

Primjena spektrofotometrijskih metoda za određivanje spektralnih značajki i razlika u boji za kvalifikaciju i kvantificiranje boje ABS polimera

Suzana Kutnjak-Mravlinčić, Martinia Ira Glogar*, Ana Sutlović, Sanja Ercegović Ražić
Sveučilište u Zagrebu Tekstilno-tehnološki fakultet
Zagreb, Hrvatska

*Dopisni autor: martina.glogar@ttf.unizg.hr

Prispjelo: 20. 11. 2022.

UDK 677.017.55.535.66:678.7

Izvorni znanstveni rad

U svrhu doprinosa istraživanju objektivizaciji boje u 3D ispisu i praćenju utjecaja parametara 3D ispisa na subjektivne i objektivne parametre boje, u ovom radu analiziran je utjecaj rezolucije 3D ispisa i debljine sloja na vrijednosti boje uzoraka ABS filamenta. Proveden je proces 3D modeliranja ispitnih objekata prema modelu kruga boja Johanna Ittena u računalnom programu Rhinoceros te ispis objekata od ABS filamenta u boji. Ispitane su tri različite brzine ispisa, što je rezultiralo s tri različite rezolucije ispisa. U eksperimentalnom dijelu detaljno su objašnjeni koraci za izradu 3D FDM objekata, uz definiranje promjenjivih i konstantnih parametara ispisa. Nakon izrade, boje 3D objekata objektivno su analizirane na temelju spektrofotometrijskog mjerenja te analize spektralnih (remisijskih) i kolorističkih parametara. Rezultati potvrđuju da je za postizanje najboljih mogućih rezultata 3D ispisa potrebno analizirati učinke pojedinih parametara ispisa na ukupnu izradu gotovog 3D objekta, uključujući boju, korištenjem odgovarajućih ispitnih metoda. U ovom radu ispitane su vrijednosti boja 3D ispisanih uzoraka iz ABS polimera. Na temelju provedenih ispitivanja potvrđen je utjecaj površinske strukture ispitnih objekata na vizualne i objektivne karakteristike boja.

Ključne riječi: aditivna proizvodnja; akrilonitril/butadien/stiren; 3D ispis; rezolucija ispisa; brzina 3D ispisa; objektivizacija boje

Original scientific paper

In order to contribute to research focused on objectifying color in 3D printing and monitoring the influence of 3D printing parameters on the subjective and objective color parameters, this paper a research of the influence of 3D printing resolution and layer thickness on color values of ABS filament samples. The process of 3D modeling of test objects based on Johannes Itten's color circle model in the Rhinoceros computer program was carried out as well as the printing of test objects from colored ABS filaments. Three different printing speeds, resulting in three different printing resolution have been tested. The steps for manufacturing a 3D FDM objects are explained in details, in the experimental part, with the definition of the adjustable and constant print parameters. After the production the colors of the 3D objects were objectively analysed based on spectrophotometric measurement and the analyses of spectral (remission) and colouristic parameters. The results confirm that in order to achieve the best possible 3D printing results, it is necessary to analyze the effects of individual printing parameters on the overall performance of the finished 3D object, including color, using appropriate test methods. In this paper, the color values of the 3D printed samples from the original ABS polymer are examined. Based on the tests performed, the influence of the surface structure of the test objects on the visual and objective properties of the colors is confirmed.

Key words: additive manufacturing; 3D printing; ABS filament; print resolution; printing speed; color objectification

1. Uvod

U aditivnoj proizvodnji (engl. *Additive Manufacturing*, AM), objekti se proizvode izravno iz trodimenzionalnog modela nanošenjem polimernog materijala sloj po sloj. Postupci aditivne proizvodnje svakodnevno imaju sve više i više područja primjene u različitim granama ne samo industrije nego i umjetnosti i kulture i gotovo da nema područja gdje AM nije zastupljen (medicinska uporaba, automobilska industrija ili potrošački proizvodi širokog spektra). Aditivni postupci ubrajaju se u napredne proizvodne tehnologije, tzv. ključne tehnologije (engl. *Key enabling technologies*, KET), a razvijaju se i primjenjuju od druge polovine 80-ih godina prošlog stoljeća [1, 2]. AM ima višestruke prednosti kao što su fleksibilnost sa složenim geometrijama, visoka proizvodna učinkovitost, očuvanje resursa i ekološka prihvatljivost, te stoga igra važnu ulogu u Industriji 4.0 i ima potencijal revolucionirati industriju [3, 4]. Među mnogim postupcima AM, danas se najviše primjenjuje postupak taložnog očvršćivanja (engl. *Fused Deposition Modeling*, FDM). Princip ove tehnologije je da se polimerni materijal u obliku žice ekstrudira iz zagrijane mlaznice i nanosi sloj po sloj kako bi se formirala tvorevina [5, 6]. Najčešće korišteni materijali su akrilonitril/butadien/stiren (ABS) i polimljična kiselina (engl. *polylactic acid*, PLA). Zbog svojih dobrih specifičnih svojstava kao što su mehanička svojstva, kemijska otpornost, fina površinska obrada i dobra mogućnost daljnje obrade, ABS se sve više koristi u raznim industrijama. Jedna od prepreka uvođenju FDM-a u funkcionalne komponente je nedostatak standarda za proizvodnju i ispitivanje materijala [2, 5]. Iz tog razloga znanstvenici i istraživači iz industrije ulažu značajne napore u istraživanje i utvrđivanje utjecaja pojedinih parametara 3D ispisa na ukupna svojstva 3D ispisanog proizvoda, a boja je svakako jedno od svojstava koje značajno utječe na razvoj niskobudžetnih proizvoda, uređaja za 3D ispis i jeftinijih materijala kako bi se aditivni procesi približili svakom pojedincu koji želi istražiti mogućnosti ovih tehnologija [7, 8].

