

# Utjecaj brzine nanošenja opterećenja na tlačna svojstva bukovine pri malim deformacijama

---

**Roginić, Robert**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2019**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:108:834455>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-07**



*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
ŠUMARSKI FAKULTET  
DRVNOTEHNOLOŠKI ODSJEK**

**PREDDIPLOMSKI STUDIJ  
DRVNA TEHNOLOGIJA**

**ROBERT ROGINIĆ**

**UTJECAJ BRZINE NANOŠENJA OPTEREĆENJA NA TLAČNA  
SVOJSTVA BUKOVINE PRI MALIM DEFORMACIJAMA**

**ZAVRŠNI RAD**

**ZAGREB, SRPANJ, 2019.**

Robert Roginić  
UTJECAJ BRZINE NANOŠENJA OPTEREĆENJA NA TLAČNA SVOJSTVA BUKOVINE PRI MALIM  
DEFORMACIJAMA

<b>AUTOR:</b>	Robert Roginić 25.01.1989., Hamburg 0053200075
<b>NASLOV:</b>	Utjecaj brzine nanošenja opterećenja na tlačna svojstva bukovine pri malim deformacijama
<b>PREDMET:</b>	Tehnološke karakteristike drva
<b>MENTOR:</b>	Doc. dr. sc. Tomislav Sedlar
<b>IZRADU RADA JE POMOGAO:</b>	Doc. dr. sc. Kristijan Radmanović
<b>RAD JE IZRAĐEN:</b>	Sveučilište u Zagrebu - Šumarski fakultet Zavod za znanost o drvu
<b>AKAD. GODINA:</b>	2018./2019.
<b>DATUM OBRANE:</b>	12.07.2019.
<b>RAD SADRŽI:</b>	Stranica: 59 Slika: 28 Tablica: 4 Navoda literature: 20
<b>SAŽETAK:</b>	<p>Cilj ovog rada je istražiti kako se mehanička svojstva drva mijenjaju promjenom brzine nanošenja opterećenja u longitudinalnom i tangencijalnom smjeru. Vrsta drva korištena za izradu uzoraka je bukovina (<i>Fagus sylvatica</i>), a ispitana mehanička svojstva su: deformacija, naprezanje, modul elastičnosti, tangenti modul, specifična energija elastične i plastične deformacije, specifična snaga elastične i plastične deformacije, te omjer specifičnih snaga plastične i elastične deformacije. Pošto mehanička svojstva drva, osim brzine nanošenja opterećenja, ovise o više faktora, kao što su: vrsta drva iz kojih su pripremljeni uzorci, sadržaj vode u uzorcima, smjer nanošenja opterećenja (longitudinalni i tangencijalni), te dimenzije uzoraka; uzorci su morali biti ujednačenih svojstva. Ujednačena svojstva su postignuta na način da su uzorci pripremljeni iz iste piljenice bukovine, iskrojani su na jednake dimenzije te su imali isti sadržaj vode. Dimenzije uzoraka su bile manje, a brzine nanošenja opterećenja su bile veće od onih propisanim normom za ispitivanje mehaničkih svojstva drva (DIN EN 408). Manje dimenzije uzoraka od propisanih su smanjile mogućnost postojanja greške unutar samih uzoraka (poput kvrga), koje bi uzrokovale veća odstupanja pri obradi podataka, a brzine su bile veće od propisanih kako bi se mogla ispitati dinamička svojstva drva, tj. svojstva koja dolaze do izražaja pri određenoj obradi i uporabi drva.</p>

	<b>IZJAVA O IZVORNOSTI RADA</b>	<b>OB ŠF 05 07</b>
		Revizija: 1
		Datum: 28.6.2017.

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

---

*vlastoručni potpis*

Robert Roginić

U Zagrebu, 12.07.2019.

## POPIS KRATICA I OZNAKA:

- $a$  – dimenzija uzorka u radijalnom smjeru
- $b$  - dimenzija uzorka u tangencijalnom smjeru
- $c$  - dimenzija uzorka u longitudinalnom smjeru
- $a_x$  – koeficijent kvadratne jednadžbe (longitudinalni smjer)
- $a_y$  – koeficijent kvadratne jednadžbe (tangencijalni smjer)
- $b_x$  – koeficijent kvadratne jednadžbe(longitudinalni smjer)
- $b_y$  – koeficijent kvadratne jednadžbe(tangencijalni smjer)
- $c_x$  – koeficijent kvadratne jednadžbe(longitudinalni smjer)
- $c_y$  – koeficijent kvadratne jednadžbe(tangencijalni smjer)
- $E_x$  – modul elastičnosti (longitudinalni smjer)
- $E_y$  – modul elastičnosti (tangencijalni smjer)
- $-F_x$  – tlačna sila (longitudinalni smjer)
- $-F_y$  – tlačna sila (tangencijalni smjer)
- $e_{el(x)}$  – specifična energija elastične deformacije (longitudinalni smjer)
- $e_{el(y)}$  – specifična energija elastične deformacije (tangencijalni smjer)
- $\epsilon_{0(x)}$  – početna deformacija (longitudinalni smjer)
- $\epsilon_{0(y)}$  – početna deformacija (tangencijalni smjer)
- $\epsilon_{TP(x)}$  – deformacija u točki proporcionalnosti (longitudinalni smjer)
- $\epsilon_{TP(y)}$  – deformacija u točki proporcionalnosti (tangencijalni smjer)
- $\epsilon_{max(x)}$  – maksimalna deformacija (longitudinalni smjer)
- $\epsilon_{max(y)}$  – maksimalna deformacija (tangencijalni smjer)
- $K_x$  – tangenti modul (longitudinalni smjer)
- $K_y$  – tangenti modul (tangencijalni smjer)
- $\bar{K}_x$  – srednja vrijednost tangentskog modula (longitudinalni smjer)
- $\bar{K}_y$  – srednja vrijednost tangentskog modula (tangencijalni smjer)
- $P_{el(x)}$  – specifična snaga elastične deformacije (longitudinalni smjer)
- $P_{el(y)}$  – specifična snaga elastične deformacije (tangencijalni smjer)
- $P_{pl(x)}$  – specifična snaga plastične deformacije (longitudinalni smjer)

$P_{pl(y)}$  – specifična snaga plastične deformacije (tangencijalni smjer)

$\sigma_{0(x)}$  – početno naprezanje (longitudinalni smjer)

$\sigma_{0(y)}$  – početno naprezanje (tangencijalni smjer)

$\sigma_{TP(x)}$  – naprezanje u točki proporcionalnosti (longitudinalni smjer)

$\sigma_{TP(y)}$  – naprezanje u točki proporcionalnosti (tangencijalni smjer)

$\sigma_{max(x)}$  – maksimalni naprezanje (longitudinalni smjer)

$\sigma_{max(y)}$  – maksimalni naprezanje (tangencijalni smjer)

$t_{0(x)}$  – vrijeme potrebno da se postigne početna deformacija (longitudinalni smjer)

$t_{0(y)}$  – vrijeme potrebno da se postigne početna deformacija (tangencijalni smjer)

$t_{TP(x)}$  – vrijeme potrebno da se postigne deformacija u točki proporcionalnosti  
(longitudinalni smjer)

$t_{TP(y)}$  – vrijeme potrebno da se postigne deformacija u točki proporcionalnosti  
(tangencijalni smjer)

$t_{max(x)}$  – vrijeme potrebno da se postigne maksimalna deformacija (longitudinalni  
smjer)

$t_{max(y)}$  – vrijeme potrebno da se postigne maksimalna deformacija (tangencijalni smjer)

TP – točka proporcionalnosti

## Sadržaj

1	UVOD.....	1
1.1	Mehanička svojstva drva .....	1
2	HIPOTEZA I CILJEVI RADA .....	6
2.1	Hipoteza .....	6
2.2	Ciljevi rada .....	6
3	PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA .....	7
4	MATERIJALI I METODE .....	10
4.1	Materijali.....	10
4.2	Metode .....	11
4.2.1	Određivanje modula elastičnosti .....	17
4.2.2	Određivanje specifične energije i snage elastične deformacije.....	19
4.2.3	Određivanje tangentsnog modula u longitudinalnom smjeru .....	21
4.2.4	Određivanje tangentsnog modula u tangencijalnom smjeru .....	25
4.2.5	Određivanje specifične energije i snage plastične deformacije u longitudinalnom i tangencijalnom smjeru.....	27
4.2.6	Određivanje deformacije u točki proporcionalnosti u longitudinalnom i tangencijalnom smjeru .....	29
4.2.7	Pregled korištenih izraza .....	32
5	REZULTATI.....	34
5.1	Rezultati određivanja mehaničkih svojstva bukovine u longitudinalnom smjeru 34	
5.2	Rezultati određivanja mehaničkih svojstva bukovine u tangencijalnom smjeru 43	
6	ZAKLJUČCI.....	53

Robert Roginić  
UTJECAJ BRZINE NANOŠENJA OPTEREĆENJA NA TLAČNA SVOJSTVA BUKOVINE PRI MALIM  
DEFORMACIJAMA

7	ZAHVALE.....	54
8	LITERATURA.....	55
9	POPIS SLIKA.....	57



## 1 UVOD

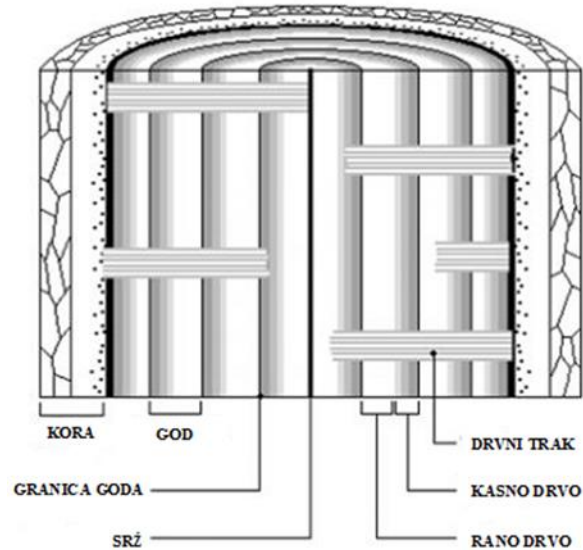
Drvo je prirodan materijal koji je unatoč sve većoj zastupljenosti sintetskih alternativa ostao sastavni dio čovjekovog života. Upotreba drva je raznolika, od graditeljstva, izrade ploča od usitnjenog drva i drvnokompozitnih materijala, uporaba drva za izradu energenata (ogrjevno drvo, peleti, briketi, dobivanje etanola i sl.), do izrade namještaja. Obzirom na sve strože tehnološke zahtjeve tržišta, pa i industrije, poznavanje mehaničkih svojstava drva je od iznimnog značaja. Ispitivanja mehaničkih svojstava drva propisana su normom (DIN EN 408) u kojoj je definirana brzina nanošenja opterećenja  $v = 0,0005 \cdot l_0$  mm/s ( $l_0$  je početna dimenzija uzorka). Međutim, drvo zbog svoje raznolike upotrebe često bude izloženo i znatno većim brzinama opterećenja kao što su obrada drva gdje sila rezanja ovisi o više faktora, a kao jedan od najutjecajnijih su mehanička svojstva samog obratka (Koch, 1968), ali i prilikom uporabe finalnih proizvoda koji su u potpunosti izrađeni od drva ili sadržavaju drvene komponente (npr. namještaj ili sportski rekviziti). Ovim se radom analizira utjecaj brzine nanošenja opterećenja na mehanička svojstva drva pri malim deformacijama.

### 1.1 Mehanička svojstva drva

Mehanička svojstva drva javljaju se kao reakcija istog na djelovanje vanjske mehaničke sile (Alfirević, 1989). Kao jedan prirodni polimerni materijal drvo je po mehaničkim i fizičkim svojstvima izrazito nehomogena i anizotropna tvar (Špoljarić, 1978.), a razlog takvim svojstvima je vrlo složena građa koja se može promatrati s makroskopskog i mikroskopskog stajališta. Promatra li se drvo s mikroskopskog stajališta, drvo se sastoji od stanica; osnovne strukturne i funkcionalne jedinice građe drva koja se sastoji od lumena i stijenke koje tvore usmjerena drvena vlakna međusobno povezana ligninom. Makroskopsku građu drva svrstavamo u one karakteristike koje su vidljive golim okom ili pod povećanjem do 20 puta. Slikom 1 je prikazana, poprečnim i uzdužnim presjekom, unutrašnjost drva koja otkriva, u većoj ili manjoj mjeri, različite strukturne karakteristike istog. Na slici 1, s vanjske strane

senalazi kora koja obavija drvo (ksilem) s čije se unutarnje strane nastavljaju godovi koji predstavljaju plašt prirasta drva jednog vegetacijskog razdoblja.

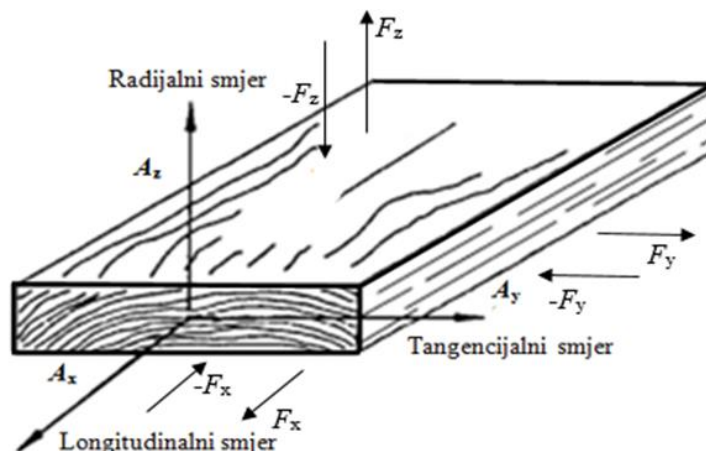
Unutar jednog goda razlikuje se zona ranog i kasnog drva, okomito na uzdužnu os drva se protežu drvni traci, a u anatomskom središtu poprečnoga presjeka drva nalazi se srčika.



**Slika 1.** Makroskopska građa drva

Izvor: (FPL, 1999)

Obzirom na građu, drvo se ubraja u ortotropne materijale (FPL, 1999) čija su mehanička svojstva izražena u tri istaknuta smjera: longitudinalni, tangencijalni i radijalni (slika 2).



**Slika 2.** Drvo kao ortotropni materijal s tri istaknuta smjera: longitudinalni, tangencijalni i radijalni smjer.  $A_x$ - longitudinalni smjer (paralelan sa smjerom protezanja drvnih vlaknaca),  $A_y$  – tangencijalni smjer (paralelan sa tangentom na liniju goda),  $A_z$  – radijalni smjer (okomit na tangentu na liniju goda). Sile pozitivnog predznaka (+F) su vlačne sile, a negativnog (-F) su tlačne.

Izvor: (FPL, 1999)

Vanjska sila koja djeluje na uzorak drva mijenja dimenzije i oblik tog uzorka. Djelovanje sile u jednom smjeru uzrokuje jednoosno, a istovremeno djelovanje sile u tri istaknuta smjera uzrokuje troosno stanje naprezanja. Ukoliko je smjer sile paralelan s jednim istaknutim smjerom, govorimo o vlačnom djelovanju sile, a ukoliko je smjer djelovanja sile antiparalelan jednom od istaknutih smjerova, govorimo o tlačnom djelovanju sile (Radmanović, 2015). Područje interesa ovog rada je jednoosno stanje naprezanja pri tlačnom djelovanju sile u longitudinalnom i tangencijalnom smjeru. Tlačno naprezanje u longitudinalnom smjeru definira se kao omjer sile i površine na koju sila djeluje

$$\sigma_x = \frac{|-F_x|}{A_x}, \quad (1)$$

a u tangencijalnom smjeru

$$\sigma_y = \frac{|-F_y|}{A_y}, \quad (2)$$

Naprezanje uzrokuje deformaciju. Deformacija se definira kao omjer promjene duljine uzorka i početne duljine uzorka. U longitudinalnom smjeru

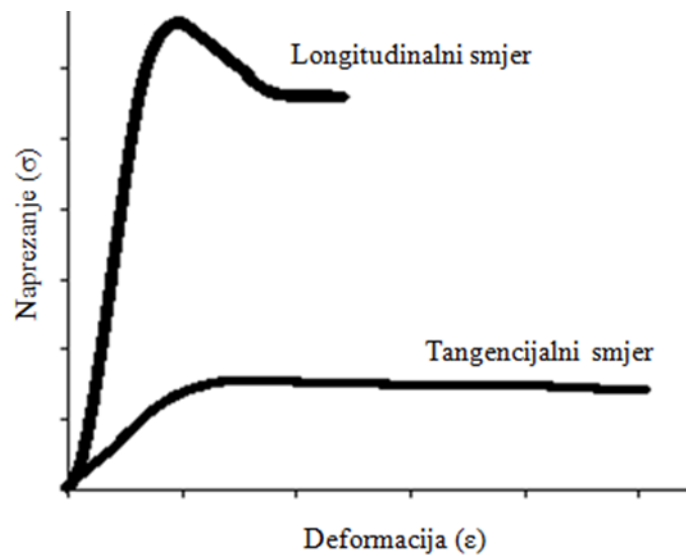
$$\varepsilon_x = \frac{|\Delta l_x|}{l_{0x}}, \quad (3)$$

gdje je  $\Delta l_x$  relativna promjena duljine u longitudinalnom smjeru, a  $l_{0x}$  početna duljina uzorka u longitudinalnom smjeru, a u tangencijalnom smjeru

$$\varepsilon_y = \frac{|\Delta l_y|}{l_{0y}}, \quad (4)$$

gdje je  $\Delta l_y$  relativna promjena duljine u tangencijalnom smjeru, a  $l_{0y}$  početna duljina uzorka u tangencijalnom smjeru. Deformacija može biti elastična (povratna) ili plastična (nepovratna). Elastične deformacije uzrokuju promjenu oblika te se nakon prestanka djelovanja sile uzorak vraća u prvobitno stanje. Plastične deformacije uzrokuju promjenu i oblika i volumena uzorka (Basar, 2000), odnosno sile su tako velike da prelaze izdržljivost drva te ono postaje trajno deformirano.

