Sveučilište Jurja Dobrile u Puli
Tehnički fakultet u Puli

NIKO VUJIĆ

ISPITIVANJE ČVRSTOĆE FDM 3D PRINTANOG UZORKA

Završni rad

Pula, rujan 2025.

Sveučilište Jurja Dobrile u Puli
Tehnički fakultet u Puli

NIKO VUJIĆ

ISPITIVANJE ČVRSTOĆE FDM 3D PRINTANOG UZORKA

Završni rad

JMBAG: 0035227593, redoviti student

Studijski smjer: Preddiplomski stručni studij proizvodno strojarstvo

Predmet: Mehanika I

Znanstveno područje: 2. Tehničke znanosti

Znanstveno polje: 2.11. Strojarstvo

Znanstvena grana: 2.11.03 Proizvodno strojarstvo

Mentor: v.pred. Sandi Buletić, dipl.ing.

Pula, rujan 2025.

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, dolje potpisani **Niko Vujić**, JMBAG: **0035227593**, kandidat za završni rad na Tehničkom fakultetu Sveučilišta Jurja Dobrile u Puli, ovime izjavljujem da je ovaj završni rad rezultat isključivo mojega vlastitog rada, da se temelji na mojim istraživanjima te da se oslanja na objavljenu literaturu kao što to pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem da niti jedan dio završnog rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz kojega necitiranog rada, te da ikoji dio rada krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za koji drugi rad pri bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili radnoj ustanovi.

Student
Niko Vujić

U Puli, **09.09.2025.**

IZJAVA

o korištenju autorskog djela

Ja, **Niko Vujić**,
dajem odobrenje Sveučilištu Jurja Dobrile u Puli, kao nositelju prava iskorištavanja, da moj završni rad pod nazivom:

ISPITIVANJE ČVRSTOĆE FDM 3D PRINTANOG UZORKA

koristi na način da gore navedeno autorsko djelo, kao cjeloviti tekst, trajno objavi u javnoj internetskoj bazi Sveučilišne knjižnice Sveučilišta Jurja Dobrile u Puli te kopira u javnu internetsku bazu završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice (stavljanje na raspolaganje javnosti), sve u skladu sa Zakonom o autorskom pravu i drugim srodnim pravima i dobrom akademskom praksom, a radi promicanja otvorenoga, slobodnoga pristupa znanstvenim informacijama.

Za korištenje autorskog djela na gore navedeni način ne potražujem naknadu.

U Puli, **09.09.2025.**

Potpis
Niko Vujić

Sadržaj

1 Uvod **1**

2 FDM aditivna tehnologija **2**

2.1 Općenito o FDM tehnologiji . . . 2

2.2 Princip rada FDM tehnologije . . . 2

2.3 Parametri ispisa . . . 3

2.4 Opis relevantnih parametara ispisa . . . 3

2.4.1 Visina sloja . . . 4

2.4.2 Širina ekstruzije . . . 4

2.4.3 Postotak ispune . . . 5

2.4.4 Debljina gornjih i donjih slojeva . . . 6

2.4.5 Vrsta ispune . . . 7

2.4.6 Orijentacija modela na radnoj podlozi . . . 9

2.4.7 Broj slojeva stijenke . . . 9

2.5 Anizotropija 3D printanih modela . . . 10

2.5.1 Mehanizmi nastajanja slabosti među slojevima . . . 10

2.5.2 Ponašanje u smiku i vlačna čvrstoća . . . 11

2.6 Taguchijeva metoda . . . 11

2.7 ANOVA analiza (analiza varijabilnosti) . . . 13

3 Planiranje i provedba eksperimenta **14**

3.1 Odabir ispitivanih parametara ispisa . . . 14

3.2 Odabir konfiguracije ispitivanih parametara ispisa . . . 15

3.2.1 Odabir konfiguracije visine sloja . . . 15

3.2.2 Odabir konfiguracije širine ekstruzije . . . 16

3.2.3 Odabir konfiguracije postotka ispune . . . 16

3.2.4 Odabir konfiguracije orijentacije ispitnog uzorka na randoj podlozi . . . 17

3.2.5 Odabir konfiguracije broja slojeva stijenke . . . 17

3.2.6 Sumarni pregled ispitivanih parametara i razina . . . 17

3.3 Metoda ispitivanja . . . 18

3.3.1 Ispitivanje vlačne čvrstoće . . . 18

3.3.2 Ispitivanje smične čvrstoće . . . 20

3.4 Priprema uzoraka . . . 21

3.4.1 Interakcija postotka ispune i širine ekstruzije . . . 21

3.4.2 Orijentacija izrade i prihvat epruvete . . . 22

3.4.3 Konstrukcija epruveta . . . 25

3.5 Materijali, oprema i postavke . . . 27

3.6 Postav za ispitivanje smične čvrstoće . . . 29

3.7 Izrada ispitnog uzorka . . . 31

3.8 Označavanje ispitnih uzoraka . . . 34
3.9 Ispitivanje na kidalici . . . 34
3.10 Testni postav . . . 34
3.11 Prikupljanje podataka . . . 37
4 Analiza podataka **38**
4.1 Računalna analiza poprečnog presjeka . . . 38
4.2 Obrada rezultata vlačnog ispitivanja . . . 41
4.2.1 Signal-šum omjer rezultata vlačnog ispitivanja . . . 41
4.2.2 ANOVA analiza rezultata vlačnog ispitivanja . . . 43
4.3 Obrada rezultata smičnog ispitivanja . . . 48
4.3.1 Signal-šum omjer rezultata smičnog ispitivanja . . . 48
4.3.2 ANOVA analiza rezultata smičnog ispitivanja . . . 50
5 Zaključak **54**
Literatura **55**
Popis slika **57**
Popis tablica **59**
Popis simbola i mjernih jedinica **60**
Prilog A – Python skripta za analizu poprečnih presjeka **I**

Sažetak

U ovom radu istraživan je utjecaj odabranih parametara FDM ispisa na mehanička svojstva 3D printanih uzoraka izrađenih od PLA materijala. Analizirani su parametri visine sloja, širine ekstruzije, postotka ispune, orijentacije slojeva i broja stijenki, dok su ostali uvjeti ispisa bili konstantni. Eksperimenti su provedeni prema Taguchijevoj metodi, a rezultati obrađeni ANOVA analizom. Utvrđeno je da orijentacija slojeva ima najveći utjecaj na vlačnu čvrstoću (23% ukupne varijabilnosti), pri čemu su uzorci s paralelnom orijentacijom postigli prosječnu čvrstoću od 29,88 MPa u usporedbi s 21,94 MPa za okomitu orijentaciju. Broj stijenki pokazao je doprinos od 16,3%, dok su ostali parametri imali manji utjecaj ($\leq$10%). Kod smične čvrstoće najznačajniji faktor bio je postotak ispune (43,2%), gdje je povećanje ispune s 20% na 85% rezultiralo rastom čvrstoće s 23,67 MPa na 34,13 MPa. Dobiveni rezultati potvrđuju da pravilnim odabirom parametara ispisa moguće značajno poboljšati mehanička svojstva 3D printanih komponenti te pružaju smjernice za optimizaciju FDM procesa u inženjerskim primjenama.

Ključne riječi: FDM, 3D printanje, PLA, vlačna čvrstoća, smična čvrstoća, parametri ispisa, Taguchi metoda

Abstract

This thesis investigates the influence of selected FDM printing parameters on the mechanical properties of PLA specimens. The analyzed parameters include layer height, extrusion width, infill percentage, layer orientation, and wall thickness, while other printing conditions were kept constant. Experiments were conducted using the Taguchi method, and results were analyzed with ANOVA. The findings show that layer orientation has the greatest impact on tensile strength (23% of total variability), with parallel layers achieving an average strength of 29,88 MPa compared to 21,94 MPa for vertical orientation. The number of walls contributed 16,3%, while the effects of other parameters were below 10%. For shear strength, the most influential factor was infill percentage (43,2%), where increasing infill from 20% to 85% raised the average strength from 23,67 MPa to 34,13 MPa. These results confirm that proper selection of printing parameters can significantly improve the mechanical properties of 3D printed components and provide guidelines for FDM process optimization in engineering applications.

Keywords: FDM, 3D printing, PLA, tensile strength, shear strength, print parameters, Taguchi method

1 Uvod

Aditivne tehnologije, često poznate i kao 3D printanje, postaju jedan od najdinamičnijih segmenata moderne proizvodnje. Za razliku od klasičnih proizvodnih metoda kao što su obrada odvajanjem čestica ili injekcijsko prešanje, aditivne tehnologije djeluju postupnim naslojavanjem materijala, čime omogućuju izradu kompliciranih i zahtjevnih geometrija koje bi tradicionalnim metodama bile vrlo teško izvedive ili u potpunosti neizvedive. Njihova primjena danas obuhvaća širok raspon područja - od brzog prototipiranja preko proizvodnje prilagođenih alata i prihvata sve do manjih proizvodnih serija.

Među različitim aditivnim tehnologijama posebno se ističe FDM (engl. *Fused Deposition Modeling*) zbog niske cijene, dostupnosti velikog broja termoplastičnih materijala, zadovoljavajućih mehaničkih svojstava te same zrelosti tehnologije. Upravo je ta kombinacija učinila FDM najraširenijom tehnologijom 3D printanja, kako u profesionalnim, tako i u kućnim primjenama. Glavne prednosti ove tehnologije su brzina i fleksibilnost izrade, mogućnost proizvodnje manjih serija bez potrebe za skupim alatima kao i značajno smanjenje škarta u odnosu na klasične metode obrade.

Unatoč brojnim gore navedenim prednostima, FDM tehnologija suočava se i s određenim ograničenjima, od kojih se najčešće ističe nepouzdanost mehaničkih svojstava izrađenih dijelova. Zbog velikog broja parametara ispisa te slojevitosti materijala (što rezultira anizotropnim svojstvima modela) konačna čvrstoća 3D printanih dijelova često odstupa od očekivane. To predstavlja značajan izazov u primjeni FDM tehnologije za funkcionalne komponente, gdje je pouzdanost i predvidivost mehaničkih svojstava ključna.

Motivacija ovog rada proizlazi upravo iz potrebe za boljim razumijevanjem utjecaja odabranih parametara ispisa na mehanička svojstva 3D printanih dijelova. Analizom i ispitivanjem moguće je odrediti koji parametri najviše doprinose varijabilnosti čvrstoće, te kako se njihovim optimiziranjem može postići prediktivniji ishod čvrstoće. Cilj rada je istražiti utjecaj ključnih parametara na vlačnu i smičnu čvrstoću uzoraka izrađenih FDM tehnologijom.

2 FDM aditivna tehnologija

2.1 Općenito o FDM tehnologiji

FDM (Fused Deposition Modeling) često znana kao i FFF (Fused Filament Fabrication) aditivna je tehnologija koja koristi ekstruziju termoplastičnog materijala kroz slojeve za izradu 3D modela. Proces se sastoji od grijanja mlaznice na temperaturu taljenja termoplastičnog materijala te istiskivanjem istog kroz brizgalicu sloj po sloj kako bi se izradio 3D model.

2.2 Princip rada FDM tehnologije

FDM tehnologija temelji se na procesu taloženja materijala po slojevima, pri čemu se termoplastični materijal (najčešće u obliku filamenta) zagrijava na (ili preko) temperaturu tališta i ekstrudira kroz mlaznicu. Proces izrade strojnog dijela može se podijeliti u sljedeće korake:

1. Priprema modela.
2. Zagrijavanje i ekstrudiranje.
3. Izgradnja slojeva.

1. Priprema modela
Model se pretvara iz vektorskog formata (step, stp, iges...) u format površinske mreže (stl, obj, ply) te se kao takav stavlja u program za pripremu ispisa (slicer). U sliceru se podešavaju svi potrebni parametri ispisa (više o njima u sljedećem poglavlju) te se model pretvara u gcode (tekstualni jezik naredbi čitljiv 3D printeru kao stroju).

2. Zagrijavanje i ekstrudiranje
Materijal u obliku filamenta se sustavom za dovod materijala dovodi u zagrijanu glavu stroja, gdje se kroz mlaznicu zatim precizno nanosi na radnu površinu.

3. Izgradnja slojeva
Stroj pomiče mlaznicu ili podlogu (ovisno o izvedbi) po osima X, Y i Z te sloj po sloj izgrađuje 3D objekt. Svaki novi sloj se taloži na prethodni po Z-osi sve dok se ne izgradi 3D objekt.

2.3 Parametri ispisa

Parametre ispisa početno možemo podijeliti u tri glavne skupine.

1. Parametri povezani s obradom materijala:

   Temperatura mlaznice.

   Temperatura podloge.

   Brzina hlađenja (diktirana hlađenjem glave stroja).

   Vrsta materijala.

   Promjer i tip filamenta.

2. Parametri povezani s dinamikom stroja:

   Brzina ispisa.

   Akceleracija i trzaj (jerk).

   Retrakcija materijala.

   Visina Z-podizanja pri preskakanju (Z-hop).

   Kalibracija osi i tolerancije.

3. Parametri povezani s geometrijom objekta:

   Visina sloja.

   Širina ekstruzije.

   Postotak ispune.

   Debljina gornjih i donjih slojeva.

   Vrsta ispune.

   Orijentacija modela na radnoj podlozi.

   Broj slojeva stijenke.

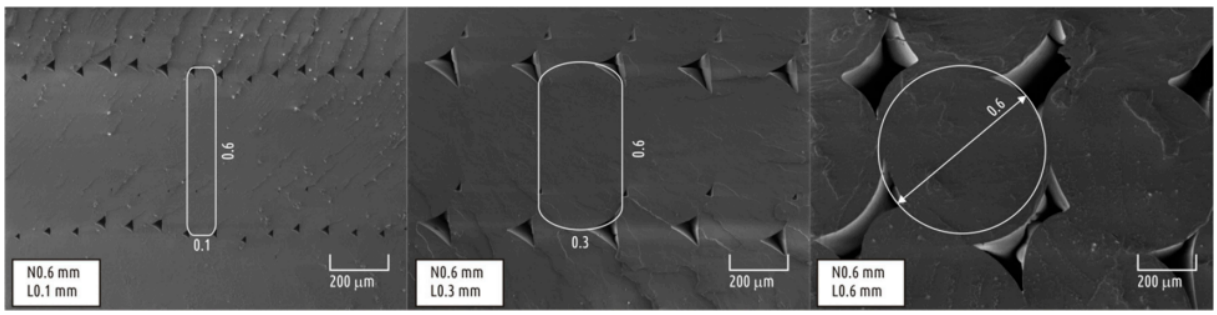
2.4 Opis relevantnih parametara ispisa

Iako svaka skupina navedenih parametara utječe na čvrstoću objekta, prve dvije skupine ovise samo o stroju i materijalu, te su samim time konstantne za svaku kombinaciju stroja i materijala. Korelaciju ćemo u ovom radu tražiti samo između parametara treće skupine, jer su parametri oblika oni koji za različite strojne dijelove u procesu proizvodnje istim materijalom na istom stroju diktiraju samu promjenu čvrstoće strojnog dijela. U daljnjem će tekstu biti detaljnije opisani parametri povezani s geometrijom objekta.

2.4.1 Visina sloja

Visina sloja predstavlja debljinu svakog pojedinog sloja taloženog tijekom ispisa, te samim time definira ”vertikalnu rezoluciju” modela. Tipične vrijednosti kreću se između 0.1mm i 0.5mm, ovisno o željenoj kvaliteti ispisa. Manji slojevi omogućavaju veću kvalitetu ispisa te manju hrapavost površine, ali produžuju vrijeme ispisa. Što je visina sloja veća, slojevi se brže talože, ali dolazi do veće separacije slojeva i slabije adhezije među istima. Pogledamo li poprečni presjek u ravnini normalnoj na trag filamenta možemo vidjeti kako manje visine slojeva (za isti volumenski protok materijala) daje veću kontaktnu površinu među slojevima, te samim time i veću adheziju među slojevima i manju horizontalnu separaciju sloja. Varijacija presjeka u odnosu na različite visine slojeva prikazana je na slici 1.

Slika 1: Transformacija poprečnog presjeka pojedinog sloja s povećanjem debljine sloja. Oblik sloja prikazan je preko SEM slika.

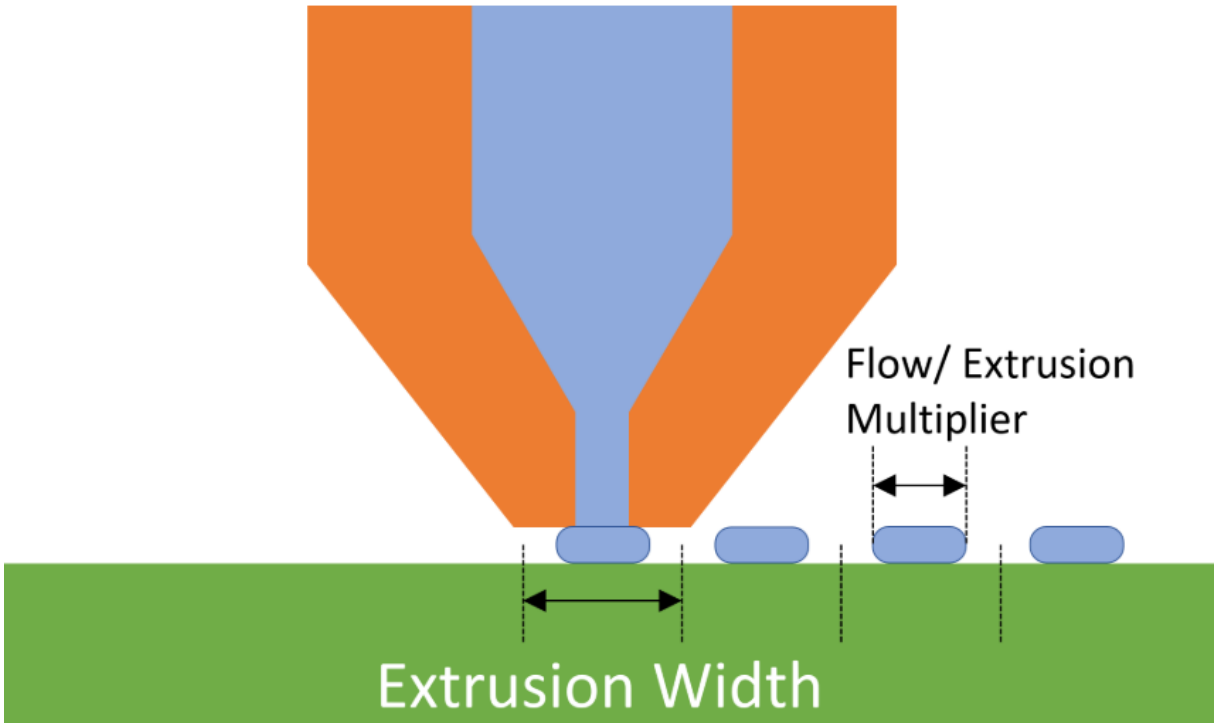


Preuzeto iz [1]

2.4.2 Širina ekstruzije

Širina ekstruzije određuje koliko je širok pojedini ispisani trag. Tipične vrijednosti kreću se između 80% i 120% promjera mlaznice, čime je moguće osigurati dobro prosječno preklapanje susjednih tragova. Preklapanje susjednih tragova prikazano je na slici 2, te je moguće primijetiti kako veća širina ekstruzije daje veću horizontalnu kontaktnu površinu između tragova, te (u ovisnosti o visini sloja prethodno opisano poglavlju 2.4.1) daje i veću kontaktnu površinu između slojeva.

Slika 2: Širina ekstruzije pojedinog traga pri izlazu iz mlaznice, kroz paralelne tragove.

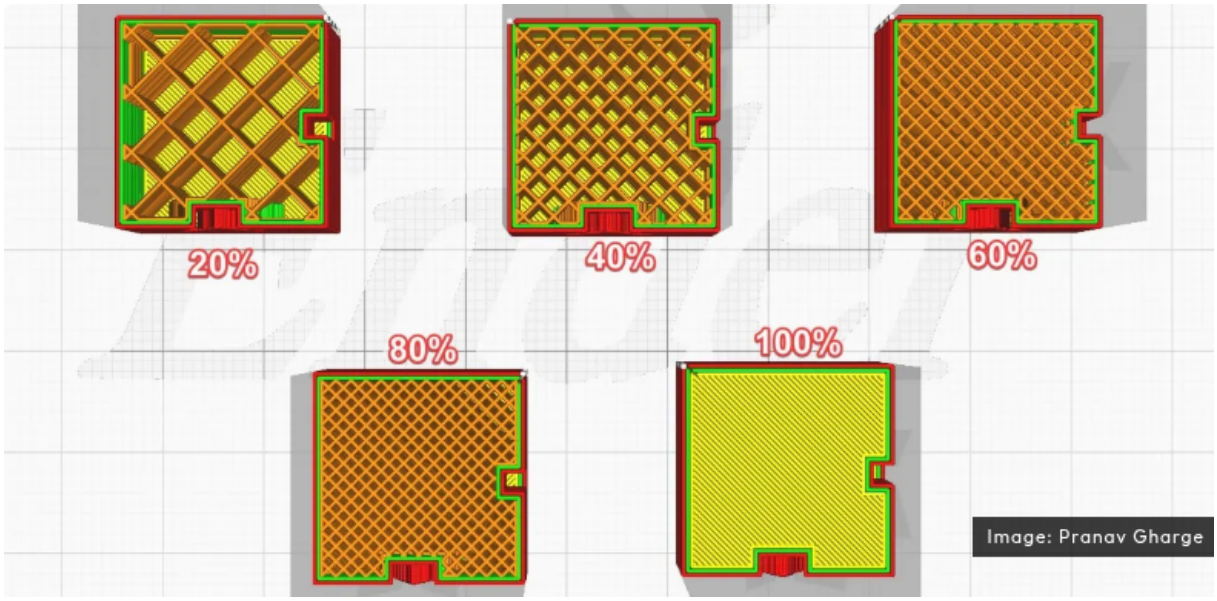


Preuzeto iz [2].

2.4.3 Postotak ispune

Postotak ispune određuje koliko unutrašnjosti modela će biti ispunjeno materijalom. Ispuna može biti u rasponu od 0% (šuplji model samo s vanjskom stijenkom) do 100% (potpuno ispunjen model). Tipične vrijednosti za funkcionalne modele kreću se između 15% i 60%, dok se veće vrijednosti često koriste za dijelove malih poprečnih presjeka u odnosu na dimenzije mlaznice (gdje je anizotropija značajna), ili za dijelove koji trebaju podnijeti značajna mehanička opterećenja. Veći postotak ispune direktno povećava masu, čvrstoću i krutost dijela, ali i povećava potrošnju materijala te značajno povećava vrijeme ispisa.

Slika 3: Različiti postotci ispune kod iste vrste ispune.



Preuzeto iz [3].

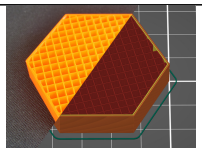
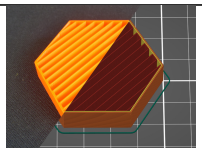
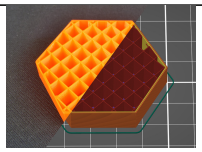
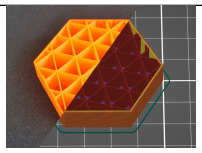
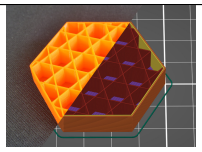
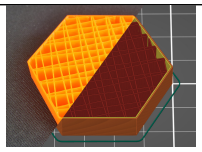
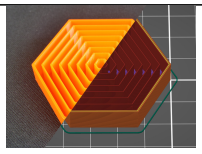
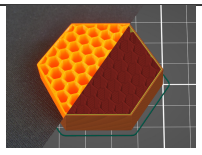
2.4.4 Debljina gornjih i donjih slojeva

Debljina gornjih i donjih slojeva definira koliko će slojeva biti potpuno ispunjeno bez strukturne ispune. Za razliku od visine slojeva (2.4.1) ovdje se govori o stvarnom broju slojeva, ne o njihovoj visini. Donji slojevi ključni su za kvalitetno prianjanje modela uz podlogu, dok gornji slojevi sprječavaju pojavu rupa ili udubljenja pri završetku ispisa. Tipične vrijednosti broja donjih slojeva kreće se između 2 i 4, kako bi se osigurala dobra baza za prianjanje slojeva manjih poprečnih presjeka (slojeva sačinjenih od ispune) te osiguralo dobro prianjanje na podlogu. Tipične vrijednosti broja gornjih slojeva kreću se između 3 i 5, ovisno o postotku ispune. Niži postoci ispune zahtijevaju veći broj gornjih slojeva kako bi se sakrilo ”vješanje” slojeva koji se grade na zadnjem sloju ispune, dok je za veće postotke ispune dovoljno imati manji broj gornjih slojeva jer se sam sloj gradi na ”gušćoj” mreži ispune.

