

# Mehanička karakterizacija 3D ispisanih polimernih materijala

---

**Filić, Bartol**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:007660>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-15**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Bartol Filić**

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **Mehanička karakterizacija 3D ispisanih polimernih materijala**

Mentori:

Doc. dr. sc. Lana Virag, dipl. ing.

Student:

Bartol Filić

Zagreb, 2024.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem svojoj mentorici Lani Virag na pomoći tokom pisanja diplomskog rada.

Posebno bih zahvalio svojoj obitelji i prijateljima na podršci tokom studija, a naročito kolegama sa svojeg smjera s kojima sam provodio puno vremena uz učenje, stres i smijeh. Hvala Ružici, Nini, Vjeki i Vedranu!

Bartol Filić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomatske ispite  
Povjerenstvo za diplomatske ispite studija strojarstva za smjerove:



Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Bartol Filić** JMBAG: 0035214754

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Mehanička karakterizacija 3D ispisanih polimernih materijala**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Mechanical characterization of 3D printed polymer materials**

Opis zadatka:

Razumijevanje mehaničkog ponašanja materijala i točnost odgovarajućih parametara materijala jedan su od ključnih faktora za pouzdano dimenzioniranje konstrukcija i osiguravanje točnosti numeričkih simulacija. Parametri materijala dobivaju se iz eksperimentalnih ispitivanja, rješavanjem optimizacijskog problema u kojem je cilj minimizirati razliku između eksperimentalno izmjerenih i modelom predviđenih vrijednosti.

PolyJet tehnologija 3D ispisa omogućuje korištenje širokog spektra materijala koji se kreće od mekih i fleksibilnih materijala (TangoBlackPlus) do krutih i tvrdih (VeroWhite). Nadalje, moguće je pomiješati navedene osnovne materijale, u različitim omjerima, prije procesa 3D ispisa, kako bi se dobili tzv. digitalni materijali. Karakteristike kretanja glave 3D pisača utječu na mikrostrukturu što potencijalno može dovesti do anizotropije materijala.

U okviru rada je potrebno:

- Poučiti norme vezane za mehaničko ispitivanje polimernih materijala.
- Odrediti potrebni broj i dimenzije epruveta za jednoosno ispitivanje materijala te pripremiti odgovarajuće CAD modele za 3D ispis.
- Za 2 PolyJet materijala provesti jednoosne testove za transversalno i longitudinalno ispisane uzorke. Za jedan smjer ispisa provesti eksperimente za tri različite brzine ispitivanja.
- Komentirati potencijalnu anizotropnost materijala. Odrediti prigodan materijalni model i odrediti materijalne parametre.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

9. svibnja 2024.

11. srpnja 2024.

15. – 19. srpnja 2024.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Doc.dr.sc. Lana Virag

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. Važnost ispitivanja.....	1
1.2. Svojstva polimera.....	3
1.3. PolyJet tehnologija.....	3
1.4. Norme za mehanička ispitivanja.....	6
2. METODOLOGIJA.....	10
2.2. Procedura mehaničkog ispitivanja.....	10
2.3. Formule materijalne karakterizacije.....	12
2.4. Priprema koda.....	16
3. REZULTATI.....	22
3.1. Vlačna čvrstoća i maksimalno istežanje materijala DM70.....	22
3.2. Vlačna čvrstoća i maksimalno istežanje materijala DM85.....	25
3.3. Usporedba materijala.....	27
3.4. Materijalna karakterizacija.....	29
3.4.1. Određivanje materijalnih parametara.....	29
3.4.2. Ovisnost materijalnih konstanti o brzini ispitivanja.....	45
4. ZAKLJUČAK.....	51

**POPIS SLIKA**

Slika 1	Optimiziranje konstrukcije [1] .....	2
Slika 2	Vlačno ispitivanje elastomera [2].....	2
Slika 3	PolyJet tehnologija ispisa [4] .....	4
Slika 4	3D ispisan model srca [3].....	5
Slika 5	Agilus 30 (lijevo) i VeroClear (desno) [3] .....	5
Slika 6	Svojstva fleksibilne grupe PolyJet materijala, ovisno o udjelima pojedinih polimera [5] .....	6
Slika 7	Ponašanje različitih polimera [6].....	7
Slika 8	Oblik i dimenzije epruvete prema ISO normi [7].....	8
Slika 9	Osi kidalice i kamere za mjerenje udaljenosti [9] .....	11
Slika 10	Prikaz kamere na sučelju s mjerenjem [9].....	12
Slika 11	Ulazni paketi i podatci.....	16
Slika 12	Čitanje ulaznih podataka .....	17
Slika 13	Početni parametri.....	18
Slika 14	Minimizacija greške i određivanje materijalnih parametara .....	19
Slika 15	Ispis grafikona .....	19
Slika 16	Mooney - Rivlinov materijalni model .....	20
Slika 17	Prilagodba grafa .....	20
Slika 18	Ispis grafova i konstanti .....	21
Slika 19	Vlačna čvrstoća materijala DM70 .....	22
Slika 20	Maksimalno istezanje materijala DM70.....	24
Slika 21	Vlačna čvrstoća materijala DM85 .....	25
Slika 22	Maksimalno istezanje materijala DM85.....	26
Slika 23	Razlika čvrstoće materijala .....	28
Slika 24	Razlika u maksimalnom istezanju materijala .....	28
Slika 25	Eksperimentalno naprezanje i stvarno naprezanje uzdužnog uzorka pri 0,5 mm/s (prvo mjerenje).....	30
Slika 26	Eksperimentalno naprezanje i Neo – Hookeov materijalni model uzdužnog uzorka pri 0,5 mm/s (prvo mjerenje).....	31
Slika 27	Eksperimentalno naprezanje i Mooney – Rivlinov materijalni model uzdužnog uzorka pri 0,5 mm/s (prvo mjerenje).....	32
Slika 28	Eksperimentalno naprezanje i stvarno naprezanje poprečnog uzorka pri 0,5 mm/s (drugo mjerenje) .....	33
Slika 29	Eksperimentalno naprezanje i Neo – Hookeov materijalni model poprečnog uzorka pri 0,5 mm/s (drugo mjerenje).....	34
Slika 30	Eksperimentalno naprezanje i Mooney – Rivlinov materijalni model poprečnog uzorka pri 0,5 mm/s (drugo mjerenje).....	35
Slika 31	Eksperimentalno naprezanje i stvarno naprezanje uzdužnog uzorka pri 3,2 mm/s (prvo mjerenje).....	36
Slika 32	Eksperimentalno naprezanje i Neo – Hookeov materijalni model uzdužnog uzorka pri 3,2 mm/s (prvo mjerenje).....	37
Slika 33	Eksperimentalno naprezanje i Mooney – Rivlinov materijalni model uzdužnog uzorka pri 3,2 mm/s (prvo mjerenje).....	38
Slika 34	Eksperimentalno naprezanje i stvarno naprezanje uzdužnog uzorka pri 0,5 mm/s (drugo mjerenje) .....	39
Slika 35	Eksperimentalno naprezanje i Neo – Hookeov materijalni model uzdužnog uzorka pri 0,5 mm/s (drugo mjerenje).....	40

---

Slika 36	Eksperimentalno naprezanje i Mooney – Rivlinov materijalni model uzdužnog uzorka pri 0,5 mm/s (drugo mjerenje).....	41
Slika 37	Eksperimentalno naprezanje i stvarno naprezanje uzdužnog uzorka pri 6 mm/s (drugo mjerenje).....	42
Slika 38	Eksperimentalno naprezanje i Neo – Hookeov materijalni model uzdužnog uzorka pri 6 mm/s (drugo mjerenje).....	43
Slika 39	Eksperimentalno naprezanje i Mooney – Rivlinov materijalni model uzdužnog uzorka pri 6 mm/s (drugo mjerenje).....	44
Slika 40	Ovisnost materijalnih konstanti o brzini ispitivanja za materijal DM70 uzdužnog ispisa.....	46
Slika 41	Ovisnost materijalnih konstanti o brzini ispitivanja za materijal DM85 uzdužnog ispisa.....	47
Slika 42	Ovisnost materijalnih konstanti o brzini ispitivanja za materijal DM70 poprečnog ispisa.....	48
Slika 43	Ovisnost materijalnih konstanti o brzini ispitivanja za materijal DM85 poprečnog ispisa.....	49
Slika 44	Eksperimentalni podatci materijala DM70.....	50



---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1	Ispisani parametri vlačnog testa .....	16
Tablica 2	Prosječne vrijednosti vlačne čvrstoće DM70 .....	23
Tablica 3	Prosječne vrijednosti maksimalnog istezanja DM70 .....	24
Tablica 4	Maksimalni pomaci čeljusti za DM70.....	24
Tablica 5	Prosječne vrijednosti vlačne čvrstoće DM85 .....	25
Tablica 6	Prosječne vrijednosti maksimalnog istezanja DM85 .....	26
Tablica 7	Maksimalni pomaci čeljusti za DM85.....	27
Tablica 8	Prosječne vrijednosti materijalnih konstanti materijala DM70 .....	45
Tablica 9	Prosječne vrijednosti materijalnih konstanti materijala DM85 .....	45

**POPIS OZNAKA**

$\sigma$	Cauchyev tenzor naprezanja
$\sigma_e$	Eksperimentalno naprezanje
$\sigma_m$	Naprezanje materijalnog modela
$L$	Ukupna udaljenost mjerenih točaka epruvete
$L_0$	Početna udaljenost mjerenih točaka epruvete
$F$	Sila na epruveti
$A$	Trenutna površina poprečnog presjeka epruvete
$A_0$	Početna površina poprečnog presjeka epruvete
$P$	Prvi Piola-Kirchhoffov tenzor naprezanja
$N$	Normala diferencijalne površine u početnoj konfiguraciji
$T$	Prvi Piola-Kirchhoffov vektor naprezanja
$t$	Cauchyev vektor naprezanja
$n$	Normala diferencijalne površine u trenutnoj konfiguraciji
$\lambda$	Produljenje epruvete
$I_1$	Prva invarijanta Cauchyevog tenzora naprezanja
$I_2$	Druga invarijanta Cauchyevog tenzora naprezanja
$W$	energija deformiranja
$C_1(C_{10})$	Prva materijalna konstanta
$C_2(C_{01})$	Druga materijalna konstanta

---

**SAŽETAK**

Brzim napretkom tehnologija 3D ispisa znatno je ubrzan proces razvoja proizvoda, naročito izrada prototipa. Uz brze prototipe i mogućnost obrade konstrukcija FEM analizom optimizacija konstrukcija poprima novu dimenziju smanjenja troškova izrade i potrebe za predimenzioniranjem. Kako bi se konstrukcije pravilno dimenzionirale za potrebnu svrhu bitno je precizno i detaljno poznavati svojstva korištenih materijala jer se na tome zasniva cijeli proces konstruiranja. Od mehaničke karakterizacije materijala na nižoj razini, odnosno iz jednoosnog vlačnog pokusa, postavljaju se materijalni modeli koji će bolje opisivati svojstva i pri složenijim slučajevima opterećenja.

Ispisom uzoraka za vlačno ispitivanje na PolyJet pisaču znatno boljih performansi od široko dostupnih FDM tipova pisača dovodi se u pitanje anizotropnost materijala s obzirom da su pojedini slojevi ispisa znatno manji, precizniji i polimerizirani uz pomoć fotopolimerizacije. Iz tog se razlog ispituju uzorci dvaju smjerova ispisa, longitudinalnog i transverzalnog pri različitim brzinama ispitivanja.

Očitavanjem podataka uočavaju se potencijalne ovisnosti mehaničkih svojstava o uvjetima ispitivanja i izrade uzoraka, a potom se karakteriziraju, *eng. fitting*, koristeći programski kod, odnosno prilagođavaju se eksperimentalnim podacima materijalnih modela i određivanje pripadnih parametara. Takvo prilagođavanje dati će vrijednosti materijalnih konstanti koje se dalje mogu koristiti za računanje naprezanja u drugim slučajevima opterećenja.

Ključne riječi: PolyJet, 3D ispisivanje, anizotropnost, brzina ispitivanja, jednoosni vlačni test, materijalna karakterizacija

---

**SUMMARY**

The rapid progress of 3D printing technology has significantly accelerated the product development process, especially prototyping. With the ability of making prototypes much faster and the possibility of processing structures using FEM analysis, the optimization of structures greatly decreases production costs and the need for overbuilding parts. In order to properly design constructions for the required purpose, it is essential to know precisely and in detail the properties of the materials used. The entire construction process is based on this. From the mechanical characterization of the materials as a base knowledge, for example from the uniaxial tensile test, material models are established and will better describe the properties even in more complex load cases.

Printing samples for tensile testing on a PolyJet printer with significantly better performance than the widely available FDM types of printers questions the anisotropy phenomenon of the material, given that individual print layers are significantly smaller, more precise and polymerized by photopolymerization. For this reason samples were printed in two directions, longitudinal and transverse, in comparison to the axis of tensile testing and are tested at different test speeds.

By reading the data, the potential dependence of the mechanical properties on the testing and production conditions are observed, and then they are characterized using a program code that performs fitting, the adaptation of the experimental data to the material models. Such an adjustment will provide values of material constants that can further be used to calculate loads in other load cases.

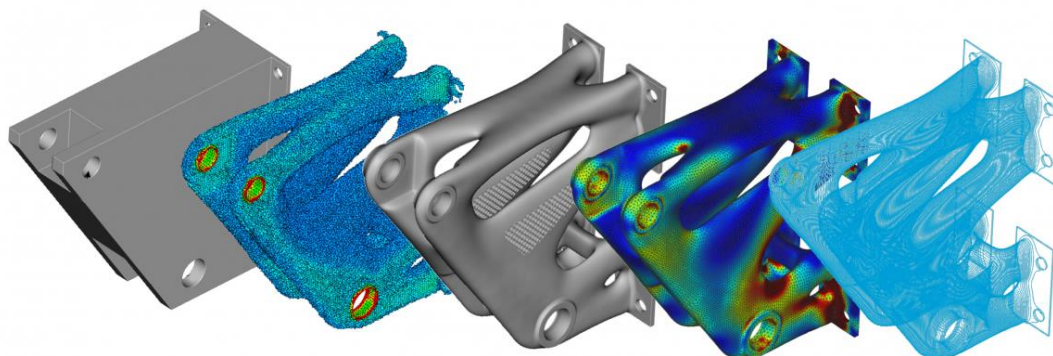
Key words: PolyJet, 3D printing, anisotropy, testing speed, uniaxial tensile test, fitting

## 1. UVOD

Prije no što se dovedu u pitanje karakteristike samih uzoraka, ovisnost smjera ispisa o izotropnosti materijala i računanje materijalnih modela potrebno je shvatiti koja je motivacija za takav eksperiment, kakvo se generalno ponašanje polimera može očekivati, a zatim i koja je procedura propisana normom kako bi rezultati imali valjanu i iskoristivu funkciju u svijetu konstruiranja.

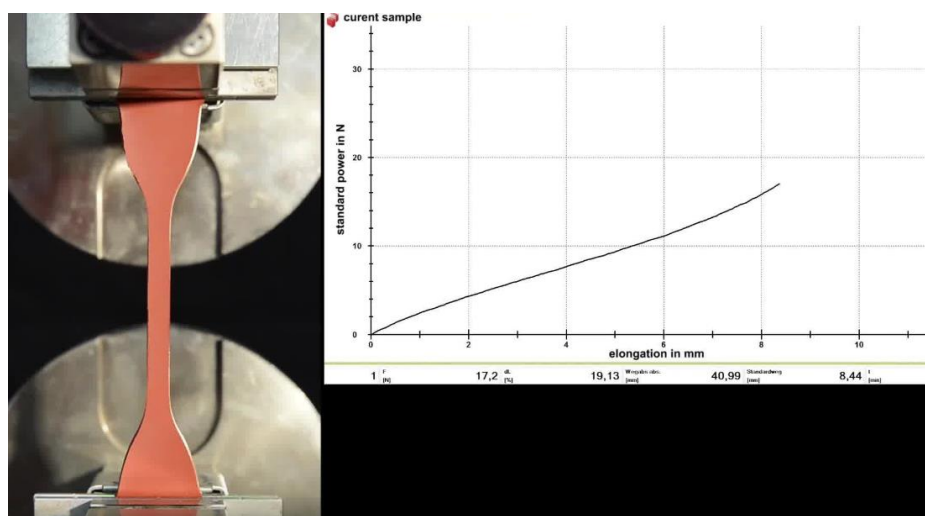
### 1.1. Važnost ispitivanja

Razvoj novih ili optimizacija postojećih komponenata i proizvoda zahtijeva razumijevanje mehaničkog ponašanja odabranog materijala. Točnost odgovarajućih parametara materijala jedan su od ključnih faktora za pouzdano dimenzioniranje konstrukcija i osiguravanje točnosti numeričkih simulacija. Također, kako bi se smanjili troškovi proizvodnje, poželjno je imati i, poželjno je imati i što manji trošak materijala, odnosno sa što manjom masom i volumenom dobiti i zadovoljavajuće karakteristike proizvoda kako bi obavljao svoju funkciju, što prikazuje i Slika 1. Za takav pristup sve se više koriste tehnologije 3D ispisa zbog mogućnosti dobivanja kompleksnih struktura s gotovo minimalnim utroškom materijala. Kako bi to uopće bilo izvedivo neizmjerne je bitno dobro poznavati svojstva materijala. Ukoliko bi se pogrešno procijenila svojstva, a sama konstrukcija nije prilagođena dovoljnim faktorom sigurnosti zbog prevelike uštede, moglo bi doći do katastrofalnih rezultata. Zato ovdje nastupa ispitivanje mehaničkog ponašanja materijala kao prvi i osnovni stadij konstruiranja.



**Slika 1 Optimiziranje konstrukcije [1]**

Povjerenjem u pouzdanost mehaničkih svojstava materijala osigurava se i točnost numeričkih simulacija kojima se procjenjuju naprezanja unutar konstrukcije te otkrivaju potencijalni problemi. U ovome radu uzorci polimernih materijala biti će ispitani vlačnim testom koristeći horizontalnu kidalicu, kao što je prikazano na Slika 2. Tim razornim ispitivanjem mjeri se vlačna čvrstoća i maksimalna istežanja uslijed aksijalnog opterećenja. Također se analizom mjerenih podataka se definira materijalni model koji najbolje opisuje ponašanje rezultate te se određuju pripadni materijalni parametri. Povlačenjem paralele između ovih eksperimentalno dobivenih podataka te onih modelom predviđenih znatno se približavamo onom početnom cilju povoljnije i preciznije proizvodnje proizvoda koji i dalje može obavljati svoju funkciju.



**Slika 2 Vlačno ispitivanje elastomera [2]**

## 1.2. Svojstva polimera

Svojstva polimera uvelike razlikuju ovisno o sastavu, stoga je teško generalno opisati njihovo ponašanje. Ono što vrijedi za većinu jest da su izolatori, mekšaju s porastom temperature i podnose relativno velike elastične deformacije, a pobliže će biti riječ o polimerima nalik gumi, elastomerima.

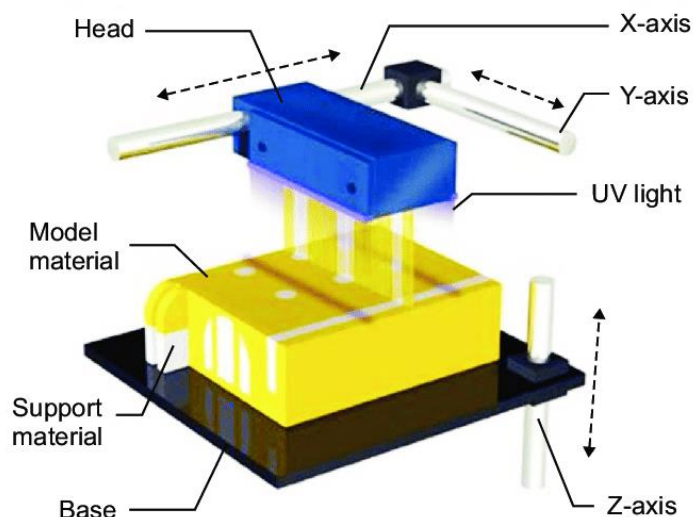
Elastomeri se sastoje od makromolekula koje imaju veliku sposobnost elastične deformacije te su amorfnog oblika i niskog stupnja umreženja. Što je veća gustoća umreženosti to im je niža elastičnost koja je osigurana dvostrukim vezama u molekulama polimera. Uglavnom se ne mogu rastopiti što onemogućuje direktnu mogućnost recikliranja, no to se izvodi drugačijim tehnikama kao na primjer usitnjavanjem te korištenjem takvih granula za podloge dječjih igrališta [17].