Mehanička svojstva drva određuju se iz dijagrama međusobne ovisnosti naprezanja i deformacija (dijagram n-d). Na slici 3 prikazan je tipičan dijagram n-d pri djelovanju sile u longitudinalnom i tangencijalnom smjeru.



**Slika 3.** Dijagram međusobne ovisnosti naprezanja i deformacija pri tlačnom djelovanju sile u longitudinalnom i tangencijalnom smjeru.

Eksperimenti na uzorcima drva pokazali su da su apsolutne veličine deformacija u longitudinalnom smjeru višestruko manje od veličine deformacija u tangencijalnom smjeru. Međutim, zbog različite prirode deformiranja u različitim smjerovima, iz ispitivanja u longitudinalnom smjeru ne može se zaključiti kakve su karakteristike drva u tangencijalnom smjeru (Bodig, 1982).

## **2 HIPOTEZA I CILJEVI RADA**

### **2.1 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.

### **2.2 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 (tangenti modul, specifična energija i snaga plastične deformacije) o brzini nanošenja opterećenja

### 3 PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Faktori koji utječu na mehanička svojstva drva su mnogobrojni, te ovise o više čimbenika, a najviše ovise o samoj vrsti drva. Poznavanjem mehaničkih svojstva drva omogućen je adekvatan odabir alata i režima obrade kojim se povećava učinkovitost obrade, smanjuju se troškovi proizvodnje, a da uz navedeno kvaliteta obrade odgovara zahtjevima tržišta.

Güntekini Aydın (2013) su ispitali mehanička svojstva (savijanje, tlačna i vlačna svojstva u smjeru protezanja drvnih vlakanca) turskog crvenog bora (*Pinus brutia Ten.*) u ovisnosti o sadržaju vode. Odabrani su trupci I, II i III razreda kvalitete, prema normi TS EN 1927-2, promjera 23 - 57 cm. Iz trupaca su iskrojeni uzorci dimenzija 45 x 90 x 3000 mm, koji prema normi TS 1265 spadaju u I, II, III razred kvalitete. Kako bi se postigla ujednačena svojstva uzoraka; svi uzorci su izrađeni iz bjeljike te su kondicionirani u sušioniku do 0 % sadržaja vode (pri temperaturi  $103 \pm 2$  °C i relativnoj vlazi zraka od 20 %), do 8 % (pri temperaturi 32 °C i relativnoj vlazi zraka 45 %), do 17 % sadržaja vode (pri temperaturi 32 °C i relativnoj vlazi zraka od 85 %) i do 28 % sadržaja vode (pri temperaturi 26,67 °C i relativnoj vlazi zraka od 90 %). Ustanovljeno je kako opadanjem sadržaja vode ispod točke zasićenosti vlakanca, sva mjerena mehanička svojstva eksponencijalno rastu. Pri padu sadržaja vode za 1 %: vlačna čvrstoća je porasla za 0,7 %, modul elastičnosti pri vlačnom ispitivanju je porastao za 1,4 %, čvrstoća na tlak je porasla za 2,3 %, modul elastičnosti pri tlačnom ispitivanju je porastao za 1,8 %, modul elastičnosti savijanja je porastao za 1,8 %, čvrstoća na savijanje je porasla za 1,3 %

Bektash, Güler i Bashtürk (2001) su ispitivali mehanička svojstva istočne bukve (*Fagus orientalis Lipsky*), te su ista uspoređivali sa drugim vrstama bukve. Uzorci su izrađeni iz trupaca duljine 1 m, ispiljenih iz debla s visine 2 do 4 gledano od same baze debla (prema normi TS 476/1984) te su opterećivani tlačno, savojno (statički), udarno i smično. Ispitivanje tlačne čvrstoće u smjeru protezanja drvnih vlakanca je sprovedeno prema normi TS 2595/1977, a dimenzije uzoraka s iznosile 40 x 40 x 60 mm. Uzorci su kondicionirani na 12 % sadržaja vode, a ispitivanje tlačnih svojstva se

izvelo nad 80 uzoraka pri brzini nanošenja opterećenja 0,6 mm/min. Statička savojna čvrstoća je ispitana prema normi TS 2474/1976, a dimenzije uzoraka su iznosile 20 x 20 x 360 mm. Uzorci su kondicionirani na sadržaj vode od 12 %, a ispitivanje je vršeno u tangencijalnom smjeru. Brzina nanošenja statičkog savojnog opterećenja je iznosila 1 mm/min, a ispitalo se 100 uzoraka. Ispitivanje čvrstoće na udarac sprovedeno je prema normi TS 2477/1976, a dimenzije uzoraka su bile 20 x 20 x 300 mm. Uzorci su kondicionirani na 12 % sadržaja vode, a brzina udara bata je iznosila 86 m/s. Ispitivanje čvrstoće na smik radijalne površine sprovedeno je prema normi TS 3459/1980. ustanovljeno je kako srednja vrijednost čvrstoće na tlak iznosi 606 kg/cm<sup>2</sup>, statičke savojne čvrstoće 1204 kg/cm<sup>2</sup>, čvrstoće na udarac 0,85 kg/cm<sup>2</sup> i čvrstoće na smik 99 kg/cm<sup>2</sup>.

Hakan Akyildiz i Sahin Kol (2009) su ispitali fizička i mehanička svojstva drva paulovnije (*Paulownia tomentosa Steud.*). Ispitana fizička svojstva su bila: gustoća zrakosuhog drva, gustoća apsolutno suhog drva, nominalna gustoća drva, bubrenje, utezanje te koeficijente toplinske vodljivosti apsolutno suhog i zrakosuhog drva. Ispitana mehanička svojstva su bila: čvrstoća na savijanje, modul elastičnosti savijanja, čvrstoća na tlak u longitudinalnom smjeru, tvrdoća, Uzorci su izrađeni iz stabala starosti 6 godina, 30-40 cm promjera na prsnoj visini. Trupci su ispiljeni paralelno s drvnim vlakancima prema normi TS 4176/1984 te su sušeni prirodno do 12 % sadržaja vode. Dimenzije uzoraka u svrhe određivanja gustoća su bile 20 x 20 x 30 mm, a gustoća se određivala prema normi TS 2472/1976. U svrhe određivanja utezanja i bubrenja 30 x 30 x 15 mm, a ispitivanje se izvelo prema normi TS 4083/1983 i TS 4084/1983. U svrhe ispitivanja toplinske vodljivosti dimenzije uzoraka su bile 20 x 50 x 100 mm, a određena je prema ASTM C 111-99. Dimenzije uzoraka za određivanje čvrstoće na tlak u longitudinalnom smjeru su iznosile 20 x 20 x 30 mm, a određena je prema normi TS 2595/1977. Dimenzije uzoraka u svrhe određivanja čvrstoće na savijanje su iznosile 20 x 20 x 320 mm, a određena je prema normi TS 2478/1976. U svrhe određivanja tvrdoće prema Brinellu, uzorci su bili dimenzija 50 x 50 x 50 mm, a tvrdoća je određena prema normi TS 2479/1976. Za svako od navedeno ispitivanje ponovilo se 30 puta. Gustoća drva su u zrakosuhom stanju je iznosila 0,317 g/cm<sup>3</sup>, a u apsolutno suhom stanju 0,294 g/cm<sup>3</sup> i nominalna



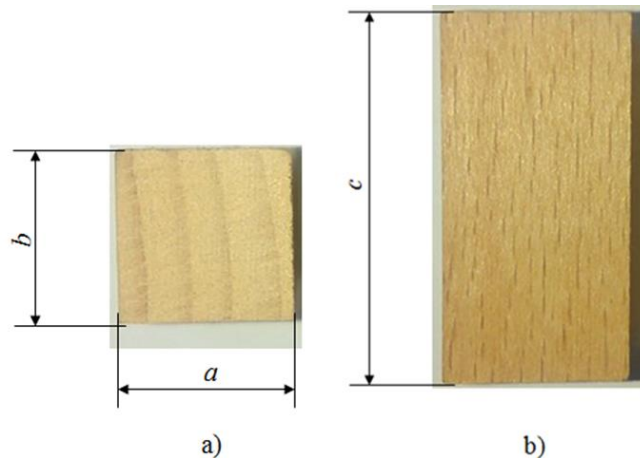
gustoća  $0,272 \text{ g/cm}^3$ . Volumno utezanje je iznosilo  $7,78 \%$ , a bubrenje  $8,41 \%$ . Toplinska vodljivost u radijalnom smjeru je iznosila  $0,089 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ , u tangencijalnom smjeru  $0,090 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$  i u longitudinalnom smjeru  $0,133 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ . Pri točki zasićenosti vlaknaca ( $28,79\%$ ) čvrstoća na savijanje je iznosila  $43,56 \text{ N/mm}^2$ , modul elastičnosti pri savijanju je iznosio  $4281,32 \text{ N/mm}^2$ , čvrstoća na tlak  $25,55 \text{ N/mm}^2$ , čvrstoća po Brinellu u longitudinalnom smjeru i okomito na smjer protezanja vlaknaca je iznosila  $2,01 \text{ kgf/mm}^2$  i  $0,88 \text{ kgf/mm}^2$ .

## 4 MATERIJALI I METODE

Eksperimentalno istraživanje izvedeno je u dvije faze. U prvoj su fazi odabrani i pripremljeni uzorci, a u drugoj fazi je ispitana tlačna čvrstoća odabranih uzoraka drva u longitudinalnom i tangencijalnom smjeru. Ispitivanje tlačne čvrstoće uzoraka drva sprovedeno je u akreditiranom laboratoriju (Laboratorij za drvo u graditeljstvu) Šumarskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

### 4.1 Materijali

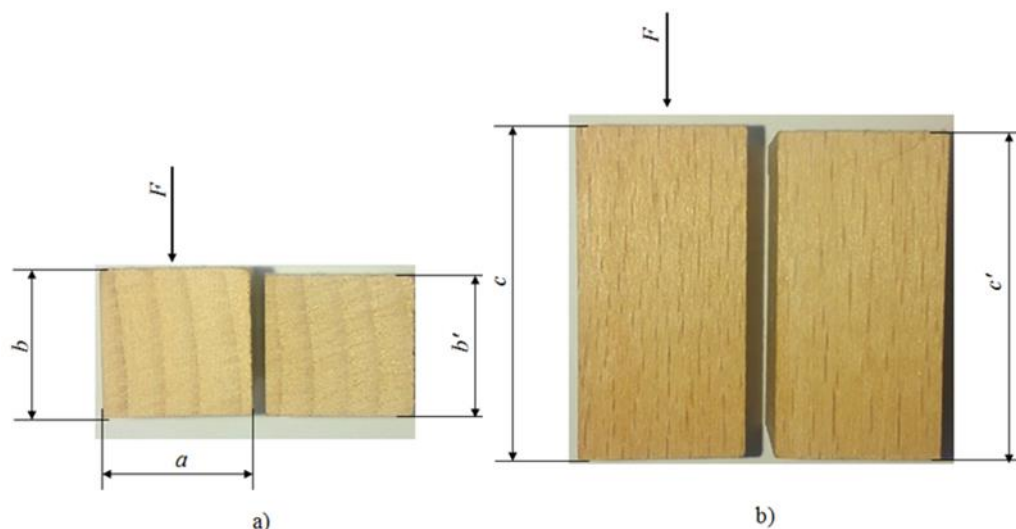
Ispitivanje ovisnosti mehaničkih svojstava o brzini nanošenja opterećenja sprovedeno je na uzorcima bukovine (*Fagus sylvatica*), kao najraširenije vrste drva u Hrvatskoj. Poznato je da mehanička svojstva drva ovise o dimenzijama ispitivanih uzoraka, odnosno o samom sastavu uzoraka drva (Horvat i Krpan, 1967.). Kako bi se što preciznije odredila energija potrebna za deformaciju jediničnog volumena, nastojalo se raditi sa što manjim dimenzijama uzoraka, a koje je bilo moguće kvalitetno ispitati na kidalici. Odabrani piljenica za izradu uzoraka bila je bez vidljivih grešaka koje bi mogle znatno utjecati na rezultate mjerenja. Uzorci su ispiljeni na odabrane dimenzije ( $a = b = 1,5$  cm i  $c = 3$  cm) (slika 4.), te im je elektrootpornim vlagomjerom izmjeren sadržaj vode koji je iznosio 9 %.



**Slika 4.** Ispiljeni uzorci bukovine. a) poprečni presjek: a – dimenzija uzorka u radijalnom smjeru, b – dimenzija uzorka u tangencijalnom smjeru, b) radijalni presjek: c -dimenzija uzorka u longitudinalnom smjeru

## 4.2 Metode

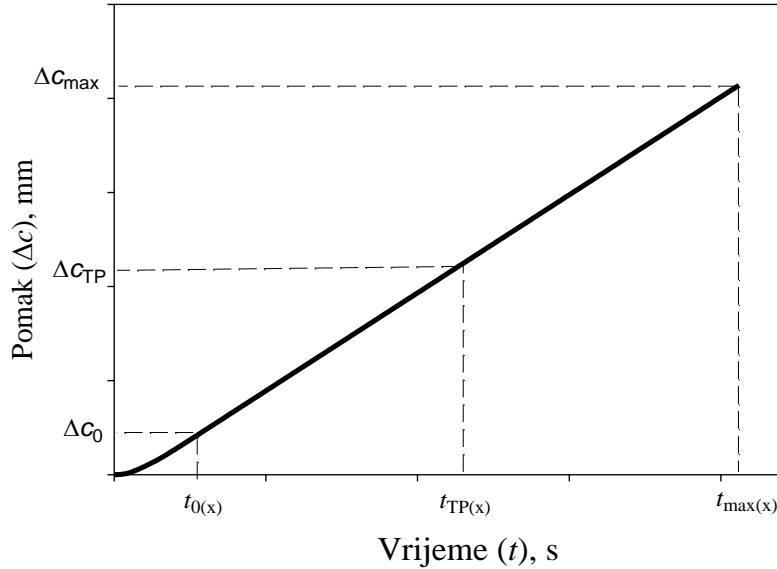
Drugom fazom eksperimentalnog dijela izmjerena su tlačna svojstva uzoraka bukovine u ovisnosti o brzini nanošenja opterećenja u longitudinalnom i tangencijalnom smjeru. Slikom 2 prikazan je poprečni (slika 5.a) i radijalni (slika 5.b) presjek uzorka s odgovarajućim dimenzijama prije i nakon nanošenja opterećenja. Na slici 5.a sila ( $F$ ) djeluje u tangencijalnom smjeru, a na slici 5.b u longitudinalnom smjeru.