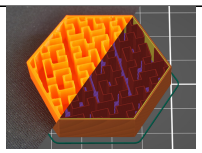
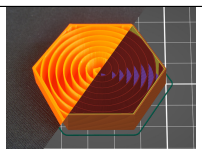
2.4.5 Vrsta ispune

Vrsta ispune definira geometrijsku strukturu kojom se ispunjava unutrašnjost modela. Vrste ispune se primarno dijele na 2D i 3D ispune, gdje 2D ispune svoj osnovni oblik ispune drže konstantnim kroz cijelu Z-os, dok 3D ispune variraju oblik ispune po Z-osi. Prednosti 3D ispuna su često smanjenje razine anizotropnosti materijala, te konzistentniji prijenos sile kroz strojni komad, no pošto se površinski presjek po Z-osi mijenja, anizotropnost nije konstanta što onemogućava bilo koju vrstu proračuna ili predikcije čvrstoće strojnog dijela. Prikaz najpopularnijih 2D i 3D vrsta ispune nalazi se u tablicama 1 i 2 (preuzeto iz [4]).

Tablica 1: 2D vrste ispune

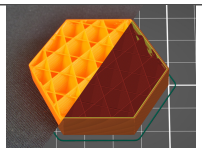
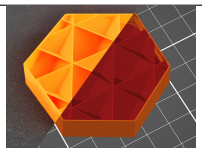
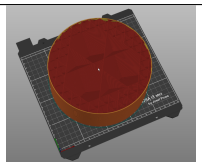
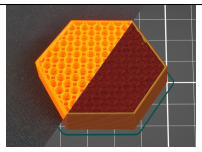
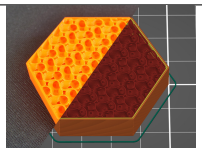
Naziv	**Opis**	**Slika**
Rectlinear	Paralelne linije koje se izmjenjuju po slojevima pod kutom od 90°.	
Poravnati rectlinear	Sve linije u istom smjeru u svim slojevima.	
Mreža (Grid)	Dvije serije linija po sloju, pod kutom od 90°, koje se sijeku.	
Trokuti	Uzorak s linijama pod tri kuta (60°).	
Zvijezde	Šesterokraki uzorak nastao iz trokuta.	
Linije	Jednosmjerne ravne linije po sloju.	
Koncentrični	Krivulje koje prate vanjske konture modela.	
Saće (Honeycomb)	Šesterokutni uzorak.	

Nastavak Tablice 1 – 2D vrste ispune

Naziv	Opis	Slika
Hilbertova krivulja	Fraktalna, labirintska linija koja ispunjava površinu.	
Arhimedova spirala	Spiralne linije koje se šire iz središta.	

Slike preuzete iz [4].

Tablica 2: 3D vrste ispune.

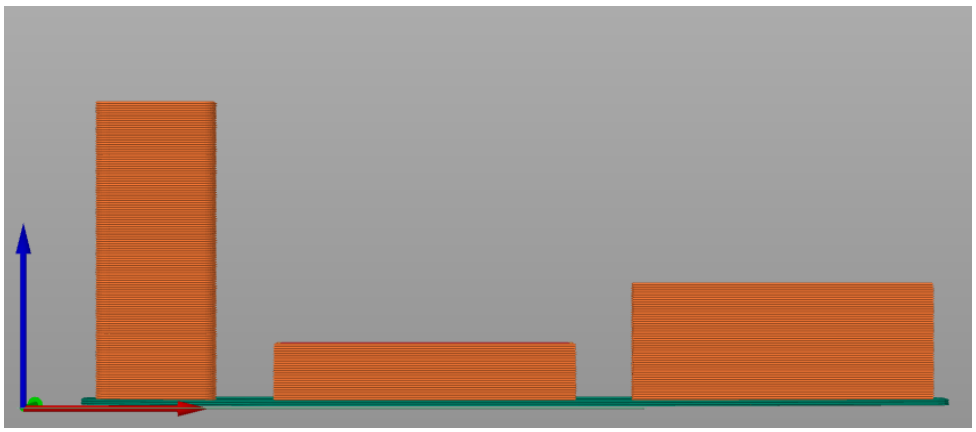
Naziv	Opis	Slika
Kockasti (Cubic)	Trodimenzionalna mreža kocki, izotropno raspoređena.	
Potporni kockasti	Rjeđa verzija cubic ispune s fokusom na dobru potporu gornjim površinama.	
Adaptivni kockasti	Varijabilna gustoća cubic ispune, ovisna o obliku modela.	
3D saće (3D honeycomb)	Kombinacija oktagona i kvadrata u prostornoj mreži.	
Giroidna ispuna (Gyroid infill)	Trodimenzionalna, glatka površina bez ravnih presjeka, definirana matematičkom funkcijom.	

Slike preuzete iz [4].

2.4.6 Orijentacija modela na radnoj podlozi

Orijentacija modela na radnoj podlozi odnosi se na smjer u kojem želimo da se model izrađuje. Na slici 4 prikazan je paralelopiped u sve tri orijentacije u odnosu na radnu podlogu. Orijentacija izrade vrlo je bitan parametar jer je glavni faktor koji diktira smjer anizotropije samog modela, razlog tome je što su mehanička svojstva u smjeru Z-osi (na slici 4 plava os) bitno drugačija od mehaničkih svojstava u smjerovima osi paralelnih s radnom podlogom. Ako se, primjerice, dijelovi koji su izloženi savijanju ispisuju tako da se slojevi talože okomito na silu savijanja (na slici 4 model lijevo), doći će do loma duž slojeva. Pravilnim postavljanjem modela može se izbjeći takvo ponašanje.

Slika 4: 3D model paralelopipeda prikazan u sve tri orijentacije u odnosu na podlogu.

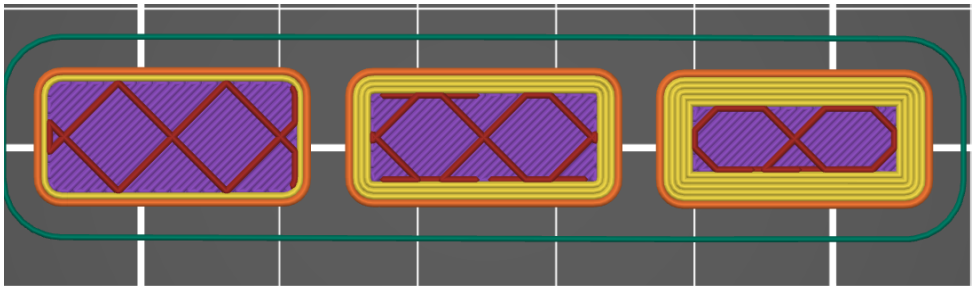


Izvor: autor.

2.4.7 Broj slojeva stijenke

Broj slojeva stijenke definira koliko će puta mlaznica napraviti kružni ispis oko konture modela, stvarajući vanjski zid modela. Povećanjem broja stijenki smanjuje se oslanjanje na unutarnju ispunu, što je korisno kod tankih ili strukturno osjetljivih modela. U kombinaciji s visokom širinom ekstruzije (2.4.2) i niskom visinom sloja (2.4.1) broj stijenki čini ključni parametar za poboljšanje čvrstoće modela.

Slika 5: 3D model paralelopipeda podešenog na 2, 4 i 6 slojeva stijenke.



Izvor: autor.

2.5 Anizotropija 3D printanih modela

2.5.1 Mehanizmi nastajanja slabosti među slojevima

Ključno ograničenje FDM tehnologije, kada govorimo o čvrstoći, je upravo anizotropija mehaničkih svojstava izrađenih dijelova. Za razliku od izotropnih materijala, kod kojih su mehanička svojstva jednaka u svim smjerovima, FDM dijelovi pokazuju značajnu razliku u čvrstoći između slojeva (po osi izgradnje slojeva, tj. Z-osi).
Glavni uzroci slabosti među slojevima su:

1. **Ograničena difuzija molekula**
   Tijekom taloženja slojeva, novi sloj rastopljenog filamenta dolazi u kontakt s već ohlađenim slojem ispod. Prava kemijska veza između slojeva može nastati samo ako dođe do *difuzije polimernih lanaca* preko granice slojeva [5], [6]. Ako je razlika u temperaturi prevelika, ili je vrijeme kontakta prekratko (zbog velike brzine kretanja mlaznice), dolazi do mehaničkog prianjanja te nastaje ”hladan spoj” dvaju slojeva u kojemu nema stvarne kemijske veze između slojeva.

2. **Temperaturni gradijenti i brzina hlađenja**
   Brzo hlađenje prethodnog sloja sprječava djelomično taljenje pri dodavanju novog sloja, što rezultira slabijom vezom [7]. Uspješno međuslojno prianjanje ovisi o toplinskoj vodljivosti materijala, viskoznosti rastaljenog polimera i vremenu difuzije.

3. **Geometrijski i reološki faktori**
   Parametri poput visine sloja, širine ekstruzije i brzine taloženja utječu na oblik i površinu kontakta između slojeva. Veće visine sloja i manja širina traga smanjuju površinu kontakta, čime se povećava vjerojatnost loma na slojevima [8], [9].

4. **Zračni među-prostor (voids)**
   Nedovoljno preklapanje tragova i slojeva može rezultirati stvaranjem *mikropraznina* koje djeluju kao koncentratori naprezanja [1], [10]. One su često inicijalne točke loma pri mehaničkom opterećenju.

5. **Efekt taloženja pod kutom**
   Kod nagnutih ili kompleksnih geometrija, slojevi se ne talože ravno jedan na drugi. To dodatno smanjuje efektivnu nosivu površinu, što posebno dolazi do izražaja kod savijanja ili smičnog opterećenja [5].

2.5.2 Ponašanje u smiku i vlačna čvrstoća

Zbog taloženja slojeva, kako je opisano u poglavlju 2.5, 3D printani dijelovi pokazuju jako anizotropno ponašanje mehaničkih svojstava. Najveća razlika primjećuje se pri usporedbi čvrstoće u smjeru paralelnom sa slojevima (X-Y ravnina) i u smjeru osi normalne na ravninu u kojoj se sloj nalazi (Z-os), posebno pri različitim vrstama opterećenja.

- **Vlačna čvrstoća** u X-Y ravnini najčešće je puno veća od one u Z-smjeru, jer se u ravnini sloja ostvaruju kontinuirani tragovi filamenta koji su dobro povezani (ne lijepi se sloj na sloj već cijeli trag prenosi opterećenje). Pri vlačnom opterećenju u smjeru Z-osi, čvrstoća ovisi isključivo o kvaliteti međuslojnog prianjanja [11].
- **Smična čvrstoća** također je osjetljiva na anizotropiju. Kod opterećenja smikom, osobito u X-Z ili Y-Z ravnini, deformacija se odvija duž granica slojeva gdje su veze najslabije. Istraživanje [12] govori kako smična čvrstoća može biti i do 70% niža od vlačne u X-Y ravnini.
- **Priroda loma** također varira — kod vlačne sile u smjeru Z-osi lom se često događa iznenada i duž (kroz) granice slojeva, dok je u X-Y ravnini lom postupniji, jer materijal ima veći kapacitet deformacije prije loma (prema [13]).

Zbog gore navedenog, odabir parametara ispisa mora se prilagoditi vrsti opterećenja kojoj će uzorak biti izložen. Ako se očekuju sile savijanja ili smicanja u smjeru Z-osi preporučeno je koristiti manje visine slojeva, veću širinu ekstruzije i više slojeva stijenke kako bi se poboljšala adhezija između slojeva.

2.6 Taguchijeva metoda

Taguchijeva metoda je eksperimentalna metoda za analizu utjecaja više ulaznih parametara na neki izlazni odziv sustava, s ciljem optimizacije performansi uz minimalan broj eksperimenata. Razvio ju je dr. Genichi Taguchi s naglaskom na robusnost i otpornost procesa na smetnje (šumove).

U klasičnom pristupu, ako postoji k faktora, svaki s l razina, potrebno je provesti l^k eksperimenata za potpunu faktorsku analizu. To brzo postaje nepraktično. Taguchijeva metoda omogućuje optimizaciju i identifikaciju najutjecajnijih faktora s puno manjim brojem ispitivanja.

Osnovni pojmovi metode:

- **Faktori:** Varijable koje se kontroliraju u eksperimentu. U ovom radu, to su odabrani parametri ispisa
- **Razine:** Odabrane vrijednosti koje pojedini faktor može poprimiti.
- **Ortogonalna matrica:** Matrica koja omogućuje sustavno variranje faktora i njihovih razina tako da se s minimalnim brojem eksperimenata obuhvati maksimalna količina informacija.
- **Signal-šum omjer (S/N omjer):** Kvantitativna mjera kojom se procjenjuje kvaliteta odziva. Povezuje korisni signal (željeni odziv) s neželjenim šumom (varijacijom). Za slučaj kada se želi maksimizirati odziv (u ovom slučaju čvrstoća), koristi se S/N omjer za kriterij "što je vrijednost viša, to je bolja":

$$\text{S/N} = -10 \cdot \log_{10}\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i^2}\right) \tag{1}$$

  gdje je y_i izmjerena vrijednost odziva u i-tom ponavljanju, a n broj ponavljanja eksperimenta za danu kombinaciju parametara.

Glavne prednosti metode su sljedeće:

- značajno smanjenje broja eksperimenata,
- jednostavna statistička obrada podataka,
- robusna optimizacija čak i uz prisustvo vanjskih smetnji,
- mogućnost donošenja zaključaka o važnosti pojedinih faktora i (što je vrlo važno) interakcija između tih faktora.

U ovom radu koristit će se Taguchijeva metoda kako bi se utvrdio utjecaj 5 faktora ispisa (visina sloja, širina ekstruzije, postotak ispune, orijentacija modela i broj slojeva stijenke) na mehaničku čvrstoću ispitnih uzoraka izrađenih FDM tehnologijom. Za svaki eksperimentalni uzorak mjerit će se vlačna i smična čvrstoća, a S/N omjer koristit će se za procjenu optimalne kombinacije parametara i njihove robusnosti.

Cilj nam je, dakle, pronaći razine faktora koje daju velik signal (visoke vrijednosti čvrstoće) i mali šum (stabilno, malo rasipanje), zato maksimiziramo S/N omjer.

2.7 ANOVA analiza (analiza varijabilnosti)

Analiza varijabilnosti (engl. *Analysis of Variance* – ANOVA) je statistička metoda kojom se utvrđuje značajnost utjecaja pojedinih faktora na odziv sustava. U kontekstu Taguchijeve metode, ANOVA se koristi za kvantitativnu procjenu koji parametri ispisa najviše doprinose varijabilnosti mehaničkih svojstava 3D printanih uzoraka. Ukupna varijabilnost rezultata eksperimenta (SS_{ukupno} – suma kvadrata ukupno) razlaže se na doprinose pojedinih faktora (SS_F – suma kvadrata faktora) i pogreške (SS_E – suma kvadrata pogreške). Na taj način moguće je odrediti koliki postotak ukupne varijacije potječe od pojedinog faktora, a koliki od nasumičnih smetnji ili mjernih pogrešaka. Tipična forma ANOVA tablice prikazana je u tablici 3.

Osnovni pojmovi:

- **Suma kvadrata (SS)** – mjeri varijabilnost. Računa se za svaki faktor i za pogrešku.
- **Stupnjevi slobode (SL)** – broj nezavisnih informacija koje faktor doprinosi analizi.
- **Srednji kvadrat (MS)** – prosječna varijabilnost po stupnju slobode, $MS = SS/SL$.
- **F-omjer (F-ratio)** – omjer MS_F/MS_E, koristi se za procjenu statističke značajnosti faktora.
- **Postotni doprinos** – udio varijabilnosti objašnjen pojedinim faktorom u ukupnoj varijabilnosti.

Tablica 3: Primjer ANOVA tablice

Izvor varijacije	SS	SL	MS	F	Doprinos [%]
Faktor A	SS_A	SL_A	MS_A	F_A	P_A
Faktor B	SS_B	SL_B	MS_B	F_B	P_B
...	...	...	...	...	...
Greška	SS_E	SL_E	MS_E	–	–
Ukupno	SS_T	SL_T	–	–	100%

Izvor:autor

Iako Taguchijeva metoda pomoću S/N omjera daje informaciju o optimalnim razinama faktora, tek ANOVA analiza pokazuje koji faktori zaista imaju statistički značajan utjecaj na odziv (u ovom slučaju – na vlačnu i smičnu čvrstoću). Na taj način može se odrediti koji parametar najviše doprinosi ukupnoj varijabilnosti čvrstoće, koliki je postotni doprinos pojedinog parametra te je li promatrani utjecaj statistički značajan ili se radi o šumu/pogrešci.

Za rezultate dobivene Taguchijevom metodom, provest će se ANOVA analiza za oba odziva (vlačna i smična čvrstoća). Rezultati će biti prikazani u obliku ANOVA tablica za svaki odziv, a iz dobivenih postotnih doprinosa donijet će se zaključci o najvažnijim parametrima ispisa koji određuju mehanička svojstva uzoraka izrađenih FDM tehnologijom.

3 Planiranje i provedba eksperimenta

U ovom poglavlju definirani su ispitivani parametri, pripadajuće razine, korištena Taguchijeva matrica, dimenzije i konfiguracija uzoraka te korišteni materijali i ispitna oprema. Eksperiment je osmišljen tako da omogući statističku obradu rezultata uz minimalan broj potrebnih ispitivanja, koristeći prednosti Taguchijevog dizajna eksperimenata.

Za potrebe eksperimenta izrađena su ukupno 45 ispitna uzorka za vlačno ispitivanje (V1–V18) i 27 ispitnih uzoraka za smično ispitivanje (S1–S27), numerirana sukladno Taguchijevim ortogonalnim matricama iz tablica 9 i 11. Svaki ispitni uzorak označen je na čeonim stranama modela u obliku slova i broja (V – vlačna, S – smična epruveta, npr. V1, V2, S1, S2 ...).

3.1 Odabir ispitivanih parametara ispisa

Među parametrima opisanim u poglavlju 2.3 (kako je već ranije navedeno) bit će ispitivani isključivo parametri povezani s geometrijom objekta, jer isti najviše utječu na čvrstoću strojnog dijela za isti materijal, te za parametre materijala preporučene od proizvođača. Među istim tim parametrima navedenim u poglavlju 2.4 potrebno je odabrati one čija promjena dovodi do najvećih varijacija u čvrstoći gotovih modela.
Prođemo li redom kroz iste možemo primijetiti kako:

1. **Visina sloja**, prema [1] zbog varijacije u adheziji između slojeva itekako utječe na čvrstoću ispitnog uzorka, pogotovo u u smjeru anizotropije.

2. **Širina ekstruzije**, prema [14] i [2] zbog varijacije u adheziji između slojeva utječe na čvrstoću ispitnog uzorka, također pogotovo u smjeru anizotropije.

3. **Postotak ispune**, prema [15], zbog same promjene u površini poprečnog presjeka modela dolazi do promjene čvrstoće ispitnog uzorka.

4. **Debljina gornjih i donjih slojeva** ne utječe na čvrstoću ispitnog uzorka (ako se u horizontalnim orijentacijama izjednači s ekvivalentnim brojem slojeva stijenke u vertikalnoj orijentaciji jer se niti jedan od tih slojeva neće nalaziti u kritičnom presjeku).

5. **Vrsta ispune**
   Iako vrsta ispune uvelike uteče na čvrstoću ispitnog uzorka, broj uzoraka za ispitivanje svih vrsta ispuna bio bi velik, te ga nije moguće istražiti u ovom radu. Potrebno je odabrati jednu vrstu ispune koja će biti konstantna kroz promjenu svih ostalih parametara. Postoji opcija opredijeliti se na 2D ili 3D ispunu prema tablicama 1 i 2. 3D ispune predstavljaju problem pri kasnijoj analizi podataka iz razloga što im (po samoj prirodi promjene geometrije kroz Z-os) površina poprečnog presjeka *nije konstantna*. Zbog kasnije analize

podataka, to znači da je vrlo teško retroaktivno odrediti geometriju sloja u kojemu se dogodio lom, te je iz tog razloga potrebno odabrati vrstu ispune s konstantnom površinom i geometrijom poprečnog presjeka, dakle 2D vrstu ispune. Zbog dobre raspodjele materijala po cijelom poprečnom presjeku i mogućnosti brze izrade odabran je **mrežasti (grid) tip ispune**.

6. **Orijentacija modela na radnoj površini**
   Prema [16], zbog promjena u smjeru anizotropije, orijentacija izrade uvelike utječe na čvrstoću ispitnog uzorka.

7. **Broj slojeva stijenke**
   Iako bi broj slojeva stijenke zbog same promjene površine poprečnog presjeka i momenata tromosti presjeka trebao utjecati na čvrstoću dijela, glavni razlog zašto je uključen u ispitivanje je zbog povezivanja istog s širinom ekstruzije. Kako je preklop tragova (detaljnije opisan u 3.2.3), kod bliskih tragova diktiran širinom ekstruzije, variranje postotka ispune nema utjecaja na preklop, već samo na adheziju između slojeva. Uzmemo li varijaciju broja slojeva stijenki u obzir (tragovi stijenki su uvijek tik jedan do drugoga), možemo promatrati i **horizontalni preklop** tragova, a ne samo kvalitetu adhezije između slojeva.

3.2 Odabir konfiguracije ispitivanih parametara ispisa

Kako bi dobili zadovoljavajuću varijaciju u čvrstoćama ispitnih uzoraka potrebnu za pronalaženje korelacije utjecaja parametara ispisa na čvrstoću, potrebno je pomno odabrati konfiguracije svakog od tih parametara.

3.2.1 Odabir konfiguracije visine sloja

Prema članku [17], nadovezanom na istraživanje [1] odabrane su visine slojeva od 0.05mm do 0.4mm. U istraživanju [1] utjecaj visine sloja na čvrstoću ispitnog uzorka ispitivan je sa dvije mlaznice (0.6mm i 0.4mm) te je varijacija u visinama sloja bila između 15% i 100% promjera mlaznice. Zbog ograničenja u broju mlaznica, ovo istraživanje će obuhvatiti samo mlaznice promjera 0.4mm (najčešći promjer korišten u stolnim strojevima), te kako bi se dobila kvalitetna raspodjela podataka, bit će odabrane tri visine sloja prema tablici 4.

Tablica 4: Konfiguracije visine sloja

Visina sloja	Postotak promjera mlaznice	Promjer mlaznice
0,08mm	20%	0,4mm
0,14mm	35%	0,4mm
0,28mm	70%	0,4mm

Izvor: autor

3.2.2 Odabir konfiguracije širine ekstruzije

Prema članku [2], ispitano je 8 širina ekstruzije u rasponu od 90% promjera mlaznice do 250% promjera mlaznice. U ovome ispitivanju bit će odabrane tri širine ekstruzije, počevši od blagog dodirivanja slojeva (100% promjera mlaznice) do velikog preklopa (200% promjera mlaznice. Konfiguracije parametara bit će ispitivane prema tablici 5.

