

Analiza utjecaja parametara na kvalitetu FDM 3D ispisa s PLA filamentom

Babić, Anđela

Master's thesis / Diplomski rad (sveučilišni)

2026

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split, Faculty of Science / Sveučilište u Splitu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:166:358366>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2026-09-04**



Repository / Repozitorij:

[Digital Repository of Faculty of Science in Split / Digitalni repozitorij Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Splitu](#)



SVEUČILIŠTE U SPLITU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

**ANALIZA UTJECAJA PARAMETARA NA
KVALITETU FDM 3D ISPISA S PLA
FILAMENTOM**

Andela Babić

Split, veljača 2026.

Sveučilište u Splitu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Odjel za politehniku
Studijski program: **Informatika i tehnika**

Analiza utjecaja parametara na kvalitetu FDM 3D ispisa s PLA filamentom

Anđela Babić

Sažetak: U ovom radu istražuje se utjecaj odabranih parametara FDM 3D ispisa na kvalitetu površine uzoraka izrađenih od PLA filameta. Teorijski dio rada obuhvaća pregled aditivnih proizvodnih tehnologija s posebnim naglaskom na FDM postupak, opis korištenih materijala i njihovih svojstava, s fokusom na karakteristike PLA filameta, kao i osnovne parametre površinske hrapavosti (R_a , R_z i R_q) te metode njihova mjerenja. Posebna pozornost posvećena je parametrima ispisa koji utječu na završnu kvalitetu proizvoda. Eksperimentalni dio istraživanja proveden je na 3D pisaču Prusa i3 MK3 uz uporabu EUMAKERS PLA filameta. Ispitni uzorci izrađeni su u obliku kvadra dimenzija $40 \times 20 \times 10$ mm pri različitim rezolucijama sloja (0,05; 0,07; 0,10; 0,15; 0,20 i 0,30 mm), dok su ostali procesni parametri zadržani konstantnima. Mjerenje hrapavosti površine provedeno je pomoću profilometra Mitutoyo Surftest SJ-310, a dobiveni eksperimentalni podaci korišteni su za statističku obradu, razvoj regresijskih matematičkih modela i generiranje odzivnih površina. Provedena metodologija omogućuje sustavnu analizu utjecaja procesnih parametara te pruža osnovu za daljnju optimizaciju FDM procesa u pogledu kvalitete površine i proizvodne učinkovitosti.

Ključne riječi: 3D printanje, FDM tehnologija, PLA filament, hrapavost površine

Rad sadrži: 54 stranice, 29 slika, 8 tablica i 41 literaturni navod.

Mentor: **doc. dr. sc. Ivan Peko**, *Prirodoslovno-matematički fakultet u Splitu*

Povjerenstvo za ocjenu i obranu završnog rada:

1. **doc. dr. sc. Ivan Peko**, *Prirodoslovno-matematički fakultet u Splitu*

2. **Izv. prof. dr. sc. Tomislav Matić**, *Prirodoslovno-matematički fakultet u Splitu*

3. **dr. sc. Dražen Kustura**, *Prirodoslovno-matematički fakultet u Splitu*

Datum obrane: **28. siječnja 2026.**

Rad je napisan na hrvatskom jeziku i pohranjen u repozitoriju Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Splitu koji je dio nacionalnog repozitorijskog sustava Dabar.

University of Split
Faculty of Science
Department of Polytechnics
Study programme: **Computer science and technics**

Analysis of the influence of parameters on the quality of FDM 3D printing with PLA filament

Anđela Babić

Abstract: This study investigates the influence of selected FDM 3D printing parameters on the surface quality of PLA-printed specimens. The theoretical part of the work provides an overview of additive manufacturing technologies, with particular emphasis on the FDM process, a description of the materials used and their properties, focusing on the characteristics of PLA filament, as well as an introduction to the basic surface roughness parameters (R_a , R_z , and R_q) and their measurement methods. Special attention is given to printing parameters that affect the final surface quality of printed parts. The experimental part of the study was carried out using a Prusa i3 MK3 3D printer and EUMAKERS PLA filament. Test specimens in the form of rectangular blocks with dimensions of $40 \times 20 \times 10$ mm were manufactured using different layer resolutions (0.05, 0.07, 0.10, 0.15, 0.20, and 0.30 mm), while all other process parameters were kept constant. Surface roughness measurements were performed using a Mitutoyo Surftest SJ-310 profilometer. The obtained experimental data were used for statistical analysis, development of regression models, and generation of response surfaces, enabling a systematic assessment of the influence of process parameters and providing a basis for further optimization of the FDM process in terms of surface quality and production efficiency.

Key words: 3D printing, FDM technology, PLA filament, surface roughness

Thesis consists of: 54 pages, 29 figures, 8 tables and 41 references.

Supervisor: **Ivan Peko PhD, Assistant Professor, Faculty of Science, Split**

Committee for the evaluation and defense of the bachelor thesis:

1. **Ivan Peko PhD, Assistant Professor, Faculty of Science, Split**
2. **Tomislav Matić PhD, Associate Professor, Faculty of Science, Split**
3. **Dražen Kustura PhD, Faculty of Science, Split**

Defense Date: **28th January 2026.**

The thesis is written in Croatian and stored in the repository of the Faculty of Science, University of Split, which is part of the national repository system Dabar.

IZJAVA

kojom izjavljujem s punom materijalnom i moralnom odgovornošću da sam završni rad s naslovom ANALIZA UTJECAJA PARAMETARA NA KVALITETU FDM 3D ISPISA S PLA FILAMENTOM izradila samostalno pod mentorstvom doc. dr. sc. Ivana Peke. U radu sam primijenila metodologiju znanstvenoistraživačkog rada i koristila literaturu koja je navedena na kraju završnog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući navela u završnom radu na uobičajen, standardan način citirala sam i povezala s fusnotama s korištenim bibliografskim jedinicama. Rad je pisan u duhu hrvatskog jezika.

Studentica

Anđela Babić

Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. 3D PRINTANJE	2
2.1. Što je 3D printanje i kako funkcionira?	2
2.2. Razlika 3D printanja i tradicionalne proizvodnje	3
2.3. Postupci 3D printanja.....	4
2.3.1. Stereolitografija (SLA)	5
2.3.2. PolyJet.....	6
2.3.3. Spajanje praškastog materijala u slojevima – PBF	7
2.4. Prednosti i nedostaci 3D printanja	8
3. FDM TEHNOLOGIJA 3D PRINTANJA.....	11
3.1. Prednosti i nedostaci FDM tehnologije.....	12
4. MATERIJALI KOD FDM 3D PRINTANJA	13
4.1. Akrlonitril butadien stiren (ABS)	14
4.2. Polietilen tereftalat modificiran glikolom (PETG)	15
4.1. Polilaktična kiselina (PLA).....	16
5. HRAPAVOST POVRŠINE	18
5.1. Pojam i značaj hrapavosti	19
5.2. Metode ispitivanja hrapavosti	20
5.2.1. Kontaktne metode	20
5.2.2. Beskontaktne metode	21
5.2.3. Usporedne metode	21
5.3. Parametri hrapavosti	21
5.3.1. Ra – aritmetička sredina odstupanja profila.....	22

5.3.2.	Rq – srednje kvadratno odstupanje profila	22
5.3.3.	Rz – maksimalna visina profila.....	23
6.	EKSPERIMENTALNI RAD	24
6.1.	Oprema i materijal	24
6.2.	Izrada eksperimentalnih uzoraka	26
7.	ANALIZA REZULTATA	29
8.	MATEMATIČKO MODELIRANJE HRAPAVOSTI POVRŠINE 3D ISPISANIH UZORAKA	38
8.1.	Regresijsko modeliranje.....	39
9.	ZAKLJUČAK	44
	LITERATURA.....	45
	Popis oznaka i kratica.....	48

1. UVOD

Aditivna proizvodnja, poznatija kao 3D printanje, predstavlja tehnološku revoluciju koja je od izrade prototipova prerasla u metodu proizvodnje finalnih funkcionalnih dijelova. Za razliku od tradicionalnih metoda koje oblikuju predmet uklanjanjem viška materijala, 3D printanje gradi objekte dodavanjem materijala sloj po sloj direktno iz digitalnog modela. Ovakav pristup omogućuje neviđenu slobodu dizajna i izradu kompleksnih geometrija uz istovremeno smanjenje otpada i vremena pripreme proizvodnje.

U svijetu aditivnih tehnologija, proces modeliranja taložnim nanošenjem (FDM) ističe se kao najrašireniji zbog svoje jednostavnosti i niske cijene uređaja. FDM tehnologija nalazi primjenu u gotovo svim industrijama - od automobilske i zrakoplovne do medicine i arhitekture. Najpopularniji materijal u ovom postupku je polilaktična kiselina (PLA), biorazgradivi polimer dobiven iz obnovljivih izvora. PLA se odlikuje niskim toplinskim stezanjem i dobrim mehaničkim svojstvima, što ga čini idealnim za širok spektar primjena.

Unatoč brojnim prednostima, FDM tehnologija suočava se s izazovom kvalitete površine. Zbog slojevitog polaganja rastaljene niti javlja se karakterističan „efekt stepenica” (engl. *stair-stepping effect*), koji izravno utječe na estetiku, trenje i mehaničku izdržljivost proizvoda. Stoga je kontrola hrapavosti površine, izražena kroz parametre Ra , Rq i Rz , postala ključan faktor u optimizaciji procesa.

Cilj ovog rada je analizirati kako rezolucija (visina) sloja i utrošak materijala utječu na kvalitetu površine uzoraka izrađenih od PLA filamenta. Eksperimentalni dio proveden je na 3D pisaču Prusa i3 MK3 uz variranje visine sloja od iznimno finih 0,05 mm do grubljih 0,30 mm. Rad istražuje utjecaj rezolucije sloja i utroška materijala na hrapavost površine, vrijeme izrade i proizvodne troškove, s ciljem definiranja optimalne ravnoteže između visoke kvalitete proizvoda i proizvodne učinkovitosti. Kroz teorijski pregled, eksperimentalnu analizu i matematičko modeliranje, ovaj rad nastoji pružiti uvid u mogućnosti preciznog upravljanja kvalitetom u svijetu FDM 3D ispisa.

2. 3D PRINTANJE

2.1. Što je 3D printanje i kako funkcionira?

3D printanje je tehnologija koja svoje korijene ima još od kraja 80-ih godina prošlog stoljeća, a svoj je procvat doživjela u posljednjih nekoliko godina kada je postala široko poznata i prihvaćena. Ova inovativna metoda, poznata još i kao aditivna proizvodnja, omogućuje izradu trodimenzionalnih objekata direktno iz digitalnog modela dodavanjem slojeva materijala jedan na drugi. Time predstavlja revolucionaran način na koji se predmeti stvaraju, pretvarajući ideje u stvarnost bez posrednika [1].

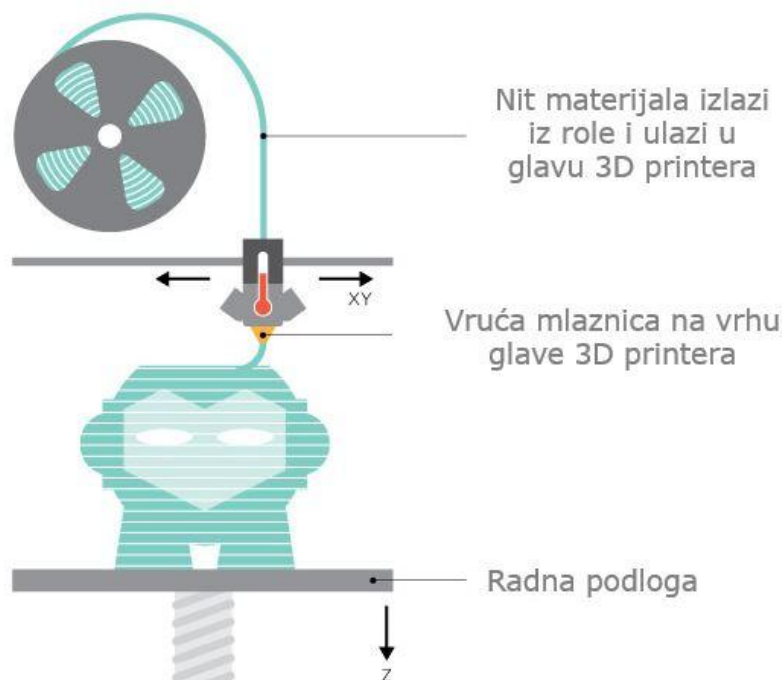
Praktički svaki zamislivi oblik koji se može stvoriti u digitalnom prostoru može se reproducirati pomoću 3D printera. Ova tehnologija ne samo da mijenja paradigmu proizvodnje, već otvara i vrata potpuno novim načinima rada u različitim industrijama. Od automobilske do medicinske industrije, 3D printanje već sada transformira način na koji se proizvode dijelovi, alati i prototipovi.

No, možda najzanimljivija perspektiva leži u potencijalu 3D printanja za individualnu upotrebu. Sada je moguće da svatko, čak i bez posebnog stručnog znanja, stvori svoje predmete iz udobnosti vlastitog doma. Samo uz pomoć računalnog programa i dostupnog 3D printera, granica je isključivo mašta. Također, kroz 3D printanje, postoji mogućnost personalizacije i prilagodbe predmeta prema individualnim potrebama i preferencijama.

Dakle, 3D printanje nije samo tehnologija proizvodnje, već je i pokretač inovacija i kreativnosti, stvarajući novu paradigmu u svijetu proizvodnje i dizajna.

3D proces izrade objekata sastoji se od 3 koraka: modeliranja predmeta unutar za to predviđenog programa, učitavanja konstruiranog objekta u printer i samog printanja. Modeliranje predmeta vrši se putem CAD (engl. *Computer-Aided Design*) programa ili skeniranjem pomoću 3D skenera. Model se zatim sprema u datoteku u STL formatu, standardnom formatu podržanom od strane većine programa za 3D modeliranje. Taj se model digitalno "reže" na tanke slojeve pomoću softvera za pripremu ispisa. Nakon toga printer prema tim slojevima nanosi materijal i stvara konačni objekt (Slika 2.1). Objekt se postupno ispisiuje sloj po sloj čija debljina može varirati ovisno o tehnologiji i zahtjevima korisnika. Ovaj parametar također utječe na trajanje printanja i veličinu objekta. Najčešće korišteni materijali uključuju plastiku, metale, keramiku i kompozite [2].

Primjena 3D printera je široka i obuhvaća različite industrije poput automobilske, medicinske, arhitektonske, vojne, zrakoplovne, strojarske i mnoge druge. Unatoč trenutnoj primjeni, tehnologija 3D printanja još uvijek je u razvoju, što otvara vrata za širok spektar potencijalnih primjena [3].



Slika 2.1 Prikaz procesa 3D printanja [4]

2.2. Razlika 3D printanja i tradicionalne proizvodnje

3D metoda printanja predmeta u današnjem svijetu tehnologije sve više dolazi do izražaja. Iako se tradicionalna proizvodnja koristi stoljećima, 3D printanje polako mijenja način na koji razmišljamo o stvaranju proizvoda.

Tradicionalna proizvodnja obično koristi metode poput lijevanja, glodanja, bušenja ili rezanja, gdje se višak materijala uklanja kako bi se dobio željeni oblik. Ove metode su učinkovite za masovnu proizvodnju, ali često zahtijevaju puno alata, rada i vremena za pripremu. Također, promjene u dizajnu proizvoda zahtijevaju prilagodbu cijelog proizvodnog procesa.

S druge strane, 3D printanje gradi predmet sloj po sloj, direktno iz digitalnog modela. Ovo omogućuje brzu izradu prototipa, individualiziranih proizvoda i kompleksnih oblika koje bi bilo teško ili u nekim slučajevima čak i nemoguće napraviti tradicionalnim metodama. Jedna

od prednosti 3D printanja je i to što se materijala koristi samo onoliko koliko je potrebno, što smanjuje otpad.

Glavna razlika između ove dvije metode je u pristupu: tradicionalna proizvodnja je "oduzimajuća" (materijal se uklanja), dok je 3D printanje "dodavajuća" (materijal se dodaje) tehnologija. Osim toga, 3D printanje je fleksibilnije, ali za sada sporije i skuplje za proizvodnju većih serija proizvoda [5].

Zaključno, 3D printanje ne zamjenjuje u potpunosti tradicionalnu proizvodnju, ali nudi nove mogućnosti, posebno u području inovacija, prototipova i personalizacije proizvoda. Budućnost će vjerojatno donijeti kombinaciju obje metode za optimalne rezultate.