**Slika 5.** Djelovanje sile ( $F$ ) u: a) tangencijalnom smjeru:  $a$  – dimenzija uzorka u radialnom smjeru prije nanošenja opterećenja,  $b$  – dimenzija uzorka u tangencijalnom smjeru prije nanošenja opterećenja,  $b'$  - dimenzija uzorka u tangencijalnom smjeru nakon nanošenja opterećenja, b) longitudinalnom smjeru:  $c$  - dimenzija uzorka u longitudinalnom smjeru prije nanošenja opterećenja,  $c'$  - dimenzija uzorka u longitudinalnom smjeru nakon nanošenja opterećenja

Sile u longitudinalnom i tangencijalnom smjeru s odgovarajućim pomacima ( $\Delta c = c' - c$  i  $\Delta b = b' - b$ ) izmjereni su na kitalici proizvođača Shimadzu, tip *Autograph AG – X*, opremljenoj dinamometrom nazivne sile 100000 N. Tijek i postupak ispitivanja programiran je pripadajućim softverom *Trapezium X*. Obzirom da su područje interesa ovog rada male deformacije, mjerenje pomaka u longitudinalnom smjeru ( $\Delta c$ ) vršeno je sve dok sila nije postigla svoju maksimalnu vrijednost, a pomak u tangencijalnom smjeru ( $\Delta b$ ) mjereno je do deformacije od 6 %. Prema Tkalec i Prekrat (2000.) čvrstoća na tlak drva, pri 15% sadržaja vode, je 3 do 10 puta veća u longitudinalnom smjeru nego u tangencijalnom. Mehanička svojstva drva određena su u ovisnosti o brzini nanošenja opterećenja, a izabrane su sljedeće brzine:  $v = (2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45$  i  $50)$  mm/min. Tijekom pojedinog ispitivanja brzina nanošenja opterećenja je bila konstantna. Na slici 6 prikazan je dijagram ovisnosti pomaka u longitudinalnom smjeru ( $\Delta c$ ) o vremenu. Brzina nanošenja opterećenja u longitudinalnom smjeru može se definirati kao

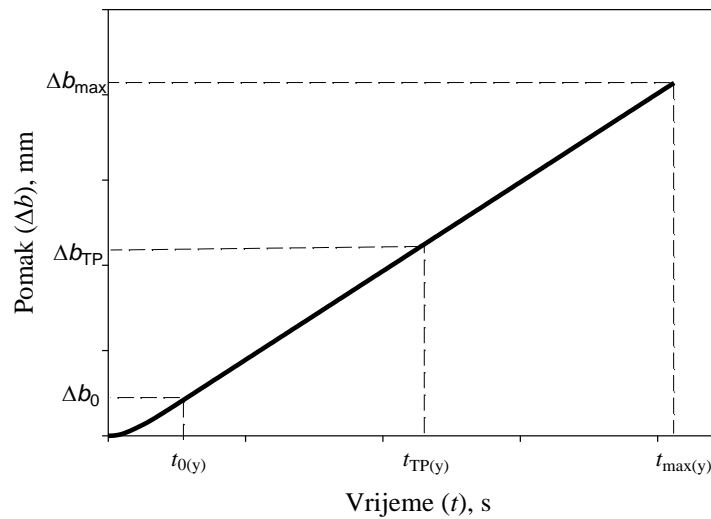
$$v = \frac{|\Delta c|}{\Delta t} = \frac{|\Delta c_0|}{t_{0(x)}} = \frac{|\Delta c_{TP}|}{t_{TP(x)}} = \frac{|\Delta c_{max}|}{t_{max(x)}} \quad (5)$$



**Slika 6.** Dijagram ovisnosti pomaka ( $\Delta c$ ) u longitudinalnom smjeru o vremenu ( $t$ ).

Na slici 7 prikazan je dijagram ovisnosti pomaka u tangencijalnom smjeru ( $\Delta b$ ) o vremenu  $t$ . Obzirom da je tijekom jednog ispitivanja brzina nanošenja opterećenja u tangencijalnom smjeru bila konstantna, vrijedi

$$v = \frac{|\Delta b|}{\Delta t} = \frac{|\Delta b_0|}{t_{0(y)}} = \frac{|\Delta b_{TP}|}{t_{TP(y)}} = \frac{|\Delta b_{max}|}{t_{max(y)}} \quad (6)$$



**Slika 7.** Dijagram ovisnosti pomaka ( $\Delta b$ ) u tangencijalnom smjeru o vremenu ( $t$ ).

Podaci izmjerene sile i pomaka obrađeni su u programskom paketu Sigmaplot v.10.0. Tlačno naprezanje pri djelovanju sile u longitudinalnom smjeru određeno je prema izrazu

$$\sigma_x = \frac{F}{a \cdot b}, \quad (7)$$

a pripadajuća relativna deformacija u longitudinalnom smjeru prema izrazu

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta c}{c}. \quad (8)$$

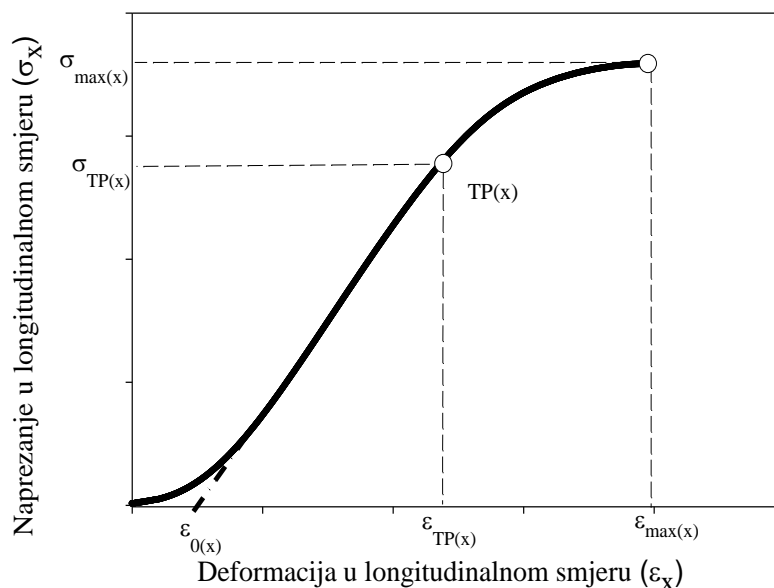
Tlačno naprezanje pri djelovanju sile u tangencijalnom smjeru određeno je prema izrazu

$$\sigma_y = \frac{F}{a \cdot c}, \quad (9)$$

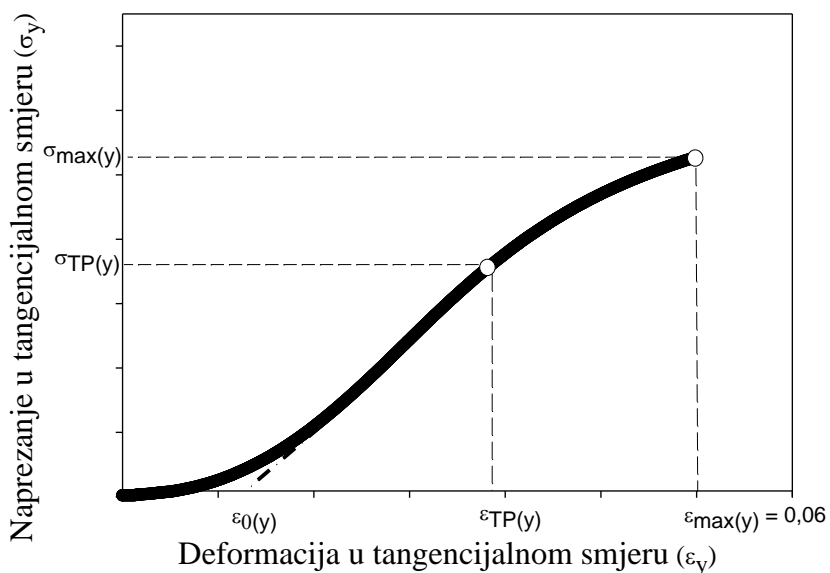
a pripadajuća relativna deformacija u tangencijalnom smjeru prema izrazu

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta b}{b} \cdot \quad (10)$$

Nakon izračunavanja tlačnih napreznja i pripadajućih relativnih deformacija napravljeni su dijagrami n-d. Dijagram n-d pri tlačnom djelovanju sile u longitudinalnom smjeru prikazan je na slici 8, a u tangencijalnom smjeru na slici 9. Parametri dijagrama u longitudinalnom smjeru označeni su indeksom x, a u tangencijalnom smjeru indeksom y. Na slikama je vidljivo da nakon početnog nelinearnog slijedi linearan odnos napreznja i deformacija. Početna nelinearnost nastaje zbog toga što u početku djelovanja sile, osim tlačenja dolazi i do namještanja uzorka zbog mikroneravnina na njegovoj površini zbog čega se kao početak elastične deformacije uzima deformacija  $\varepsilon_0$  (slike 8 i 9). Područje u kojem je odnos napreznja i deformacija linearan naziva se elastično područje. Točka proporcionalnosti (TP) označava kraj elastičnog područja i početak plastičnog područja. Unutar plastičnog područja nastaju trajne deformacije koje ostaju i nakon djelovanja sile. Uzorak u longitudinalnom smjeru je opterećivan do trenutka u kojem je sila postigla svoju maksimalnu vrijednost, a u tangencijalnom smjeru do deformacije 6 % ( $\varepsilon_y = 0,06$ ).



**Slika 8.** Dijagram međusobne ovisnosti naprežanje deformacija pri djelovanju sile u longitudinalnom smjeru.  $\sigma_{max(x)}$  – maksimalno naprežanje u longitudinalnom smjer, TP(x) – točka proporcionalnosti u longitudinalnom smjeru



**Slika 9.** Dijagram n-d pri djelovanju sile u tangencijalnom smjeru.  $\epsilon_{max(y)}$  – konačna deformacija u tangencijalnom smjeru, TP(y) – točka proporcionalnosti u tangencijalnom smjeru.

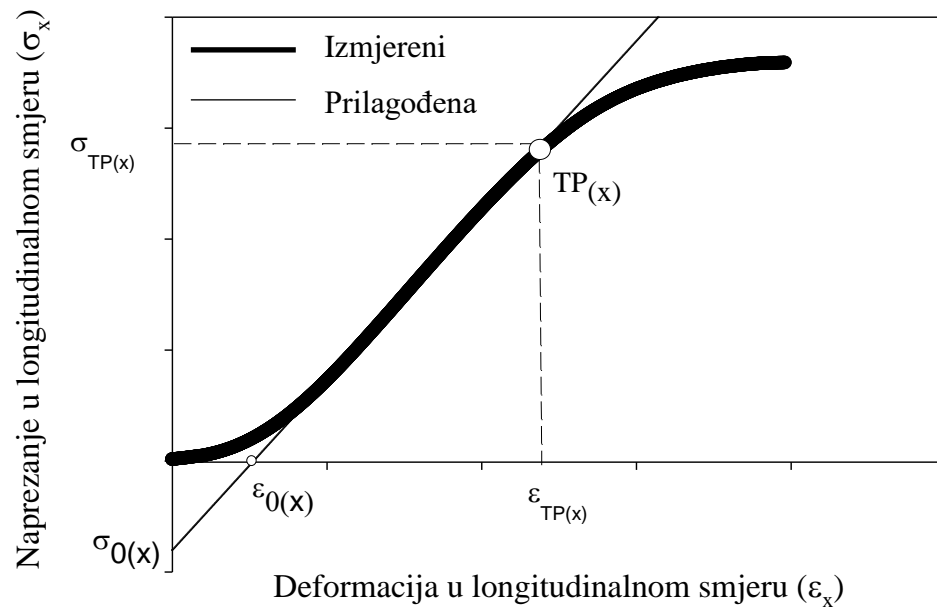


#### 4.2.1 Određivanje modula elastičnosti

Sila koja djeluje na uzorak bukovine mijenja dimenzije i oblik tog uzorka. Promjena oblika može biti elastična ili plastična tj. promjena oblika se sastoji od povratnih ili elastičnih deformacija i nepovratnih ili plastičnih deformacija. Kod elastične promjene oblika, po prestanku djelovanja vanjske sile, uzorak se vraća u prvobitni oblik, a modul elastičnosti predstavlja mjeru elastičnosti, odnosno vezu između naprezanja i deformacije u elastičnom području dijagrama n-d. Prema Tkalec i Prekrat (2000.) modul elastičnosti drva u tangencijalnom smjeru, pri 15% sadržaja vode, iznosi svega od 1/11 do 1/40 modula elastičnosti u longitudinalnom smjeru. Razmatranja elastičnog područja identična su za oba promatrana smjera, te će se zbog jednostavnosti prikazati opći izrazi kojima se pridružuje indeks x za longitudinalni i indeks y za tangencijalni smjer. Veza između naprezanja i deformacije u elastičnom području može se opisati linearnom funkcijom (Požgaj, 1993)

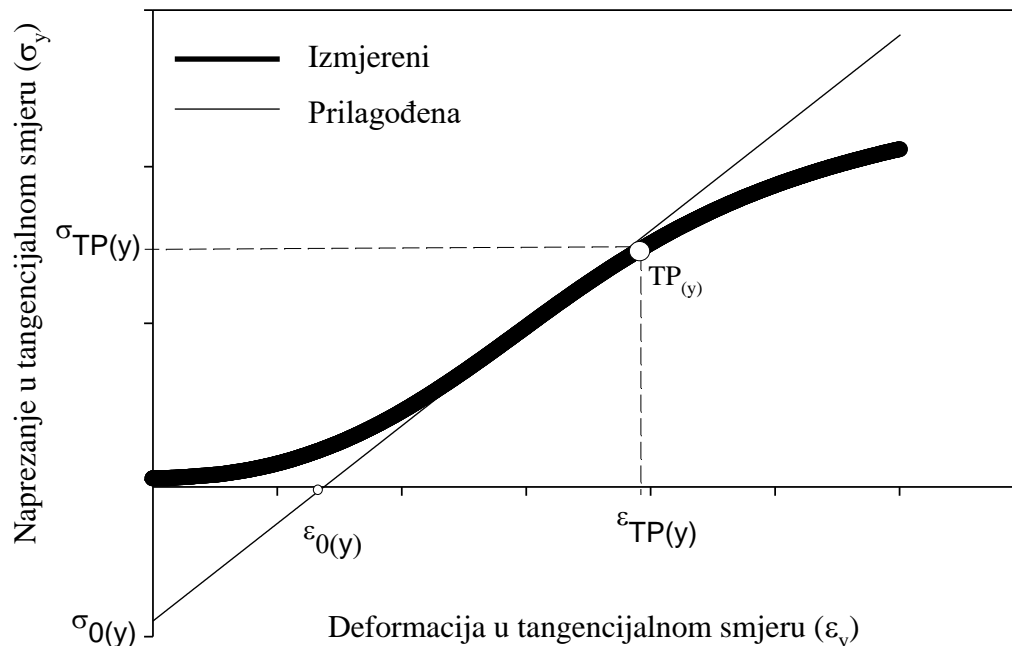
$$\sigma_{el} = \sigma_0 + E \cdot \varepsilon_{el}, \quad (11)$$

gdje  $\sigma_{el}$  označava svako naprezanje manje od  $\sigma_{TP}$ , a  $\varepsilon_{el}$  svaku deformaciju za koju vrijedi  $\varepsilon_0 \leq \varepsilon_{el} \leq \varepsilon_{TP}$ .  $\sigma_0$  označava odsječak linearne funkcije na ordinati, a  $E$  modul elastičnosti (nagib linearne funkcije naspram osi deformacije). Modul elastičnosti ( $E$ ) i odsječak linearne funkcije na ordinati ( $\sigma_0$ ) određeni su na način da se eksperimentalno izmjerenim podacima u linearnom području dijagrama n-d prilagođavao (fitao) izraz (11). Slikom 10 prikazan je dijagram n-d u longitudinalnom smjeru (indeks x) sa prilagođenom linearnom funkcijom u elastičnom području.



**Slika 10.** Dijagram n-d pri djelovanju sile u longitudinalnom smjeru.  $\sigma_{TP(x)}$  – maksimalno elastično naprezanje u longitudinalnom smjeru, TP(x) – točka proporcionalnosti u longitudinalnom smjeru.

Slikom 11 prikazan je dijagram n–d u tangencijalnom smjeru (indeks y) sa prilagođenom linearnom funkcijom u elastičnom području.



**Slika 11.** Dijagram n-d pri djelovanju sile u tangencijalnom smjeru.  $\varepsilon_{TP(y)}$  – maksimalna elastična deformacija u tangencijalnom smjeru,  $TP_{(y)}$  – točka proporcionalnosti u tangencijalnom smjeru.

#### 4.2.2 Određivanje specifične energije i snage elastične deformacije

Pri procesu deformacije uzoraka bukovine sila izvrši određeni rad. Jedan dio rada koji ta sila izvrši akumulira se u materijalu u vidu potencijalne energije deformacije. Zanemare li se gubici uslijed pretvaranja u ostale oblike energije, sav uloženi rad vanjske sile pretvara se u potencijalnu energiju bukovine. Ova energija je u granicama elastičnog ponašanja povratna, što znači da po prestanku djelovanja sile uzorak bukovine može vršiti mehanički rad jednak uskladištenoj elastičnoj energiji.

Elementarni deformacijski rad uložen na elastičnu deformaciju jediničnog volumena naziva se specifična energija elastične deformacije, a određena je izrazom

$$e_{el} = \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_{TP}} \sigma_{el} d\varepsilon_{el} = \sigma_0 \cdot (\varepsilon_{TP} - \varepsilon_0) + \frac{E}{2} \cdot (\varepsilon_{TP}^2 - \varepsilon_0^2) \quad (12)$$

Specifična snaga elastične deformacije ( $P_{el}$ ) predstavlja brzinu prijenosa specifične elastične energije, a određena je prema

$$P_{el} = \frac{e_{el}}{t_{TP} - t_0} \quad (13)$$

Iz izraza (8) i (9) slijedi da je za određivanje specifične energije i snage elastične deformacije potrebno poznavati parametre koji ograničavaju elastično područje na osi apcise ( $\varepsilon_0$  i  $\varepsilon_{TP}$ ) i vrijeme potrebno da sila postigne navedene deformacije ( $t_0$  i  $t_{TP}$ ). Deformacija i vrijeme u točki proporcionalnosti ( $\varepsilon_{TP}$  i  $t_{TP}$ ) određeni su u odjeljku 4.2.6., a deformacija  $\varepsilon_0$  određena je izjednačavanjem izraza (11) sa nulom

$$\sigma_0 + E \cdot \varepsilon_0 = 0 \Rightarrow \varepsilon_0 = -\frac{\sigma_0}{E} \quad (14)$$

Kombinacijom izraza (5), (8) i (14) određeno je vrijeme ( $t_0$ ) potrebno da sila postigne deformaciju  $\varepsilon_0$

$$t_0 = -\frac{\sigma_0 \cdot c}{E \cdot v} \quad (15)$$

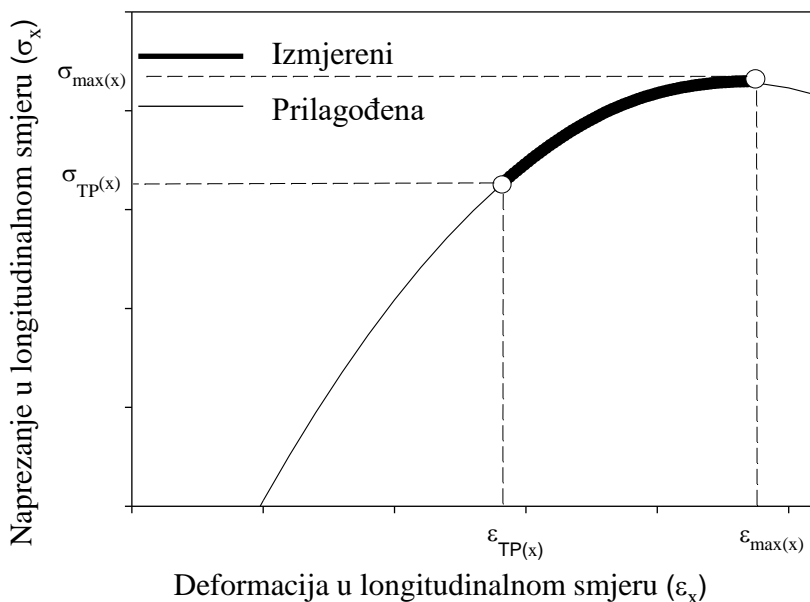
Izraz (15) pokazuje da vrijeme potrebno da sila postigne deformaciju  $\varepsilon_0$ , osim o brzini, ovisi i obrnuto proporcionalno o modulu elastičnosti ( $E$ ), te proporcionalno sa duljinom uzorka ( $c$ ) i naprezanjem ( $\sigma_0$ ).