Tablica 5: Konfiguracija širine ekstruzije

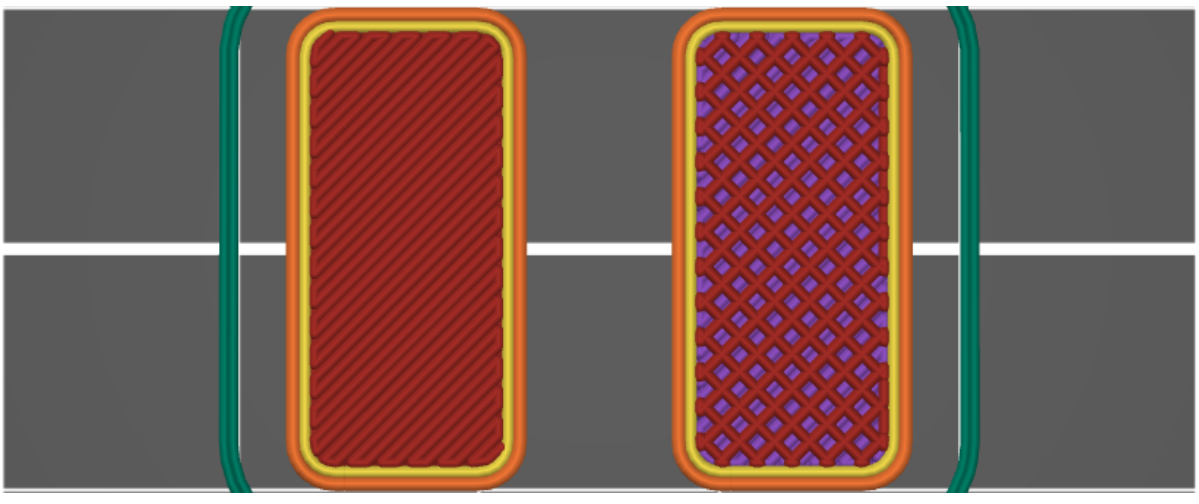
Širina ekstruzije	Postotak promjera mlaznice	Promjer mlaznice
0,4mm	100%	0,4mm
0,6mm	150%	0,4mm
0,8mm	200%	0,4mm

Izvor: autor

3.2.3 Odabir konfiguracije postotka ispune

Prema istraživanju [18] ispitana su 4 različita postotka ispune u rasponu od 20% do 100%. U ovome ispitivanju bit će odabrana tri različita postotka ispune, počevši od 20% (u praksi minimum za funkcionalne modele) do 85% (gotovo potpuno ispunjen komad). Razlog zašto gornja granica nije fiksirana na 100% je to što na takvim (ekstremnim) postocima ispune dolazi do velikog preklapanja linija slojeva zbog same geometrije ispune, što otežava razlikovanje promjene čvrstoće promjenom širine ekstruzije u odnosu na promjenu ispune. Iz tog je razloga odabran postotak ispune koji će ipak pustiti prazan prostor između tragova ispitnog uzorka. Na slici 6 vidljivo je da pri širini ekstruzije od 100% (0,4mm), na 100% ispune nema preklapanja tragova, dok bi svakim povećanjem preko te granice došlo do znatnog preklapanja istih. U tablici 6 prikazani su odabrani postoci ispune koji će biti ispitani.

Slika 6: Usporedba 100% (lijevo) i 85% (desno) postotka ispune, pri širini ekstruzije od 100%.



Izvor: autor

Tablica 6: Konfiguracija postotka ispune

Postotak ispune	Promjer mlaznice
20%	0,4mm
55%	0,4mm
85%	0,4mm

Izvor: autor

3.2.4 Odabir konfiguracije orijentacije ispitnog uzorka na randoj podlozi

Orijentacija modela, opisana u poglavlju 2.4.6 glavni je parametar koji utječe na anizotropiju ispitnog uzorka. Uzorci će (ovisno o tome ispituju li se na vlak ili smik) biti ispitivani u dvije, ili sve tri orijentacije prikazane na slici 4.

3.2.5 Odabir konfiguracije broja slojeva stijenke

Parametar broj slojeva stijenke, opisan u poglavlju 2.4.7, utječe na čvrstoću ispitnog uzorka zbog promjene površine presjeka, te posebno pri složenim opterećenjima zbog promjene momenta tromosti presjeka. Kako nije preporučeno broj slojeva stijenke spuštati ispod 2 sloja (zbog ravnosti i kvalitete površine vanjskog zida), te nije poželjno da na nosivim dijelovima stijenka zauzima preko 50% ukupne površine (zbog nepostojećeg presijecanja tragova koje je često benefitno za ukrućivanje tragova unutar istog sloja), za ovo će se ispitivanje odabrati 3 broja slojeva stijenke: 2 sloja, 4 sloja i 6 slojeva.

3.2.6 Sumarni pregled ispitivanih parametara i razina

U tablici 7 prikazan je sažetak svih ispitivanih parametara ispisa, uz pripadajuće razine koje su odabrane za daljnje ispitivanje.

Tablica 7: Sažetak ispitivanih parametara i njihovih razina

Parametar	Vrijednosti
Visina sloja	0,08 mm, 0,14 mm, 0,28 mm
Širina ekstruzije	0,4 mm, 0,6 mm, 0,8 mm
Postotak ispune	20%, 55%, 85%
Orijentacija modela	Orijentacija 1, Orijentacija 2, Orijentacija 3
Broj slojeva stijenke	2, 4, 6

Izvor: autor

3.3 Metoda ispitivanja

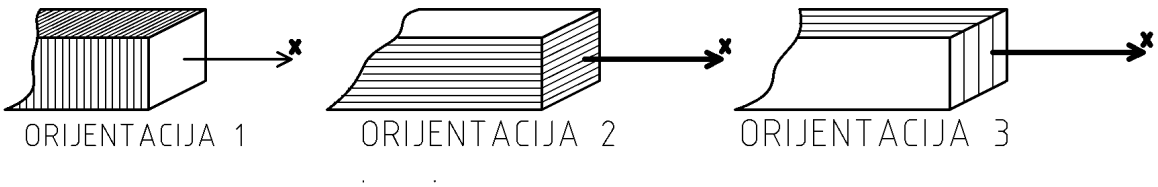
Ispitivanje (a samim time i analiza podataka) bit će podijeljeno na dva dijela, vlačni i smični dio, koji su odabrani jer se u tim slučajevima zbog delaminacije slojeva najčešće dešavaju lomovi.

3.3.1 Ispitivanje vlačne čvrstoće

Ispitivanje vlačne čvrstoće radit će se statičkim vlačnim pokusom na univerzalnoj kidalici. Svi parametri iz poglavlja 3.2.6 bit će ispitani, te (kako bi se smanjio broj potrebnih epruveta) koristit će se Taguchijeva metoda za analizu podataka. Kako bi odredili koje parametre je potrebno ispitati, možemo prema [19] za slučaj jednolike raspodjele σ u presjeku A reći da je pri čistom vlačnom naprezanju $\sigma_x = \sigma_y = 0$ i $\sigma_z \neq 0$, te da je iz toga $\sigma = \sigma_z = \frac{F}{A}$. Nazovemo li orijentacije orijentacija 1, orijentacija 2 i orijentacija 3 (prema slici 7), možemo primijetiti kako su pri vlačnom testu, ako napravimo ispitne uzorke simetričnima u ravnini normalnoj na X-os (prema slici 15), te ako sila djeluje u smjeru X-osi, orijentacija 2 i orijentacija 3 zapravo iste, te onda možemo reći da je potrebno pronaći samo sljedeća naprezanja:

$$\sigma_{z,or1}; \sigma_{z,or2} = \sigma_{z,or3} = \sigma_{z,or23} \tag{2}$$

Slika 7: Prikaz rasporeda slojeva u sve tri orijentacije.



Izvor: autor

Kada znamo koje kombinacije su nam potrebne, možemo napraviti tablicu 8 sa referentnim parametrima za ispitivanje vlačne čvrstoće.

Tablica 8: Parametri vlačnog testa

Parametar	Vrijednosti	Broj varijacija
Visina sloja	0,08 mm 0,14 mm 0,28 mm	3
Širina ekstruzije	0,4 mm 0,6 mm 0,8 mm	3
Postotak ispune	20% 55% 85%	3
Orijentacija modela	Orijentacija 1 Orijentacija 2	2
Broj slojeva stijenke	2 4 6	3

Izvor: autor

Napravimo li iz te tablice broj kombinacija koje postoje metodom potpune faktorske analize, imamo četiri parametra s tri varijacije te jedan parametar s dvije varijacije, što nam ukupno daje **162** potrebne epruvete. Iz tog razloga, iskoristit ćemo Taguchijevu metodu ortogonalnih matrica, kako bi umjesto kombiniranja svih parametara, pronašli korelacije između miješanih. Kako su Taguchijevi ortogonalni nizovi standardizirani, najbliži niz u koji se uklapa ovaj slučaj je $\mathrm{L}18(2^1 \times 3^7)$, što znači da je za pokrivanje svih polja potrebno 18 različitih eksperimenata. U tablici 9 pokazane su kombinacije koje je potrebno ispitati.

Tablica 9: Taguchijeva L18 ortogonalna matrica sa stvarnim vrijednostima

Eksperiment	Orijentacija	Visina sloja	Širina ekstruzije	Postotak ispune	Broj slojeva stijenke
1	Orijentacija 1	0,08 mm	0,4 mm	20%	2
2	Orijentacija 1	0,08 mm	0,6 mm	55%	4
3	Orijentacija 1	0,08 mm	0,8 mm	85%	6
4	Orijentacija 1	0,14 mm	0,4 mm	55%	6
5	Orijentacija 1	0,14 mm	0,6 mm	85%	2
6	Orijentacija 1	0,14 mm	0,8 mm	20%	4
7	Orijentacija 1	0,28 mm	0,4 mm	85%	4
8	Orijentacija 1	0,28 mm	0,6 mm	20%	6
9	Orijentacija 1	0,28 mm	0,8 mm	55%	2
10	Orijentacija 2	0,08 mm	0,4 mm	85%	4
11	Orijentacija 2	0,08 mm	0,6 mm	20%	6
12	Orijentacija 2	0,08 mm	0,8 mm	55%	2
13	Orijentacija 2	0,14 mm	0,4 mm	20%	6
14	Orijentacija 2	0,14 mm	0,6 mm	55%	2
15	Orijentacija 2	0,14 mm	0,8 mm	85%	4
16	Orijentacija 2	0,28 mm	0,4 mm	55%	4
17	Orijentacija 2	0,28 mm	0,6 mm	85%	6
18	Orijentacija 2	0,28 mm	0,8 mm	20%	2

Izvor: autor

3.3.2 Ispitivanje smične čvrstoće

Ispitivanje smične čvrstoće bit će izvedeno uzorkom s V-utorom na linearnim vodilicama na univerzalnoj kidalici. Svi parametri iz poglavlja 3.2.6 bit će ispitani, te (kako bi se smanjio broj potrebnih epruveta) koristit će se (kao i kod vlačnog testa) Taguchijeva metoda za analizu podataka. Kako bi odredili koje parametre je potrebno ispitati, možemo prema [19] za slučaj jednolike raspodjele τ u presjeku napisati $\tau = \frac{F}{A}$. Pogledamo li ponovno sliku 7, jasno je da pri ispitivanju na smik potrebno ispitati sve tri orijentacije, jer čak i sa simetričnom epruvetom ispitni se uzorak neće delaminirati isto djelujemo li silom na ravninu sloja, ili paralelno s njom. U tablici 10 ispisani su referentni parametri za smično ispitivanje.

Tablica 10: Parametri smičong testa

Parametar	**Vrijednosti**	**Broj varijacija**
Visina sloja	0,08 mm 0,14 mm 0,28 mm	3
Širina ekstruzije	0,4 mm 0,6 mm 0,8 mm	3
Postotak ispune	20% 55% 85%	3
Orijentacija modela	Orijentacija 1 Orijentacija 2 Orijentacija 3	3
Broj slojeva stijenke	2 4 6	3

Izvor: autor

Napravimo li iz tablice 10 broj kombinacija koje postoje metodom potpune faktorske analize, imamo pet parametara sa tri varijacije što nam ukupno daje **243** potrebne epruvete. Opet ćemo upotrijebiti Taguchijevu metodu ortogonalnih matrica kako bi smanjili broj uzoraka, te je sljedeći korak pronaći najbliži standardni ortogonalni niz koji zadovoljava naš slučaj. U ovome je slučaju to jednostavno, jer imamo 3^5 kombinacija, te to direktno odgovara matrici L27 koja sadržava pet faktora po tri razine, te zahtjeva 27 eksperimenata. U tablici 11 nalazi se raspisana matrica eksperimenata.

Tablica 11: Taguchijeva ortogonalna matrica L27 (5 faktora, 3 razine)

Eksperiment	Orijentacija	Visina sloja	Širina ekstruzije	Postotak ispune	Broj slojeva stijenke
1	Orijentacija 1	0,08 mm	0,4 mm	20%	2
2	Orijentacija 2	0,08 mm	0,4 mm	55%	4
3	Orijentacija 3	0,08 mm	0,4 mm	85%	6
4	Orijentacija 2	0,08 mm	0,6 mm	20%	6
5	Orijentacija 3	0,08 mm	0,6 mm	55%	2
6	Orijentacija 1	0,08 mm	0,6 mm	85%	4
7	Orijentacija 3	0,08 mm	0,8 mm	20%	4
8	Orijentacija 1	0,08 mm	0,8 mm	55%	6
9	Orijentacija 2	0,08 mm	0,8 mm	85%	2
10	Orijentacija 2	0,14 mm	0,4 mm	20%	6
11	Orijentacija 3	0,14 mm	0,4 mm	55%	2
12	Orijentacija 1	0,14 mm	0,4 mm	85%	4
13	Orijentacija 3	0,14 mm	0,6 mm	20%	4
14	Orijentacija 1	0,14 mm	0,6 mm	55%	6
15	Orijentacija 2	0,14 mm	0,6 mm	85%	2
16	Orijentacija 1	0,14 mm	0,8 mm	20%	2
17	Orijentacija 2	0,14 mm	0,8 mm	55%	4
18	Orijentacija 3	0,14 mm	0,8 mm	85%	6
19	Orijentacija 3	0,28 mm	0,4 mm	20%	4
20	Orijentacija 1	0,28 mm	0,4 mm	55%	6
21	Orijentacija 2	0,28 mm	0,4 mm	85%	2
22	Orijentacija 1	0,28 mm	0,6 mm	20%	4
23	Orijentacija 2	0,28 mm	0,6 mm	55%	6
24	Orijentacija 3	0,28 mm	0,6 mm	85%	2
25	Orijentacija 2	0,28 mm	0,8 mm	20%	2
26	Orijentacija 3	0,28 mm	0,8 mm	55%	4
27	Orijentacija 1	0,28 mm	0,8 mm	85%	6

Izvor: autor

3.4 Priprema uzoraka

Iako su metode ispitivanja standardizirane, zbog specifičnih svojstava 3D printanih modela nije praktično pridržavati se standardiziranih ispitnih uzoraka propisanih normama kao što su ISO 527, ASTM D7078, ISO 20337 itd. Iako nam Taguchijeva metoda uzima u obzir preklapanje parametara, pametno je napraviti dovoljnu separaciju parametara koji imaju međusobnu interakciju kako bi dobili relevantnu varijaciju u čvrstoćama. Iz tog je razloga potrebno paziti na nekoliko parametara i njihovih kombinacija.

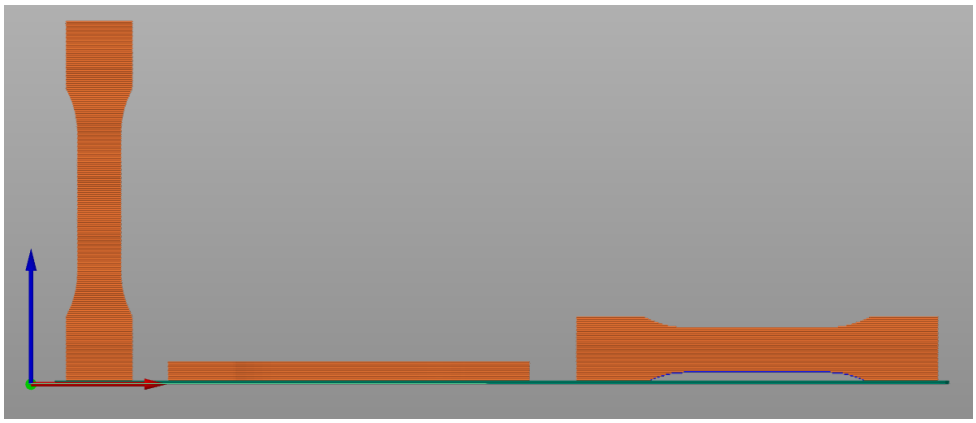
3.4.1 Interakcija postotka ispune i širine ekstruzije

Kako je navedeno u poglavlju 3.2.3 potrebno je pustiti dovoljno prostora između tragova ispune i stijenke, kako utjecaj širine ekstruzije ne bi u graničnim slučajevima utjecao na preklapanje tragova. Izrađen je te prerezan model kvadratnog površinskog presjeka 10x10mm (prema slici 12) te je pokazano da na širini ekstruzije od 200% sa mlaznicom promjera 0,4mm pri 85% ispune granično nema dodirivanja tragova u presjeku.

3.4.2 Orijentacija izrade i prihvat epruvete

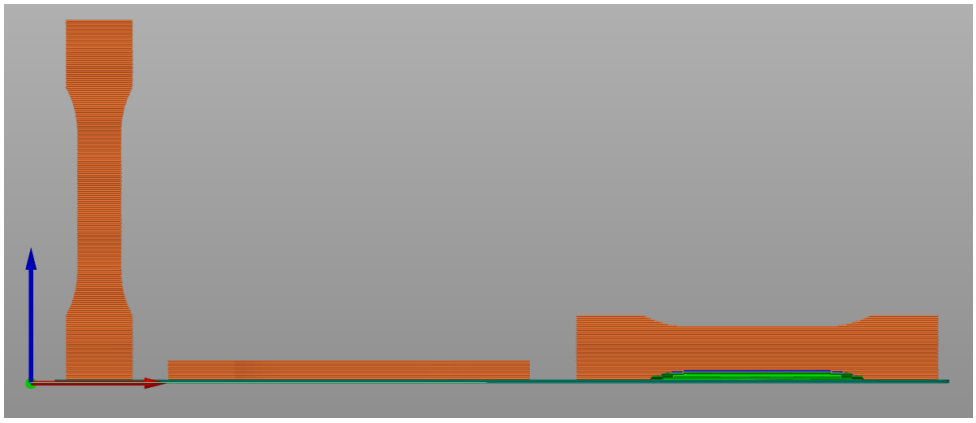
Kako bi geometrijske karakteristike izrađenih ispitnih uzoraka bile što konzistentnije, potrebno je osmisliti ispitni uzorak bez prevjesa (kako bi izbjegli potporni materijal) te je također potrebno paziti da se isti može izraditi u sve tri orijentacije. Na slikama 8 i 9 prikazana je standardna ispitna epruveta u sve tri orijentacije. Možemo primijetiti kako u trećoj (najdesnijoj) konfiguraciji epruveta zahtjeva potporni materijal, koji će na toj plohi promijeniti kvalitetu površine, te promijeniti geometriju same epruvete.

Slika 8: Ispitna epruveta prikazana u sve tri orijentacije bez potpornog materijala.



Izvor: autor

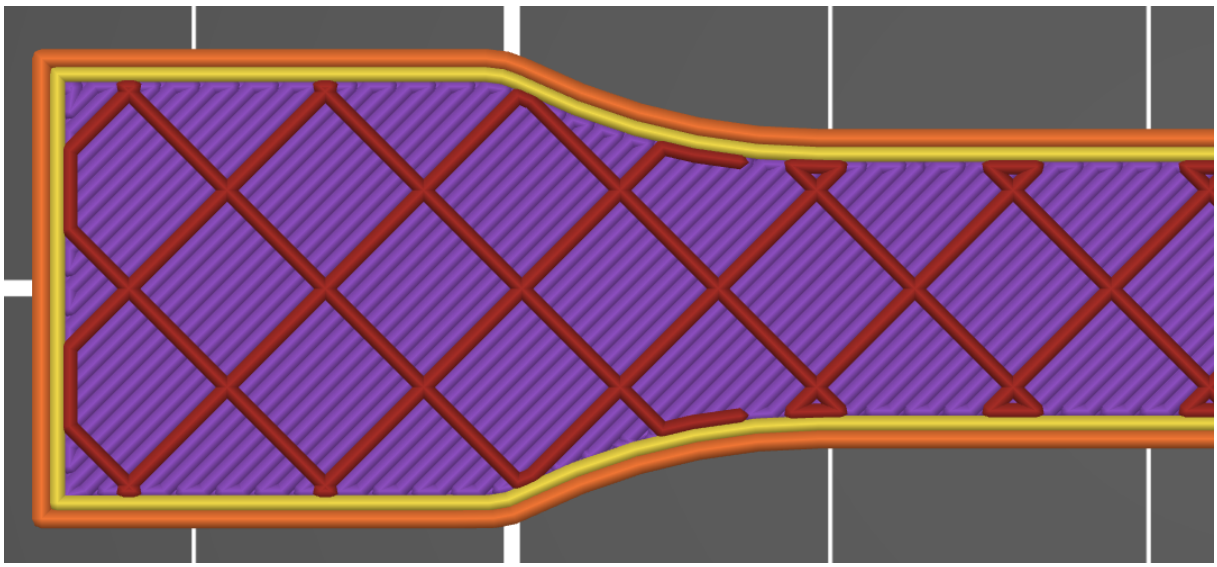
Slika 9: Ispitna epruveta prikazana u sve tri orijentacije sa potpornim materijalom u trećoj orijentaciji (desno).



Izvor: autor

Ipak, napravimo li epruvetu kao paralelopiped sa kvadratnom bazom, postoji opasnost od oštećenja epruvete pri stezanju kod epruveta s nižim postocima ispune, ali ono što je najbitnije, gubimo osnovnu funkciju testne epruvete, a to je njeno suženje. Prema [20] valjanost eksperimenata napravljenih sa standardnim geometrijama epruveta izrađenih aditivnim metodama postavljena je u pitanje zbog loma na prijelazu steznog dijela i struka epruvete umjesto na predviđenoj sredini struka. Problem se javlja na dijelu suženja epruvete, gdje u standardnih epruveta suženje smanjuje površinu poprečnog presjeka proporcionalno s krivuljom suženja. Kako je vidljivo na slici 10, suženje epruvete dešava se samo po stijenci epruvete, dok površina poprečnog presjeka uvelike ovisi i o vrsti i postotku ispune, te se ne mijenja linearno sa suženjem epruvete.

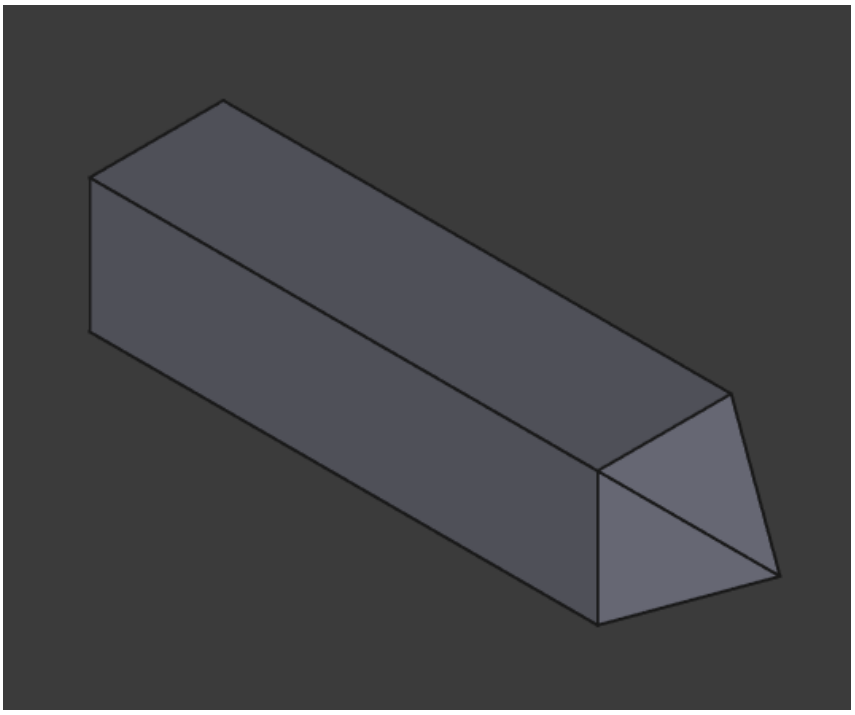
Slika 10: Prikaz suženja epruvete u presjeku.



