



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA  
DEPARTMAN ZA GRAFIČKO INŽENJERSTVO I DIZAJN



Bojan Banjanin

# Karakterizacija proizvodnih parametara alata za utiskivanje izrađenih tehnikom 3D štampe

- doktorska disertacija -

Novi Sad, 2018.

## IZJAVA

*Ja, Bojan Banjanin, izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da ova doktorska disertacija predstavlja isključivo rezultate mog rada u saradnji sa mentorom, da se temelji na mojim naučno-stručnim saznanjima i istraživanjima i da se oslanjana na popisanu i navedenu litereraturu.*

*Izjavljujem da nijedan deo ove doktorske disertacije nije napisan na nedozvoljen i neetičan način, preuzimanjem ili prepisivanjem iz bilo kojeg necitiranog rada, tuđih dela ili rezultata, koji bi bio u suprotnosti sa akademskom moralnošću.*

*Autorska prava svih rezultata i elemenata koji su dobijeni u doktorskoj disertaciji pripadaju Departmanu za grafičko inženjerstvo i dizajn, odnosno Fakultetu tehničkih nauka kao pravnom licu. Izjavljujem da su istovetne štampana i elektronska verzija doktorske disertacije.*

*Izjavljujem da sam saglasan da se doktorska disertacija može staviti na trajan uvid u elektronskom obliku.*

---

*Potpis kandidata*



**КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА**

Редни број, <b>РБР:</b>	
Идентификациони број, <b>ИБР:</b>	
Тип документације, <b>ТД:</b>	Монографска публикација
Тип записа, <b>ТЗ:</b>	Текстуални штампани материјал
Врста рада, <b>ВР:</b>	Докторска дисертација
Аутор, <b>АУ:</b>	Бојан Бањанин
Ментор, <b>МН:</b>	Доц. др Гојко Владић
Наслов рада, <b>НР:</b>	Карактеризација производних параметара алата за утискивање израђених техником 3Д штампе
Језик публикације, <b>ЈП:</b>	Српски
Језик извода, <b>ЈИ:</b>	Српски
Земља публиковања, <b>ЗП:</b>	Република Србија
Уже географско подручје, <b>УГП:</b>	А.П. Војводина
Година, <b>ГО:</b>	2018
Издавач, <b>ИЗ:</b>	Ауторски репринт
Место и адреса, <b>МА:</b>	Нови Сад, Трг Доситеја Обрадовића 6
Физички опис рада, <b>ФО:</b> (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	13/238/232/58/137/32/4
Научна област, <b>НО:</b>	Графичко инжењерство и дизајн
Научна дисциплина, <b>НД:</b>	Графичко инжењерство и дизајн
Предметна одредница/Кључне речи, <b>ПО:</b>	Алати за утискивање, ФДМ техника, адитивна производња, карактеризација производних параметара
<b>УДК</b>	
Чува се, <b>ЧУ:</b>	У библиотеци Факултета техничких наука у Новом Саду
Важна напомена, <b>ВН:</b>	
Извод, <b>ИЗ:</b>	У дисертацији су представљена истраживања утицајних параметара у процесу израде алата за утискивање техником адитивне производње, тачније техником депоновања истопљеног материјала (ФДМ). Израђена је контролна група алата за утискивање конвенционалном техником хемијског нагризања и СЛА техником 3Д штампе. Циљ истраживања је дефинисање оптималних процесних параметара израде алата за утискивање ФДМ техником штампе. Установљена је методологија за карактеризацију производних параметара која се може применити на остале технике адитивне производње. Анализом добијених резултата и закључака истраживања установљена су ограничења и могућности замене конвенционалних алата за утискивање алатима израђеним техникама 3Д штампе.
Датум прихватања теме, <b>ДП:</b>	
Датум одбране, <b>ДО:</b>	
Чланови комисије, <b>КО:</b>	Председник: Др Драгољуб Новаковић, редовни професор
	Члан: Др Младен Станчић, доцент
	Члан: Др Себастиан Балаш, ванредни професор
	Члан: Др Магдолна Пал, доцент
	Члан, ментор: Др Гојко Владић, доцент
	Потпис ментора



## KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, <b>ANO</b> :	
Identification number, <b>INO</b> :	
Document type, <b>DT</b> :	Monographic Publication
Type of record, <b>TR</b> :	Textual material, printed
Contents code, <b>CC</b> :	Ph.D. thesis
Author, <b>AU</b> :	Bojan Banjanin
Mentor, <b>MN</b> :	Doc. Ph.D. Gojko Vladić
Title, <b>TI</b> :	Characterisation of manufacturing parameters of embossing dies produced by 3D printing technique
Language of text, <b>LT</b> :	Serbian
Language of abstract, <b>LA</b> :	Serbian
Country of publication, <b>CP</b> :	Republic of Serbia
Locality of publication, <b>LP</b> :	A.P. Vojvodina
Publication year, <b>PY</b> :	2018
Publisher, <b>PB</b> :	Author's reprint
Publication place, <b>PP</b> :	Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6
Physical description, <b>PD</b> : <small>(chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)</small>	13/238/232/58/137/32/4
Scientific field, <b>SF</b> :	Graphic engineering and design
Scientific discipline, <b>SD</b> :	Graphic engineering and design
Subject/Key words, <b>S/KW</b> :	Embossing dies, FDM, additive manufacturing, characterisation of manufacturing parameters
<b>UC</b>	
Holding data, <b>HD</b> :	The Library of the Faculty of Technical Sciences in Novi Sad
Note, <b>N</b> :	
Abstract, <b>AB</b> :	<p>The study of the influencing parameters in the production process of embossing dies using Fused Deposition Modelling (FDM) additive manufacturing technique, was investigated in this dissertation. Embossing dies, produced using conventional chemical etching and vat photo-polymerization technique, were developed as a control group. This research aims to define the optimal process parameters of Fused Deposition Modelling (FDM) in embossing dies manufacturing. A new methodology for the characterisation of production parameters, which can be applied to other additive production techniques, has been established. By analysing the results and the conclusions of this research, the possibility of replacing conventional embossing dies produced using 3D printing techniques has been established as well as its limitations.</p>
Accepted by the Scientific Board on, <b>ASB</b> :	
Defended on, <b>DE</b> :	
Defended Board, <b>DB</b> :	
President:	Dragoljub Novaković, Ph.D. full profesor
Member:	Mladen Stančić, Ph.D. Assistant Professor
Member:	Sebastian Baloš, Ph.D. Associate Professor
Member:	Magdolna Pál, Ph.D. Assistant Professor
Member, Mentor:	Gojko Vladić, Ph.D. Assistant Professor

Menthor's sign



*Želim da se zahvalim svom mentoru dr Gojku Vladiću na ukazanom poverenju, strpljenju i korisnim sugestijama koje mi je pružio u toku izrade doktorske disertacije. Zahvaljujem se profesoru dr Dragoljubu Novakoviću na podršci i razumevanju. Zahvalnost dugujem i ostalim kolegama na pomoći, iskrenim komentarima, nesebičnim sugestijama i ohrabrujućim rečima.*

*Zahvaljujem se prijateljima koji su bili uz mene. Hvala na strpljenju, podršci i lepim trenucima provedenim sa vama. Snežo, hvala na pomoći, inspiraciji i podsticaju da istrajem u pisanju ove disertacije.*

*Hvala porodici na poverenju i безусловnoj podršci.*

## REZIME

*Tehnika oplemenjivanja utiskivanjem predstavlja značajnu operaciju završne obrade grafičkih proizvoda. Procesom utiskivanja se vrši permanentna promena površine materijala pomoću alata za utiskivanje upotrebom sile pritiska, u cilju formiranja udubljene ili ispupčene slike. Alati za utiskivanje izrađuju se konvencionalnim tehnikama proizvodnje poput tehnika hemijskog nagrivanja metala ili uklanjanja materijala rezanjem. Nedostatak ovih tehnika je u velikoj količini nusproizvoda (otpadne hemikalije i strugotine) nastalih u toku i nakon proizvodnog procesa. Neadekvatnim rukovanjem ovim nusproizvodima dolazi do zagađenja radne i životne sredine čoveka. Takođe, konvencionalne tehnike izrade alata za utiskivanje podrazumevaju upotrebu različitih mašina i uređaja, adekvatnu površinu radnog prostora i često nedovoljnu fleksibilnost u brzini izmene poslova. Zamenom konvencionalnih tehnika izrade alata za utiskivanje, tehnikama aditivne proizvodnje, ovi problemi, nametnuti od strane tržišta, mogu se u velikoj meri prevazići.*

*Osnovni cilj istraživanja je definisanje optimalnih procesnih parametara izrade alata za utiskivanje tehnikom deponovanja istopljenog materijala (Fused Deposition Modeling - FDM). Dodatni ciljevi obuhvataju definisanje ograničenja FDM tehnike 3D štampe i primenu stečenih znanja na ostale tehnike aditivne proizvodnje. FDM tehnika štampe odabrana je zbog jednostavnosti i dostupnosti, kao i zbog mogućnosti upotrebe biorazgradivih materijala kao što je polilaktična kiselina, a pokazala se kao adekvatna za postavku metodologije i sticanje uvida u parametre koji utiču na kvalitet izrađenih alata za utiskivanje.*

*Definisani su uticajni parametri u procesu utiskivanja i urađena je karakterizacija tih parametara kroz niz istraživanja opisanih ovim radom. Utvrđena je zatezna čvrstoća nepremaznih, premaznih i voluminoznih papira, korišćenih u procesu utiskivanja. Primenom Taguči metode i metode frakcionalnog rangiranja, analiziran je uticaj osam procesnih parametara izrade alata FDM tehnikom štampe (debljina sloja, vrsta i procenat unutrašnje popune, broj konturnih zidova, broj završnih slojeva, orijentacija uzoraka na platformi za štampu, brzina kretanja glave za štampu i temperatura dizne u glavi štampača) na mehaničke i fizičke osobine izrađenih uzoraka, vreme štampe i potrošnju materijala. Istražen je uticaj proizvodnih parametara na termomehaničke i fizičke karakteristike uzoraka izrađenih FDM tehnikom štampe i ponovljivost mehaničkih osobina termoplastičnih materijala od polilaktične kiseline i akrolinitril butadien stirena. Utvrđen je uticaj mehaničke i hemijske obrade uzoraka na mehaničke i fizičke osobine alata. Poređeni su rezultati utiskivanja nastalih upotrebom konvencionalnih i alata izrađenih FDM tehnikom 3D štampe. Analiziran je kvalitet, utisnutih papirnih uzoraka ovim alatima, upotrebom dve metode: metode analize slika i vizuelne metode. U cilju primene alata izrađenog FDM tehnikom štampe u realnom proizvodnom procesu, istražena je otpornost alata na habanje nakon hiljadu utisnutih uzoraka.*

*Karakterizacija proizvodnih parametara alata za utiskivanje izrađenih FDM tehnikom štampe obezbedila je poboljšanje mehaničkih i fizičkih osobina uz istovremenu optimizaciju potrošnje materijala i vremena potrebnog za njegovu izradu. Izrađeni alati su obezbedili kvalitetne otiske i posle hiljadu utiskivanja, što je potvrdilo njegovu mogućnost upotrebe za poslove manjih tiraža. Rezultati vizuelne metode ukazuju na zadovoljavajući kvalitet papira utisnutih alatima izrađenim FDM tehnikom štampe. Od tri korišćene vrste papira, voluminozni papiri su pokazali najlošiji kvalitet. Najviše ocene dobili su nepremazni i premazni papiri većih gramatura. Ipak, alati izrađeni FDM tehnikom štampe nisu bili u mogućnosti da proizvedu utisnute uzorke istog kvaliteta kao i konvencionalni alati. Međutim, izradom alata primenom stereolitografskog postupka, pokazano je da se upotrebom naprednijih tehnika aditivne proizvodnje mogu dobiti rezultati utiskivanja sličnog kvaliteta kao i u slučaju utiskivanja konvencionalnim alatima.*

*Nakon sprovedenih istraživanja, došlo se do zaključka da je zamena tradicionalnih tehnika izrade alata za utiskivanje FDM tehnikom štampe opravdana smanjenjem potrebnih uređaja, površine radnog prostora, cene pojedinačnog alata i štetnog uticaja na radnu i životnu sredinu uz određena ograničenja. Ovom disertacijom postavljena je metodologija koju je moguće primeniti i na druge tehnike aditivne proizvodnje u cilju što bolje implementacije u oblasti grafičke industrije.*

**Ključne reči:** Alati za utiskivanje, FDM tehnika, aditivna proizvodnja, karakterizacija proizvodnih parametara

## ABSTRACT

*Embossing technique is an important operation in the print finishing process for specific graphic products. Embossing process entails permanently changing the shape of the paper surface by applying pressure on the embossing die, so as to create a recessed or raised image. Embossing dies are made using conventional techniques such as chemical etching or milling. The disadvantage of these techniques is large quantity of by-products (waste chemicals and chips) produced during and after the manufacturing process. Inadequate handling of these by-products results in contamination of the environment. Also, conventional techniques of the embossing die production imply the use of different machines and devices, enough workspace, and often insufficient flexibility in quick job changes. By replacing conventional with additive manufacturing techniques, these problems imposed by the market can be overcome to a great extent.*

*This research aims to define the optimal process parameters of Fused Deposition Modelling (FDM). Additional goals include identifying the limitations of FDM 3D printing technique and applying acquired knowledge to other additive manufacturing techniques. FDM printing technique is chosen because of its simplicity and availability, as well as the possibility of using biodegradable materials such as polylactic acid, and it has proved to be adequate for defining the methodology and gaining a better insight into parameters that affect the quality of the 3D printed embossing dies.*

*Parameters relevant for embossing process are defined, and the characterisation of these parameters is made through a series of experiments described in this paper. The tensile strength of the uncoated, coated and voluminous bulk paper used in the embossing process was determined. Using the Taguchi method and the fractional ranking method, the influence of the eight FDM process parameters (layer height, type and percentage of infill, number of contours, number of roof layers, orientation of the object on the printing platform, printing speed and nozzle temperature) on the mechanical and physical properties of the produced samples, time of the printing and the consumption of the material was analysed. The influence of process parameters on thermo-mechanical and physical characteristics of samples printed using polylactic acid and acrylonitrile butadiene styrene was investigated, as well as the consistency of their mechanical properties. The influence of mechanical and chemical post-treatment on the mechanical and physical properties of printed samples has been determined. The embossing results produced by conventional and FDM printed dies are compared. The quality of paper embossed with produced dies was evaluated by two methods: image analysis and visual quality assessment. With the aim to use the FDM embossing dies in the real production process, the wear resistance of 3D printed embossing die after a thousand impressions was investigated.*