Razumijevanjem sastava polimera i manipulacijom njihovih agregatnih stanja omogućena je tehnologija 3D ispisivanja proizvoda. Postoji nekoliko tehnika lokalnog odlaganja, odnosno polimerizacije, materijala koristeći neku vrstu sustava za kretanje u prostoru (robotska ruka, portalne osi...) Kako bi se koristile ove tehnologije potrebno je koristiti polimere koji su tome prilagođeni. Za ispis filameta koji je u krutom stanju potrebno je koristiti polimer koji će se moći u tom procesu zagrijati kroz sapnicu printera, odložiti na pravoj koordinati te ponovno stvrdnuti uz srastanje s prethodno odloženim materijalom. Ta se tehnika zove FDM, odnosno „fused deposition modeling“.

## 1.3. PolyJet tehnologija

Za potrebe ovog rada koristi se PolyJet tehnologija ispisa polimera. Ovakva vrsta printera značajno je skuplja od onog koji taloži filament. Radi se o tehnologiji koja koristi sapnice vrlo slične onima na klasičnim laserskim printerima s mnogo zasebnih „rupica“ kroz koje prolazi materijal koji je u samome početku u tekućem stanju. Nakon odlaganja materijala iz sapnice potrebno ga je stvrdnuti što se odvija uz pomoć ultraljubičastog svjetla koje se nalazi na istoj glavi printera gdje su i sapnice za odlaganje što opisuje Slika 3. Ova je tehnologija naprednija od ostalih jer svaka od sapnica ima mogućnost korištenja drugog materijala. Takvom se kombinacijom dodatno širi spektar sposobnosti 3D ispisivanja konstrukcija s obzirom na promjenu svojstava i boje na pojedinim dijelovima konstrukcije. Kao potporni materijal odlaže

se zasebna vrsta koja je lako topiva u vodi ili otapalima. Iz tog je razloga dimenzijska točnost znatno veća, kao i zato što su same sapnice mnogo manjeg promjera nego kod FDM tehnologije. Korištenjem ove tehnologije ne pojavljuje se efekt stepeničastog ispisa kod kojeg se pri svakom novom sloju vidi mjesto gdje su spojene dvije linije ispisa. Takva su mjesta kritični presjeci konstrukcija i najčešće tamo pucaju. S obzirom da ovdje nisu tako izražena mjesta spajanja dvije linije ispisa dovodi se u pitanje hoće li smjer ispisa imati utjecaj na vlačnu čvrstoću ili će biti moguće pretpostaviti izotropnost materijala. [3]



Slika 3 PolyJet tehnologija ispisa [4]

U PolyJet tehnologiji postoji nekoliko vrsta fotopolimera koji svojim svojstvima oponašaju elastomere. Jedan od njih je *Elastico* kojem istežanje pri pucanju doseže 360 – 400% početne duljine i vlačnu čvrstoću u iznosu od 3 – 5 MPa. [3]

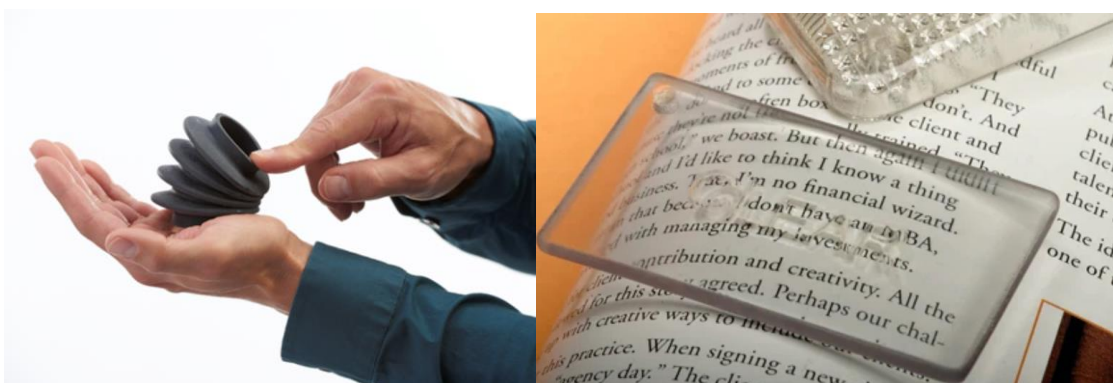
Uz njega, nešto zanimljiviji materijal naziva *TissueMatrix* vjerno simulira izrazito osjetljivu i mekanu strukturu ljudskih tkiva i unutarnjih organa kako prikazuje primjer na slika 4 . Zbog toga ga nije moguće ispisati u obliku samostalne konstrukcije već uz neki stabilno materijal. Koristi se za ispis imitacija ljudskih tkiva na kojima se vježba šivanje, bušenje, rastežanje i druge kirurške aktivnosti.





**Slika 4** 3D ispisan model srca [3]

U ovome se radu koriste dva digitalna materijala naziva DM70 i DM85. Njihova su svojstva različita uslijed drugačijih omjera dvaju osnovnih materijala od kojih su sačinjeni. *Agilus* kao gumolika baza i *VeroClear* kao materijal koji oponaša prozirni PMMA, polimetakrilat što prikazuje slika 5. Svojstva ovih dvaju materijala opisana su očitavanjem parametara vlačnog testa u nastavku rada. [5]

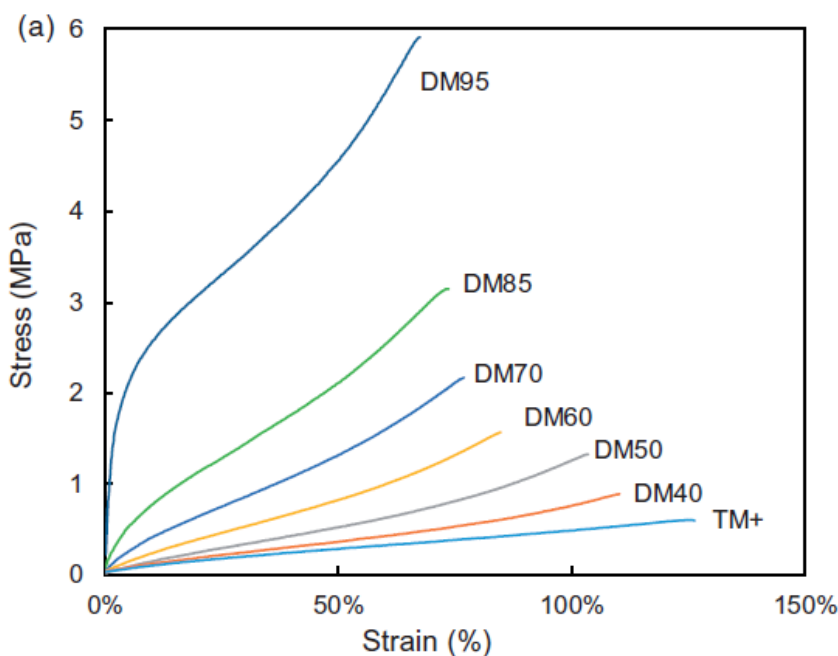


**Slika 5** Agilus 30 (lijevo) i VeroClear (desno) [3]

Slika 6 prikazuje ovisnost svojstava pojedinih materijala korištenih u PolyJet tehnologiji o udjelima zasebnih polimera iz literature [5]. Međutim, iako u literaturi postoje naznake da smjer ispisa utječe na materijalna svojstva, odnosno da uzorak postaje anizotropan, to nikada nije

potpuno ispitano. Također, testiranja se često provode pri jednoj brzini ispitivanja, te nije detaljno istražen utjecaj brzine ispitivanja na čvrstoću i maksimalna istezanja materijala.

Nadalje, materijali za PolyJet tehnologije se i dalje razvijaju. Navedeni rezultati sa slike 6 su provedeni na uzorcima digitalnih koji su dobiveni miješanjem *TangoBlackPlus* i *VeroWhite* materijala. Brojevi u imenu digitalnih materijala označavaju tvrdoću pojedinog materijala. U zadnje vrijeme se umjesto *TangoBlackPlus* materijala koji je bio sklon trganju koristi unaprijeđeni *Agilus* materijal iste tvrdoće, ali potencijalno drugačije krutosti. Prema tome, svi novi digitalni materijali će imati drugačije mehaničko ponašanje u odnosu na ono do sada objavljeno u literaturi.



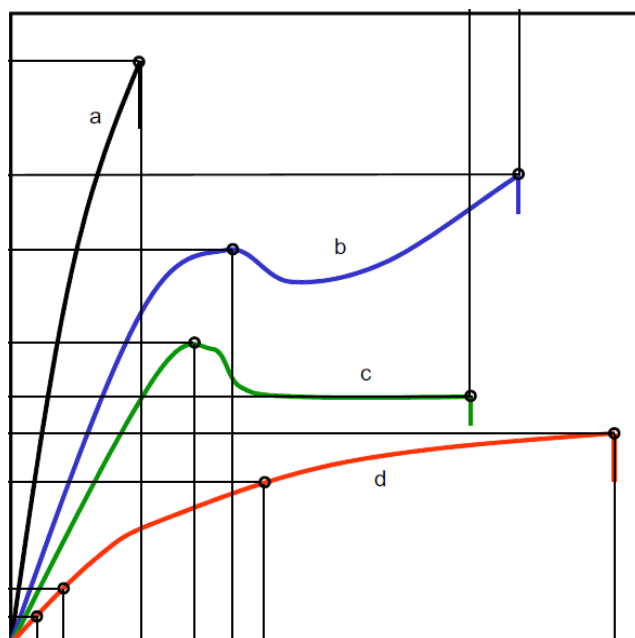
**Slika 6** Svojstva fleksibilne grupe PolyJet materijala, ovisno o udjelima pojedinih polimera [5]

#### 1.4. Norme za mehanička ispitivanja

Za mehaničko ispitivanje polimera postoje dvije norme: ISO 527-1 za krute polimere [6] i ISO 37:2011 za gumaste (*rubber-like*) polimere [7]. Ovim normama su definirane dimenzije uzoraka, minimalni potrebni broj ispitanih uzoraka, način ispitivanja materijala kao i način opisa eksperimenta u dokumentaciji.

Posebno su nam zanimljivi fleksibilniji materijali nalik gumama. Dva takva materijala, odnosno dvije epruvete isprintane PolyJet tehnologijom, ispitana su na jednoosnoj kidalici te će se usporediti ovisnost smjera ispisa, longitudinalni (uzdužni) i transverzalni (okomiti). Kako bi se ovakav test pravilno izveo te njegovi rezultati bili usporedivi s teoretskim modelima potrebno je koristiti se određenim normama propisanim za takva ispitivanja.

Prva norma koja se uzima u obzir je ISO 527-1 te opisuje određivanje vlačnih svojstava polimera. Nakon opisivanja pojedinih parametara, na Slika 7 je otprilike vidljivo kako će se polimeri različitih čvrstoća i svojstava ponašati prema grafu.



Slika 7 Ponašanje različitih polimera [6]

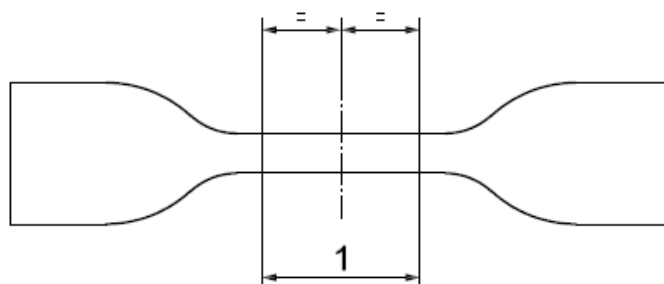
Crna linija označena slovom a prikazuje krhki materijal koji ne podnosi gotovo nimalo plastične deformacije, ali zato postiže najveće naprezanje dok materijal označen slovom d i crvenom linijom prikazuje gumoliki polimer koji puca tek pri velikom istezanju većem od 50%.

Princip ispitivanja se svodi na aksijalno razvlačenje duž glavne longitudinalne osi konstantnom brzinom sve dok uzorak ne pukne ili dok naprezanje ne postigne neku predodređenu vrijednost. Nadalje, norma određuje minimalni broj od 5 uzoraka potreban za pravilno testiranje. Pri tome treba imati na umu da se povećanjem broja uzoraka pospješuje i točnost srednje vrijednosti

vlačne čvrstoće. Dodatno, zanemaruju se svi uzorci koji su se slomili preblizu prihvatnim čeljustima ili su proklizali u njima. Ovo je primarno bitno pri određivanju broja uzoraka koji će se pripremiti za ispitivanje kako ne bi nastala situacija nedovoljnih testova.

Iduća norma koja se tiče ovog rada je ISO 37:2011. U njoj se pobliže opisuje ispitivanje vlačnih svojstava termoplastičnih i vulkaniziranih guma. Takvi se materijali mogu pripremiti na nekoliko načina. Generalno se dijele na epruvete u obliku bučice i prstenaste uzorke. Prstenasti uzorci se preferiraju ukoliko se radi o automatskom ispitivanju zbog lakoće rukovanja, npr. testiranja već ukomponirana u proizvodni proces. Epruvete u obliku bučice se koriste kada se želi potanko proučavati utjecaj smjera usmjerenja zrna, u ovome slučaju smjer ispisa. Upravo zato će se ovdje i koristiti takve epruvete.

Kada govorimo o epruvetama oblika bučice postoje 5 različitih normom propisanih dimenzija što prikazuje Slika 8. Preporučaju se verzije koje su većih dimenzija jer manje epruvete imaju tendenciju davati nešto više vrijednosti vlačne čvrstoće.



Type of test piece	Type 1	Type 1A	Type 2	Type 3	Type 4
Test length (mm)	$25 \pm 0,5$	$20 \pm 0,5^a$	$20 \pm 0,5$	$10 \pm 0,5$	$10 \pm 0,5$
<sup>a</sup> The test length shall not exceed the length of the narrow portion of the test piece (dimension C in Table 2).					

**Slika 8 Oblik i dimenzije epruvete prema ISO normi [7]**

Napominje se da se tipovi 3 i 4 koriste u slučajevima kada nema dovoljno materijala za ispitivanja na većim epruvetama. Takav je slučaj na primjer kada se uzorak izrezuje iz nekih vrsti brtvi koje su određene otprije svojim oblikom. Kako je 3D ispis relativno nova tehnologija nije postavljena norma kojom se isključivo određuju parametri, odnosno dimenzije uzoraka za takve materijale. U ovoj se normi dimenzije spominju kao dimenzije noža koji iz ranije

pripremljenih polimera izrezuje epruvete. No, kako se radi o istome tipu polimera ta je norma najbliža onome što je potrebno za valjanost ispitivanja ovoga rada.

Minimalno vrijeme između vulkanizacije, u ovome slučaju ispisa, i ispitivanja mora iznositi 16 sati dok maksimalno iznosi 4 tjedna. U tom periodu je bitno pravilno skladištiti epruvete kako ne bi došlo do narušavanja točnosti ispitivanja uslijed vanjskih utjecaja na uzorke [8]. U ovom radu je ispitivanje provedeno 1-3 dana nakon 3D ispisa.

---

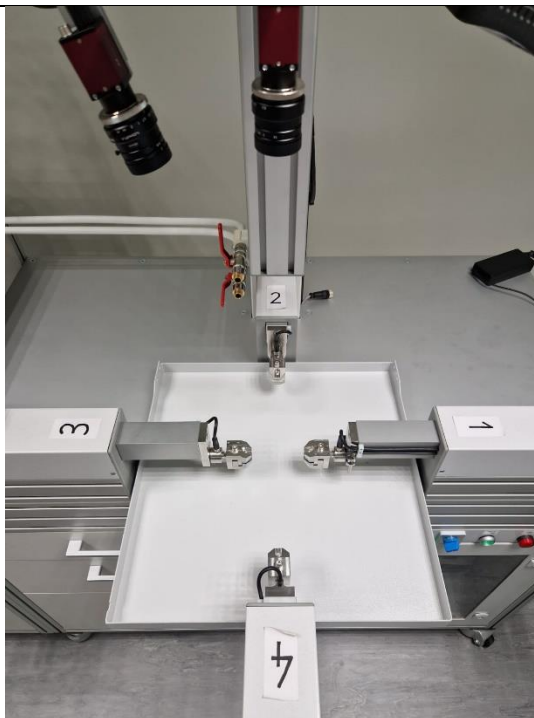
## **2. METODOLOGIJA**

### **2.1. Priprema uzoraka**

Uzorci su 3D ispisani na uređaju Stratasys Objet350 Connex3. Maksimalni broj uzoraka koji se može istovremeno isprintati je određen veličinom radne površine. Za odabrane dimenzije uzoraka je bilo moguće isprintati 14 epruveta u uzdužnom i 14 epruveta u smjeru okomitom na smjer ispisa iz jednog materijala. Trajanje ispisa za svaki od materijala je bilo oko 105 minuta. Na uzorcima su ručno označene točke bijelim flomasterom u razmaku 25 mm čiji se razmak prati tijekom ispitivanja. Unutar svake grupe ispitivanja (definirane materijalom, smjerom ispisa i brzinom ispitivanja) su ispitane četiri epruvete, jer po normi zahtijevaju minimalno tri.

### **2.2. Procedura mehaničkog ispitivanja**

Kidalica koja je korištena za ispitivanje sastoji se od četiri osi te je sposobna za dvoosna ispitivanja materijala kako je vidljivo na Slika 9. Osi kidalice i kamere za mjerenje udaljenosti. Njome se upravlja koristeći korisničko sučelje pripremljeno u Beckhoffovom TwinCat programu. Za potrebe ispitivanja moguće je svaku os zasebno pokretati u aksijalnome smjeru, ali i automatski unosom brzine kretanja. Prije samog ispitivanja potrebno je kalibrirati senzore sila smještene na čeljustima što se obavlja pomoću vanjskog, prethodno umjerenog, uređaja za mjerenje sile. Tek osiguravanjem jednoznačnog rezultata tih dvaju mjerača moguće je pristupiti valjanoj proceduri ispitivanja.



**Slika 9 Osi kidalice i kamere za mjerenje udaljenosti [9]**

Prethodno je osiguran dovoljan faktor trenja u čeljustima kako uzorak ne bi proklizavao prije pucanja. Bitno je osigurati dovoljnu silu pritezanja kako bi se izbjeglo proklizavanje, ali također ne i preveliku kako ne bi došlo do stvaranja kritičnog presjeka na krivoj poziciji. Nakon postavljanja dviju točaka u razmaku od 25 mm koji je propisan normom, epruvete oblika bučice i tipa 1 opisane u prethodnom poglavlju postavljaju se u čeljusti kidalice. Ove dvije točke označavaju ispitnu duljinu te se prate pomoću sustava kamera postavljenog na kidalici. Pomicanjem čeljusti, odnosno razvlačenjem uzorka, pomiču se i označene točke kojima kamera zapisuje koordinate što prikazuje Slika 10. One se stoga moraju prije testa precizno označiti u sučelju, a potom i osigurati kameri da izdvoji isključivo te točke bez vanjskog utjecaja. To se odnosi na uklanjanje izvora refleksije i fluktuirajućih izvora svjetlosti. U tu se svrhu koriste posebno postavljena industrijska svjetla.



Slika 10 Prikaz kamere na sučelju s mjerenjem [9]

Kako je opisano u zadatku rada, procedura se odnosi na ispitivanje utjecaja smjera ispisa te brzine ispitivanja za dva različita materijala, DM70 i DM85. Nakon postavljanja epruvete u čeljusti određuju se brzine ispitivanja te se sami proces razvlačenja uzorka odvija sve dok uzorak ne pukne. Rezultati pojedinačnih mjerenja pohranjuju se u obliku tekstualnog zapisa parametara očitanih sila na svakoj čeljusti te udaljenošću dvaju označenih točaka. Iz ovih se informacija kasnije računaju naprežanje i istežanje. Trenutak u kojem se sila počinje smanjivati označava puzanje materijala i početak pucanja epruvete. Podatci koji su zapisani nakon trenutka očitane maksimalne sile razvlačenja nisu uključeni u daljnji račun.

Odabrane brzine vlačnog testa iznose 0,5 mm/s, 3,2 mm/s i 6 mm/s. Uzorci kojima je smjer ispisa usmjeren poprečno na os ispitivanja testirani su pri sve tri brzine dok su uzorci uzdužnog smjera ispisa testirani pri brzinama od 0,5 mm/s i 3,2 mm/s.