Izvor: autor

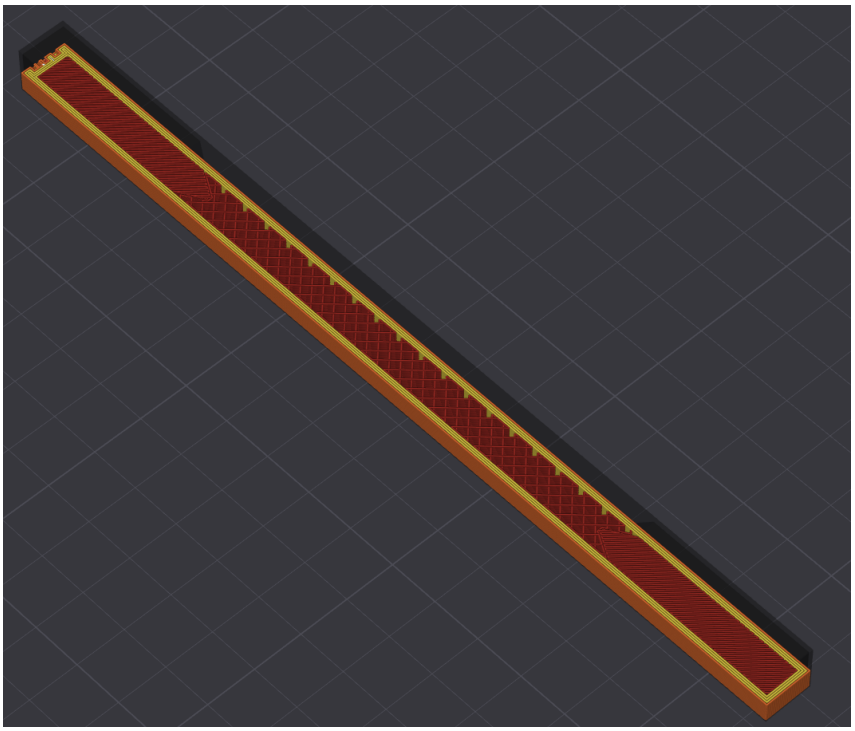
Suženi struk epruvete daje nam manju površinu poprečnog presjeka kako bi mogli garantirati da će zona loma stati u suženi dio. Kako ne možemo pouzdano izraditi struk, a opet želimo dobiti manju površinu poprečnog presjeka u sredini epruvete (zoni loma), možemo napraviti kompromis sa varijacijom postotka ispune kroz dužinu epruvete. Napravimo li da je postotak ispune na prihvatu čeljusti kidalice 100%, sredina epruvete imati će manji postotak ispune te samim time i manju površinu poprečnog presjeka. Na slici 11 prikazan je kraj epruvete koji je izrađen sa 100% ispune, te sa gradijentnim ulazom u zonu loma epruvete kako bi promjena površine poprečnog presjeka bila postepena. Na slici 12 prikazana je epruveta u presjeku te promjene u površini poprečnog presjeka iste.

Slika 11: Okvirna geometrija prihvatnog kraja epruvete koji je potrebno izraditi sa 100% ispune.



Izvor: autor

Slika 12: Epruveta pripremljena s 20% ispune, sa integriranim krajnjim prihvatima s 100% ispune.

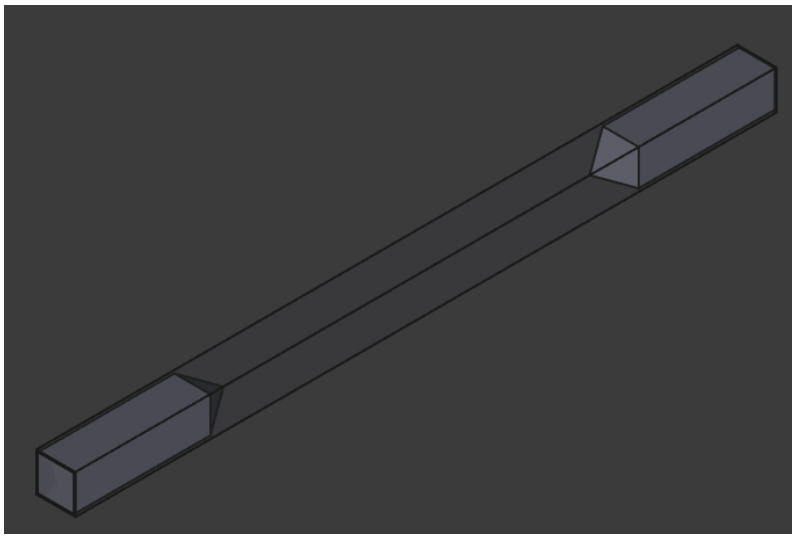


Izvor: autor

3.4.3 Konstrukcija epruveta

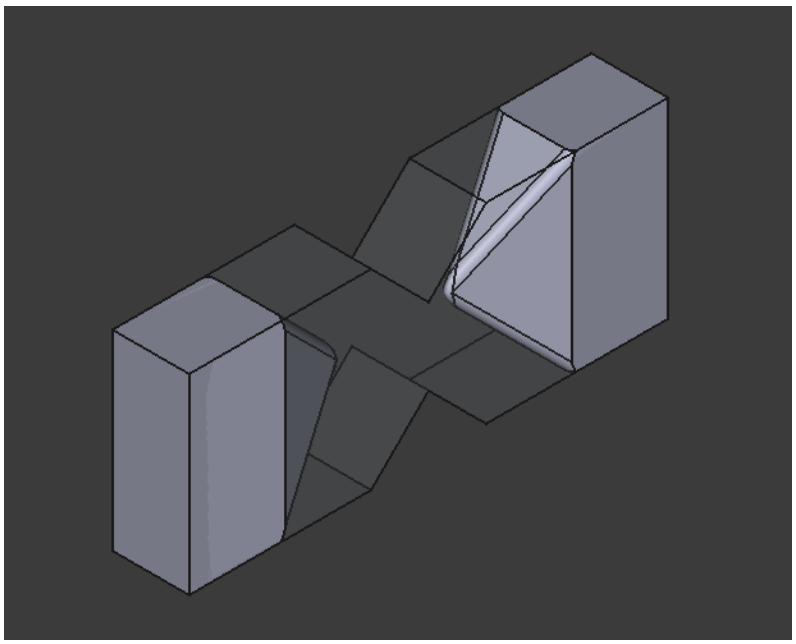
Konstrukcija epruveta napravljena je uzevši u obzir probleme opisane u ovom radu a svi modeli izrađeni su u CAD programu FreeCAD. 3D prikaz epruvete koja će biti podvrgnuta vlačnom testiranju nalazi se na slici 13 dok je prikaz epruvete za smično testiranje na slici 14.
Geometrija epruveta i njihovih prihvata prikazana je na skicama 16 i 15.

Slika 13: 3D prikaz epruvete za testiranje na vlak.



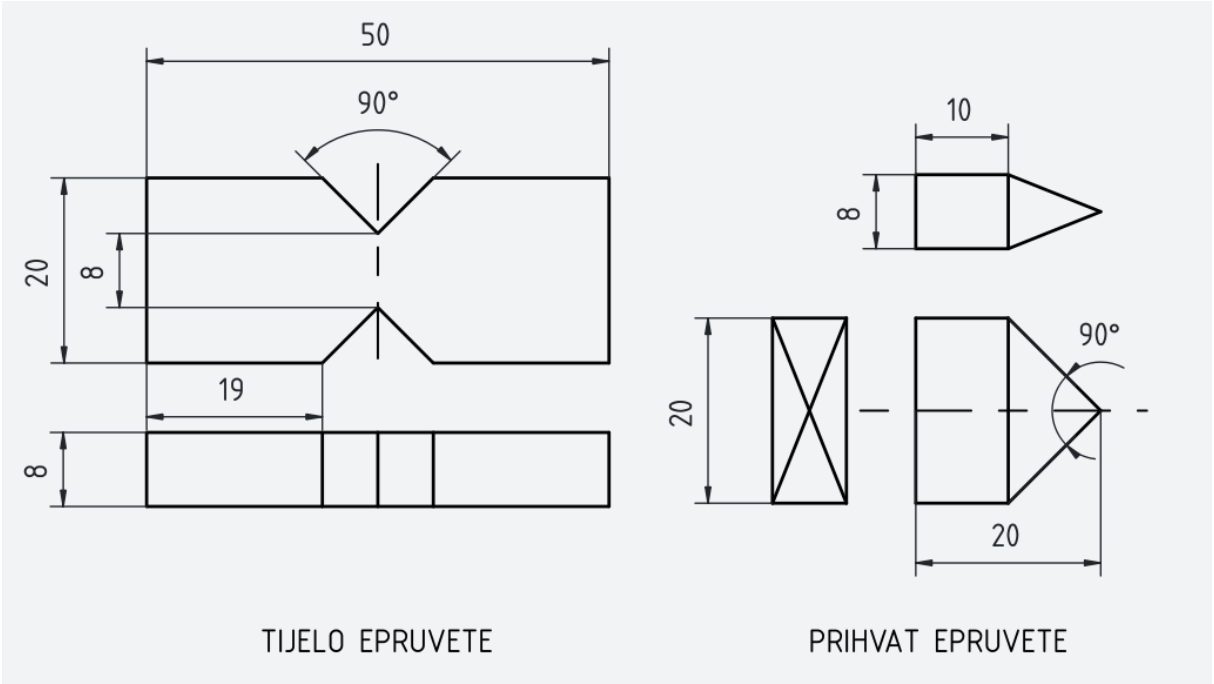
Izvor: autor

Slika 14: 3D prikaz epruvete za testiranje na smik.



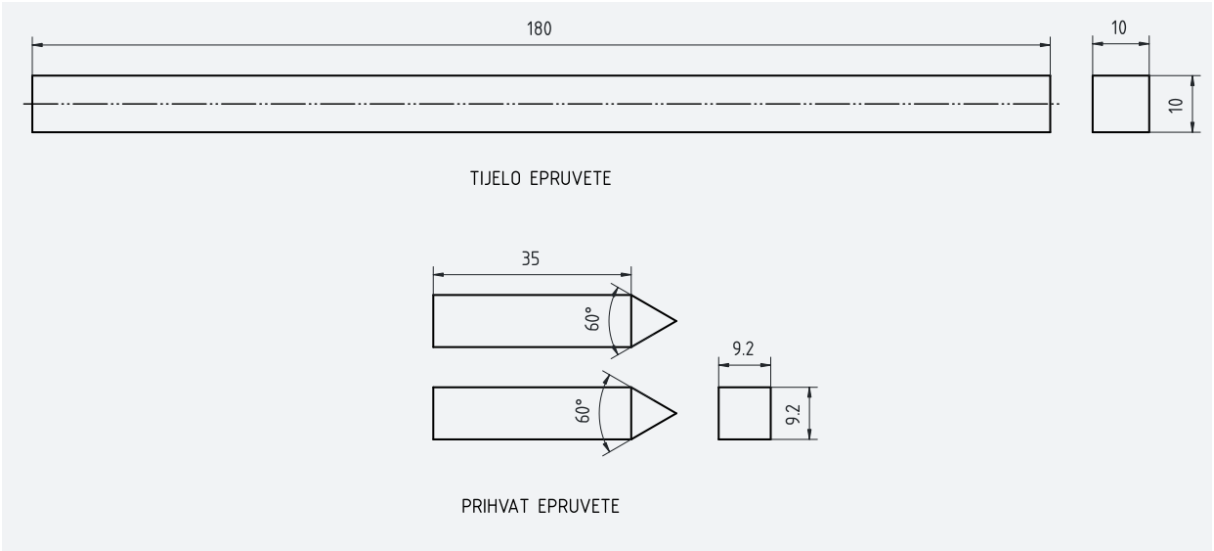
Izvor: autor

Slika 15: Skica za dimenzioniranje epruvete za testiranje na smik.



Izvor: autor

Slika 16: Skica za dimenzioniranje epruvete za testiranje na vlak.



Izvor: autor

3.5 Materijali, oprema i postavke

U svrhu eksperimenta korišteni su sljedeći materijali i oprema, te su sva mehanička ispitivanja odrađena u centru za istraživanje METRIS.

- **3D Printer**
  Bambu Lab P1S FDM pisač odabran je zbog svoje visoke brzine ispisa te zatvorene komore koja osigurava bolju temperaturnu kontrolu cijelog procesa izrade. Opremljen je *AMS (Automatic Material Station)* sustavom za automatsku izmjenu do četiri filamenta, čime je omogućen (u ovom slučaju) kontinuirani rad pri izmjeni role filamenta.

- **Slicer program**
  Bambu Studio, službeni program otvorenog koda (open source) tvrtke Bambu Lab, temeljen na PrusaSliceru. Korišten je za definiranje parametara ispisa, orijentacije i generiranje G-koda za svaki pojedini uzorak.

- **Materijal**
  Odabran je sivi PLA (Polylactide) filament tvrtke AzureFilm promjera 1,75 mm zbog pristupačne cijene i jednostavnosti izrade. Svojstva materijala (definirana od strane proizvođača) prikazana su u tablici 12, svojstva su dobivena na uzorku s parametrima definiranim u tablici 13. Preporučeni parametri ispisa definirani od strane proizvođača dani su u tablici 14.

- **Sušač materijala**
  Kako bi se dobila konzistentnost izrade među uzorcima, uzevši u obzir da je datum proizvodnje različitih rola filamenta nepoznat a samim time i njegova vlažnost, svaka rola filamenta sušena je u sušilici *SUNLU S2 Filament Dryer* na 50 ℃ kroz 8 sati, prema preporuci proizvođača sušilice.

- **Ispitna oprema**
  Za mehaničko ispitivanje korištena je *MESSPHYSIK BETA 250* univerzalna kidalica.

Tablica 12: Mechanical properties of 3D printed PLA specimens

Svojstva 3D printanog uzorka	**Test condition**	**PLA**
Tensile modulus [GPa]	1 mm/min	3,3
Tensile strength [MPa]	50 mm/min	59,0
Strain at break (Tensile) [%]	50 mm/min	4,2
Strain at tensile strength [%]	50 mm/min	3,8
Flexural modulus [GPa]	2 mm/min	2,8
Flexural strength [MPa]	2 mm/min	73,6
Flexural strain at flexural strength [%]	2 mm/min	3,3
Strain at break (Flexural) [%]	2 mm/min	3,3
Charpy unnotched [kJ/m^2]	23 °C	10,4

Izvor: Autor obradio prema [21]

Tablica 13: Parametri za izradu uzorka

3D printer: Creality Ender 3	**Infill:** 20 %	**Nozzle temperature:** 200 °C
Slicer: Cura	**Shells:** 2	**Bed temperature:** 55 °C
Nozzle: 0.4 mm	**Layer height:** 0.2 mm	**Print speed:** 50 mm/s

Izvor: Autor obradio prema [21]

Tablica 14: Preporučene postavke

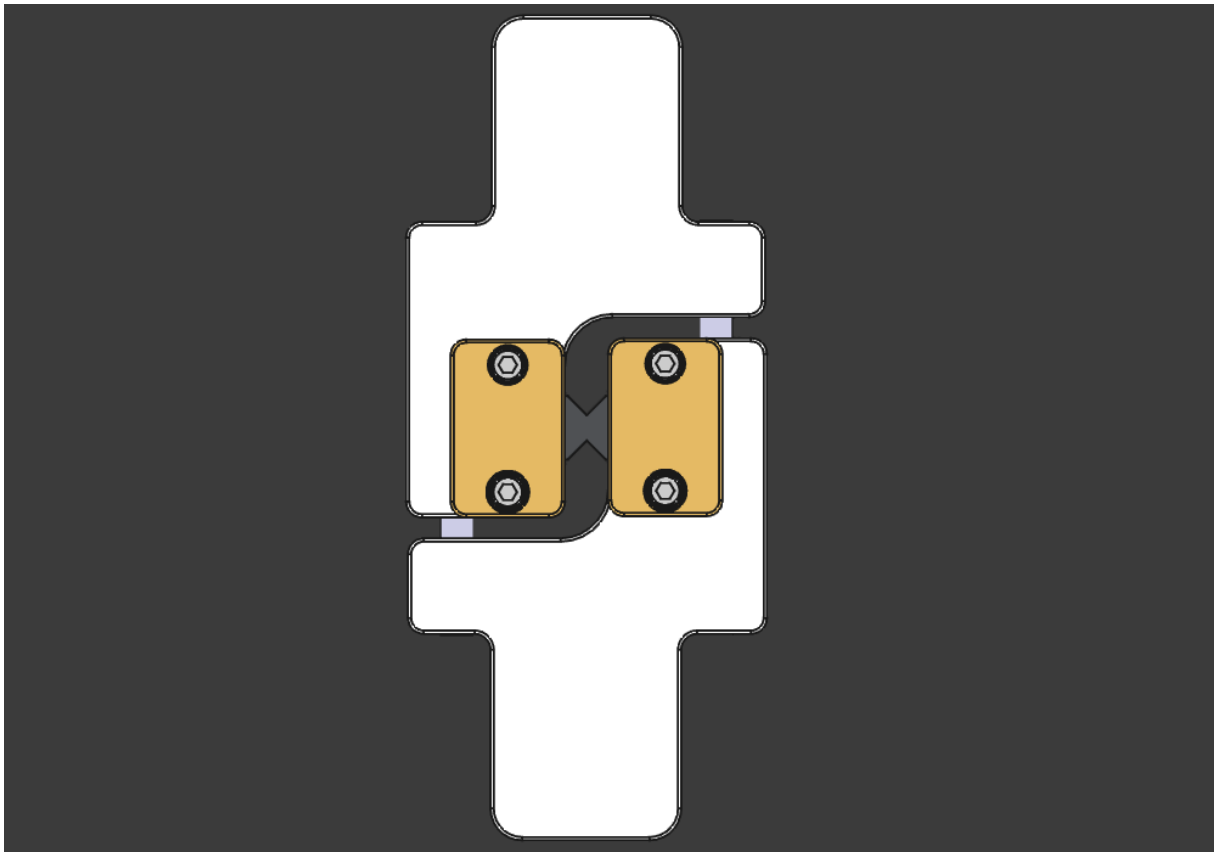
Nozzle temperature:	200–230 °C
Heated bed:	Not required (recommended 50–60 °C)
Print speed:	50–100 mm/s
Build platform:	Blue tape, Kapton tape, Glass bed

Izvor: Autor obradio prema [21]

3.6 Postav za ispitivanje smične čvrstoće

Pošto je jedini dostupni stroj za ispitivanje čvrstoće univerzalna kidalica, ispitivanje smične čvrstoće bit će izvedeno uzorkom s V-utorom na linearnim vodilicama. Potrebno je iz tog razloga napraviti napravu za univerzalnu kidalicu koja će omogućiti da se razvlačenjem naprave ostvari smik u kritičnom presjeku ispitnog uzorka. Po uzoru na [22] napravljena je naprava prikazana na slici 17 koja pomoću dvije čeljusti steže ispitni uzorak opisan u poglavlju 3.4.3 te ga pomoću dvaju linearnih vodilica razvlači na način da u kritičnom presjeku (V-utoru) ostvaruje (gotovo) čisto smično naprezanje.

Slika 17: Prikaz naprave za smično opterećenje epruvete.

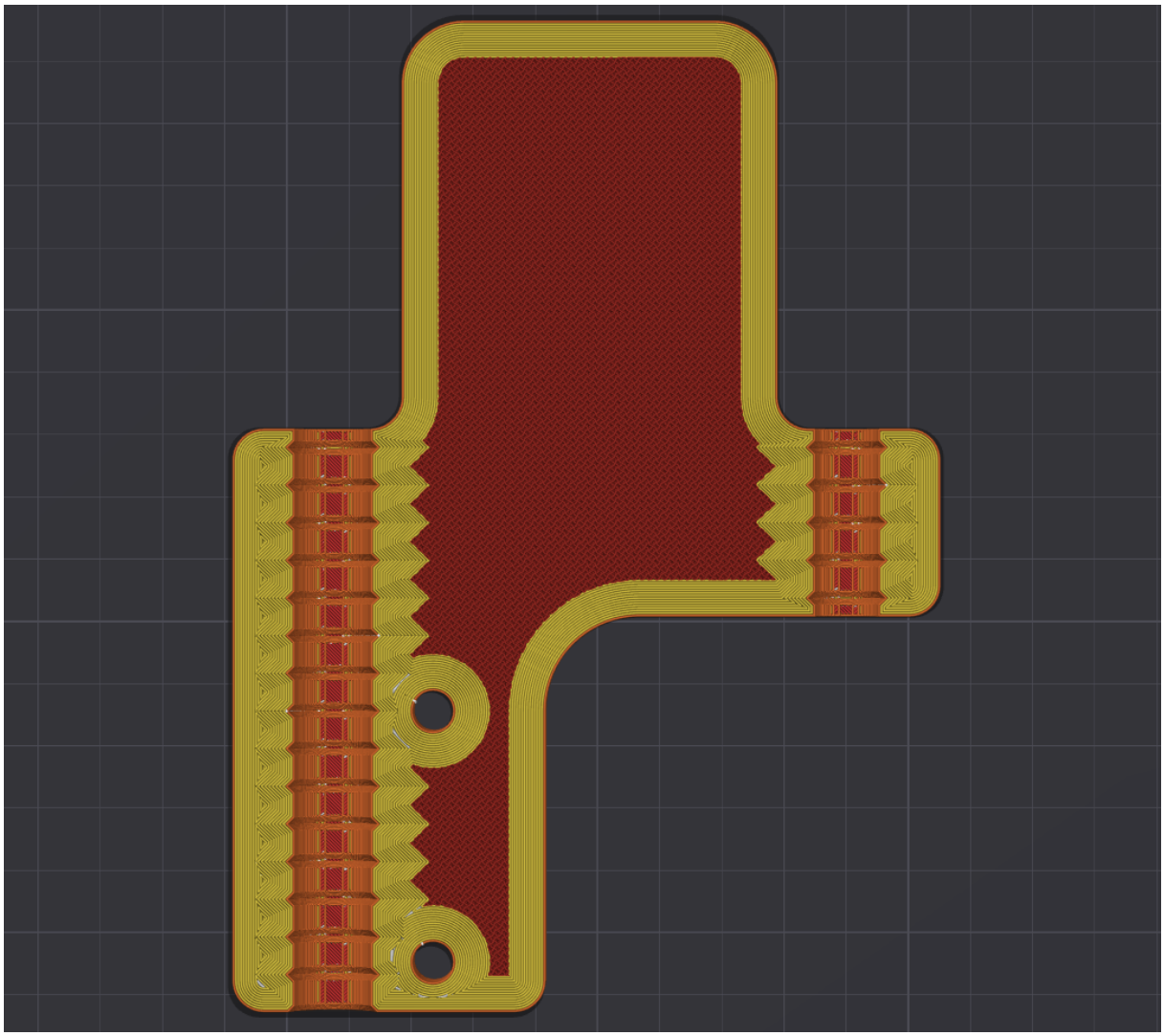


Izvor: autor

S obzirom na to da pristup opremi za obradu odvajanjem čestica nije bio moguć za ovaj rad, naprava će biti izrađena metodom FDM 3D printanja. Iz istog je razloga potrebno voditi računa o krutosti iste kako ne bi došlo do deformacije naprave u razini u kojoj bi dovela točnost mjerenja pomaka u ispitnom uzorku u pitanje. Na slici 18 prikazana je naprava u presjeku, te pripremljena za ispis. Kako bi se osigurala minimalna deformacija naprave u odnosu na ispitni uzorak, površina kritičnog presjeka L-nosača naprave načinjena je da bude preko deset puta veća od površine kritičnog presjeka ispitnog uzorka. Vodilo se računa o tome da slojevi stijenke

kritičnog presjeka (stup na koji se prihvaća ispitni uzorak budu opterećeni na vlak (najpovoljnije), te se broj slojeva stijenke povećao na 15. Ispuna je postavljena na 90%, te je odabrana 3D vrsta ispune ”Gyroid”.