*The characterisation of the production parameters improved the mechanical and physical properties of the embossing dies produced with the FDM printing technique while at the same time optimising the consumption of used material and the production time. The created dies provided high-quality embossed samples even after a thousand impressions, which confirmed their applicability for small print runs. The results of the visual quality assessment indicate satisfactory quality of the samples embossed by the tools produced by FDM printing technique. Concerning embossing results, voluminous papers showed the worst quality. The highest quality was obtained with uncoated and coated papers of larger weights. However, the embossing dies produced by FDM technique were not able to produce embossed samples of the same quality as conventional tools. Embossing tool produced by stereolithography was used as the proof of the concept that more advanced additive manufacturing techniques can be used to create embossed samples with similar quality to the ones produced using conventional dies.*

*After conducted experiments, the conclusion is reached that replacing conventional chemical etching technique with FDM printing technique is justified, having in mind the reduction in devices used in die making process, reduction of workspace area, the price of an embossing die, and the reduction in adverse impacts on the environment, but some limitations must be taken in to the consideration. This dissertation has set up a methodology that can be applied to other additive manufacturing techniques with the aim of their better implementation in other processes of the graphics industry.*

**Keywords:** *Embossing dies, FDM, additive manufacturing, characterisation of manufacturing parameters*

## SPISAK SLIKA

Slika 3.1: Oplemenjivanje papirne podloge tehnikom utiskivanja	4
Slika 3.2: Podela alata za utiskivanje po formi alata a, b) ravni, c, d) cilindar-cilindar	5
Slika 3.3: Podela tehnika utiskivanja	6
Slika 3.4: Tehnika hladnog utiskivanja sa folijom	6
Slika 3.5: Prikaz poprečnog preseka papira i orijentacija vlakana u njegovoj strukturi	7
Slika 3.6: Deformacije i naponi nastali utiskivanjem papira (t-apon istezanja, c-apon pritiskanja, s-smicanje)	10
Slika 3.7: Uporedni prikaz proizvodnih koraka izrade alata za utiskivanje tehnologijom hemijskog nagrizanja i aditivnim tehnikama	12
Slika 3.8: Princip FDM tehnologije 3D štampe	13
Slika 3.9: Princip fotopolimerizacije tečnog materijala	14
Slika 3.10: Princip tehnologije povezivanja materijala termalnom energijom	14
Slika 3.11: Princip Binder Jetting tehnologije 3D štampe	15
Slika 3.12: Princip Binder Jetting tehnologije 3D štampe	15
Slika 3.13: Princip Material Jetting tehnologije 3D štampe	15
Slika 3.14: Princip SLS tehnologije 3D štampe	16
Slika 3.15: Radni parametri FDM tehnike štampe	17
Slika 3.16: Ilustracija različitih uglova rastera slojeva na uzorku izrađenom FDM tehnikom štampe. a) ugao od 0°, b) 45°, c) 90° i d) 45°/45°	18
Slika 3.17: Prikaz različitih vrsta popune: a) linearni, heksagonalni, maroknska zvezda i ketfil, b) šarkfil	18
Slika 3.18: Prikaz različitih procenata unutrašnje popune od 10% do 100%	19
Slika 3.19: Prikaz različitog broja konturnih zidova. Uzorak a) je izrađen sa završnim „krovom“ dok ostali nisu	19
Slika 3.20: Ispitivanje zatezanjem a), sabijanjem b), savijanjem u tri tačke c), uvijanjem d), izvijanjem e), smicanjem f) ispitivanje tvrdoće g) i ispitivanje energije udara h)	20
Slika 3.21: Deformacija prilikom utiskivanja u zavisnosti od vremena: elastična (a), elastično-plastična (b), plastična (c), gde je $\epsilon$ veličina deformacije (opterećenje), p-to – rasterećenje, t - vreme deformacije i relaksacije	21
Slika 3.22: Ilustracija stepenastog efekta na primeru sa debljim slojevima (a) i manje izražen stepenast efekat (b)	27
Slika 3.23: (S leva na desno) Neobrađen uzorak izrađen FDM tehnikom 3D štampe, mehanički obrađen uzorak i hemijski obrađen uzorak	27
Slika 3.24: Uticajni parametri na kvalitet uzoraka izrađenih FDM tehnikom 3D štampe	30
Slika 3.25: Primena 3D tehnika štampe u izradi pribora za fiksiranje i rukovanje proizvoda u toku procesa proizvodnje	34
Slika 3.26: FDM štampa Brajevog pisma i elemenata taktilne mape	35
Slika 3.27: Slika 3.27: Izgled FDM štampanog kalupa za a), b) termoformiranje, c) porozna struktura kalupa za termoformiranje i d) duvanje plastičnih boca	35
Slika 7.1: Mašina za rezanje naslaga materijala Perfecta 76 HTVC	42
Slika 7.2: Uređaj za testiranje zatezne čvrstoće materijala Shimadzu Compact Tabletop Testing EZ-LX	42
Slika 7.3: Dimenzije uzorka za ispitivanje zatezanja (Tip 1) po ASTM D638-14 standardu (mm)	44
Slika 7.4: Uticajni faktori na kvalitet štampanog uzorka i njegove mehaničke osobine u FDM tehnici štampe	44
Slika 7.5: Statistički nacrt eksperimenta (DOE). Šematski prikaz procesnih faktora koji utiču na željene izlazne promenjive	45
Slika 7.6: MakerBot Replicator 5th Generation FDM štampač	47
Slika 7.7: Način obeležavanja test epruvete za testiranje zatezne čvrstoće	47
Slika 7.8: Uređaj za merenje površinske hrapavosti TR200 - Time Group Inc, China	47
Slika 7.9: Digitalna tehnička vaga Radwag PS 211/C2	48
Slika 7.10: a) Dimenzije uzorka za ispitivanje sabijanjem po ASTM D695-15 standardu (mm), b) orijentacija deponovanih niti filameta na uzorku za testiranje pritisne čvrstoće i c) orijentacija deponovanih niti filameta na uzorku za testiranje zatezne čvrstoće	49
Slika 7.11: FDM štampač MakerBot Replicator 2x	50
Slika 7.12: Uzorci za testiranje zatezne čvrstoće od a) PLA materijala i b) od ABS materijala štampani FDM tehnikom 3D štampe	51

Slika 7.13: Uzorci za testiranje pritiskne čvrstoće od a) PLA materijala i b) ABS materijala štampani FDM tehnikom 3D štampe	51
Slika 7.14: Mikroskop Leitz Orthoplan	52
Slika 7.15: Mikroskopski snimci gornje površine uzorka od a) ABS i b) PLA materijala i bočnih strana uzoraka od c) ABS i d) PLA materijala pri uveličanju od 20x štampanih FDM tehnikom 3D štampe	52
Slika 7.16: a) mašina za testiranje zatezne čvrstoće Shimadzu Compact Tabletop Testing Machine EZ-LX; b) uveličan prikaz čeljusti za pričvršćavanje uzoraka; c) mašina za testiranje pritiskne čvrstoće VEB ZDM 5/91; d) uveličan prikaz ploča za pritiskanje uzoraka	53
Slika 7.17: USB digitalni mikroskop Veho VMS-004D	53
Slika 7.18: a) Aparatura za zagrevanje uzoraka tokom testiranja zatezne čvrstoće i b) montirana aparatura na čeljusti za fiksiranje uzoraka prilikom testiranja zatezne čvrstoće	54
Slika 7.19: Ilustracija aparature za zagrevanje uzoraka tokom testiranja a) zatezne čvrstoće i b) pritiskne čvrstoće	55
Slika 7.20: Ilustracija a) uzorka i njegovih dimenzija i b) šema aparature za preliminarno testiranje toplotne provodljivosti	55
Slika 7.21: Testo 735-2 – Višekanalni termometar	56
Slika 7.22: Termalna kamera Fluke TiS45	57
Slika 7.23: Test uzorci sa finim detaljima za utiskivanje	59
Slika 7.24: Odštampani uzorak sa finim detaljima za utiskivanje	59
Slika 7.25: Prikaz potrebnih alata za obradu brusnim papirom: a) epruveta za testiranje zatezne čvrstoće i b) modela sa sitnim elementima za utiskivanje	60
Slika 7.26: Prikaz alata potrebnih za hemijsku obradu potapanjem u acetonsku kupku	61
Slika 7.27: Digitalni USB mikroskop ViTiny VT-300	61
Slika 7.28: Elementi alata za utiskivanje na formi za a) prvi, b) drugi, c) treći i d) četvrti set alata	62
Slika 7.29: Pripremni fajlovi za izradu alata za utiskivanje tehnikom hemijskog nagrivanja	63
Slika 7.30: Uređaj za izradu filmova Laser Imagesetter Ultre 5400	63
Slika 7.31: Uređaj za osvetljavanje ploča Rectoplan Duplomat	64
Slika 7.32: Proces razvijanja magnezijumske ploče	65
Slika 7.33: Uređaj za hemijsko nagrivanje magnezijumskih ploča i fiksiranje ploče spremne za proces hemijskog nagrivanja	65
Slika 7.34: Uređaj za regulaciju brzine kretanja lopatica, vremena hemijskog nagrivanja i temperature sredstva za nagrivanje	66
Slika 7.35: Komplet alata izrađenih tehnikom hemijskog nagrivanja magnezijuma namenjenih za istraživanje obuhvaćeno doktorskom disertacijom	66
Slika 7.36: 3D model jednog seta replike alata za utiskivanje izrađenog tehnikom hemijskog nagrivanja magnezijuma	66
Slika 7.37: Paralelni prikaz a) alata za utiskivanje izrađenog tehnikom hemijskog nagrivanja magnezijuma i b) FDM tehnikom 3D štampe od PLA materijala	67
Slika 7.38: a) Ploče za utiskivanje papirnih uzoraka, b) fiksirana patrica alata za utiskivanje na donjoj ploči, c) fiksirana matrica alata za utiskivanje na gornjoj ploči za utiskivanje i d) utiskivanje papirnih uzoraka na uređaju Shimadzu EZ-LX	67
Slika 7.39: Uzorci nepremaznog papira iste gramature utisnuti različitim silama pritiska	68
Slika 7.40: a) Rezultat utiskivanja konvencionalnim alatom i b) neoptimizovanim alatom za utiskivanje izrađenim FDM tehnikom 3D štampe sa PLA materijalom	68
Slika 7.41: Princip utiskivanja a) alatom izrađenim tehnikom nagrivanja sa obeleženim mestima kontakta između matrice i patrice i b) alatom izrađenim FDM tehnikom 3D štampe	69
Slika 7.42: Testirani parametri alata za utiskivanje izrađenog FDM tehnikom štampe: a – ugao zakošenja bočnih stranica elemenata, b – dubina elemenata, c – zazor između patrice i matrice	69
Slika 7.43: Izgled patrice i matrice alata za definisanje vrednosti parametara dubine elemenata, ugla bočnih stranica elemenata i zazora između matrice i patrice. Izrađeni elementi na alatu su: osmougao (sredina) i krugovi različitih vrednosti prečnika	70
Slika 7.44: Konstruisan 3D model alata za definisanje termalne ekspanzije PLA materijala za štampu FDM tehnikom 3D štampe	70

Slika 7.45: Odštampan uzorak za definisanje termalne ekspanzije PLA materijala nakon štampe FDM tehnikom 3D štampe	71
Slika 7.46: Konstruisani 3D modeli alata za utiskivanje za izradu FDM tehnikom 3D štampe – a) prvi, b) drugi, c) treći, d) četvrti set alata	72
Slika 7.47: Konstruisani 3D modeli seta alata za utiskivanje najsitnijih elemenata za izradu SLA tehnikom 3D štampe	73
Slika 7.48: Izgled SLA štampača FormLabs Form 2 za štampu alata za utiskivanje	73
Slika 7.49: Komplet alata izrađenih FDM tehnikom 3D štampe	74
Slika 7.50: Komplet alata izrađenog SLA tehnikom 3D štampe	75
Slika 7.51: Utiskivanje uzoraka pomoću pritisnih ploča mernog uređaja Shimadzu EZ-LX: a) izgled aparature i b) pritisne ploče za utiskivanje	76
Slika 7.52: Izgled ravnog skenera Canon CanoScan 5600F korišćenog za digitalizaciju utisnutih uzoraka	76
Slika 7.53: Šema algoritma za analizu skeniranih slika i određivanje razlike intenziteta nijanse sive	78
Slika 7.54: Primer unimodalnosti histograma originalne slike sivih tonova	79
Slika 7.55: Primer segmentiranih slika nastalih od originalne skenirane monohromatske slike pomoću a) Ridler, b) Otsu, c) Kapur, d) Yen, e) Zack i f) Tsai metode segmentacije slike	80
Slika 7.56: Prikaz ucrtanog praga na unimodalnom histogramu na osnovu a) Ridler, b) Otsu, c) Kapur, d) Yen, e) Zack i f) Tsai metode segmentacije slike	81
Slika 7.57: Priprema uzoraka za segmentaciju slike a) neobrađen uzorak sa vidljivim oštećenjima papira i drugim vrstama šuma i b) izgled slike nakon uklanjanja šuma	82
Slika 7.58: Izgled a) originalne monohromatske slike, b) binarna pozitivna maska dobijena Kapur metodom c) binarna maska u negativu i d) maskiranje originalne slike segmentovanom za izdvajanje površine papira van senke	82
Slika 7.59: Par uzoraka za vizuelnu metodu ocene kvaliteta utisnutih uzoraka alatom izrađenim a) tehnikom hemijskog nagrizanja i b) FDM tehnikom 3D štampe	84
Slika 7.60: Kabinet za posmatranje uzoraka - Agile Radiant Controlled Light 5	84
Slika 7.61: a i b) Postavka uzoraka i kabineta za posmatranje korišćenih za vizuelnu metodu ispitivanja kvaliteta i c i d) položaj ispitanika u toku testiranja	85
Slika 7.62: Konstruisani 3D model alata za testiranje otpornosti na habanje: a) patrica i b) matrica	86
Slika 7.63: Alat za testiranje otpornosti na habanje izrađen FDM tehnikom 3D štampe: a) patrica i b) matrica	86
Slika 7.64: Ilustracija elementa na altu za testiranje otpornosti na habanje: a – oštri ugao, b – tup ugao, c – zaobljen vrh ugla i d – visina elementa za utiskivanje	86
Slika 8.1: a) Uzorci od ABS materijala štampanih FDM tehnikom nakon testiranja zatezne čvrstoće b) Prikaz mesta loma i njegov poprečni presek	109
Slika 8.2: a) Uzorci od PLA materijala štampanih FDM tehnikom nakon testiranja zatezne čvrstoće b) Prikaz mesta loma i njegov poprečni presek	109
Slika 8.3: Snimci aparature za testiranje uticaja različitih temperatura na zateznu čvrstoću uzoraka snimljeni termalnom kamerom Fluke TiS45 pri temperaturi od a) 67 °C, b) 78,3 °C i c) 82,7 °C	115
Slika 8.4: Snimci zagrejanog PLA uzorka pričvršćenog na čeljusti uređaja za testiranje zatezne čvrstoće pri različitim temperaturama (°C) snimljeni termalnom kamerom Fluke TiS45	115
Slika 8.4 (nastavak): Snimci zagrejanog PLA uzorka pričvršćenog na čeljusti uređaja za testiranje zatezne čvrstoće pri različitim temperaturama (°C) snimljeni termalnom kamerom Fluke TiS45	116
Slika 8.5: Mikroskopski snimak gornjih (a,b,c) i bočnih površina (d,e,f) netretiranih, mehanički tretiranih i hemijski tretiranih uzoraka (s leva na desno)	118
Slika 8.6: Poprečni presek zone prekida uzoraka posle ispitivanja zatezne čvrstoće kod a) netretiranog, b) mehanički tretiranog c) hemijski tretiranog PLA uzorka	119
Slika 8.7: Mikroskopski snimci profila za utiskivanje kod različito tretiranih PLA uzoraka: (a, d, g) neobrađenih, (b, e, h) mehanički obrađenih i (c, f, i) hemijski obrađenih	120
Slika 8.8: Ilustracije primera testiranih parametara elemenata alata za utiskivanje – a), b), c) različite dubine elemenata, d), e), f) različiti zazori između patrice i matrice, g), h), i) različite kosine bočnih ivica elemenata alata za utiskivanje	121
Slika 8.9: Rezultati utiskivanja alatom izrađenim FDM tehnikom 3D štampe na premaznom papiru. Dubina elemenata 0,4 mm, zazor 0,3 mm i 0,5 mm i kosina bočnih ivica 10° i 30°	121
Slika 8.10: Rezultati utiskivanja alatom izrađenim FDM tehnikom 3D štampe na premaznom papiru. Dubina elemenata 0,6 mm, zazor 0,3 mm i 0,5 mm i kosina bočnih ivica 10° i 30°	122