2.3. Postupci 3D printanja

3D printanje obuhvaća nekoliko proizvodnih postupaka kojima se izrađuju 3D modeli, prema standardu ISO/ASTM 52900:2021 postoji sedam takvih postupaka, odnosno kategorija. [6]. Svi postupci međusobno se razlikuju po načinu na koji se oblikuje materijal te se mogu razlikovati i po odabiru materijala, završnoj obradi površine, trajnosti te brzini i cijeni proizvodnje. Kategorije su prikazane u Tablici 2.1.

Tablica 2.1 - Tehnologije, načini rada te primjeri procesa 3D printanja

Tehnologija aditivne proizvodnje	Opis načina rada	Primjeri procesa
Material Extrusion	Materijal se zagrijava do taljenja te se kroz mlaznicu nanosi u slojevima	FDM (Fused Deposition Modeling), FFF
Vat Photopolymerization	Tekuća fotopolimerna smola selektivno se očvršćuje djelovanjem svjetlosti ili laserske zrake	SLA (Stereolithography), DLP, LCD
Material Jetting	Kapljice fotopolimera nanose se na radnu površinu i trenutno se učvršćuju UV zračenjem	PolyJet, MultiJet
Binder Jetting	Na sloj praškastog materijala nanosi se vezivno sredstvo, nakon	3DP, Metal Binder Jetting

	čega slijedi dodatna toplinska obrada ili infiltracija	
Powder Bed Fusion	Sloj praškastog materijala selektivno se tali ili sinterira pomoću laserskog ili elektronskog snopa	SLS (Selective Laser Sintering), SLM, EBM
Directed Energy Deposition	Dovedeni materijal u obliku praha ili žice tali se usmjerenim izvorom energije i nanosi na podlogu	LENS, LMD, WAAM
Sheet Lamination	Tanki listovi materijala slažu se i međusobno povezuju toplineom ili tlakom	LOM (Laminated Object Manufacturing), UAM

U nastavku su detaljnije objašnjene odabrane tehnologije i procesi koje imaju najrašireniju primjenu i značaj u industriji.

2.3.1. Stereolitografija (SLA)

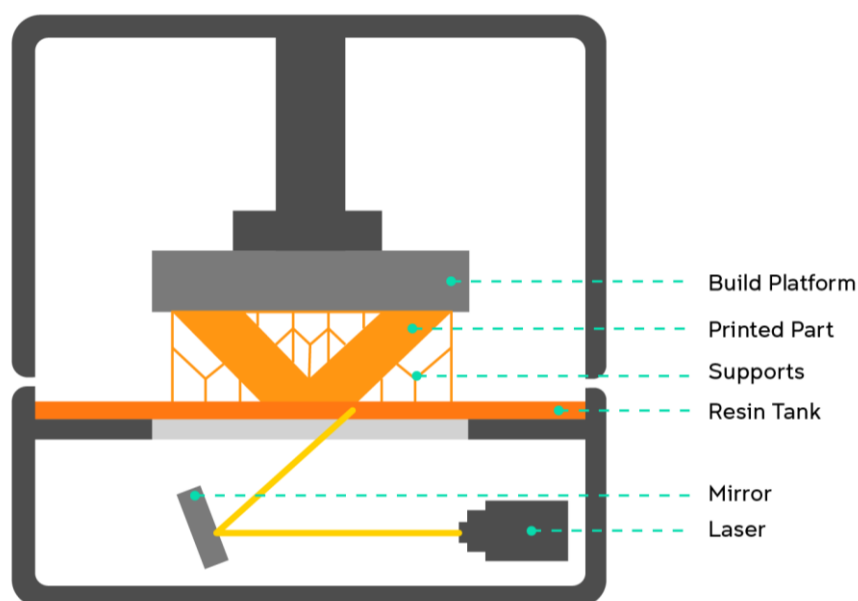
Stereolitografija (SLA) jedna je od najranijih i najpreciznijih tehnologija aditivne proizvodnje te pripada skupini postupaka fotopolimerizacije u komori. Temelji se na selektivnom očvršćivanju tekuće fotopolimerne smole pomoću izvora svjetlosti, najčešće UV laserske zrake, pri čemu se objekt izrađuje sloj po sloj prema digitalnom 3D modelu. Tijekom procesa laser skenira površinu smole i definira presjek modela, uzrokujući fotopolimerizaciju samo na unaprijed određenim područjima. Nakon očvršćivanja jednog sloja, radna platforma se pomiče, a postupak se ponavlja sve dok se ne izradi cijeli objekt (Slika 2.2).

SLA tehnologija omogućuje izradu dijelova jako visoke dimenzijske točnosti i velike rezolucije, uz mogućnost primjene izuzetno tankih slojeva. Zbog toga su linije slojeva često gotovo nevidljive, a dobivena površina iznimno glatka, što u mnogim slučajevima smanjuje potrebu za naknadnom obradom. Visoka kvaliteta površine dodatno je posljedica kemijske povezanosti između slojeva nastale procesom fotopolimerizacije, koja omogućuje preciznu reprodukciju geometrije i izradu vrlo složenih i detaljnih struktura.

Zahvaljujući navedenim prednostima, SLA se često primjenjuje u izradi preciznih prototipova, dentalnih i medicinskih modela, kalupa te funkcionalnih dijelova s kompleksnim geometrijama. U usporedbi s FDM tehnologijom, SLA omogućuje znatno bolju rezoluciju i

kvalitetu površine, ali istodobno zahtijeva dodatne postupke naknadne obrade, poput ispiranja nepolimerizirane smole i dodatnog UV očvršćivanja izrađenih dijelova.

Nedostaci SLA tehnologije uključuju ograničena mehanička svojstva dijelova, osjetljivost fotopolimernih materijala na UV zračenje i vlagu te višu cijenu materijala u usporedbi s termoplastičnim filamentima. Unatoč tim ograničenjima, stereolitografija i dalje ima značajnu ulogu u području aditivne proizvodnje zbog iznimne preciznosti, visoke kvalitete površine i mogućnosti izrade vrlo složenih geometrija [7].



Slika 2.2 Prikaz rada SLA printera [8]

2.3.2. PolyJet

PolyJet tehnologija predstavlja naprednu i vrlo preciznu metodu aditivne proizvodnje. Tijekom procesa, mlaznice nanose sitne kapljice fotopolimernog materijala na radnu površinu prema zadanim parametrima. Materijal se istovremeno izlaže UV svjetlu, čime se učvršćuje i formira završni predmet.

Rezolucija sloja može biti već od 0.016 mm, a uz preciznost od 0.1 mm po sloju, ova tehnologija omogućava izradu iznimno glatkih i detaljnih modela.

Kod izrade predmeta sa složenijom geometrijom ili udubljenjima, potrebno je koristiti potporni materijal. PolyJet printer u tu svrhu koristi dodatnu mlaznicu koja nanosi gelasti potporni materijal, lako uklonjiv nakon završetka procesa.

Velika prednost ove tehnologije je mogućnost izrade gotovih proizvoda bez dodatne završne obrade. Omogućava printanje kompleksnih oblika (Slika 2.3) i detalja poput slika, crteža ili natpisa, a podržava i širi raspon materijala nego većina drugih tehnologija 3D printanja [5].



Slika 2.3 Predmeti izrađeni PolyJet tehnologijom ispisa [9]

2.3.3. Spajanje praškastog materijala u slojevima – PBF

Powder Bed Fusion (PBF) je napredna tehnologija aditivne proizvodnje koja omogućava izradu trodimenzionalnih objekata postupnim taloženjem i spajanjem slojeva praškastog materijala. U ovom procesu, tanki sloj praha ravnomjerno se nanosi na platformu za printanje, nakon čega se snop lasera (u tehnologijama SLS i SLM) ili elektronska zraka (u tehnologiji EBM) koristi za selektivno topljenje ili spajanje čestica praha. Na taj se način formira sloj materijala koji odgovara poprečnom presjeku proizvoda.

Kada je jedan sloj završen, platforma se spušta, nanosi se novi sloj praha i postupak se ponavlja sve dok se ne oblikuje konačni predmet. Ova tehnologija omogućava vrlo visoku preciznost i kvalitetu površine, što je čini pogodnom za izradu funkcionalnih dijelova i komponenti složenih geometrija koje bi bilo teško ili nemoguće proizvesti uobičajenim metodama. Osim toga, PBF ne zahtijeva dodatne kalupe ili alate, čime se smanjuju troškovi i vrijeme izrade, osobito kod manjih serija ili prototipova [10].

Unatoč brojnim prednostima, tehnologija ima i određene nedostatke. Proces je relativno spor u usporedbi s nekim drugim metodama 3D printanja, a troškovi opreme i materijala su

visoki. Također, zbog visokih temperatura koje se koriste pri spajanju čestica, može doći do naprezanja i deformacija u materijalu, što zahtijeva dodatnu naknadnu obradu. U nekim slučajevima potrebno je i korištenje potpornih struktura, koje se kasnije moraju ukloniti.

Unatoč tim ograničenjima, Powder Bed Fusion se danas smatra jednom od najpreciznijih i najsvestranijih tehnologija 3D printanja, posebno u medicinskoj i zrakoplovnoj proizvodnji, gdje je potrebna visoka točnost, čvrstoća i pouzdanost izrađenih dijelova [11].

Unutar tehnologije Powder Bed Fusion razlikuju se tri osnovne metode 3D printanja: selektivno lasersko sinteriranje (Selective Laser Sintering – SLS), selektivno lasersko taljenje (Selective Laser Melting – SLM) i taljenje snopom elektrona (Electron Beam Melting – EBM).

Kod SLS tehnologije, laserski snop se koristi za zagrijavanje čestica praha do točke sinteriranja, pri čemu se one međusobno povezuju i formiraju kompaktni sloj materijala. Ova metoda ne zahtijeva potpuno taljenje materijala, što omogućava širu primjenu različitih praškastih materijala, poput polimera i kompozita.

S druge strane, SLM tehnologija koristi visokoenergetski laserski snop za potpuno taljenje metalnog praha, nakon čega se čestice povezuju i očvršćuju u homogeni, čvrsti sloj koji predstavlja poprečni presjek proizvoda. Ovim postupkom moguće je postići iznimno visoku gustoću i mehaničku čvrstoću izrađenih dijelova, usporedivu s onima proizvedenima konvencionalnim metodama obrade metala.

Treća metoda, EBM tehnologija, koristi snop elektrona za taljenje metalnog praha u kontroliranom vakuumskom okruženju. Na taj način se čestice metala povezuju i skrućuju u čvrsti, homogeni sloj. Zbog vakuumskih uvjeta, ova je tehnologija posebno pogodna za obradu reaktivnih metala, poput titana i njegovih legura, koji bi pri laserskom taljenju mogli oksidirati [12].

2.4. Prednosti i nedostaci 3D printanja

Aditivna proizvodnja (3D printanje) predstavlja suvremeni i inovativni pristup izradi proizvoda koji omogućuje stvaranje trodimenzionalnih objekata sloj po sloj na temelju digitalnog modela. Za razliku od tradicionalnih tehnologija obrade koje se temelje na oduzimanju materijala, aditivna proizvodnja dodaje materijal samo tamo gdje je potreban, što donosi brojne tehničke, ekonomske i ekološke prednosti.

Prednosti 3D printanja uključuju mogućnost stvaranja kompleksnih geometrija i objekata u kraćem vremenu nego što je to moguće konvencionalnim metodama poput tokarenja, glodanja ili lijevanja. Ova tehnologija omogućuje izradu struktura složene unutarnje geometrije, poput šupljih konstrukcija, rešetkastih i organskih oblika, što je posebno značajno u zrakoplovnoj, medicinskoj i automobilskoj industriji.

Jedna od ključnih prednosti je minimalna količina otpada, jer se materijal nanosi isključivo tamo gdje je potreban. Time se postiže materijalna učinkovitost i smanjenje troškova, uz pozitivan utjecaj na okoliš. Iako proizvodi često zahtijevaju dodatnu završnu obradu radi poboljšanja površinske kvalitete, ukupni utrošak resursa i materijala znatno je manji u usporedbi s konvencionalnim metodama.

3D printanje također omogućuje personalizaciju i prilagodbu proizvoda bez potrebe za dodatnim alatima, kalupima ili značajnim promjenama u proizvodnom procesu. Ova mogućnost ima posebnu važnost u biomedicinskoj primjeni (izrada implantata, proteza, ortopedskih pomagala) te u industrijskom dizajnu, gdje se traži fleksibilnost i brza prilagodba krajnjem korisniku.

Dodatna prednost je i brza izrada prototipova (rapid prototyping), čime se značajno skraćuje vrijeme razvoja proizvoda i omogućuje brži izlazak na tržište. Uz to, 3D printanje omogućava decentraliziranu i lokalnu proizvodnju, što smanjuje troškove transporta i omogućuje bržu opskrbu i fleksibilnije planiranje proizvodnje.

Široka raznolikost materijala dostupna je za 3D ispis – od polimera, metala i keramike, pa sve do eksperimentalnih materijala poput zlata, srebra i bioloških materijala koji se istražuju u području printanja hrane i bioprintanja. Iako je ponuda materijala već široka, ovo područje i dalje bilježi značajan razvoj i inovacije [2].

U različitim industrijama, ove prednosti učinile su 3D tehnologiju iznimno popularnom za proizvodnju lakših, učinkovitijih i ekonomičnijih modela, dijelova i proizvoda, čime se dodatno povećava njezina primjena i tržišni potencijal.

Unatoč brojnim prednostima, 3D printanje ima i određene nedostatke koji ograničavaju njegovu širu primjenu u industriji. Jedan od najznačajnijih nedostataka je visoka cijena opreme i materijala, osobito kod tehnologija koje koriste metale, keramiku ili visokoenergetske izvore poput lasera i elektronskih snopova.

Također, proces je često sporiji od konvencionalnih metoda masovne proizvodnje, što ga čini manje isplativim za serijsku proizvodnju većih količina proizvoda. Ograničenja postoje i u pogledu vrsta materijala — iako su danas dostupni polimerni, metalni i keramički materijali, njihova obrada zahtijeva posebne parametre i često ograničava primjenu tehnologije u specifičnim područjima.

Površinska kvaliteta 3D printanih dijelova često nije na razini tradicionalno obrađenih proizvoda, pa je potrebna naknadna mehanička, kemijska ili toplinska obrada radi postizanja zahtijevane točnosti i hrapavosti. Uz to, kod određenih tehnologija mogu se pojaviti unutarnja naprezanja, poroznosti i deformacije, što može negativno utjecati na mehanička svojstva gotovog proizvoda.

Iako su dostupni brojni materijali, neki materijali poput metala ili tehničkih kompozita i dalje zahtijevaju kompleksne procese obrade i visoku energetska učinkovitost, što povećava troškove proizvodnje. Dodatni izazov predstavlja i stručnost operatera, jer 3D printanje zahtijeva detaljno poznavanje procesa, pripreme modela i postprocesnih postupaka.

Na kraju, iako 3D printanje pruža izuzetnu fleksibilnost, ono nije uvijek ekonomski opravdano za masovnu proizvodnju, već se najčešće koristi za prototipove, male serije, specijalizirane proizvode i reparaciju postojećih dijelova, gdje njegova jedinstvena svojstva dolaze najviše do izražaja [11].

3D printanje donosi revolucionarne promjene u suvremenoj proizvodnji, omogućavajući bržu, učinkovitiju i održiviju izradu proizvoda uz visoku razinu prilagodljivosti. Iako se suočava s izazovima poput visoke cijene opreme, ograničenog izbora materijala i potrebe za naknadnom obradom, razvoj novih tehnologija i materijala konstantno proširuje mogućnosti primjene. U budućnosti se očekuje da će 3D printanje postati ključna proizvodna tehnologija u mnogim industrijskim sektorima, povezujući inovaciju, fleksibilnost i održivost.

3. FDM TEHNOLOGIJA 3D PRINTANJA

Tehnologija taložnog očvršćivanja materijala (engl. *Fused Deposition Modeling – FDM*) razvijena je 1989. godine od strane Scotta i Lise Crump, a njezinu je komercijalnu primjenu kasnije omogućila tvrtka Stratasys. Nakon isteka patenta, kao i razvojem novih materijala i pisača, ova je tehnologija postala široko dostupna te se danas primjenjuje u brojnim područjima [13].