### 4.2.3 Određivanje tangentskog modula u longitudinalnom smjeru

Tangentski modul predstavlja mjeru plastičnosti, odnosno vezu između naprezanja i deformacija u plastičnom području dijagrama  $n-d$  (Mathew i sur., 1982.). Na slici 13 prikazano je plastično područje dijagrama  $n-d$  pri tlačnom djelovanju sile u longitudinalnom smjeru. Plastična deformacija  $\varepsilon_{pl(x)}$  je svaka deformacija za koju vrijedi  $\varepsilon_{TP(x)} \leq \varepsilon_{pl(x)} \leq \varepsilon_{max(x)}$ , a plastično naprezanja ( $\sigma_{pl(x)}$ ) je svako naprezanje za koje vrijedi  $\sigma_{TP(x)} \leq \sigma_{pl(x)} \leq \sigma_{max(x)}$ . Prema Gaaf i sur. (2017.) odnos naprezanja i deformacija u plastičnom području može se opisati funkcijom drugog reda. Eksperimentalno izmjerenim podacima u plastičnom području prilagođavana (fitana) je funkcija

$$\sigma_{pl(x)} = a_x \cdot \varepsilon_{pl(x)}^2 + b_x \cdot \varepsilon_{pl(x)} + c_x, \quad (16)$$

pri čemu su određeni koeficijenti  $a_x$ ,  $b_x$  i  $c_x$  koji opisuju ponašanje funkcije u promatranom dijelu plastičnog područja.



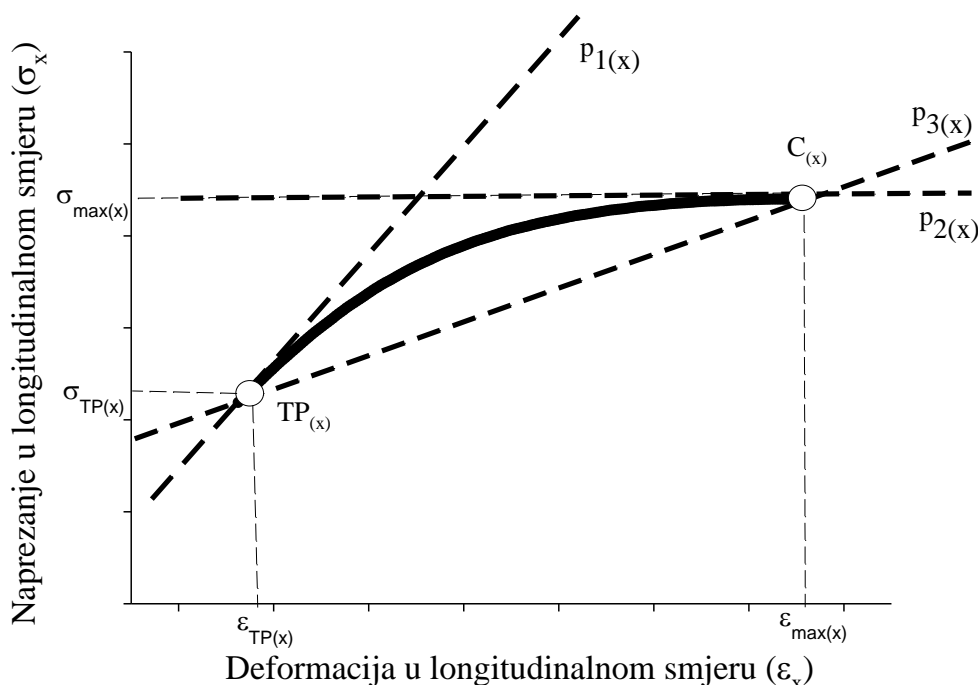
**Slika 12.** Dijagram n-d pri djelovanju sile u longitudinalnom smjeru.  $\sigma_{max(x)}$  – maksimalno naprezanje u longitudinalnom smjeru,  $\epsilon_{max(x)}$  – deformacija pri maksimalnom naprezanju u longitudinalnom smjeru, TP(x) – točka proporcionalnosti u longitudinalnom smjeru.

Tangentni modul u longitudinalnom smjeru ( $K_x$ ) predstavlja nagib tangente na krivulju u plastičnom području, a definiran je kao prva derivacija izraza (16)

$$K_x = \frac{d\sigma_{pl(x)}}{d\epsilon_{pl(x)}} = 2 \cdot a_x \cdot \epsilon_{pl(x)} + b_x \quad (17)$$

Iz izraza (17) slijedi da je tangentni modul linearno ovisan o plastičnoj deformaciji, a koeficijent linearnosti je dvostruka konstanta  $a_x$  ( $2a_x$ ). Tangentni modul ima maksimalnu vrijednost pri deformaciji u točki proporcionalnosti ( $\epsilon_{TP(x)}$ ), a pri maksimalnoj deformaciji ( $\epsilon_{max(x)}$ ) jednak je nuli. Na slici 13 prikazano je plastično područje dijagrama n–d u longitudinalnom smjeru sa tri ucrtana pravca ( $p_{1(x)}$ ,  $p_{2(x)}$  i

$p_{3(x)}$ ). Pravac  $p_{1(x)}$  je tangenta na krivulju n–d u točki proporcionalnosti ( $TP_{(x)}$ ). Nagib pravca  $p_1$  u odnosu na os deformacije predstavlja maksimalnu vrijednost tangentskog modula ( $K_{\max(x)}$ ). Pravac  $p_{2(x)}$  je tangenta na krivulju n–d u točki u kojoj se postiže maksimalno naprezanje ( $C_{(x)}$ ), te je paralelan sa osi deformacije ( $K_x = 0$ ). Pravac  $p_{3(x)}$  predstavlja sekantu koja krivulju n–d siječe u točki proporcionalnosti ( $TP_{(x)}$ ) i u točki u kojoj se postiže maksimalno naprezanje ( $C_{(x)}$ ).



**Slika 13.** Plastično područje dijagrama n–d u longitudinalnom smjeru sa tri ucrtana pravca ( $p_{1(x)}$ ,  $p_{2(x)}$  i  $p_{3(x)}$ )

Nagib pravca  $p_{3(x)}$  naspram osi deformacije predstavlja srednju vrijednost tangentskog modula u longitudinalnom smjeru  $\bar{K}_x$ , a određen je prema izrazu

$$\bar{K}_x = \frac{\sigma_{\max(x)} - \sigma_{TP(x)}}{\epsilon_{\max(x)} - \epsilon_{TP(x)}} \quad (18)$$

Iz izraza (18) vidljivo je da srednja vrijednost tangentskog modula u longitudinalnom smjeru ovisi o naprezanju i deformaciji u točki proporcionalnosti (određeni u odjeljku 4.2.6.) i maksimalnom naprezanju i deformaciji. Deformacija pri maksimalnom naprezanju određena je izjednačavanjem prve derivacije izraza (16) sa nulom

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_{pl(x)}}{d\varepsilon_{pl(x)}} &= 0 \\ 2 \cdot a_x \cdot \varepsilon_{\max(x)} + b_x &= 0 \Rightarrow \varepsilon_{\max(x)} = -\frac{b_x}{2 \cdot a_x} \end{aligned} \quad (19)$$

Uvrštavanjem izraza (19) u izraz (16) slijedi izraz za maksimalno naprezanje u longitudinalnom smjeru

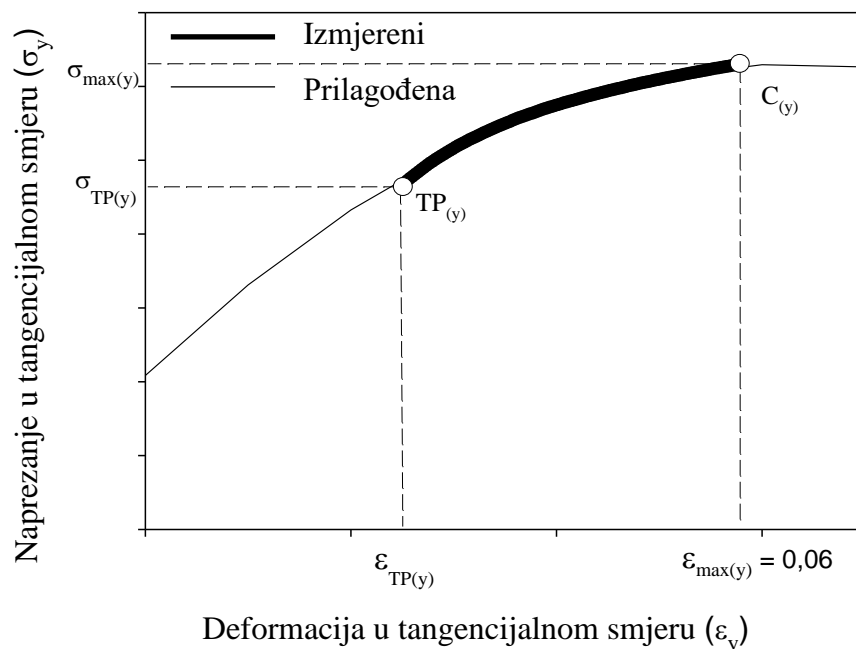
$$\sigma_{\max(x)} = a_x \cdot \left( -\frac{b_x}{2 \cdot a_x} \right)^2 + b_x \cdot \left( -\frac{b_x}{2 \cdot a_x} \right) + c_x \cdot \quad (20)$$



#### 4.2.4 Određivanje tangentsnog modula u tangencijalnom smjeru

Na slici 14 prikazan je dijagram  $\sigma$ - $\epsilon$  pri djelovanju sile u tangencijalnom smjeru. Eksperimentalno izmjerenim podacima u plastičnom području prilagođavana (fitana) je krivulja drugog reda oblika

$$\sigma_{pl(y)} = a_y \cdot \epsilon_{pl(y)}^2 + b_y \cdot \epsilon_{pl(y)} + c_y, \quad (21)$$



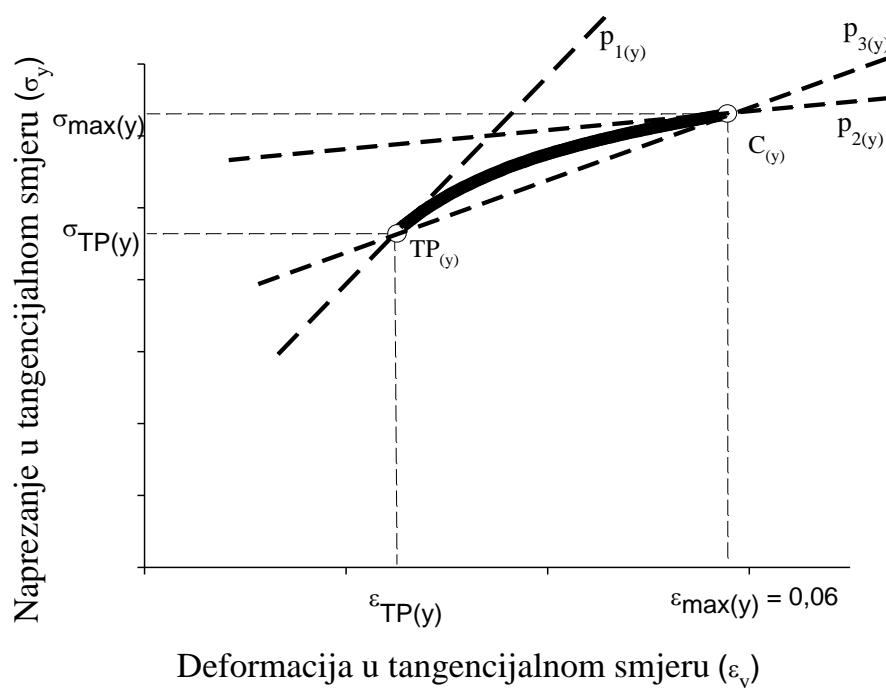
**Slika 14.** Dijagram međusobne ovisnosti naprežanje deformacija pri djelovanju sile u tangencijalnom smjeru.  $\sigma_{max(y)}$  – maksimalno naprežanje u tangencijalnom smjeru,  $\epsilon_{max(y)}$  – deformacija pri maksimalnom naprežanju u tangencijalnom smjeru,  $TP(y)$  – točka proporcionalnosti u tangencijalnom smjeru

Tangentsni modulu tangencijalnom smjeru ( $K_y$ ) definiran se kao prva derivacija izraza (21)

$$K_y = \frac{d\sigma_{pl(y)}}{d\epsilon_{pl(y)}} = 2 \cdot a_y \cdot \epsilon_{pl(y)} + b_y \quad (22)$$

Deformacija pri maksimalnom naprežanju u tangencijalnom smjeru iznosila je 6 % ( $\epsilon_{max(y)} = 0,06$ ). Tangentsni modul ima maksimalnu vrijednost pri deformaciji u točki

proporcionalnosti ( $\epsilon_{TP(y)}$ ), a minimalnu pri deformaciji od 6 % ( $\epsilon_{max(y)} = 0,06$ ). Unutar plastičnog područja dijagrama  $n-d$  u tangencijalnom smjeru (slika 15) ucrtana su tri pravca ( $p_{1(y)}$ ,  $p_{2(y)}$  i  $p_{3(y)}$ ). Pravac  $p_{1(y)}$  je tangenta na krivulju  $n-d$  u točki proporcionalnosti ( $TP_{(y)}$ ). Nagib pravca  $p_{1(y)}$  spram osi deformacije predstavlja maksimalnu vrijednost tangentskog modula ( $K_{max(y)}$ ). Pravac  $p_{2(y)}$  je tangenta na krivulju  $n-d$  u točki ( $C_{(y)}$ ) u kojoj se postiže deformacija  $\epsilon = 0,06$ . Nagib pravca  $p_{2(y)}$  predstavlja minimalnu vrijednost tangentskog modula u tangencijalnom smjeru ( $K_{min(y)}$ ). Pravac  $p_{3(y)}$  predstavlja sekantu koja krivulju  $n-d$  sječe u točki proporcionalnosti ( $TP_{(y)}$ ) i u točki u kojoj se postiže deformacija  $\epsilon = 0,06$ .



**Slika 15.** Plastično područje dijagrama  $n-d$  u tangencijalnom smjeru sa tri ucrtana pravca ( $p_{1(y)}$ ,  $p_{2(y)}$  i  $p_{3(y)}$ )

Nagib pravca  $p_{3(y)}$  spram osi deformacije predstavlja srednju vrijednost tangentskog modula u tangencijalnom smjeru  $\bar{K}_y$ , a određen je prema izrazu

$$\bar{K}_y = \frac{\sigma_{\max(y)} - \sigma_{TP(y)}}{0,06 - \varepsilon_{TP(y)}} \quad (23)$$

Izraz (23) pokazuje da srednja vrijednost tangentskog modula u tangencijalnom smjeru ovisi o naprežanju i deformaciji u točki proporcionalnosti (određeni u odjeljku 4.2.6.) i naprežanju pri deformaciji  $\varepsilon = 0,06$ . Naprežanje pri deformaciji  $\varepsilon = 0,06$  ( $\sigma_{\max(y)}$ ) određeno je prema

$$\sigma_{\max(y)} = a_y \cdot 0,06^2 + b_y \cdot 0,06 + c_y, \quad (24)$$

#### 4.2.5 Određivanje specifične energije i snage plastične deformacije u longitudinalnom i tangencijalnom smjeru

Pri procesu deformacije uzoraka bukovine, vanjska sila izvrši određeni rad koji se u materijalu akumulira u vidu potencijalne energije deformacije. Ova energija je u granicama plastičnog ponašanja nepovratna, te uzrokuje promjenu oblika i volumena uzoraka i nakon prestanka djelovanja sile. Pošto ovisi o deformaciji, ta energija se naziva energija deformacije ili deformacijski rad. Elementarni deformacijski rad uloženi na plastičnu deformaciju jediničnog volumena naziva se još i specifična energija plastične deformacije ( $e_{pl}$ ), a u longitudinalnom smjeru određena je izrazom

$$e_{pl(x)} = \int_{\varepsilon_{TP(x)}}^{\varepsilon_{\max(x)}} \sigma_{pl(x)} d\varepsilon_{pl(x)} = \frac{a_x}{3} \cdot \left( \varepsilon_{\max(x)}^3 - \varepsilon_{TP(x)}^3 \right) + \frac{b_x}{2} \cdot \left( \varepsilon_{\max(x)}^2 - \varepsilon_{TP(x)}^2 \right) + c_x \cdot \left( \varepsilon_{\max(x)} - \varepsilon_{TP(x)} \right), \quad (25)$$

a u tangencijalnom smjeru

$$e_{pl(y)} = \int_{\varepsilon_{TP(y)}}^{0,06} \sigma_{pl(y)} d\varepsilon_{pl(y)} = \quad (26)$$

$$\frac{a_y}{3} \cdot \left( 0,06^3 - \varepsilon_{TP(y)}^3 \right) + \frac{b_y}{2} \cdot \left( 0,06^2 - \varepsilon_{TP(y)}^2 \right) + c_y \cdot \left( 0,06 - \varepsilon_{TP(y)} \right)$$