Slika 8.11: Rezultati utiskivanja alatom izrađenim FDM tehnikom 3D štampe na premaznom papiru. Dubina elemenata 0,8 mm, zazor 0,3 mm i 0,5 mm i kosina bočnih ivica 10° i 30°	123
Slika 8.12: Rezultati utiskivanja alatom izrađenim FDM tehnikom 3D štampe na ofset papiru. Dubina elemenata 0,4 mm, zazor 0,3 mm i 0,5 mm i kosina bočnih ivica 10° i 30°	124
Slika 8.13: Rezultati utiskivanja alatom izrađenim FDM tehnikom 3D štampe na ofset papiru. Dubina elemenata 0,6 mm, zazor 0,3 mm i 0,5 mm i kosina bočnih ivica 10° i 30°	125
Slika 8.14: Rezultati utiskivanja alatom izrađenim FDM tehnikom 3D štampe na ofset papiru. Dubina elemenata 0,8 mm, zazor 0,3 mm i 0,5 mm i kosina bočnih ivica 10° i 30°	126
Slika 8.15: Rezultati utiskivanja alatom izrađenim FDM tehnikom 3D štampe na voluminoznom papiru. Dubina elemenata 0,4 mm, zazor 0,3 mm i 0,5 mm i kosina bočnih ivica 10° i 30°	127
Slika 8.16: Rezultati utiskivanja alatom izrađenim FDM tehnikom 3D štampe na voluminoznom papiru. Dubina elemenata 0,6 mm, zazor 0,3 mm i 0,5 mm i kosina bočnih ivica 10° i 30°	128
Slika 8.17: Rezultati utiskivanja alatom izrađenim FDM tehnikom 3D štampe na voluminoznom papiru. Dubina elemenata 0,8 mm, zazor 0,3 mm i 0,5 mm i kosina bočnih ivica 10° i 30°	129
Slika 8.18: Rezultati utiskivanja alatom izrađenim FDM tehnikom 3D štampe na premaznom, ofset i voluminoznom papiru. Dubina elemenata 0,4 mm i 0,5 mm, zazor 0,3 mm i kosina bočnih ivica 20°	130
Slika 8.19: Mikroskopski snimci profila alata štampanog FDM tehnikom od PLA materijala: (a-d) ispupčeni elementi širina 0,5 mm, 1 mm, 2 mm i 4 mm respektivno	131
Slika 8.20: Mikroskopski snimci profila alata štampanog FDM tehnikom od PLA materijala: (a-d) udubljeni elementi širina 1,1 mm, 1,6 mm, 2,6 mm i 4,6 mm respektivno	132
Slika 8.21: Ocene ispitivanja za parametar oštine ivica utisnutih uzoraka za prvi set alata	139
Slika 8.22: Ocene ispitivanja za parametar oštine ivica utisnutih uzoraka za drugi set alata	140
Slika 8.23: Ocene ispitivanja za parametar oštine ivica utisnutih uzoraka za treći set alata	140
Slika 8.24: Ocene ispitivanja za parametar oštine ivica utisnutih uzoraka za četvrti set alata	141
Slika 8.25: Ocene ispitivanja za parametar ujednačenosti visine elemenata utisnutih uzoraka za prvi set alata	141
Slika 8.26: Ocene ispitivanja za parametar ujednačenosti visine elemenata utisnutih uzoraka za drugi set alata	142
Slika 8.27: Ocene ispitivanja za parametar ujednačenosti visine elemenata utisnutih uzoraka za treći set alata	142
Slika 8.28: Ocene ispitivanja za parametar ujednačenosti visine elemenata utisnutih uzoraka za četvrti set alata	143
Slika 8.29: Ocene ispitivanja za parametar oštećenja papira na elementima uzoraka utisnutih prvim setom alata	144
Slika 8.30: Ocene ispitivanja za parametar oštećenja papira na elementima uzoraka utisnutih drugim setom alata	144
Slika 8.31: Ocene ispitivanja za parametar oštećenja papira na elementima uzoraka utisnutih trećim setom alata	145
Slika 8.32: Ocene ispitivanja za parametar oštećenja papira na elementima uzoraka utisnutih četvrtim setom alata	145
Slika 8.33: Ocene ispitivanja za parametar oštećenja papira oko elemenata uzoraka utisnutih prvim setom alata	146
Slika 8.34: Ocene ispitivanja za parametar oštećenja papira oko elemenata uzoraka utisnutih drugim setom alata	147
Slika 8.35: Ocene ispitivanja za parametar oštećenja papira oko elemenata uzoraka utisnutih trećim setom alata	147
Slika 8.36: Ocene ispitivanja za parametar oštećenja papira oko elemenata uzoraka utisnutih četvrtim setom alata	148
Slika 8.37: Ocene ispitivanja za parametar ukupnog kvaliteta uzoraka utisnutih prvim setom alata	149
Slika 8.38: Ocene ispitivanja za parametar ukupnog kvaliteta uzoraka utisnutih drugim setom alata	149
Slika 8.39: Ocene ispitivanja za parametar ukupnog kvaliteta uzoraka utisnutih trećim setom alata	150
Slika 8.40: Ocene ispitivanja za parametar ukupnog kvaliteta uzoraka utisnutih četvrtim setom alata	151
Slika 8.41: Izgled alata za testiranje otpornosti na oštećenja a) matrica, b) patrica i c) izgled utisnutih elemenata na papiru posle 25. utiskivanja	152
Slika 8.42: Mikroskopski snimci najsitnijeg elementa dužine 2 mm posle 25, 50, 100, 200, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000-og utiskivanja urađeni digitalnim USB mikroskopom ViTiny VT300. Zaokružene su vidljive promene na ivicama alata	152
Slika 8.43: Skenirani snimci elementa dužine 4 mm posle 25, 50, 100, 200, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000-og utiskivanja. Zaokružene su vidljive promene na ivicama utisnutih elemenata	153
Slika 9.1: Prikaz skeniranih uzoraka papira utisnutih konvencionalnim alatom (a, c, e, g) i alatima izrađenim FDM tehnikom 3D štampe (b, d, f, h)	170
Slika 9.2: Deformacija u donjem delu alata za utiskivanje izrađenog FDM tehnikom 3D štampe – mogući uzrok neujednačene visine utisnutih elemenata	171
Slika 9.3: Prikaz skeniranog uzoraka papira utisnutog alatom izrađenim SLA tehnikom 3D štampe	172

## SPISAK GRAFIKA

Grafik 8.1: Krive napon-izduženje sa različitim smerom vlakana kod nepremaznog papira gramature 80 g/m <sup>2</sup>	89
Grafik 8.2: Krive napon-izduženje sa različitim smerom vlakana kod nepremaznog papira gramature 100 g/m <sup>2</sup>	89
Grafik 8.3: Krive napon-izduženje sa različitim smerom vlakana kod nepremaznog papira gramature 120 g/m <sup>2</sup>	90
Grafik 8.4: Krive napon-izduženje sa različitim smerom vlakana kod nepremaznog papira gramature 140 g/m <sup>2</sup>	90
Grafik 8.5: Krive napon-izduženje sa različitim smerom vlakana kod ofset papira gramature 170 g/m <sup>2</sup>	91
Grafik 8.6: Krive napon-izduženje sa različitim smerom vlakana kod premaznog papira gramature 130 g/m <sup>2</sup>	92
Grafik 8.7: Krive napon-izduženje sa različitim smerom vlakana kod premaznog papira gramature 150 g/m <sup>2</sup>	92
Grafik 8.8: Krive napon-izduženje sa različitim smerom vlakana kod premaznog papira gramature 170 g/m <sup>2</sup>	93
Grafik 8.9: Krive napon-izduženje sa različitim smerom vlakana kod premaznog papira gramature 200 g/m <sup>2</sup>	93
Grafik 8.10: Krive napon-izduženje sa različitim smerom vlakana kod voluminoznog papira gramature 60 g/m <sup>2</sup>	95
Grafik 8.11: Krive napon-izduženje sa različitim smerom vlakana kod voluminoznog papira gramature 70 g/m <sup>2</sup>	95
Grafik 8.12: Krive napon-izduženje sa različitim smerom vlakana kod voluminoznog papira gramature 80 g/m <sup>2</sup>	96
Grafik 8.13: Uticaj glavnih efekata S/N (Signal to Noise) odnosa na zateznu čvrstoću	97
Grafik 8.14: Uticaj glavnih efekata S/N (Signal to Noise) odnosa na površinsku hrapavost	98
Grafik 8.15: Uticaj glavnih efekata S/N (Signal to Noise) odnosa na vreme	99
Grafik 8.16: Uticaj glavnih efekata S/N (Signal to Noise) odnosa na masu	100
Grafik 8.17: Primer površinske hrapavosti uzorka za Test #7 (0,2mm; 60%; diam; 3)	102
Grafik 8.18: Uticaj glavnih efekata S/N (Signal to Noise) odnosa na zateznu čvrstoću	102
Grafik 8.19: Uticaj glavnih efekata S/N (Signal to Noise) odnosa na površinsku hrapavost	103
Grafik 8.20: Uticaj glavnih efekata S/N (Signal to Noise) odnosa na vreme	104
Grafik 8.21: Uticaj glavnih efekata S/N (Signal to Noise) odnosa na masu	105
Grafik 8.22: Primer površinske hrapavosti uzorka za Test #7 (1mm, 0°; 90 mm/s; 225 °C)	107
Grafik 8.23: a) Kriva napon-izduženje uzoraka od PLA materijala i b) kriva napon-izduženje uzoraka od ABS materijala	108
Grafik 8.24: Srednje vrednosti zatezne čvrstoće ABS i PLA uzoraka na krivoj napon-izduženje	110
Grafik 8.25: Sila prelaza iz elastične u plastičnu oblast sa standardnim devijacijama, dobijene nakon testa za određivanje pritiskne čvrstoće za ABS i PLA termoplastične materijale	110
Grafik 8.26: Kriva napon-izduženje za uzorke od PLA materijala pri različitim temperaturama	113
Grafik 8.27: Kriva napon-izduženje za uzorke od ABS materijala pri različitim temperaturama	114
Grafik 8.28: Krive srednjih vrednosti zatezne čvrstoće uzoraka od PLA i ABS materijala	114
Grafik 8.29: Uticaj temperature okoline na izduženje uzoraka od PLA i ABS materijala štampanih FDM tehnikom štampe	115
Grafik 8.30: Srednje vrednosti pritiskne čvrstoće pri različitim temperaturama za oba materijala	117
Grafik 8.31: Kriva napon-izduženje za različito tretirane uzorke od PLA materijala	119
Grafik 9.1: Poređenje srednjih vrednosti sa prikazom standardnih devijacija za a) zateznu čvrstoću, b) izduženje i c) Modul elastičnosti uzoraka štampanih FDM tehnikom 3D štampe iz ovog eksperimenta sa rezultatima prikupljenim iz literaturnih izvora	163

## SPISAK TABELA

Tabela 3.1: Primer ortogonalnog L9 nacrta	31
Tabela 7.1: Karakteristike papira korišćenih u eksperimentu	41
Tabela 7.2: Karakteristike mašine za rezanje naslaga materijala Perfecta 76 HTVC	42
Tabela 7.3: Karakteristike uređaja za testiranje zatezne čvrstoće materijala Shimadzu Compact Tabletop Testing EZ-LX	43
Tabela 7.4: Karakteristike polimera od polilaktične kiseline - PLA	43
Tabela 7.5: Kodiran Tagučijev L9 nacrt i Tagučijev L9 nacrt sa uvrštenim vrednostima nivoa uticajnih faktora za oba bloka eksperimenta	46