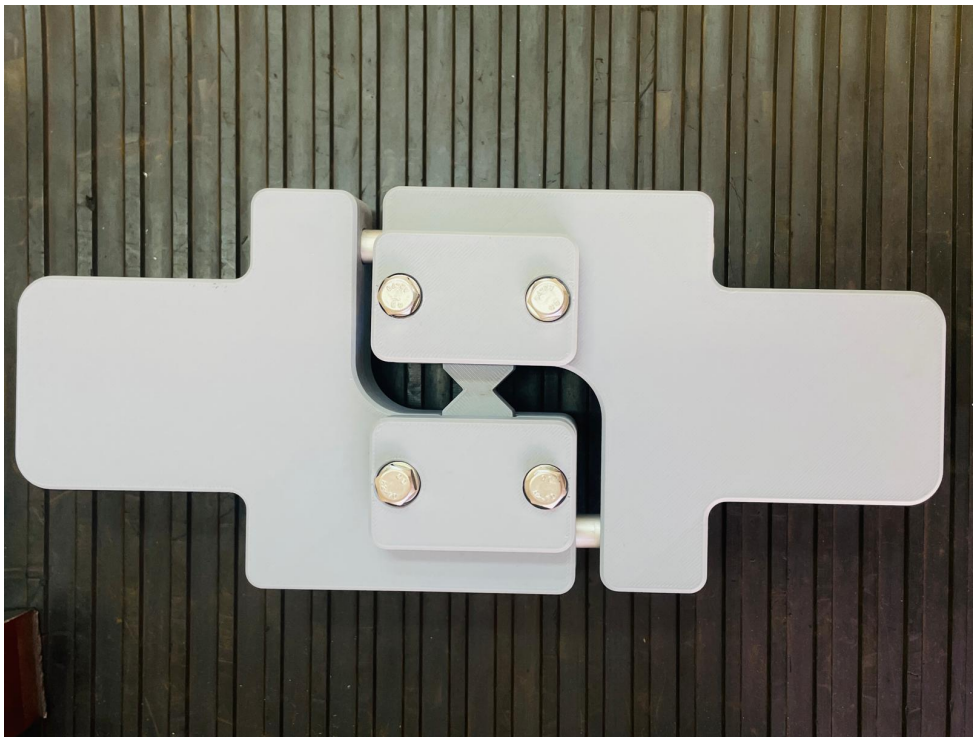
Slika 18: Prikaz naprave za smično opterećenje epruvete, pripremljene za ispis, u presjeku.



Izvor: autor

Vodilice su napravljene od dosjednih aluminijskih cijevi, od kojih je čahura napravljena od cijevi $\emptyset 12\mathrm{mm}$ debljine stijenke 1mm, te je vodilica napravljena od aluminijske cijevi $\emptyset 10\mathrm{mm}$ debljine stijenke također 1mm. Čahura je uprešana u plastični nosač na hladno, te je osigurana samo steznim spojem (isto vrijedi i za vodilicu na drugoj strani nosača). Izrađena naprava nalazi se na slici 19.

Slika 19: Prikaz izrađene naprave za smično testiranje sa ispitnim uzorkom.



Izvor: autor

3.7 Izrada ispitnog uzorka

Ispitni uzorci izrađeni su na 3D printeru *Bambu Lab P1S*, korištenjem programskog paketa *Bambu Studio* za pripremu G-koda. Prije montaže filamenta u *Bambu Lab AMS Station* stanicu za upravljanje filamentom, sve role sušene su u sušilici *SUNLU S2 Filament Dryer* na 50 ℃ kroz 8 sati. Svi parametri ispisa koji nisu varijabilni prema ortogonalnim matricama držani su konstantnima, te su isti navedeni u tablici 15.

Tablica 15: Konstantni parametri ispisa

Parametar	**Vrijednost**
Filament	AzureFilm PLA Original filament Grey
Pripremni volumen filamenta (prime volume)	45mm^2
Promjer filamenta	$1,75\text{mm}$
Temperatura smekšavanja	$45\,℃$
Temperatura mlaznice	$220\,℃$
Temperatura podloge	$55\,℃$
Brzina početnog sloja	55mm/s
Brzina ispisa ispune početnog sloja	$105\text{mm}s$
Brzina ispisa vanjskog zida	200mm/s
Brzina ispisa ispune	230mm/s

Izvor: autor

Nakon ispisa, svaki ispitni uzorak vizualno je pregledan te mjeren pomičnim mjerilom kako bi se provjerila geometrijska točnost, mjerene su bočne stranice s gornje i donje strane ispitnog uzorka, te visina samog ispitnog uzorka (točnost $\pm 0,2mm$), svaka izmjera rađena je 3 puta te je uzet prosjek. Mjerenja ispitnih uzoraka za vlačno ispitivanje prikazana su u tablici 16 dok su mjere ispitnih uzoraka za smično ispitivanje prikazane u tablici 17. Uzorci koji su imali vidljive defekte (delaminacije ili praznine) izuzeti su iz ispitivanja. Izrađeni ispitni uzorci nalaze se na slici 20.

Tablica 16: Dimenzije ispitnih uzoraka (a_o, b_o)

Oznaka uzorka	a_o [mm]	b_o [mm]	Prosjek [a_o, b_o] [mm]
V1	10,00 / 9,99 / 9,99 / 9,99	9,92 / 9,96 / 9,99 / 9,99	10,00 / 9,92
V2	9,99 / 9,99 / 9,98 / 9,97	9,92 / 9,92 / 9,91 / 9,91	9,99 / 9,96
V3	9,85 / 9,89 / 9,90 / 9,89	9,89 / 9,90 / 9,91 / 9,90	9,86 / 9,90
V4	10,00 / 9,99 / 9,99 / 9,99	9,91 / 9,91 / 9,91 / 9,91	10,00 / 9,93
V5	9,99 / 9,99 / 9,99 / 9,98	9,90 / 9,91 / 9,91 / 9,91	9,99 / 9,91
V6	10,00 / 10,00 / 10,00 / 9,99	9,93 / 9,93 / 9,93 / 9,93	9,99 / 9,93
V7	10,00 / 10,00 / 9,99 / 9,98	9,92 / 9,92 / 9,92 / 9,92	9,99 / 9,92
V8	10,00 / 10,00 / 9,99 / 9,99	9,91 / 9,91 / 9,91 / 9,91	10,00 / 9,91
V9	9,99 / 9,99 / 9,99 / 9,99	9,93 / 9,93 / 9,93 / 9,93	9,99 / 9,93
V10	10,00 / 10,00 / 9,99 / 9,99	9,90 / 9,90 / 9,91 / 9,91	10,00 / 9,90
V11	10,00 / 10,00 / 9,99 / 9,99	9,92 / 9,92 / 9,92 / 9,92	9,99 / 9,92
V12	10,00 / 10,00 / 10,00 / 9,99	9,93 / 9,93 / 9,93 / 9,93	10,00 / 9,93
V13	10,00 / 9,99 / 9,99 / 9,99	9,90 / 9,90 / 9,90 / 9,90	9,99 / 9,90
V14	9,99 / 9,99 / 9,99 / 9,99	9,93 / 9,93 / 9,93 / 9,93	9,99 / 9,93
V15	9,99 / 9,99 / 9,99 / 9,99	9,92 / 9,92 / 9,92 / 9,92	9,99 / 9,92
V16	10,00 / 10,00 / 10,00 / 9,99	9,91 / 9,91 / 9,91 / 9,91	10,00 / 9,91
V17	9,99 / 9,99 / 9,99 / 9,99	9,92 / 9,92 / 9,92 / 9,92	9,99 / 9,92
V18	9,99 / 9,99 / 9,99 / 9,99	9,96 / 9,96 / 9,96 / 9,96	9,99 / 9,98

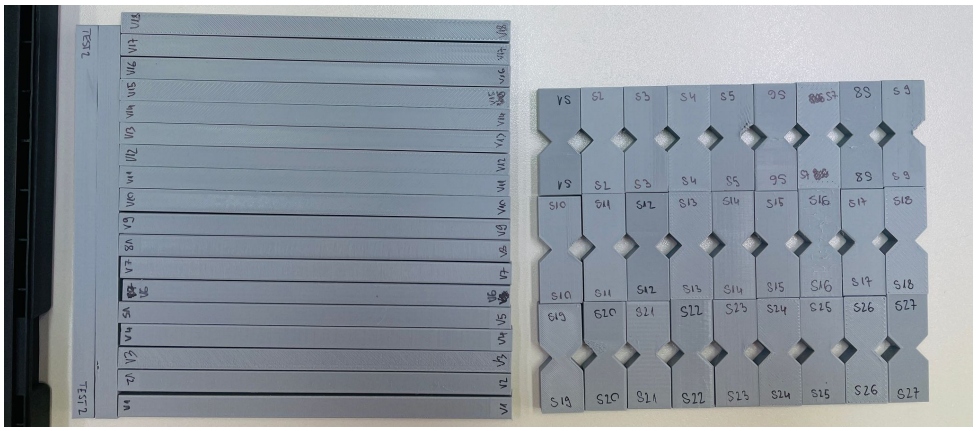
Izvor: autor

Tablica 17: Dimenzije ispitnih uzoraka S1–S27 (a_o i prosjek)

Oznaka uzorka	a_o [mm] (četiri mjerenja)	Prosjek [a_o] [mm]
S1	8,00 / 8,15 / 7,98 / 8,01	8,04
S2	8,02 / 8,02 / 7,98 / 8,02	8,02
S3	7,99 / 7,99 / 8,04 / 8,06	7,99
S4	8,06 / 8,07 / 7,95 / 7,98	8,06
S5	7,98 / 7,98 / 7,98 / 7,96	7,98
S6	7,99 / 7,96 / 7,87 / 7,87	7,99
S7	8,08 / 8,10 / 8,10 / 8,07	8,09
S8	7,95 / 7,94 / 7,96 / 7,87	7,92
S9	7,89 / 7,87 / 8,04 / 7,92	7,88
S10	7,94 / 8,11 / 8,10 / 8,01	7,97
S11	8,09 / 8,10 / 8,01 / 8,04	8,10
S12	8,07 / 8,04 / 8,18 / 8,15	8,04
S13	8,12 / 8,15 / 8,01 / 8,04	8,15
S14	8,00 / 7,95 / 7,91 / 7,91	7,99
S15	8,04 / 7,91 / 7,91 / 8,03	7,94
S16	7,99 / 8,00 / 7,95 / 8,14	8,02
S17	7,88 / 7,84 / 7,85 / 8,19	7,86
S18	8,14 / 8,19 / 8,12 / 8,13	8,17
S19	8,11 / 8,13 / 8,17 / 8,09	8,12
S20	8,07 / 7,97 / 7,95 / 8,02	8,12
S21	8,13 / 8,18 / 7,98 / 8,15	7,98
S22	8,02 / 7,98 / 8,15 / 8,13	8,09
S23	8,07 / 7,99 / 8,12 / 8,15	7,99
S24	8,14 / 8,13 / 7,90 / 7,94	8,14
S25	7,97 / 7,88 / 7,85 / 7,99	7,88
S26	8,15 / 8,18 / 7,95 / 7,92	8,19
S27	8,12 / 7,99 / 7,97 / 7,99	8,02

Izvor: autor

Slika 20: Prikaz svih ispitnih uzoraka.

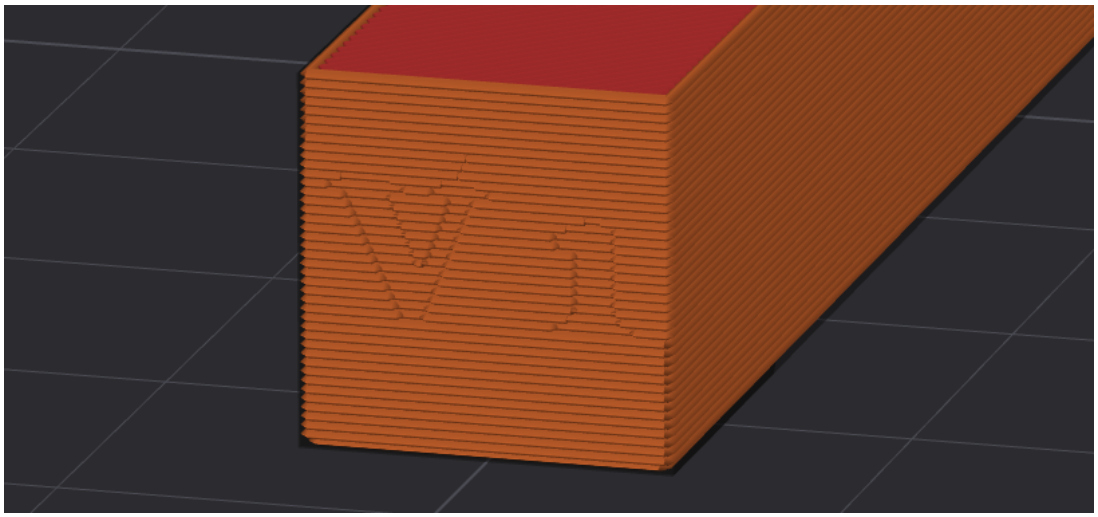


Izvor: autor

3.8 Označavanje ispitnih uzoraka

Ispitni uzorci označeni su graviranjem teksta direktno u slicer programu (prikazano na slici 21). Za vlačne ispitne uzorke korištene su oznake V1-V18, dok su smični ispitni uzorci označeni oznakama S1-S27. Oznake odgovaraju redoslijedu ispitivanja u ortogonalnim matricama, čime je omogućeno praćenje svakog ispitnog uzorka tijekom eksperimenta.

Slika 21: Primjer graviranog teksta na čelu ispitnog uzorka.



Izvor: autor

3.9 Ispitivanje na kidalici

Ispitivanja su provedena na univerzalnoj kidalici *MESSPHYSIK BETA 250* sa sljedećim brzinama:

- **Vlačno ispitivanje**: provedeno brzinom od $5\mathrm{mm}/\mathrm{min}$.
- **Smično ispitivanje**: provedeno brzinom od $5\mathrm{mm}/\mathrm{min}$.

Tijekom svakog testa snimana je sila, a podaci su pohranjeni u računalo povezano s uređajem. Iz izmjerenih vrijednosti sile i poznatog presjeka ispitnog uzorka izračunate su vrijednosti naprezanja $\sigma_{\mathrm{nom}} = F_{\mathrm{m}}/A_{\mathrm{nom}}$ (za vlak) i $\tau_{\mathrm{nom}} = F_{\mathrm{m}}/A_{\mathrm{nom}}$ (za smik).

3.10 Testni postav

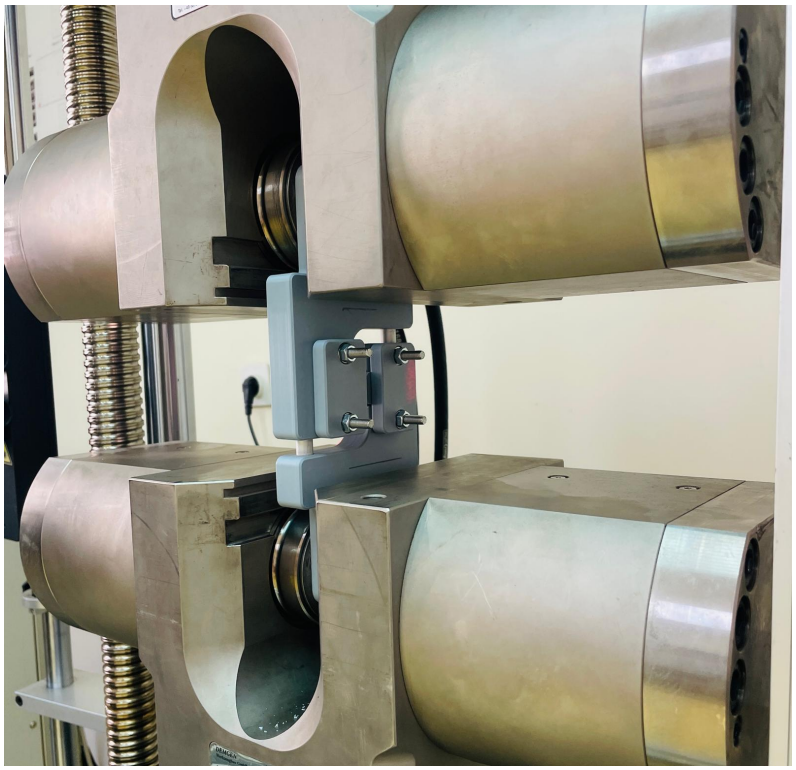
Po dva testna uzorka korištena su za pronalaženje sile pri kojoj čeljusti neće zgnječiti ispitni uzorak, a da isti opet ne sklizne iz čeljusti. Prikaz vlačnog ispitnog uzorka prikazan je na slici 22, dok je primjer smičnog ispitnog uzorka u stroju prikazan na slici 23.

Slika 22: Primjer vlačnog ispitnog uzorka u kidalici.



Izvor: autor

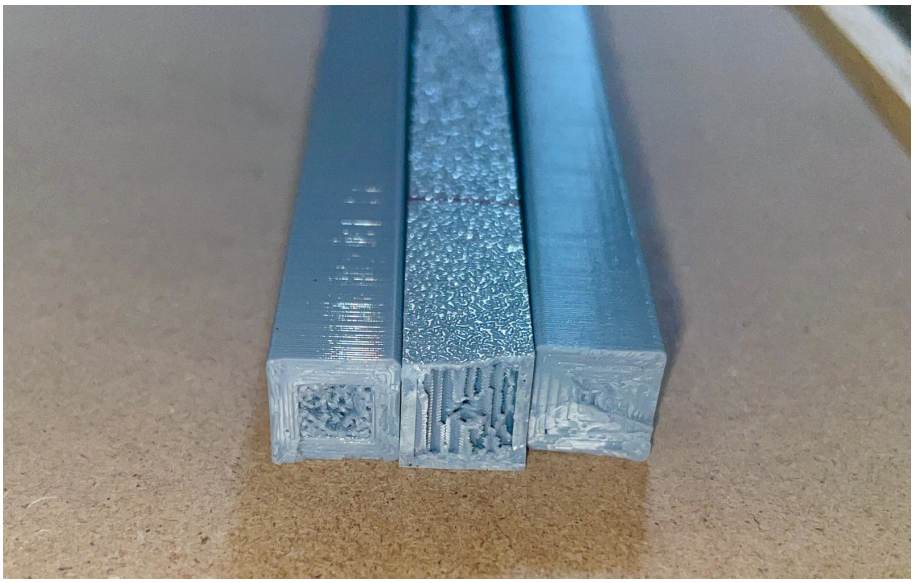
Slika 23: Primjer smičnog ispitnog uzorka u kidalici



Izvor: autor

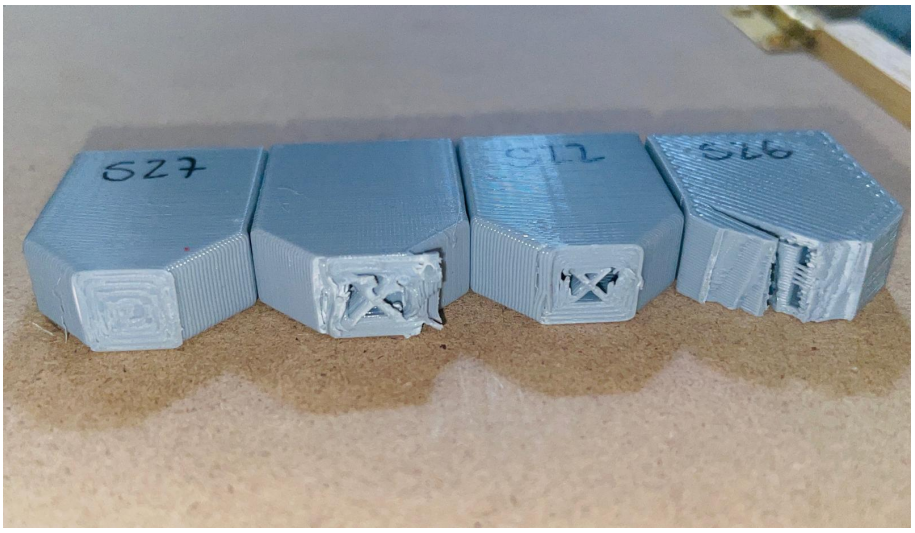
Problem pucanja ispitnog uzorka pri vrhu zone loma nije u potpunosti eliminiran promjenom geometrije epruvete, ali se lom na svim ispitnim uzorcima javljao na sličnoj poziciji (između 20 i 30 milimetara od špica prihvata ispitnog uzorka), tako da su rezultati relativno (međusobno) konzistentni iako nisu za usporedbu s rezultatima drugih istraživanja (što ne bi ni mogli biti zbog nove geometrije ispitnog uzorka). Problem gnječenja prihvata ispitnog uzorka također nije u potpunosti riješen. Prikaz loma ispitnog uzorka ispitivanog na vlak nalazi se na slici 24 dok se primjer loma ispitnog uzorka ispitivanog na smik nalazi na slikama 25 i 26.

Slika 24: Primjer loma vlačnog ispitnog uzorka.



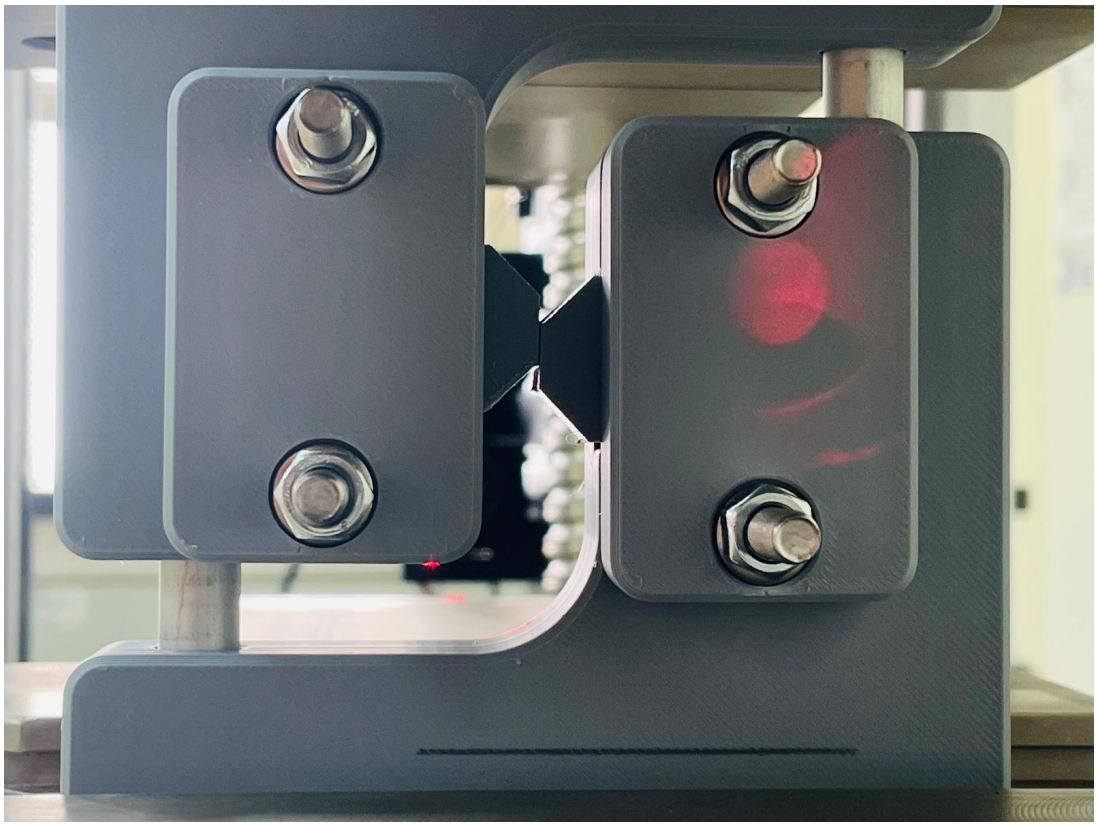
Izvor: autor

Slika 25: Primjer loma simčnog ispitnog uzorka.



Izvor: autor

Slika 26: Primjer loma smičnog ispitnog uzorka u napravi.



Izvor: autor

3.11 Prikupljanje podataka

Za svaki ispitni uzorak zabilježeni su:

- oznaka (Vx ili Sx),
- konfiguracija parametara definirana ortogonalnom matricom,
- vrijednosti sile,
- izračunata naprezanja.

Na taj način dobiven je skup podataka koji se dalje koristi u analizi prema Taguchijevoj metodi.