FDM pripada skupini tehnologija ekstruzije materijala, pri čemu se rastaljeni filament istiskuje kroz mlaznicu te se taloži sloj po sloj. Svaki pojedini sloj tijekom postupka se hladi i stvrdnjava, čime se postupno oblikuje trodimenzionalni objekt. U ovoj se tehnologiji najčešće koriste plastični i kompozitni filament.

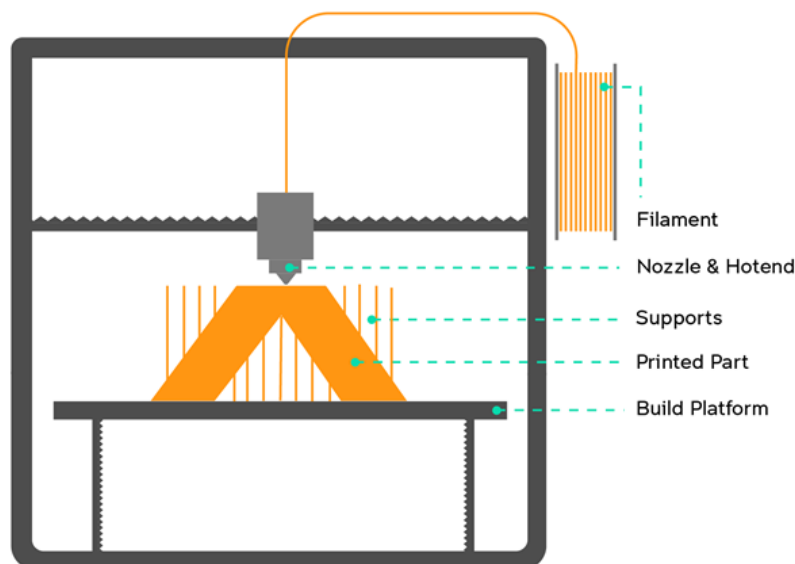
FDM pisač sastoji se od nekoliko osnovnih komponenti [14]:

- Filament – osnovni materijal u obliku niti (žice) namotane na kolut.
- Ekstruder – mehanizam koji uvlači filament i tali ga prije istiskivanja kroz mlaznicu.
- Radna podloga – površina na koju se materijal taloži sloj po sloj, često grijana radi poboljšanja prijanjanja.
- Upravljački sustav – elektronički sklopovi i softver koji upravljaju kretanjem pisača, temperaturom i cjelokupnim procesom izrade prema G - kodu.

Postupak izrade kod FDM tehnologije odvija se u tri osnovne faze: izrada CAD modela, njegova priprema i slanje 3D pisaču te sama izrada objekta, uz mogućnost naknadne obrade. U prethodnom dijelu rada opisana je izrada CAD modela i njegova priprema u "slicer" softveru, koji model razlaže na slojeve, definira parametre ispisa te generira G-kod s uputama za rad pisača.

Prije početka ispisa filament se postavlja u ekstruder, prolazi kroz hladni dio sustava i ulazi u zagrijanu mlaznicu. Kako bi se osiguralo kvalitetno prijanjanje prvog sloja, potrebno je pravilno poravnati radnu podlogu i podesiti razmak između mlaznice i podloge. Nakon postizanja radne temperature ispisuje se tzv. linija za čišćenje mlaznice (engl. *priming line*), kojom se stabilizira protok materijala. Sam proces ispisa temelji se na kretanju ekstrudera po osima X i Y, dok se pomicanje po osi Z ostvaruje pomicanjem podloge ili mlaznice. Materijal se taloži sloj po sloj, hladi i očvršćuje sve do oblikovanja konačnog objekta (Slika 3.1). Tijekom izrade nužno je nadzirati rad pisača kako bi se spriječile nepravilnosti poput stvaranja

niti ili deformacija. Nakon završetka ispisa uklanja se izrađeni model zajedno s potpornim strukturama, a prema potrebi provodi se dodatna obrada, poput rezanja, brušenja ili termičkih postupaka [15].



Slika 3.1 Proces izrade FDM tehnologijom [16]

Budući da je postupak izrade ovim pisačima relativno jednostavan i pristupačan, FDM tehnologija našla je primjenu kako u industriji, tako i u kućnoj i hobi upotrebi.

3.1. Prednosti i nedostaci FDM tehnologije

FDM tehnologija odlikuje se pristupačnošću, niskim troškovima i jednostavnim rukovanjem, zbog čega je posebno pogodna za početnike. Dodatna prednost ove tehnologije je širok raspon dostupnih materijala, od krutih do fleksibilnih, što omogućuje raznoliku primjenu. Pojedini materijali su biorazgradivi, čime se smanjuje negativan utjecaj na okoliš. Uz korištenje potpornih struktura, FDM pisači omogućuju izradu složenih geometrija i kompleksnih oblika.

Unatoč navedenim prednostima, FDM tehnologija ima i određena ograničenja. Tijekom izrade nastaju vidljivi slojevi, što rezultira hrapavijom površinom izrađenih dijelova te često zahtijeva dodatnu naknadnu obradu. U usporedbi s drugim tehnologijama aditivne proizvodnje, FDM postupak je sporiji i manje precizan, a mogu se pojaviti i problemi tijekom ispisa, poput začepjenja mlaznice ili podizanja rubova modela. Nadalje, maksimalne dimenzije izrađenih objekata ograničene su veličinom radne komore pisača [13].

4. MATERIJALI KOD FDM 3D PRINTANJA

Povijest materijala za 3D ispis seže unatrag od samih početaka ove tehnologije. Danas je dostupan širok spektar različitih vrsta materijala, prilagođenih različitim potrebama i zahtjevima. To uključuje prahove, filamente, kuglice, smole i druge oblike. Materijali koje koristi FDM tehnologija nazivaju se filamenti, odnosno niti namotane na kolut (Slika 4.1).

Ovi materijali često su razvijeni s ciljem zadovoljenja specifičnih zahtjeva određenih industrija ili primjena. Na primjer, u dentalnoj industriji razvijeni su materijali koji su posebno prilagođeni za izradu stomatoloških implanata.

Međutim, s porastom popularnosti 3D ispisa, došlo je i do procvata različitih proizvođača materijala za 3D pisače. To je rezultiralo ogromnim izborom materijala na tržištu, što može biti izazovno za korisnike koji se prvi put susreću s ovom tehnologijom.

Upravo zbog toga, sve češće se provode pregledi i usporedbe različitih materijala kako bi se olakšao odabir najprikladnijeg materijala za određenu svrhu. Ti pregledi obično uključuju analizu svojstava materijala poput čvrstoće, fleksibilnosti, otpornosti na toplinu i kemikalije, kao i njihovu cijenu i dostupnost.

Uzimajući u obzir sve ovo, u nastavku rada su istraženi neki od najčešće korištenih materijala u svijetu 3D ispisa kako bi se bolje razumjele njihove karakteristike i primjene.



Slika 4.1 FDM filamenti namotani na kolut [17]

4.1. Akrilonitril butadien stiren (ABS)

Akrilonitril butadien stiren (ABS) pripada skupini termoplastičnih kopolimera čije komponente osiguravaju visoku čvrstoću, žilavost, otpornost na udarce i dobru obradivost. Zahvaljujući tim svojstvima, ABS je jedan od najčešće korištenih plastičnih materijala u industriji te standardni materijal u FDM tehnologiji, dostupan za većinu stolnih 3D pisaa. Osim u FDM postupcima, ABS je dostupan i u obliku smole, što omogućuje njegovu primjenu i u SLA tehnologiji.

ABS se odlikuje visokom mehaničkom čvrstoćom, trajnošću i dobrom otpornošću na povišene i snižene temperature, pri čemu može tolerirati temperaturna opterećenja u rasponu od približno $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Temperatura ispisa najčešće se kreće između $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $230\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ima glatku završnu površinu te se lako naknadno obrađuje brušenjem, bušenjem ili kemijskim postupcima. Također je široko dostupan, cjenovno povoljan i nudi se u raznim bojama.

Unatoč brojnim prednostima, ABS ima i određena ograničenja. Tijekom ispisa može doći do skupljanja materijala i podizanja rubova (engl. *warping*), osobito ako se ne koristi grijana radna podloga i zatvorena komora pisaa. Tijekom procesa ispisa oslobađaju se štetne pare i čestice, zbog čega se preporučuje korištenje pisaa sa zatvorenim kućištem i odgovarajućom ventilacijom. Dodatno, ABS nije biorazgradiv te pokazuje slabu otpornost na UV zračenje, što može uzrokovati žućenje i degradaciju materijala, a bez stabilne kontrole temperature moguća su i dimenzijska odstupanja [18].

Zbog svojih svojstava, ABS se široko primjenjuje u izradi kućišta, igračaka, automobilskih dijelova, kućanskih aparata i funkcionalnih prototipova. U industrijskoj proizvodnji često se koristi za izradu prototipova i alata, nerijetko u modificiranim varijantama radi poboljšane otpornosti na toplinu [19]. Primjer proizvoda izrađenih iz ovog materijala je prikazan na slici 4.2.



Slika 4.2 Predmeti izrađeni od ABS filamenta [20]

4.2. Polietilen tereftalat modificiran glikolom (PETG)

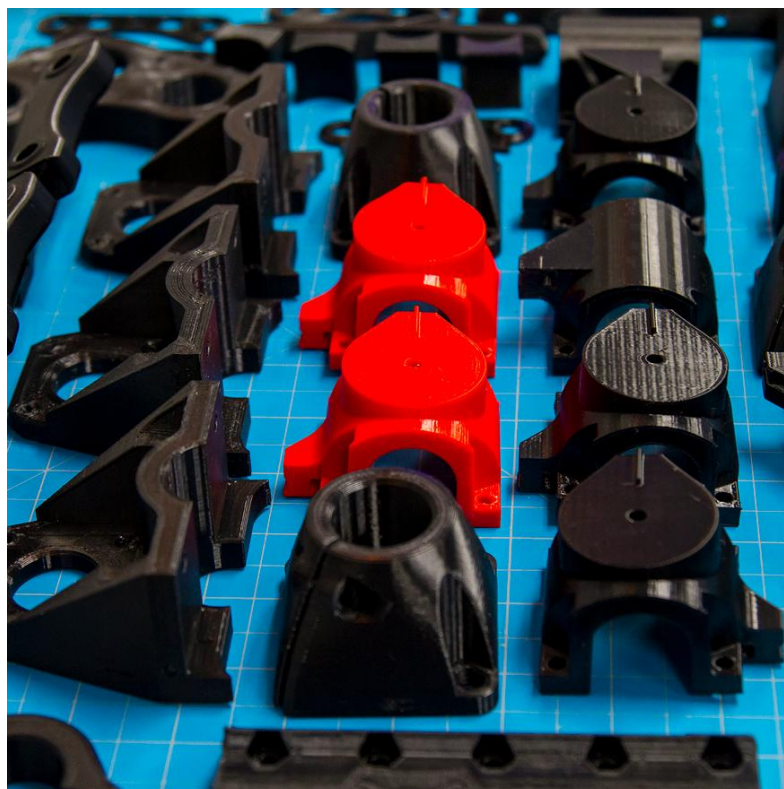
Polietilen tereftalat modificiran glikolom (PETG) pripada skupini kopoliestera, odnosno glikoliziranih poliestera, čija je kemijska struktura slična polietilen tereftalatu (PET), uz dodatak glikola kojim se smanjuje krhkost i lomljivost materijala. Riječ je o amorfnoj termoplastici koja je u potpunosti reciklabilna te se široko primjenjuje u području aditivne proizvodnje. U FDM tehnologiji PETG objedinjuje jednostavnost ispisa karakterističnu za PLA i mehaničku otpornost usporedivu s ABS-om.

PETG se odlikuje jednostavnim ispisom i dobrom adhezijom između slojeva, zbog čega je pogodan i za manje iskusne korisnike. Materijal ne ispušta neugodne ni štetne pare tijekom ispisa te omogućuje glatku i sjajnu površinsku završnu obradu. Odlikuje se visokom žilavošću, vodootpornošću i dobrom kemijskom otpornošću, dok se njegova toplinska postojanost nalazi između PLA-a i ABS-a.

Unatoč brojnim prednostima, PETG ima i određena ograničenja. Nepravilno podešene postavke ispisa mogu uzrokovati pojavu niti (engl. *stringing*) i kapanje materijala, a kod složenijih geometrija često je potrebno koristiti potporne strukture. Zbog izraženo jake adhezije PETG-a na radnu podlogu, preporučuje se primjena separacijskog sloja, poput ljepila, kako bi se olakšalo uklanjanje otiska i spriječilo oštećenje podloge. Nadalje, naknadna obrada PETG-

a je zahtjevnija, budući da se materijal teže lijepi te se, za razliku od ABS-a, ne može kemijski zaglađivati otapalima.

Zahvaljujući povoljnim mehaničkim i kemijskim svojstvima, PETG se koristi za izradu funkcionalnih prototipova i dijelova izloženih vlazi, kemikalijama i umjerenim toplinskim opterećenjima, poput kućišta, poklopaca, nosača i zaštitnih obloga. Primjenjuje se za izradu kućanskih predmeta, ambalaže i svjetlosnih difuzora, dok se u području elektronike, medicine i edukacije koristi za izradu različitih tehničkih i edukativnih modela (Slika 4.3) [21, 22].



Slika 4.3 Predmeti izrađeni od PETG filamenta [22]

4.1. Polilaktična kiselina (PLA)

Polilaktična kiselina (PLA) pripada skupini biopolimera dobivenih iz obnovljivih izvora, poput kukuruza ili šećerne trske, zbog čega se smatra ekološki prihvatljivim materijalom. Za razliku od ABS-a, PLA je biorazgradiv te predstavlja jedan od najčešće korištenih materijala u FDM tehnologiji. Njezino printanje odvija se pri temperaturama ispisa koje se najčešće kreću između 180 °C i 230 °C, a zbog niske kontrakcije tijekom hlađenja ne zahtijeva korištenje grijane radne podloge ni zatvorene komore pisača.

PLA se odlikuje jednostavnošću ispisa, dobrom adhezijom između slojeva i malom sklonošću skupljanju, što rezultira dobrom dimenzijskom točnošću i glatkom završnom površinom. Materijal se brzo hladi i stvrdnjava, što omogućuje stabilan ispis, ali istodobno može otežati rukovanje ako parametri hlađenja nisu pravilno podešeni. PLA je cjenovno pristupačan te dostupan u velikom broju varijanti i boja, uključujući i prozirne izvedbe.

Unatoč brojnim prednostima, PLA ima i određena ograničenja. Odlikuje se slabijom otpornošću na povišene temperature i UV zračenje te manjom žilavošću u usporedbi s ABS-om, zbog čega je sklon deformacijama i lomovima pri mehaničkom opterećenju. Nepravilno podešeno hlađenje može uzrokovati pojavu niti (engl. *stringing*), a dugotrajna izloženost vlazi može dovesti do promjene boje i degradacije materijala.

PLA se najčešće koristi za brzu izradu prototipova, dekorativne i edukacijske modele, ambalažu te potrošne proizvode. U području medicine primjenjuje se za izradu anatomskih modela, resorptivnih šavova i implantata, dok se poboljšane varijante materijala (PLA+) koriste i u industriji za izradu alata i pomoćnih dijelova [23, 24]. Predmeti izrađeni od PLA filameta prikazani su na slici 4.3.



Slika 4.3 Predmeti izrađeni od PLA filameta [24]

5. HRAPAVOST POVRŠINE

Hrapavost površine jedno je od najvažnijih obilježja svake tehnički obrađene površine jer u značajnoj mjeri određuje njezina funkcionalna i estetska svojstva. Definira se kao skup mikrogeometrijskih nepravilnosti koje nastaju tijekom procesa obrade i razlikuje se od makrogeometrijskih pogrešaka poput valovitosti. Hrapavost je, dakle, mikrostrukturno svojstvo koje u kombinaciji s drugim površinskim karakteristikama čini ukupnu površinsku teksturu [25].

Kontrola i analiza hrapavosti površine od presudnog je značaja u strojarskoj industriji jer ona utječe na različite aspekte ponašanja komponenata. Funkcionalno, hrapavost određuje tribološka svojstva, poput trenja i trošenja, dok s mehaničkog gledišta mikrogeometrijske nepravilnosti mogu djelovati kao koncentratori naprezanja, čime se smanjuje otpornost na zamor materijala. S estetskog i ergonomskeg aspekta glatke površine povezuju se s višom razinom kvalitete i uporabnom vrijednošću proizvoda [26].