Tabela 7.6: Karakteristike MakerBot Replicator 5th Generation FDM štampača	47
Tabela 7.7: Karakteristike uređaja za merenje površinske hrapavosti TR200 - Time Group Inc, China	48
Tabela 7.8: Karakteristike digitalne tehničke vage Radwag PS 211/C2	48
Tabela 7.9: Karakteristike FDM štampača MakerBot Replicator 2x	50
Tabela 7.10: Podešavanja parametara FDM štampača MakerBot Replicator 5th Generation i Replicator 2x	50
Tabela 7.11: Karakteristike mikroskopa Leitz Orthoplan	52
Tabela 7.12: Karakteristike USB digitalnog mikroskopa Veho VMS-004D	53
Tabela 7.13: Karakteristike Testo 735-2 – Višekanalnog termometra	56
Tabela 7.14: Karakteristike termalne kamere Fluke TiS45	57
Tabela 7.15: Karakteristike digitalnog USB mikroskopa ViTiny VT-300	61
Tabela 7.16: Karakteristike uređaja za izradu filmova Laser Imagesetter Ultrre 5400	63
Tabela 7.17: Maksimalne brzine osvetljavanja filma na uređaju Laser Imagesetter Ultrre 5400	64
Tabela 7.18: Karakteristike uređaja za osvetljavanje ploča Rectoplan Duplomat	64
Tabela 7.19: Karakteristike SLA štampača FormLabs Form	73
Tabela 7.20: Konačna podešavanja vrednosti osam testiranih parametara za štampu alata za utiskivanje izrađenih FDM tehnikom štampe	74
Tabela 7.21: Parametri štampe SLA štampača FormLabs Form 2 za štampu alata za utiskivanje	75
Tabela 7.22: Karakteristike ravnog skenera Canon CanoScan 5600F korišćenog za digitalizaciju utisnutih uzoraka	77
Tabela 7.23: Karakteristike kabineta za posmatranje - Agile Radiant Controlled Light 5	84
Tabela 8.1: Srednje vrednosti zatezne čvrstoće i istezanja za nepremazne papire	88
Tabela 8.2: Srednje vrednosti zatezne čvrstoće i istezanja za premazne mat papire	91
Tabela 8.3: Srednje vrednosti zatezne čvrstoće i istezanja za voluminozne papire	94
Tabela 8.4: Rezultati analize uticaja testiranih faktora na srednje vrednosti zatezne čvrstoće sa dodeljenim vrednostima ranga za svaki faktor	97
Tabela 8.5: Rezultati analize uticaja testiranih faktora na srednje vrednosti površinske hrapavosti sa dodeljenim vrednostima ranga za svaki faktor	98
Tabela 8.6: Rezultati analize uticaja testiranih faktora na srednje vrednosti vremena štampe sa dodeljenim vrednostima ranga za svaki faktor	99
Tabela 8.7: Rezultati analize uticaja testiranih faktora na srednje vrednosti mase pojedinačnog uzorka sa dodeljenim vrednostima ranga za svaki faktor	100
Tabela 8.8: Optimalne kombinacije nivoa za svaku izlaznu promenjivu posebno dobijene analizom Tagučijevog L9 nacрта	100
Tabela 8.9: Važnost uticaja ulaznih faktora na svaku od izlaznih promenjivih	101
Tabela 8.10: Rezultati frakcionalnog rangiranja kombinacija nivoa faktora definisanih L9 Tagučijevim ortogonalnim nizom	101
Tabela 8.11: Rezultati analize uticaja testiranih faktora na srednje vrednosti zatezne čvrstoće pojedinačnog uzorka sa dodeljenim vrednostima ranga za svaki faktor	103
Tabela 8.12: Rezultati analize uticaja testiranih faktora na srednje vrednosti površinske hrapavosti pojedinačnog uzorka sa dodeljenim vrednostima ranga za svaki faktor	104
Tabela 8.13: Rezultati analize uticaja testiranih faktora na srednje vrednosti vremena štampe pojedinačnog uzorka sa dodeljenim vrednostima ranga za svaki faktor	104
Tabela 8.14: Rezultati analize uticaja testiranih faktora na srednje vrednosti mase pojedinačnog uzorka sa dodeljenim vrednostima ranga za svaki faktor	105
Tabela 8.15: Optimalne kombinacije nivoa za svaku izlaznu promenjivu posebno dobijene analizom Tagučijevog L9 nacрта	106
Tabela 8.16: Važnost uticaja ulaznih faktora na svaku od izlaznih promenjivih	106
Tabela 8.17: Rezultati frakcionalnog rangiranja kombinacije nivoa faktora definisanih L9 Tagučijevim ortogonalnim nizom	106
Tabela 8.18: Rezultati frakcionalnog rangiranja kombinacija nivoa faktora drugog bloka definisanih L9 Tagučijevim ortogonalnim nizom	107
Tabela 8.19: Mehaničke osobine uzoraka od PLA i ABS materijala štampanih FDM tehnikom 3D štampe	108
Tabela 8.20: Mehaničke osobine uzoraka od ABS materijala nakon testa za određivanje pritiskne čvrstoće	111
Tabela 8.21: Mehaničke osobine uzoraka od PLA materijala nakon testa za određivanje pritiskne čvrstoće	111

Tabela 8.22: Rezultati testiranja zatezne čvrstoće štampanih uzoraka od PLA i ABS materijala pri različitim vrednostima temperature	112
Tabela 8.23: Rezultati testa pritiskne čvrstoće kod uzoraka od PLA i ABS materijala štampanih FDM tehnikom štampe pri promeni temperature okoline	117
Tabela 8.24: Srednje vrednosti izmerenih dimenzija uzoraka od PLA materijala štampanih FDM tehnikom 3D štampe pre i posle završne obrade	118
Tabela 8.25: Izmerene stvarne vrednosti elemenata alata štampanog FDM tehnikom 3D štampe	132
Tabela 8.26: Izmerene vrednosti elemenata alata štampanog FDM tehnikom 3D štampe nakon korigovanog 3D modela	133
Tabela 8.27: Vrednosti intenziteta nijanse sive delova slike pod senkom i van senke kao i razlika tih vrednosti za prvi set alata	134
Tabela 8.28: Vrednosti intenziteta nijanse sive delova slike pod senkom i van senke kao i razlika tih vrednosti za drugi set alata	135
Tabela 8.29: Vrednosti intenziteta nijanse sive delova slike pod senkom i van senke kao i razlika tih vrednosti za treći set alata	136
Tabela 8.30: Vrednosti intenziteta nijanse sive delova slike pod senkom i van senke kao i razlika tih vrednosti za četvrti set alata	137
Tabela 8.31: Vrednosti intenziteta nijanse sive delova slike pod senkom i van senke kao i razlika tih vrednosti kod uzoraka utisnutih alatom izrađenog SLA tehnikom 3D štampe	138
Tabela 8.32: Šest odabranih uzoraka utisnutih alatom za testiranje otpornosti na habanje i redni broj utiskivanja svakog od njih prikazivan ispitanicima	154
Tabela 8.33: Odgovori ispitanika koji su uočili razliku između utisnutih uzoraka	154
Tabela 10.1: Uporedni prikaz potrebnog prostora (za postavku mašina, uređaja i repromaterijala), vremena izrade alata za utiskivanje, kompleksnosti procesa, troškova materijala i potencijalnog štetnog uticaja na čoveka i njegovu životnu sredinu, za obe tehnike proizvodnje	178

## SPISAK PRILOGA

Prilog P1 - Karakterizacija papirnih materijala za utiskivanje	196
Prilog P2 - Karakterizacija procesnih parametara FDM tehnike 3D štampe	201
Prilog P3 - Istraživanje uticaja završne obrade uzoraka proizvedenih FDM tehnikom 3D štampe na površinsku hrapavost, zateznu čvrstoću i promenu dimenzija finih detalja za utiskivanje	223
Prilog P4 - Metoda analize slika digitalizovanih uzoraka utisnutih elemenata	226

## SPISAK SKRAĆENICA

**ABS** - Acrylonitrile Butadiene Styrene

**AM** – Additive Manufacturing

**ANOVA** - Analysis of Variance

**ASTM** - American Society for Testing and Materials

**BMP** - Bitmap image

**CAD** – Computer Aided Design

**CD** – Cross-machine Direction

**CNC** - Computer Numerical Control

**DLP** - Digital Light Processing

**DMA** - Dynamic Mechanical Analysis

**DMTA** - Dynamic Mechanical Thermal Analysis

**DOE** – Design Of Experiment

**DSC** - Differential Scanning Calorimetry

**FDM** – Fused Deposition Modelling

**HSP** - Hansen Solubility Parameter

**ISO** - International Organization for Standardisation

**MD** – Machine Direction

**OMMT** - Organo-montmorillonite

**PC** - Polycarbonate

**PEEK** - Polyether Ether Ketone

**PET** - Polyethylene terephthalate

**PLA** - Polylactic Acid

**PP** - Polypropylene

**PS** - Polystyrene

**RP** – Rapid Prototyping

**S/N** – Signal to Noise ratio

**SLA** – Stereolithography Apparatus

**STL** – Stereolithography

**TAPPI** - Technical Association of the Pulp and Paper Industry

**TGA** - Thermogravimetric Analysis

**TIFF** - Tagged Image File Format

**UV** – Ultraviolet

# SADRŽAJ

REZIME .....	i
ABSTRACT.....	ii
SPISAK SLIKA.....	iii
SPISAK GRAFIKA .....	vii
SPISAK TABELA .....	vii
SPISAK PRILOGA .....	x
SPISAK SKRAĆENICA.....	xi
SADRŽAJ.....	0
1. UVOD .....	1
2. OBRAZLOŽENJE O POTREBAMA ISTRAŽIVANJA.....	3
3. PROCES UTISKIVANJA I FAKTORI KOJI UTIČU NA KVALITET REZULTATA UTISKIVANJA .....	4
3.1 Oplemenjivanje proizvoda grafičke proizvodnje utiskivanjem .....	4
3.2 Papirne podloge za utiskivanje.....	7
3.2.1 Vrsta papira.....	7
3.2.2 Mehaničke osobine .....	8
3.2.3 Vlažnost papira.....	8
3.2.4 Hemijski sastav.....	9
3.2.5 Unutrašnja struktura .....	9
3.2.6 Oštećenje papira .....	9
3.3 Alati za utiskivanje papirnih materijala.....	10
3.3.1 Konvencionalne metode izrade alata za utiskivanje.....	10
3.3.2 Tehnike 3D štampe u grafičkoj proizvodnji.....	12
3.3.3 Metode za ispitivanje mehaničkih osobina materijala korišćenih u tehnikama 3D štampe .....	20
3.4 Radni parametri utiskivanja .....	21
4. AKTUELNO STANJE U OBLASTI ISTRAŽIVANJA TEHNIKA 3D ŠTAMPE .....	23
4.1 Ispitivanja mehaničkih karakteristika delova dobijenih FDM tehnikom 3D štampe .....	23
4.2 Ispitivanja termo-mehaničkih karakteristika delova izrađenih FDM tehnikom 3D štampe.....	25
4.3 Uticaj završne obrade (post-processing) na karakteristike delova dobijenih FDM tehnikom 3D štampe .....	27
4.4 Uticajni faktori na proizvodnju objekata FDM tehnikom 3D štampe .....	30
4.5 Primena tehnika 3D štampe u industrijskoj proizvodnji .....	33
4.6 Istraživanja u oblasti grafičke proizvodnje .....	35
4.7 Efekti primene tehnika 3d štampe na životnu sredinu.....	36
4.7.1 Konvencionalne metode izrade alata za utiskivanje na papirnim podlogama.....	36
4.7.2 Aditivne tehnologije izrade alata za utiskivanje na papirnim podlogama.....	37
5.PREDMET, PROBLEM I CILJ ISTRAŽIVANJA .....	38
6. HIPOTEZE.....	39

7. MATERIJALI I METODOLOGIJA.....	40
7.1 Plan istraživanja .....	40
7.2 Karakterizacija papirnih materijala za utiskivanje.....	41
7.3 Karakterizacija procesnih parametara FDM tehnike 3D štampe .....	43
7.4 Ponovljivost mehaničkih osobina uzoraka izrađenih FDM tehnikom štampe .....	49
7.5 Termo-mehaničke osobine uzoraka izrađenih FDM tehnikom štampe .....	54
7.6 Istraživanje uticaja završne obrade uzoraka dobijenih FDM tehnikom 3D štampe na površinsku hrapavost, zateznu čvrstoću i promenu dimenzija finih detalja za utiskivanje .....	58
7.7 Izrada alata za utiskivanje .....	62
7.7.1 Izrada alata za utiskivanje konvencionalnom tehnikom hemijskog nagrizanja.....	62
7.7.2 Izrada alata za utiskivanje FDM tehnikom 3D štampe .....	66
7.8 Istraživanje promena dimenzija uzoraka izrađenih FDM tehnikom u odnosu na zadati računarski model .....	70
7.9 Izrada alata za utiskivanje FDM i SLA tehnikom 3D štampe .....	71
7.10 Utiskivanje papirnih materijala alatima sa reprezentativnim elementima .....	75
7.10.1 Utvrđivanje odgovarajućeg pritiska za utiskivanje .....	75
7.10.2 Utiskivanje papira utvrđenim pritiscima iz prve faze eksperimenta .....	83
7.11 Ispitivanje otpornosti alata za utiskivanje na habanje pri korišćenju.....	85
8. REZULTATI .....	88
8.1 Karakterizacija papirnih materijala za utiskivanje.....	88
8.2 Karakterizacija procesnih parametara FDM tehnike 3D štampe .....	96
8.3 Ponovljivost mehaničkih osobina uzoraka izrađenih FDM tehnikom štampe .....	107
8.3.1 Merenje zatezne čvrstoće.....	107
8.3.2 Merenje pritisne čvrstoće .....	110
8.4 Termo-mehaničke osobine uzoraka izrađenih FDM tehnikom štampe .....	111
8.4.1 Zatezna čvrstoća pri različitim temperaturama .....	112
8.4.2 Pritisna čvrstoća pri različitim temperaturama .....	116
8.5 Istraživanje uticaja završne obrade uzoraka proizvedenih FDM tehnikom 3D štampe na površinsku hrapavost, zateznu čvrstoću i promenu dimenzija finih detalja za utiskivanje .....	117
8.6 Izrada alata za utiskivanje FDM tehnikom 3D štampe – Definisane elementa.....	120
8.7 Istraživanje promena dimenzija uzoraka izrađenih FDM tehnikom u odnosu na zadati računarski model .....	131
8.8 Utiskivanje papirnih materijala alatima sa reprezentativnim elementima .....	133
8.8.1 Utvrđivanje odgovarajućeg pritiska za utiskivanje .....	133
8.8.2 Utiskivanje papira utvrđenim pritiscima iz prve faze eksperimenta .....	138
8.9 Ispitivanje otpornosti alata za utiskivanje na habanje pri korišćenju .....	151
8.9.1 Ocena otpornosti na habanje alata za utiskivanje prilikom upotrebe .....	154
9. DISKUSIJA.....	156
9.1 Karakterizacija papirnih materijala za utiskivanje.....	156
9.1.1 Uticaj smera vlakana na zateznu čvrstoću i izduženje .....	156
9.1.2 Uticaj gramature papira na zateznu čvrstoću i izduženje .....	158
9.1.3 Uticaj vrste papira na zateznu čvrstoću i izduženje.....	159