Omjerom specifične energije i vremenskog intervala određena je specifična snaga plastične deformacije u longitudinalnom smjeru

$$P_{pl(x)} = \frac{e_{pl(x)}}{t_{\max(x)} - t_{TP(x)}} \quad (27)$$

i tangencijalnom smjeru

$$P_{pl(y)} = \frac{e_{pl(y)}}{t_{(\varepsilon = 0,06)} - t_{TP(y)}} \quad (28)$$

Iz izraza (5), (8) i (19) slijedi izraz za vrijeme ( $t_{\max}$ ) potrebno da se postigne maksimalna deformacija u longitudinalnom smjeru

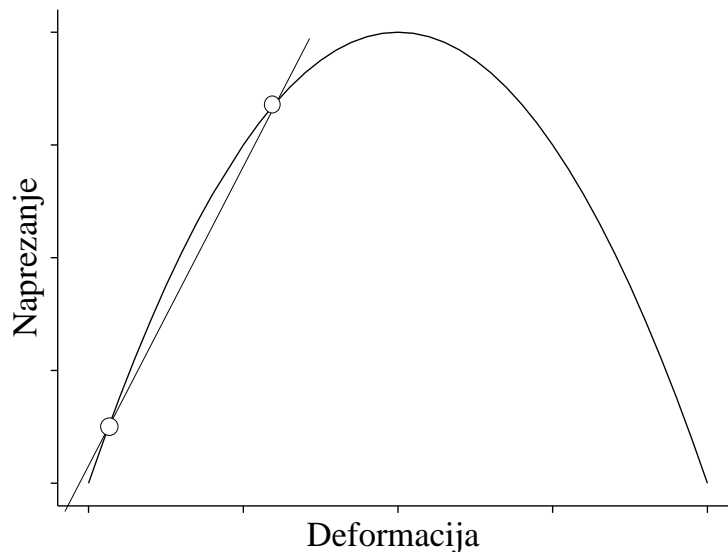
$$t_{\max(x)} = - \frac{b_x \cdot c}{2 \cdot a_x \cdot v}, \quad (29)$$

a iz izraza (6) i (10) slijedi izraz za vrijeme ( $t_{\max}$ ) potrebno da se postigne maksimalna deformacija u tangencijalnom smjeru

$$t_{\max(y)} = \frac{0,06 \cdot b}{v}, \quad (30)$$

#### 4.2.6 Određivanje deformacije u točki proporcionalnosti u longitudinalnom i tangencijalnom smjeru

Neovisno o kojem smjeru nanošenja opterećenja je riječ (longitudinalnom ili tangencijalnom), točka proporcionalnosti predstavlja vrijednost u kojoj se iz elastičnog područja reverzibilnih deformacija prelazi u plastično područje ireverzibilnih deformacija (slika 16). Odnos naprezanja i deformacija u elastičnom području krivulje jest linearan, pa je elastični dio krivulje opisan jednadžbom pravca (Hookeov zakon), dok je dio krivulje u plastičnom području okarakteriziran nelinearnim odnosom naprezanja i deformacija. Takvu krivulju više nije moguće opisati linearnom funkcijom, već je potreban složeniji pristup pronalaska optimalnog matematičkog izraza za opis plastičnog dijela krivulje. Nakon što se odredi matematički izraz koji opisuje krivulju u plastičnom području, točku proporcionalnosti je moguće analitički odrediti tako što se taj izraz izjednači s jednadžbom pravca koji opisuje krivulju u elastičnom području.



**Slika 16.** Shematski prikaz određivanja TP

Deformacija u točki proporcionalnosti određena je izjednačavanjem dviju krivulja

$$\sigma_0 + E \cdot \varepsilon = a \cdot \varepsilon^2 + b \cdot \varepsilon + c. \quad (31)$$

Rješenja izraza (31) su

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{-(b-E) \pm \sqrt{(b-E)^2 - 4 \cdot a \cdot (c - \sigma_0)}}{2 \cdot a}. \quad (32)$$

Usporedbom rješenja izraza (29) i eksperimentalno izmjerenih podataka određeno je rješenje koje zadovoljava postavljene uvjete, pri čemu valja naglasiti kako je izbačen pozitivan korijen u rješenju kvadratne jednadžbe (32).

$$\varepsilon_{TP} = \varepsilon_2 = \frac{-(b-E) - \sqrt{(b-E)^2 - 4 \cdot a \cdot (c - \sigma_0)}}{2 \cdot a}. \quad (33)$$

Deformacija u točki proporcionalnosti u longitudinalnom smjeru je određena prema

$$\varepsilon_{TP(x)} = \frac{-(b_x - E_x) - \sqrt{(b_x - E_x)^2 - 4 \cdot a_x \cdot (c_x - \sigma_{0(x)})}}{2 \cdot a_x}, \quad (34)$$

a deformacija u točki proporcionalnosti u tangencijalnom smjeru je određena prema

$$\varepsilon_{TP(y)} = \frac{-(b_y - E_y) - \sqrt{(b_y - E_y)^2 - 4 \cdot a_y \cdot (c_y - \sigma_{0(y)})}}{2 \cdot a_y}. \quad (35)$$

Vrijeme potrebno da se postigne deformacija u točki proporcionalnosti određeno je pomoću izraza (5), (8) i (34)

$$t_{TP(x)} = \frac{-\left(b_x - E_x\right) - \sqrt{\left(b_x - E_x\right)^2 - 4 \cdot a_x \cdot \left(c_x - \sigma_{0(x)}\right)} \cdot c}{2 \cdot a_x \cdot v} \quad (36)$$

te pomoću izraza (6), (10) i (35) u tangencijalnom smjeru

$$t_{TP(y)} = \frac{-\left(b_y - E_y\right) - \sqrt{\left(b_y - E_y\right)^2 - 4 \cdot a_y \cdot \left(c_y - \sigma_{0(y)}\right)} \cdot c}{2 \cdot a_y \cdot v} \quad (37)$$

### 4.2.7 Pregled korištenih izraza

**Tablica 1.** Pregled izraza korištenih za opis elastičnog područja dijagrama n-d

	Longitudinalni smjer	Tangencijalni smjer
$\epsilon_0$	$-\frac{\sigma_{0(x)}}{E_x}$	$-\frac{\sigma_{0(y)}}{E_y}$
$t_0$	$-\frac{\sigma_{0(x)} \cdot c}{E_x \cdot \nu}$	$-\frac{\sigma_{0(y)} \cdot b}{E_y \cdot \nu}$
$\epsilon_{TP}$	$\frac{-(b_x - E_x) - \sqrt{(b_x - E_x)^2 - 4 \cdot a_x \cdot (c_x - \sigma_{0(x)})}}{2 \cdot a_x}$	$\frac{-(b_y - E_y) - \sqrt{(b_y - E_y)^2 - 4 \cdot a_y \cdot (c_y - \sigma_{0(y)})}}{2 \cdot a_y}$
$t_{TP}$	$\frac{-(b_x - E_x) - \sqrt{(b_x - E_x)^2 - 4 \cdot a_x \cdot (c_x - \sigma_{0(x)})} \cdot c}{2 \cdot a_x \cdot \nu}$	$\frac{-(b_y - E_y) - \sqrt{(b_y - E_y)^2 - 4 \cdot a_y \cdot (c_y - \sigma_{0(y)})} \cdot c}{2 \cdot a_y \cdot \nu}$
$e_{el}$	$\sigma_{0(x)} \cdot (\epsilon_{TP(x)} - \epsilon_{0(x)}) + \frac{E_x}{2} \cdot (\epsilon_{TP(x)}^2 - \epsilon_{0(x)}^2)$	$\sigma_{0(y)} \cdot (\epsilon_{TP(y)} - \epsilon_{0(y)}) + \frac{E_y}{2} \cdot (\epsilon_{TP(y)}^2 - \epsilon_{0(y)}^2)$
$P_{el}$	$\frac{e_{el(x)}}{t_{TP(x)} - t_{0(x)}}$	$\frac{e_{el(y)}}{t_{TP(y)} - t_{0(y)}}$



**Tablica 2.** Pregled izraza korištenih za opis plastičnog područja dijagrama n - d

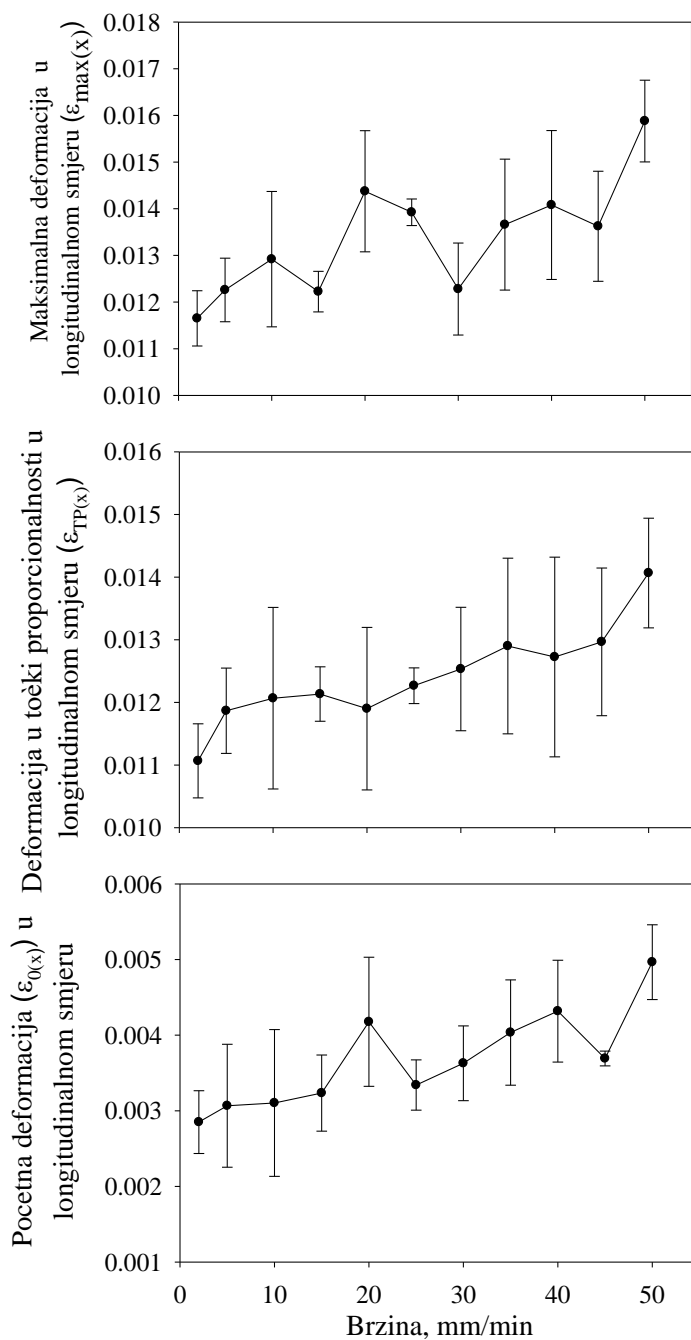
	Longitudinalni smjer	Tangencijalni smjer
$\epsilon_{\max}$	$-\frac{b_x}{2 \cdot a_x}$	0,06
$t_{\max}$	$-\frac{b_x \cdot c}{2 \cdot a_x \cdot v}$	$\frac{0,06 \cdot b}{v}$
$K$	$2 \cdot a_x \cdot \epsilon_{pl(x)} + b_x$	$2 \cdot a_y \cdot \epsilon_{pl(y)} + b_y$
$\bar{K}_x$	$\frac{\sigma_{\max(x)} - \sigma_{TP(x)}}{\epsilon_{\max(x)} - \epsilon_{TP(x)}}$	$\frac{\sigma_{\max(y)} - \sigma_{TP(y)}}{0,06 - \epsilon_{TP(y)}}$
$e_{pl}$	$\frac{a_x}{3} \cdot \left( \epsilon_{\max(x)}^3 - \epsilon_{TP(x)}^3 \right) +$ $\frac{b_x}{2} \cdot \left( \epsilon_{\max(x)}^2 - \epsilon_{TP(x)}^2 \right) + c_x \cdot \left( \epsilon_{\max(x)} - \epsilon_{TP(x)} \right)$	$\frac{a_y}{3} \cdot \left( 0,06^3 - \epsilon_{TP(y)}^3 \right) +$ $\frac{b_y}{2} \cdot \left( 0,06^2 - \epsilon_{TP(y)}^2 \right) + c_y \cdot \left( 0,06 - \epsilon_{TP(y)} \right)$
$P_{pl}$	$\frac{e_{pl(x)}}{t_{\max(x)} - t_{TP(x)}}$	$\frac{e_{pl(y)}}{t_{(\epsilon = 0,06)} - t_{TP(y)}}$

## 5 REZULTATI

Rezultati mjerenja obrađivani su u programskom paketu SigmaPlot v.10.0. Eksperiment se u istim uvjetima ponavljao pet puta, nakon čega je određena srednja vrijednost izmjerene veličine sa pripadajućom standardnom devijacijom. Obzirom na mali broj ponovljenih mjerenja, podaci se nisu testirali statističkim testovima.

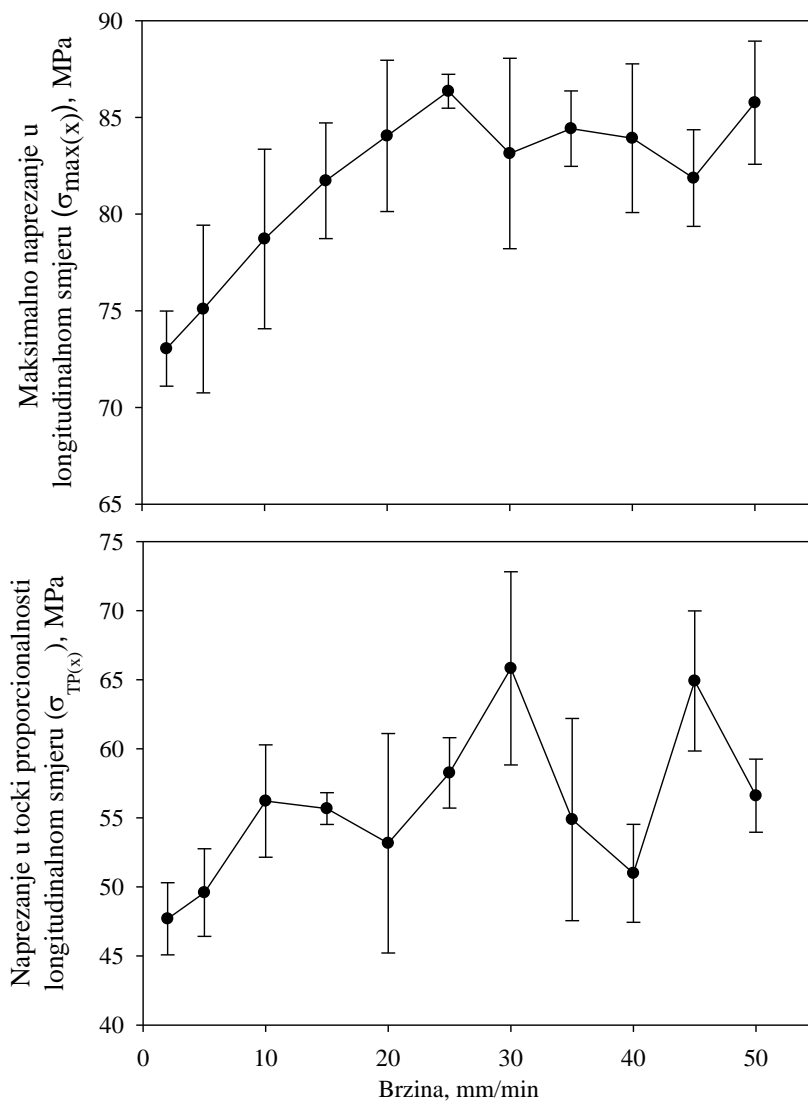
### 5.1 Rezultati određivanja mehaničkih svojstva bukovine u longitudinalnom smjeru

Na slici 17 prikazan je dijagram ovisnosti srednjih vrijednosti karakterističnih deformacija ( $\varepsilon_{0(x)}$ ,  $\varepsilon_{TP(x)}$ ,  $\varepsilon_{max(x)}$ ) o brzini nanošenja opterećenja u longitudinalnom smjeru sa pripadajućim standardnim devijacijama. Na slici je uočljiv trend porasta srednjih vrijednosti deformacija porastom brzine što je u skladu s rezultatima provedenih ispitivanja mehaničkih svojstva drva (Wouts i sur., 2016.).