Međutim, unatoč tehničkom napretku AM tehnologije, još uvijek postoji niz problema vezanih uz pouzdanost i varijabilnost proizvedenih objekata [9]. Većina postupaka AM općenito dovode do anizotropije u mikrostrukтури i mehaničkim svojstvima tiskanih dijelova. To je prvenstveno zbog utjecaja topline tijekom procesa taloženja kao i strukture difuznog polimernog lanca. Novija istraživanja u ovom području usmjerena su na utjecaj proizvodnih parametara na mehanička svojstva 3D ispisanih polimernih materijala, tj. debljinu sloja, temperaturu ekstruzije, orijentaciju ispisa, temperaturu radne podloge 3D

pisača, brzinu ispisa, koja izravno utječe na vrijeme i kvalitetu ispisa, te oblik i gustoću ispune uzorka [9-11]. Agnusdei i Del Prete [12] provode opsežnu studiju o razvoju i evolucijskim trendovima istraživačkih pravaca u ovom području, fokusirajući se na kontekst održivosti AM tehnologije. U tu svrhu provode bibliometrijsku, online i meta-analizu literature. Na temelju svojih istraživanja identificiraju tri različita klastera u smislu tehnologija i materijala, aditivna proizvodnja za održivost i aditivna proizvodnja za dizajn [12]. Carutasu, N. L. i sur. [13] proveli su eksperimentalnu analizu mehaničkih (rastezna i pritiska čvrstoća) i elastičnih svojstava ABS uzoraka jer identificiraju određeni istraživački nedostatak u ovom području. Zaključuju da su ABS termoplasti stabilni na utjecaje okoline i ne pokazuju značajnije savijanje, skupljanje ili upijanje vlage te da se postižu precizni dijelovi koji se ne mijenjaju pod utjecajima okoline ili tijekom vremena. Oni potvrđuju vrlo mali utjecaj smjera taloženja (vodoravno ili okomito) i gustoće ispune na elastična i mehanička svojstva [13]. Kumar i Singh [14] istražuju mogućnost miješanja polimera koji se najčešće koriste u AM tehnologiji; ABS, PLA i visokootporni polistiren (engl. *high impact polystyrene*, HIPS). Oni istražuju toplinska i mehanička svojstva 3D ispisanih (engl. *3D Printing*, 3DP) višekomponentnih materijala i otkrivaju da se svojstva naprežanja i čvrstoće 3DP-a mogu kontrolirati ispisom od više materijala pri predviđenim postavkama proizvodnih parametara. Utvrđeno je da je istežanje pri prekidu višekomponentnog materijala bilo niže u usporedbi s jedno komponentnim ABS ili PLA materijalom, te da su prekidno opterećenje i prekidna čvrstoća bili veći od jedno komponentnog HIPS materijala. 3D ispis višekomponentnog materijala dao je veću čvrstoću na savijanje od jedno komponentnog HIPS materijala, ali nižu od PLA i ABS-a. Višekomponentni tisak također je rezultirao manjom toplinskom vodljivošću od HIPS materijala, što je dodatna potvrda njegove korisnosti [14].

Markiz, Horvath i Ficzer [15] su istražili mehanička svojstva ABS uzoraka, koncentrirajući se na utjecaj orijentacije 3D ispisa. Na temelju rezultata ispitivanja rasteznih svojstava utvrđeno je da su uzorci 3D ispisan u smjeru 0° za 44,7% viši od onih u smjeru 3D ispisa 90°. Nadalje, orijentacija 3D ispisa nema utjecaja na modul elastičnosti. Dobiveni rezultati pokazuju da su u skladu sa svim istraživanjima u ovom području, odnosno studije su pokazale da su mehanička svojstva 3DP uzoraka polimera veća pri 0° nego pri 90° [15].

Svaki koncept komunikacije potencijalnim potrošačima određenih proizvoda, usluga ili prostora danas je nezamisliv bez ugrađenog koncepta estetike. Estetika je važna dimenzija ukupne kvalitete proizvoda koja

pridonosi povećanju poslovne i tržišne uspješnosti te poslovne izvrsnosti. Stoga je iznimno važno da uz funkcionalna i mehanička svojstva proizvoda bude ispunjena i estetska komponenta. Značajan dio pojma estetike je boja kao nezaobilazan parametar kvalitete, funkcionalnih i estetskih svojstava te konačnog rezultata proizvoda za potrošača. Boja kao dominantan poticaj vizualne percepcije moćno je sredstvo komunikacije i kao takva neizostavan parametar kvalitete svakog proizvoda.

Gao i sur. [1] proveli su studiju o utjecaju bojila ABS i PLA uzoraka na razlike u mehaničkom ponašanju (rastezna, pritiska i savojna čvrstoća), budući da se obojeni polimeri izrađuju miješanjem neobojenog polimera i obojenih aditiva. Analiza rezultata ispitivanja pokazuje da boja, odnosno dodatak bojila/pigmenta igra važnu ulogu u ponašanju FDM proizvoda. Različite boje polimera u različitim su stupnjevima utjecale na svojstva uzoraka. Uzorci izrađeni od istog materijala, ali u različitim bojama pokazali su maksimalnu razliku od 29 % u mehaničkim svojstvima (rastezna čvrstoća) [1].

Tamasag i sur. [16] došli su do sličnih zaključaka istražujući utjecaj parametara ispune, boje i raspodjele pigmenta na mehanička svojstva i hrapavost površine. Rezultati potvrđuju da je najutjecajniji parametar na rasteznu čvrstoću dijelova bila gustoća ispune, zatim ispitani materijal, pigment i postotak udjela pigmenta. Za površinsku hrapavost gustoća ispune bila je najutjecajniji parametar, zatim postotak udjela pigmenta, vrsta pigmenta i materijal [16]. Muhamad, Hanifah i Ghani [17] istraživali su utjecaj boje i temperature 3D ispisa ABS polimera na kvalitetu 3DP i utvrdili da je potrebno postaviti različite temperature za polimere iste vrste ali različitih boja, kako bi se dobio proizvod ujednačenih svojstava. Također su zaključili da parametar temperature 3D ispisa ima utjecaj na svojstva čvrstoće [17].