9.2 Karakterizacija procesnih parametara FDM tehnike 3D štampe .....	160
9.3 Ponovljivost mehaničkih osobina uzoraka izrađenih FDM tehnikom štampe .....	162
9.4 Termo-mehaničke osobine uzoraka izrađenih FDM tehnikom štampe .....	164
9.5 Istraživanje uticaja završne obrade uzoraka dobijenih FDM tehnikom 3D štampe na površinsku hrapavost, zateznu čvrstoću i promenu dimenzija finih detalja za utiskivanje .....	165
9.6 Izrada alata za utiskivanje FDM tehnikom 3D štampe – Definisane elementa .....	166
9.7 Istraživanje promena dimenzija uzoraka izrađenih FDM tehnikom u odnosu na zadati računarski model .....	167
9.8 Utiskivanje papirnih materijala alatima sa reprezentativnim elementima .....	168
9.8.1 Utvrđivanje odgovarajućeg pritiska za utiskivanje .....	168
9.8.2 Utiskivanje papira utvrđenim pritiscima iz prve faze eksperimenta .....	169
9.9 Ispitivanje otpornosti alata za utiskivanje na habanje.....	173
10. ZAKLJUČCI .....	175
10.1 Buduća istraživanja .....	179
11. MOGUĆNOST PRIMENE REZULTATA U PROIZVODNJI .....	180
12. LITERATURA.....	181
13. PRILOZI .....	196
Prilog P1 - Karakterizacija papirnih materijala za utiskivanje .....	196
Prilog P2 - Karakterizacija procesnih parametara FDM tehnike 3D štampe .....	201
Prilog P3 - Istraživanje uticaja završne obrade uzoraka proizvedenih FDM tehnikom 3D štampe na površinsku hrapavost, zateznu čvrstoću i promenu dimenzija finih detalja za utiskivanje .....	223
Prilog P4 - Metoda analize slika digitalizovanih uzoraka utisnutih elemenata .....	226
14. BIOGRAFIJA SA BIBLIOGRAFIJOM.....	235

## 1. UVOD

Specijalne tehnike oplemenjivanja utiskivanjem sa i bez folije čine neizostavni deo velikog broja grafičkih proizvoda. Od korica, omota za knjige, vizit kartica, pozivnica do ukrasnih omota i ambalaže, tehnike oplemenjivanja doprinose boljem vizuelnom doživljaju koji utiče na donošenje odluke o kupovini određenog proizvoda. Pored estetske funkcije, proizvodi oplemenjeni na ovaj način, mogu imati i informativnu funkciju u slučaju Brajevog pisma, taktilnih slika i tekstualnih elemenata namenjenih za osobe sa poremećajem vida. Proces utiskivanja možemo opisati kao proces pri kojem se vrši permanentna promena oblika površine materijala pomoću alata za utiskivanje upotrebom sile pritiska, u cilju formiranja udubljenih ili ispupčenih elemenata. Alati za utiskivanje se sastoje iz patrice (forme) i matrice (kontra-forme) ili u nekim slučajevima samo iz patrice. Matrica sadrži udubljenu sliku, a patrica ispupčenu sliku elemenata za utiskivanje. Materijal za utiskivanje (papir, karton, koža, plastika,...) prolazi između patrice i matrice, čijim se međusobnim uklapanjem vrši utiskivanje.

Alati za utiskivanje se izrađuju konvencionalnim tehnikama, obrade metala rezanjem ili tehnikama hemijskog nagrizanja. Prednost alata izrađenih ovim tehnikama je u njihovoj otpornosti na habanje i visokoj preciznosti izrađenih elemenata. Konvencionalni alati za utiskivanje su u stanju da izdrže i milionske tiraže, pogotovo ako je reč o mesinganim ili čeličnim alatima. Alati od magnezijuma podnose tiraže i do 150.000 utiskivanja bez oštećenja. Međutim, navedene konvencionalne tehnike podrazumevaju prostor za skladištenje repromaterijala, mašina, uređaja, kao i odlaganje otpada nastalog u procesu proizvodnje (strugotina, hemikalija,...). Često ovakvi načini izrade alata nisu pogodni za životnu i radnu sredinu čoveka.

U grafičkoj proizvodnji se može uočiti trend smanjenja tiraža i potražnje za proizvodima personalizovanog sadržaja sa mogućnošću brze izmene posla, što često zahteva od proizvođača sposobnost da zaokruži ceo proces proizvodnje na jednom mestu. U personalizovanoj proizvodnji, alati za utiskivanje ne moraju proizvoditi velike tiraže, pa se javlja potreba za novim materijalima i tehnikama proizvodnje alata za utiskivanje. Od ovakvih alata se zahteva jednostavna izrada, niža cena proizvodnje i zadovoljavanje svih potrebnih kriterijuma u procesu utiskivanja (visoka preciznost izrade alata, dobre mehaničke i fizičke karakteristike, lakoća izrade i smanjeno vreme i cena proizvodnje). Sve je veći broj proizvođača grafičkih materijala i opreme koji u svoj proizvodni lanac uključuju i neke od tehnika 3D štampe. Ideja ovog rada je da se istraži mogućnost zamene konvencionalne tehnike izrade alata za utiskivanje tehnikama aditivne proizvodnje, odnosno popularno nazivanim, tehnikama 3D štampe. Tehnike aditivne proizvodnje (engl. *additive manufacturing* - AM) se odnose na proces proizvodnje 3D objekata dodavanjem materijala u sukcesivnim slojevima. Do nedavno, ove tehnike su se koristile samo za izradu prototipova, međutim poslednjih godina pronalaze upotrebu u industrijskoj proizvodnji. Usavršavanje tehnologije i sve veća dostupnost ovih tehnika, omogućava njihovu upotrebu u oblasti edukacije, kao i u domaćinstvima za personalizovanu proizvodnju.

Jedna od najzastupljenijih tehnika 3D štampe je tehnika deponovanja istopljenog materijala (engl. *material extrusion*), poznata još pod nazivom FDM (engl. *Fused Deposition Modeling*). Ovu tehniku karakteriše jednostavan princip rada, jednostavna konstrukcija štampača, mogućnost upotrebe različitih materijala i niska nabavna cena u odnosu na ostale tehnike štampe. Upotreba biorazgradivih termoplastičnih materijala poput polilaktične kiseline – PLA, dobijenih od prirodnih sirovina, omogućava izradu alata za utiskivanje koji se mogu reciklirati ili u kratkom periodu biološki razgraditi, čime se uticaj na životnu sredinu smanjuje. Nedostatak ove tehnike štampe je ograničena preciznost izrađenih delova i potreba za naknadnom završnom obradom



kako bi se dobile što finije površine bez vidljivih niti, deponovanih u toku izrade. Ograničena preciznost dimenzija alata za utiskivanje, izrađenih FDM tehnikom štampe, se može kompenzovati karakterizacijom faktora širenja materijala nakon topljenja i deponovanja na platformi za štampu i modifikacijom 3D modela na osnovu te karakterizacije. Finoću površina alata moguće je poboljšati upotrebom metoda završne obrade FDM štampanih uzoraka od PLA materijala. Nedovoljna istraženost ove oblasti, otvara mogućnost, ali i neophodnost produbljivanja znanja vezanih za uticaj završne obrade na finoću površina i mehaničke osobine štampanih uzoraka.

Poznato je da u procesu proizvodnje FDM tehnikom štampe, na izlazni kvalitet izrađenih alata za utiskivanje utiču mnogobrojni parametri, kao što su: vrsta materijala, debljina deponovanih slojeva, vrsta i procenat unutrašnje popune, broj konturnih zidova, temperatura dizne u glavi štampača, brzina kretanja glave za štampu, orijentacija deponovanih niti i objekta na platformi za štampu. Ovi parametri i njihov uticaj na mehaničke, termalne i fizičke osobine izrađenih uzoraka detaljno su istraženi u ovoj disertaciji. Alati za utiskivanje izrađeni FDM tehnikom 3D štampe neophodno je da poseduju dobre mehaničke osobine, smanjenu površinsku hrapavost, mogućnost precizne izrade sitnih elemenata, kao i smanjeno vreme proizvodnje i količine potrošenog materijala, kako bi se njihova upotreba opravdala. Neophodno je odrediti i koje tiraže je moguće ostvariti alatima izrađenim FDM tehnikom štampe bez oštećenja alata i ujednačenim rezultatima utiskivanja na različitim papirnim materijalima.

Pri karakterizaciji proizvodnih parametara alata za utiskivanje izrađenih FDM tehnikom štampe, upotrebljena je jedna od najčešće korišćenih metoda - Tagučić metoda dizajna nacrtu eksperimenta, čijom se upotrebom smanjuje broj potrebnih eksperimenata, odnosno vreme i potrebni troškovi za izradu eksperimentalnih uzoraka. Kao rezultat ove metode ulazne promenjive se rangiraju po važnosti uticaja na vrednost odabrane izlazne promenjive. Pregledom literaturnih navoda, nisu obuhvaćeni svi ulazni parametri, niti je praćen uticaj na izlazne promenjive kao što je vreme štampe i količina potrošenog materijala. U ovoj disertaciji, najuticajniji parametri na mehaničke i fizičke osobine definisani u literaturnim izvorima, prošireni su uvođenjem dodatne ulazne promenjive (broj završnih slojeva) i dve izlazne promenjive (vreme štampe i količina potrošenog materijala) u cilju detaljnije karakterizacije proizvodnih parametara izrade alata tehnikom FDM štampe.

Rezultati stečeni ovim radom doprinose detaljnoj analizi uticajnih parametara FDM tehnike 3D štampe na proces i kvalitet izrade alata za utiskivanje. Primenom usvojenih principa izrađen je i probni alat za utiskivanje tehnikom polimerizacije tečnog polimera (vat fotopolimerizacija) kao primer mogućnosti primene razvijene metodologije na druge tehnike 3D štampe. Rezultatima dobijenim ovim radom stiče se detaljnija slika o uticajnim parametrima, njihovoj karakterizaciji i potencijalnom načinu upotrebe u drugim oblastima grafičke proizvodnje.

## 2. OBRAZLOŽENJE O POTREBAMA ISTRAŽIVANJA

Nakon pregleda i analize istraživanja koja se bave optimizacijom procesa FDM tehnike aditivne proizvodnje, hrapavošću i vizuelnim izgledom površine odštampanih modela, mehaničkim osobinama modela, karakteristikama korištenih materijala i istraživanjima vezanih za štetnost hemikalija koje se koriste u procesu hemijskog nagrivanja metala (Perez-Ramirez, 2003; Feng i saradnici, 2008), javlja se potreba za istraživanjima usmerenim direktno na upotrebu ove tehnike u polju izrade alata za utiskivanje u grafičkoj proizvodnji. Konvencionalna tehnika hemijskog nagrivanja metala za izradu alata za utiskivanje stvara nusproizvode koje je potrebno propisno odložiti i/ili reciklirati. U velikom broju slučajeva iskorišćene hemikalije se odlažu u kanalizaciju ili zemljište što štetno deluje na životnu sredinu. Takođe nekontrolisan rad sa ovim hemikalijama ima štetnog uticaja na radno okruženje, pa je neophodno istražiti mogućnost zamene tehnike hemijskog nagrivanja nekom od tehnika 3D štampe.

Tehnika deponovanja istopljenog materijala – FDM je jedna od tehnika aditivne proizvodnje, koja koristi termoplastične materijale kao sirovinu. Ova tehnika 3D štampe se upotrebljava kako za industrijsku proizvodnju tako i za personalnu upotrebu. Obzirom na jednostavnost i pristupačnost, posebna pažnja u okviru istraživanja biće posvećena ovoj tehnici štampe. Bitan razlog za upotrebu ove tehnike je i mogućnost štampanja biorazgradivim materijalom kao što je PLA. Površine objekata dobijenih ovom tehnikom imaju veću hrapavost u poređenju sa ostalim AM tehnikama, pa ukoliko se pokaže da su rezultati utiskivanja zadovoljavajući, može se pretpostaviti da će i ostale AM tehnike proizvodnje zadovoljiti kriterijume za izradu alata za utiskivanje. U okviru istraživanja planirana je izrada alata i drugim tehnikama 3D štampe, a zatim poređenje osobina alata i rezultata utiskivanja tim alatima. S obzirom da se kvalitet izrade alata tehnikama aditivne proizvodnje poslednjih godina sve više povećava, a oblast primene se pomera sa razvoja prototipova na industrijsku proizvodnju funkcionalnih alata, sve je veća potreba za uključivanjem ovih tehnika u procese grafičke proizvodnje.

Još jedan od razloga za potrebama ovog istraživanja je nedovoljan broj definisanih standarda u oblasti tehnika aditivne proizvodnje. Postojanje mnoštva uticajnih parametara u tehnikama aditivne proizvodnje otežava rešavanje ovog problema. Urađen je značajan broj istraživanja uticajnih parametara različitih tehnika 3D štampe, ali nisu obuhvaćeni svi parametri, pogotovo oni za koje se u toku preliminarnih istraživanja pokazalo da imaju uticaj na izradu alata za utiskivanje. Jedan od njih je ulazni parametar broja završnih slojeva FDM štampanih alata. Takođe, nedovoljno radova je urađeno i u oblasti istraživanja uticaja završne obrade na kvalitet uzoraka od PLA materijala štampanih FDM tehnikom štampe, što je ovom disertacijom takođe obuhvaćeno.