### 2.3. Formule materijalne karakterizacije

Kako je ranije spomenuto, ključni dio ovakvih ispitivanja je usporedba eksperimentalnog ispitivanja s materijalnim modelima. Iz eksperimenta razvlačenja iščitavaju se produljenje i sila



koja je upotrijebljena. Povezivanjem tih informacija s poznatim dimenzijama epruvete lako se računa naprezanje koje se stvara u materijalu.

$$\sigma = \frac{F}{A}. \quad (1)$$

Osnovni problem pri računanju ovom formulom je deformacija koja se ostvaruje uslijed naprezanja. Zbog deformacije više ne možemo računati kao da je presjek epruvete jednak početnome iz čega slijedi da je i naprezanje drugačije od onoga kakvim ga smatramo. Računanje s početnim, nepromijenjenim, presjekom radi se uz pomoć prvog Piola-Kirchhoffovog tenzora naprezanja (PPK) koji glasi:

$$\mathbf{T} = \frac{d\mathbf{f}}{dA_0} = \mathbf{P}^T \mathbf{N}. \quad (2)$$

U ovoj jednadžbi  $d\mathbf{f}$  označava diferencijal trenutne sile,  $\mathbf{T}$  je prvi Piola-Kirchhoffov vektor naprezanja, a  $\mathbf{P}$  označava PPK tenzor naprezanja s normalom diferencijalne površine u početnoj konfiguraciji  $\mathbf{N}$ . Kako  $\mathbf{P}$  nije simetričan potrebno je paziti na transponiranje. [10]

Ako se uzima u obzir promjena poprečnog presjeka površine, a to je upravo ono što je ključno za pravilno postavljanje eksperimenta i dobivanje iskoristivih podataka, potrebno je uvesti Cauchyev tenzor naprezanja koji je potpuno u trenutnoj konfiguraciji. Definira se kao:

$$\mathbf{t} = \frac{d\mathbf{f}}{dA} = \boldsymbol{\sigma}^T \mathbf{n} = \boldsymbol{\sigma} \mathbf{n}. \quad (3)$$

Ovdje je  $\mathbf{t}$  Cauchyev vektor naprezanja, a  $\boldsymbol{\sigma}$  Cauchyev tenzor naprezanja koji je simetričan te mu stoga nije potrebno transponiranje. Vidljivo je da se u nazivniku koristi diferencijal trenutnog poprečnog presjeka za razliku od PPK tenzora.

Materijalna karakterizacija, odnosno prilagođavanje eksperimentalno dobivenih podataka onima dobivenim teorijom koristeći Neo – Hookeov materijalni model, dobiva se pomoću formule koja glasi:

$$\min \sum (\sigma_e - \sigma_m)^2. \quad (4)$$

Potrebno je izračunati konstantu  $C_1$  tako da se krivulja naprezanja Neo - Hookeovog materijalnog modela označenog  $\sigma_m$  što bolje preklapa sa  $\sigma_e$ , odnosno eksperimentalnim naprezanjem. Raspišu li se zasebno naprezanja  $\sigma_m$  i  $\sigma_e$  te uvrste u prethodnu jednadžbu dobiti će se izraz oblika:

$$\min \sum \left( \lambda \frac{N}{A_0} - 2C_1 \left( \lambda^2 - \frac{1}{\lambda} \right) \right)^2. \quad (5)$$

Ovdje  $\lambda = \frac{L}{L_0}$  označava aksijalno produljenje epruvete u smjeru opterećenja.

Uvrštavanjem ovih formula u programski paket *Octave* računa se materijalna konstanta  $C_1$ , uz pomoć naredbe *lsqnonlin*, kojom se efektivno eksperimentalni podatci prilagode materijalnom modelu, no detaljniji opis koda slijedi u idućem poglavlju.

U slučaju Mooney-Rivlinovog materijalnog modela slučaj je nešto kompliciraniji. Njegova točnost pri računanju nelinearnog ponašanja je znatno viša [11]. Kako bi se poboljšala točnost uvodi se i druga invarijanta desnog Cauchy-Greenovog tenzora deformiranosti  $\mathbf{C}$  koja glasi:

$$I_2 = \left( (\text{tr}(\mathbf{C}))^2 - \text{tr}(\mathbf{C}^2) \right). \quad (6)$$

Prva invarijanta se izražuje oblikom:

$$I_1 = \text{tr}(\mathbf{C}). \quad (7)$$

Sređivanjem ovih izraza dobiveni su sljedeći oblici ovih dviju invarijanti:

$$I_1 = \lambda^2 + \frac{2}{\lambda} \quad (8)$$

$$I_2 = 2\lambda + \frac{1}{\lambda^2}. \quad (9)$$

Energija deformiranja za Mooney-Rivlinov materijalni model glasi [12]:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3). \quad (10)$$

Naprezanje u aksijalnome smjeru izvodi se prema:

$$\sigma_{11} = 2 \left( \frac{\partial W}{\partial I_1} b_{11} - \frac{\partial W}{\partial I_2} b_{11}^{-1} \right) - 2 \left( \frac{\partial W}{\partial I_1} b_{22} - \frac{\partial W}{\partial I_2} b_{22}^{-1} \right). \quad (11)$$

Parcijalne derivacije energije deformiranja po invarijantama iznose upravo materijalne konstante:

$$C_{10} = \frac{\partial W}{\partial I_1}. \quad (12)$$

$$C_{01} = \frac{\partial W}{\partial I_2}. \quad (13)$$

A lijevi Cauchy-Greenov tenzor deformiranosti poprima oblik kao:

$$B = \begin{bmatrix} \lambda^2 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\lambda} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\lambda} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Uvrštavanjem i kombiniranjem ovih jednadžbi dobiven je izraz za aksijalno naprezanje izražen preko materijalnih konstanti i istezanja:

$$\sigma_{11} = 2C_{10} \left( \lambda^2 - \frac{1}{\lambda} \right) + 2C_{01} \left( \lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right). \quad (15)$$

Upravo iz ove formule se, korištenjem programa *Octave*, računaju materijalne konstante. Ovim će se materijalnim modelom dobiti puno točnija prilagodba eksperimentalnih podataka teoretskom modelu. [10]

## 2.4. Priprema koda

Rješavanje zadatka karakterizacije grafova radi se uz pomoć programa *Octave*. Potrebno je prije svega učitati dodatni paket alata *optim* kako bi se mogla koristiti naredba *lsqnonlin* za prilagodbu grafova. Taj je dio opisan Slika 11

```

1 pkg load optim
2 pkg load io
3
4 % Učitavanje podataka iz excela
5 filename = 'D:\Desktop\mjerenja_excel\DM_85_Poprecno_1_6mm_s_Cetvrto_mjerenje.xlsx';
6 data = xlsread(filename, 'F2:G1000');
```

Slika 11 Ulazni paketi i podatci

Paket alata *io* potreban je kako bi se mogli očitavati podatci iz *Excel* tablice koja u sebi nosi očitane parametre vlačnog testiranja na kidalici.

Podatci u *Excelu* spremljeni su u obliku Tablica 1 i opisuju kompletno ponašanje epruvete sve od početnih uvjeta sve do pucanja. S obzirom da pri kraju ispitivanja dolazi do popuštanja koje je teže opisati i koje će se isključiti iz procesa karakteriziranja potrebno je jednako tako isključiti i te podatke iz koda kako opisuju redovi 8-19 na Slika 12.

Tablica 1 Ispisani parametri vlačnog testa

A	B	C	D	E	F	G	H	I
D_x [mm]	F_x1 [N]	F_x3 [N]			Srednja sila	Pomak	Lambda	Naprezanje
25.58949	0	0			0	0	1	0
25.58961	0.02	0			0.01	0.000125	1.000005	0.000806456
25.64177	0.86	0.75			0.805	0.052283	1.002043	0.065051994
25.74921	1.56	1.36			1.46	0.159718	1.006242	0.118476827
25.89227	2.12	1.86			1.99	0.302778	1.011832	0.162382736
26.06062	2.59	2.28			2.435	0.471129	1.018411	0.199986361

```
8 % Očitavanje pomaka i sile
9 produljenje = data(:, 2);
10 sila = data(:, 1);
11
12 % Maksimalna sila
13 [max_sila, max_index] = max(sila);
14
15
16 % Isključivanje podataka nakon maksimuma sile
17 %vrijeme = vrijeme(1:max_index);
18 produljenje = produljenje(1:max_index);
19 sila = sila(1:max_index);
```

**Slika 12** Čitanje ulaznih podataka

Slijedi definiranje početnih dimenzija uzoraka, a potom i definiranje parametara naprezanja koji se će se koristiti za materijalnu karakterizaciju. Kako je ranije opisano, PPK tenzor naprezanja ne uzima u obzir stvarni poprečni presjek uzorka već samo početni, a Cauchyev tenzor naprezanja korigira svoj izračun prema promjeni presjeka uslijed istezanja. Nakon računanja PPK i Cauchyevog tenzora naprezanja poželjno ih je i predstaviti grafom kako bi se jasno vidjela razlika u njihovim računima i zbog čega se uopće teži procesu određivanja materijalnih parametara. Taj dio programskog koda opisuje Slika 13.

```
21 % Početne dimenzije
22 L0 = 25;
23 A0 = 12.4;
24
25 lambda = (L0 + produljenje) / L0;
26
27 % Racunanje PPK naprezanja i Cauchyovo naprezanje
28 sigma_PPK = sila / A0;
29 sigma_Cauchy = lambda.* sila / A0;
30
31 %Definiranje eksperimentalnog naprezanja
32 sigma_e = sigma_Cauchy;
33
34 % Ispis PPK naprezanja i Cauchyevog naprezanja
35 figure;
36 plot(lambda, sigma_PPK, 'r-', 'LineWidth', 1, 'DisplayName',...
37 'PPK Naprezanje (N/A_0)');
38 hold on;
39 plot(lambda, sigma_Cauchy, 'b-', 'LineWidth', 1, 'DisplayName',...
40 'Cauchy Naprezanje (\lambda N/A_0)');
41 xlim([min(lambda),max(lambda)]);
42 ylim([min(sigma_Cauchy),max(sigma_Cauchy)]);
43 xlabel('Izduženje (\lambda)');
44 ylabel('Naprezanje (\sigma) [MPa]');
45 title('PPK Naprezanje i Cauchyovo Naprezanje');
46 legend('show');
47 grid on;
48 hold off;
```

Slika 13 Početni parametri

Iduće se definira materijalni model prema formuli (5) iz prethodnog poglavlja. Naprezanje materijalnog modela se računa kao funkcija jer u sebi nosi i materijalnu konstantu  $C_1$  koju je cilj izračunati. Upravo je ona to što će omogućiti prilagodbu grafa i prikazana je na Slika 14. Definira se i funkcija greške koja minimizira razliku suma eksperimentalnog naprezanja i naprezanja materijalnog modela. Takvim izračunom, uz funkcije *lsqnonlin*, dobiva se konačna materijalna konsanta  $C_1$ .

```

50 % Materijalni model
51 function sigma_m = teorijsko_naprezanje(C1, lambda)
52     sigma_m = 2 * C1 * (lambda.^2 - 1 ./ lambda);
53 end
54
55
56 function greska = funkcija_greske(C1, lambda, sigma_e, A0)
57     sigma_m = teorijsko_naprezanje(C1, lambda);
58     greska = (sigma_e - sigma_m);
59 end
60
61 % Fittanje
62 C1_initial = 0.6;
63 [C1_opt, resnorm] = lsqnonlin(@(C1) funkcija_greske...
64 (C1, lambda, sigma_e, A0), C1_initial);
65
66 sigma_teorijsko = teorijsko_naprezanje(C1_opt, lambda);

```

Slika 14 Minimizacija greške i određivanje materijalnih parametara

Na kraju izračuna potrebno je takve parametre i ispisati u obliku grafa kako bi se provjerio proces određivanja parametara i iščitala materijalna konstanta. Priprema ispisa grafa opisuje Slika 15.

```

68 % Ispis fittane krivulje
69 figure;
70 plot(lambda, sigma_Cauchy, 'b-', 'LineWidth', 1, 'DisplayName',...
71 'Eksperimentalno naprezanje (\lambda N/A_0)');
72 hold on;
73 plot(lambda, sigma_teorijsko, 'r-', 'LineWidth', 1, 'DisplayName',...
74 sprintf('Naprezanje s materijalnim modelom (C1 = %.5f)', C1_opt));
75 xlim([min(lambda), max(lambda)]);
76 ylim([min(sigma_teorijsko), max(sigma_teorijsko)]);
77 xlabel('Izduženje (\lambda)');
78 ylabel('Naprezanje (\sigma) [MPa]');
79 title('Eksperimentalno naprezanje i materijalni model');
80 legend('show');
81 grid on;
82 hold off;

```

Slika 15 Ispis grafikona

Kako bi se računale materijalne konstante pomoću Mooney - Rivlinovog materijalnog modela, kod je potrebno prilagoditi, odnosno uvesti dodatne varijable i funkcije. Prije svega definira se funkcija Mooney – Rivlinovog naprezanja koja ovisi o materijalnim konstantama i istezanju kako je opisano u prethodnom poglavlju. Potom se definira i funkcija greške koja na kraju računa sumu razlika eksperimentalnog naprezanja i naprezanja materijalnog modela, u ovom slučaju nazvanog  $\sigma_{mr}$ . Ovaj se materijalni model računa prema kodu sa Slika 16.

```

92 % Materijalni model Mooney-Rivlin
93 function sigma_mr = teorijsko_naprezanje_mr(C, lambda)
94     C10 = C(1);
95     C01 = C(2);
96     sigma_mr = 2 * C10 * (lambda.^2 - 1 ./ lambda) + 2 * C01 * ...
97     (lambda - 1 ./ (lambda.^2));
98 end
99
100 function greska_mr = funkcija_greske_mr(C, lambda, sigma_e)
101     sigma_mr = teorijsko_naprezanje_mr(C, lambda);
102     greska_mr = (sigma_e - sigma_mr);
103 end

```

**Slika 16 Mooney - Rivlinov materijalni model**

Nakon definiranja i računanja potrebnih parametara dolazi se do ispisa grafa što je vrlo slično kao i za Cauchyjev materijalni model. Materijalna karakterizacija se odvija prema kodu navedenom na Slika 17.

```

105 % Fittanje za Mooney-Rivlin model
106 C_pocetno = [1, 1]; % Početne vrijednosti za C10 i C01
107 [C_opt, resnorm_mr] = lsqnonlin(@(C) funkcija_greske_mr...
108 (C, lambda, sigma_e), C_pocetno);
109 %C_opt = lsqcurvefit(@teorijsko_naprezanje_mr, C_pocetno, lambda, sigma_e);
110
111 C10_opt = C_opt(1);
112 C01_opt = C_opt(2);
113

```

**Slika 17 Prilagodba grafa**

Po završetku računa ispisuju se dodatni grafovi prema kodu sa Slika 18 koji će prikazati određivanje parametara Mooney – Rivlinovog modela, a u naredbenom prozoru se ispisuju vrijednosti materijalnih konstanti.



```
116 % Ispis fittane krivulje za Mooney-Rivlin model
117 figure;
118 plot(lambda, sigma_Cauchy, 'b-', 'LineWidth', 1, 'DisplayName',...
119 'Eksperimentalno naprezanje (\lambda N/A_0)');
120 hold on;
121 plot(lambda, sigma_teorijsko_mr, 'r-', 'LineWidth', 1, 'DisplayName',...
122 sprintf('Mooney-Rivlin model (C10 = %.5f, C01 = %.5f)', C10_opt, C01_opt));
123 xlim([min(lambda),max(lambda)]);
124 ylim([min(sigma_teorijsko_mr),max(sigma_teorijsko_mr)]);
125 xlabel('Izduženje (\lambda)');
126 ylabel('Naprezanje (\sigma) [MPa]');
127 title('Eksperimentalno naprezanje i Mooney-Rivlin model');
128 legend('show');
129 grid on;
130 hold off;
131
132 % Ispis konstant C10 i C01
133 fprintf('Optimal C10: %.5f\n', C10_opt);
134 fprintf('Optimal C01: %.5f\n', C01_opt);
```

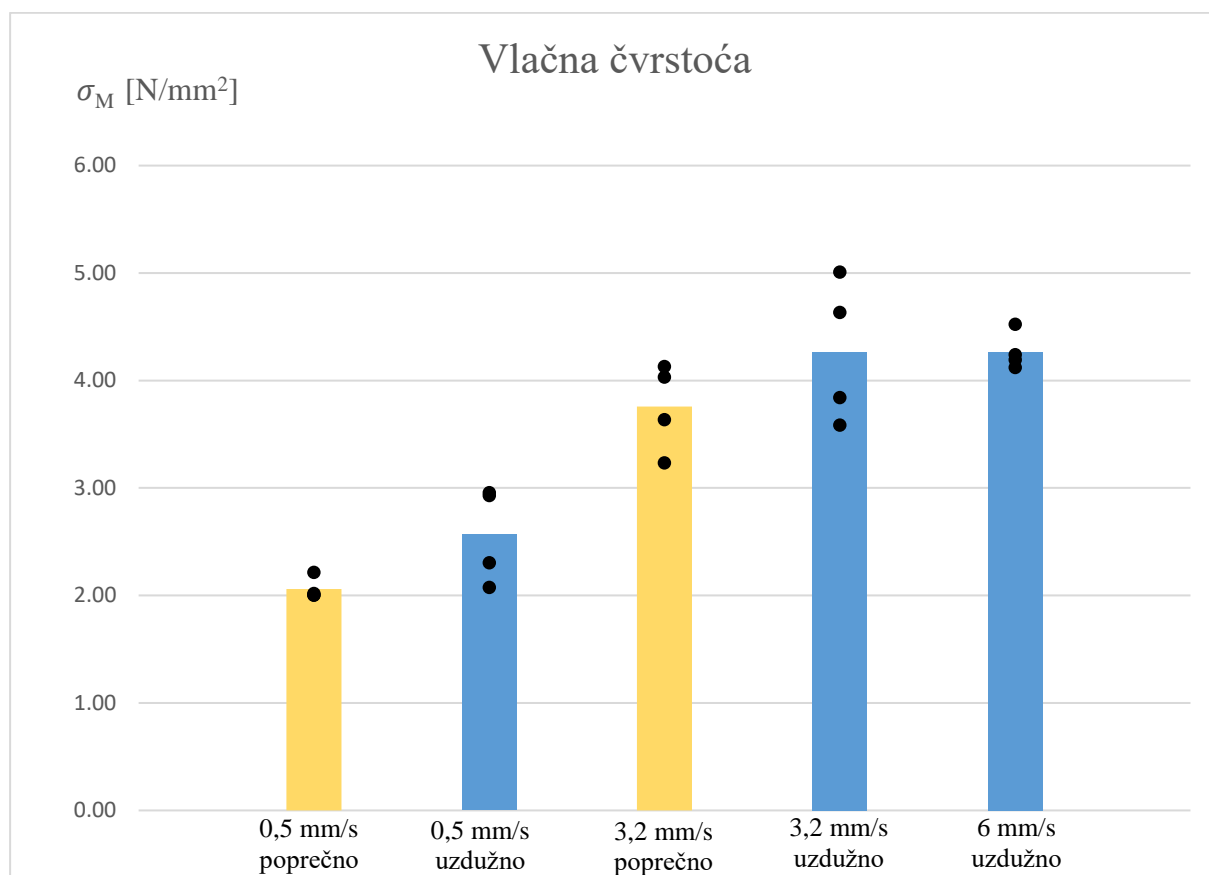
**Slika 18 Ispis grafova i konstanti**

Na ovaj se način računaju materijalne konstante svakog pojedinog mjerenja te će se uzeti njihov prosjek kako bi se tumačio utjecaj brzine ispitivanja na svojstva materijala.

### 3. REZULTATI

#### 3.1. Vlačna čvrstoća i maksimalno istežanje materijala DM70

Iznos maksimalne sile očitane pri vlačnom pokusu podijeljene s poprečnim presjekom epruvete, u ovome slučaju  $12,4 \text{ mm}^2$ , i pomnožene s odgovarajućim istežanjem prikazati će nam vlačnu čvrstoću materijala. Na grafikonima koji slijede prikazane su vrijednosti pojedinih vlačnih testova za svaki materijal, smjer ispisa i brzinu ispitivanja u obliku točaka, a njihova srednja vrijednost izražena je u obliku stupca. Slika 19 prikazuje vlačnu čvrstoću fotopolimeriziranog polimera DM70 dok Tablica 2 pokazuje iznose prosječnih vrijednosti.