U industriji se razvila čitava znanost o površinskoj topografiji koja uključuje mjerenje, analizu i optimizaciju hrapavosti. Od prvih mehaničkih metoda, gdje se igla kretala preko površine i bilježila njezine nepravilnosti, do današnjih sofisticiranih optičkih tehnika, razvijeni su brojni alati i norme kojima se standardizira način ispitivanja. Među njima najznačajnije su norme ISO 4287, koja definira osnovne 2D profilometrijske parametre, te ISO 25178, koja uvodi 3D parametre za prostornu analizu površina [27, 28].

U području aditivne proizvodnje, posebice kod FDM postupka, analiza hrapavosti ima posebno značenje. Budući da se dijelovi izrađuju slojevitim taloženjem materijala, završna površina često pokazuje izražene prijelaze između slojeva, što stvara tzv. "stair-stepping" efekt. Ovaj fenomen rezultira povećanom hrapavošću u usporedbi s klasičnim metodama obrade i ograničava primjenu FDM ispisa u industriji gdje su potrebne vrlo glatke i precizne površine [29]. Upravo zato istraživači nastoje razumjeti i optimizirati procesne parametre poput visine sloja, brzine ispisa, temperature mlaznice i orijentacije uzorka kako bi se smanjila hrapavost površine i poboljšala ukupna kvaliteta proizvoda [30].

Ovo poglavlje obrađuje temeljne aspekte hrapavosti površine u nekoliko cjelina. U prvom podpoglavlju razmatra se pojam i značaj hrapavosti, s naglaskom na njezin utjecaj na funkcionalna svojstva i posebnosti u aditivnoj proizvodnji. Drugo podpoglavlje posvećeno je

metodama ispitivanja hrapavosti, pri čemu se uspoređuju kontaktne i beskontaktne metode mjerenja, njihovi nedostaci i prednosti te njihova primjena kod FDM ispisa. Treće podpoglavlje daje pregled parametara hrapavosti, od najčešće korištenih 2D veličina Ra , Rq , i Rz . Time se stvara cjelovita osnova za razumijevanje problematike hrapavosti površine, što je nužno za daljnju analizu matematičkog modeliranja i optimizacije u sljedećim poglavljima.

5.1. Pojam i značaj hrapavosti

Hrapavost površine dio je šireg područja površinske topografije koje obuhvaća valovitost, oblik i druge nepravilnosti. Ona se definira kao skup malih, nepravilnih odstupanja od idealne geometrije površine koja nastaju tijekom procesa obrade ili proizvodnje [25]. Budući da svaka površina, bez obzira na tehnologiju izrade, posjeduje određeni stupanj hrapavosti, razumijevanje i kontrola ovog svojstva od iznimne je važnosti u inženejskoj praksi.

Hrapavost utječe na više aspekata funkcionalnosti proizvoda:

- **Tribološka svojstva** – povećana hrapavost povećava trenje i trošenje, što može dovesti do kraćeg vijeka trajanja komponente.
- **Mehaničke karakteristike** – mikrogeometrijske nepravilnosti djeluju kao koncentratori naprezanja, smanjujući otpornost na zamor materijala [26].
- **Adhezija i površinska energija** – hrapave površine imaju veću kontaktnu površinu, što može povećati prijanjanje boja, ljepila ili bioloških tkiva [31].
- **Estetski dojam i ergonomija** – u industrijskim i potrošačkim proizvodima glatka površina povezuje se s većom kvalitetom i ugodnijim dodirrom.

Kod FDM postupka 3D ispisa hrapavost je osobito izražena zbog slojevitog taloženja polimernih niti. Svaki sloj ostavlja trag u obliku tzv. "stair-stepping" efekta, što je posebno uočljivo na kosim ili zakrivljenim površinama [29]. Na hrapavost u FDM-u utječu brojni procesni parametri, među kojima se ističu:

- visina sloja,
- promjer mlaznice,
- brzina ispisa,
- temperatura mlaznice,

- temperatura radne podloge.

Razumijevanje hrapavosti razvijalo se kroz više desetljeća, od prvih pokušaja mjerenja pomoću jednostavnih mehaničkih igala sredinom 20. stoljeća, do današnjih naprednih optičkih metoda. Standardizacija ovog područja posebno je važna: ISO 4287 definira osnovne 2D parametre hrapavosti.

Praćenje i optimizacija hrapavosti posebno je važna u industrijama gdje kvaliteta površine izravno utječe na funkcionalnost – u medicinskim implantatima, automobilske industriji, zrakoplovstvu te kod izrade kalupa i prototipova. U FDM tehnologiji optimizacija hrapavosti predstavlja ključan korak prema širem usvajanju 3D ispisa u industrijskoj praksi [30].

5.2. Metode ispitivanja hrapavosti

Mjerenje i analiza hrapavosti površine zauzimaju ključno mjesto u inženjerstvu jer omogućuju kvantitativnu procjenu površinskih nepravilnosti i njihovu povezanost s funkcionalnim svojstvima komponente. Odabir metode mjerenja ovisi o vrsti materijala, zahtjevima točnosti, raspoloživoj opremi te specifičnim karakteristikama površine. U aditivnoj proizvodnji, a posebno kod FDM postupka, potreba za točnim ispitivanjem hrapavosti naglašena je zbog slojevite prirode strukture i varijabilnosti koja nastaje promjenom parametara ispisa [29].

5.2.1. Kontaktne metode

Najraširenija metoda mjerenja hrapavosti je korištenje kontaktnih profilometara. Uređaj sadrži dijamantnu iglu koja prelazi preko površine uzorka, registrirajući vertikalna odstupanja od referentne ravnine. Na temelju tih podataka generira se 2D profil površine iz kojeg se izračunavaju parametri poput Ra , Rq i Rz . Prednosti ove metode su visoka točnost i široka primjena dok je nedostatak taj da je ova metoda destruktivna u smislu da može oštetiti osjetljive ili meke materijale, a brzina mjerenja je ograničena.

Kontaktne metode definirane su normom ISO 4287, koja specificira terminologiju i parametre profilometrijskog mjerenja. Osim toga, ISO 4288 daje smjernice za odabir odgovarajuće mjerne duljine i filtriranja signala [27, 32].

5.2.2. Beskontaktne metode

Beskontaktne metode koriste svjetlosne valove za dobivanje topografije površine. Jedna od najčešće korištenih je interferometrija bijelog svjetla (engl. *White Light Interferometry* - WLI), koja omogućuje precizno mjerenje mikrometarskih i submikrometarskih nepravilnosti.

Druga metoda je konfokalna laserska mikroskopija, kojom se dobivaju trodimenzionalne slike površine visoke rezolucije. Prednost ove metode je mogućnost analize složenih geometrija i neravnih površina [25].

Laserski 3D skeneri omogućuju brzo mapiranje većih površina, što je korisno u industrijskim primjenama gdje je važno dobiti globalni pregled hrapavosti. Prednosti su brzina, neinvazivnost, mogućnost mjerenja krhkih ili mekih materijala dok su nedostaci ovisnost o optičkim svojstvima materijala (refleksija, transparentnost) i veća cijena opreme.

U analizi površinske kvalitete FDM ispisa najčešće se kombiniraju kontaktne i beskontaktne metode.

5.2.3. Usporedne metode

Kod usporednih metoda hrapavost površine određuje se uspoređivanjem ispitivanog uzorka s pločicom standardizirane hrapavosti (engl. *Standard Roughness Comparison* – SRC), koja sadrži niz referentnih razina. Procjena se provodi vizualno ili dodirom, a metoda je prikladna za površine dobivene tokarenjem, pjeskarenjem i poliranjem. Prednosti ovakvog pristupa su brzina provedbe, niska cijena i jednostavna primjena u proizvodnom okruženju, dok su njezini glavni nedostaci ograničena točnost mjerenja i snažna ovisnost o iskustvu ispitivača [33]

5.3. Parametri hrapavosti

Parametri hrapavosti koriste se za kvantitativno opisivanje površinske mikrogeometrije i predstavljaju ključnu osnovu za usporedbu površina izrađenih različitim proizvodnim tehnologijama. Oni omogućuju da se kompleksne površinske nepravilnosti svedu na mjerljive veličine koje se mogu analizirati, uspoređivati i optimizirati. Posebno u kontekstu aditivne proizvodnje, gdje je završna kvaliteta površine često slabija nego kod klasičnih postupaka obrade, parametri hrapavosti služe kao osnova za procjenu prihvatljivosti komponente za industrijsku primjenu.

5.3.1. R_a – aritmetička sredina odstupanja profila

Najčešće korišten parametar je R_a (aritmetička sredina odstupanja profila), koji predstavlja prosječnu udaljenost svih točaka profila od srednje linije u mjernom intervalu. R_a se definira prema izrazu:

$$R_a = \frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z(x)| dx$$

gdje je:

R_a – srednje aritmetičko odstupanje profila [μm]

lr – duljina mjerenja [mm]

$Z(x)$ – visina profila hrapavosti obzirom na referentnu liniju (odstupanje od srednje linije) [μm]

R_a daje opću mjeru glatkoće površine i često se koristi u industriji jer omogućuje brzu i jednostavnu usporedbu različitih površina. Međutim, budući da predstavlja srednju vrijednost, R_a ne daje informacije o ekstremnim vrhovima i udubljenjima, što može biti problematično u slučajevima kada upravo oni imaju presudan utjecaj na funkcionalnost.

5.3.2. R_q – srednje kvadratno odstupanje profila

Sličan, ali osjetljiviji parametar je R_q ili RMS (engl. *root mean square*) vrijednost, koji se računa kao kvadrat srednje vrijednosti odstupanja profila:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{lr} \int_0^{lr} [Z(x)]^2 dx}$$

gdje je:

R_q – srednja kvadratna vrijednost odstupanja profila, [μm]

lr – referentna duljina, [mm]

$Z(x)$ – visina profila hrapavosti obzirom na referentnu liniju [μm]

Za razliku od R_a , R_q naglašava ekstremne vrijednosti, pa bolje odražava površine koje imaju izražene vrhove ili duboke doline. Upravo zato se R_q često koristi u istraživanjima gdje je potrebno analizirati potencijalne koncentratore naprezanja, što je posebno relevantno kod dijelova izrađenih FDM metodom, gdje slojevit struktura stvara značajne prijelaze.

5.3.3. Rz – maksimalna visina profila

Parametar Rz definiĉra se kao maksimalna visina profila unutar referentne duŹine i raĉuna se kao zbroj najveće visine vrha Rp i najveće dubine dola Rv . Za razliku od Ra , Rz naglašava ekstremna odstupanja, što ga čini korisnim za analizu dijelova kod kojih su kritiĉni lokalni defekti. U FDM tehnologiji, gdje slojevi stvaraju izraŹene rubove, Rz se koristi za procjenu izraŹenosti tzv. "stair-stepping" efekta. Njegova vrijednost raĉuna se prema izrazu [34] :

$$Rz = Rp + Rv$$

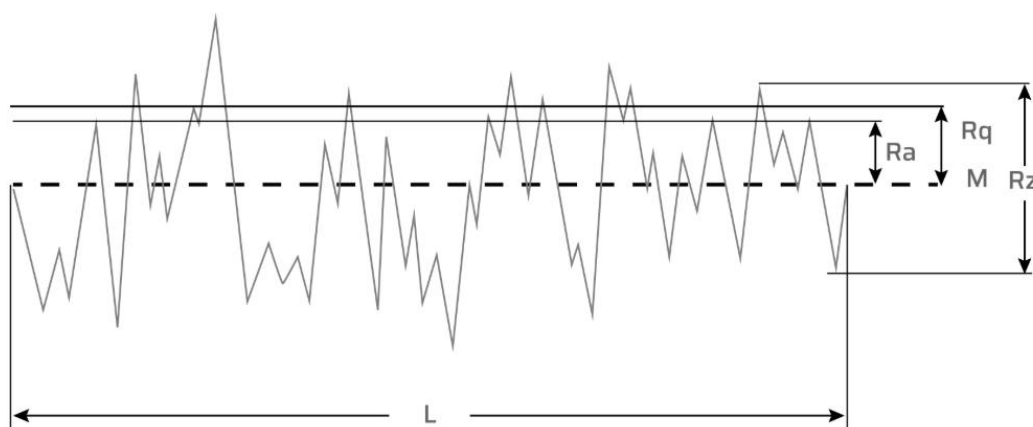
gdje je:

Rz – najveća visina profila unutar referentne duŹine, [μm]

Rp – najveća visina vrha profila na referentnoj duŹini, [μm]

Rv - najveća dubina dola profila na referentnoj duŹini [μm]

Na slici 5.1 je shematski prikaz osnovnih parametara Ra , Rq i Rz . Dijagram jasno ilustrira što zapravo opisuje svaki od parametara.



Slika 5.1. Shematski prikaz parametara Ra , Rq i Rz [35]

6. EKSPERIMENTALNI RAD

U ovom dijelu rada analizira se utjecaj visine sloja (rezolucije ispisa) i utroška materijala na kvalitetu FDM 3D ispisa s PLA filamentom. Visina sloja predstavlja ključni parametar koji određuje vidljivost slojeva, hrapavost površine i ukupnu mehaničku čvrstoću ispisa. Cilj eksperimenta je utvrditi kako promjena visine sloja kao i količina utrošenog materijala utječu na kvalitetu površine izrađenih uzoraka.

6.1. Oprema i materijal

Za ispis potrebnih uzoraka korišten je 3D printer PRUSA i3 MK3 prikazan na slici ispod (Slika 6.1). Taj printer podržava filament promjera 1,75 mm te omogućuje stabilan i pouzdan ispis različitih materijala. Upravljanje se vrši putem SD kartice ili USB priključka, dok se priprema modela provodi u softveru PrusaSlicer [36].



Slika 6.1 3D printer: PRUSA i3 MK3

Za printanje je korišten EUMAKERS PLA filament (Slika 6.2) promjera 1,75 mm čije su osnovne karakteristike prikazane u Tablici 6.1.

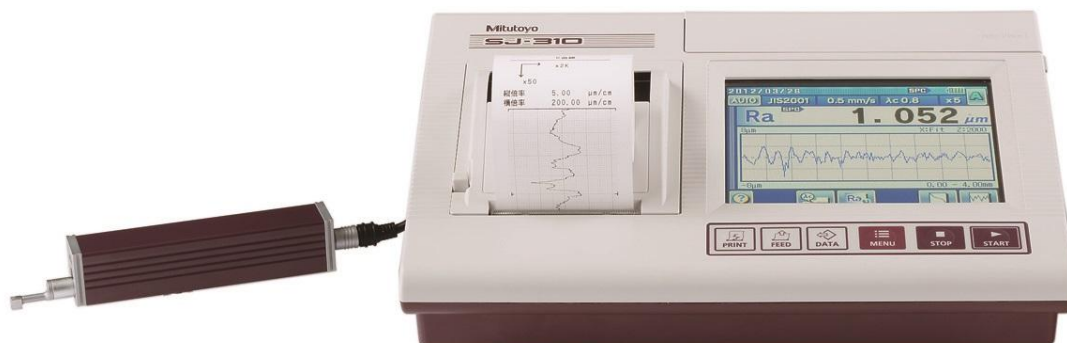
Tablica 6.1. - Osnovne karakteristike EUMAKERS PLA filamenta [37]

Preporučena temperatura ispisa	190-210 °C
Grijana podloga	50-60 °C (ne nužno)
Dostupni promjeri	1.75 mm i 2.85 mm
Tolerancija promjera	+/- 0.03 mm
Masa	1.1 kg
Preporučena brzina ispisa	40-80 mm/s



Slika 6.2 EUMAKERS PLA filament korišten za ispis [37]

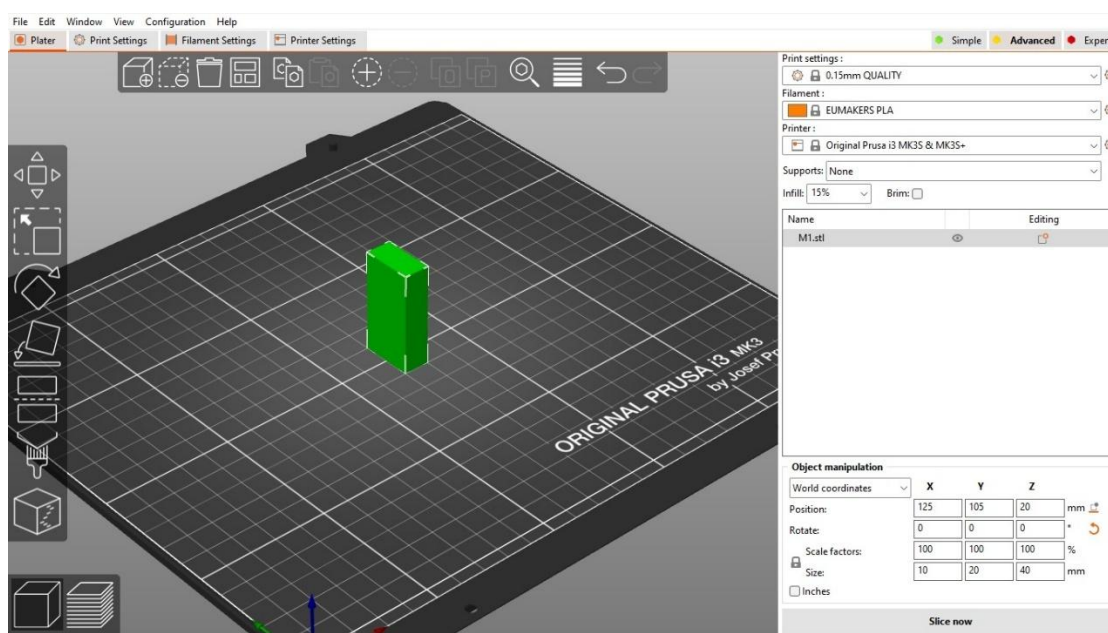
Za određivanje hrapavosti površine korišten je prijenosni mjerni uređaj Mitutoyo Surftest SJ-310 (Slika 6.3), koji se odlikuje visokom rezolucijom mjerenja od 0.002 μm . Instrument omogućuje mjerenje standardnih parametara hrapavosti (Ra , Rz i Rq) u skladu s međunarodnim normama, te je prikladan za brzu analizu i međusobnu usporedbu ispisanih uzoraka.