Sektor mode i stila života (engl. *lifestyle*) također je jedno od jedinstvenih područja u kojem aditivna proizvodnja igra transformativnu ulogu. AM se primjenjuje u modnoj industriji za razvoj prototipova, inovativnih primjera visoke mode (fran. *haute couture*) ili prilagodljivih personaliziranih tvorevina [18]. Omogućavanjem 3D ispisa u boji otvoren je čitav niz primjena koje nisu prvotna područja primjene AM postupaka posebice unutar dizajnerske i umjetničke prakse kao npr. 3D ispis replika iz muzejskih zbirki, stvaranje digitalno utemeljenih umjetničkih djela, arhitektonskih i krajobraznih modela, očuvanju kulturne baštine i drugo. Nova područja primjene stvorila su potrebu za proučavanje i istraživanje svojstva ili karakteristika boje 3D ispisanih tvorevina i sa stajališta trajnosti te stabilnosti boje 3D ispisane tvorevine. Kako bi se odgovo-

rilo na pitanje stabilnosti boje i trajnosti 3D ispisa u boji, potrebna su istraživanja o ponašanju boje tijekom starenja, uzimajući u obzir parametre materijala, 3D ispisa i okoliša [19, 20].

Bez obzira radi li se o personaliziranom dizajnu, ciljanoj proizvodnoj komponenti ili produkt dizajnu, 3D karakterizacija boja je važan alat za komunikaciju reprodukcije boja. Trenutno 3D ispis u boji ima veliki i značajan utjecaj na život i društvo no još uvijek ne postoji precizna oprema za mjerenje strukture površine i karakteristika boje 3D ispisanih proizvoda. Najčešće se primjenjuje CIELAB sustav za karakterizaciju boja 3D ispisanih tvorevina. Kako bi se opisala ponovljivost boja 3D ispisa te pratila i kontrolirala boja ispisa 3D pisača, potrebna je profesionalna precizna oprema za testiranje i softver za postizanje specifičnih uzoraka boja ili tonova [21]. Trenutačno su istraživanja o trajnosti i stabilnosti 3D ispisa u boji usmjerena na pronalaženje ispravnog načina simulacije starenja ili promjene stvarnih 3D ispisa, koji su izloženi u različitim uvjetima okoline. Konzistentnost i trajnost boja od velikog su interesa za umjetnike i dizajnere koji koriste AM tehnologije za izradu prototipa, umjetničkih djela, arhitektonskih modela, scenkog modeliranja ili urbanog dizajna i zahtijevaju točne, definirane efekte boja. Boja je temeljni dio svakog objekta i očekuje se da izvorni efekti ostanu konstantni tijekom određenog vremenskog razdoblja. Trajanje i postojanost boje ovise o različitim čimbenicima, kao što su svjetlost, vlažnost, temperatura i kontakt zraka [21].

Pregled dostupne literature pokazuje da je primjena 3D ispisa intenzivnija, što utječe i na područja u kojima je boja jedan od ključnih parametara kvalitete proizvoda i jedan od ključnih estetskih elemenata. Kako bi doprinio istraživanju usmjerenom na objektivizaciju boje u 3D ispisu i praćenju utjecaja parametara 3D ispisa na subjektivne i objektivne parametre izgleda boje 3DP objekta, ovaj rad predstavlja dio šireg istraživanja koje analizira utjecaj parametara ispisa 3D objekta (rezolucija, odnosno brzina ispisa), na izgled boje uzoraka ABS polimera. Proveden je proces 3D modeliranja ispitnih objekata prema modelu kruga boja Johannesesa Ittena u računalnom programu Rhinoceros te 3D ispis ispitnih objekata od obojenih ABS polimera uz određivanje parametara boje 3D ispisanih ispitnih objekata.

2. Eksperimentalni dio

U eksperimentalnom dijelu istraživanja ispitani su parametri boje 3D ispisanih objekata od ABS polimera. Cilj je bio analizirati utjecaj parametra debljine sloja 3D ispisa na strukturu površine, a time i na

vrijednosti boja 3DP objekta. Za istraživanje je korišten eksperimentalni sustav koji se sastoji od računalnog programa Rhinoceros za CAD modeliranje, stolnog 3D pisača MakerBot Replicator 2X i ABS polimer tvrtke MakerBot za 3DP.