Slika 19 Vlačna čvrstoća materijala DM70

Tablica 2 Prosječne vrijednosti vlačne čvrstoće DM70

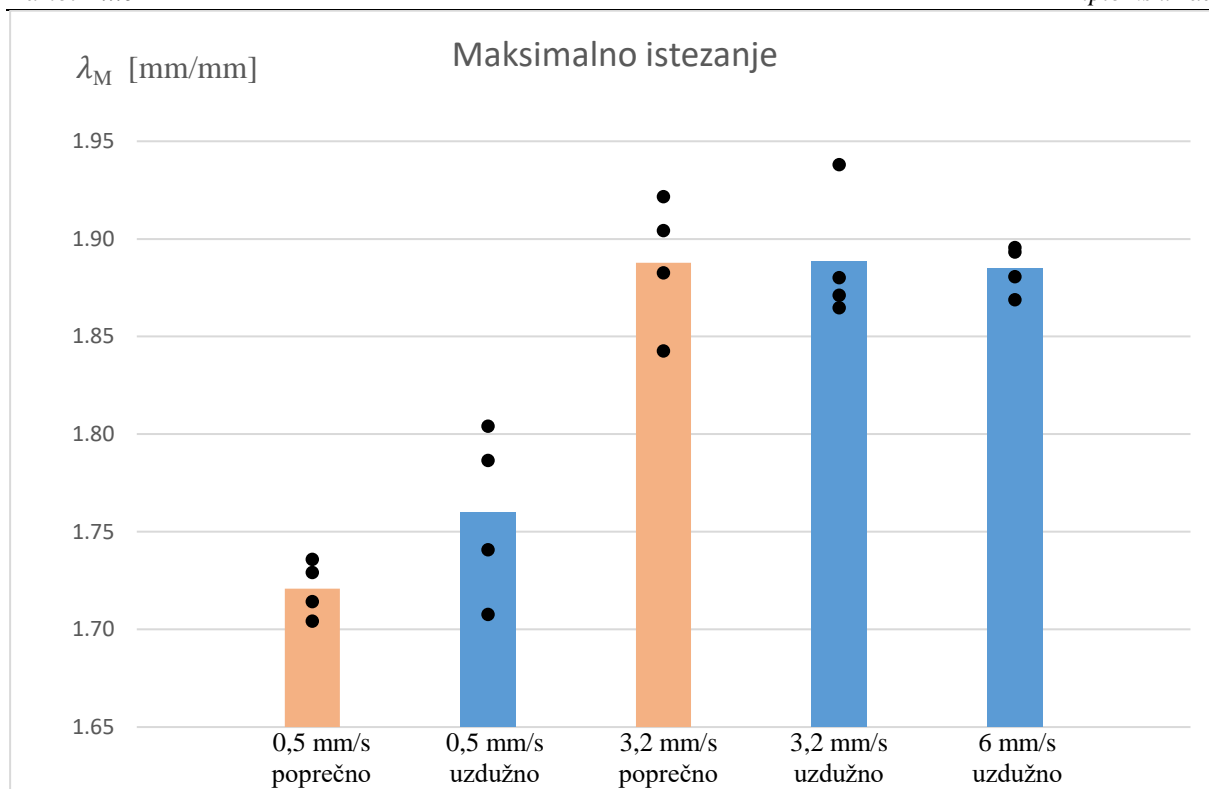
vlačna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ] DM 70	0,5 mm/s poprečno	0,5 mm/s uzdužno	3,2 mm/s poprečno	3,2 mm/s uzdužno	6 mm/s uzdužno
prosječna vrijednost	2,0603	2,5674	3,7579	4,2674	4,2694

Iz ovog je prikaza vidljivo da smjer ispisa materijala ima veliki utjecaj na iznos vlačne čvrstoće. Razlog tome je stvaranje potencijalnih kritičnih presjeka pogodnih za pucanje pri poprečnom smjeru ispisa. Ploha srastanja pojedinih slojeva ispisa uvijek će biti slabija od samih „niti“ materijala. Slično ponašanje dobro nam je poznato iz primjera drva i smjera rasta vlakana celuloze. Ta se pojava zove anizotropnost i izrazito je važno imati na umu pokazuje li takva svojstva materijal koji se koristi pri konstruiranju.

Valja napomenuti da je pri trećem mjerenju uzdužne epruvete pri brzini od 0,5 mm/s korištena prethodno opterećeni uzorak te je zbog toga vlačna čvrstoća tog testa niža od očekivane. Ukoliko se taj uzorak zanemari u računu, prosječna vlačna čvrstoća uzdužne epruvete pri toj brzini porasti će na iznos od  $\sigma_M = 2,7311 \text{ N/mm}^2$  čime se dodatno povećava razlika između uzdužno i poprečno ispisanih uzoraka. Također se uočava porast vlačne čvrstoće materijala s porastom brzine ispitivanja što je očekivano svojstvo polimera.

Sa slike 19 i iz tablice 2 je također vidljivo da se s brzinom ispitivanja povećava vlačna čvrstoća. Zanimljivo je da se utjecaj brzine smanjuje s povećanjem brzine. Vlačna čvrstoća se čak dvaput povećala između ispitivanja brzinom 0,5 mm/s i 3,2 mm/s, a daljnjim povećanjem je ostala otprilike ista. Sa slike 19 se još vidi da je za sporo ispitivanje brzinom 0,5 mm/s rasipanje rezultata znatno veće nego za brzinu ispitivanja 3,2 mm/s. Za najveću brzinu se rasipanje rezultata opet smanjilo.

Maksimalno istezanje pri kojem su pojedine epruvete puknule je prikazano slikom 20. Srednje su vrijednosti također prikazane u zasebnoj Tablica 3 dok su pojedina mjerenja prikazana na slici 20 u obliku točaka.



Slika 20 Maksimalno istezanje materijala DM70

Tablica 3 Prosječne vrijednosti maksimalnog istezanja DM70

$\lambda_{\max}$ DM 70	0,5 mm/s poprečno	0,5 mm/s uzdužno	3,2 mm/s poprečno	3,2 mm/s uzdužno	6 mm/s uzdužno
prosječna vrijednost	1,7209	1,7599	1,8879	1,8886	1,8847

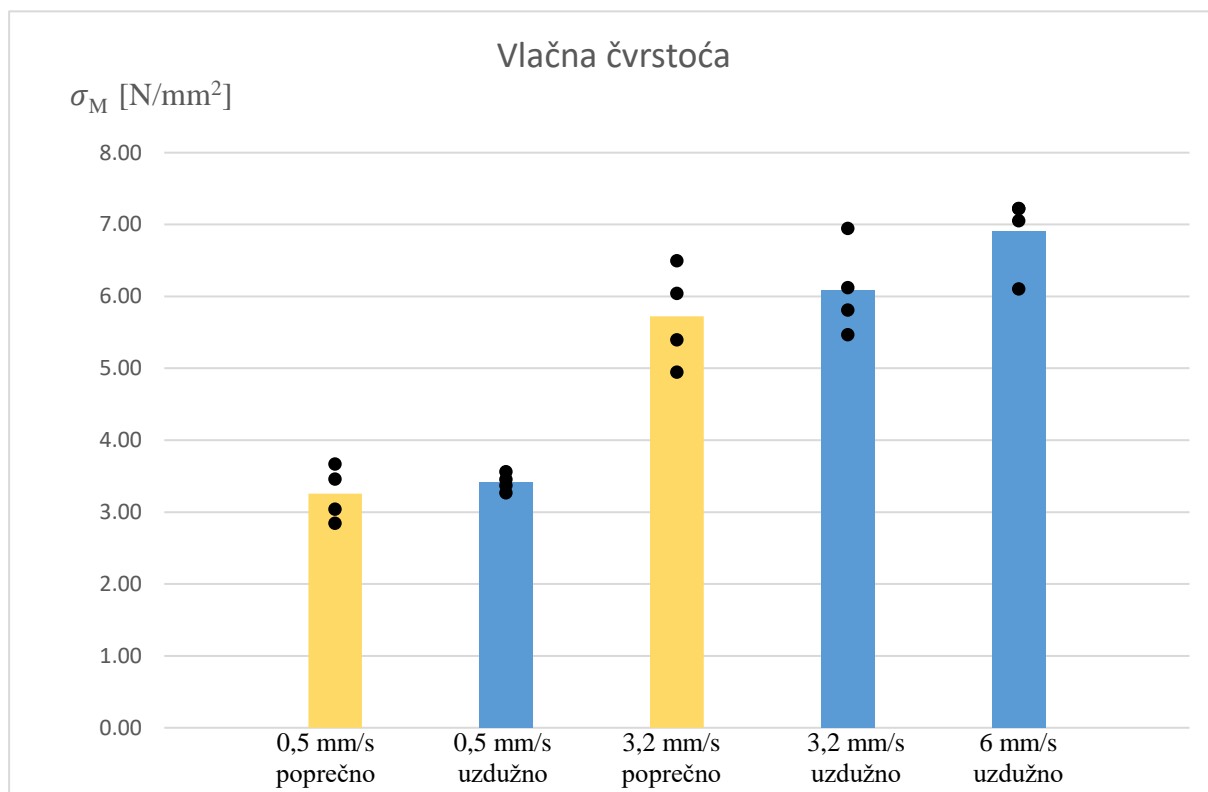
Pri mjerenju istezanja dolazi do nešto većeg rasipanja podataka u odnosu na vlačnu čvrstoću. Većina je uzoraka puknula unutar jednog i pol milimetra prema Tablica 4 s obzirom na uvjete ispitivanja uz iznimku ranije spomenutog trećeg mjerenja uzdužnog uzorka pri brzini od 0.5 mm/s koji je bio prethodno opterećen te ponovno postavljen u čeljusti kicalice.

Tablica 4 Maksimalni pomaci čeljusti za DM70

maksimalni pomak [mm] DM 70	0,5 mm/s poprečno	0,5 mm/s uzdužno	3,2 mm/s poprečno	3,2 mm/s uzdužno	6 mm/s uzdužno
1. mjerenje	17,8895	20,2825	21,2648	22,7393	21,8874
2. mjerenje	18,7020	20,1383	22,8511	23,7737	22,7104
3. mjerenje	18,3275	17,8215	22,8567	21,5162	23,0712
4. mjerenje	17,6552	18,8143	23,0546	21,9444	22,6508
prosječna vrijednost	18,1435	19,2642	22,5068	22,4934	22,5799

### 3.2. Vlačna čvrstoća i maksimalno istezanje materijala DM85

Materijal DM 85 nešto je krućih svojstava što prikazuje Slika 21, a prosjek vlačnih čvrstoća opisuje Tablica 5



Slika 21 Vlačna čvrstoća materijala DM85

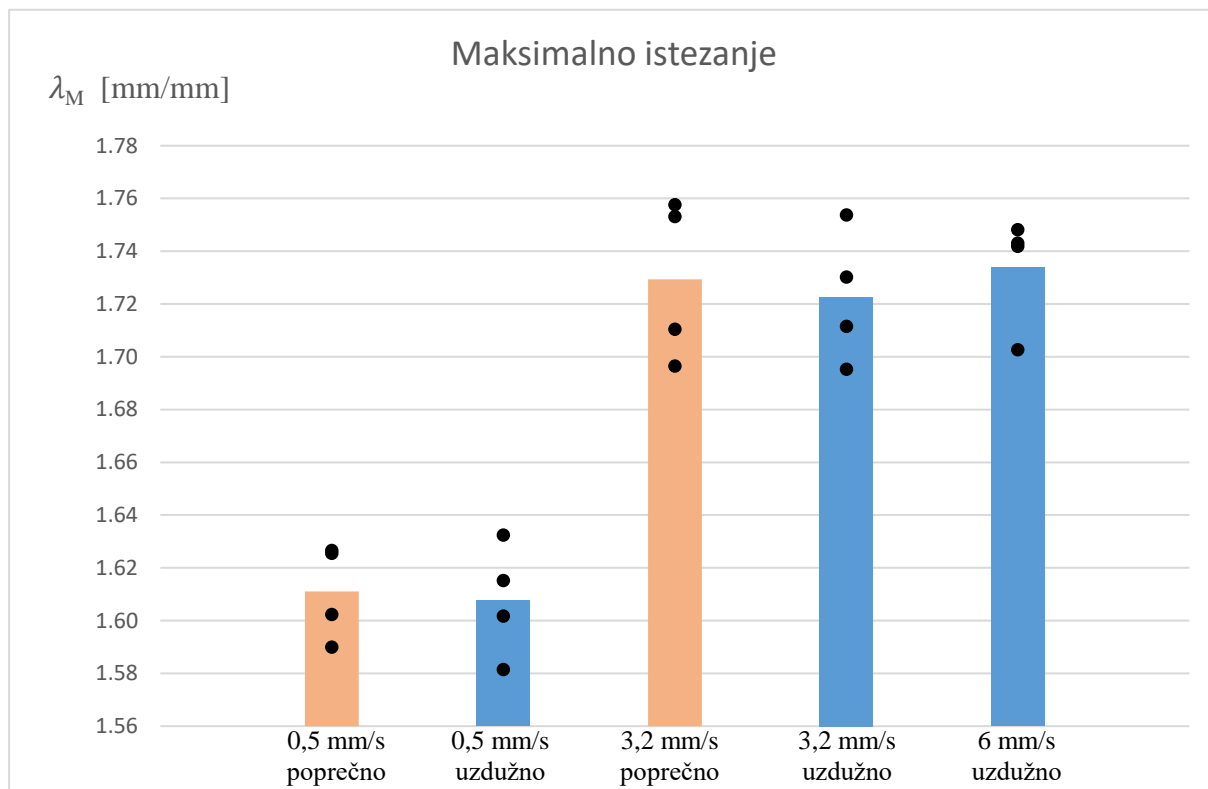
Tablica 5 Prosječne vrijednosti vlačne čvrstoće DM85

vlačna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ] DM 85	0,5 mm/s poprečno	0,5 mm/s uzdužno	3,2 mm/s poprečno	3,2 mm/s uzdužno	6 mm/s uzdužno
prosječna vrijednost	3,2564	3,4167	5,7227	6,0885	6,9027

Kao i kod prethodnog, mekšeg materijala i ovaj odražava svojstvo povećanja vlačne čvrstoće s povećanjem brzine ispitivanja. Za razliku od DM70 materijala ovdje je razlika u vrijednostima vlačne čvrstoće za različite smjerove ispisa nešto manje izražena, naročito pri niskim brzinama ispitivanja, no i dalje je prisutna. Također, opet je vidljivo da povećanje brzine ispitivanja uzrokuje povećanje vlačne čvrstoće. Zanimljivo je da, za razliku od DM 75 materijala, gdje

daljnje povećanje brzine nije imalo utjecaja, pri brzini ispitivanja 6 mm/s se čvrstoća znatno poveća u odnosu na 3,2mm/s.

Slijedi prikaz ovisnosti maksimalnog istežanja o uvjetima ispitivanja na Slika 22 uz prosječne vrijednosti u Tablica 6.



**Slika 22** Maksimalno istežanje materijala DM85

Usporedbom slika 20 i 22 vidljiva je razlika u ponašanju materijala: za materijal DM 70 su maksimalna istežanja za uzdužni ispis uzorka veća nego za poprečni ispis, dok za materijal DM85 vrijedi obratno. S obzirom na to da je čvrstoća za oba materijala veća za uzdužan ispis, ovo je prva naznaka da bi 3D ispisani materijal mogao biti anizotropan.

**Tablica 6** Prosječne vrijednosti maksimalnog istežanja DM85

$\lambda_{\max}$ DM 85	0,5 mm/s poprečno	0,5 mm/s uzdužno	3,2 mm/s poprečno	3,2 mm/s uzdužno	6 mm/s uzdužno
prosječna vrijednost	1,6111	1,6077	1,7294	1,7227	1,7339

Također se usporedbom istezanja za oba materijala vidi da se maksimalna istezanja smanjuju s povećanjem tvrdoće digitalnog materijala.

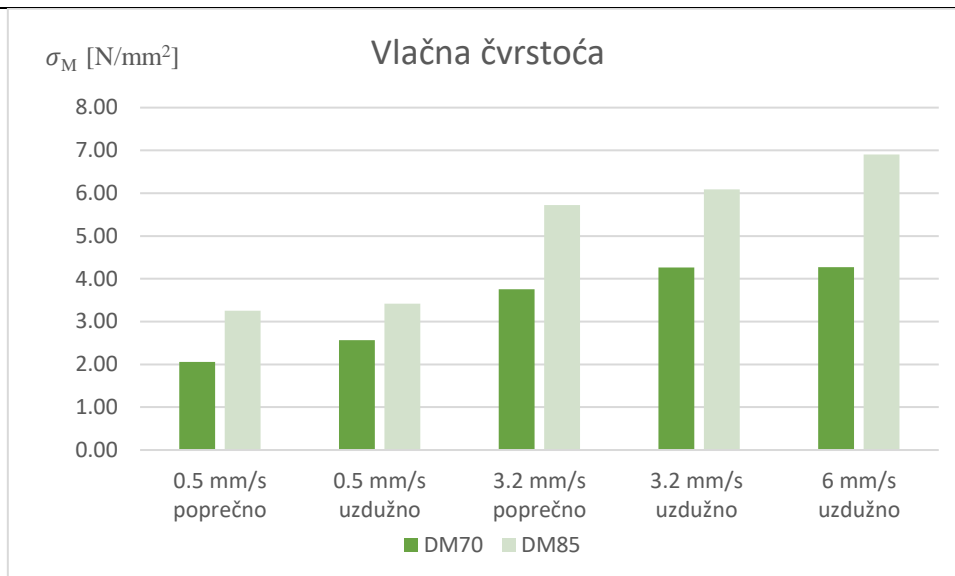
U ovome se slučaju također pojavljuje pojava povećanja maksimalnog istezanja pri povećanju brzine ispitivanja. Promatranjem Tablica 7 koja prikazuje koliko se pri svakom ispitivanju sami uzorak istegnuo u milimetrima uočljivo je također odstupanje od otprilike jednog i pol milimetra unutar pojedinih uvjeta ispitivanja. Pri četvrtom mjerenju uzdužnog uzorka brzinom od 0,5 mm/s pojavljuje se iznimka zbog koje se dobiva dojam da poprečno ispisan uzorak podnosi veće maksimalno istezanje nego uzdužni uzorak. Promatranjem samog uzorka nije uočen razlog za takav rezultat no moguće nesavršenosti pri ispisu epruvete mogu prouzročiti takav rezultat.

**Tablica 7 Maksimalni pomaci čeljusti za DM85**

maksimalni pomak [mm] DM 85	0,5 mm/s poprečno	0,5 mm/s uzdužno	3,2 mm/s poprečno	3,2 mm/s uzdužno	6 mm/s uzdužno
1. mjerenje	15,4775	15,4597	18,6193	18,0924	19,1165
2. mjerenje	15,1712	16,0639	18,6463	17,6407	18,7310
3. mjerenje	15,0164	15,6622	17,8106	18,5003	18,6532
4. mjerenje	15,3252	14,5956	17,8211	19,2373	17,6770
Prosječna vrijednost	15,2475	15,4453	18,2243	18,3677	18,5444

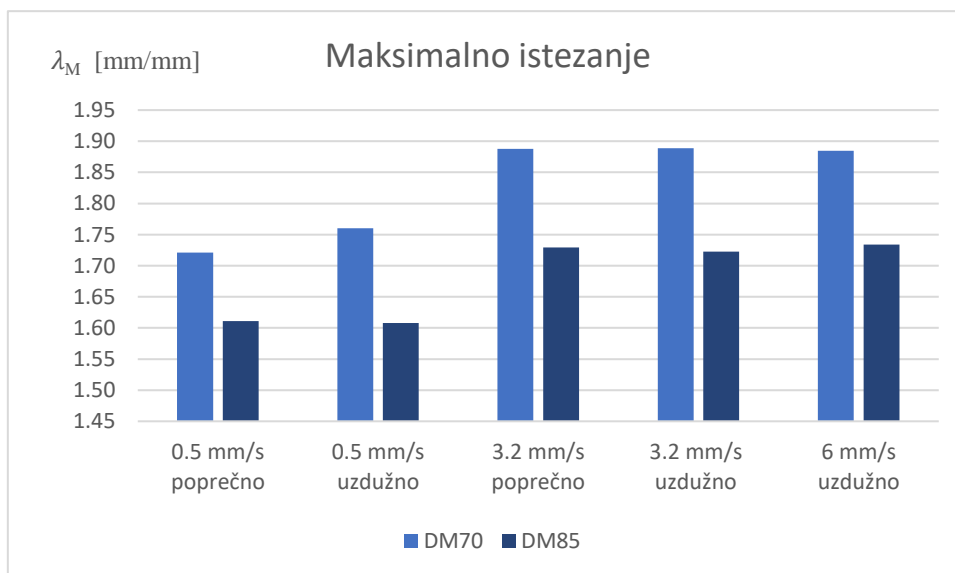
### 3.3. Usporedba materijala

Razlika u vlačnoj čvrstoći dvaju različitih materijala prikazana je Slika 23. Vidljivo je koliko porast čvrstoće s brzinom ovisi o krutosti materijala. Zaključuje se da je za tvrde materijale veća potreba za ispitivanjem pri nekoliko različitih brzina kako bi se točnije pretpostavilo njegovo ponašanje u realnim uvjetima.