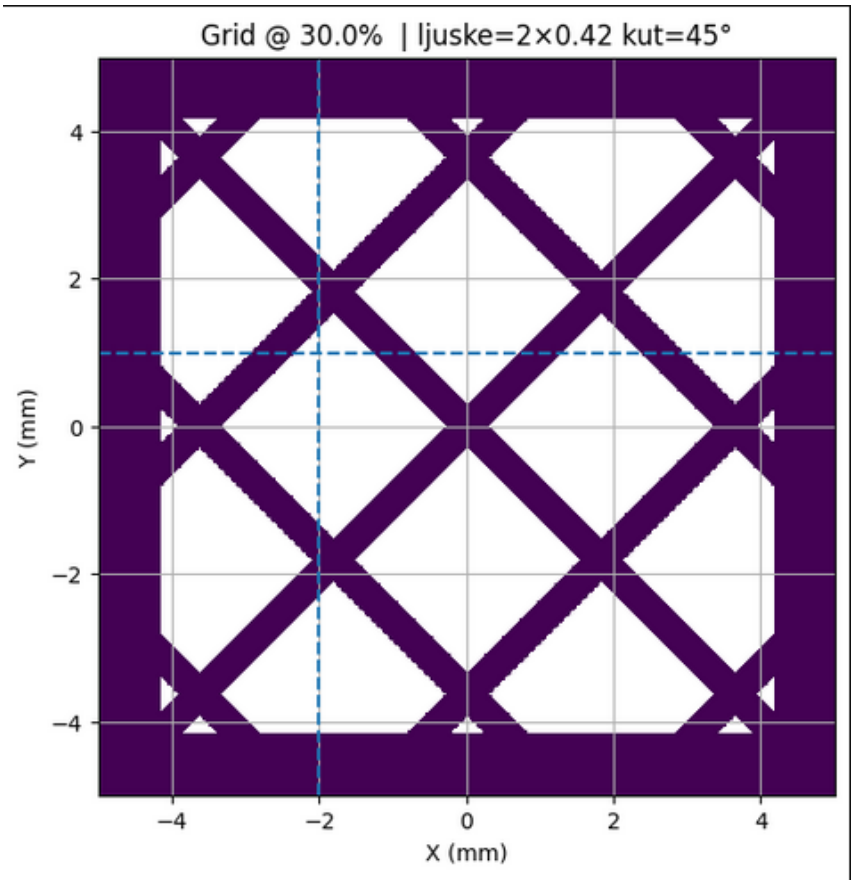
4 Analiza podataka

4.1 Računalna analiza poprečnog presjeka

Za proračun naprezanja potrebno je odrediti stvarne površine poprečnih presjeka ispitnih uzoraka, koje su ovisne o geometriji ispune (vrsti ispune), širini ekstruzije (širini traga), postotku ispune, broju stijenki i orijentaciji slojeva. U tu svrhu napisan je Python alat koji simulira unutarnju strukturu 3D printanog uzorka u 2D rasteru. Na temelju navedenih parametara, program generira booleovu masku koja prikazuje raspored materijala u poprečnom presjeku.

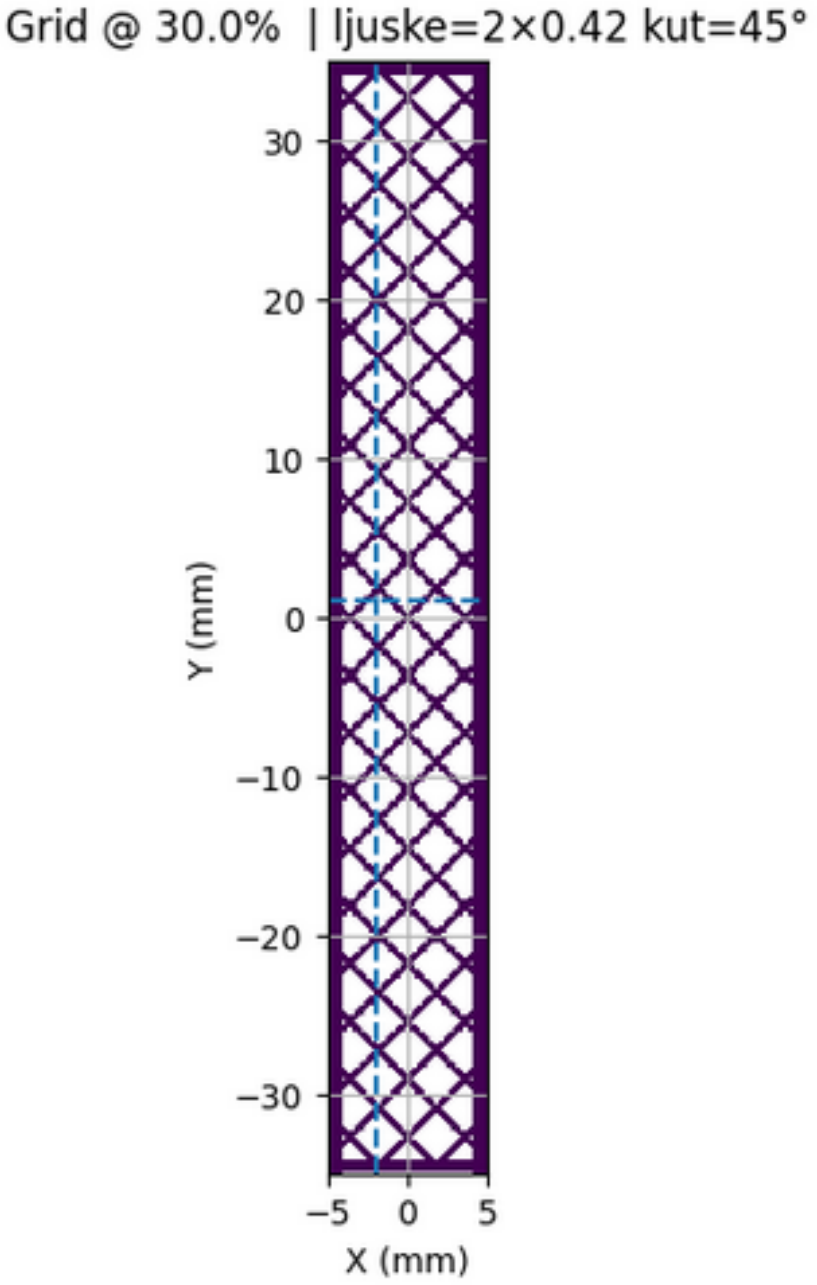
Alat nakon generiranja booleove maske izračunava ukupnu površinu presjeka u XY ravnini (pošto je XY ravnina normalna na Z-os ispisa, ova je površina konstantna u 2D ispunama) te površine presjeka u ravninama paralelnim s XZ i YZ ravninama (što je relevantno za različite orijentacije ispisa). Primjer vizualizacije presjeka za obije orijentacije potrebne za vlačno testiranje nalazi se na slikama 27, 28.

Slika 27: 2D prikaz ispune ispitnog uzorka u orijentaciji uspravnog ispisa.



Izvor: autor

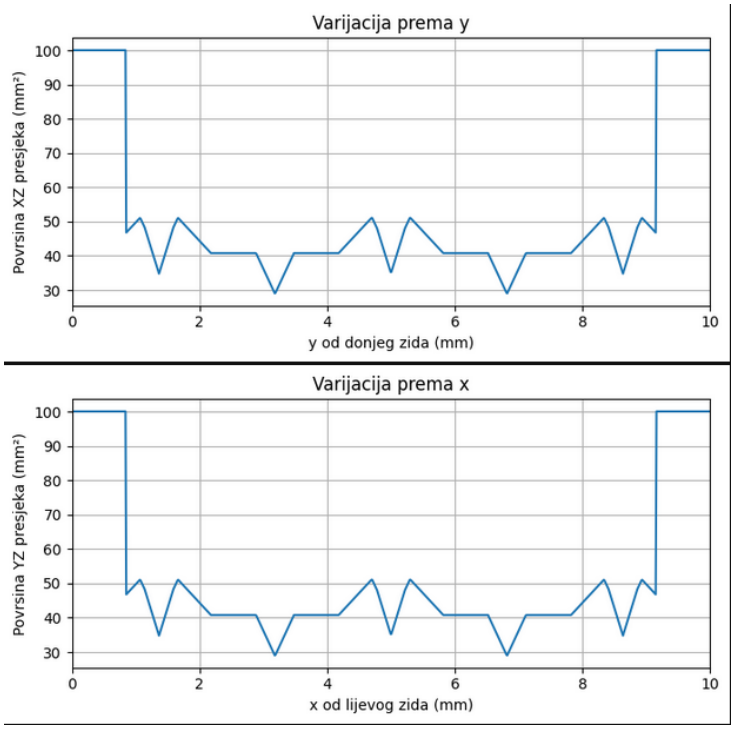
Slika 28: 2D prikaz ispune ispitnog uzorka u orijentaciji ležećeg ispisa.



Izvor: autor

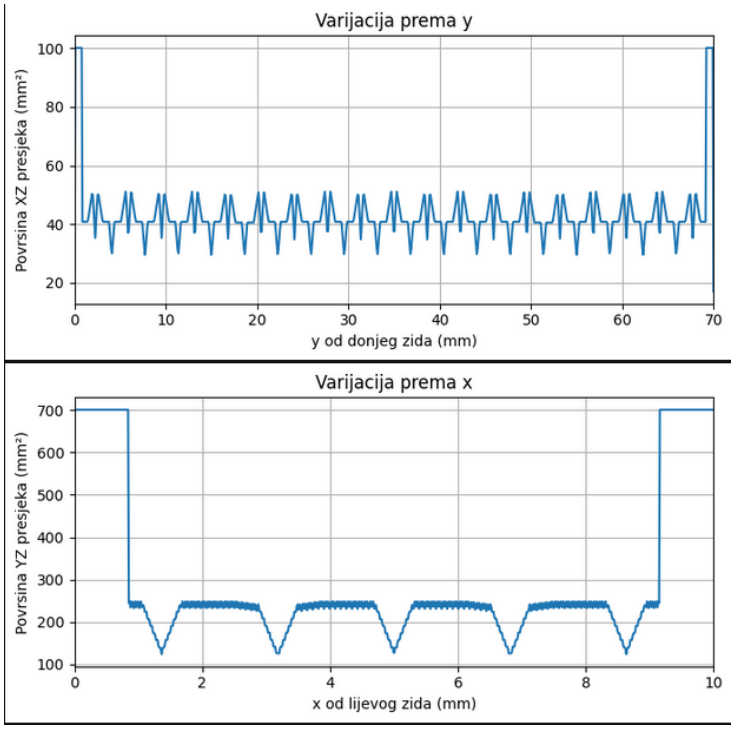
Iako 2D ispune ne mijenjaju površinu poprečnog presjeka kroz Z-os, u ostale dvije dimenzije ona se svakako mijenja, kako bi se odredilo koliko se točno mijenja, napravljen je graf promjene površine u odnosu na duljinu modela, te automatski proračun površine paralelne sa XZ i YZ ravninama za zadanu x i y dimenziju. Na slikama 29, 30 prikazane su promjene površina u odnosu na njihove referentne ravnine.

Slika 29: Promjena površine po X i Y osi za presjek na slici 27. Izvor: autor.



Izvor: autor

Slika 30: Promjena površine po X i Y osi za presjek na slici 28. Izvor: autor.



Izvor: autor

Za slučaj potrebe izračuna površine poprečnog presjeka u točnoj ravnini, moguć je upis zasebne visine na x i y osi, te je nakon izvršavanja programa ispisana i površina u odnosu na te referentne osi u sljedećem formatu:

```
==== Grid ispuna 30.0% ====
XY ukupna povrsina     = 301,7364 mm^2,
  Povrsina ljuski      = 132,4033 mm^2,
  Povrsina ispune      = 169,3331 mm^2,
-- Presjeci kroz Z (uzorak konstantan po Z) --
Duzina po X @ y=1,000 mm: 4,0801 mm,
Duzina po Y @ x=-2,000 mm: 19,0989 mm,
Povrsina XZ @ y=1,000: 40,8010 mm^2  (Z=10,000 mm),
Povrsina YZ @ x=-2,000: 190.9887 mm^2  (Z=10,000 mm),

A_xz(y=1mm) = 40,80100125156456 mm^2,
A_yz(x=-2mm) = 190,9887359198926 mm^2.
```

Uzevši u obzir da je Bambu Lab Slicer program otvorenog koda, matematički model i način generiranja mrežaste (Grid) ispune preuzet je iz istog, te prepisan iz programskog jezika C++ u programski jezik Python, te dorađen za 2D prikaz. Izračun površina proveden je pomoću vlastitog Python programa izvršavanog u JupyterLab okruženju (vidi Prilog A).

4.2 Obrada rezultata vlačnog ispitivanja

Nakon odrađenog vlačnog ispitivanja na kidalici, zabilježene su sile prikazane u tablici 18. Svaki uzorak ispitivan je do loma, te je zabilježena najveća sila u procesu ispitivanja.

4.2.1 Signal-šum omjer rezultata vlačnog ispitivanja

Primjenom Taguchijeve metode i izračuna signal-šum (S/N omjer) moguće je odrediti koji parametri ispisa imaju najveći utjecaj na čvrstoću uzoraka te identificirati optimalne kombinacije parametara. Za svaki uzorak, pomoću maksimalne sile F_{m} pri lomu, izračunata je vlačna čvrstoća prema izrazu:

$$\sigma_{\mathrm{nom}} = \frac{F_{\mathrm{m}}}{A_{\mathrm{nom}}} \tag{3}$$

gdje je A_{nom} površina nominalnog poprečnog presjeka epruvete kada bi bila potpuno ispunjena.

Nominalnu površinu koristimo kako bi svi uzorci imali istu referencu za računanje naprezanja. Budući da je unutrašnjost ispitnog uzorka kompleksna, te površina poprečnog presjeka nije konstanta, niti je jednostavnog oblika, korišten je program opisan u poglavlju 4.1 kako bi se odredila minimalna površina poprečnog presjeka, te uzročno posljedično i naprezanje (σ_{ef}) koje bi se pojavilo kada bi ispitni uzorak zbilja puknuo u presjeku s najmanjom površinom.

Za svaku eksperimentalnu kombinaciju iz ortogonalne matrice L18 (tablica 9) izračunat je signal-šum (S/N) omjer prema izrazu 1. Gdje je y_i izmjerena vrijednost čvrstoće u i-tom ponavljanju, a n broj ponavljanja. Budući da je svaki ispitni uzorak (zbog ograničenih resursa) ispitivan samo jednom, izraz 1 možemo pretvoriti u izraz 4 (za vlak). Za svaki rezultat izračunat je S/N omjer (pripadajući za taj slučaj) prema kriteriju "što je vrijednost viša, to je bolja".

$$\text{S/N} = -10 \cdot \log_{10}\left(\frac{1}{\sigma_{\text{nom}}^2}\right) = 20 \cdot log_{10}\left(\sigma_{\text{nom}}\right) \tag{4}$$

Tablica 18: Rezultati vlačnog ispitivanja

Eksperiment	A_{nom} [mm^2]	A_{min} [mm^2]	F_{m} [kN]	σ_{nom} [MPa]	σ_{ef} [MPa]	S/N [dB]
1	100	44,493	0,778	7,78	17,4859	17,8196
2	100	87,819	3,299	32,99	37,5659	30,3676
3	100	100	0,794	7,94	7,9400	17,9964
4	100	87,6308	2,792	27,92	31,8609	28,9183
5	100	91,5613	2,468	24,68	26,9546	27,8469
6	100	93,9905	2,871	28,71	30,5456	29,1607
7	100	92,7473	2,423	24,23	26,1247	27,6871
8	100	96,3896	1,891	18,91	19,6183	25,5338
9	100	79,2649	2,431	24,31	30,6693	27,7157
10	100	35,669	3,398	33,98	95,2648	30,6245
11	100	36,045	3,218	32,18	89,2773	30,1517
12	100	26,908	2,768	27,68	102,869	28,8433
13	100	32,415	2,472	24,72	76,2610	27,8610
14	100	24,155	2,527	25,27	104,616	28,0521
15	100	42,804	3,647	36,47	85,2023	31,2387
16	100	26,909	2,491	24,91	92,5713	27,9275
17	100	44,555	4,111	41,11	92,2680	32,2789
18	100	15,895	2,263	22,63	142,372	27,0937

Izvor: autor

Nakon što smo odredili sve vrijednosti za signal-šum omjere, moguće je onda odrediti srednji signal-šum svih razina svakog faktora u tablici 9, srednju čvrstoću svake razine svakog parametra, te finalno i razliku maksimalnog i minimalnog signal-šum omjera svake razine svakog faktora. Sa tim podacima, možemo napraviti predikciju optimalne kombinacije signal-šum omjera. Svi navedeni podaci prikazani su u tablici 19.

Tablica 19: Analiza faktora s prosječnim vrijednostima S/N i čvrstoće

Faktor	Razina	S/N [dB]	$\bar{\sigma}$ [MPa]	Δ (S/N)	Optimalna kombinacija S/N
Orijentacija	1	25,8940	21,94	3,4473	2
	2	29,3413	29,88		
Visina sloja [mm]	0,08	25,9672	23,76	3,2725	0,14
	0,14	28,8463	27,96		
	0,28	28,0395	26,02		
Širina ekstruzije [mm]	0,4	26,8063	23,92	2,8791	0,6
	0,6	29,0385	29,19		
	0,8	27,0081	24,62		
Postotak ispune [%]	20	26,2701	22,49	2,3673	55
	55	28,6374	27,18		
	85	27,9454	28,07		
Broj slojeva stijenke	2	26,2286	22,06	2,2322	4
	4	29,5010	30,22		
	6	27,1234	25,46		

Izvor: autor

4.2.2 ANOVA analiza rezultata vlačnog ispitivanja

ANOVA metodu provesti ćemo po postupku opisanom u poglavlju 2.7.
Izračunamo li srednju srednju vrijednost (μ) naprezanja σ svakog eksperimenta te zbroj kvadrata odstupanja točaka od srednje vrijednosti za skup svih σ, uz broj uzoraka $\mathrm{N} = 18$, dobivamo vrijednosti iz izraza 6 te izraza 5.

$$\mu = \bar{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^{N}(\sigma_i)}{N} = 25.912\mathrm{MPa} \tag{5}$$

$$SS_{ukupno} = \sum_{i=1}^{N}(\sigma_i) = 1233.228\mathrm{MPa}^2 \tag{6}$$

Sada je moguće izračunati zbrojeve kvadrata za svaki faktor ($\mathrm{SS_f}$) prema izrazu 7 koji predstavlja dio ukupne varijacije koji se može pripisati glavnom učinku faktora za koji se računa.

$$SS_f = \sum_{j=1}^{l} n_j(\bar{\sigma}_j - \bar{\sigma})^2 \tag{7}$$

Srednji kvadrat definiran je izrazima 8 i 9 te opisuje prosječni varijabilitet koji objašnjava faktor po jednom stupnju slobode i ”ostatak”, tj. preostali varijabilitet koji model nije objasnio.

$$\mathrm{MS_f} = \frac{\mathrm{SS_f}}{\mathrm{SL_f}} \tag{8}$$

$$\mathrm{MS_E} = \frac{\mathrm{SS_E}}{\mathrm{SL_E}} \tag{9}$$

Stupnjevi slobode govore koliko je neovisnih informacija dostupno za procjenu varijabilnosti.

Ukupni broj stupnjeva slobode (definiran izrazom 10) je zapravo ukupan broj ispitnih uzoraka, umanjen za jedan jer jedno od N mjerenja koristimo za procjenu ukupnog prosjeka μ, dok je broj stupnjeva slobode faktora s a razina (definiran izrazom 11) umanjen za jedan jer se jedna razina koristi za kontrast u odnosu na μ.

$$\mathrm{SL}_{\mathrm{ukupno}} = \mathrm{N} - 1 \tag{10}$$

$$\mathrm{SL}_{\mathrm{faktor}} = \mathrm{a} - 1 \tag{11}$$

U tablici 20 prikazane su vrijednosti zbroja kvadrata, stupnjeva slobode te srednjih kvadrata za svaki faktor i njegove razine.

Tablica 20: Sume kvadrata faktora vlačnog testa

Faktor	$\bar{\sigma}$	n	μ^2	$\mathrm{n} \cdot \mu^2$
Orijentacija				
1	21,9411	9	15,7697	141,9275
2	29,8833	9	15,7697	141,9275
Zbroj kvadrata				283,8550
Stupnjevi slobode				1
Srednji kvadrat				283,8550
Visina sloja [mm]				
0,08	23,7583	6	4,6392	27,8354
0,14	27,9617	6	4,2002	25,2013
0,28	26,0167	6	0,0109	0,0655
Zbroj kvadrata				53,1022
Stupnjevi slobode				2
Srednji kvadrat				26,5511
Širina ekstruzije [mm]				
0,4	23,9233	6	3,9557	23,7347
0,6	29,19	6	10,7438	64,4629
0,8	24,6233	6	1,6612	9,9674
Zbroj kvadrata				98,1644
Stupnjevi slobode				2
Srednji kvadrat				49,0822
Postotak ispune [%]				
20	22,4883	6	11,7230	70,3381
55	27,18	6	1,6073	9,6436
85	28,0683	6	4,6489	27,8929
Zbroj kvadrata				107,8745
Stupnjevi slobode				2
Srednji kvadrat				53,9377
Broj slojeva stijenke				
2	22,0583	6	14,8525	89,1148
4	30,215	6	18,5139	111,0834
6	25,4633	6	0,2015	1,2090
Zbroj kvadrata				201,4071
Stupnjevi slobode				2
Srednji kvadrat				100,7036

Izvor: autor

Pogreška predstavlja sve što nije objašnjeno glavnim učincima u modelu, te je definirana izrazom 12. Uzevši u obzir da (zbog ograničenja eksperimenta) nemamo više ispitivanja istih

ispitnih uzoraka, pogreška će sadržavati interakcije među faktorima (jer ih ne procjenjujemo), stohastični šum procesa (varijacije u ispisu, temperaturama, mjerenju itd.) te neubrojene kovarijante (neidealnu adheziju, točne poprečne presjeke, interakciju geometrije ispune i stijenke itd.). Pogreška u ovom slučaju zato neće nužno predstavljati grešku u mjerenju, već neobjašnjene varijacije u rezultatu.

$$\mathrm{SS_E} = \mathrm{SS_{ukupno}} - \sum_{f} \mathrm{SS_f} \tag{12}$$

F-omjer, opisan izrazom 13, predstavlja usporedbu varijabilnosti zbog faktora te preostale (rezidualne) varijabilnosti. Velika F vrijednost govori da se razine u tom faktoru razlikuju više nego što bi se očekivalo od slučajnog šuma, te je kao takva pokazatelj statističke značajnosti faktora na finalni rezultat.

$$\mathrm{F_f} = \frac{\mathrm{MS_f}}{\mathrm{MS_e}} \tag{13}$$

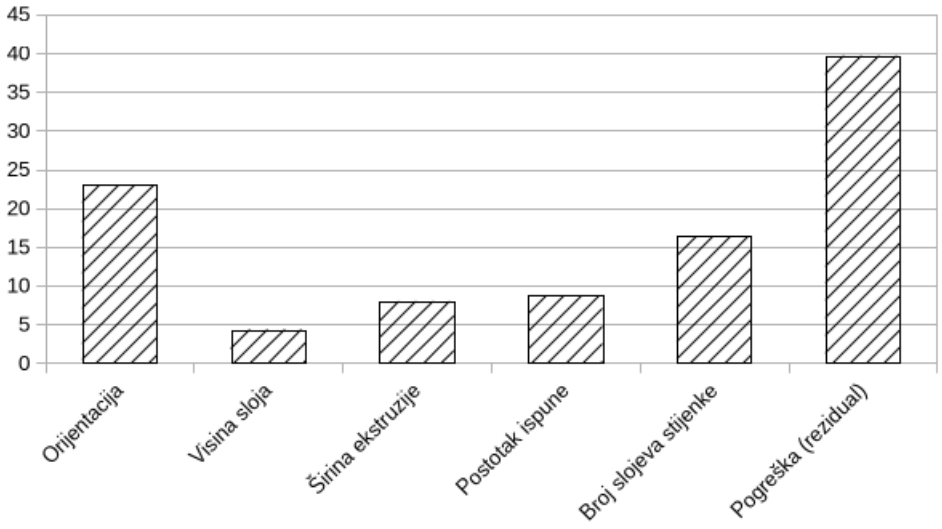
Sažetak cijele analize, te udio varijabiliteta svakog faktora prikazan je u tablici 21, dok su udjeli varijabiliteta prikazani grafički na slici 31.