Slika 6.3 Mjerni uređaj Mitutoyo Surftest SJ-310 [38]

6.2. Izrada eksperimentalnih uzoraka

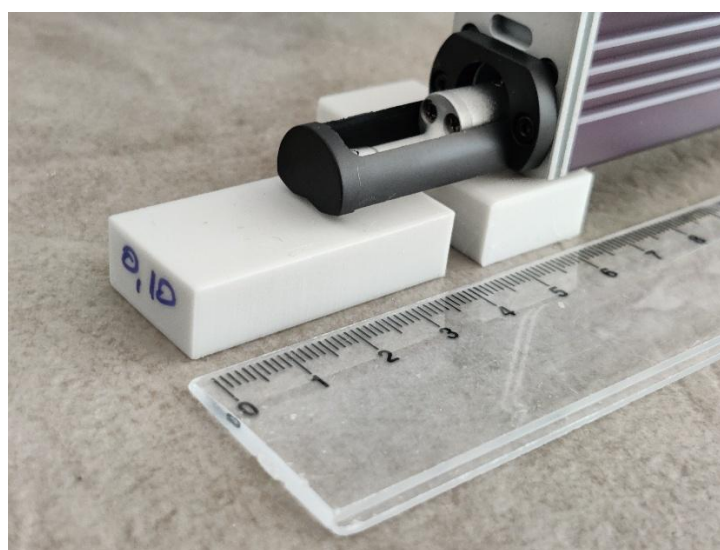
U svrhu provedbe eksperimentalnog istraživanja izrađeno je šest epruveta primjenom različitih parametara 3D ispisa. Kao geometrijski model korišten je jednostavni uzorak u obliku kvadra dimenzija $40 \times 20 \times 10$ mm, koji je pripremljen u STL formatu i korišten identično za sve ispise, čime je osigurana usporedivost rezultata. Orijentacija modela na radnoj podlozi 3D pisača prikazana je na Slici 6.4. Epruvete se međusobno razlikuju isključivo po rezoluciji sloja, koja je iznosila 0,05; 0,07; 0,10; 0,15; 0,20 i 0,30 mm, kako je prikazano na Slici 6.5. Postupak mjerenja hrapavosti površine prikazan je na Slici 6.6, dok su konstantni parametri procesa izrade, koji su zadržani jednaki za sve uzorke, navedeni u Tablici 6.2.



Slika 6.4 Orijentacija modela eksperimentalnog uzorka na radnoj podlozi 3D printera



Slika 6.5 Isprintane epruvete različitih rezolucija ispisa



Slika 6.5 Mjerenje hrapavosti površine uzoraka

Tablica 6.1 Konstantni parametri procesa 3D printanja

Parametar	Vrijednost
Filament	
Promjer	1.75 mm
Ekstruzijski multiplikator	1.0
Gustoća	1.24 g/cm ³
Temperatura mlaznice	215/210°C
Temperatura podloge	60°C
Slojevi i stjenke	

Visina sloja	0.3 mm
Visina prvog sloja	0.2 mm
Broj perimitera	2
Gornje pune stijenke	4 (0.7 mm)
Donje pune stijenke	3 (0.5 mm)
Ispuna (Infill)	
Gustoća ispune	20%
Uzorak ispune	Grid
Gornji uzorak ispune	Monotonic lines
Donji uzorak ispune	Monotonic

Prije 3D ispisa u slicer softveru su očitane izlazne veličine za svaki eksperiment: ukupna potrošnja filameta (izražena u gramima i metrima), volumen materijala, procijenjeni trošak te vrijeme trajanja ispisa.

7. ANALIZA REZULTATA

Rezultati provedenih eksperimenata, očitanih izlaznih veličina u Prusa Slicer softveru te izmjerenih parametara hrapavosti površine, prikazani su dvjema tablicama (Tablica 7.1 i 7.2), a njihova analiza prikazana je grafički.

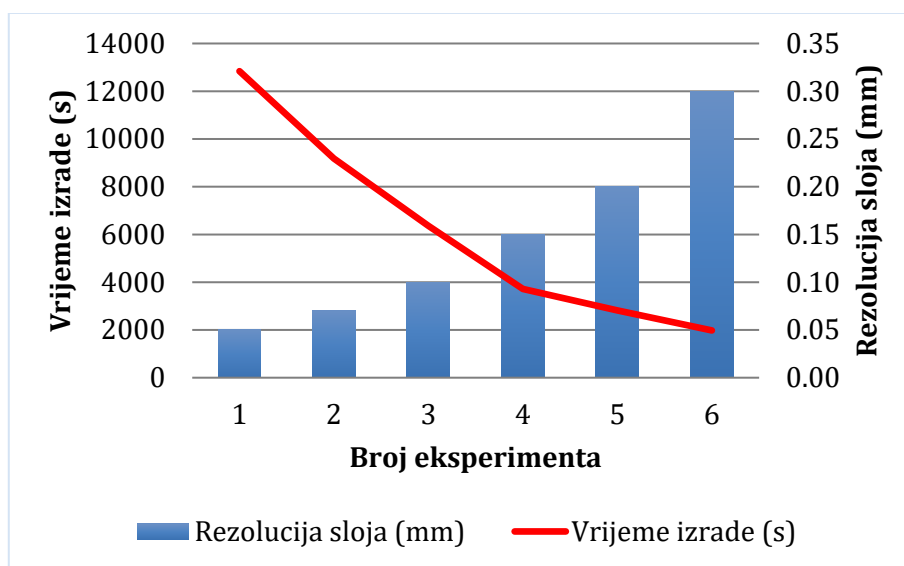
U Tablici 7.1 prikazane su vrijednosti rezolucije sloja za svaki uzorak te odgovarajući utrošak materijala, vrijeme potrebno za izradu i trošak izrade za svaki uzorak. Trošak izrade izračunat je temeljem cijene korištenog materijala EUMAKERS PLA filament (1.1 kg, 1.75 mm), koja iznosi 29.50 EUR, odnosno približno 0,027 EUR/g [37].

Tablica 7.1 Utjecaj rezolucije sloja na utrošak materijala, vrijeme i trošak izrade

Broj eksperimenta	Rezolucija sloja (mm)	Utrošak materijala (g)	Vrijeme izrade (s)	Trošak izrade (EUR)
1	0.05	5.25	12840	0.1549
2	0.07	5.30	9180	0.1563
3	0.10	5.27	6360	0.1555
4	0.15	4.30	3720	0.1269
5	0.20	4.22	2820	0.1255
6	0.30	4.85	1980	0.1431

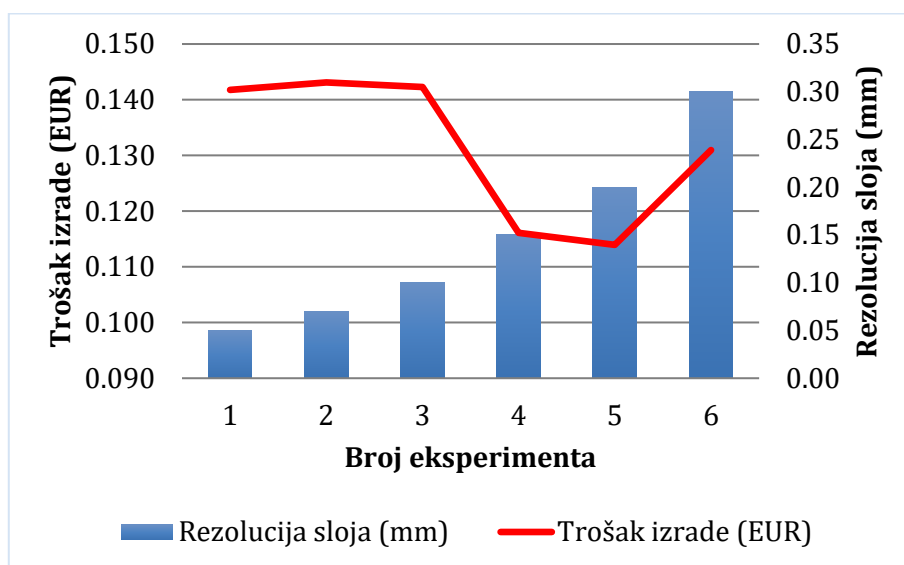
Radi detaljnije analize podataka prikazanih u Tablici 7.1 izrađeni su grafički prikazi (Slike 7.1–7.4) koji ilustriraju međusobne odnose između odabranih parametara.

Slika 7.1 prikazuje povezanost između vremena izrade i rezolucije sloja. Uočeno je da se s povećanjem rezolucije sloja smanjuje vrijeme izrade modela. Pri manjoj rezoluciji, odnosno tanjim slojevima, potreban je veći broj prolaza mlaznice, što rezultira produljenjem ukupnog vremena ispisa. Najkraće vrijeme izrade zabilježeno je u eksperimentu s najvećom rezolucijom sloja (1980 sekundi = 33 minute).



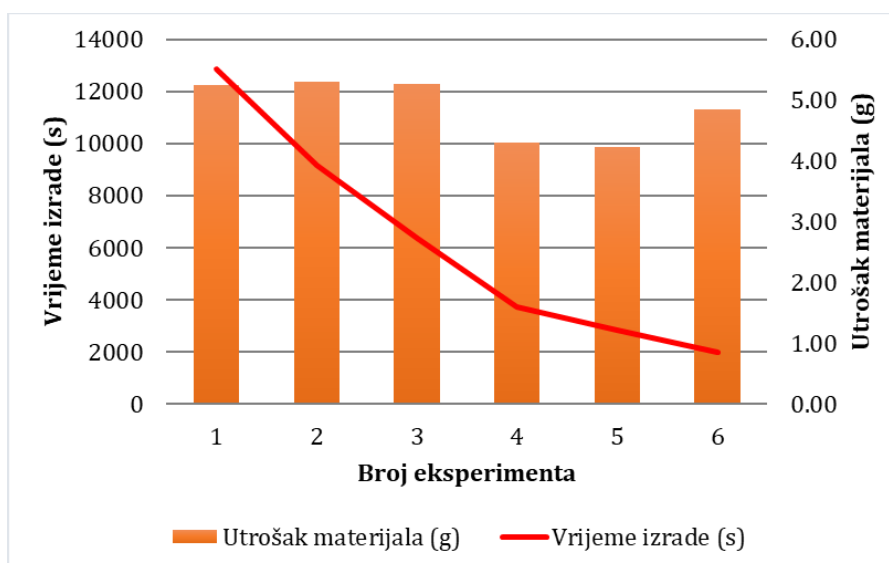
Slika 7.1 Utjecaj rezolucije sloja na vrijeme izrade

Slika 7.2 prikazuje odnos između troška izrade i rezolucije sloja. Trošak izrade blago varira i uglavnom je povezan s utroškom materijala, no primjetan je lagani porast troška za manje vrijednosti rezolucije sloja zbog povećanja vremena izrade.



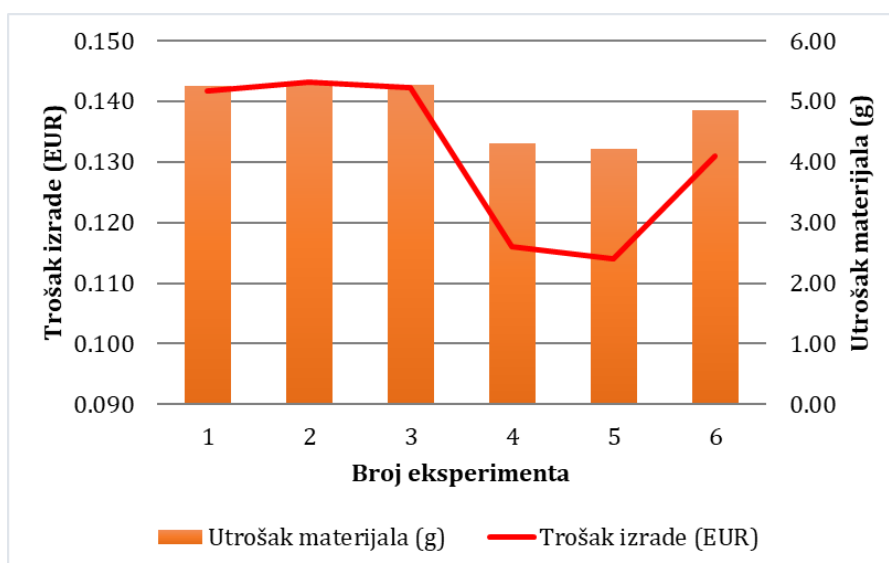
Slika 7.2 Utjecaj rezolucije sloja na trošak izrade

Slika 7.3 prikazuje povezanost između utroška materijala i vremena izrade. Vrijeme izrade ne ovisi linearno o potrošnji materijala već primarno o broju slojeva. Iako potrošnja materijala ostaje približno konstantna, vrijeme izrade značajno varira i smanjuje se s porastom rezolucije sloja.



Slika 7.3 Utjecaj utroška materijala na vrijeme izrade

Slika 7.4 prikazuje povezanost između troška izrade i utroška materijala. Uočljivo je da trošak izrade primarno prati potrošnju materijala, za razliku od vremena izrade na koji utrošak materijala ne utječe značajno.



Slika 7.4 Utjecaj utroška materijala na trošak izrade

Provedeni eksperimenti jasno su pokazali da rezolucija sloja ima značajan i dominantan utjecaj na vrijeme 3D ispisa. Povećanjem rezolucije sloja, odnosno uporabom debljih slojeva, dolazi do primjetnog smanjenja vremena izrade, što je izravna posljedica manjeg ukupnog broja slojeva potrebnih za izradu uzorka. Time se značajno skraćuje trajanje procesa taloženja materijala. S druge strane, utjecaj rezolucije sloja na trošak izrade znatno je manje izražen u

usporedbi s njezinim utjecajem na vrijeme izrade. Iako promjene rezolucije ne dovode do značajnih varijacija u ukupnim troškovima, uočeno je da su uzorci izrađeni s manjom rezolucijom sloja povezani s nešto višim troškovima, prvenstveno zbog duljeg vremena rada stroja i povećane potrošnje energije. Analiza je također pokazala da utrošak materijala nema značajan utjecaj na vrijeme izrade, budući da je trajanje procesa u najvećoj mjeri određeno brojem slojeva, a ne ukupnom količinom istisnutog materijala. Unatoč tome, vrijeme izrade se i dalje smanjuje s porastom rezolucije sloja, neovisno o varijacijama u utrošku materijala. Kada je riječ o troškovima, primijećen je blagi porast troška izrade kod eksperimenata s nešto većim utroškom materijala, no te razlike nisu statistički značajne. To upućuje na zaključak da vrijeme ispisa i energetska potrošnja imaju veći utjecaj na ukupni trošak izrade od same količine utrošenog materijala u promatranom rasponu parametara.