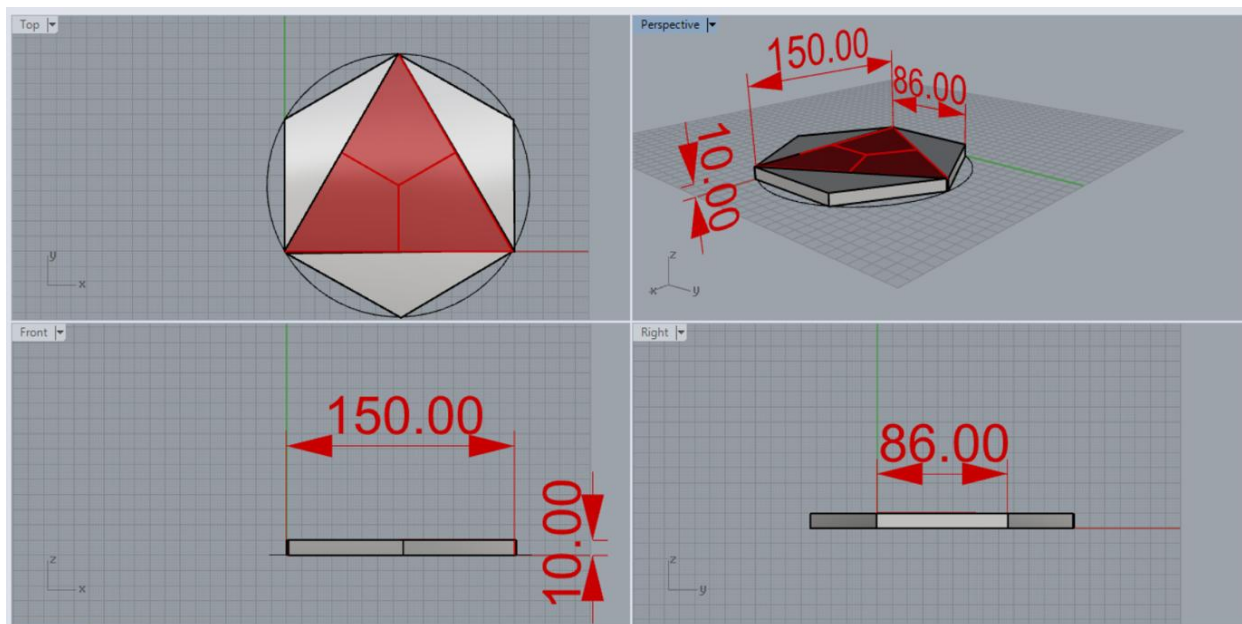
U fazi postavljanja eksperimenta definirane su tri skupine 3D ispisanih objekata u primarnim i sekundarnim bojama, prema parametrima debljine sloja ispisa i brzine ispisa:

1. skupina – debljina sloja ispisa 0,20 mm (standardni ispis / srednja rezolucija)
2. skupina – debljina sloja ispisa 0,10 mm (spori ispis / visoka rezolucija)
3. skupina – debljina sloja za ispis 0,30 mm (brzi ispis / niska rezolucija)

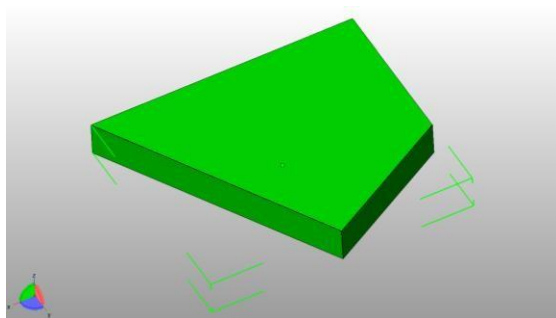
Faze izrade 3D FDM objekta iste su kao i za sve postupke AM i sastoje se od konstruiranja CAD modela, pretvaranja CAD modela u STL datoteku, prijenosa STL datoteke na 3D pisač, postavljanje parametara pisača te izrade proizvoda.

Modeliranje CAD modela prikazano je na sl.1.

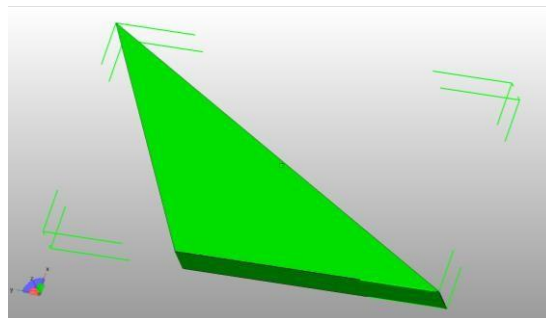
Nakon što je definiran CAD model, kreira se STL datoteka. STL datoteka je standardni format koji se koristi za prijenos podataka prilikom izrade 3D objekata. STL datoteka modeliranih 3D ispisanih objekata prikazana je na sl.2. 3D ispis ispitnih objekata proveden je stolnim 3D pisačem MakerBot Replicator 2X pomoću ABS MakerBot polimera promjera 1,75 mm, u bojama crvena, žuta, plava, narančasta, zelena i ljubičasta. Softver uređaja za 3D ispis (MakerWare) omogućuje izbor uzoraka ispune: linearni, heksagonalni uzorak (saće) te interpolacijski uzorci ukrasnog karaktera: catfill, sharkfill i moroconstar. Za izradu ispitnih objekata odabran je heksagonalni ili sačasti uzorak. Odabrani podesivi i konstantni parametri 3D ispisa navedeni su u tab.1. Softver uređaja za 3D ispis (MakerWare) omogućuje pozicioniranje i orijentiranje datoteke po sve tri osi, skaliranje, izbor mlaznice, kao i podešavanje parametara ispisa. Tijekom 3D ispisa, svi ispitni objekti uvijek su pozicionirani na isti način na radnoj podlozi 3D pisača (sl.3). Za svaku debljinu sloja izrađeno je 6 ispitnih objekata s primarnim i sekundarnim bojama; izrađeno je ukupno 18 3D



Sl.1 Modeliranje CAD modela ispitnih objekta



a)

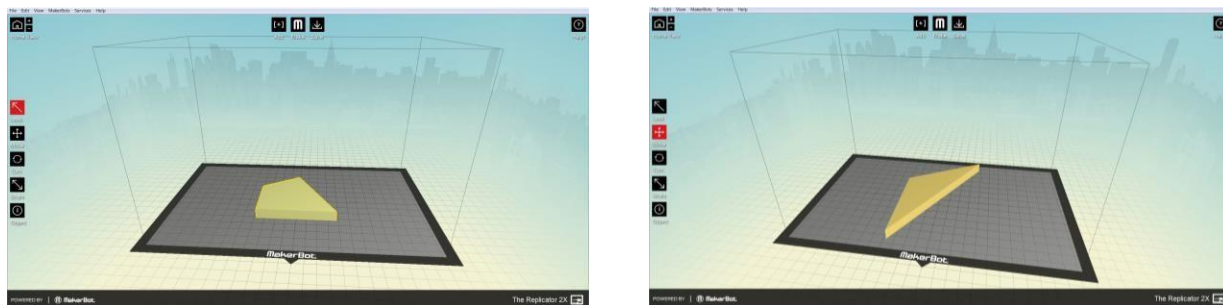


b)