**Slika 23** Razlika čvrstoće materijala

Pored ovisnosti vlačne čvrstoće poželjno je obratiti pozornost i na ovisnost maksimalnog istežanja o krutosti materijala na slici Slika 24.



**Slika 24** Razlika u maksimalnom istežanju materijala

U ovome slučaju, kako je i očekivano, krući materijal pokazuje manju sposobnost maksimalnog istežanja. Zanimljivo je vidjeti da kod oba materijala pri porastu brzine s 3,2 mm/s na 6 mm/s nije izražena promjena parametra istežanja.

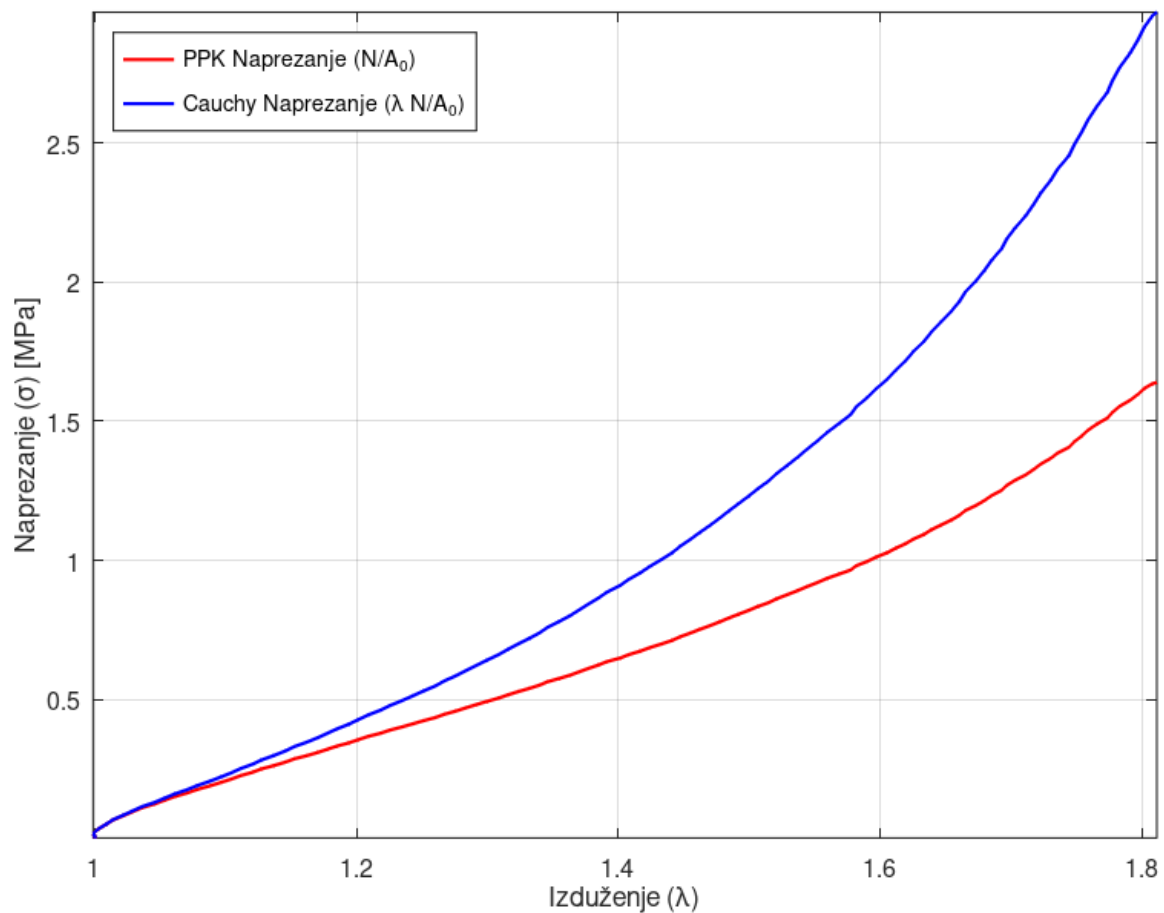


### 3.4. Materijalna karakterizacija

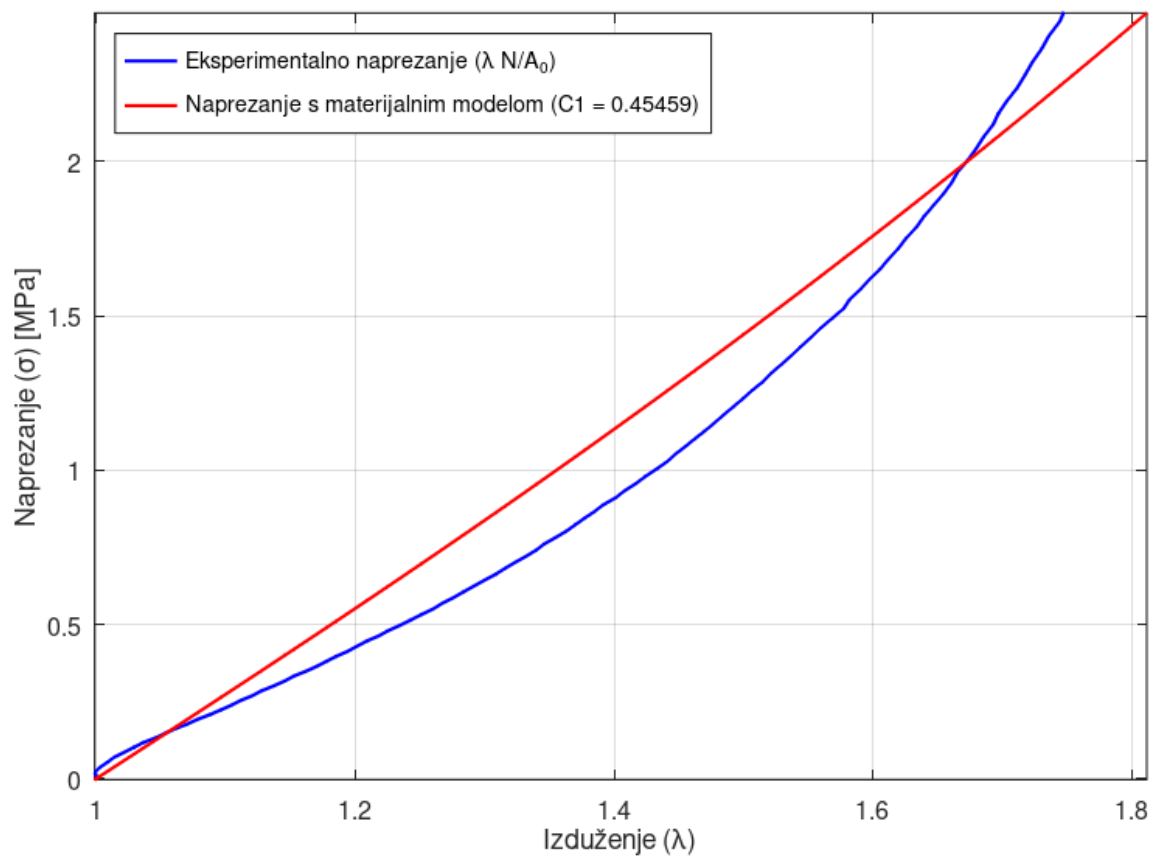
#### 3.4.1. *Određivanje materijalnih parametara*

Uporabom ranije opisanog programskog koda za mehaničku karakterizaciju eksperimentalnih podataka provedeni su podaci dobiveni iz vlačnih testova, a rezultat koda su materijalne konstante  $C_1$  za Neo – Hookeovom materijalni model te  $C_{10}$  i  $C_{01}$  za Mooney-Rivlinov model. Osim konstanti ispisani su i zasebni dijagrami svakog zasebnog mjerenja koji prikazuju razliku eksperimentalnog naprezanja izračunatog koristeći početni poprečni presjek  $A_0$  i Cauchyevog naprezanja koje uzima u obzir promjenu presjeka uslijed istezanja. Slijedeći dijagram pokazuje eksperimentalno naprezanje i njegovo prvo određivanje materijalnih parametara prema Neo – Hookeovom materijalnom modelu, a posljednji dijagram prikazuje prema Mooney – Rivlinovom materijalnom modelu.

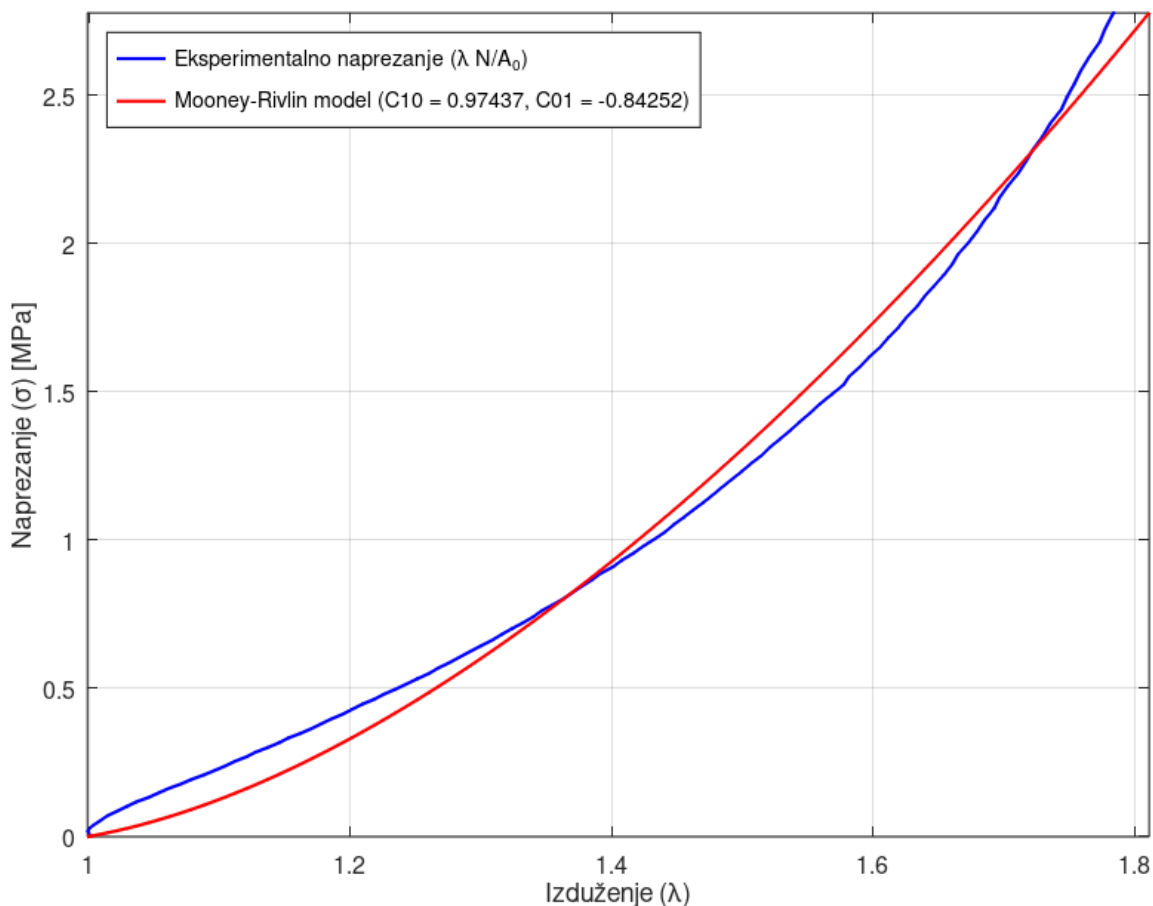
Prvo mjerenje uzdužno ispisanog uzorka materijala DM70 pri brzini 0.5 mm/s prikazuju slike Slika 25, Slika 26 i Slika 27.



**Slika 25** Eksperimentalno naprezanje i stvarno naprezanje uzdužnog uzorka pri 0,5 mm/s (prvo mjerenje)



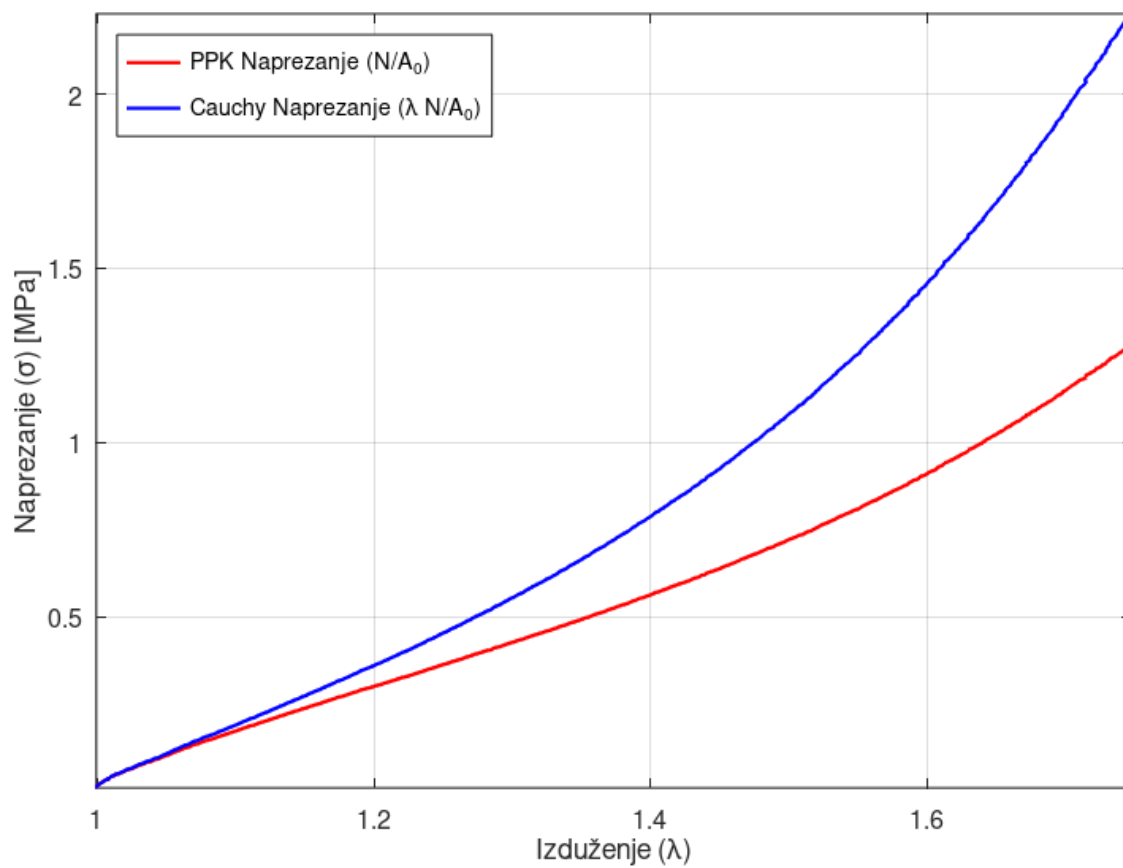
**Slika 26** Eksperimentalno naprezanje i Neo – Hookeov materijalni model uzdužnog uzorka pri 0,5 mm/s (prvo mjerenje)



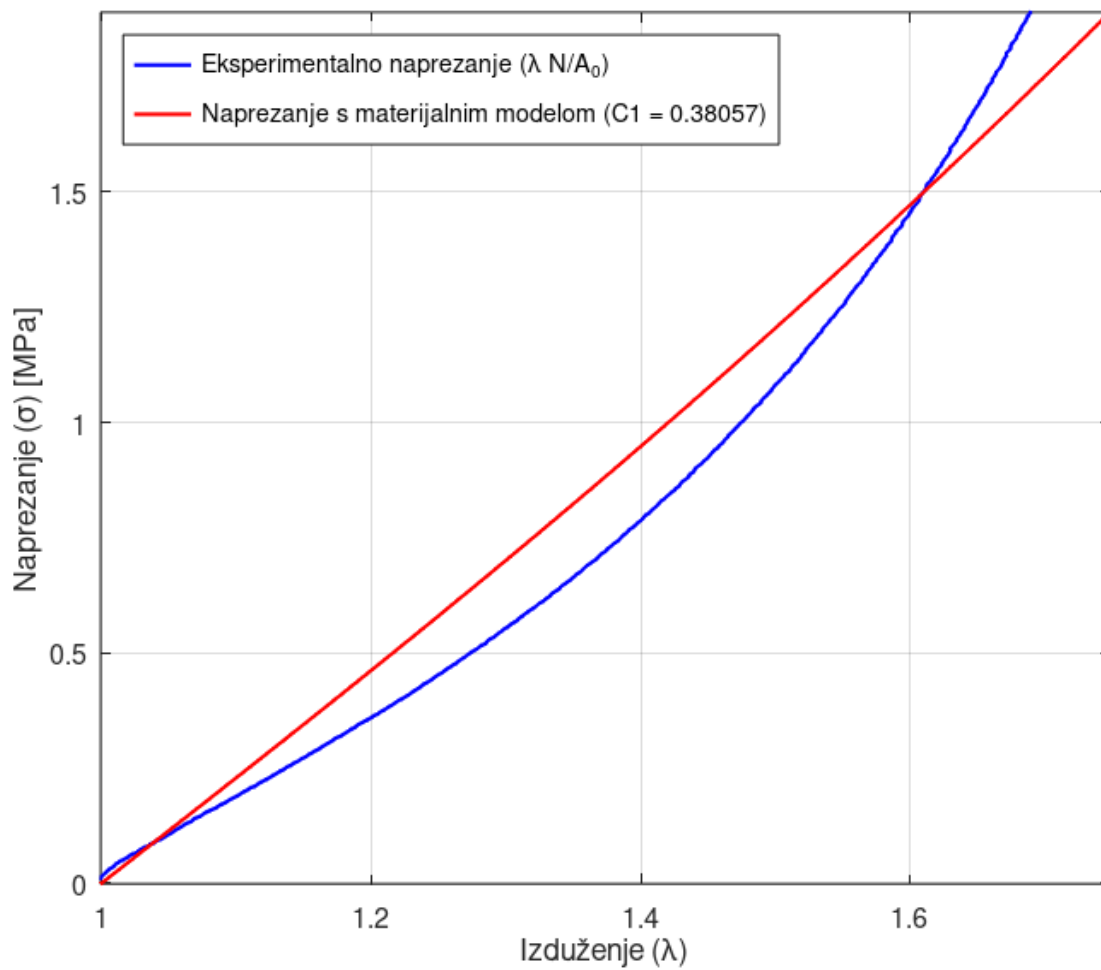
**Slika 27** Eksperimentalno naprezanje i Mooney – Rivlinov materijalni model uzdužnog uzorka pri 0,5 mm/s (prvo mjerenje)

Iz priloženih grafova vidljivo je koliko je Mooney – Rivlin model precizniji u opisivanju eksperimentalnih podataka, odnosno najveće odstupanje takvog modela je znatno manje od najvećeg odstupanja Neo – Hookeovog materijalnog modela.