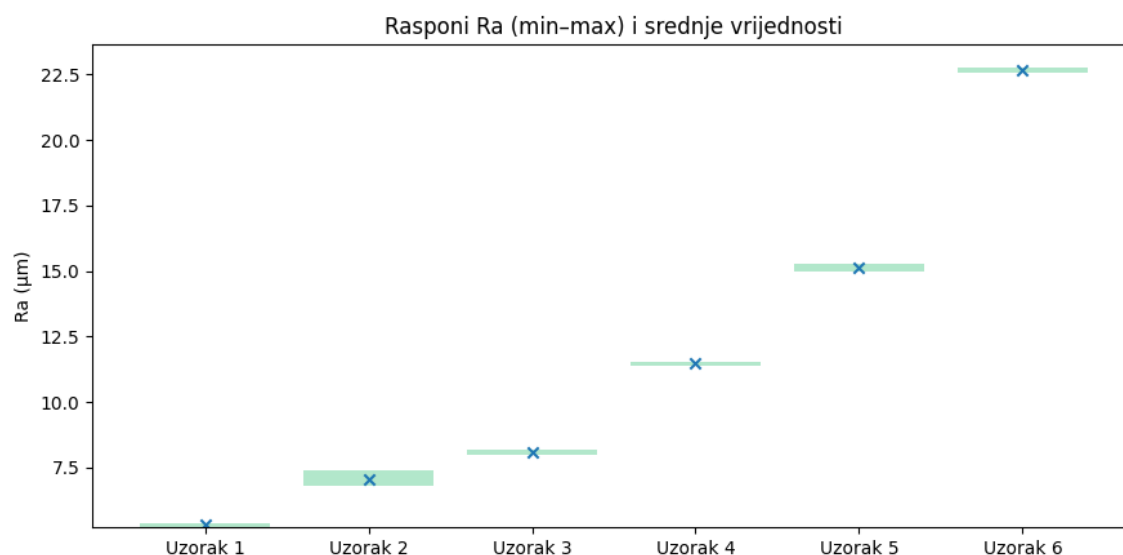
Uz utjecaj rezolucije slojeva i utroška materijala na vrijeme i troškove izrade, analiziran je i utjecaj ta dva parametra na kvalitetu i hrapavosti površine.

U Tablici 7.2 prikazani su rezultati mjerenja parametara hrapavosti površine (Ra , Rz i Rq) za pojedine eksperimente, zajedno s pripadajućom rezolucijom sloja i utroškom materijala. Svaki parametar izmjeren je tri puta, a u tablici su navedene srednje vrijednosti dobivenih rezultata. Rasponi sva tri mjerenja su prikazani na slikama 7.5 – 7.7.

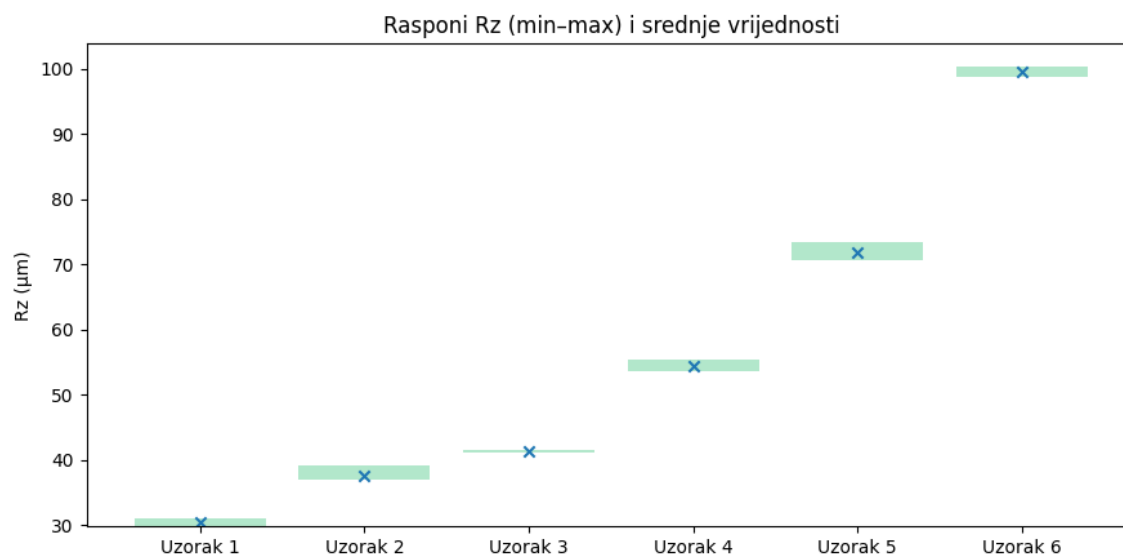
Tablica 7.2 Parametri hrapavosti površine pri različitim rezolucijama sloja

Broj eksperimenta	Rezolucija sloja (mm)	Utrošak materijala (g)	Parametri hrapavosti površine		
			Ra (μm)	Rz (μm)	Rq (μm)
1	0.05	5.25	5.306	30.445	6.479
2	0.07	5.30	7.033	37.664	8.481
3	0.10	5.27	8.070	41.277	9.739
4	0.15	4.30	11.479	54.415	13.765
5	0.20	4.22	15.103	71.738	18.256
6	0.30	4.85	22.649	99.476	27.052

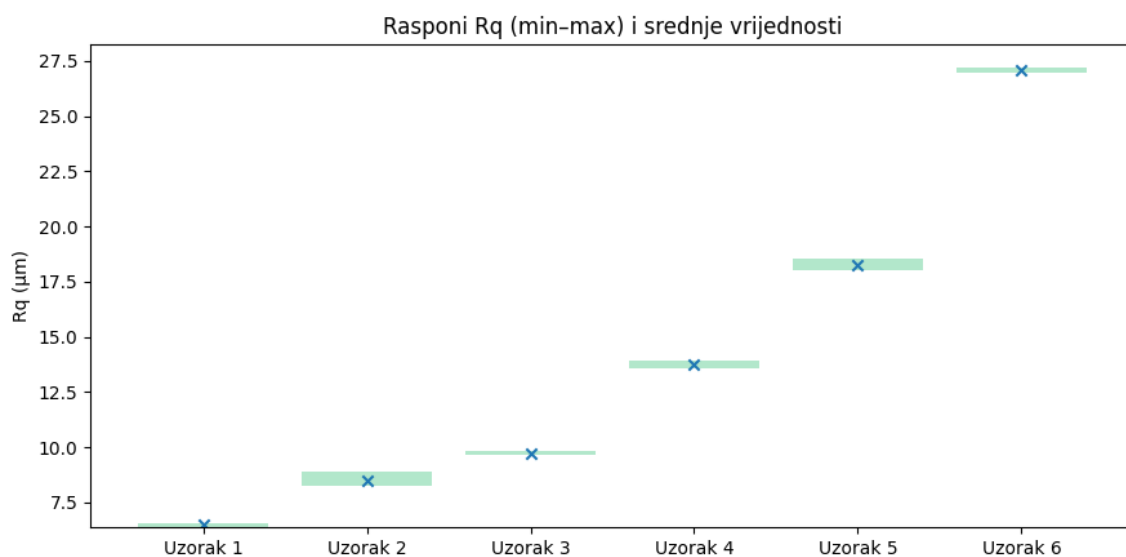
Iz dobivenih rezultata može se uočiti da povećanje rezolucije sloja dovodi do izraženog porasta hrapavosti površine ispisanih uzoraka. S debljim slojevima postaju vidljiviji prijelazi između pojedinih slojeva materijala, što rezultira neravnom površinskom strukturom. Time se potvrđuje da rezolucija sloja ima značajan utjecaj na kvalitetu površine, pri čemu veće vrijednosti rezolucije nepovoljno utječu na kvalitetu površine uzoraka.



Slika 7.5 Raspon hrapavosti površine (R_a) za 3 mjerenja po uzorku

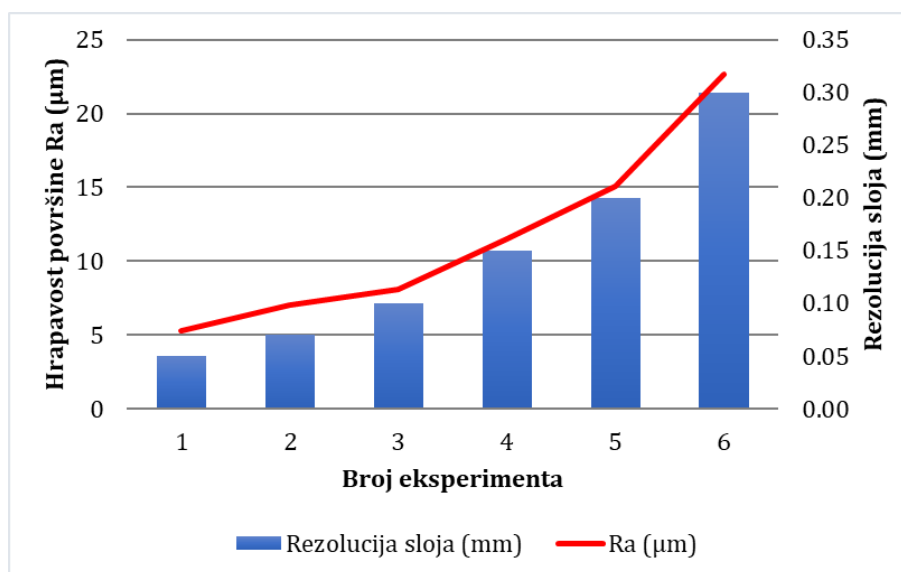


Slika 7.6 Raspon hrapavosti površine (R_z) za tri mjerenja po uzorku

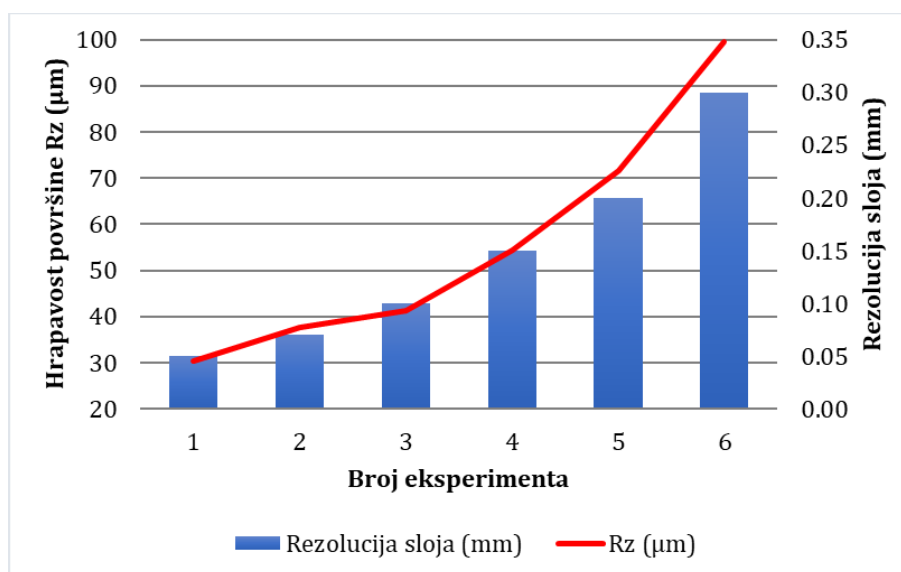


Slika 7.7 Raspon hrapavosti površine (R_q) za tri mjerenja po uzorku

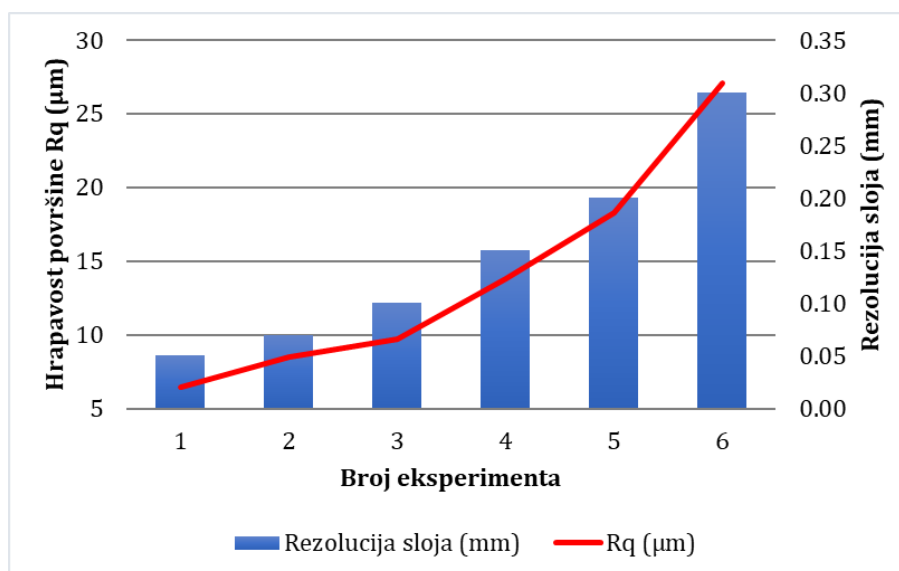
Radi detaljnije analize podataka prikazanih u Tablici 7.2 izrađeni su grafički prikazi (Slike 7.8–7.10) koji ilustriraju odnos između rezolucije sloja i hrapavosti površine proizvedenih uzoraka.



Slika 7.7 Utjecaj rezolucije sloja na hrapavost R_a



Slika 7.8 Utjecaj rezolucije sloja na hrapavost Rz

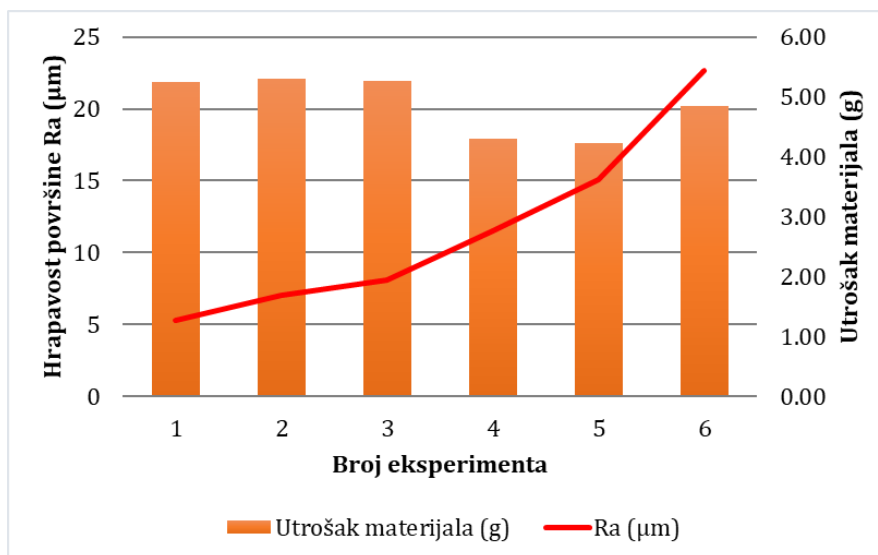


Slika 7.9 Utjecaj rezolucije sloja na hrapavost Rq

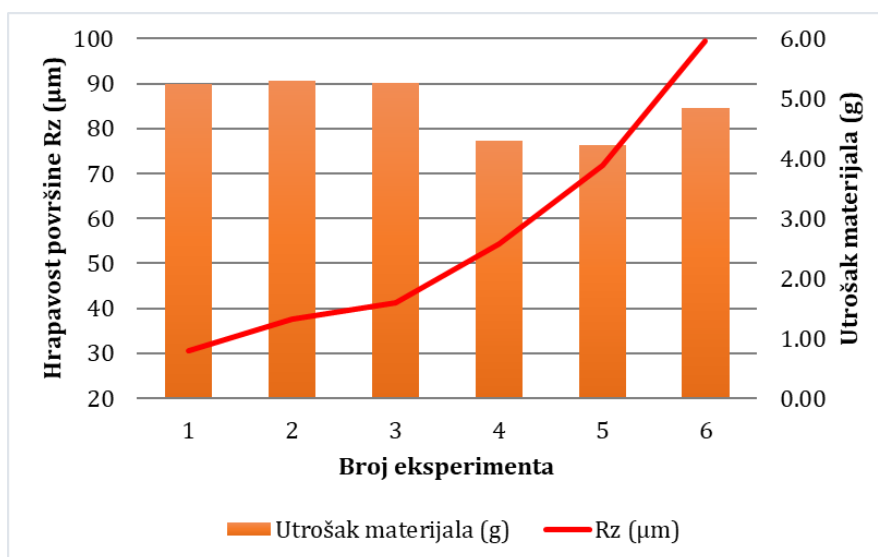
Dobiveni rezultati jasno ukazuju da najmanja razmatrana rezolucija sloja od 0.05 mm dovodi do najnižih vrijednosti hrapavosti površine, čime se postiže najkvalitetnija i najglada završna obrada ispitanih uzoraka. S postupnim povećanjem rezolucije sloja uočen je izražen porast hrapavosti površine, što se može pripisati naglašenijem step-efektu i slabijem zaglađivanju prijelaza između pojedinih slojeva. Analiza je pokazala da sva tri promatrana parametra hrapavosti (R_a , R_q i R_z) slijede istu tendenciju promjene u ovisnosti o rezoluciji sloja, pri čemu vrijednosti kontinuirano rastu s povećanjem debljine sloja. Time se potvrđuje da rezolucija sloja predstavlja ključni procesni parametar koji u najvećoj mjeri određuje

kvalitetu površine u FDM postupku, dok ostali utjecaji u promatranom rasponu parametara imaju sekundarnu ulogu.