Sl.2 STL datoteka ispitnih objekta: a) unutarnji romb, b) jednakostranični trokut

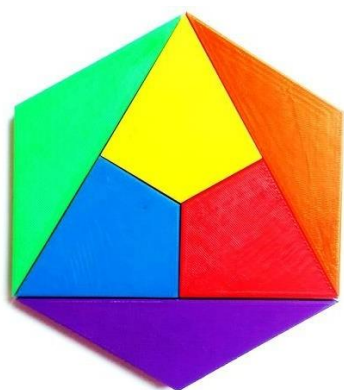
Tab.1 Promjenjivi i konstantni parametri 3D ispisa

	Skupine ispitnih objekta		
	1.	2.	3.
Brzina ispisa / rezolucija	Standard / Standard	Spori / Visoka	Brzi / Niska
Parametri 3D ispisa			
Promjenjivi parametri			
Debljina sloja ispisa (mm)	0,20 mm	0,10 mm	0,30 mm
Gustoća ispune (%)	10 %	15 %	10 %
Konstantni parametri			
Uzorak ispune	saće	saće	saće
Broj vanjskih slojeva	3	3	3
Temperatura ispisa (° C)	230	230	230
Temperatura podloge (° C)	110	110	110



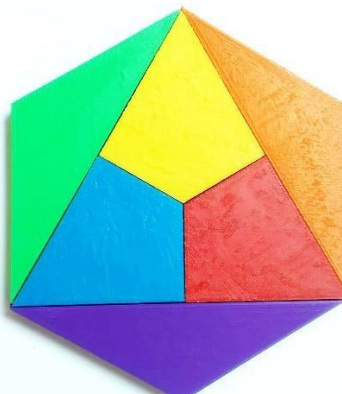
Sl.3 Pozicioniranje ispitnih objekata na radnoj podlozi 3D pisača

1. skupina ispitnih objekta



a)

2. skupina ispitnih objekta



b)

3. skupina ispitnih objekta



c)

Sl.4 Skupine 3D ispisanih ispitnih objekata: a) debljina sloja 0,20 mm – standardni ispis/standardna rezolucija, b) debljina sloja 0,10 mm – spori ispis/visoka rezolucija, c) debljina sloja 0,30 mm – brzi ispis/niska rezolucija

ispitnih objekata. Skupine 3D ispisanih ispitnih objekata prikazane su na sl.4. Mjerenje boja provedeno je na 3D ispisanim objektima remisijskim spektrofotometrom DataColor 800 s mjernom geometrijom $d/8^\circ$, standardnim svjetlom D65 i veličinom mjernog otvora 27 mm. Za svaku grupu 3D objekata izmjerene su sve boje. Na temelju dobivenih spektralnih karakteristika boja prikazane su krivulje refleksije, provedeno je pozicioniranje ispitnih objekata u a^*/b^* prostoru boja i analiza parametara boje svjetline (L^*), zasićenosti/krome (C^*) i tona (h°). Također, provedena je objektivna brojčana procjena razlika u boji izračunatih prema formuli CIE76. Izračun razlike u boji teme-

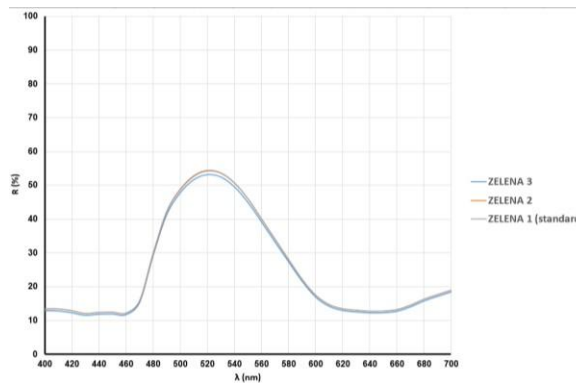
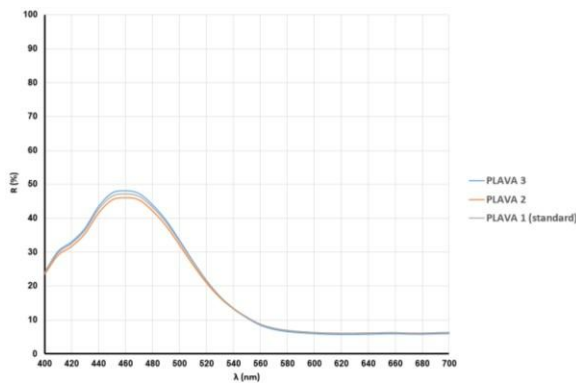
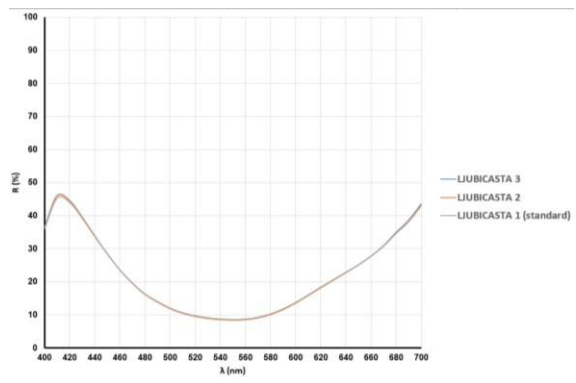
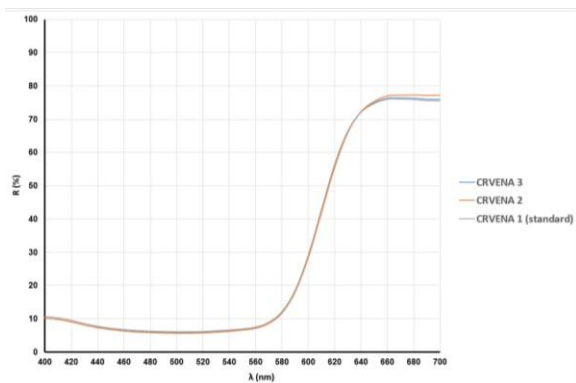
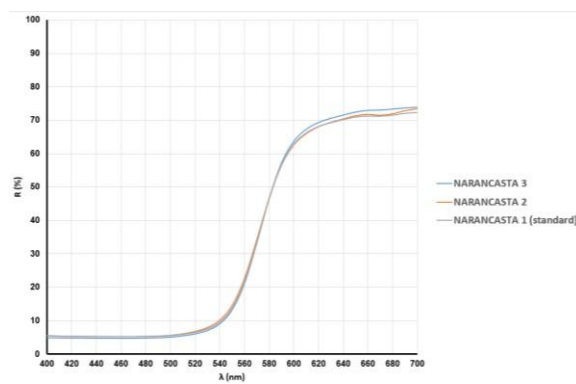
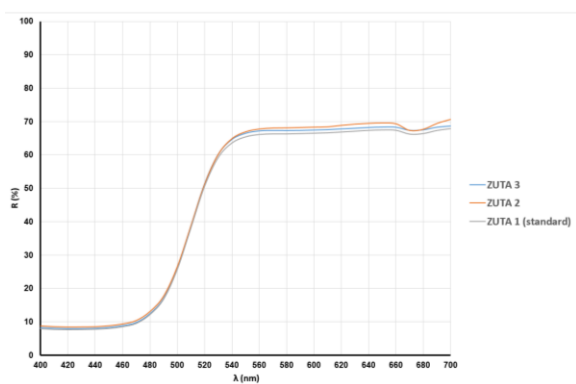
lji se na usporedbi referentnog uzorka s drugim uzorcima iste boje, a u tu su svrhu kao referentni odabrani uzorci 1. skupine (Tab.1). Uzorci 2. i 3. skupine uspoređeni su s uzorcima iste boje 1. skupine. Rezultati su prikazani kao razlika u boji.