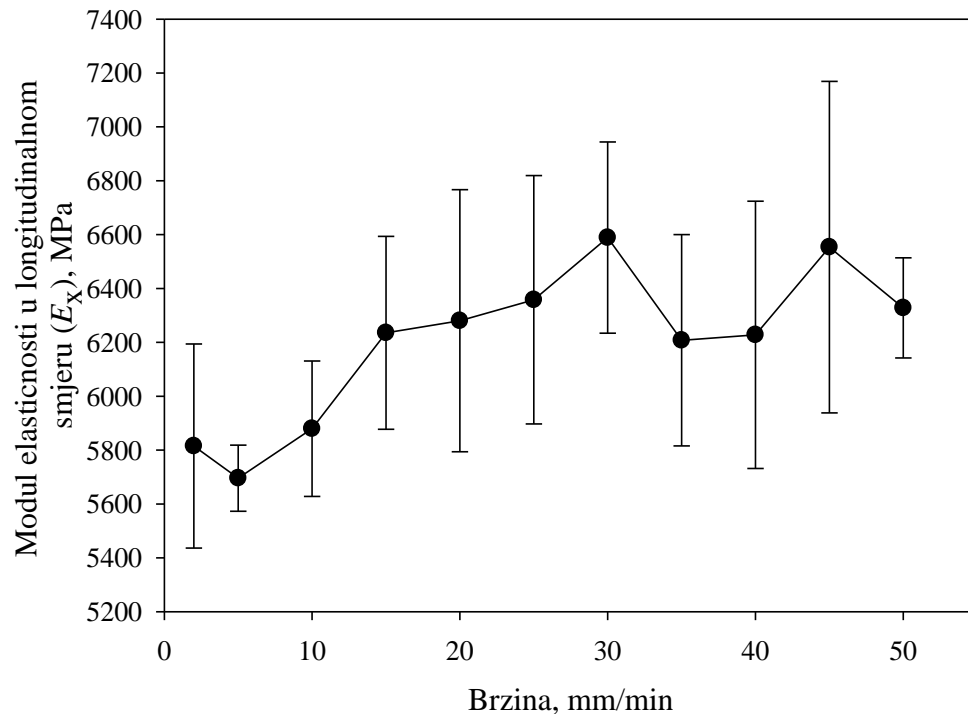
**Slika 17.** Dijagram ovisnosti srednjih vrijednosti i početne deformacije ( $\epsilon_{0(x)}$ ), deformacije u točki proporcionalnosti ( $\epsilon_{TP(x)}$ ) i maksimalne deformacije ( $\epsilon_{\max(x)}$ ) u longitudinalnom smjeru o brzini nanošenja opterećenja sa pripadajućim standardnim devijacijama

Na slici 18 prikazan je dijagram ovisnosti srednjih vrijednosti karakterističnih naprezanja ( $\sigma_{TP(x)}$ ,  $\sigma_{max(x)}$ ) o brzini nanošenja opterećenja u longitudinalnom smjeru sa pripadajućim standardnim devijacijama. Porastom brzine nanošenja opterećenja vidljiv je trend povećanja srednje vrijednost maksimalnog naprezanja (Tagarielli, 2007.), dok se za srednje vrijednosti naprezanja u točki proporcionalnosti ne može ustanoviti jasan trend.



**Slika 18.** Dijagram ovisnosti srednjih vrijednosti naprezanja u točki proporcionalnosti ( $\sigma_{TP(x)}$ ) i maksimalnog naprezanja ( $\sigma_{max(x)}$ ) u longitudinalnom smjeru o brzini nanošenja opterećenja sa pripadajućim standardnim devijacijama

Slika 19 prikazuje dijagram ovisnosti srednjih vrijednosti modula elastičnosti u longitudinalnom smjeru ( $E_x$ ) o brzini nanošenja opterećenja sa pripadajućim standardnim devijacijama. Povećanjem brzine nanošenja opterećenja vidljiv je trend porasta srednjih vrijednosti modula elastičnosti što je u skladu s rezultatima provedenih ispitivanja mehaničkih svojstva drva (Sliker, 1972.).



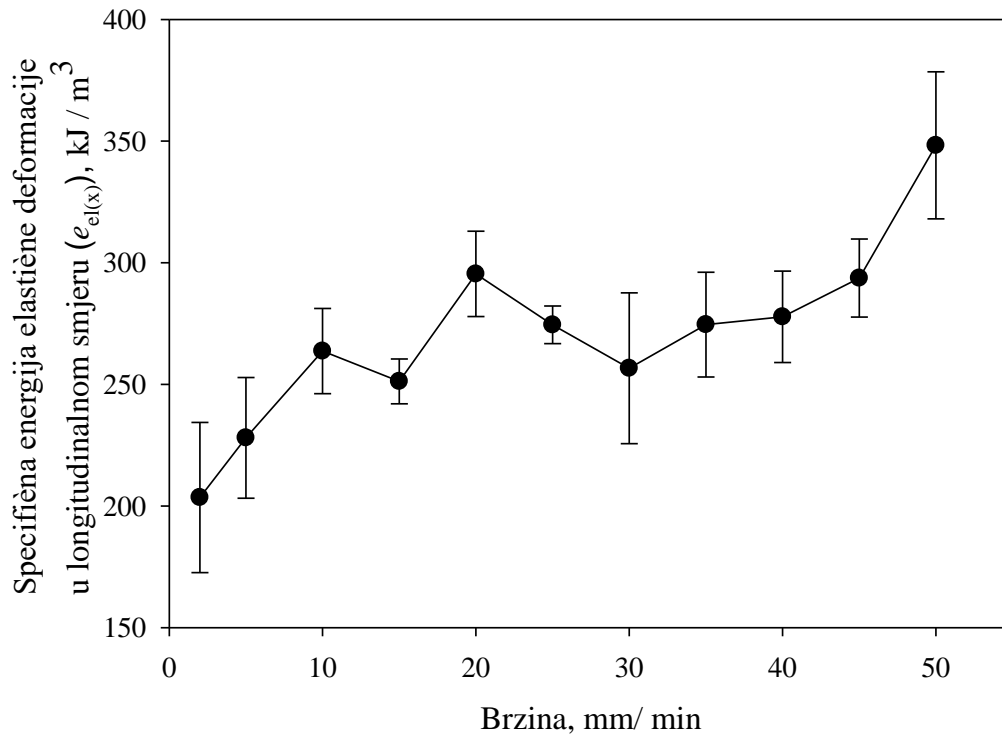
**Slika 19.** Dijagram ovisnosti srednjih vrijednosti modula elastičnosti u longitudinalnom smjeru ( $E_x$ ) o brzini nanošenja opterećenja sa pripadajućim standardnim devijacijama

U tablici 3 prikazane su srednje vrijednosti maksimalnog ( $K_{(x)max}$ ) i srednjeg ( $K_{(x)srednje}$ ) tangentsnog modula sa pripadajućim standardnim devijacijama u ovisnosti o brzini nanošenja opterećenja. Promjenom brzine nanošenja opterećenja nije vidljiv jasan trend srednjih vrijednosti maksimalnog niti srednjeg tangentsnog modula. U prikazanoj tablici, najmanja srednja vrijednost maksimalnog tangentsnog modula je pri brzini nanošenja opterećenja 15 mm/min, a najveća pri 20 mm/min. Najmanja srednja vrijednost srednjeg tangentsnog modula je pri brzini nanošenja opterećenja 15 mm/min, a najveća pri 20 mm/min.

**Tablica 3.** Ovisnosti srednje vrijednosti maksimalnog tangentsnog modula ( $K_{(x)max}$ ) i srednje vrijednosti srednjih vrijednosti tangentsnog modula ( $K_{(x)srednje}$ ) u longitudinalnom smjeru o brzini nanošenja opterećenja sa pripadajućim standardnim devijacijama

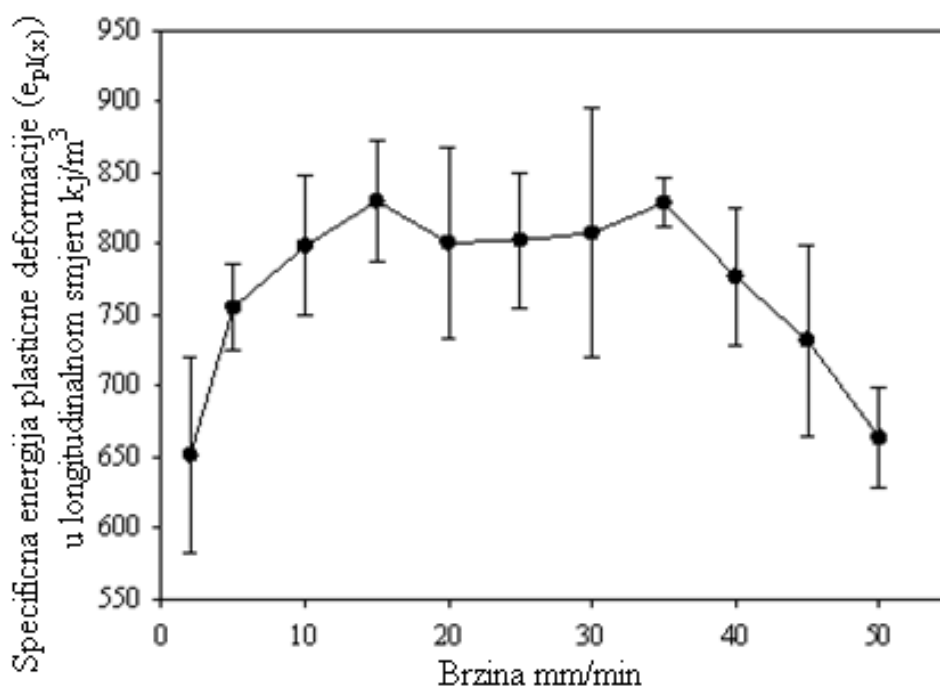
$v$ , mm / min	$K_{(x)max}$ , MPa	Standardna devijacija od $K_{(x)max}$ , MPa	$K_{(x)srednje}$ , MPa	Standardn a devijacija od $K_{(x)srednje}$ , MPa
2	5596,87	353,78	2758,38	179,08
5	5100,61	112,64	2492,64	506,67
10	5127,84	458,76	2530,89	232,75
15	4919,76	493,84	2429,27	228,61
20	6148,69	253,58	3028,48	126,95
25	6032,93	335,59	2950,86	204,29
30	5530,31	101,61	2743,15	402,32
35	5586,62	284,79	2732,66	255,63
40	5799,93	313,07	2856,52	130,57
45	5415,73	166,41	2656,14	310,11
50	5863,59	168,48	2866,85	532,95

Na slici 20 prikazan je dijagram ovisnosti srednjih vrijednosti specifične energije elastične deformacije u longitudinalnom smjeru ( $e_{el(x)}$ ) o brzini nanošenja opterećenja sa pripadajućim standardnim devijacijama. Unatoč oscilacijama srednjih vrijednosti u dijagramu je prisutan trend porasta srednjih vrijednosti povećanjem brzine nanošenja opterećenja.



**Slika 20.** Dijagram ovisnosti srednje vrijednosti specifične energije elastične deformacije u longitudinalnom smjeru ( $e_{el(x)}$ ) o brzini nanošenja opterećenja sa pripadajućim standardnim devijacijama

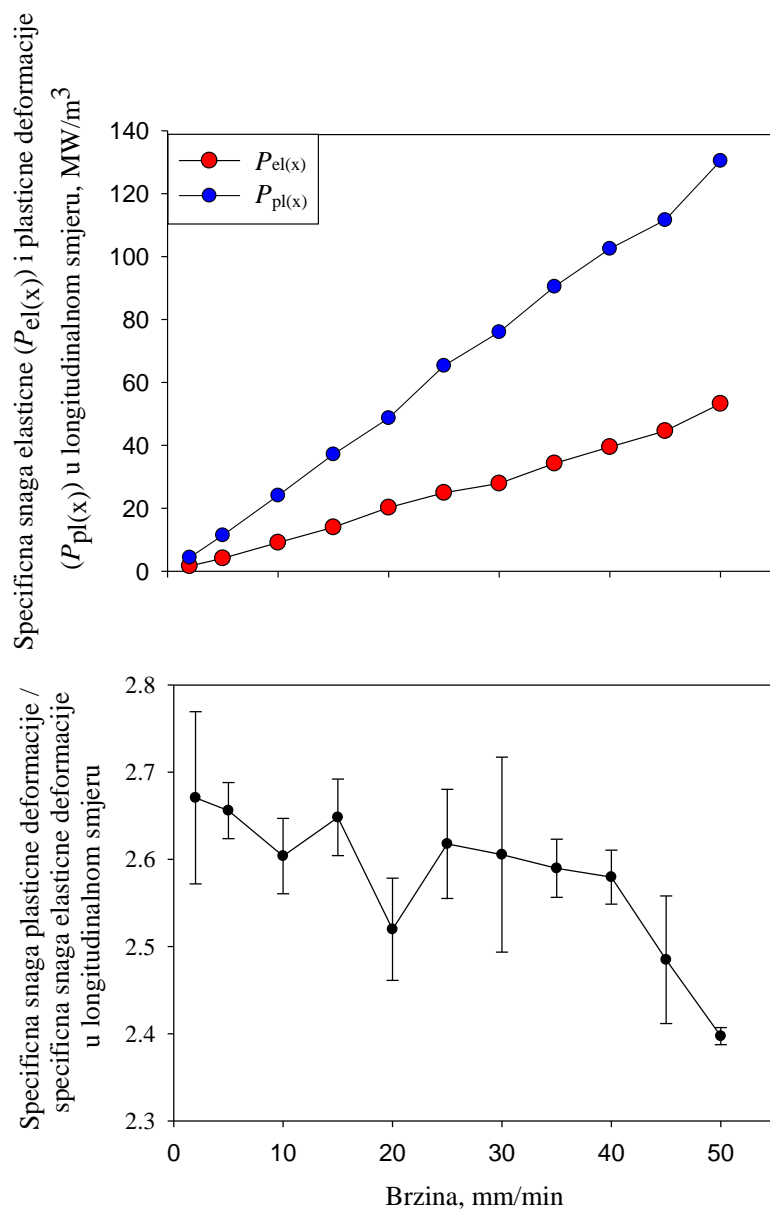
Dijagram na slici 21 je prikazuje ovisnost srednjih vrijednosti specifične energije plastične deformacije u longitudinalnom smjeru ( $e_{pl(x)}$ ) o brzini nanošenja opterećenja sa pripadajućim standardnim devijacijama. Iz dijagrama je vidljivo početno povećanje srednje vrijednosti do brzine 15 mm/min, a daljnjim povećanjem brzine nanošenja opterećenja uočljiva je tendencija opadanja srednjih vrijednosti specifične energije plastične deformacije.



**Slika 21.** Dijagram ovisnosti srednje vrijednosti specifične energije plastične deformacije u longitudinalnom smjeru ( $e_{pl(x)}$ ) o brzini nanošenja opterećenja sa pripadajućim standardnim devijacijama



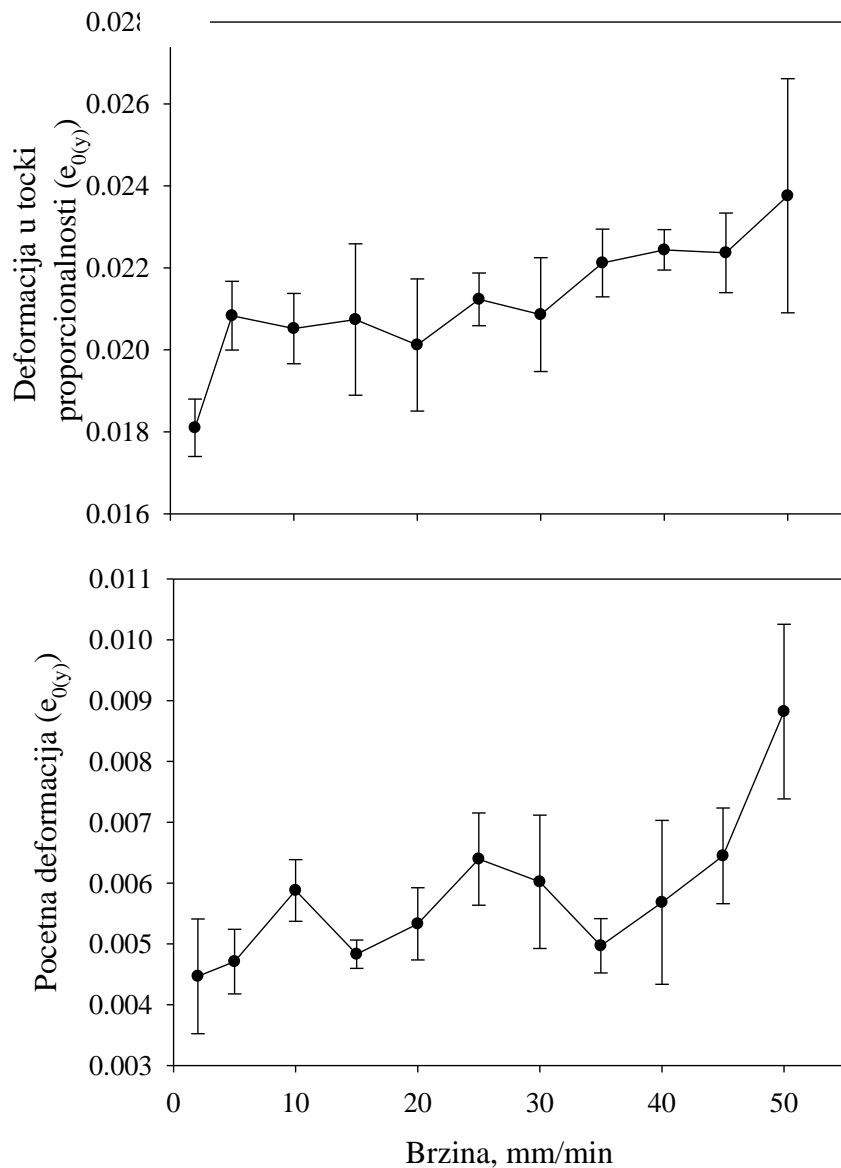
Slika 22.a prikazuje dijagram ovisnosti srednjih vrijednosti specifične snage elastične ( $P_{el(x)}$ ) i plastične ( $P_{pl(x)}$ ) deformacije u longitudinalnom smjeru o brzini nanošenja opterećenja. Iz dijagrama je vidljivo da je snaga potrebna za plastičnu deformaciju jediničnog volumena veća od snage potrebne za elastičnu deformaciju pri svim promatranim brzinama nanošenja opterećenja. Slika 22.b prikazuje dijagram ovisnosti srednjih vrijednosti omjera specifične snage plastične i elastične deformacije u longitudinalnom smjeru ( $P_{pl(x)} / P_{el(x)}$ ) o brzini nanošenja opterećenja sa pripadajućim standardnim devijacijama. Na dijagramu je vidljiv trend pada srednjih vrijednosti omjera porastom brzine nanošenja opterećenja.