Tablica 21: Sažetak ANOVA tablice ispitivanja na vlak

Faktor	**SS**	**SL**	**MS**	**F-omjer**	**Udio varijabiliteta [%]**
Orijentacija	283,8550	1	283,8550	4,6455	23,0172
Visina sloja	53,1022	2	26,5511	0,4345	4,3060
Širina ekstruzije	98,1644	2	49,0822	0,8033	7,9600
Postotak ispune	107,8745	2	53,9373	0,8827	8,7473
Broj slojeva stijenke	201,4071	2	100,7036	1,6481	16,3317
Pogreška (rezidual)	488,8245	8	61,1031		39,6378
Ukupno	1233,2279	17			100,0000

Izvor: autor

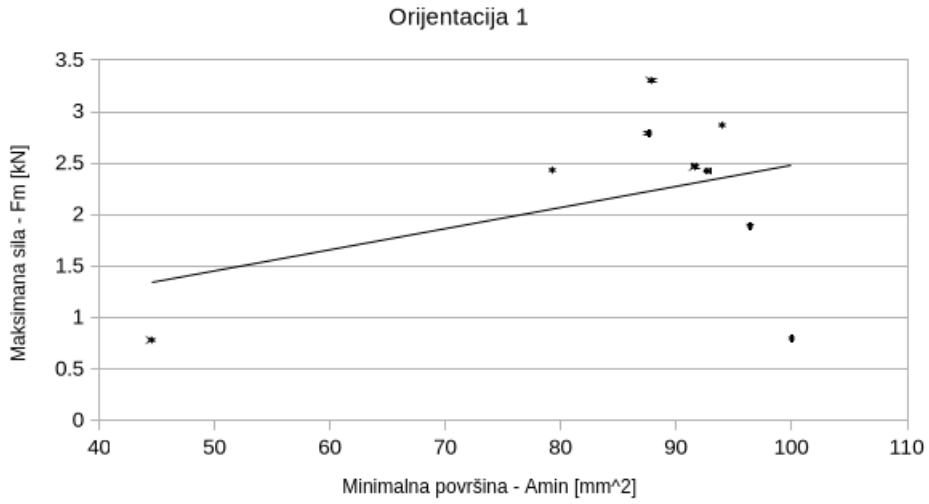
Slika 31: Udio varijabiliteta svakog faktora i greške.



Izvor: autor

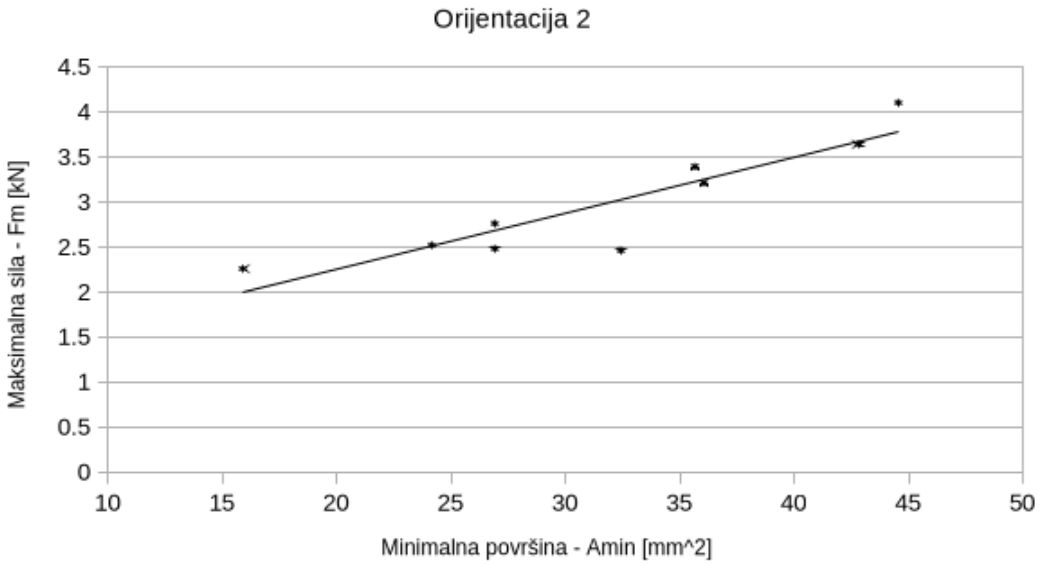
Promatranjem ove analize moguće je primijetiti kako su čvrstoće u tablicama podijeljene u dva dijela, te je granica dijeljenja zapravo promjena orijentacija (što i ima smisla te isto pokazuje i tablica 21). Orijentacija je jedini parametar u ovom setu faktora koji ne utječe direktno na izmjenu površine poprečnog presjeka (utječe indirektno rotiranjem same rešetke ispune). Uzmemo li onda minimalne površine poprečnih presjeka A_{min} izračunate programom opisanim u poglavlju 4.1 (upisane u tablici 18) te sile postignute za svaki uzorak možemo napraviti grafove 32 i 33.

Slika 32: Minimalna površina poprečnog presjeka uzorka A_{min} u odnosu na maksimalnu silu F_{m} za uzorke s orijentacijom 1.



Izvor: autor

Slika 33: Minimalna površina poprečnog presjeka uzorka A_{min} u odnosu na maksimalnu silu F_{m} za uzorke s orijentacijom 2.



Izvor: autor

Tumačenje ovisnosti sile o minimalnoj površini poprečnog presjeka možemo dobiti jednadžbama pravaca trendova. Jednadžba pravca linije trenda sa slike 32 prikazana je u izrazu 14, dok je jednadžba pravca linije trenda sa slike 33 prikazana u izrazu 15.

$$F_{\text{m}}(A_{\text{min}}) = 0,0207A_{\text{min}} + 0,415 \tag{14}$$

$$F_{\text{m}}(A_{\text{min}}) = 0,0627A_{\text{min}} + 1,001 \tag{15}$$

Moguće je primijetiti kako je pri orijentaciji 1 (vertikalna orijentacija) prosječni porast sile (F_{m}) po jedinici površine (mm^2) 20,7N, dok je za orijentaciju 2 ista vrijednost 62,7N. Izračunamo li sada korijensku srednju kvadratnu pogrešku, kako bi saznali kolika bi bila pogreška kada bi silu predviđali iz površine, dobivamo izraze 16 i 17.

$$RMSE_{\text{or1}} = \sqrt{\frac{1}{n-2}\sum_{i=1}^{n}\left(F_{m-or1,i} - \hat{F}_{m-or1,i}\right)^2} = 0,8724\text{kN} \tag{16}$$

$$RMSE_{\text{or2}} = \sqrt{\frac{1}{n-2}\sum_{i=1}^{n}\left(F_{m-or2,i} - \hat{F}_{m-or2,i}\right)^2} = 0,2829\text{kN} \tag{17}$$

gdje je $\hat{F}_{m,i} = a \cdot A_{\min,i} + b$ sila predviđena regresijskim pravcem (prema 14 i 15 za orijentacije 1 i 2), dok je $\bar{F}_m$ aritmetička sredina izmjerenih sila, a n broj uzoraka. Kako bi mogli definirati koliko dobro linearni model objašnjava naše podatke, možemo izračunati koeficijent

determinacije prema izrazima 18 i 19.

$$R^2_{\text{or1}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(F_{m-or1,i} - \hat{F}_{m-or1,i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(F_{m-or1,i} - \bar{F}_{m-or1}\right)^2} = 0,151 \tag{18}$$

$$R^2_{\text{or2}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(F_{m-or2,i} - \hat{F}_{m-or2,i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(F_{m-or2,i} - \bar{F}_{m-or2}\right)^2} = 0,872 \tag{19}$$

Analizom izraza 18 i 19 možemo primijetiti kako za orijentaciju 1 (vertikalnu orijentaciju ispisa), samo 15% varijabilnosti sile moguće je objasniti linearnom ovisnošću o površini, dok je za orijentaciju 2 (horizontalnu orijentaciju) ta vrijednost čak 87%.

Iako su vrijednosti vrlo raspršene, očit je trend porasta maksimalne sile u odnosu na porast apsolutne površine poprečnog presjeka, neovisno o tome dali ona dolazi zbog porasta širine ekstruzije, postotka ispune ili povećanja broja slojeva stijenki.

4.3 Obrada rezultata smičnog ispitivanja

Nakon odrađenog smičnog ispitivanja, zabilježene su sile prikazane u tablici 22. Svaki uzorak ispitivan je do loma, te je zabilježena najveća sila u procesu ispitivanja. Rezultati smičnog ispitivanja obratiti će se na isti način kao i kod vlačnog, dakle prema poglavlju 4.2.

4.3.1 Signal-šum omjer rezultata smičnog ispitivanja

Smična čvrstoća τ_{nom} računata je prema izrazu:

$$\tau_{\text{nom}} = \frac{F_{\text{m}}}{A_{\text{nom}}} \tag{20}$$

gdje je A_{nom} nominalna površina smične ravnine.

Za svaku eksperimentalnu kombinaciju iz ortogonalne matrice L27 (tablica 11) izračunat je signal-šum (S/N) omjer prema izrazu 1, gdje je y_i izmjerena vrijednost smičnog naprezanja u i-tom ponavljanju, a n broj ponavljanja. Budući da je svaki ispitni uzorak (zbog ograničenih resursa) ispitivan samo jednom, izraz 1 možemo pretvoriti u izraz 21 (za smik).
Za svaki rezultat izračunat je S/N omjer (pripadajući za taj slučaj) prema kriteriju "što je vrijednost viša - to je bolja".

$$\text{S/N} = -10 \cdot \log_{10}\left(\frac{1}{\tau^2_{\text{nom}}}\right) = 20 \cdot log_{10}\left(\tau_{\text{nom}}\right) \tag{21}$$

Tablica 22: Rezultati smičnog ispitivanja

Eksperiment	A_{nom} [mm^2]	A_{min} [mm^2]	F_m [kN]	Ravnina loma	σ_{nom} [MPa]	σ_{ef} [MPa]	S/N [dB]
1	64	31,577	0,968	xy	15,125	30,6552	23,5939
2	64	36,365	1,673	xz	26,1403	46,0058	28,3463
3	64	55,707	1,911	xz	29,8438	36,2394	29,4077
4	64	37,084	1,536	xz	24,0000	24,0000	27,6042
5	64	32,841	1,594	xz	32,6391	59,1029	28,9133
6	64	62,477	2,623	xy	40,9844	41,9882	32,6256
7	64	60,395	2,415	xy	37,7344	21,1110	25,9860
8	64	42,934	2,015	xz	31,4844	39,1563	28,0530
9	64	47,099	1,916	xz	29,9375	40,6803	29,5241
10	64	42,934	2,046	xy	32,0000	38,2447	28,3104
11	64	27,007	1,642	xz	25,6563	60,6576	28,1839
12	64	47,099	2,104	xy	32,8750	37,7158	30,1701
13	64	45,337	1,072	xz	16,7500	23,6451	24,4803
14	64	50,325	1,468	xz	22,8750	43,4063	27,4529
15	64	44,051	2,091	xy	32,6719	43,2864	30,4092
16	64	42,792	2,061	xy	32,2031	40,5069	28,7815
17	64	60,893	2,514	xy	39,2813	41,6260	31,0321
18	64	34,184	2,357	xz	36,8281	34,1406	30,0271
19	64	30,118	1,206	xz	18,8281	40,0093	25,4961
20	64	53,205	1,923	xy	28,1719	34,5156	28,1869
21	64	44,055	1,783	xz	27,8594	40,4721	28,3055
22	64	58,227	2,367	xz	35,9844	52,5741	30,6615
23	64	37,000	2,025	xy	31,6406	37,0000	30,4345
24	64	46,458	2,309	xz	32,9531	45,3958	30,3579
25	64	46,458	2,624	xy	40,0625	49,0464	32,6641
26	64	60,395	2,548	xz	39,8125	42,1889	32,0004
27	64	44,453	2,845	xy	44,4531	44,4531	32,9580

Izvor: autor

Nakon izračuna svih signal-šum omjera, određene su srednje signal-šum vrijednosti svih razina svakog faktora prema tablici 11, srednju čvrstoću razina svakog faktora, te finalno i razliku maksimalnog i minimalnog signal-šum omjera svih razina svakog faktora. Navedeni izračuni prikazani su u tablici 23.

Tablica 23: Analiza faktora s prosječnim vrijednostima S/N i čvrstoće

Faktor	Razina	S/N [dB]	$\bar{\sigma}$ [MPa]	Δ (S/N)	Optimalna kombinacija S/N
Orijentacija	Orijentacija 1	30,5954	35,226		
	Orijentacija 2	29,3624	29,771	2,1171	1
	Orijentacija 3	28,4783	27,582		
Visina sloja [mm]	0,08	28,6997	28,382		
	0,14	29,6917	31,545	1,3449	0,28
	0,28	30,0447	32,651		
Širina ekstruzije [mm]	0,4	28,1518	26,3142		
	0,6	29,8948	32,3299	2,2376	0,8
	0,8	30,3895	33,9340		
Postotak ispune [%]	20	27,1819	23,6788		
	55	30,6862	34,7743	3,5043	55
	85	30,5679	34,125		
Broj slojeva stijenke	2	28,7524	27,998		
	4	29,1244	30,152	1,8068	6
	6	30,5593	34,427		

Izvor: autor

4.3.2 ANOVA analiza rezultata smičnog ispitivanja

ANOVA analiza provedena je na identičan način kao i u poglavlju 4.2.2. Srednja vrijednost (μ) naprezanja τ_{nom} svakog eksperimenta te zbroj kvadrata odstupanja točaka od srednje vrijednosti za skup svih τ_{nom}, uz broj uzoraka $\mathrm{N} = 27$ dobivamo vrijednosti iz izraza 22 i 23.

$$\mu = \bar{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^{N}(\tau_i)}{N} = 30,859\mathrm{MPa} \tag{22}$$

$$SS_{ukupno} = \sum_{i=1}^{N}(\tau_i) = 1616,98\mathrm{MPa}^2 \tag{23}$$

Zbrojevi kvadrata za svaki faktor ($\mathrm{SS_f}$) računamo prema izrazu 24.

$$SS_f = \sum_{j=1}^{l} n_j(\bar{\tau}_j - \bar{\tau})^2 \tag{24}$$

Srednji kvadrat definiran je izrazima 8 i 9, a stupnjevi slobode računati su izrazima 10 i 11. U tablici 24 prikazane su vrijednosti zbroja kvadrata, stupnjeva slobode te srednjih kvadrata za svaki faktor i njegove razine.

Tablica 24: Sume kvadrata faktora smičnog testa

Faktor	$\bar{\sigma}$	n	μ^2	$\mathrm{n} \cdot \mu^2$
Orijentacija				
1	35,2257	9	19,0647	317,0313
2	29,7708	9	1,1849	10,6643
3	27,5816	9	10,7438	96,6944
Zbroj kvadrata				107,3588
Stupnjevi slobode				2
Srednji kvadrat				53,6794
Visina sloja [mm]				
0,08	28,3819	9	6,1377	55,2386
0,14	31,5451	9	0,4703	4,2324
0,28	32,6510	9	3,2101	28,8906
Zbroj kvadrata				88,3620
Stupnjevi slobode				2
Srednji kvadrat				44,1810
Širina ekstruzije [mm]				
0,4	26,3142	9	20,6583	185,9246
0,6	32,3299	9	2,1623	19,4609
0,8	33,9403	9	9,4535	85,0814
Zbroj kvadrata				290,4670
Stupnjevi slobode				2
Srednji kvadrat				145,2335
Postotak ispune [%]				
20	23,6788	9	51,5604	464,0434
55	34,7743	9	15,3267	137,9401
85	34,1250	9	10,6643	95,9788
Zbroj kvadrata				697,9623
Stupnjevi slobode				2
Srednji kvadrat				348,9811
Broj slojeva stijenke				
2	27,9983	9	8,18596	73,6736
4	30,1528	9	0,49928	4,4935
6	34,4271	9	12,7285	114,5569
Zbroj kvadrata				192,7240
Stupnjevi slobode				2
Srednji kvadrat				96,3620

Izvor: autor

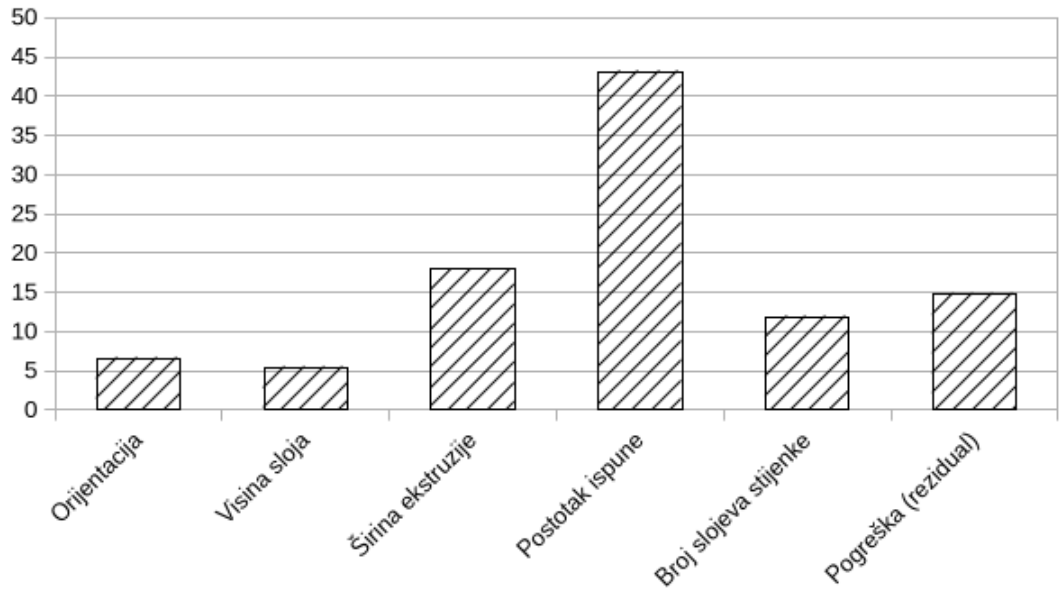
Pogreška je izračunata prema izrazu 12, dok je F-omjer izračunat izrazom 13. Sažetak cijele analize, te udio varijabiliteta prikazan je u tablici 25 dok su udjeli varijabiliteta prikazani grafički na slici 34.

Tablica 25: Sažetak ANOVA tablice ispitivanja na smik

Faktor	**SS**	**SL**	**MS**	**F-omjer**	**Udio varijabiliteta [%]**
Orijentacija	107,3588	2	53,6794	3,5771	6,6395
Visina sloja	88,3620	2	44,1810	2,9441	5,4646
Širina ekstruzije	290,4670	2	145,2335	9,6779	17,9636
Postotak ispune	697,9623	2	348,9811	23,2552	43,1646
Broj slojeva stijenke	192,7240	2	96,3620	6,4213	11,9188
Pogreška (rezidual)	240,1054	16	15,0066		14,8490
Ukupno	1616,9795	26			100,0000

Izvor: autor

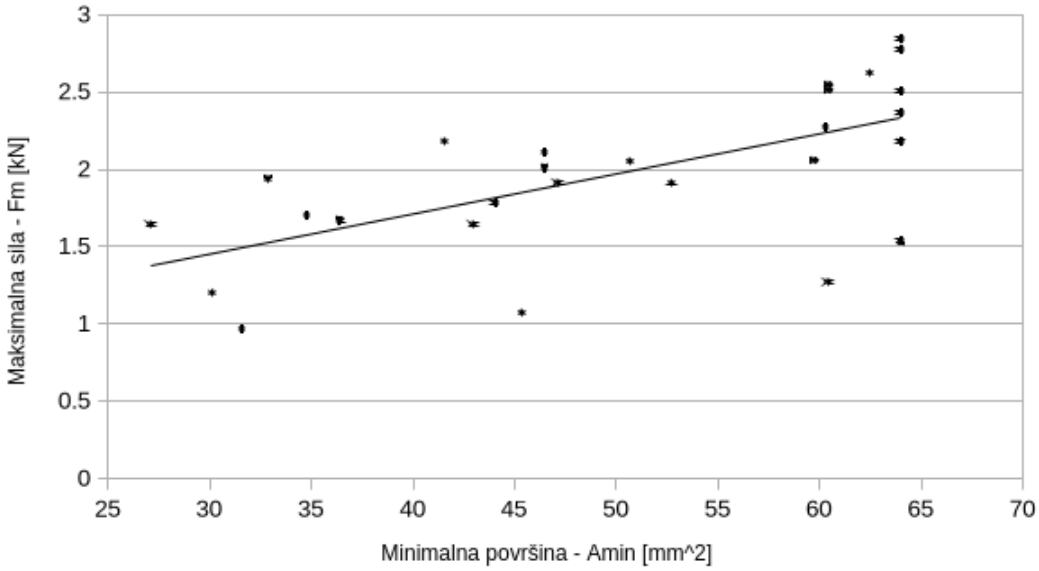
Slika 34: Udio varijabiliteta svakog faktora i greške.



Izvor: autor

Očito je da daleko najveći utjecaj na čvrstoću ima parametar postotka ispune uzorka. Uzmemo li sada minimalne površine poprečnih presjeka A_{min} izračunate programom opisanim u poglavlju 4.1, te sile postignute za svaki uzorak možemo napraviti graf na slici 35.

Slika 35: Korelacija minimalne površine poprečnog presjeka A_{min} i maksimalne postignute sile F_m.



Izvor: autor

Tumačenje ovisnosti sile o minimalnoj površini poprečnog presjeka možemo dobiti jednadžbom pravca trenda. Tako za sliku 34 jednadžbu pravca trenda možemo pronaći u izrazu 25.

$$F_{\text{m}}(A_{\text{min}}) = 0.026A_{\text{min}} + 0.669 \tag{25}$$

Moguće je primijetiti kako je prosječni porast sile po milimetru kvadratnom površine 26N. Izračunamo li sada srednju korijensku kvadratnu pogrešku, dobivamo izraz 26.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n-2}\sum_{i=1}^{n}\left(F_{m,i} - \hat{F}_{m,i}\right)^2} = 0.3946\text{kN} \tag{26}$$

Kako bi mogli definirati koliko dobro linearni model objašnjava naše podatke, možemo izračunati koeficijent determinacije prema izrazu 27.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(F_{m,i} - \hat{F}_{m,i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(F_{m,i} - \bar{F}_m\right)^2} = 0.4122 \tag{27}$$

Analizom izraza 27 možemo primijetiti kako je 41% varijabilnosti sile moguće objasniti linearnom ovisnošću o površini.

Iako su vrijednosti poprilično raspršene, očit je trend porasta maksimalne sile porastom apsolutne površine poprečnog presjeka, neovisno o tome dali ona dolazi zbog porasta širine ekstruzije, postotka ispune ili povećanja broja slojeva stijenki.

5 Zaključak

Cilj ovog istraživanja bio je kvantitativno odrediti utjecaj odabranih parametara FDM ispisa na mehanička svojstva 3D printanih uzoraka. Analizirani su parametri povezani s geometrijom ispisa (visina sloja, širina ekstruzije, postotak ispune, orijentacija modela i broj slojeva stijenki), dok su materijal i uvjeti ispisa održavani konstantnima. Primjenom Taguchijeve metode i ANOVA analize omogućeno je smanjenje broja eksperimenata uz očuvanje statističke relevantnosti.

Rezultati vlačnih ispitivanja pokazali su da najveći pojedinačni utjecaj na vlačnu čvrstoću ima orijentacija ispisa, koja objašnjava 23% ukupne varijabilnosti rezultata. Uzorci s paralelnom orijentacijom slojeva postigli su prosječnu čvrstoću od 29,88 MPa,što je 1,36 puta više od uzoraka s okomitom orijentacijom (21,94 MPa). Drugi po važnosti parametar bio je broj slojeva stijenki (doprinos od 16,3%), pri čemu povećanje s dvije na četiri stijenke povećava prosječnu čvrstoću s 22,06 MPa na 30,22 MPa (povećanje od 1,37 puta). Ostali parametri (visina sloja, postotak ispune i širina ekstruzije) pokazali su manji, ali mjerljiv doprinos, svaki ispod 10%.

Kod smične čvrstoće, ključan je bio postotak ispune, s doprinosom od 43,2% ukupne varijabilnosti. Uzorci s ispunom od 85% postigli su prosječnu čvrstoću od 34,13 MPa, što je 1,44 puta više od uzoraka s 20% ispune (23,67 MPa). Drugi najvažniji parametar bila je širina ekstruzije (doprinos od 18%),gdje povećanje s 0,4 mm na 0,8 mm rezultira porastom čvrstoće s 26,5 MPa na 34,1 MPa (oko 1,29 puta). Broj slojeva stijenki imao je doprinos od 11,9%, dok su visina sloja i orijentacija imali utjecaje ispod 10%.

Zabilježen je porast maksimalne sile s porastom površine poprečnog presjeka uzorka u svim orijentacijama, u oba ispitivanja.

Važno je napomenuti da su zbog ograničenog broja uzoraka (samo jedno ispitivanje po konfiguraciji) rezultati opterećeni značajnim šumom. Stoga se prikazane vrijednosti i omjeri trebaju tumačiti prvenstveno kao pokazatelji trendova, a ne kao apsolutne vrijednosti. Za precizniju kvantifikaciju utjecaja parametara bilo bi potrebno ponoviti ispitivanja s većim brojem uzoraka kako bi se smanjila varijabilnost i povećala pouzdanost dobivenih zaključaka.