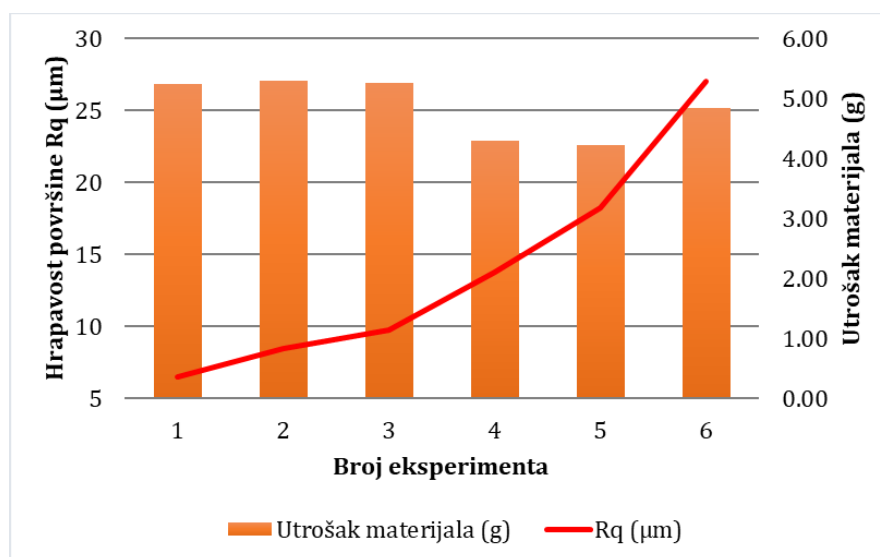
Slijede grafikoni (Slike 7.11–7.13) koji prikazuju odnos između parametara hrapavosti površine (Ra , Rz i Rq) i utroška materijala.



Slika 7.10 Utjecaj utroška materijala na parametar Ra



Slika 7.11 Utjecaj utroška materijala na parametar Rz



Slika 7.12 Utjecaj utroška materijala na parametar Rq

Dobiveni rezultati pokazuju da utrošak materijala ostaje gotovo konstantan u svim provedenim eksperimentima, dok parametri hrapavosti površine (R_a , R_q i R_z) pokazuju jasan porast s povećanjem rezolucije sloja. Time se potvrđuje da kvaliteta površine nije značajno povezana s količinom utrošenog materijala, već u najvećoj mjeri ovisi o odabranoj debljini sloja. Ovakvo ponašanje može se objasniti činjenicom da promjena rezolucije sloja ne utječe bitno na ukupni volumen istisnutog materijala, već prvenstveno na geometriju i raspored slojeva, što izravno određuje topografiju površine. Pri manjim debljinama sloja smanjuje se izraženost step-efekta, a prijelazi između susjednih slojeva postaju gladi, što rezultira nižim vrijednostima parametara hrapavosti. Suprotno tome, s povećanjem rezolucije sloja pojedini slojevi postaju izraženiji, što dovodi do naglašenijih površinskih nepravilnosti i posljedično viših vrijednosti R_a , R_q i R_z . Iako manja debljina sloja omogućuje postizanje kvalitetnije završne obrade, ona istodobno zahtijeva veći broj slojeva, što značajno produljuje vrijeme izrade. S druge strane, veće vrijednosti rezolucije sloja smanjuju ukupan broj slojeva i skraćuju trajanje procesa, čime se postiže veća proizvodna učinkovitost i ekonomska isplativost, ali uz kompromis u kvaliteti površine. Stoga se može zaključiti da rezolucija sloja predstavlja ključni parametar FDM procesa, pri čemu optimalan odabir ovisi o zahtjevima primjene, odnosno o traženom balansu između kvalitete površine, vremena izrade i ukupne isplativosti procesa.

8. MATEMATIČKO MODELIRANJE HRAPAVOSTI POVRŠINE 3D ISPISANIH UZORAKA

Matematičko modeliranje i optimizacija predstavljaju ključne alate u razumijevanju i poboljšanju procesa aditivne proizvodnje, uključujući FDM tehnologiju. Za razliku od deskriptivnih analiza koje samo prikazuju eksperimentalne rezultate, statističko modeliranje omogućuje uspostavljanje odnosa između ulaznih parametara procesa i izlaznih mjera kvalitete, dok optimizacija omogućuje pronalaženje najboljih kombinacija parametara u skladu s postavljenim ciljevima. U kontekstu površinske kvalitete, modeliranje i optimizacija hrapavosti imaju za cilj ne samo predvidjeti vrijednosti parametara Ra , Rz ili Rq , već i identificirati uvjete koji će dovesti do minimalne hrapavosti izrađenih uzoraka.

U tu svrhu najčešće se primjenjuju metode regresijske analize, kojima se gradi matematički model temeljen na eksperimentalnim podacima. Regresijski modeli omogućuju kvantitativni opis odnosa između ulaznih varijabli, poput temperature mlaznice, visine sloja, brzine ispisa, brzine ventilatora ili orijentacije ispisa, i izlaznih varijabli koje uključuju parametre hrapavosti Ra , Rz i Rq . Na temelju dobivenih modela moguće je predvidjeti kakvu će površinsku kvalitetu imati uzorci pri određenim uvjetima ispisa. Procjena točnosti modela provodi se korištenjem pokazatelja poput koeficijenta determinacije (R^2), dok se statistička značajnost parametara provjerava analizom varijance (ANOVA). Time se identificiraju najutjecajniji procesni parametri te njihove interakcije, što istraživačima omogućuje dublje razumijevanje procesa i donošenje odluka temeljenih na podacima [39].

Osim regresijskog modeliranja, u optimizaciji hrapavosti sve se češće primjenjuju višeciljne metode koje u obzir uzimaju više kriterija istodobno. U FDM postupku nije dovoljno samo smanjiti hrapavost, već je potrebno pronaći ravnotežu između kvalitete površine, vremena ispisa i mehaničkih svojstava. Upravo zato u literaturi veliku primjenu pronalazi metoda poželjnosti Derringer–Suich, kojom se više ciljeva transformira u funkcije poželjnosti s vrijednostima između 0 (neprihvatljivo) i 1 (idealno). Računanjem ukupne poželjnosti (D) kao geometrijske sredine pojedinačnih ciljeva dobiva se indeks koji omogućuje jednostavnu usporedbu različitih kombinacija procesnih parametara. Takav pristup osigurava pronalaženje optimalnih kompromisnih rješenja [40].

Prednost ovakvog pristupa jest njegova jednostavnost i intuitivnost, ali i mogućnost povezivanja s metodom odzivne površine odgovora (engl. *Response Surface Method - RSM*),

kojom se dobivaju trodimenzionalni prikazi utjecaja parametara na izlazne varijable i ukupnu poželjnost. U praksi je dokazano da se kombinacijom regresijske analize i metode poželjnosti može značajno poboljšati površinska kvaliteta FDM ispisa [41].

Sveukupno, matematičko modeliranje i optimizacija hrapavosti površine imaju presudnu ulogu u razvoju FDM tehnologije. One ne samo da omogućuju bolje razumijevanje složenih odnosa između procesnih parametara i kvalitete površine, nego i pružaju praktične alate za poboljšanje procesa. Time se otvara mogućnost šire industrijske primjene FDM tehnologije u područjima gdje su zahtjevi za površinsku kvalitetu visoki, poput biomedicine, automobilske industrije i precizne mehanike.

8.1. Regresijsko modeliranje

Regresijska analiza jedan je od najčešće korištenih statističkih alata u istraživanjima procesa aditivne proizvodnje jer omogućuje opisivanje i kvantificiranje odnosa između ulaznih varijabli (procesni parametri FDM postupka, poput temperature mlaznice, brzine ispisa, visine sloja, brzine ventilatora, orijentacije ispisa...) i izlaznih varijabli (parametri kvalitete, poput hrapavosti površine – Ra , Rz i Rq). Temeljna ideja regresijske analize je izgradnja matematičkog modela koji povezuje ulazne i izlazne parametre pri zadanim uvjetima ispisa [30].

Najjednostavniji oblik je linearni regresijski model, koji pretpostavlja linearnu vezu između zavisne varijable i jedne ili više nezavisnih varijabli. U kontekstu FDM ispisa, linearna regresija može poslužiti za inicijalnu procjenu utjecaja, primjerice visine sloja ili brzine ispisa, na vrijednost parametra Ra . Međutim, budući da je proces taloženja slojeva vrlo složen i nelinearan, jednostavni linearni modeli često nisu dovoljni.

Zbog toga se u istraživanjima FDM ispisa češće koristi višestruka linearna regresija (MLR) ili polinomska regresija višeg reda. Višestruka linearna regresija omogućuje istovremeno uključivanje više ulaznih parametara i njihovih međusobnih interakcija. Na taj način moguće je dobiti uvid u to kako se promjena kombinacije parametara, a ne samo pojedinačne vrijednosti, odražava na određeni izlaz primjerice hrapavost površine [39]. Polinomska regresija proširuje model tako da uključuje kvadratne i višeredne članove, što omogućuje opisivanje nelinearnih odnosa koji su česti u aditivnoj proizvodnji.

Kvaliteta regresijskog modela procjenjuje se pomoću više statističkih pokazatelja, a najčešće se koristi koeficijent determinacije (R^2). Vrijednost R^2 bliža 1 upućuje na to da model dobro objašnjava varijabilnost podataka, dok niže vrijednosti signaliziraju da značajan dio varijabilnosti ostaje neobjašnjen. Osim R^2 , važna je i analiza varijance (ANOVA), kojom se ispituje statistička značajnost modela i pojedinih ulaznih parametara. ANOVA omogućuje identifikaciju parametara koji imaju najveći utjecaj na hrapavost površine, kao i utvrđivanje značajnih interakcija među njima [41].

U kombinaciji s metodama višeciljne optimizacije, regresijski modeli predstavljaju temelj za donošenje odluka u industrijskoj praksi, jer omogućuju ne samo predviđanje vrijednosti izlaznih vrijednosti, već i njihovo optimiziranje u odnosu na zahtjeve krajnje primjene.

U ovom dijelu rada, primjenom softvera Minitab, razvijeni su regresijski matematički modeli kojima se opisuju odnosi između izlaznih parametara hrapavosti površine (R_a , R_z i R_q) te rezolucije sloja i utroška materijala kao ulaznih procesnih parametara. Dobiveni modeli predstavljeni su odgovarajućim matematičkim izrazima (1) – (3). Kao pokazatelj kvalitete regresijskih modela korišten je koeficijent determinacije R^2 , dok je statistička značajnost modela i pojedinih utjecaja ispitana primjenom analize varijance (ANOVA) za sva tri izlazna parametra, što je prikazano u Tablicama 8.1 – 8.3. Na temelju razvijenih matematičkih modela generirane su trodimenzionalne odzivne površine koje ilustriraju utjecaj rezolucije sloja i utroška materijala na hrapavost površine R_a , R_z i R_q , a prikazane su na Slici 8.1 a) - c).

$$R_a = -10,8 + 129,1 \text{ Rezolucija sloja} + 2,42 \text{ Utrošak materijala} - 11,7 \text{ Rezolucija sloja} * \text{Utrošak materijala} \quad (R^2=99.75\%) \quad (1)$$

$$R_z = -81,3 + 858 \text{ Rezolucija sloja} + 18,94 \text{ Utrošak materijala} - 116,0 \text{ Rezolucija sloja} * \text{Utrošak materijala} \quad (R^2=99.80\%) \quad (2)$$

$$R_q = -15,5 + 174,5 \text{ Rezolucija sloja} + 3,42 \text{ Utrošak materijala} - 18,2 \text{ Rezolucija sloja} * \text{Utrošak materijala} \quad (R^2=99.78\%) \quad (3)$$

Tablica 8.1 Analiza varijance za hrapavost površine R_a

Izvor varijacije	DF	Adj SS	Adj MS	F-vrijednost	p-vrijednost
Regresija	3	206.779	68.9264	267.61	0.004
Rezolucija sloja	1	0.555	0.5547	2.15	0.280
Utrošak materijala	1	0.213	0.2133	0.83	0.459
Rezolucija sloja $\times$ Utrošak materijala	1	0.114	0.1136	0.44	0.575
Pogreška	2	0.515	0.2576	—	—
Ukupno	5	207.294	—	—	—

Tablica 8.2 Analiza varijance za hrapavost površine R_z

Izvor varijacije	DF	Adj SS	Adj MS	F-vrijednost	p-vrijednost
Regresija	3	3339.66	1113.22	335.53	0.003
Rezolucija sloja	1	24.50	24.50	7.39	0.113
Utrošak materijala	1	13.08	13.08	3.94	0.185
Rezolucija sloja $\times$ Utrošak materijala	1	11.08	11.08	3.34	0.209
Pogreška	2	6.64	3.32	—	—
Ukupno	5	3346.30	—	—	—

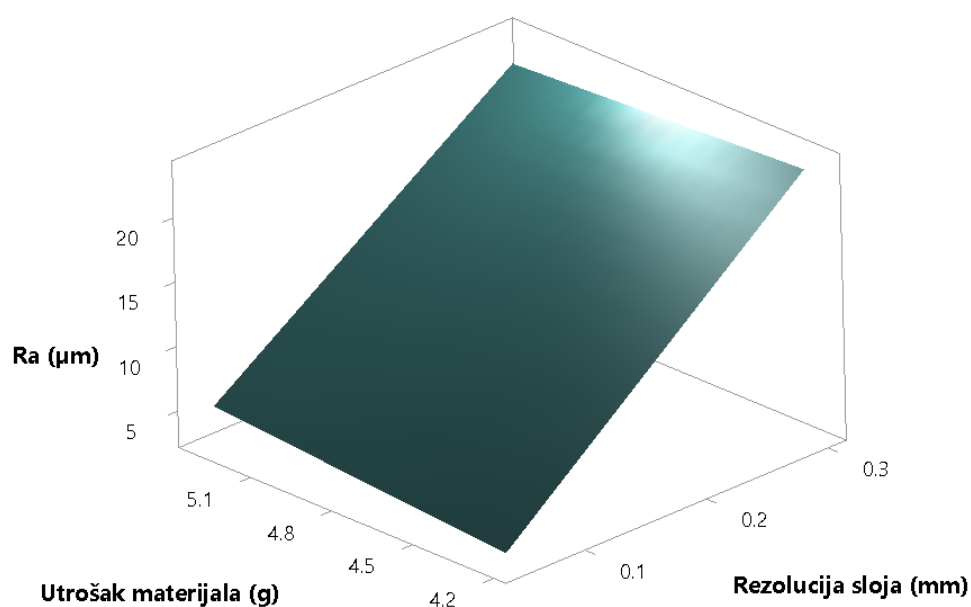
Tablica 8.3 Analiza varijance za hrapavost površine R_q

Izvor varijacije	DF	Adj SS	Adj MS	F-vrijednost	p-vrijednost
Regresija	3	293.056	97.685	305.64	0.003
Rezolucija sloja	1	1.014	1.0137	3.17	0.217
Utrošak materijala	1	0.426	0.4262	1.33	0.368
Rezolucija sloja $\times$ Utrošak materijala	1	0.274	0.2735	0.86	0.453
Pogreška	2	0.639	0.3196	—	—
Ukupno	5	293.696	—	—	—

