Dijagram međuovisnosti naprezanja i deformacije sa izmjerenim podacima i prilagođenom funkcijom 14

Slika 11. Plastično područje grafa naprezanja i deformacije sa ucrtanim pravcima p_1, p_2 i p_3.....15

Slika 12. Dijagram odnosa srednjih vrijednosti naprezanja u točki proporcionalnosti i brzine 18

Slika 13. Dijagram odnosa srednjih vrijednosti maksimalnog naprezanja i brzine 19

Slika 14. Dijagram odnosa srednjih vrijednosti početne linearne deformacije i brzine 20

Slika 15. Dijagram odnosa srednjih vrijednosti deformacija u točki proporcionalnosti i brzine 20

Slika 16. Dijagram odnosa maksimalnih deformacija i brzine 21

Slika 17. Dijagram odnosa srednjih vrijednosti modula elastičnosti i brzine 22

Slika 18. Dijagram ovisnosti srednjih vrijednosti specifične energije elastične deformacije o brzini 23

Slika 19. Dijagram ovisnosti srednjih vrijednosti specifične energija plastične deformacije o brzini 23