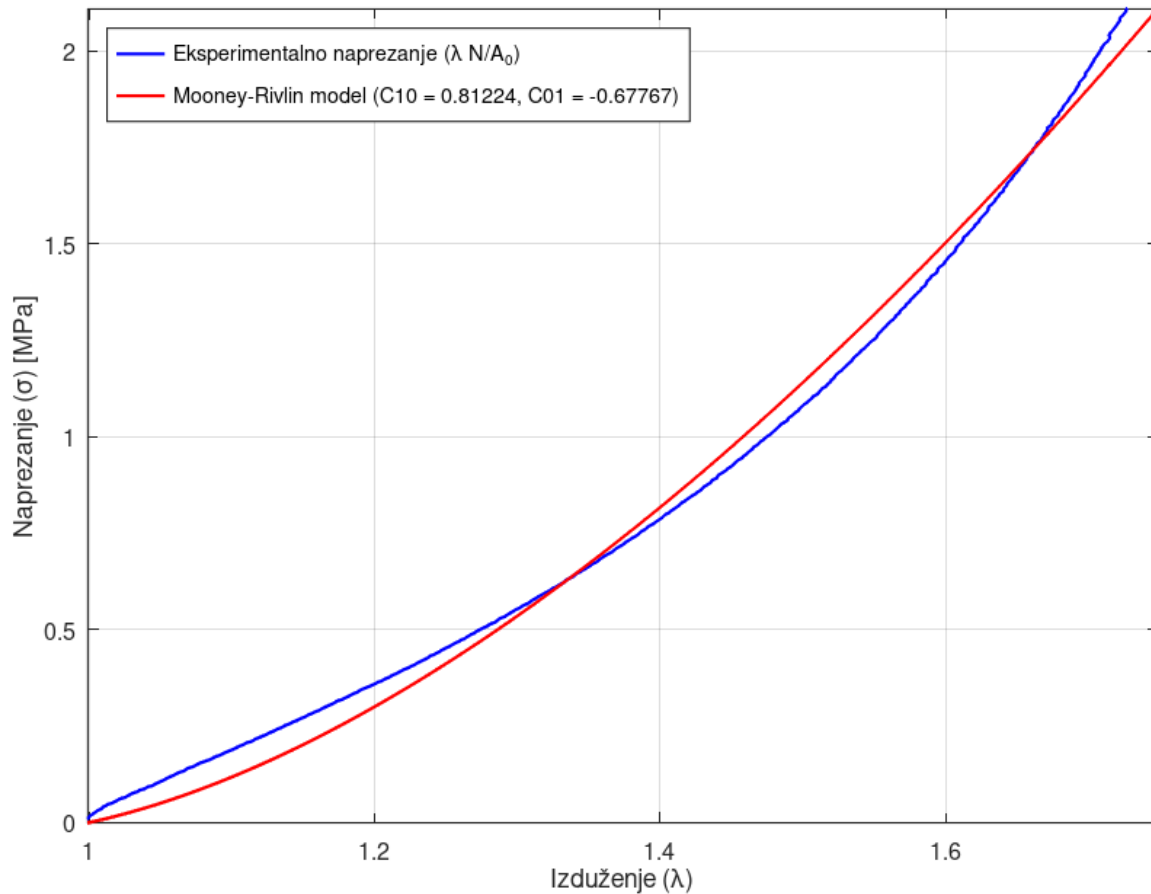
Slijedeći prikazi pokazuju karakteriziranje istoga materijala pri istoj brzini, no slučaj kada je korišten poprečni smjer ispisa uzorka. Odabrano je drugo mjerenje ovih uvjeta i prikazano je na slikama Slika 28, Slika 29 i Slika 30.



Slika 28 Eksperimentalno naprezanje i stvarno naprezanje poprečnog uzorka pri 0,5 mm/s (drugo mjerenje)



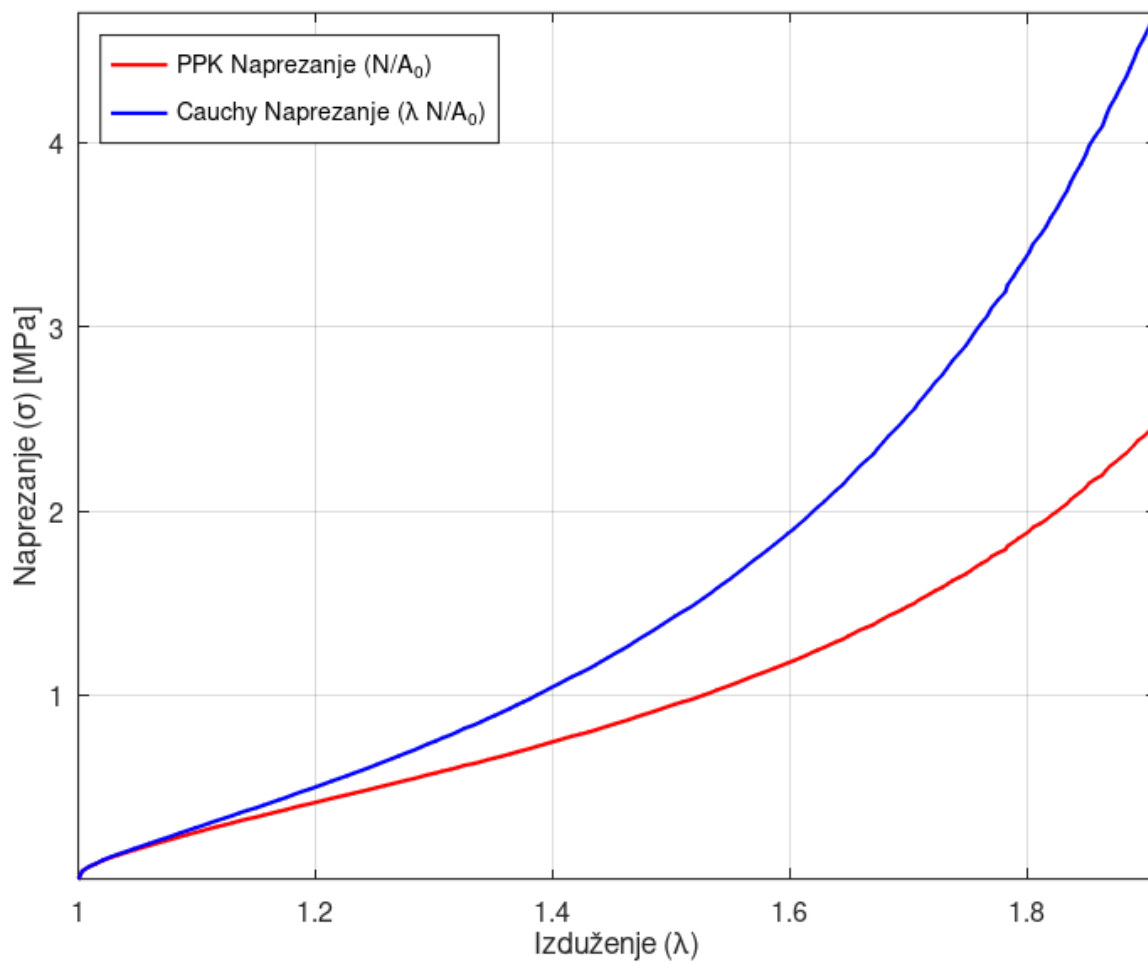
**Slika 29** Eksperimentalno naprezanje i Neo – Hookeov materijalni model poprečnog uzorka pri 0,5 mm/s (drugo mjerenje)



**Slika 30** Eksperimentalno naprezanje i Mooney – Rivlinov materijalni model poprečnog uzorka pri 0,5 mm/s (drugo mjerenje)

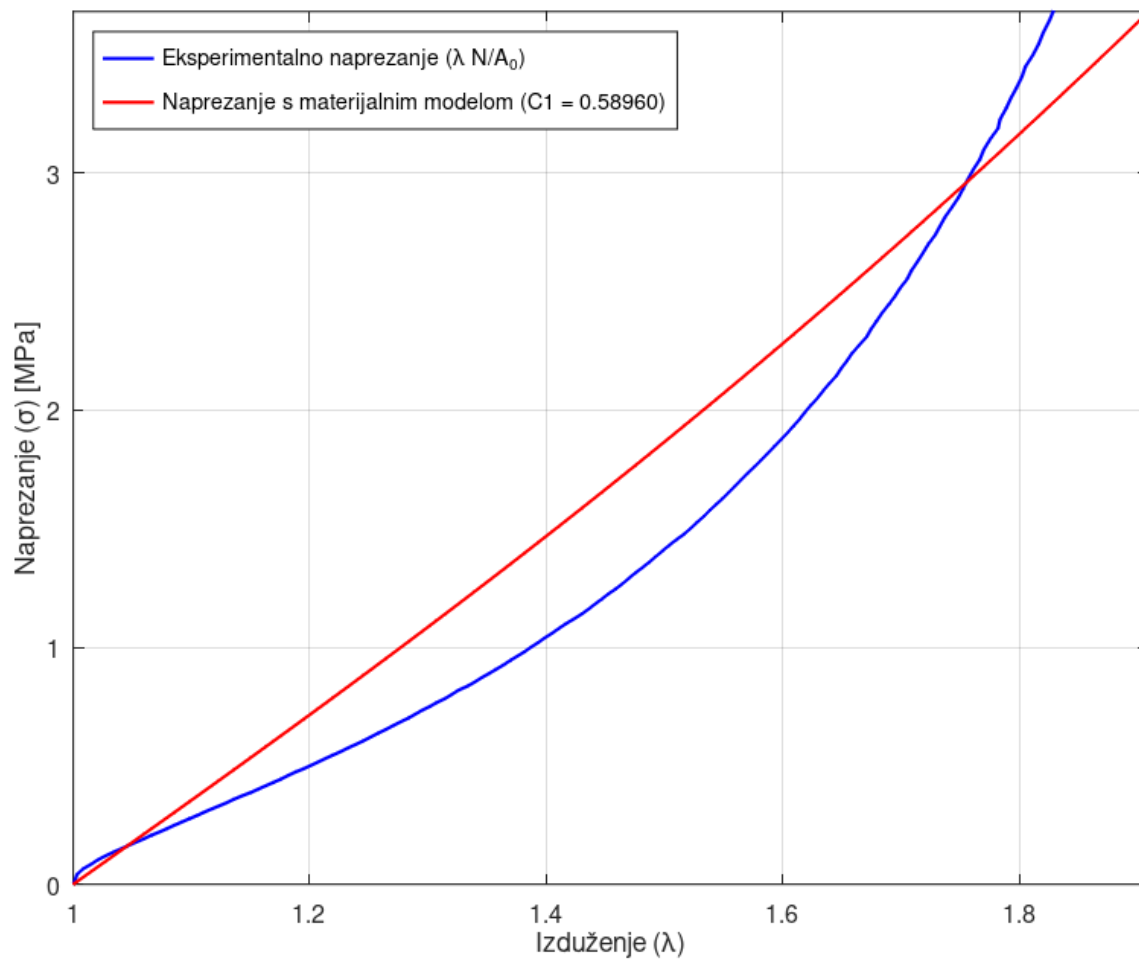
Usporedbom ovih dvaju slučajeva vidljivo je da profil opterećenja i istežanja ostaje gotovo identičan u oba smjera ispisa.

Usporedbu sličnih dijagrama, no pri testiranju uzdužnog uzorka većom brzinom (prvo mjerenje), prikazuju slike Slika 31, Slika 32 i Slika 33.

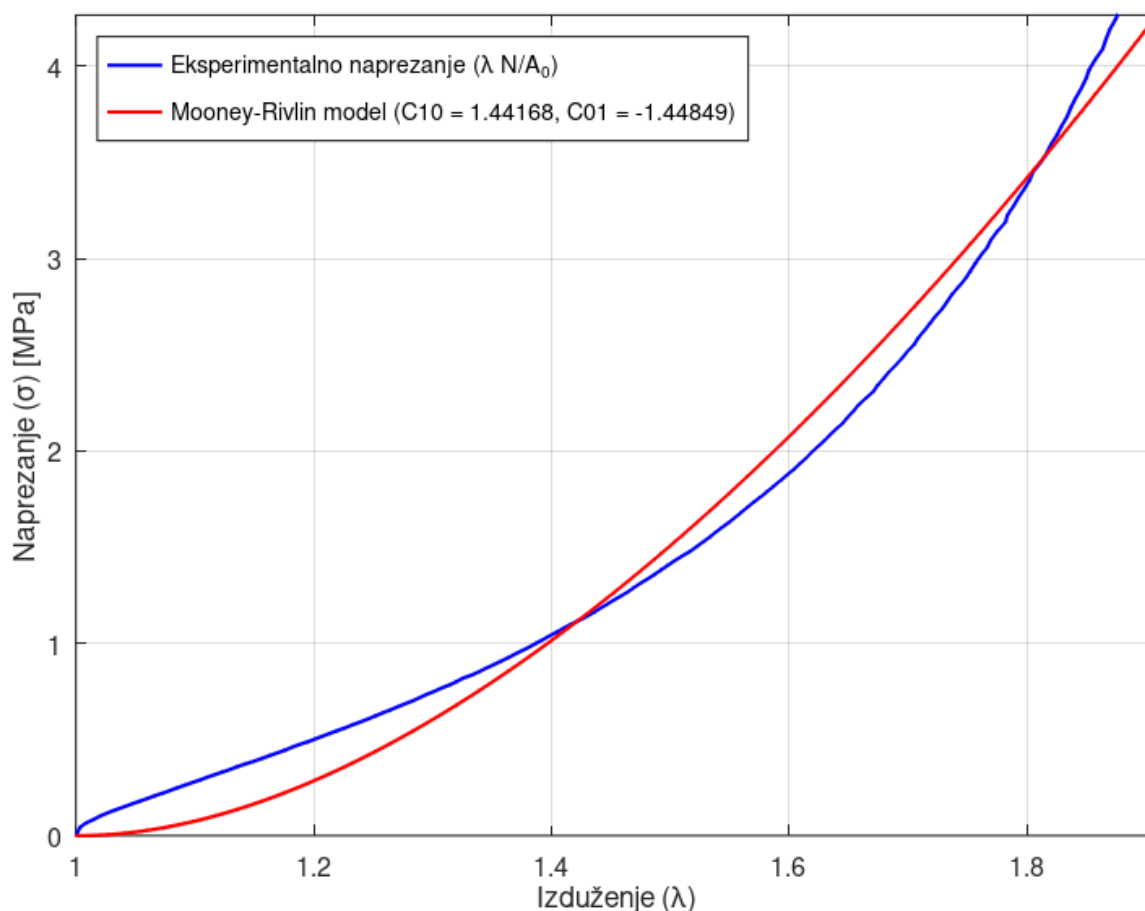


Slika 31 Eksperimentalno naprezanje i stvarno naprezanje uzdužnog uzorka pri 3,2 mm/s (prvo mjerenje)





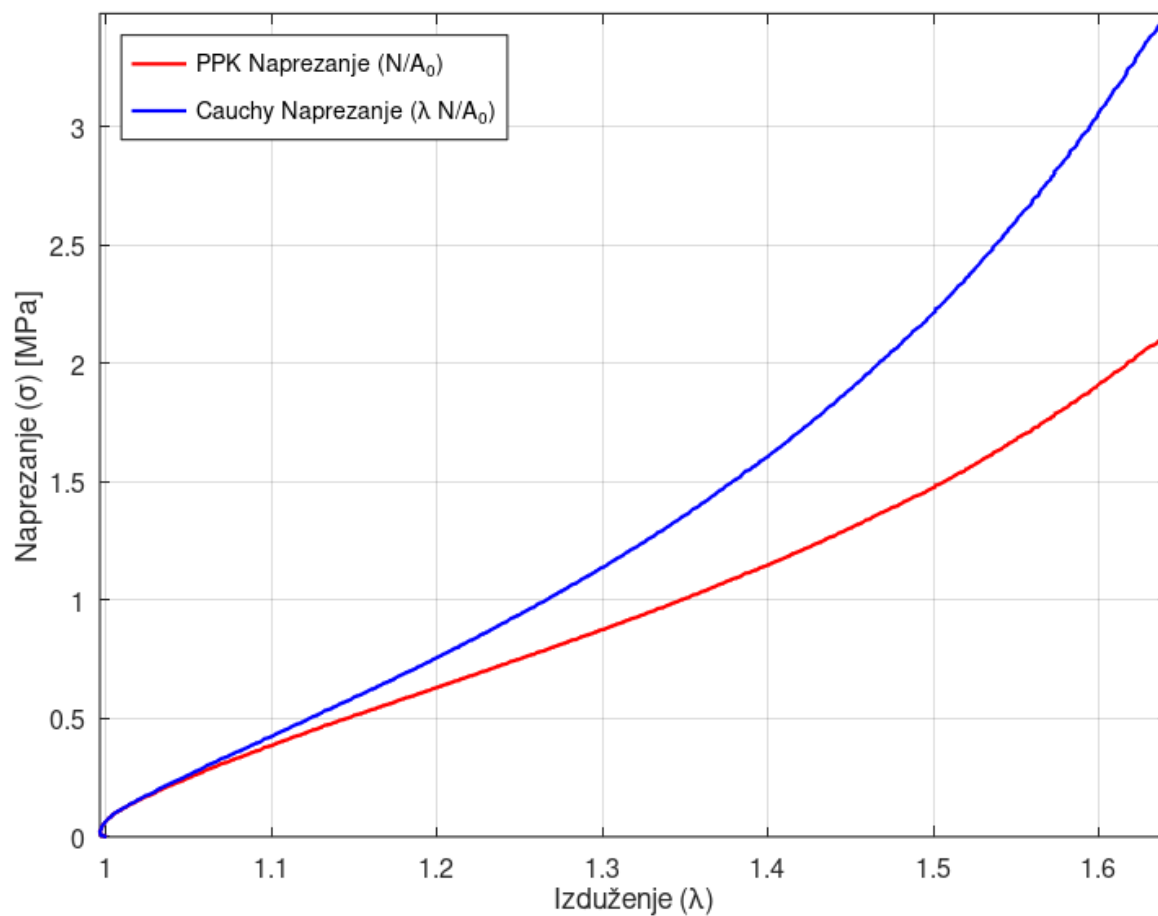
**Slika 32** Eksperimentalno naprezanje i Neo – Hookeov materijalni model uzdužnog uzorka pri 3,2 mm/s (prvo mjerenje)



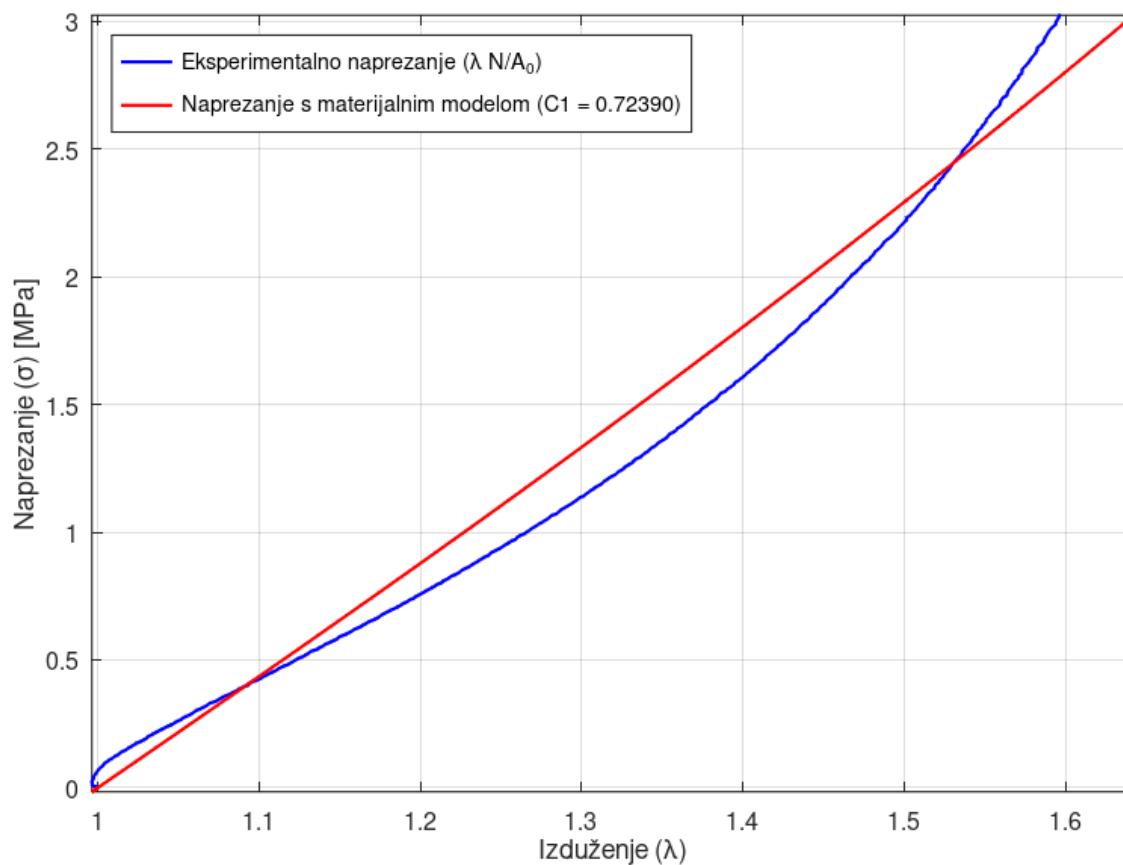
**Slika 33** Eksperimentalno naprezanje i Mooney – Rivlinov materijalni model uzdužnog uzorka pri 3,2 mm/s (prvo mjerenje)

U ovome se primjeru primjećuje nešto lošija aproksimacija Mooney – Rivlinovog modela pri malim iznosima istezanja. Iz toga se razloga ponekad koriste materijalni modeli koji su mnogo kompleksniji i sadrže više od dvije materijalne konstante te znatno bolje mogu opisati ponašanje materijala, naročito ukoliko dolazi do izraženijeg efekta očvršćivanja pri većim istezanjima.