Nepostojanje metodologije izrade alata za utiskivanje tehnikama aditivne proizvodnje još je jedan od razloga za ovo istraživanje. Unapređenjem procesa izrade alata za utiskivanje i definisanjem metodologije karakterizacije uticajnih parametara tehnika 3D štampe javlja se sve veća potreba za njihovim uključivanjem u procese grafičke proizvodnje. Karakterizacijom proizvodnih parametara alata za utiskivanje izrađenih tehnikama aditivne proizvodnje u značajnoj meri se može odgovoriti zahtevima trenutnog tržišta, u isto vreme smanjujući troškove i vreme pripreme i proizvodnje alata.

Doprinos ovog istraživanja je u produblivanju znanja primene aditivnih tehnika, odnosno 3D štampe u procesima grafičke proizvodnje. Grafička industrija se sve češće suočava sa potrebama personalizovane proizvodnje i značajno manjim tiražima. Integracija 3D štampe u proizvodni proces pruža nove mogućnosti kako bi upravo ove potrebe tržišta bile što efikasnije zadovoljene.

## 3. PROCES UTISKIVANJA I FAKTORI KOJI UTIČU NA KVALITET REZULTATA UTISKIVANJA

### 3.1 Oplemenjivanje proizvoda grafičke proizvodnje utiskivanjem

Oplemenjivanje proizvoda pripada završnoj fazi grafičkog procesa - završnoj grafičkoj obradi. U ovoj fazi proizvodu se dodaju određene funkcije ili se vrši promena same forme (Kipphan, 2001).

Operacije preoblikovanja čine značajnu grupu operacija obrade materijala uključenih u završnu grafičku obradu. Zadatak preoblikovanja predstavlja promenu stanja materijala bez promene dimenzija i mase materijala koji se obrađuje. Operacije preoblikovanja se po vrsti mehaničkog opterećenja mogu podeliti na (Holik, 2013):

- operacije preoblikovanja pritiskom, gde se materijali oblikuju isključivo silama pritiska koje mogu delovati u jednoj ili u više osa;
- operacije preoblikovanja zatezanjem i pritiskom, koje uključuju obradne operacije u kombinaciji sile istezanja i pritiska;
- operacije preoblikovanja zatezanjem, pri kojima se obradni materijali prerađuju isključivo silama zatezanja u jednom ili u više osa;
- operacije preoblikovanja savijanjem, kod kojih se materijali formiraju silama savijanja;
- operacije preoblikovanja smicanjem, gde su prisutni naponi smicanja po jednoj ili više osa.

Utiskivanje je deo završne grafičke obrade i može se definisati kao proces u kom se vrši plastična deformacija oblika materijala u cilju poboljšanja vizuelnog i taktilnog doživljaja. Pored ovog, utiskivanje može imati i informativnu funkciju, u slučaju tekstualnih elemenata i taktilnih slika, mapa i pisama namenjenih za osobe sa oštećenjem vida.

Proces utiskivanja se po sledećim autorima može definisati kao:

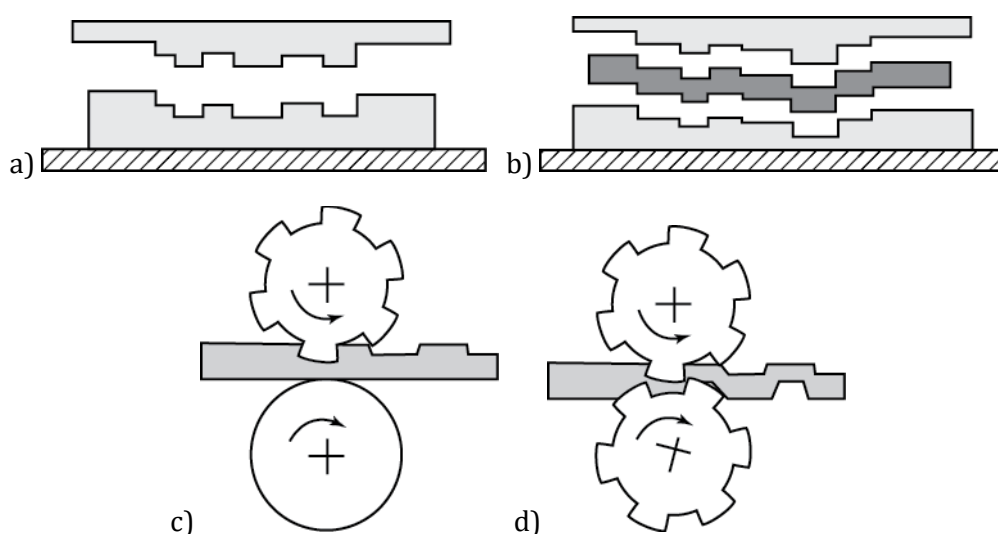
- plastična promena oblika materijala pomoću alata za utiskivanje (Kipphan, 2001);
- oblikovanje izdignute figure ili šablona na površini materijala koristeći alat za utiskivanje (Werblow, 2009);
- proces pravljenja izdignutih oblika na papiru ili nekoj drugoj ravnoj površini pomoću alata za utiskivanje (Brandtjen i Kluge, 1983);
- proces formiranja podloge za utiskivanje upotrebom pritisne sile u cilju promene njenog oblika (Wilken, 2013);
- proces u kojem se stvara udubljena ili ispupčena slika na površini kartona (Kirwan, 2013).



Slika 3.1: Oplemenjivanje papirne podloge tehnikom utiskivanja (Sharp Print Finishers, 2016; MultiGraphic Marketing, 2014; Glavny, 2017)

Konstantinović (1997) u svojoj klasifikaciji postupka za ukrašavanje korica knjige, utiskivanje deli na: *utiskivanje bez folija*, *utiskivanje sa folijama* i *na reljefno utiskivanje*. *Utiskivanje bez folije* se definiše kao ukrašavanje korica zagrejanom metalnom formom za utiskivanje pri čemu je utisnuta površina glatka, iste dubine i jednostrano deformisana. *Utiskivanje sa folijama* je definisano kao postupak utiskivanja pri čemu se upotrebom pritiska i temperature, boja ili metalni sloj odvaja od nosača folije na utisnutu površinu. *Reljefno utiskivanje* je postupak pri kome se materijal za utiskivanje nalazi između patrice i matrice. Usled povišene temperature i pritiska nastaje plastična obostrana deformacija na materijalu za utiskivanje.

Liebau i Heinze (2001) predlažu podelu utiskivanja na osnovu više parametara. Po zauzetosti površine, utiskivanje dele na delimično (engl. *partial embossing*) i utiskivanje punom površinom (engl. *full surface embossing*). Po tipu deformacije na jednostepeno (sa jednim i sa dva alata), višestepeno (sa jednim i sa dva alata) i skulpturno (nepravilnog oblika). Po prenosu boje na podlogu: bez upotrebe boje ili folije (suvi žig - engl. *blind embossing*), sa upotrebom boje ili folije. Po obliku forme alata: ravne i cilindrične forme (Slike 3.2a-d).

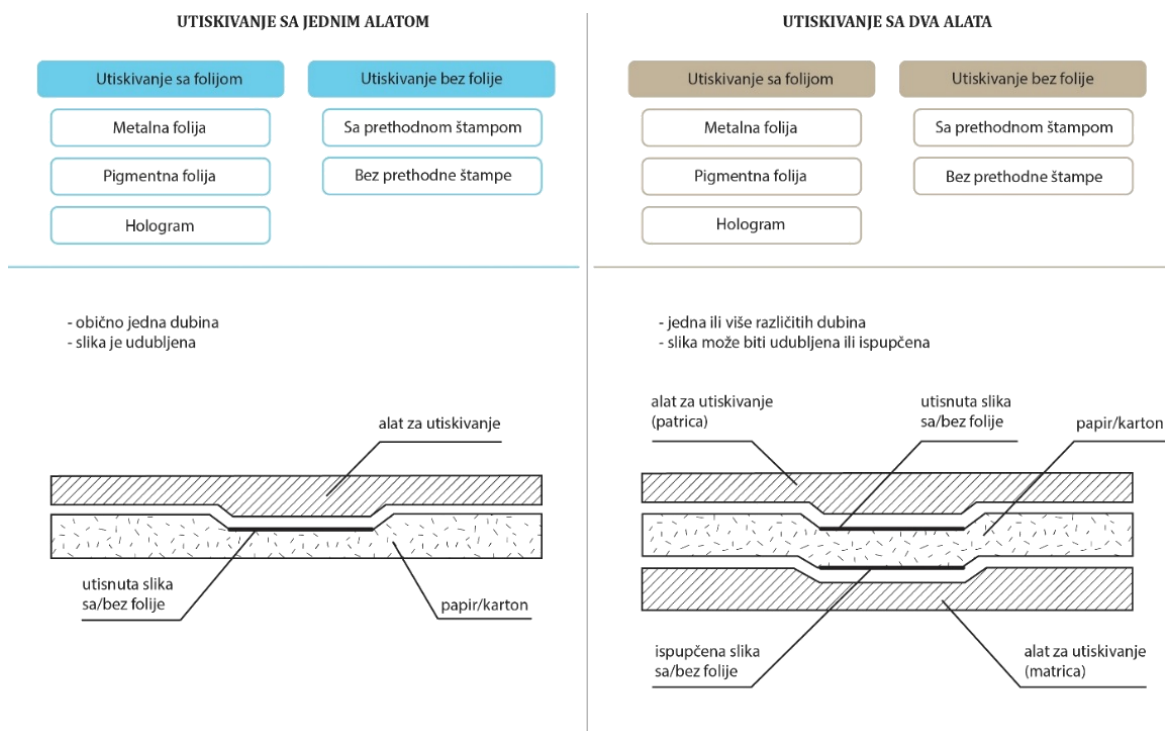


Slika 3.2: Podela alata za utiskivanje po formi alata a, b) ravni, c, d) cilindar-cilindar (Liebau & Heinze, 2008)

U sažetom uputstvu za tehnike utiskivanja (Brandtjen i Kluge, 1983) predložena je podela na: utiskivanje ispupčenih elemenata (engl. *embossing*), utiskivanje udubljenih elemenata (engl. *debossing*), utiskivanje sa folijom (engl. *foil embossing*), utiskivanje sa folijom manjeg kontrasta (engl. *pastel leaf ili tint leaf*), utiskivanje zagrejanog alata na površinu vinila i plastike (engl. *thermal diecutting*), glačanje (engl. *glazing*) i spaljivanje (engl. *scorching*). Glačanje i spaljivanje su slični procesi u kojima se koristi zagrejeni alat. U slučaju glačanja koristi se obično tamniji papir kako bi efekat uglačane utisnute površine bio istaknutiji. Kod spaljivanja se koriste više temperature alata i svetliji papiri kako bi se dobio efekat spaljenog papira i povećan kontrast.

Proizvođač papira Mohawk (2008) objavio je uputstvo za primenu utiskivanja gde navodi podelu na utiskivanje bez folije (engl. *blind embossing*), utiskivanje površine na koju je prethodno nanosena boja ili folija (engl. *registered emboss*), utiskivanje sa folijom (engl. *combo emboss*) i glačanje.

Obzirom na različite podele procesa utiskivanja iz gore navedenih izvora, predložena je klasifikacija prikazana na slici 3.3.

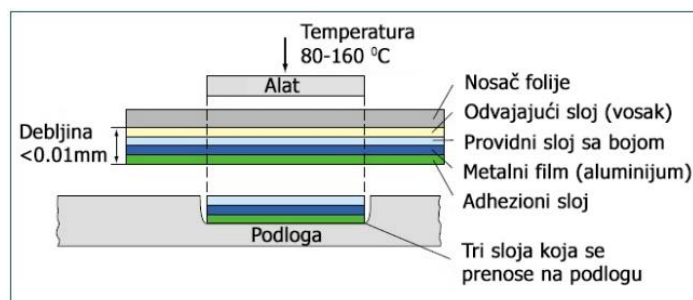


Slika 3.3: Podela tehnika utiskivanja

Kod tehnika ukrašavanja folijom, razlikuju se tehnike hladnog otiskivanja (engl. *cold foil*) i tehnike toplog otiskivanja folije (engl. *hot foil*).

Tehnika hladnog otiskivanja se može sprovesti ofset (ravnom) štampom (suvo otiskivanje) i flekso (visokom) štampom (mokro otiskivanje) (Cold Foil, 2014). U hladnom otiskivanju, folija se ne utiskuje u papir već se pomoću lepila i valjaka za presovanje prenosi na podlogu.

Tehnika toplog otiskivanja folije (zlatotisak, foliotisak) obuhvata tehnike utiskivanja folije na podlogu pri čemu se ona trajno deformiše (Slika 3.4). Ova deformacija može biti jednostrana (sa jednim alatom) ili obostrana (sa dva alata) (Konstantinović, 1997).



Slika 3.4: Tehnika hladnog otiskivanja sa folijom (Kipphan, 2001)

Na kvalitet utiskivanja utiču mnogobrojni faktori. Ove faktore generalno možemo podeliti na (Konstantinović, 1997):

- parametre podloge za utiskivanje;
- parametre alata;
- radne parametre utiskivanja.

Pre same izrade alata za utiskivanje, neophodno je znati izgled željene forme za utiskivanje. Potrebno je odrediti optimalnu veličinu elemenata na formi, količinu detalja, zazor između forme

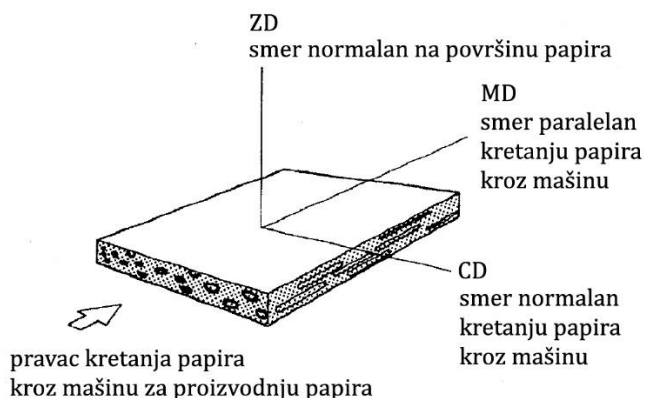
(patrice) i kontra-forme (matrice) kao i željenu dubinu elemenata alata. Preciznost elemenata, njihova veličina i veličina serije koja se želi izraditi alatom utiču na odabir materijala za alat.