**Slika 22.** a) Dijagram ovisnosti srednjih vrijednosti specifične snage elastične ( $P_{el(x)}$ ) i plastične ( $P_{pl(x)}$ ) deformacije u longitudinalnom smjeru o brzini nanošenja opterećenja. b) Dijagram ovisnosti srednjih vrijednosti omjera specifične snage elastične i plastične deformacije u longitudinalnom smjeru ( $P_{pl(x)} / P_{el(x)}$ ) o brzini nanošenja opterećenja sa pripadajućim standardnim devijacijama

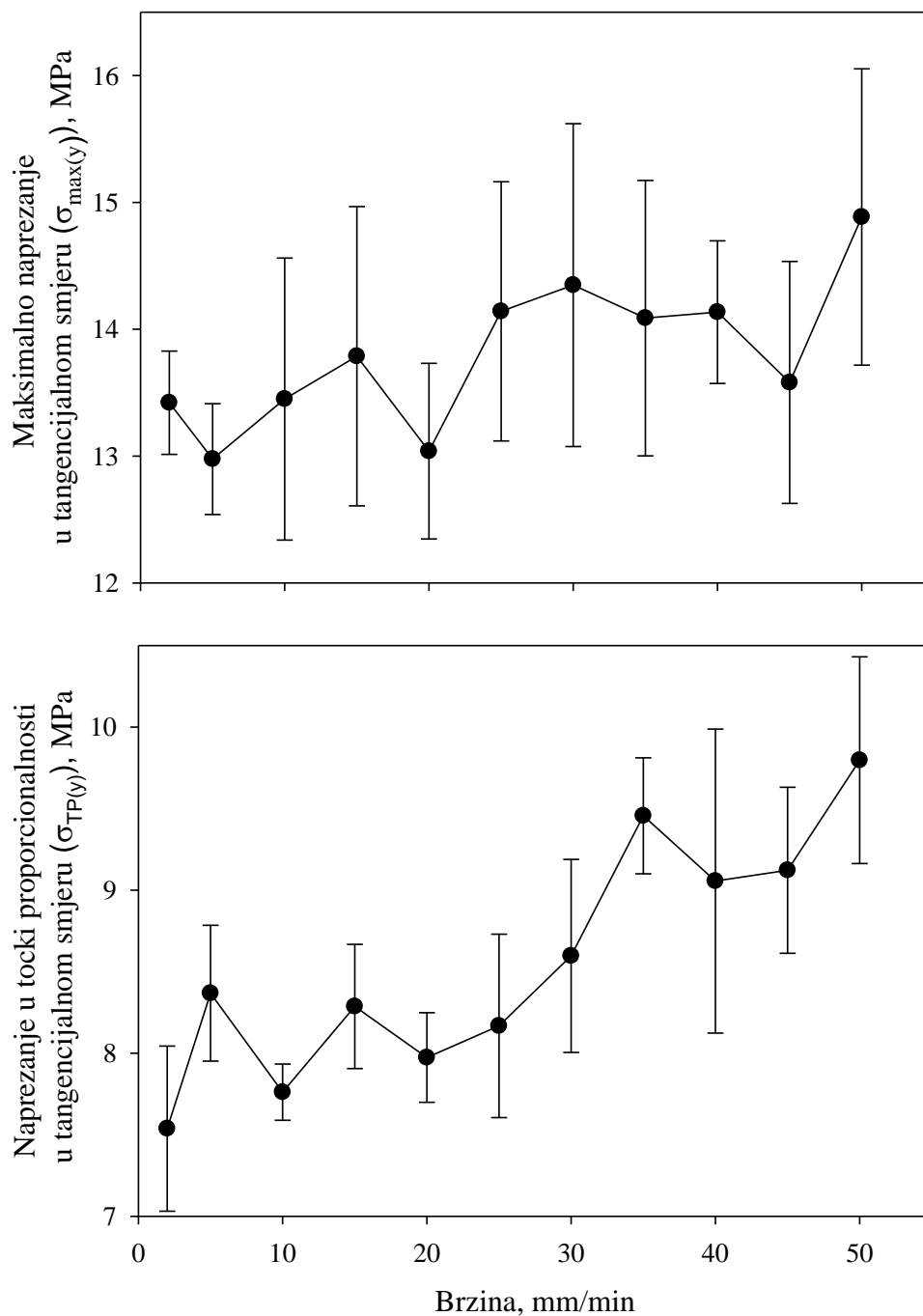
## **5.2 Rezultati određivanja mehaničkih svojstva bukovine u tangencijalnom smjeru**

Slična razmatranja kao za longitudinalni smjer sproved će se i za tangencijalni smjer. Na slici 17 prikazan je dijagram ovisnosti srednjih vrijednosti karakterističnih deformacija u tangencijalnom smjeru ( $\varepsilon_{0(y)}$ ,  $\varepsilon_{TP(y)}$ ) o brzini nanošenja opterećenja sa pripadajućim standardnim devijacijama u karakterističnim točkama ( $\varepsilon_{0(y)}$ ,  $\varepsilon_{TP(y)}$ ). Iako su u dijagramu prisutne oscilacije, ipak je uočljiv trend porasta srednjih vrijednosti deformacija sa porastom brzine; što je u skladu s rezultatima provedenih ispitivanja mehaničkih svojstva drva (Wouts i sur., 2016.).



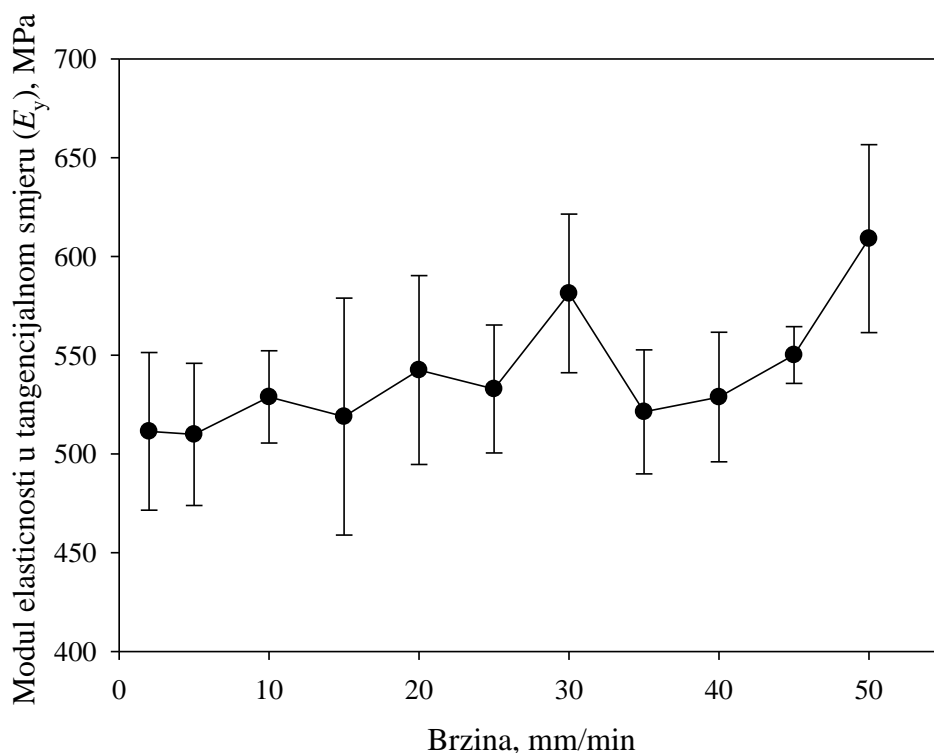
**Slika 23.** Dijagram ovisnosti srednjih vrijednosti početne deformacije ( $\epsilon_{0(y)}$ ) i deformacije u točki proporcionalnosti ( $\epsilon_{TP(y)}$ ) u tangencijalnom smjeru o brzini nanošenja opterećenja sa pripadajućim standardnim devijacijama

Na slici 24 je prikazan dijagram ovisnosti srednjih vrijednosti karakterističnih naprezanja ( $\sigma_{TP(y)}$ ,  $\sigma_{max(y)}$ ) o brzini nanošenja opterećenja u tangencijalnom smjeru sa pripadajućim standardnim devijacijama. Iz dijagrama je vidljiv trend povećanja srednjih vrijednosti karakterističnih naprezanja sa povećanjem brzine nanošenjaopterećenja što je u skladu s rezultatima provedenih ispitivanja mehaničkih svojstava drva (Bragov i sur., 2016).



**Slika 24.** Dijagram ovisnosti srednjih vrijednosti naprezanja u točki proporcionalnosti ( $\sigma_{TP(y)}$ ) i maksimalnog naprezanja ( $\sigma_{\max(y)}$ ) u tangencijalnom smjeru o brzini nanošenja opterećenja sa pripadajućim standardnim devijacijama

Slikom 25 prikazan je dijagram ovisnosti srednjih vrijednosti modula elastičnosti u tangencijalnom smjeru ( $E_y$ ) o brzini nanošenja opterećenja sa pripadajućim standardnim devijacijama. Unatoč nešto većim oscilacijama srednjih vrijednosti na dijagramu je uočljiv blagi trend porasta srednjih vrijednosti sa povećanjem brzine opterećenja.



**Slika 25.** Dijagram ovisnosti srednje vrijednosti modula elastičnosti u tangencijalnom smjeru ( $E_y$ ) o brzini nanošenja opterećenja sa pripadajućim standardnim devijacijama

U tablici 4 navedene su srednje vrijednosti minimalnog ( $K_{(y)min}$ ), maksimalnog ( $K_{(y)max}$ ) i srednjeg ( $K_{(y)srednje}$ ) tangentnog modula u tangencijalnom smjeru u ovisnosti o brzini nanošenja opterećenja sa pripadajućim standardnom devijacijama. Zbog oscilacija srednjih vrijednosti nije moguće ustanoviti jasan trend povećanjem brzine nanošenja opterećenja. U prikazanoj tablici, najmanja srednja vrijednost minimalnog tangentnog modula je je pri brzini nanošenja opterećenja 25 mm/min, a najveća pri 50 mm/min. Najmanja srednja vrijednost maksimalnog tangentnog modula je pri brzini nanošenja opterećenja 35 mm/min, a najveća pri 50 mm/min. Najmanja srednja

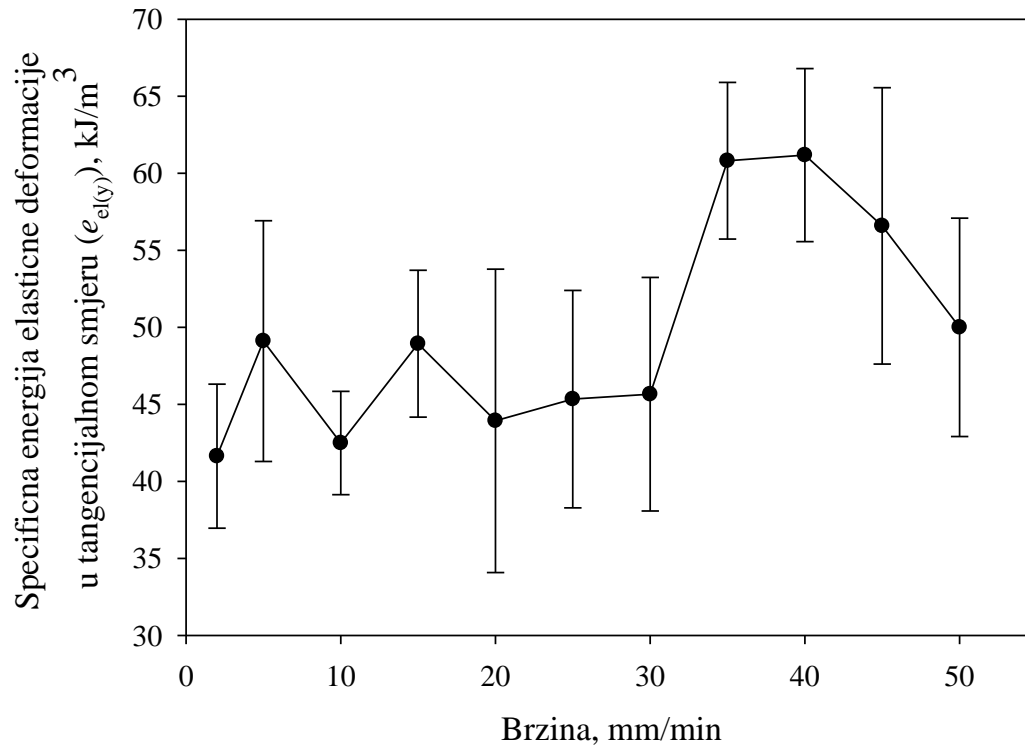
vrijednost srednjeg tangentskog modula je pri brzini nanošenja opterećenja 20 mm/min, a najveća pri 50 mm/min.

**Tablica 4.** Ovisnosti srednjih vrijednosti minimalnog tangentskog modula ( $K_{(y)min}$ ), maksimalnog tangentskog modula ( $K_{(y)max}$ ) i aritmetičke vrijednosti tangentskog modula ( $K_{(y)srednje}$ ) u tangencijalnom smjeru o brzini nanošenja opterećenja sa pripadajućim standardnim devijacijama

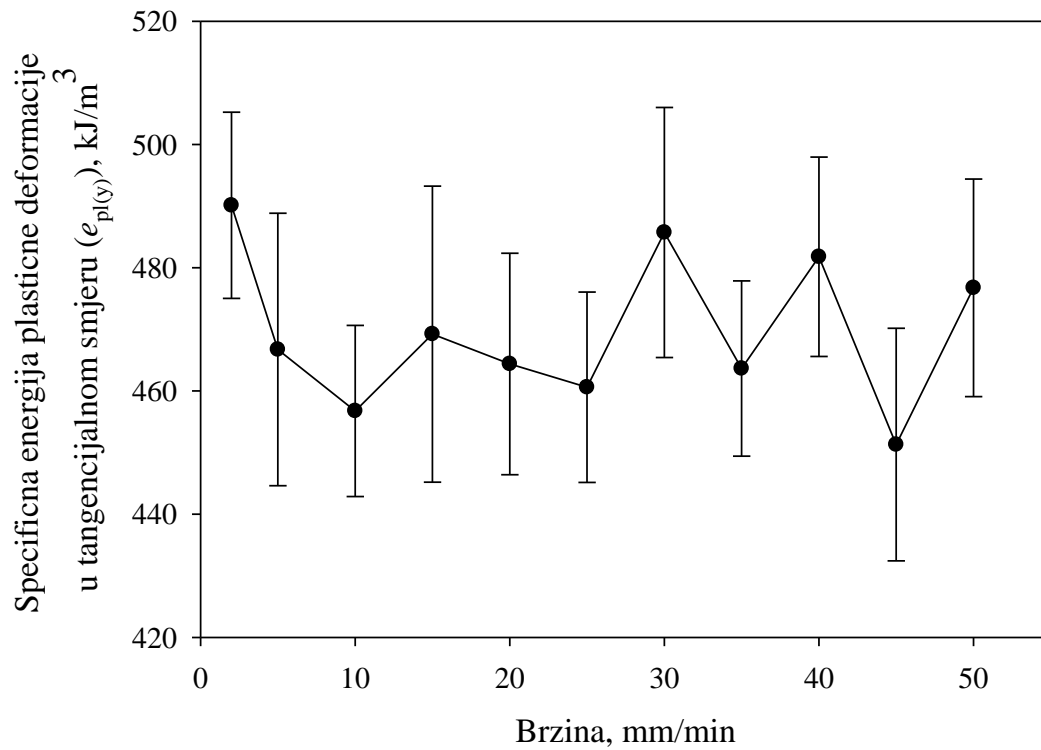
v, mm / min	$K_{(y)min}$ , Mpa	Standardna devijacija od $K_{(y)min}$ , Mpa	$K_{(y)max}$ , Mpa	Standardna devijacija od $K_{(y)max}$ , Mpa	$K_{(y)srednje}$ , Mpa	Standardna devijacija od $K_{(y)srednje}$ , Mpa
2	12,53	1,04	289,23	22,81	146,21	21,35
5	13,26	4,64	253,16	15,22	122,75	4,76
10	13,09	1,81	279,51	12,51	132,23	3,68
15	13,47	1,66	278,08	36,52	131,36	16,52
20	12,71	3,81	268,11	26,41	126,68	10,12
25	12,07	4,35	265,11	19,24	128,61	7,19
30	13,95	3,56	313,64	26,39	146,76	14,58
35	13,19	4,12	252,85	19,72	142,26	12,44
40	13,83	3,55	268,02	20,09	135,41	11,29
45	13,45	0,87	266,58	17,21	129,59	11,51
50	14,51	2,37	345,08	42,21	154,79	17,95

Dijagram na slici 26 prikazuje ovisnost srednjih vrijednosti specifične energije elastične deformacije ( $e_{el(y)}$ ), a na slici 27 prikazana je ovisnost srednje vrijednosti specifične energije plastične deformacije ( $e_{pl(y)}$ ) u tangencijalnom smjeru o brzini nanošenja opterećenja sa pripadajućim standardnim devijacijama. Zbog većih oscilacija srednjih vrijednosti, nije moguće odrediti jasan trend.