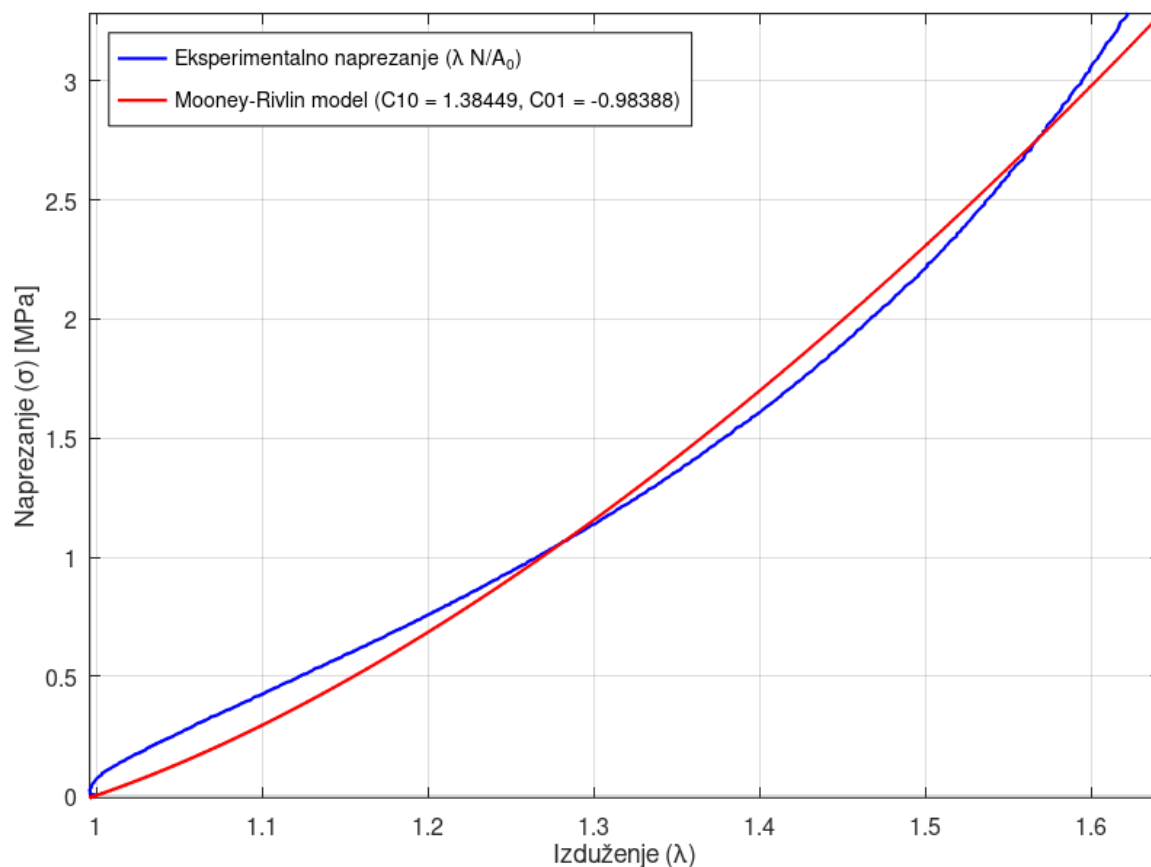
Idući prikazi pokazati će slične uvjete ispitivanja kao i do sada, no raditi će se o materijalu DM85. Uzdužno ispisana epruveta opterećenja pri brzini 0,5 mm/s prikazana je na slikama Slika 34, Slika 35 i Slika 36.



**Slika 34** Eksperimentalno naprezanje i stvarno naprezanje uzdužnog uzorka pri 0,5 mm/s (drugo mjerenje)

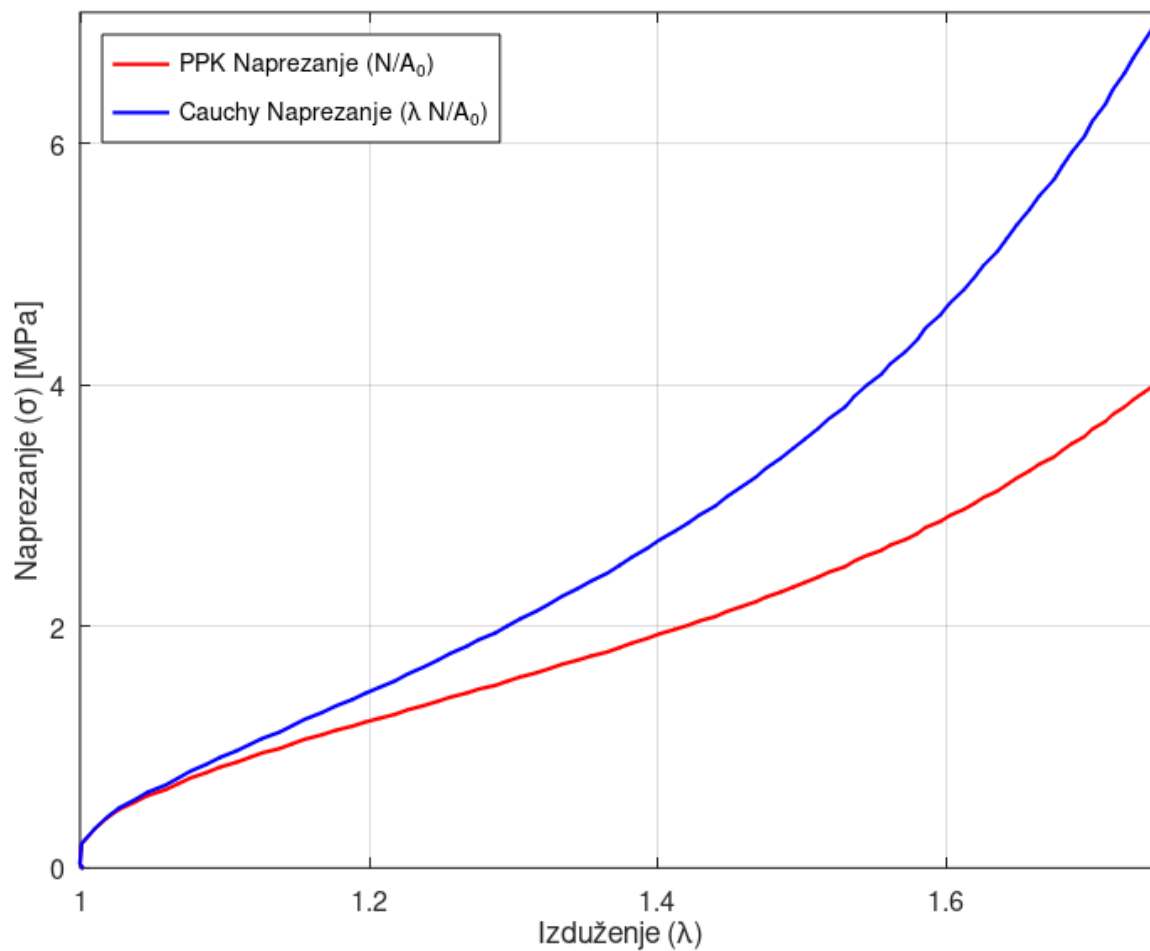


**Slika 35** Eksperimentalno naprezanje i Neo – Hookeov materijalni model uzdužnog uzorka pri 0,5 mm/s (drugo mjerenje)

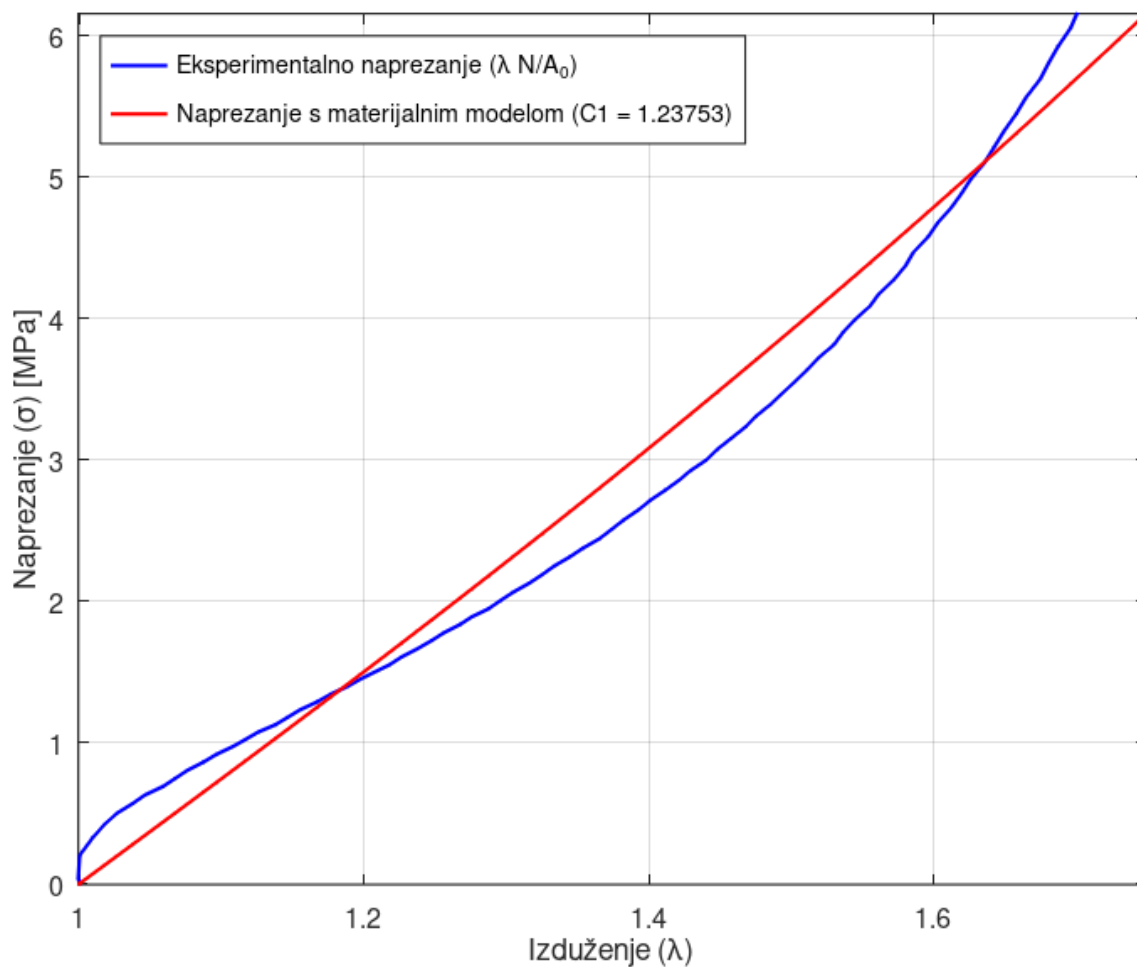


**Slika 36** Eksperimentalno naprezanje i Mooney – Rivlinov materijalni model uzdužnog uzorka pri 0,5 mm/s (drugo mjerenje)

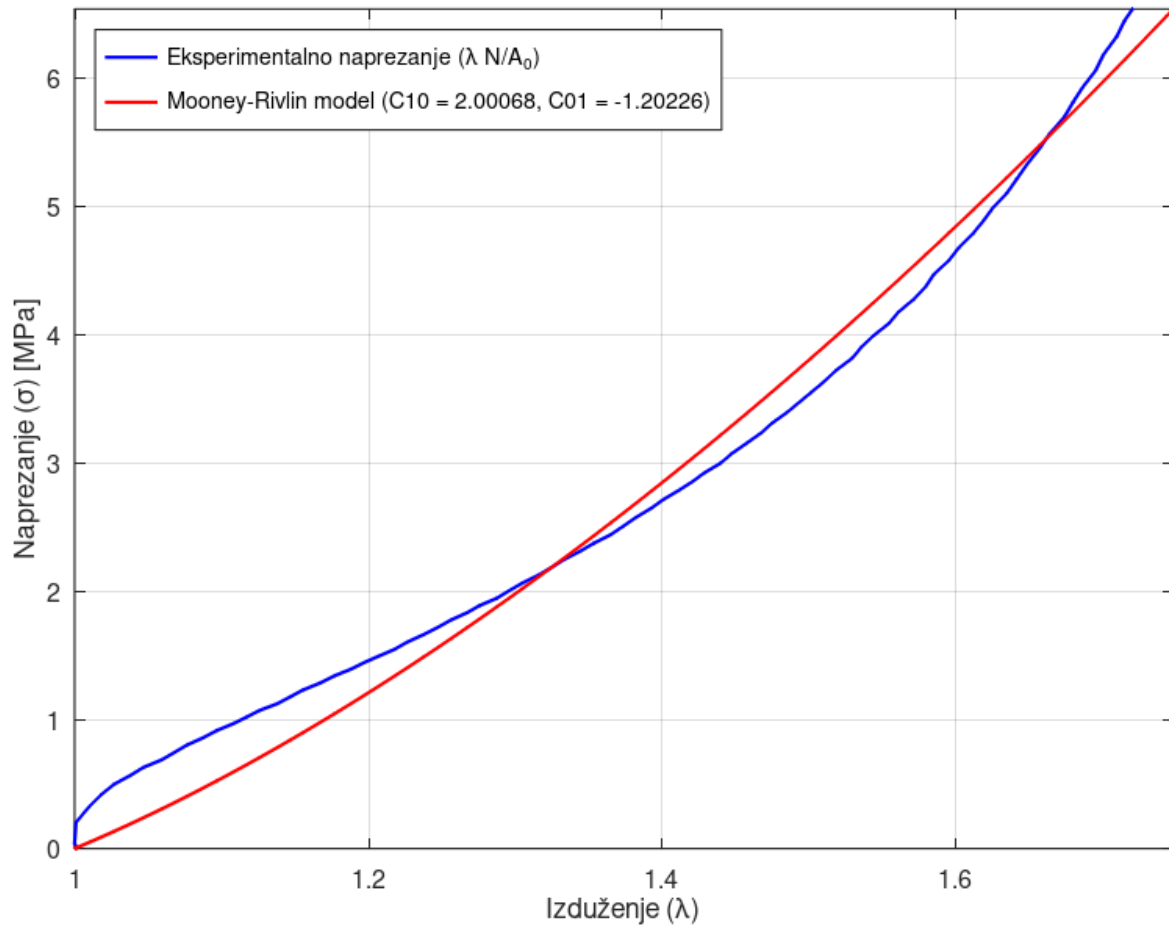
Grafovi koji slijede prikazuju ponašanje materijala i karakterizaciju eksperimentalnih podataka za isti materijal, DM85, pri vlačnom testu brzine 6 mm/s gdje je uzorak isprintan u uzdužnom smjeru. To je prikazano slikama Slika 37, Slika 38 i Slika 39.



Slika 37 Eksperimentalno naprezanje i stvarno naprezanje uzdužnog uzorka pri 6 mm/s (drugo mjerenje)



**Slika 38** Eksperimentalno naprezanje i Neo – Hookeov materijalni model uzdužnog uzorka pri 6 mm/s (drugo mjerenje)



**Slika 39** Eksperimentalno naprezanje i Mooney – Rivlinov materijalni model uzdužnog uzorka pri 6 mm/s (drugo mjerenje)

U ovim je prikazima pokazano da znatnim povećanjem brzine krivulje i dalje zadržavaju isti oblik dok se vrijednosti i nagibi mijenjaju. Pri ovom se testu Neo – Hookeov materijalni model prilagođava eksperimentalnim podacima relativno slično kao i Mooney – Rivlinov model.



### 3.4.2. Ovisnost materijalnih konstanti o brzini ispitivanja

Prilikom materijalne karakterizacije eksperimentalnih podataka izračunate su zasebne materijalne konstante  $C_1$ ,  $C_{10}$  i  $C_{01}$ . Koristiti će se Mooney – Rivlinov model za uspoređivanje utjecaja brzine s obzirom da mu je prilagođavanje podataka stvarnim iznosima mnogo točnije. Za izračunate vrijednosti konstanti računaju se njihove prosječne vrijednosti pri svakoj brzini ispitivanja za oba materijala u slučaju uzdužnog smjera ispisa kako prikazuju tablica 8 i tablica 9.

**Tablica 8** Prosječne vrijednosti materijalnih konstanti materijala DM70

DM70	uzdužno			poprečno	
	0,5	3,2	6	0,5	3,2
$C_1$	0,418115	0,555288	0,564825	0,367405	0,493913
$C_{10}$	0,89715	1,29635	1,244245	0,776708	1,142853
$C_{01}$	-0,76202	-1,25596	-1,15247	-0,63562	-1,09851

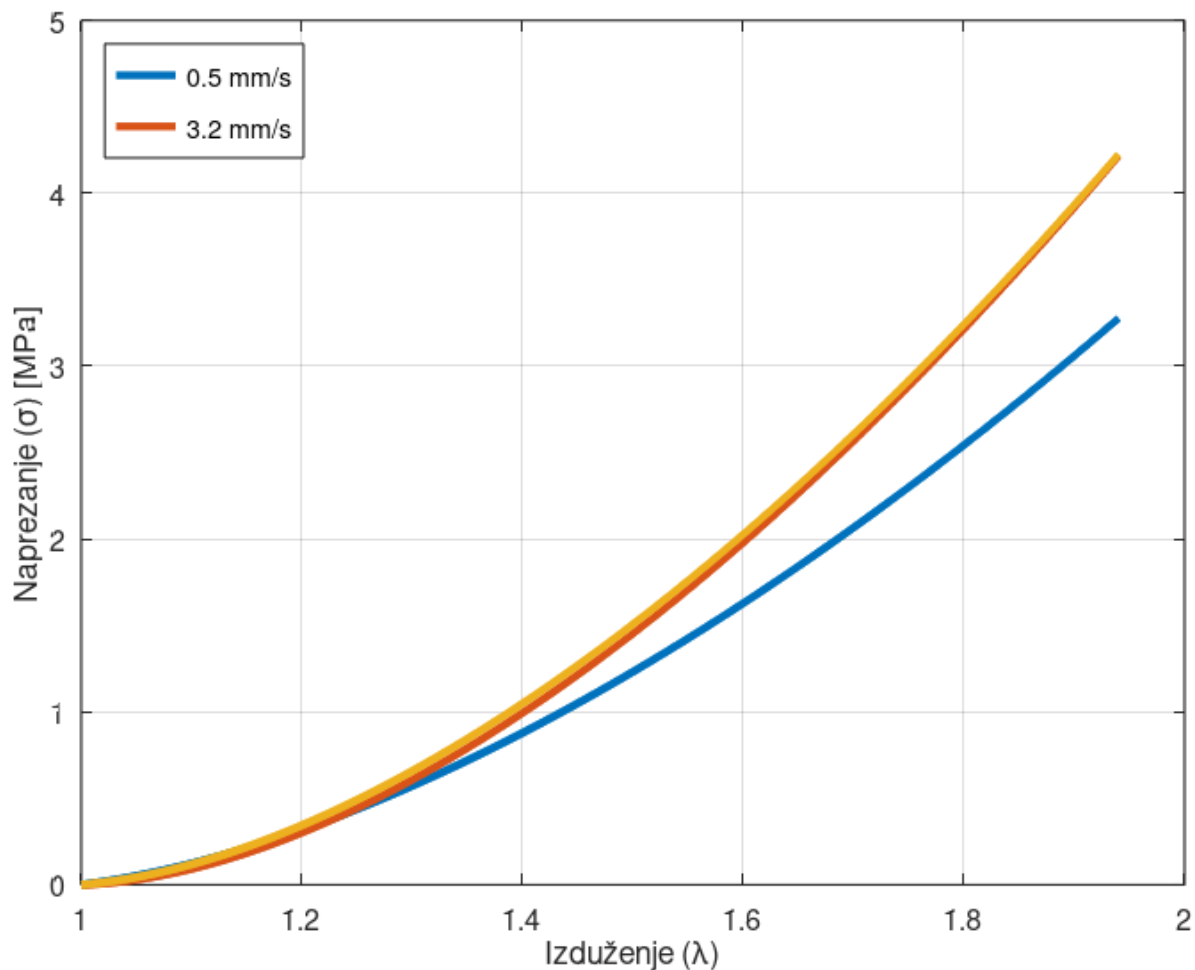
**Tablica 9** Prosječne vrijednosti materijalnih konstanti materijala DM85

DM85	uzdužno			poprečno	
	0,5	3,2	6	0,5	3,2
$C_1$	0,766638	1,093398	1,234703	0,71923	1,013655
$C_{10}$	1,328375	1,904275	1,944123	1,469273	2,04777
$C_{01}$	-0,82646	-1,26891	-1,11543	-1,09789	-1,61159