Dobiveni rezultati potvrđuju hipotezu da parametri ispisa imaju mjerljiv i značajan utjecaj na mehanička svojstva FDM uzoraka. Orijentacija slojeva i broj stijenki pokazali su se presudnima za optimizaciju vlačne čvrstoće, dok su postotak ispune i širina ekstruzije bili ključni za optimizaciju smične čvrstoće.

Rezultati ovog rada mogu poslužiti kao referenca pri optimizaciji parametara ispisa u slučajevima gdje je potrebna predvidljiva i ponovljiva čvrstoća 3D printanih dijelova. Ograničenja istraživanja uključuju korištenje samo jednog materijala (PLA), jedne vrste ispune (grid) te mali broj ponavljanja po uzorku. Buduća istraživanja trebala bi obuhvatiti različite materijale, druge geometrije ispune (npr. gyroid) i dodatne parametre poput brzine hlađenja, čime bi se omogućila šira generalizacija rezultata i njihova primjena u inženjerskim sustavima.

Literatura

[1] P. Kuznetsov, A. Solonin, O. Urzhumtsev, R. Schilling i A. Tavitov, "Strength of PLA Components Fabricated with Fused Deposition Technology Using a Desktop 3D Printer as a Function of Geometrical Parameters of the Process," *Polymers*, sv. 10, br. 3, str. 313, 2018. DOI: 10.3390/polym10030313.

[2] S. Hermann. "The Effect of Extrusion Width on Strength and Quality of 3D Prints," pogledano 16. kolovoza 2025. adresa: https://www.cnckitchen.com/blog/the-effect-of-extrusion-width-on-strength-and-quality-of-3d-prints.

[3] C. Creations. "What is the Strongest Infill Pattern in Cura and PrusaSlicer?" Pogledano 16. kolovoza 2025. adresa: https://clevercreations.org/what-is-strongest-infill-pattern-cura-prusa/.

[4] P. Research. "Infill Patterns," pogledano 16. kolovoza 2025. adresa: https://help.prusa3d.com/article/infill-patterns_177130.

[5] Q. Sun, G. M. Rizvi, C. T. Bellehumeur i P. Gu, "Effect of process parameters on the mechanical properties of 3D printed ABS using fused deposition modeling," *Journal of Manufacturing Processes*, sv. 10, br. 3, str. 204–214, 2008.

[6] J. F. Rodriguez, J. P. Thomas i J. E. Renaud, "Diffusion and re-entanglement in fused deposition modeling," *Rapid Prototyping Journal*, sv. 7, br. 3, str. 144–152, 2001.

[7] T. J. Coogan i D. O. Kazmer, "Thermal modeling of interlayer diffusion during fused deposition modeling of thermoplastics," *Additive Manufacturing*, sv. 18, str. 144–153, 2017.

[8] Y. Aoyagi, K. Yamashita i M. Yamaguchi, "Effects of molecular weight on surface tension and viscosity of polylactide," *Journal of Applied Polymer Science*, sv. 84, br. 6, str. 1233–1239, 2002.

[9] C. Basgul i dr., "Effect of layer thickness and print orientation on mechanical behavior of fused deposition modeling parts," *Rapid Prototyping Journal*, sv. 23, br. 2, str. 320–328, 2017.

[10] A. Bellini i S. Güçeri, "Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling," *Rapid Prototyping Journal*, sv. 9, br. 4, str. 252–264, 2003.

[11] M. Aulia, A. Nugroho, B. Pramujati i dr., "Anisotropic tensile strength of 3D printed components: A review," *Materials Today: Proceedings*, sv. 46, str. 2341–2347, 2021.

[12] A. Panoto, D. Kurniawan i E. Siregar, "Evaluation of shear strength and delamination of PLA material produced by fused deposition modeling," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, sv. 494, br. 1, str. 012 070, 2019.

[13] M. Zandi i dr., “Mechanical properties and failure behavior of 3D printed materials under various loading conditions,” *Polymer Testing*, sv. 86, str. 106 406, 2020.

[14] J. Butt, S. Bhaskar, Y. Mahmoodkhani, N. Patel i J. Singh, “Investigating the Influence of Material Extrusion Rates and Line Widths on FFF-Printed Graphene-Enhanced PLA,” *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, sv. 6, br. 3, str. 57, 2022. DOI: 10.3390/jmmp6030057. pogledano 16. kolovoza 2025. adresa: https://www.mdpi.com/2504-4494/6/3/57.

[15] M. G. Aboelella, S. J. Ebeid i M. M. Sayed, “Layer combination of similar infill patterns on the tensile and compression behavior of 3D printed PLA,” *Scientific Reports*, sv. 15, str. 11 759, 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-94446-8. pogledano 19. kolovoza 2025. adresa: https://www.nature.com/articles/s41598-025-94446-8.

[16] M. Eryıldız, “Effect of Build Orientation on Mechanical Behaviour and Build Time of FDM 3D-Printed PLA Parts: An Experimental Investigation,” *European Mechanical Science*, sv. 5, br. 3, str. 116–120, 2021. DOI: 10.26701/ems.881254.

[17] S. Hermann. “The Influence of Layer Height on the Strength of FDM 3D Prints,” pogledano 19. kolovoza 2025. adresa: https://www.cnckitchen.com/blog/the-influence-of-layer-height-on-the-strength-of-fdm-3d-prints.

[18] M. Daly, M. Tarfaoui, M. Chihi i C. Bouraoui, “Effects of Infill Density and Pattern on the Tensile Mechanical Behavior of 3D-Printed Carbon-Fiber Reinforced PETG Composites by the FDM Process,” *Materials*, sv. 8, br. 4, str. 115, 2024. DOI: 10.3390/ma8040115. pogledano 19. kolovoza 2025. adresa: https://www.mdpi.com/2504-477X/8/4/115.

[19] D. Bazjanac, *Nauka o čvrstoći I. dio*. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, 1963.

[20] V. Cojocaru, D. Frunzaverde i G. Marginean, “On the Use of Different Types of Standardized Dogbone Specimens for Tensile Tests of PLA Printed by MEX: A Comparative Analysis,” *FME Transactions*, sv. 53, br. 2, str. 335–343, 2025. DOI: 10.5937/fme2502326C.

[21] AzureFilm d.o.o. “Technical Data Sheet: PLA (Polylactide),” pogledano 9. rujna 2025. adresa: https://www.azurefilm.com.

[22] A. G. Stamopoulos, L. G. Di Genova i A. Di Ilio, “Assessment of the shear properties of thermoplastic composites using the ±45° tension and the V-notched rail shear methods,” *Manufacturing Rev.*, sv. 7, str. 10, 2020. DOI: 10.1051/mfreview/2020007. adresa: https://doi.org/10.1051/mfreview/2020007.

Popis slika

1 Transformacija poprečnog presjeka pojedinog sloja s povećanjem debljine sloja. Oblik sloja prikazan je preko SEM slika. 4
2 Širina ekstruzije pojedinog traga pri izlazu iz mlaznice, kroz paralelne tragove. . 5
3 Različiti postotci ispune kod iste vrste ispune. 6
4 3D model paralelopipeda prikazan u sve tri orijentacije u odnosu na podlogu. . 9
5 3D model paralelopipeda podešenog na 2, 4 i 6 slojeva stijenke. 9
6 Usporedba 100% (lijevo) i 85% (desno) postotka ispune, pri širini ekstruzije od 100%. 16
7 Prikaz rasporeda slojeva u sve tri orijentacije. 18
8 Ispitna epruveta prikazana u sve tri orijentacije bez potpornog materijala. . . . 22
9 Ispitna epruveta prikazana u sve tri orijentacije sa potpornim materijalom u trećoj orijentaciji (desno). 22
10 Prikaz suženja epruvete u presjeku. 23
11 Okvirna geometrija prihvatnog kraja epruvete koji je potrebno izraditi sa 100% ispune. 24
12 Epruveta pripremljena s 20% ispune, sa integriranim krajnjim prihvatima s 100% ispune. 24
13 3D prikaz epruvete za testiranje na vlak. 25
14 3D prikaz epruvete za testiranje na smik. 25
15 Skica za dimenzioniranje epruvete za testiranje na smik. 26
16 Skica za dimenzioniranje epruvete za testiranje na vlak. 26
17 Prikaz naprave za smično opterećenje epruvete. 29
18 Prikaz naprave za smično opterećenje epruvete, pripremljene za ispis, u presjeku. 30
19 Prikaz izrađene naprave za smično testiranje sa ispitnim uzorkom. 31
20 Prikaz svih ispitnih uzoraka. 33
21 Primjer graviranog teksta na čelu ispitnog uzorka. 34
22 Primjer vlačnog ispitnog uzorka u kidalici. 35
23 Primjer smičnog ispitnog uzorka u kidalici 35
24 Primjer loma vlačnog ispitnog uzorka. 36
25 Primjer loma simčnog ispitnog uzorka. 36
26 Primjer loma smičnog ispitnog uzorka u napravi. 37
27 2D prikaz ispune ispitnog uzorka u orijentaciji uspravnog ispisa. 38
28 2D prikaz ispune ispitnog uzorka u orijentaciji ležećeg ispisa. 39
29 Promjena površine po X i Y osi za presjek na slici 27. Izvor: autor. 40
30 Promjena površine po X i Y osi za presjek na slici 28. Izvor: autor. 40
31 Udio varijabiliteta svakog faktora i greške. 46

32 Minimalna površina poprečnog presjeka uzorka A_{min} u odnosu na maksimalnu silu F_{m} za uzorke s orijentacijom 1. 46
33 Minimalna površina poprečnog presjeka uzorka A_{min} u odnosu na maksimalnu silu F_{m} za uzorke s orijentacijom 2. 47
34 Udio varijabiliteta svakog faktora i greške. 52
35 Korelacija minimalne površine poprečnog presjeka A_{min} i maksimalne postignute sile F_m. 53

Popis tablica

1 2D vrste ispune 7
2 3D vrste ispune. 8
3 Primjer ANOVA tablice 13
4 Konfiguracije visine sloja 15
5 Konfiguracija širine ekstruzije 16
6 Konfiguracija postotka ispune 17
7 Sažetak ispitivanih parametara i njihovih razina 17
8 Parametri vlačnog testa 19
9 Taguchijeva L18 ortogonalna matrica sa stvarnim vrijednostima 19
10 Parametri smičong testa 20
11 Taguchijeva ortogonalna matrica L27 (5 faktora, 3 razine) 21
12 Mechanical properties of 3D printed PLA specimens 28
13 Parametri za izradu uzorka 28
14 Preporučene postavke 28
15 Konstantni parametri ispisa 31
16 Dimenzije ispitnih uzoraka (a_o, b_o) 32
17 Dimenzije ispitnih uzoraka S1–S27 (a_o i prosjek) 33
18 Rezultati vlačnog ispitivanja 42
19 Analiza faktora s prosječnim vrijednostima S/N i čvrstoće 43
20 Sume kvadrata faktora vlačnog testa 44
21 Sažetak ANOVA tablice ispitivanja na vlak 45
22 Rezultati smičnog ispitivanja 49
23 Analiza faktora s prosječnim vrijednostima S/N i čvrstoće 50
24 Sume kvadrata faktora smičnog testa 51
25 Sažetak ANOVA tablice ispitivanja na smik 52

Popis simbola i mjernih jedinica

Simboli i mjerne jedinice

Simbol	Naziv	Jedinica
S/N	Signal-Šum omjer	dB
$\Delta S/N$	Raspon S/N vrijednosti po razinama pojedinog faktora	dB
SS	Suma kvadrata	MPa^2
SS_{ukupno}	Ukupna suma kvadrata	MPa^2
SS_f	Suma kvadrata učinka faktora f	MPa^2
SS_E	Suma kvadrata pogreške	MPa^2
SL	Stupnjevi slobode	-
SL_{ukupno}	Ukupan broj stupnjeva slobode	-
SL_f	Stupnjevi slobode faktora	-
SL_E	Stupnjevi slobode pogreške	-
MS	Srednji kvadrat	MPa^2
MS_f	Srednji kvadrat faktora	MPa^2
MS_E	Srednji kvadrat pogreške	MPa^2
F_f	F-omjer za faktor	-
$RMSE$	Korijenska srednja kvadratna pogreška	N
R^2	Koeficijent determinacije	-
P_f	Postotni doprinos faktora f u ukupnoj varijabilnosti	%
μ	Srednja vrijednost odziva	MPa
y_i	i-ta izmjerena vrijednost odziva	MPa
N	Ukupan broj opažanja (uzoraka)	-
n	Broj ponavljanja	-
σ	Normalno naprezanje	MPa
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Komponente normalnog naprezanja u koordinatnim osima x, y, z	MPa
$\bar{\sigma}$	Srednje normalno naprezanje	MPa
σ_{ef}	Normalno naprezanje u najmanjoj površini poprečnog presjeka $A_{\min}$	MPa
σ_{nom}	Nominalno normalno naprezanje na nazivnoj površini uzorka	MPa
τ	Tangencijalno naprezanje	MPa
τ_x, τ_y, τ_z	Komponente tangencijalnog naprezanja u koordinatnim osima x, y, z	MPa
$\bar{\tau}$	Srednje tangencijalno naprezanje	MPa
τ_{ef}	Tangencijalno naprezanje u najmanjoj površini poprečnog presjeka $A_{\min}$	MPa
τ_{nom}	Tangencijalno normalno naprezanje na nazivnoj površini uzorka	MPa
A	Površina poprečnog presjeka	mm^2
A_{nom}	Nominalna površina poprečnog presjeka	mm^2
$A_{\min}$	Minimalna površina poprečnog presjeka	mm^2
F	Sila	N
F_m	Maksimalna sila zabilježena u procesu	N
a_0	Izmjerena širina uzorka	mm
b_0	Izmjerena debljina uzorka	mm
$\emptyset$	Promjer	mm

Prilog A – Python skripta za analizu poprečnih presjeka

Sljedeći kod izvršavan je unutar okruženja **JupyterLab**, a koristi biblioteku `NumPy` i `Matplotlib`. Skripta služi za generiranje simuliranog rasporeda ispune FDM ispisa i izračun površina presjeka i geometrijskih momenata inercije.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

def _udaljenost_mod(u, razmak):
    r = np.mod(u, razmak)
    return np.minimum(r, razmak - r)

def _pravocrtna_maska(XX, YY, razmak, sirina_linije, kut_stupnjevi=0.0, faza=0.0):

    th = np.deg2rad(kut_stupnjevi)
    u = XX * np.cos(th) + YY * np.sin(th)
    dist = _udaljenost_mod(u + faza, razmak)
    return dist <= (sirina_linije / 2.0)

def _razmak_za_gustocu_mreze(sirina_linije, f):

    f = float(np.clip(f, 0.0, 1.0))
    if f <= 0.0:
        return np.inf
    if f >= 1.0:
        return sirina_linije
    r = 1.0 - np.sqrt(1.0 - f)
    return sirina_linije / r

def izracun_povrsine(XX, YY, maska):
    if not np.any(maska):
        return {"A": 0.0}

    dx = XX[0, 1] - XX[0, 0]
    dy = YY[1, 0] - YY[0, 0]
    dA = dx * dy
    A = float(np.count_nonzero(maska) * dA)
    return {"A": A}

def prusa_mreza_ili_pravocrtna(
    sirina, visina,
    udio_ispune,
    sirina_linije=0.42,
    slojevi_ljuske=2,
    osnovni_kut_ispune_stupnjevi=45.0,
    mreza=True,
```

```
    z_visina=0.0,
    faza_po_mm=0.0,
    z_visina_objekta=None,
    y_ravnina=0.0,
    x_ravnina=0.0,
    N=800,
    graficki_prikaz=True,
    detaljno=True
):
    xs = np.linspace(-sirina/2, sirina/2, N)
    ys = np.linspace(-visina/2, visina/2, N)
    XX, YY = np.meshgrid(xs, ys)

    shell_mask = np.zeros_like(XX, dtype=bool)
    for i in range(slojevi_ljuske):
        off = (i + 0.5) * sirina_linije
        shell_mask |= np.abs(XX - (-sirina/2 + off)) <= (sirina_linije / 2)
        shell_mask |= np.abs(XX - ( +sirina/2 - off)) <= (sirina_linije / 2)
        shell_mask |= np.abs(YY - (-visina/2 + off)) <= (sirina_linije / 2)
        shell_mask |= np.abs(YY - ( +visina/2 - off)) <= (sirina_linije / 2)

    unutarnji_pomak = slojevi_ljuske * sirina_linije
    unutarnji_pravokutnik = (
        (np.abs(XX) <= (sirina/2 - unutarnji_pomak)) &
        (np.abs(YY) <= (visina/2 - unutarnji_pomak))
    )

    if udio_ispune <= 0.0:
        infill_mask = np.zeros_like(XX, dtype=bool)
    elif udio_ispune >= 1.0:
        razmak = sirina_linije
        maske = []
        kutevi = [osnovni_kut_ispune_stupnjevi] + ([osnovni_kut_ispune_stupnjevi + 90] if
            mreza else [])
        faza = faza_po_mm * z_visina
        for a in kutevi:
            maske.append(_pravocrtna_maska(XX, YY, razmak, sirina_linije, kut_stupnjevi=a,
                faza=faza))
        infill_mask = np.logical_or.reduce(maske) & unutarnji_pravokutnik
    else:
        razmak = _razmak_za_gustocu_mreze(sirina_linije, udio_ispune) if mreza \
                 else sirina_linije / udio_ispune
        maske = []
        kutevi = [osnovni_kut_ispune_stupnjevi] + ([osnovni_kut_ispune_stupnjevi + 90] if
            mreza else [])
        faza = faza_po_mm * z_visina
        for a in kutevi:
```

```
            maske.append(_pravocrtna_maska(XX, YY, razmak, sirina_linije, kut_stupnjevi=a,
                faza=faza))
        infill_mask = np.logical_or.reduce(maske) & unutarnji_pravokutnik

    konacna_maska = shell_mask | infill_mask

    if graficki_prikaz:
        plt.figure(figsize=(6, 6))
        img = np.where(konacna_maska, 1.0, np.nan)
        plt.imshow(img, origin='lower',
                   extent=[-sirina/2, sirina/2, -visina/2, visina/2],
                   interpolation='nearest')
        naslov = "Grid" if mreza else "Pravocrtna"
        plt.title(f"{naslov} @ {udio_ispune*100:.1f}% |
            ljuske={slojevi_ljuske}*{sirina_linije:.2f}
            kut={osnovni_kut_ispune_stupnjevi:.0f}deg")
        plt.xlabel("X (mm)")
        plt.ylabel("Y (mm)")
        plt.gca().set_aspect('equal', 'box')
        plt.grid(True)
        plt.hlines(y_ravnina, -sirina/2, sirina/2, linestyles='--')
        plt.vlines(x_ravnina, -visina/2, visina/2, linestyles='--')
        plt.show()

    total = izracun_povrsine(XX, YY, konacna_maska)
    ljuske = izracun_povrsine(XX, YY, shell_mask)
    A_ispuna = total["A"] - ljuske["A"]

    dx = XX[0, 1] - XX[0, 0]
    dy = YY[1, 0] - YY[0, 0]
    ys_centered = YY[:, 0]
    xs_centered = XX[0, :]
    row = int(np.argmin(np.abs(ys_centered - y_ravnina)))
    col = int(np.argmin(np.abs(xs_centered - x_ravnina)))

    duzina_x_na_y = float(np.count_nonzero(konacna_maska[row, :]) * dx)
    duzina_y_na_x = float(np.count_nonzero(konacna_maska[:, col]) * dy)

    povrsina_xz_na_y = None
    povrsina_yz_na_x = None
    if z_visina_objekta is not None and z_visina_objekta > 0:
        povrsina_xz_na_y = duzina_x_na_y * z_visina_objekta
        povrsina_yz_na_x = duzina_y_na_x * z_visina_objekta

    duzina_x_vs_y = np.count_nonzero(konacna_maska, axis=1) * dx
    duzina_y_vs_x = np.count_nonzero(konacna_maska, axis=0) * dy

```

```
    if z_visina_objekta is not None and z_visina_objekta > 0:
        povrsina_xz_vs_y = duzina_x_vs_y * z_visina_objekta
        povrsina_yz_vs_x = duzina_y_vs_x * z_visina_objekta
        y_oznaka = "Povrsina XZ presjeka (mm^2)"
        x_oznaka = "Povrsina YZ presjeka (mm^2)"
    else:
        povrsina_xz_vs_y = duzina_x_vs_y
        povrsina_yz_vs_x = duzina_y_vs_x
        y_oznaka = "Duzina po X (mm) [postavi z_visina_objekta za povrsinu]"
        x_oznaka = "Duzina po Y (mm) [postavi z_visina_objekta za povrsinu]"

    y_os_0_do_H = ys_centered + visina/2.0
    x_os_0_do_W = xs_centered + sirina/2.0

    if graficki_prikaz:
        plt.figure(figsize=(7, 3.5))
        plt.plot(y_os_0_do_H, povrsina_xz_vs_y)
        plt.xlabel("y od donjeg zida (mm)")
        plt.ylabel(y_oznaka)
        plt.title("Varijacija prema y")
        plt.grid(True)
        plt.xlim(0, visina)
        plt.tight_layout()
        plt.show()

        plt.figure(figsize=(7, 3.5))
        plt.plot(x_os_0_do_W, povrsina_yz_vs_x)
        plt.xlabel("x od lijevog zida (mm)")
        plt.ylabel(x_oznaka)
        plt.title("Varijacija prema x")
        plt.grid(True)
        plt.xlim(0, sirina)
        plt.tight_layout()
        plt.show()
    if detaljno:
        print(f"==== {('Grid' if mreza else 'Pravocrtna')} ispuna {udio_ispune*100:.1f}%
            ====")
        print(f"XY ukupna povrsina = {total['A']:.4f} mm^2")
        print(f" Povrsina ljuski = {ljuske['A']:.4f} mm^2")
        print(f" Povrsina ispune = {A_ispuna:.4f} mm^2")
        print(f"-- Presjeci kroz Z (uzorak konstantan po Z) --")
        print(f"Duzina po X @ y={y_ravnina:.3f} mm: {duzina_x_na_y:.4f} mm")
        print(f"Duzina po Y @ x={x_ravnina:.3f} mm: {duzina_y_na_x:.4f} mm")
        if povrsina_xz_na_y is not None:
            print(f"Povrsina XZ @ y={y_ravnina:.3f}: {povrsina_xz_na_y:.4f} mm^2
                (Z={z_visina_objekta:.3f} mm)")
        if povrsina_yz_na_x is not None:
```

```
            print(f"Povrsina YZ @ x={x_ravnina:.3f}: {povrsina_yz_na_x:.4f} mm^2
                (Z={z_visina_objekta:.3f} mm)")
        print()
    return {
        "maska": konacna_maska,
        "XX": XX, "YY": YY,
        "dx": dx, "dy": dy,
        "povrsina_ukupno_xy": total["A"],
        "povrsina_ljuske_xy": ljuske["A"],
        "povrsina_ispune_xy": A_ispuna,
        "duzina_x_na_y": duzina_x_na_y,
        "duzina_y_na_x": duzina_y_na_x,
        "povrsina_xz_na_y": povrsina_xz_na_y,
        "povrsina_yz_na_x": povrsina_yz_na_x,
        "y_os_mm": y_os_0_do_H,
        "x_os_mm": x_os_0_do_W,
        "povrsina_xz_vs_y": povrsina_xz_vs_y,
        "povrsina_yz_vs_x": povrsina_yz_vs_x,
    }
# Konfiguracija
if __name__ == "__main__":
    W, H = 10.0, 70.0
    Z = 10.0
    res = prusa_mreza_ili_pravocrtna(
        sirina=W, visina=H,
        udio_ispune=0.2,
        sirina_linije=0.42,
        slojevi_ljuske=2,
        osnovni_kut_ispune_stupnjevi=45.0,
        mreza=True,
        z_visina_objekta=Z,
        y_ravnina=+1.0,
        x_ravnina=-2.0,
        N=800,
        graficki_prikaz=True, detaljno=True
    )
    print("A_xz(y=1mm) =", res["povrsina_xz_na_y"], "mm^2")
    print("A_yz(x=-2mm) =", res["povrsina_yz_na_x"], "mm^2")
```

Listing 1: Python skripta za analizu poprečnih presjeka.