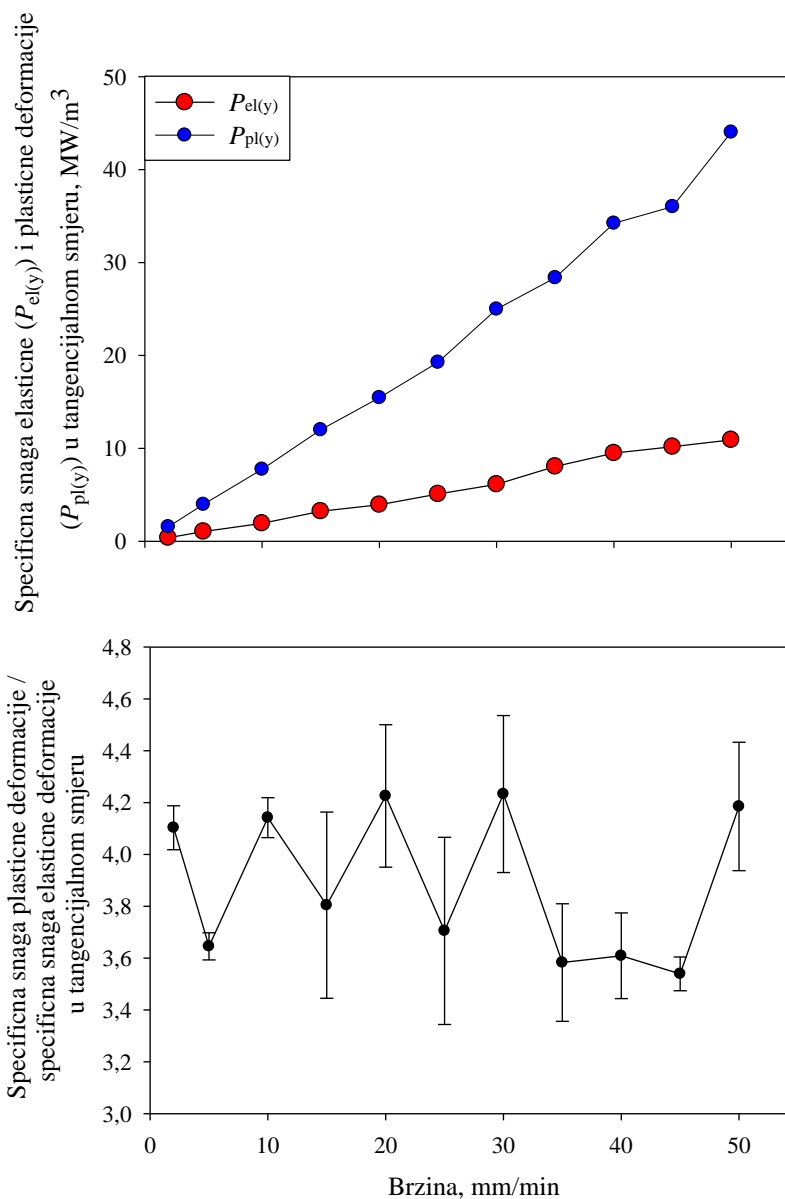


**Slika 26.** Dijagram ovisnosti srednje vrijednosti specifične energije elastične deformacije u tangencijalnom smjeru ( $e_{el(y)}$ ) o brzini nanošenja opterećenja sa pripadajućim standardnim devijacijama



**Slika 27.** Dijagram ovisnosti srednjih vrijednosti specifične energije plastične deformacije u tangencijalnom smjeru ( $e_{pl(y)}$ ) o brzini nanošenja opterećenja sa pripadajućim standardnim devijacijama

Slika 28.a prikazuje dijagram ovisnosti srednjih vrijednosti specifične snage elastične ( $P_{el(y)}$ ) i plastične ( $P_{pl(y)}$ ) deformacije u tangencijalnom smjeru o brzini nanošenja opterećenja. Na dijagramu je vidljiv porast srednjih vrijednosti specifične snage elastične i plastične deformacije sa porastom brzine nanošenja opterećenja. Snaga potrebna za plastičnu deformaciju jediničnog volumena povećanjem brzine nanošenja opterećenja raste brže nego snaga potrebna za elastičnu deformaciju. Slikom 28.b prikazan je dijagram ovisnosti srednje vrijednosti omjera specifične snage plastične i elastične deformacije u tangencijalnom smjeru ( $P_{pl(y)} / P_{el(y)}$ ) o brzini nanošenja opterećenja sa pripadajućim standardnim devijacijama. U dijagramu su prisutne oscilacije zbog kojih nije moguće odrediti trend promjene omjera srednjih vrijednosti porastom brzine nanošenja opterećenja. Omjer srednjih vrijednosti poprima najveću vrijednost pri brzini nanošenja opterećenja 30 mm/min, dok najnižu vrijednost poprima pri 45 mm/min.



**Slika 28.a)** Dijagram ovisnosti srednjih vrijednosti specifične snage elastične ( $P_{el(y)}$ ) i plastične ( $P_{pl(y)}$ ) deformacije u tangencijalnom smjeru o brzini nanošenja. b) Dijagram ovisnosti srednje vrijednosti omjera specifične snage plastične i elastičnedformacije u tangencijalnom smjeru ( $P_{pl(y)} / P_{el(y)}$ ) o brzini nanošenja opterećenja sa pripadajućim standardnim devijacijama

## 6 ZAKLJUČCI

1. Iz predstavljenih rezultata istraživanja može se zaključiti da brzina nanošenja opterećenja utječe na izmjerena mehanička svojstva bukovine.
2. Utjecaj brzine na izmjerena mehanička svojstva bukovine izraženiji je u longitudinalnom smjeru.
3. Sva mehanička svojstva ispitana u longitudinalnom smjeru povećavaju se s povećanjem brzine nanošenja opterećenja, osim specifične plastične energije.
4. Mehanička svojstva ispitana u tangencijalnom smjeru se ili povećavaju s povećanjem brzine nanošenja opterećenja, ili se ne može odrediti jasan trend.
5. Standardne devijacije izmjerenih mehaničkih svojstava znatno su veće u tangencijalnom smjeru zbog veće anizotropije nego što je to u longitudinalnom smjeru

## **7 ZAHVALE**

Zahvaljujem se Šumarskom fakultetu u Zagrebu na ustupljenom laboratoriju za ispitivanje tlačne čvrstoće uzoraka drva u akreditiranom laboratoriju za drvo u graditeljstvu Šumarskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

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

Posebno zahvaljujem komentoru doc. dr. sc. Kristijanu Radmanoviću i prof. dr. sc. Ružici Beljo Lučić, koji su me vodili kroz istraživanje.

## 8 LITERATURA

1. A. Bragov, A. Lomunov. Dynamic properties of Some Wood Species. Journal de Physique IV Colloque, 1997, 07 (C3), pp.C3-487-C3-492
2. Alfirević, I., 1989: Nauka o čvrstoći, Tehnička knjiga Zagreb
3. Basar, Y. & Weichert, D., 2000: Nonlinear Continuum Mechanics of Solids. Fundamental. mathematical and physical concepts Springer, 2000.
4. Bodiq, F.; Jane, B. A., 1982: Mechanics of wood and wood composites
5. ErgünGüntekin i Tuğba Yılmaz Aydın, 2013: Effects of Moisture Content on Some Mechanical Properties of Turkish Red Pine (*Pinus brutia* Ten.), International Caucasian Forestry Symposium
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. Gaaf i sur. (2017.)
8. Horvat – Krpan, 1967: Drvno industrijski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb
9. Ibrahim Bektash, Cengiz Güler i M. Altay Bashtürk, 2001: Principal Mechanical Properties of Eastern Beech Wood(*Fagus orientalis* Lipsky) Naturally Grown in AndÝrÝn Northeastern Mediterranean Region of Turkey, Turk J Agric For 26 (2002) 147-154 © T.BÜTAK
10. M. Hakan Akyildiz i Hamiyet Sahin Kol, 2009: Some technological properties and uses of paulownia(*Paulownia tomentosa* Steud.) wood, Journal of Environmental Biology
11. Mathew, P.; Oxley, P., 1982: Predicting the Effects of Very High Cutting Speeds on Cutting Forces. University of New Wales, Australia, Annals of the CIRP Vol. 31/1/1982
12. Norma: DIN EN 408
13. Požgaj, A., Chovanec, D., Kurjatko, S., Babiak, M., 1993: Štruktura a vlasntnosti dreva, Priroda a. S., Bratislava, ISBN 80 – 07 – 00600 - 1

14. Radmanović, K., 2015: Utjecaj mehaničkih svojstava drva na snagu potrebnu za odvajanje čestice pri ortogonalnom rezanju, Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
15. 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
16. Svante Widehammar National Graduate School of Scientific Computing and Metso Paper AB
17. Špoljarić, Z., 1978: Anatomija drva, Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
18. Tkalec i Prekrat (2000.): Konstrukcije proizvoda od drva 1 - osnove drvnih konstrukcija, Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Znanje d.d.
19. V.L. Tagarielli, V.S. Deshpande, N.A. Fleck \* The high strain rate response of PVC foams and end-grain balsa wood Cambridge University, Engineering Department, Trumpington Street, Cambridge, CB2 1PZ, UK Available online 16 February 2007
20. Wouts, J., G. Haugou, D. Coutellier, H. Morvan., 2016: Strain rate effects on the compressive response of wood and energy absorption capabilities, ANRT



## 9 POPIS SLIKA

- Slika 1.** Makroskopska građa drva ..... 2
- Slika 2.** Drvo kao ortotropni materijal s tri istaknuta smjera: longitudinalni, tangencijalni i radijalni smjer.  $A_x$ - longitudinalni smjer (paralelan sa smjerom protezanja drvnih vlaknaca),  $A_y$  – tangencijalni smjer (paralelan sa tangentom na liniju goda),  $A_z$  – radijalni smjer (okomit na tangentu na liniju goda). Sile pozitivnog predznaka (+F) su vlačne sile, a negativnog (-F) su tlačne. .... 3
- Slika3.** Dijagram međusobne ovisnosti naprežanja i deformacija pri tlačnom djelovanju sile u longitudinalnom i tangencijalnom smjeru..... 5
- Slika 4.** Ispiljeni uzorci bukovine. a) poprečni presjek: a – dimenzija uzorka u radijalnom smjeru, b – dimenzija uzorka u tangencijalnom smjeru, b) radijalni presjek: c -dimenzija uzorka u longitudinalnom smjeru..... 11
- Slika5.** Djelovanje sile (F) u: a) tangencijalnom smjeru: a – dimenzija uzorka u radijalnom smjeru prije nanošenja opterećenja, b – dimenzija uzorka u tangencijalnom smjeru prije nanošenja opterećenja, b' - dimenzija uzorka u tangencijalnom smjeru nakon nanošenja opterećenja, b) longitudinalnom smjeru: c - dimenzija uzorka u longitudinalnom smjeru prije nanošenja opterećenja, c' - dimenzija uzorka u longitudinalnom smjeru nakon nanošenja opterećenja ..... 12
- Slika 6.** Dijagram ovisnosti pomaka ( $\Delta c$ ) u longitudinalnom smjeru o vremenu (t).... 13
- Slika7.** Dijagram ovisnosti pomaka ( $\Delta b$ ) u tangencijalnom smjeru o vremenu (t). .... 14
- Slika8.** Dijagram međusobne ovisnosti naprežanje deformacija pri djelovanju sile u longitudinalnom smjeru.  $\sigma_{max}(x)$  – maksimalno naprežanje u longitudinalnom smjer, TP(x) – točka proporcionalnosti u longitudinalnom smjeru..... 16
- Slika 9.** Dijagram n-d pri djelovanju sile u tangencijalnom smjeru.  $\epsilon_{max}(y)$  – konačna deformacija u tangencijalnom smjeru, TP(y) – točka proporcionalnosti u tangencijalnom smjeru..... 16
- Slika 10.** Dijagram n-d pri djelovanju sile u longitudinalnom smjeru.  $\sigma_{TP}(x)$  – maksimalno elastično naprežanje u longitudinalnom smjeru, TP(x) – točka proporcionalnosti u longitudinalnom smjeru..... 18

<b>Slika 11.</b> Dijagram n-d pri djelovanju sile u tangencijalnom smjeru. $\epsilon_{TP}(y)$ – maksimalna elastična deformacija u tangencijalnom smjeru, $TP(y)$ – točka proporcionalnosti u tangencijalnom smjeru.....	19
<b>Slika12.</b> Dijagram n-d pri djelovanju sile u longitudinalnom smjeru. $\sigma_{max}(x)$ – maksimalno naprezanje u longitudinalnom smjeru, $\epsilon_{max}(x)$ – deformacija pri maksimalnom naprezanju u longitudinalnom smjeru, $TP(x)$ – točka proporcionalnosti u longitudinalnom smjeru.....	22
<b>Slika13.</b> Plastično područje dijagrama n–d u longitudinalnom smjeru sa tri ucrtana pravca ( $p_1(x)$ , $p_2(x)$ i $p_3(x)$ ) .....	23
<b>Slika14.</b> Dijagram međusobne ovisnosti naprezanje deformacija pri djelovanju sile u tangencijalnom smjeru. $\sigma_{max}(y)$ – maksimalno naprezanje u tangencijalnom smjeru, $\epsilon_{max}(y)$ – deformacija pri maksimalnom naprezanju u tangencijalnom smjeru, $TP(y)$ – točka proporcionalnosti u tangencijalnom smjeru.....	25
<b>Slika15.</b> Plastično područje dijagrama n–d u tangencijalnom smjeru sa tri ucrtana pravca ( $p_1(y)$ , $p_2(y)$ i $p_3(y)$ ) .....	26
<b>Slika 16.</b> Shematski prikaz određivanja $TP$ .....	29
<b>Slika17.</b> Dijagram ovisnosti srednjih vrijednosti i početne deformacije ( $\epsilon_0(x)$ ), deformacije u točki proporcionalnosti ( $\epsilon_{TP}(x)$ ) i maksimalne deformacije ( $\epsilon_{max}(x)$ ) u longitudinalnom smjeru o brzini nanošenja opterećenja sa pripadajućim standardnim devijacijama .....	35
<b>Slika18.</b> Dijagram ovisnosti srednjih vrijednosti naprezanja u točki proporcionalnosti ( $\sigma_{TP}(x)$ ) i maksimalnog naprezanja ( $\sigma_{max}(x)$ ) u longitudinalnom smjeru o brzini nanošenja opterećenja sa pripadajućim standardnim devijacijama .....	36
<b>Slika19.</b> Dijagram ovisnosti srednjih vrijednosti modula elastičnosti u longitudinalnom smjeru ( $E_x$ ) o brzini nanošenja opterećenja sa pripadajućim standardnim devijacijama .....	37
<b>Slika20.</b> Dijagram ovisnosti srednje vrijednosti specifične energije elastične deformacije u longitudinalnom smjeru ( $e_{el}(x)$ ) o brzini nanošenja opterećenja sa pripadajućim standardnim devijacijama .....	39
<b>Slika21.</b> Dijagram ovisnosti srednje vrijednosti specifične energije plastične deformacije u longitudinalnom smjeru ( $e_{pl}(x)$ ) o brzini nanošenja opterećenja sa pripadajućim standardnim devijacijama .....	40

- Slika22.** a) Dijagram ovisnosti srednjih vrijednosti specifične snage elastične ( $P_{el}(x)$ ) i plastične ( $P_{pl}(x)$ ) deformacije u longitudinalnom smjeru o brzini nanošenja opterećenja ..... 42
- Slika23.** Dijagram ovisnosti srednjih vrijednosti početne deformacije ( $\epsilon_0(y)$ ) i deformacije u točki proporcionalnosti ( $\epsilon_{TP}(y)$ ) u tangencijalnom smjeru o brzini nanošenja opterećenja sa pripadajućim standardnim devijacijama ..... 44
- Slika24.** Dijagram ovisnosti srednjih vrijednosti naprezanja u točki proporcionalnosti ( $\sigma_{TP}(y)$ ) i maksimalnog naprezanja ( $\sigma_{max}(y)$ ) u tangencijalnom smjeru o brzini nanošenja opterećenja sa pripadajućim standardnim devijacijama ..... 46
- Slika 25.** Dijagram ovisnosti srednje vrijednosti modula elastičnosti u tangencijalnom smjeru ( $E_y$ ) o brzini nanošenja opterećenja sa pripadajućim standardnim devijacijama ..... 47
- Slika26.** Dijagram ovisnosti srednje vrijednosti specifične energije elastične deformacije u tangencijalnom smjeru ( $e_{el}(y)$ ) o brzini nanošenja opterećenja sa pripadajućim standardnim devijacijama ..... 49
- Slika27.** Dijagram ovisnosti srednjih vrijednosti specifične energije plastične deformacije u tangencijalnom smjeru ( $e_{pl}(y)$ ) o brzini nanošenja opterećenja sa pripadajućim standardnim devijacijama ..... 50
- Slika28.** a) Dijagram ovisnosti srednjih vrijednosti specifične snage elastične ( $P_{el}(y)$ ) i plastične ( $P_{pl}(y)$ ) deformacije u tangencijalnom smjeru o brzini nanošenja. b) Dijagram ovisnosti srednje vrijednosti omjera specifične snage plastične i elastične deformacije u tangencijalnom smjeru ( $P_{pl}(y) / P_{el}(y)$ ) o brzini nanošenja opterećenja sa pripadajućim standardnim devijacijama ..... 52