3. Rezultati i rasprava

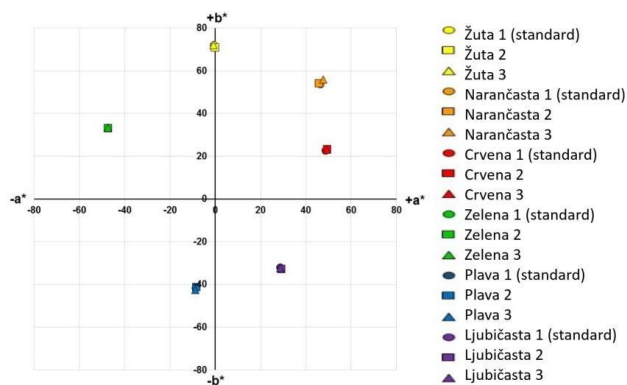
Promatrajući 3D ispisane objekte tri skupine (sl.4), subjektivno se mogu uočiti male razlike u svojstvima istih boja ovisno o parametrima ispisa pojedinog objekta. U izradi 3D ispisanih objekata u skupinama

1, 2 i 3 primjenom tri različite brzine ispisa dobivene su tri različite debljine sloja ispisa. Pretpostavka je bila da debljina sloja utječe na strukturu površine ispitnih objekata te da očekivane promjene strukture dodatno utječu na razlike u modulaciji upadne svjetlosti, što vizualno mijenja pojedine parametre boje. Postoji različita interakcija između upadne svjetlosti i površina predmeta, što utječe na omjer reflektirane, apsorbirane i raspršene svjetlosti te daje vizualni dojam izgleda drugačije boje. Smjer kretanja reflektirane svjetlosti i raspršenje određuju hoće li promatrana površina izgledati glatko i sjajno ili hrpavo i mat. Fenomen apsorpcije svjetlosti također je vrlo složen, a doživljaj površinskih svojstava i boje površine izravno ovisi o interakciji između apsorpcije

i raspršenja svjetlosti. Kako bi se objektivno ocijenile moguće razlike u boji i analizirala priroda tih razlika, uspoređivane su spektralne karakteristike boja 3D ispisanih objekata iz tri skupine (sl.4) prikazom njihovih remisijskih krivulja (sl.5). Ujednačenost oblika krivulja refleksije potvrđuje da se spektralna svojstva boje ne mijenjaju u odnosu na brzinu ispisa, odnosno debljinu sloja. Dominantna valna duljina u reflektiranom dijelu upadne svjetlosti ostaje ista i nema promjene u tonu boje. Male razlike u visinama krivulje uočene su u uzorcima plavog, zelenog i ljubičastog tona boje. Za 3D ispisane objekte žutog, narančastog i crvenog tona, koji su također izrađeni različitim debljinom sloja, odnosno različitim rezolucijom, razlike su izraženije, što potvrđuje položaj



Sl.5 Remisijske krivulje za obojene 3D ispisane objekte za tri skupine (1 - standard, 2 i 3)



Sl.6 Položaj izmjerenih boja u a*/b* prostoru boja

krivulje i ukazuje na određene razlike u zasićenosti i svjetlini mjenjenih boja.

Daljnja analiza provedena je pozicioniranjem izmjerenih boja u jedinstvenom a*/b* koordinatnom prostoru boja (sl.6), čime se prostorno definiraju parametri tona i krome te se prati njihov odnos i provodi usporedba na temelju utjecaja parametara ispisa objekata. Može se reći da rezultati vrijednosti koordinata a*/b* nisu u potpunosti u skladu s prikazom remisij-skih krivulja. Za razliku od rezultata dobivenih za remisije boja, razlike pokazane u malim pomacima u položaju istih boja nešto su vidljivije za narančasti, plavi i ljubičasti ton boje. Iako su razlike dobivene usporedbom istih boja za različite skupine (1, 2 i 3) prilično male, one mogu ukazivati na određeni utjecaj debljine sloja ispisa 3D objekata na sveobuhvatne objektivne i subjektivne karakteristike boje.