Alati od mesinga i bakra su izbor za precizno utiskivanje finih elemenata i za veće tiraže, a forme od magnezijuma dobijene hemijskim nagrivanjem imaju manju čvrstoću, pa se često koriste za manje tiraže i pritiske (Konstantinović, 1997). Zazor se određuje u procesu pripreme fajlova za izradu filmova. Manji zazor će biti korišćen kod tanjih papira dok će veći zazor biti kod debljih papira, obično sa reljefnom površinom. Dubina elemenata na alatu se kontroliše u procesu hemijskog nagrivanja. Dubina nagrivanja zavisi od vremena nagrivanja, temperature nagrivanja i brzine okretanja lopatica za mešanje sredstva za nagrivanje u mašini.

Osobine podloge za utiskivanje takođe mogu uticati na kvalitet utiskivanja. Različite vrste papira zahtevaju različita podešavanja parametara alata i podešavanja radnih parametara. Ukoliko su elementi na alatu sitniji, a dubina utiskivanja veća, potrebno je obezbediti odgovarajuću čvrstoću, žilavost, tvrdoću i elastičnost papira, kako bi se postigli optimalni rezultati. Bitne osobine papira koji će se koristiti za utiskivanje su: zatezna čvrstoća, pritiska čvrstoća, deformacija prilikom istezanja, žilavost, krutost, gustina i relativna vlažnost papira (Kirwan, 2013). Ako se relativna vlažnost materijala poveća, povećava se i nepovratna deformacija (Konstantinović, 1997).

### 3.2 Papirne podloge za utiskivanje

Odabir odgovarajućeg papira za utiskivanje znatno utiče na rezultate utiskivanja. Papir za utiskivanje treba da ima osobine koje će omogućiti rezultat utiskivanja bez oštećenja, odnosno pucanja ili probijanja strukture papira. Anizotropna priroda i procenat vlage u papiru imaju značajan uticaj na mehaničke karakteristike papira. Anizotropnost je posledica orijentacije vlaknaca u toku proizvodnje papira. Na slici 3.5 prikazana je orijentacija vlakana papira: mašinski pravac papira (MD – engl. *Machine Direction*), poprečni pravac normalan na pravac kretanja papira pri proizvodnji (CD – engl. *Cross Direction*) i pravac debljine papira (ZD – engl. *Thickness Direction*). Anizotropna priroda papira utiče skoro na sve operacije preoblikovanja, pa u određenoj meri i na utiskivanje. Iz tog razloga veoma je bitno upoznati se sa osnovnim karakteristikama papira u različitim pravcima (Ek i saradnici, 2009).



Slika 3.5: Prikaz poprečnog preseka papira i orijentacija vlakana u njegovoj strukturi

#### 3.2.1 Vrsta papira

Različiti efekti se dobijaju upotrebom papira sa teksturom u poređenju sa papirom koji ima glatku površinu. Papiri sa dugačkim vlaknima se smatraju najpogodnijim za proces utiskivanja, dok su papiri male gramature sa velikom količinom premaza ili laka skloniji pucanju prilikom utiskivanja



pa ne predstavljaju dobar izbor. Dugačka vlakna u strukturi papira omogućavaju bolju deformaciju bez pucanja površine papira (McIntosh Embossing, Inc., N.D.). Povećano izduženje pri zatezanju predstavlja bitnu osobinu papira za utiskivanje kako ne bi došlo do oštećenja papira. Takođe, reciklirani papiri se izbegavaju u postupku utiskivanja zbog kraćih vlakanaca nastalih u toku reciklaže (Jezek, 2015). Vlakanca u recikliranom papiru su često dosta sabijena, pa se za utiskivanje u ovakvim papirima zahteva veća sila, što može da smanji životni vek alata (Verso corporation, 2018). Debljina papira takođe utiče na efekat dobijen utiskivanjem. Deblji papiri mogu da obezbede dublji otisak, što omogućava varijaciju u dubini utisnutih elemenata, odnosno korišćenje alata sa elementima na više nivoa (Anson, 2011). Kod utiskivanja tanjih papira, preporučljivo je koristiti alate sa elementima za utiskivanje koji imaju zaobljene ivice, kako ne bi došlo do oštećenja papira prilikom delovanja sile utiskivanja. Utiskivanje bez folije generalno pruža bolje efekte na neoslojenim papirima finije površine, jer nisu skloni pucanju ili stvaranju nabora prilikom utiskivanja. Dok se za utiskivanje bez folije često koriste neoslojeni papiri sa teksturom, za utiskivanje sa folijom bolje rezultate daje papir sa glatkom oslojenom površinom, jer u tom slučaju folija bolje prijanja za površinu (Verso corporation, 2018). Visoko reflektujuće glatke površine papira omogućavaju da sjajni ili čak holografski efekat folije više dođe do izražaja. Po navodima kompanije Mohawk (2008) oslojeni papiri se retko koriste za utiskivanje sa folijom, jer je moguće da gasovi koji se stvaraju u toku utiskivanja mogu ostati zarobljeni između folije i papira u vidu gasnih džepova. Za kombinaciju reljefnog utiskivanja i utiskivanja sa folijom, oslojeni papir mat površine pruža najbolje karakteristike za kvalitetno utiskivanje folije i izražajnije efekte (Verso corporation, 2018). Utiskivanje bez folije na neoslojenim papirima je obično manje dubine, jer površinski sloj i kraća vlakna ne dozvoljavaju veće deformacije (McIntosh Embossing, Inc., N.D.).

### 3.2.2 Mehaničke osobine

Za proces utiskivanja, jedna od bitnih i najčešće ispitivanih karakteristika papira je zatezna čvrstoća. Pored zatezne čvrstoće, značajne su još i pritisna čvrstoća, čvrstoća prilikom savijanja i trenje između papira i površina alata za utiskivanje (Kunnari i saradnici, 2007; Hauptman i Majschak, 2011; Ostlund i saradnici, 2011; Ankerfors i Lindstorm, 2011; Post i saradnici, 2011). Veliki broj istraživanja je sprovedeno u cilju razumevanja ponašanja papira prilikom uticaja sile zatezanja (Niskanen 1998; Uesaka i saradnici, 2001; Uesaka, 2005; Alava i Niskanen, 2006; Ek i saradnici, 2009). Krive napon-izduženje se koriste za karakterizaciju ponašanja papira prilikom istezanja. Pucanje papira prilikom istezanja zavisi od dosta faktora. Jedan od njih je količina elastične energije uzorka i potrebna količina energije za pokretanje linije loma. Ukoliko je količina elastične energije unutar uzorka mala ili je količina potrebne energije za pokretanje linije loma velika, zbog kratkog vremena testiranja, velike čvrstoće ili visokog sadržaja vlage, potrebno je dovesti dodatnu količinu energije u uzorak istežući ga duži vremenski period. U slučajevima povećane vlažnosti papira moguće je vršiti istezanje dosta dugo pre nego što dođe do pucanja uzorka. Iz tog razloga potrebno je meriti izduženje do momenta kad je veći deo zatezne čvrstoće izgubljen (Vishtal i Retulainen, 2012).

### 3.2.3 Vlažnost papira

Uticaj vlažnosti papira takođe je od velikog značaja na operacije preoblikovanja utiskivanjem. Sa povećanjem vlažnosti, oslabljuju se vodonične veze između vlakanaca papira, pa se time smanjuje i zatezna čvrstoća, a izduženje pri zatezanju se povećava. Snižavanjem relativne vlažnosti papira, vlakanca gube svoju prirodnu elastičnost čineći papir krtime, odnosno sklonom pucanju. Veoma je bitno obezbediti adekvatan nivo relativne vlažnosti papira kako bi se operacije preoblikovanja mogle jednostavnije obaviti (Ek i saradnici, 2009; Holik, 2013; Kirwan, 2013). Bitne osobine

papira za utiskivanje su: zatezna čvrstoća, pritisna čvrstoća, deformacija prilikom istezanja, žilavost, krutost, gustina i relativna vlažnost papira (Kirwan, 2013).

Prisustvo vlage čini da papir za utiskivanje bude mekši, menjajući krivu napon-izduženje, smanjujući modul elastičnosti i zateznu čvrstoću. Izduženje kod papira sa povećanim procentom vlažnosti je veće zbog pojačane plastične deformacije. Povećana temperatura ima sličan efekat na zateznu čvrstoću (Salmén i Back 1977; Back i Salmen, 1989). Variranjem vlažnosti i temperature papirnih materijala, moguće je povećati vrednost izduženja za približno 2 do 2,5% (Kunnari i saradnici, 2007). Voda unutar materijala se ponaša kao plastifikator, smanjujući temperaturu omekšavanja celuloze i lignina (Goring, 1963; Back i Salmen, 1982; Waterhouse 1984; Shiraishi 1991; Haslach, 2000; Alava i Niskanen, 2006). Postoje različiti podaci za optimalan procenat vlažnosti papira. Po Blechschmidt (2013) vlažnost materijala za utiskivanje treba da je u rasponu od 7 do 10%. U radu Salmén i saradnika (1984) većina papirnih materijala su u potpunosti omekšani pri vlažnosti od 6% do 8% i temperaturi od 150 °C i 180 °C. Efekat vlažnosti i temperature materijala na izduženje zavisi od strukture materijala; što je gustina materijala veća, manje je izduženje (Rhim, 2010). Vlažnost i temperatura takođe imaju pojačani efekat na stepen relaksacije papira. Relaksacija je pojava snižavanja napreznja u napregnutom elementu pri konstantnoj početnoj deformaciji (Rešković, 2013). Približno 50% napona u mokrom papiru može biti otpušteno u toku 0,5 sekundi (Kurki i saradnici, 2004; Retulainen i Salminen, 2009).

#### 3.2.4 Hemijski sastav

Hemijski sastav papira takođe utiče na zateznu čvrstoću. Izduženje pri zatezanju i zatezna čvrstoća papira sastavljenih od mehaničke pulpe je manja od papira sačinjenih od hemijske pulpe (Seth, 2005). Hemijski sastav papira utiče i na količinu vlage koja će se apsorbovati. Visok sadržaj lignina i nizak sadržaj hemiceluloze smanjuju pozitivan efekat vlage na izduženje (Scallan, 1974; Kunnari i saradnici, 2007).

#### 3.2.5 Unutrašnja struktura

Talasasta vlakna u sastavu papira poboljšavaju izduženje, ali istovremeno u velikoj meri smanjuju zateznu čvrstoću (Page i Seth, 1980; Mohlin i saradnici, 1996; Gurnagul i saradnici, 1997; Joutsimo, 2004; Joutsimo i saradnici, 2005; Seth, 2005; Kunnari i saradnici, 2007). Ovakva vlakna u strukturi papira, imaju sposobnost da rasporede indukovani napon na veću površinu uspešnije u poređenju sa ravnim vlaknima (Joutsimo i saradnici, 2005). Faza sušenja papira u značajnoj meri može da utiče na osobine papira. Skraćivanje vlakana i papira u toku procesa sušenja dovodi do negativnog uticaja na izduženje papira (Dumbleton, 1972).

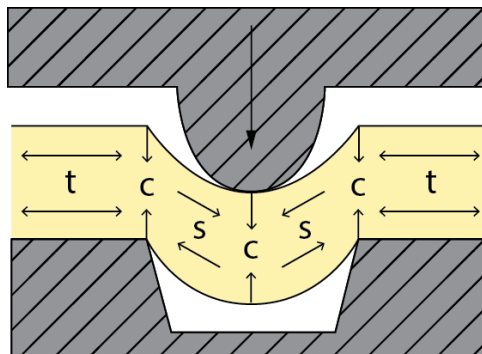
#### 3.2.6 Oštećenje papira

Oštećenje papira u vidu prekida ili pucanja papira nakon utiskivanja nije prihvatljivo sa stanovišta upotrebe konačnog proizvoda, jer narušava njegovu estetsku i upotrebnu funkciju. Uzrok nastanka ovih oštećenja je razlika u pretrpljenim naponima između unutrašnje i spoljašnje površine papira. Napon i izduženje na unutrašnjoj površini (sa strane patrice) su manji od onih na spoljašnjoj površini. Ova razlika je veća što je papir deblji (Bhattacharyya i saradnici, 2003). Prekid (lom) papira nastaje zbog prekida veza između vlakana ili zbog prekida samih vlakana, pa napon prilikom istezanja i izduženje prilikom istezanja određuje da li će doći do prekida (Niskanen i saradnici, 1996). Sam početak nastajanja loma je iniciran prekidom veza između vlakana (Van Den Akker 1950; Van Den Akker i saradnici 1958). Papirni uzorci su prilikom



izduženja u pravcu normalnom na vlakna papira (CD) plastičniji i duktilniji u poređenju sa izduženjem u pravcu vlaknaca (MD) (Salminen, 2003).

Kod utiskivanja, površina papira se pritiska u udubljenje pokretnog alata dok su ivice utisnutog dela papira pod silama istezanja. Sile koje deluju na papir prilikom utiskivanja prikazane su na slici 3.6.



Slika 3.6: Deformacije i naponi nastali utiskivanjem papira (*t*-napon istezanja, *c*-napon pritiskanja, *s*-smicanje) (Hine, 1964; Beex i Peerlings, 2009)

U eksperimentalnom delu disertacije biće utvrđene mehaničke osobine papira za utiskivanje merenjem zatezne čvrstoće svih vrsta papira na kojima će biti vršeno utiskivanje. S obzirom da se u papir prilikom testiranja utiskuju elementi čije ivice zaklapaju različite uglove sa smerom vlakana u papiru, uticaj smera vlakana na zateznu čvrstoću papira će takođe biti utvrđen.

### 3.3 Alati za utiskivanje papirnih materijala

Dve opisane i poređene metode izrade alata za utiskivanje su tehnika hemijskog nagrivanja metala i FDM tehnika aditivne proizvodnje.

#### 3.3.1 Konvencionalne metode izrade alata za utiskivanje

##### *Materijali korišćeni u konvencionalnim metodama*

Alati za utiskivanje izrađeni konvencionalnom metodom hemijskog nagrivanja mogu se izraditi od magnezijuma, bakra, mesinga, cinka, aluminijuma, čelika i polimera (Polydiam Industries Ltd, n.d.).