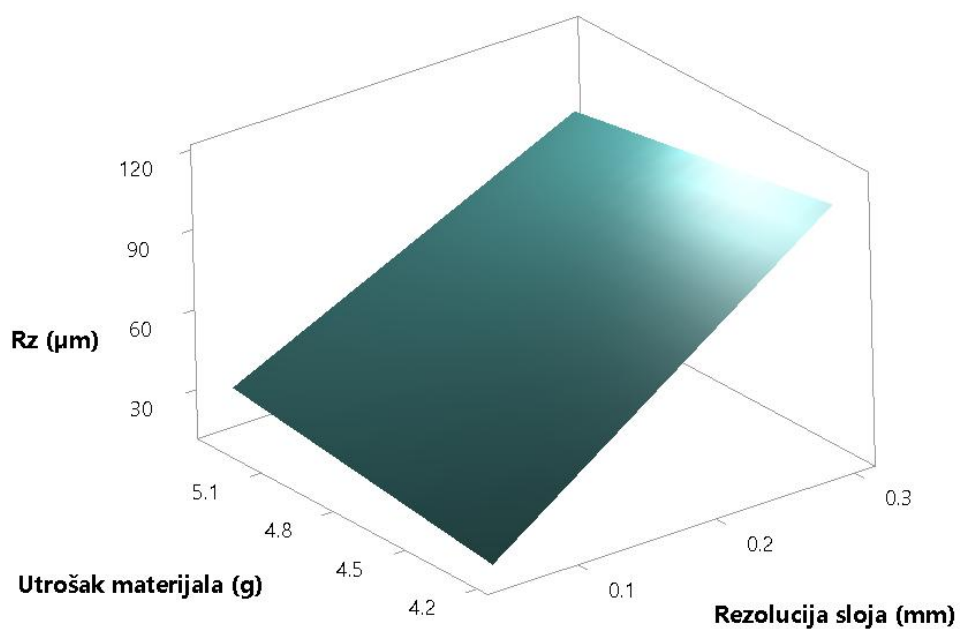
Analiza varijance za sva tri parametra hrapavosti površine (R_a , R_z i R_q) pokazuje da je regresijski model statistički značajan ($p < 0,01$), što potvrđuje da promatrani ulazni parametri zajedno imaju značajan utjecaj na hrapavost površine. Međutim, pojedinačni utjecaji rezolucije sloja i utroška materijala, kao i njihov međudjelujući učinak, nisu statistički značajni na razini značajnosti $p = 0,05$. Unatoč tome, rezolucija sloja pokazuje izraženiji utjecaj u odnosu na

utrošak materijala, što je vidljivo iz viših F-vrijednosti za sva tri parametra hrapavosti. Dobiveni rezultati upućuju na to da je rezolucija sloja dominantan procesni parametar, dok utrošak materijala ima sekundarnu ulogu u određivanju kvalitete površine u promatranom rasponu eksperimentalnih uvjeta.

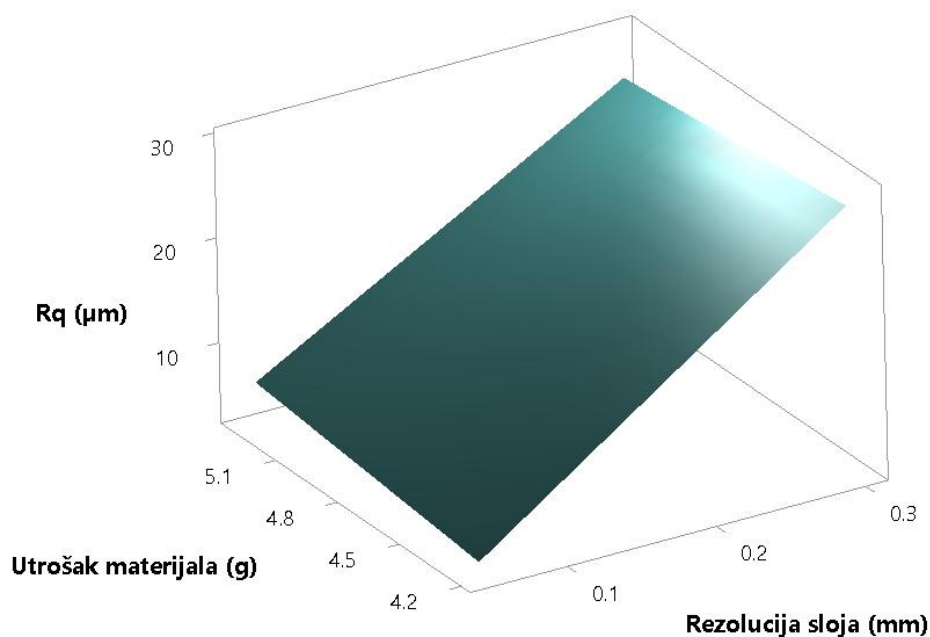
a)



b)



c)



Slika 8.1 Odzivna površina utjecaja rezolucije sloja i utroška materijala na hrapavost površine: a) R_a , b) R_z i c) R_q

Prikazane odzivne površine jasno pokazuju da rezolucija sloja ima dominantan i sustavan utjecaj na sve analizirane parametre hrapavosti površine (R_a , R_q i R_z), pri čemu vrijednosti hrapavosti kontinuirano rastu s povećanjem debljine sloja. Ovakav trend može se objasniti pojačanom pojavom tzv. "step efekta" pri većim rezolucijama sloja, gdje izraženiji prijelazi između susjednih slojeva rezultiraju grubljom topografijom površine i većim lokalnim odstupanjima profila. Suprotno tome, pri manjim rezolucijama sloja slojevi su tanji i gušće raspoređeni, što omogućuje glađe prekrivanje površine i smanjenje površinskih nepravilnosti.

Utjecaj utroška materijala na promatrane parametre hrapavosti pokazuje se sekundarnim i zanemarivim u cijelom razmatranom rasponu, što upućuje na zaključak da promjene u količini istisnutog filameta ne mijenjaju bitno geometrijsku strukturu površine, već prvenstveno utječu na volumen i masu uzorka. Minimalne vrijednosti R_a , R_q i R_z ostvaruju se pri najmanjim rezolucijama sloja, neovisno o manjim varijacijama u utrošku materijala.

Dobiveni rezultati potvrđuju da je rezolucija sloja ključni procesni parametar za kontrolu kvalitete površine u FDM 3D printanju, dok se optimalan odabir njezine vrijednosti mora provoditi u skladu sa zahtjevima primjene, uzimajući u obzir kompromis između kvalitete završne obrade, vremena izrade i ukupne proizvodne učinkovitosti.

9. ZAKLJUČAK

Provedeno istraživanje u okviru ovog rada potvrdilo je da su procesni parametri, a prvenstveno rezolucija sloja, presudni faktori koji određuju kvalitetu i funkcionalnost proizvoda izrađenih FDM tehnologijom 3D ispisa. Kroz detaljnu analizu uzoraka od PLA filameta, utvrđena je jasna i mjerljiva ovisnost između visine nanesenog sloja i rezultirajuće hrapavosti površine izražene parametrima Ra, Rz i Rq.

Eksperimentalni rezultati nedvojbeno pokazuju da smanjenje rezolucije sloja dovodi do značajnog poboljšanja kvalitete površine. Na najnižoj rezoluciji od 0,05 mm dobiveni su najgladi uzorci s minimalnim vrijednostima hrapavosti, čime se potvrđuje da se preciznim slaganjem tanjih slojeva može učinkovito minimizirati tzv. "step efekt". Međutim, ovakva visoka kvaliteta dolazi uz značajan kompromis u pogledu vremena izrade. Usporedba pokazuje da je za izradu uzorka pri rezoluciji od 0,05 mm potrebno čak 12.840 sekundi, dok je pri rezoluciji od 0,30 mm to vrijeme smanjeno na svega 1.980 sekundi. Zanimljivo je primijetiti da utrošak materijala i izravni troškovi filameta ostaju relativno stabilni bez obzira na visinu sloja, što znači da je primarni resurs koji se optimizira zapravo vrijeme rada stroja.

Analiza hrapavosti putem instrumenta Mitutoyo Surftest SJ-310 omogućila je kvantitativnu potvrdu ovih trendova. Svi mjereni parametri (Ra, Rz i Rq) pratili su istu uzlaznu tendenciju s povećanjem visine sloja, što ukazuje na to da deblji slojevi čine prijelaze između niti materijala znatno izraženijima i vizualno uočljivijima. Primijenjeno matematičko modeliranje i regresijska analiza pokazali su se kao izvrsni alati za predviđanje kvalitete površine, omogućujući korisniku da unaprijed procijeni hoće li ispis zadovoljiti potrebne standarde.

Zaključno, uspjeh u FDM 3D ispisu ne ovisi samo o kvaliteti pisača i materijala, već o stručnom odabiru parametara koji moraju biti usklađeni s namjenom proizvoda. Ako je naglasak na estetskoj privlačnosti, nužno je koristiti manje rezolucije sloja unatoč duljem trajanju procesa. S druge strane, za prototipove kod kojih je brzina bitnija od izgleda, veće rezolucije pružaju ekonomski najisplativije rješenje. Ovo istraživanje pruža čvrstu osnovu za daljnju optimizaciju procesa i dokazuje da PLA filament, uz pravilno postavljanje parametara, ostaje vrhunski materijal za širok spektar inženjerskih i kreativnih izazova u aditivnoj proizvodnji.

LITERATURA

1. I. Gibson, D. W. Rosen, and B. Stucker, Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, 3rd ed. Springer, 2021.
2. Ngo, T. D., et al., Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. Composites Part B., 2018.
3. Chua, C. K., & Leong, K. F. (2017). 3D Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications. World Scientific.
4. Što je 3D printanje?. Dostupno na: <https://pitajtatu.com/2021/01/07/sto-je-3d-printanje/> (19.01.2026.).
5. Hotko Cernić, Krešo, „3D printanje“, završni rad, 2018.
6. ISO/ASTM. ISO/ASTM 52900:2021 – Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2021.
7. C. K. Chua, K. F. Leong and C. S. Lim, *Rapid Prototyping: Principles and Applications*, 3rd ed. Singapore: World Scientific Publishing, 2010.
8. <https://www.making.unsw.edu.au/learn/3d-printing-with-sla-resin-printers/>
9. <https://all3dp.com/1/best-polyjet-3d-printing-services/>
10. D. D. Gu, W. Meiners, K. Wissenbach, and R. Poprawe, “Laser additive manufacturing of metallic components: Materials, processes and mechanisms,” International Materials Reviews, vol. 57, no. 3, pp. 133–164, 2012.
11. W. E. Frazier, “Metal additive manufacturing: A review,” Journal of Materials Engineering and Performance, vol. 23, no. 6, pp. 1917–1928, 2014.
12. T. DebRoy, H. L. Wei, J. S. Zuback, T. Mukherjee, J. W. Elmer, J. O. Milewski, et al., “Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties,” Progress in Materials Science, vol. 92, pp. 112–224, 2018.
13. Top3DShop. Fused Deposition Modeling – All You Need To Know About FDM 3D Printing Technology. Dostupno na: <https://top3dshop.com/blog/fused-deposition-modeling-all-you-need-to-know-about-fdm-3d-printing-technology> (1.12.2025.)
14. Azurefilm. FDM printanje – što je to FDM? Dostupno na: <https://azurefilm.com/hr/2023/10/28/fdm-printanje-sto-je-to-fdm/> (1.12.2025.)
15. Prototalk UK. An Overview Of The Fused Deposition Modelling Process. Dostupno na: <https://prototalkuk.com/blog/fused-deposition-modelling-process/> (1.12.2025.)

16. UNSW Sydney: USWS Making – 3D printing: FDM. Dostupno na: <https://www.making.unsw.edu.au/learn/3d-printing-with-fdm-and-thermoplastics/> (15.1.2026.)
17. Xometry: Types of 3D Printer Filaments. Dostupno na: <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/types-of-3d-printer-filaments/> (8.1.2026.)
18. Xometry: ABS 3D Printing Filament. Dostupno na: <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/abs-3d-printing-filament/> (8.1.2026.)
19. Simplify3D. ABS Material Guide. Dostupno na: <https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/abs/> (8.1.2026.).
20. 7 Top ABS 3D Printing Services Put to the Test. Dostupno na: <https://all3dp.com/1/abs-3d-printing-services/> (8.1.2026.)
21. NinjaTek: PETG – 3D Printing Material Guide, s Interneta, <https://ninjatek.com/learn/3d-printing-materials/petg/> (8.1.2026.)
22. How to Succeed when 3D Printing with PETG Filament. Dostupno na: https://www.matterhackers.com/news/how-to-succeed-when-printing-with-petg-filament?srltid=AfmBOop0ujJha1PW4jw67FvifmZ8N_b5Rsi_ky6ecqs-z0yLilvWYOKb (8.1.2026.)
23. Printer3D.hr: PLA Filament, s Interneta, <https://printer3d.hr/edukacija-i-podrska/filamenti-i-smole/pla-filament/> (8.1.2026.)
24. 3Dnatives. PLA 3D Printing Guide. Dostupno na: <https://www.3dnatives.com/en/pla-3d-printing-guide-190820194/> (8.1.2026.)
25. Leach, R. (2013). Characterisation of areal surface texture. Springer.
26. Stout, K. J., & Blunt, L. (2000). Three Dimensional Surface Topography (2nd ed.). Butterworth-Heinemann
27. ISO 4287:1997. Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters. International Organization for Standardization.
28. ISO 25178:2012. Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Areal – Terms, definitions and surface texture parameters. International Organization for Standardization

29. Boschetto, A., & Bottini, L. (2014). Accuracy prediction in fused deposition modeling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73(5–8), 913–928.
30. Kumar, R., Singh, R., & Singh, T. P. (2020). Surface quality improvement in FDM by parameter optimization using desirability function approach. *Journal of Manufacturing Processes*, 56, 1089–1101. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.05.056>
31. Jiang, C., Zhao, L., & Zhu, Y. (2020). Characterization of surface roughness in additive manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 59, 503–513. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.09.021>
32. ISO 4288:1996. Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Rules and procedures for the assessment of surface texture. International Organization for Standardization.
33. Additive-X. 3D printing workflow – the 5 steps explained. Dostupno na: <https://www.additive-x.com/blog/3d-printing-workflow-the-5-steps-explained> (15.9.2025.)
34. Instructables (vanceg). The 3D Printing Process. Dostupno na: <https://www.instructables.com/The-3D-Printing-Process>
35. KDE: Understanding Surface Roughness: How it Affects the Performance of Your Product. Dostupno na: <https://kde.agency/blog/surface-roughness>
36. All3DP: Original Prusa i3 MK3S Review: Best 3D Printer Specs. Dostupno na: <https://all3dp.com/1/original-prusa-i3-mk3s-review-3d-printer-specs/>
37. EUmakers: PLA Filament | Color: White. Dostupno na: <https://www.eumakers.com/pla-filament-color-white.html> (14.1.2026.)
38. MiSUMi: Mitutoyo Surftest SJ-310. Dostupno na: https://th.misumi-ec.com/en/vona2/detail/223005448761/?srsltid=AfmBOor_y95knk-8RO9NW3jyqB1PmLr-j_zUUN-xZdaqVfabs_3nK-Rf (14.1.2026.)
39. Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2021). *Introduction to Linear Regression Analysis* (6th ed.). Wiley.
40. Derringer, G., & Suich, R. (1980). Simultaneous optimization of several response variables. *Journal of Quality Technology*, 12(4), 214–219.
41. Chohan, J. S., Singh, R., Boparai, K. S., & Penna, R. (2019). Multi-objective optimization of fused deposition modelling process parameters for improved dimensional accuracy and surface finish. *Rapid Prototyping Journal*, 25(1), 20–35.

Popis oznaka i kratica

3D	trodimenzionalno
ABS	akrilonitril–butadien–stiren
CAD	engl. <i>Computer-Aided Design</i>
FDM	engl. <i>Fused Deposition Modeling</i>
ISO	engl. <i>International Organization for Standardization</i>
LOM	engl. <i>Laminated Object Manufacturing</i>
PA	poliamid
PETG	polietilen-tereftalat modificiran glikolom
PLA	polilaktična kiselina
Ra	srednje aritmetičko odstupanje profila
Rq	srednje kvadratno odstupanje profila
Rz	maksimalna visina profila
SLA	engl. <i>Stereolithography</i>
SLS	engl. <i>Selective Laser Sintering</i>
TPA	termoplastični poliamidi
TPC	termoplastični kopoliester
TPU	termoplastični poliuretan
TPE	termoplastični elastomer
UV	ultraljubičasto zračenje