Vrijednosti osnovnih parametara boje (L^* , C^* , h°), (Tab.2), pokazuju male promjene parametra zasićenja (kroma, C^*), što je posljedica utjecaja površinske

Tab.2 L^* , C^* , h° vrijednosti izmjerenih boja za sve 3D objekte

Ispitni objekt	L^*	C^*	h°
Žuta 1 (standard)	79,2	72,1	90,5
Žuta 2	79,9	70,9	90,1
Žuta 3	79,7	72,1	90,6
Narančasta 1 (standard)	58,6	71,1	49,2
Narančasta 2	59,0	70,9	49,8
Narančasta 3	58,7	73,5	49,6
Crvena 1 (standard)	45,7	53,9	24,9
Crvena 2	45,2	54,5	25,2
Crvena 3	45,3	54,4	25,2
Plava 1 (standard)	46,8	42,6	258,2
Plava 2	46,4	42,0	258,5
Plava 3	46,8	43,6	258,2
Ljubičasta 1 (standard)	41,5	43,0	311,7
Ljubičasta 2	41,2	43,9	311,7
Ljubičasta 3	41,5	43,2	311,6
Zelena 1 (standard)	66,9	57,9	145,0
Zelena 2	66,9	57,8	145,0
Zelena 3	66,3	58,0	144,9

strukture na odnos raspršenja i apsorpcije u odnosu na količinu refleksije. Promjena strukture površine ne dovodi do promjena u spektralnom sastavu reflektirane svjetlosti, iz čega proizlaze ujednačene vrijednosti parametra tona (h°). Vrijednosti svjetline (L^*) također su ujednačene unutar pojedine skupine, iz čega se potvrđuje da površinska struktura nema utjecaja na količinu svjetla reflektiranog s površine. Daljnja karakterizacija razlika u odnosu na parametre prerade 3D ispisa provedena je izračunavanjem razlika u boji pomoću matematičke formule CIE76. U sklopu ove analize izračunate su vrijednosti ukupne razlike u boji (dE) i razlike u pojedinačnim parametrima boje:

Tab.3 Razlike u boji (CIE76) uspoređivanih ispitnih objekata za iste boje, u svakoj skupini

Razlike u boji CIE76	dL^*	da^*	db^*	dC^*	dh	dE
Žuta 1 (standard)						
Žuta 2	0,76	0,48	-1,12	-1,12	-0,47	1,44
Žuta 3	0,49	-0,05	-0,02	-0,02	0,05	0,49
Narančasta 1 (standard)						
Narančasta 2	0,26	-0,66	0,78	0,16	1,01	1,06
Narančasta 3	-0,12	1,31	2,57	2,8	0,68	2,88
Crvena 1 (standard)						
Crvena 2	-0,46	0,47	0,57	0,67	0,31	0,87
Crvena 3	-0,34	0,39	0,52	0,57	0,31	0,73
Ljubičasta 1 (standard)						
Ljubičasta 2	-0,32	0,59	-0,68	0,9	-0,01	0,95
Ljubičasta 3	-0,01	0,05	-0,24	0,21	-0,12	0,24
Plava 1 (standard)						
Plava 2	-0,57	0,24	0,34	-0,38	0,16	0,7
Plava 3	-0,17	-0,27	-1,12	1,15	-0,03	1,16
Zelena 1 (standard)						
Zelena 2	-0,04	0,09	-0,01	-0,08	-0,04	0,1
Zelena 3	-0,64	-0,03	0,16	0,12	-0,11	0,66

razlika u svjetlini (dL^*), razlika u boji (dC^*), razlika u tonu (dh°) i razlike u a^*/b^* koordinatama (da^* i db^* gdje da^* predstavlja odstupanje na osi a^* (crveno-zelena os), a db^* odstupanje na osi b^* (žuto-plava os)). Negativne vrijednosti razlika u a^* i b^* koordinatama ($-da^*$; $-db^*$) pokazuju da je uzorak u odnosu na referentni (standard) crveniji, odnosno žući, dok pozitivne da^* i db^* vrijednosti pokazuju da je uzorak u odnosu na referentni (standard) zeleniji, odnosno plavlji. Usporedba, odnosno utvrđivanje razlika u boji, provedena je u odnosu na odabrani standard (ispitni objekt 1, označen kao STANDARD koji se odnosi na uzorke boja u 1. skupini). Rezultati su prikazani u tab.3.

Razlike u boji potvrđuju relativno mali utjecaj praćenih parametara 3D ispisa ispitnih objekata na objektivne vrijednosti boje. Vrijednosti razlika u boji neznatno izvan dogovorenih raspona tolerancije, koje za ukupnu razliku u boji dE iznose ≤ 1 , $dL^* \leq 1$, $dC^* \leq 0,8$ i $dh^\circ \leq 0,5$ utvrđene su za žutu, narančastu i plavu boju. U slučaju navedenih ispitnih objekata, razlog za postignute razlike u boji, koje su malo izvan granica tolerancije, je upravo u povećanim vrijednostima razlike u kromi (dC^*).

5. Zaključak

Rezultati potvrđuju da je za postizanje najboljih mogućih rezultata 3D ispisa potrebno analizirati učinke pojedinih parametara 3D ispisa na ukupnu izvedbu konačnog objekta, uključujući boju, korištenjem odgovarajućih ispitnih metoda. U ovom radu ispitane su vrijednosti boja 3D ispisanih ispitnih objekata od originalnog ABS polimera. Na temelju provedenih ispitivanja potvrđen je utjecaj površinske strukture ispitnih objekata na vizualne i objektivne karakteristike boja. Dobiveni rezultati potvrđuju utjecaj debljine sloja 3D ispisa na izgled boje. Karakterizacija boja jedan je od ključnih čimbenika za sveobuhvatno osiguranje kvalitete 3D ispisanih proizvoda. Integracija objektivnog CIE sustava u procese kontrole kvalitete neophodna je za proizvodnju i kontrolu proizvoda kod kojih je boja važan parametar, kao i za proizvode proizvedene tehnologijom 3D ispisa.