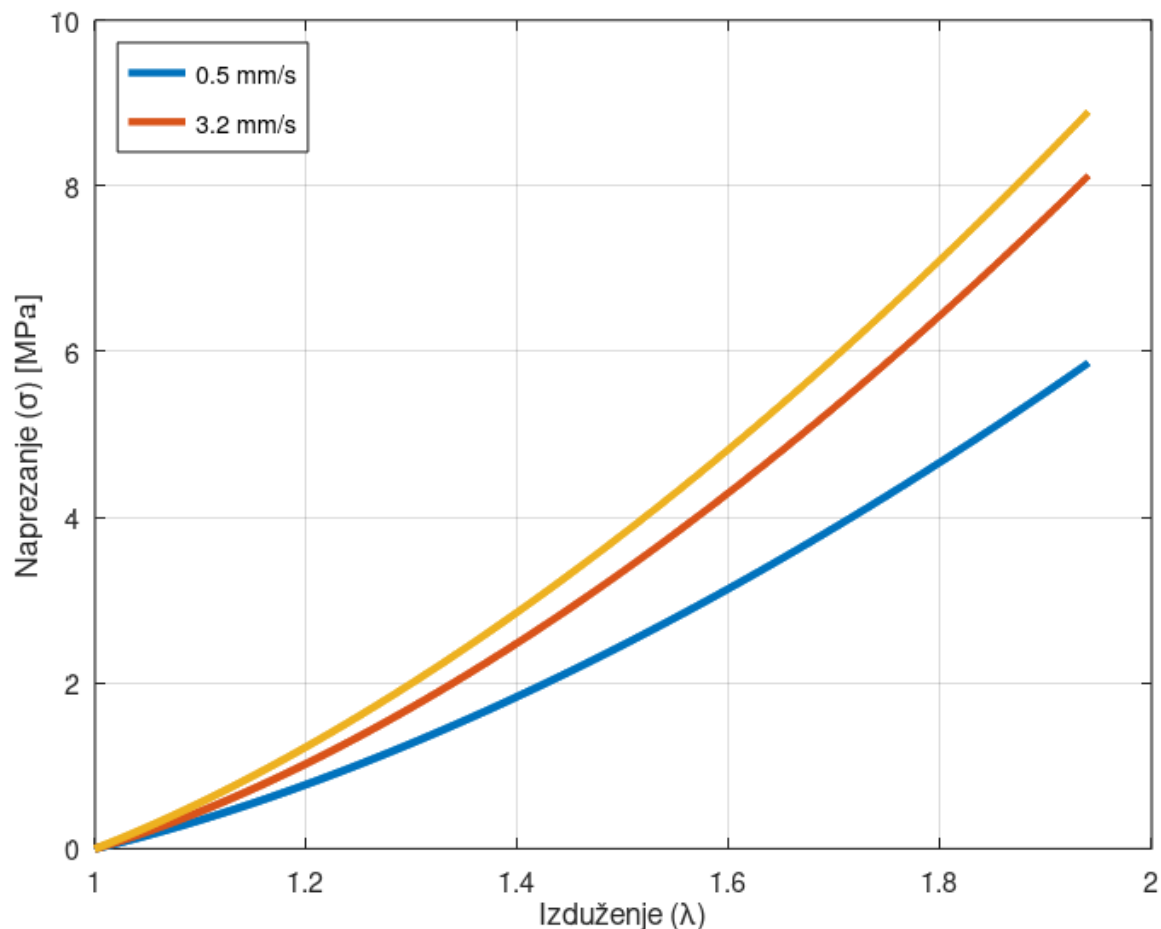
Prosječne vrijednosti materijalnih konstanti uvrštavaju se u formulu za računanje naprezanja pomoću Mooney – Rivlinovog modela koja glasi:

$$\sigma = 2C_{10} \left( \lambda^2 - \frac{1}{\lambda} \right) + 2C_{01} \left( \lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right). \quad (16)$$

Pripremom zasebnog koda u programu *Octave*, koji iz unesenih vrijednosti konstanti računa naprezanje za pojedine točke istezanja, ispisuju se dijagrami ovisnosti svojstava materijala o brzini kojom se provodio vlačni test. Ti su dijagrami prikazani na Slika 40 i Slika 41.



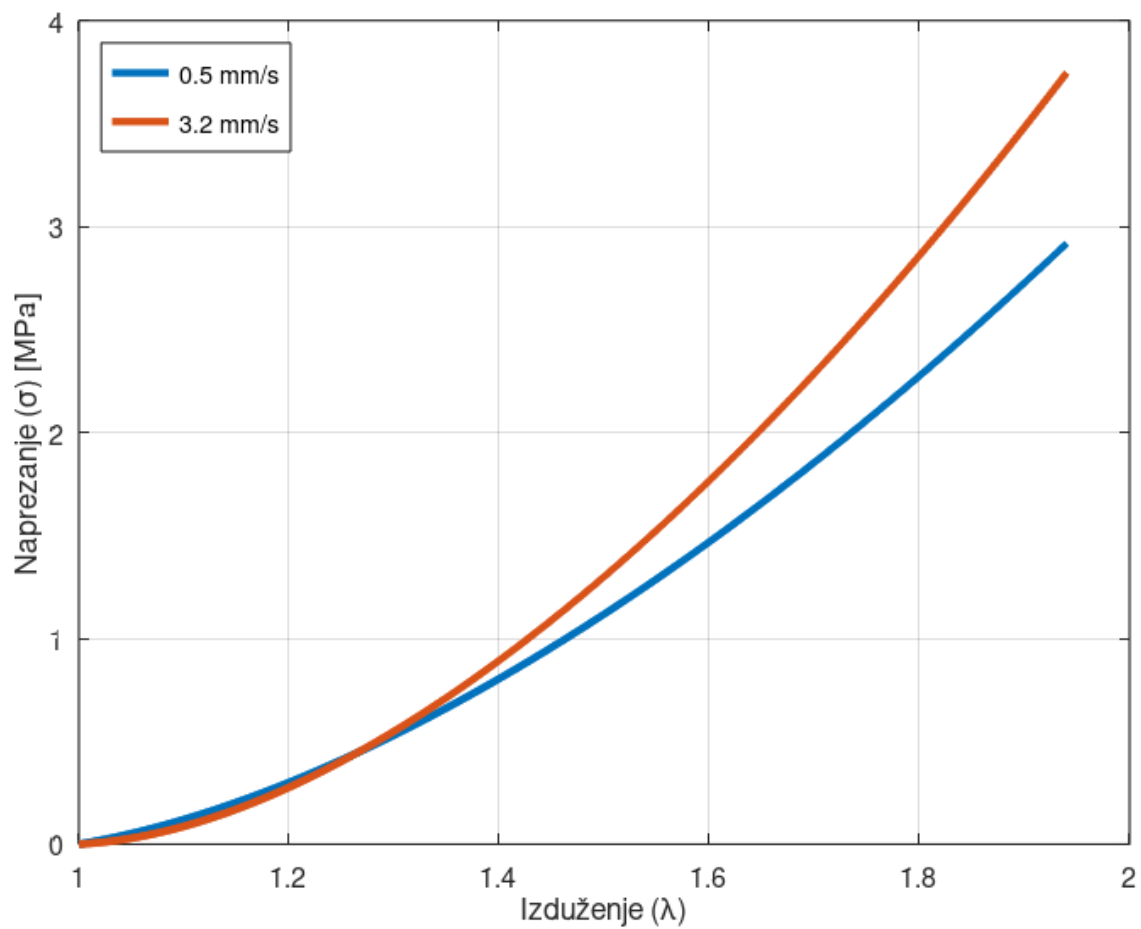
**Slika 40** Ovisnost materijalnih konstanti o brzini ispitivanja za materijal DM70 uzdužnog ispisa



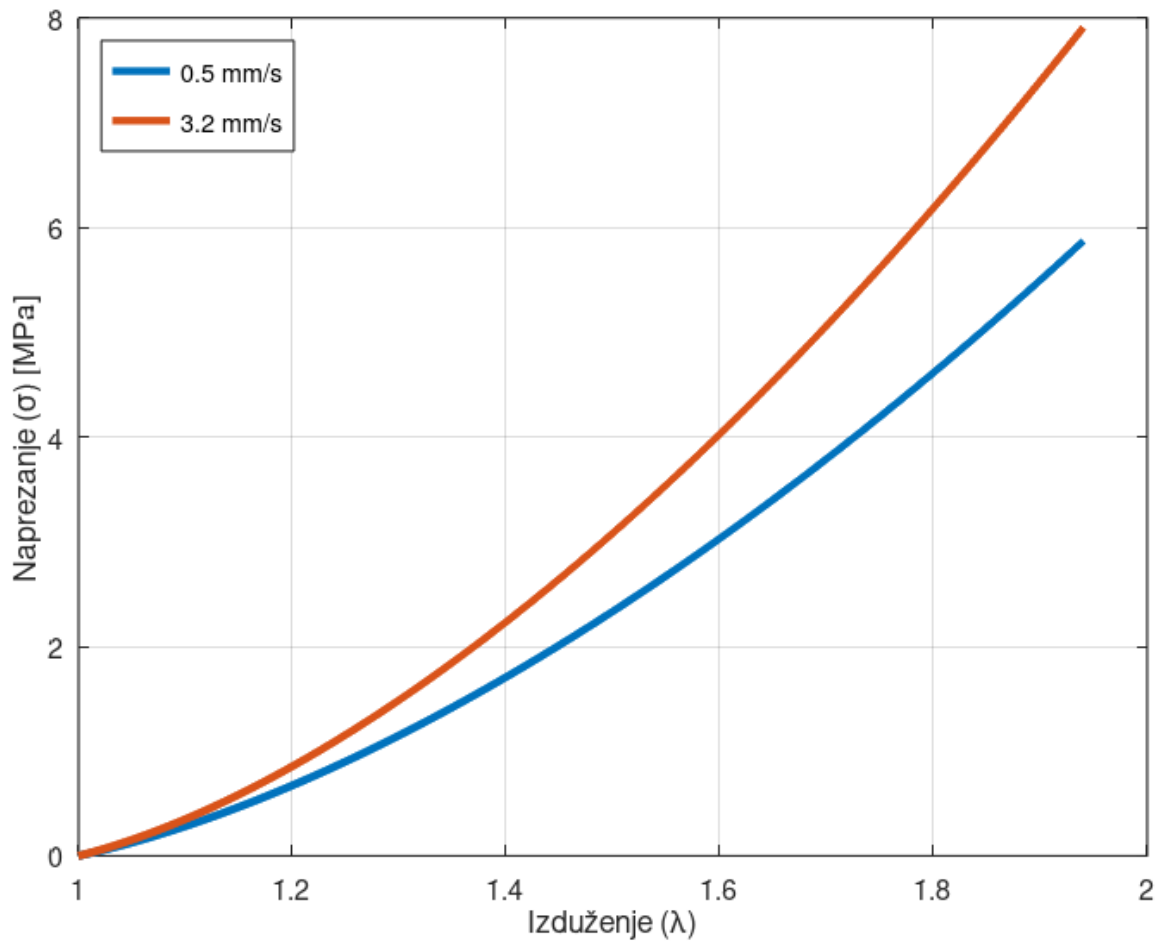
**Slika 41** Ovisnost materijalnih konstanti o brzini ispitivanja za materijal DM85 uzdužnog ispisa

Iz ovakvog se prikaza jasnije primjećuje koliko je čvršći materijal, odnosno DM85 više ovisan o brzini ispitivanja. Razmak između krivulja je očito znatno izraženiji u odnosu na onaj kod materijala DM70.

S obzirom da je uočena razlika svojstava zanimljivo je promotriti u kojoj mjeri ovisi brzina ispitivanja za uzorke ispisane u poprečnome smjeru. Poprečno ispisane epruvete mjerene su pri brzinama od 0.5 mm/s i 3.2 mm/s. Kako je vidljivo iz uzdužnih uzoraka ta je razlika izraženija nego ona pri većim brzinama i stoga je korisnija za promatranje. Ovisnost svojstava o brzini ispitivanja za poprečne epruvete prikazuju Slika 42 i Slika 43.

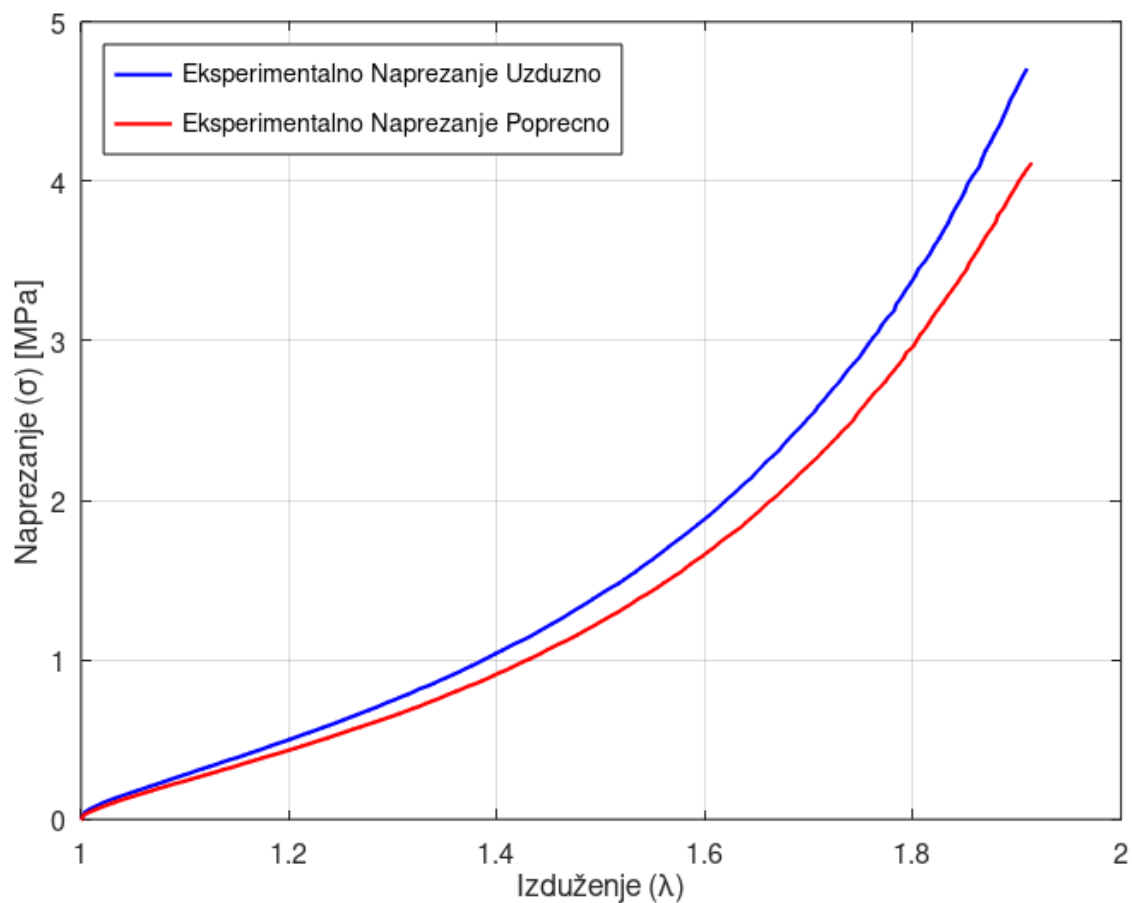


**Slika 42** Ovisnost materijalnih konstanti o brzini ispitivanja za materijal DM70 poprečnog ispisa



**Slika 43** Ovisnost materijalnih konstanti o brzini ispitivanja za materijal DM85 poprečnog ispisa

Na posljetku usporedimo eksperimentalne podatke za materijal DM70 pri brzini 3,2 mm/s ovisno o smjeru ispisa kako prikazuje Slika 44      Eksperimentalni podatci materijala DM70



**Slika 44** Eksperimentalni podatci materijala DM70

Iz priloženog se primjećuje da je materijal anizotropan. To pokazuje i razlika u konstanti  $C_1$  izračunatoj i pokazanoj u tablici 8.

## 4. ZAKLJUČAK

Provođenjem jednoosnog vlačnog ispitivanja tek se djelomično rješava problem poznavanja mehaničkih svojstava materijala. Eksperimentalni podatci se koriste za određivanje najbolje modela za opis materijala i pripadnih materijalnih konstante koji dalje pružaju mogućnost uvrštavanja istih u jednadžbe za računanje naprezanja u ovisnosti o istežanju za realne probleme. U ovome su radu provedena ispitivanja na uzorcima 3D ispisanih digitalnih materijala DM 70 i DM 85 PolyJet tehnologijom. Ispitane su epruvete iz oba materijala ispisane u smjeru ispisa te u okomitom smjeru. Testiranje je provedeno pri tri brzine (0,5 mm/s, 3,2 mm/s te 6 mm/s). Za oba materijala se pokazalo da uzdužno ispisani uzorci imaju veću vlačnu čvrstoću. Također, za oba materijala se vlačna čvrstoća povećava s povećanjem brzine. Zanimljivo, za DM70 materijal nema znatne razlike u vlačnoj čvrstoći između brzina 3,2 i 6 mm/s.

Maksimalno istežanje se smanjuje s tvrdoćom materijala i povećava s brzinom ispisa. Za materijal DM70 je maksimalno istežanje veće kod uzdužno ispisanih uzoraka, dok je za DM85 veće za poprečno ispisani uzorak za sve brzine ispitivanja.

Krutost materijala je analizirana pomoću Neo – Hookeovog i Mooney – Rivlinovog materijalnog modela s dvije materijalne konstante. Za oba materijala se pokazalo da je Neo – Hookeov materijalni model znatno lošije opisuje ponašanje materijala. Ti su modeli prvi stadiji u opisivanju ponašanja materijala, a zavisno o potrebi moguće je provesti i znatno složenija ispitivanja, npr. dvoosni vlačni test, i opisati rezultate uz pomoć složenijih materijalnih modela s više materijalnih konstanti.

Konkretno vlačnim testom u ovome radu dokazana je pojava anizotropnosti uzoraka isprintanih PolyJet tehnologijom bez obzira na izrazito bolju preciznost i kvalitetu izradaka u odnosu na druge tehnologije 3D ispisivanja.

Svrha ovakvog ispitivanja je poboljšanje procesa razvoja proizvoda i upotrebljivost 3D ispisanih izradaka u realnim uvjetima. Poznavanje pojave anizotropnosti i u kojoj se mjeri pokazuje omogućuje konstruktoru da prilagodi smjer ispisa željenom načinu opterećenja u kojem će se izradak nalaziti. Pored toga daje konstruktoru na uvid hoće li svojstva pojedinih materijala zadovoljiti potrebe ili je moguće to postići nekim konstrukcijskim rješenjima.

---

**LITERATURA**

- [1] <https://additive-x.com/blog/how-topology-optimisation-creates-3d-printing-opportunities/>
- [2] Tensile Test on Elastomer; Institute of Applied Mechanics; Civil Engineering RWTH Aachen University; 2017.
- [3] <https://www.stratasys.com/en/>
- [4] [https://www.researchgate.net/figure/PolyJet-technology-UV-Ultra-violet\\_fig2\\_282584691](https://www.researchgate.net/figure/PolyJet-technology-UV-Ultra-violet_fig2_282584691)
- [5] Material models and finite analysis of additively printed polymer composites; Ryu. J. E., Salcedoe., Lee H. J., Jang S. J., Jang E. Y., Yassi H. A., Baek D., Choi D., Lee E.; Journal of Composite Materials; 2018.
- [6] Plastics – Determination of tensile properties, General principles, ISO 527-1 :2012
- [7] Rubber, vulcanized or thermoplastic – Determination of tensile stress-strain properties, ISO 37 :2011
- [8] Plastics – Determination of tensile properties, Test conditions for moulding and extrusion plastics, ISO 527-2 :2012
- [9] Fotografije iz osobne arhive
- [10] Programski zadaci iz Mehanike kontinuuma; FSB; Igor Karšaj; 2020.
- [11] A Finite Element Implementation of Mooney – Rivlin's Strain Energy Function in Abaqus; University of Calgary; 2000.
- [12] Numerički model eksperimentalnog ispitivanja 3D ispisanih dvokomponentnih arterijskih replika; Antonio Jurić, Diplomski rad; 2021.
- [13] Razvoj postupka korištenja Neo-Hooke materijalnog modela za opis ponašanja krvnih žila; Mirta Džida, Diplomski rad; 2021.
- [14] Primjena aditivne proizvodnje za klasičnu preradu kompozitnih polimernih tvorevina; Josip Zvekić, Diplomski rad; 2022.
- [15] Stroj za ispitivanje čvrstoće ispisanih materijala; Martina Mokos, Diplomski rad; 2022.
- [16] Stability study of the compressible Mooney-Rivlin hyperelastic model; Fodor B., Kossa A., Journal of Strain Analysis for Engineering Design 2024.
- [17] <https://www.britannica.com/science/elastomer/Intermolecular-association-thermoplastic-elastomers>