Literatura:

[1] Gao, G.; Xu, F.; Xu, J.; Liu, Z. Study of Material Color Influences on Mechanical Characteristics of Fused Deposition Modeling Parts. *Materials* **2022**, 15, 7039. DOI: 10.3390/ma15197039

- [2] Godec, D.; Šercer, M. Aditivne tehnologije – 4. industrijska revolucija, *Tehničke znanosti* 2015 19(1), 1-3
- [3] Wimpenny, D.I.; Pandey, P.M.; Kumar, L.J. (Eds). *Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies*, Springer, Singapore, 2017, DOI: 10.1007/978-981-10-0812-2
- [4] Bandyopadhyay A.; Heer, B. Additive manufacturing of multi-material structures, *Materials Science and Engineering* **2018**, 129, 1-16. DOI: 10.1016/j.msere.2018.04.001
- [5] Leung, Y.; Kwok, T.; Li, X.; Yang, Y.; Wang, C. C. L.; Chen, Y. Challenges and Status on Design and Computation for Emerging Additive Manufacturing Technologies ASME. *J. Comput. Inf. Sci. Eng.* 2019; 19(2), 021013. DOI: 10.1115/1.4041913
- [6] Lee, J.Y.; Jia An, J.; Chua, C.K. Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials, *Applied Materials Today* **2017**, 7, 120-133. DOI: 10.1016/j.apmt.2017.02.004
- [7] Ligon, S.C.; Liska, R.; Stampfl, J.; Gurr, M.; Mulhaupt, R. Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing. *Chem. Rev.* **2017**, 117, 10212–10290. DOI: 10.1021/acs.chemrev.7b00074.
- [8] Selvamani, S.K.; Samykano, M.; Subramaniam, S.R.; Ngui, W.K.; Kadirgama, K.; Kanagaraj, G.; Idris, M.S. 3D Printing: Overview of ABS Evolvement. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Automotive Innovation Green Energy Vehicle AIP Conf. Proc.* 2059, Kuantan, Malaysia, 25–26 July 2018; 020041, 1-11.
- [9] Mbow, M.M.; Marin, P.; Pourroy, F. Extruded diameter dependence on temperature and velocity in the fused deposition modeling process, *Progress in Additive Manufacturing* **2020**, 5(2), 139-152. DOI: 10.1007/s40964-019-00107-4
- [10] Mukherjee, M. Effect of build geometry and orientation on micro-structure and properties of additively manufactured 316L stainless steel by laser metal deposition, *Materialia* **2019**, 7 100359. DOI: 10.1016/j.mtla.2019.100359
- [11] Luzanin, O.; Movrin, D.; Stathopoulos, V.N.; Pandis, P.K.; Radusin, T.; Todorovic Neć Guduric, V. Impact of processing parameters on tensile strength, in-process crystallinity and meso structure in FDM-fabricated PLA specimens, *Rapid Prototyping Journal* **2019**, 25, 1398-1410. DOI: 10.1108/RPJ-12-2018-0316

- [12] Agnusdei, L.; Del Prete, A. Additive manufacturing for sustainability: A systematic literature review. *Sustain. Futures* **2022**, 4, 100098. DOI: 10.1016/j.sfr.2022.100098.
- [13] Carutasu N. L., Simion, I.; Carutasu, G.; Jiga, G.; Arion, A.F. Experimental Test for Elastic and Mechanical Evaluation of ABS Plastic Used in 3D Printing, *Materiale Plastice* **2015**, 52(3), 397-401
- [14] Kumar, R.; Singh, R.; Farina, I. On the 3D printing of recycled ABS, PLA and HIPS thermo-plastics for structural applications, *PSU Research Review* **2018**, 2(2), 115-137. DOI: 10.1108/PRR-07-2018-0018
- [15] Markiz. N.; Horvath, E.; Ficzer, P. Influence of printing direction on 3D printed ABS specimens, *Production Engineering Archives* **2020**, 26(3), 127-130. DOI: 10.30657/pea.2020.26.24
- [16] Tamaşag, I.; Suci, C.; Beşliu-Băncescu, I.; Dulucianu, C.; Cerlină, D.-A. Experimental Study on the Possibilities of FDM Direct Colour Printing and Its Implications on Mechanical Properties and Surface Quality of the Resulting Parts. *Polymers* **2022**, 14, 5173. DOI: 10.3390/polym14235173
- [17] Muhamad, F.B.; M. Hanifah, M. Effect of ABS filament colour and temperature in 3D printer to the product, *National Technology Research in Engineering Design and Social Science* **2019**, 443-447. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.079
- [18] Vanderploeg, A.; Lee, S.E.; Mamp, M. The application of 3D printing technology in the fashion industry. *Int. J. Fash. Des. Technol. Educ.* **2017**, 10, 170-179. DOI: 10.1080/17543266.2016.1223355
- [19] Stanic, M.; Lozo, B.; Gregor-Svetec, D. Colorimetric properties and stability of 3D prints. *Rapid Prototyping Journal* **2012**, 18(2), 120-128. DOI: 10.1108/13552541211212104
- [20] Walters, P.; Huson, D.; Parraman, C.; Stanić, M. 3D Printing in Colour: Technical Evaluation and Creative Applications, In *Proceedings of the 6 International Printmaking Conference*, Bristol, September, 2009
- [21] Chen, G.; Chen, C.; Yu, Z.; Yin, H.; He, L.; Yuan, J. Color 3D Printing: Theory, Method, and Application, In *New Trends in 3D Printing*. InTechOpen, London, UK, 2016; Section 2, 25–51. DOI: 10.5772/63944