Alati za utiskivanje od **magnezijuma** su najčešće korišćeni zbog svoje pristupačne cene, brzine hemijskog nagrivanja, i dobre provodljivosti temperature. Magnezijum je pogodan i za proces izrade hemijskim nagrivanjem i za graviranje. Koristi se kod tiraža koji zahtevaju između 100.000 i 150.000 utiskivanja bez većih oštećenja elemenata. Posle koliko utiskivanja će forma biti istrošena, zavisi od veličine slike, tipa, teksture i debljine materijala za utiskivanje. Tehnika hemijskog nagrivanja magnezijuma je za razliku od hemijskog nagrivanja bakra i cinka, čistija tehnika. Ugao nagrivanja ne može se precizno kontrolisati kao u slučaju graviranja. Brzina nagrivanja je približno 0,18 mm u minuti (u-emboss, n.d; Rikard, 2016; Iggesund, 2018).

**Bakar** se koristi za fine i ekskluzivne poslove jer obezbeđuje stabilne i precizne elemente. Pogodan je za tiraže između 100.000 i 500.000 otisaka. Bakar se takođe koristi ukoliko su potrebni visoki pritisci zbog veličine slike koja treba da se utisne, jer je čvrst i izdržljiv materijal. Skuplji je od magnezijuma i vreme potrebno za hemijsko nagrivanje je duže (u-emboss, n.d; Rikard, 2016; Iggesund, 2018).

Alati od **mesinga** su najkvalitetniji i zadovoljavaju visoke zahteve kvaliteta i postojanosti na tiražima i do 1.000.000 otisaka. Iako se može obraditi tehnikom hemijskog nagrivanja, mesing se obično obrađuje ručnim ili CNC graviranjem i pogodan je ne samo za graviranje elemenata jednake dubine nego i za izradu višestepenih elemenata (elementi sa različitim dubinama). Jedini nedostatak ovog materijala je njegova cena zbog koje se koristi samo za ekskluzivne poslove koji zahtevaju veliki broj otisaka i visoku preciznost utisnutih elemenata (u-emboss, n.d; Rikard, 2016; Iggesund, 2018).

**Cink** se koristi uglavnom kao jeftina zamena za bakar i može da izdrži tiraže i do 250.000 otisaka. Nedostatak korišćenja ovog materijala je njegov skup, spor i prljav postupak hemijskog nagrivanja (u-emboss, n.d; Rikard, 2016; Iggesund, 2018).

**Aluminijum** se može koristiti u procesu utiskivanja folije jer ima odlične termalne osobine. Nedostatak ovog materijala je u složenosti procesa graviranja, jer ima tendenciju da zapuši ili uvrne vrh reznog alata, pa zahteva skuplje alate ili češće čišćenje i zamenu alata. Aluminijum je pogodan i za hladno utiskivanje kao jeftinija alternativa za mesing (u-emboss, n.d; Rikard, 2016; Iggesund, 2018).

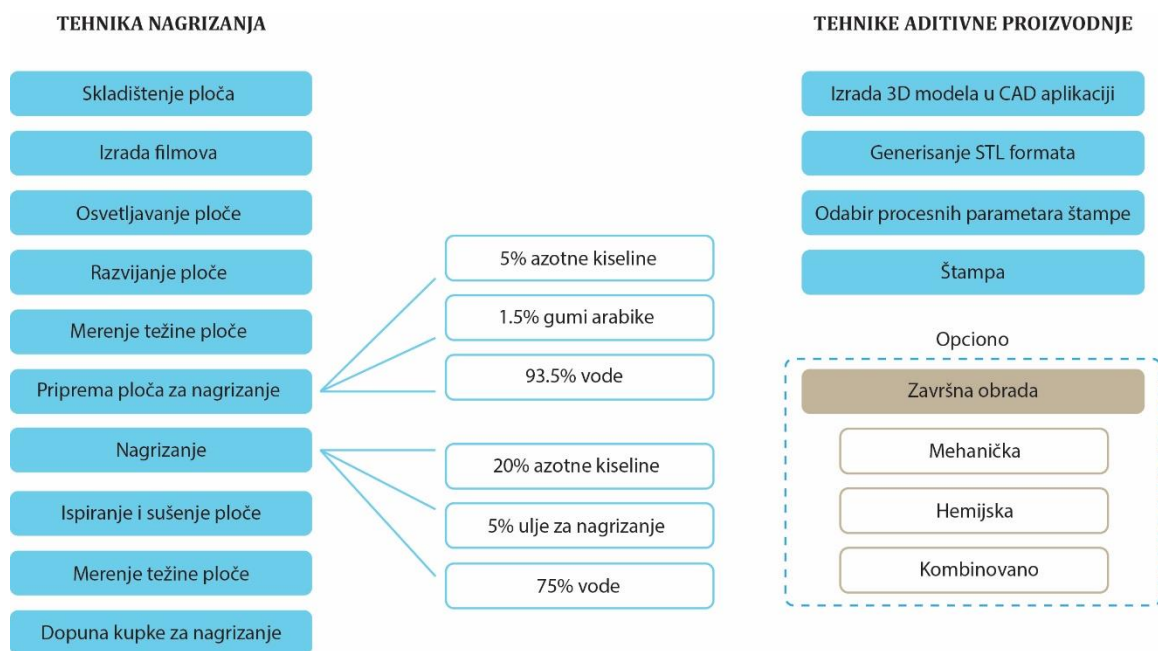
Alati za utiskivanje od **nerđajućeg čelika** se retko koriste u procesu utiskivanja sa ili bez folije, jer se sporo graviraju, a u slučaju graviranja zahtevaju skuplje rezne alate. Takođe, sa alatima od ovog materijala teško je održati konstantnu temperaturu na površini, pa se za utiskivanje folije koristi isključivo u slučajevima kada su potrebni tiraži veći od 1.000.000 otisaka (u-emboss, n.d; Rikard, 2016; Iggesund, 2018).

Alati za utiskivanje od **polimera** se takođe mogu koristiti, ali zbog svoje niske tačke stakljenja, nisu pogodni za utiskivanje folije gde se zahtevaju temperature od 80 °C do 180 °C. Međutim, sa proizvodnjom folija koje zahtevaju niže temperature utiskivanja, alati od fotopolimera pronalaze svoju upotrebu. Glavna prednost ovih materijala je jednostavna izrada alata bez većih ulaganja (u-emboss, n.d; Rikard, 2016; Iggesund, 2018).

Svi navedeni materijali za izradu alata za utiskivanje zahtevaju dosta složen proces izrade uz upotrebu različitih uređaja i hemikalija, zatim radni i skladišteni prostor i na kraju rešenje za odlaganje iskorišćenog materijala ili njegovu reciklažu. Zbog ovih zahteva, javlja se potreba za pronalaženjem novih materijala i procesa izrade alata za utiskivanje, kako bi se proces pojednostavio, a štetan uticaj na radnu i životnu sredinu smanjio (u-emboss, n.d; Rikard, 2016; Iggesund, 2018).

#### *Izrada alata za utiskivanje tehnikom hemijskog nagrivanja*

Najčešće korišćen materijal za izradu alata za utiskivanje je magnezijum. Kao što je već navedeno, alati od ovog materijala se izrađuju tehnikama hemijskog nagrivanja ili graviranja, s napomenom da se hemijsko nagrivanje mnogo češće koristi. Ovde će biti navedeni koraci u procesu hemijskog nagrivanja magnezijuma kako bi se predstavila neophodna oprema i repromaterijal. Na slici 3.7 su uporedno prikazane faze izrade alata za utiskivanje tehnikom hemijskog nagrivanja i aditivnim tehnikama.



Slika 3.7: Uporedni prikaz proizvodnih koraka izrade alata za utiskivanje tehnologijom hemijskog nagrizanja i aditivnim tehnikama

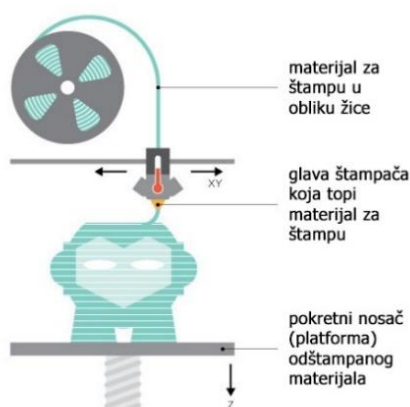
Pored očiglednog smanjenja broja koraka za izradu alata aditivnim tehnikama, manje su potrebe prostora za postavku uređaja i skladištenje repromaterijala. U slučaju konvencionalne tehnike potrebni su uređaji za izradu filmova, osvetljavanje ploča, razvijanje ploča i hemijsko nagrizanje. Kod aditivnih tehnika je najčešće potreban računar i jedna mašina. Repromaterijal za tehnike 3D štampe se razlikuje u zavisnosti od tehnike, ali se obično radi o jednom materijalu koji zahteva mnogo manje prostora za skladištenje. Hemikalija i uklonjenog neiskorišćenog materijala u aditivnim tehnikama gotovo i da nema (osim ukoliko se ne štampa podloga i potporna struktura). Ovo čini istraživanje primene i optimizacije tehnika 3D štampe za izradu alata za utiskivanje veoma atraktivnim i aktuelnim, a rezultate istraživanja korisnim za unapređenje procesa grafičke proizvodnje.

### 3.3.2 Tehnike 3D štampe u grafičkoj proizvodnji

Tehnike aditivne proizvodnje (engl. *additive manufacturing* - AM) se odnose na proces proizvodnje 3D objekata dodavanjem materijala u sukcesivnim slojevima. Pojam „3D štampe“ se često koristi kao sinonim za tehnike aditivne proizvodnje. Ove tehnike su najčešće korišćene u svrhe brze izrade prototipova (engl. *rapid prototyping* - RP), ali poslednjih godina sve se više koriste u industrijskoj proizvodnji kao i za personalnu upotrebu u domaćinstvima (Berman, 2012; Chulilla, 2011, Espalin i saradnici, 2014; Chua i saradnici, 2010), bioinženjerstvu (Richard i saradnici, 2014), funkcionalnoj štampi Brajevog alfabeta i taktilnih objekata, raznih mapa i planova za osobe sa oštećenjem vida (Stangl i saradnici, 2014; Urbas i saradnici, 2016) i proizvodnju alata za utiskivanje u grafičkoj industriji (Delić i saradnici, 2017). Neke od prednosti tehnika 3D štampe su: sposobnost da se proizvedu objekti komplikovane geometrije u kratkom vremenskom periodu, bez dodatnih troškova za izradu alata (Upcraft i Fletcher, 2003; Mansour i Hague, 2003); sposobnost da se proizvedu funkcionalni sklopovi povezivanjem više manjih delova u procesu konstrukcije unutar CAD programskih alata, smanjivanjem broja potrebnih delova, vremena rukovanja i potrebe za skladištenim prostorom (Hopkinson i saradnici, 2006; Bernard i Fischer, 2002); sposobnosti da se optimizuje potrošnja materijala konstruisanjem delova koje je veoma teško ili čak nemoguće proizvesti konvencionalnim načinom proizvodnje; i na kraju, sposobnost da se smanji količina otpada i na taj način smanji štetan uticaj na životnu sredinu.

Po ASTM F2792 – 12a standardu aditivne tehnike su klasifikovane u sedam grupa: povezivanje praškastog materijala prskanjem vezivnog sredstva (engl. *binder jetting*), povezivanje deponovanog materijala direktnim izlaganjem izvoru energije (engl. *direct energy deposition*), tehnika deponovanja istopljenog materijala (engl. *material extrusion*), prskanje materijala (engl. *material jetting*), povezivanje čestica termalnom energijom (engl. *powder bed fusion*), laminacija listova (engl. *sheet lamination*) i fotopolimerizacija tečnog materijala (engl. *vat photopolymerization*) (ASTM International, 2012; ASTM Interantional, 2015).

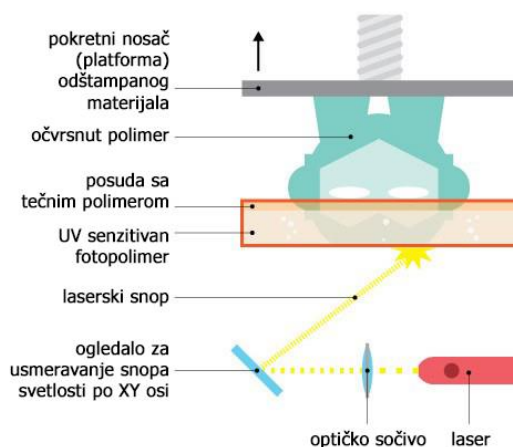
**Tehnika deponovanja istopljenog materijala** - poznata još i pod nazivom FDM (engl. *fused deposition modeling*) je jedna od komercijalnih tehnika 3D štampe (slika 3.8). Sinonimi za ovaj postupak su na engleskom jeziku još i: “*plastic jet printing*”, “*thermoplastic extrusion*” ili “*fused filament method*” koji se koriste jer je skraćenica FDM zaštićena (Bogue, 2013). FDM tehnika štampe je razvijena 1988. godine od strane Skot Krampa (engl. *Scott Crump*), ali ju je kompanija Stratasys komercijalizovala 1990. godine (Stratasys, 2016). Materijal koji se koristi za štampu je u čvrstom stanju u formi žice koja je namotana na kotur. Žica se sa kotura izvlači i provodi do dela sa zagrejanom diznom kroz koju se čvrsta žica provlači, zagreva, topi i nanosi na platformu, gde se momentalno hladi i očvrstne. Ceo mehanizam sa diznom ima mogućnost kretanja duž dve horizontalne ose, a treća dimenzija se dobija spuštanjem pokretne platforme za debljinu jednog sloja. Slojevi se slažu jedan na drugi kako bi se formirao konačan 3D objekat. Tehnika FDM štampe deponuje materijal u određenom pravcu proizvodeći objekte anizotropnih osobina (Ahn i saradnici, 2002). Materijali koji se koriste u FDM tehnici 3D štampe su različite vrste plastičnih materijala (ABS, PLA, najlon i dr.) i kompozitnih materijala sačinjeni od plastike i čestica metala, keramike, raznih vlakana karbona, drveta, itd. Modeli izrađeni FDM tehnikom 3D štampe imaju zadovoljavajuća mehanička svojstva, ali nešto lošiji kvalitet površine, koju je naknadnom obradom moguće poboljšati (Yan i Gu, 1996; Wendel i saradnici, 2008; Upcraft i Fletcher, 2003; Wong i Hernandez, 2012). Ova tehnika aditivne proizvodnje je postala popularna zbog jednostavnosti upotrebe, niske cene i smanjenog uticaja na životnu sredinu i masovno se koristi za izradu prototipova, ali i realnih industrijskih proizvoda (Masood i Song, 2004).



Slika 3.8: Princip FDM tehnologije 3D štampe (3dhubs, 2018)

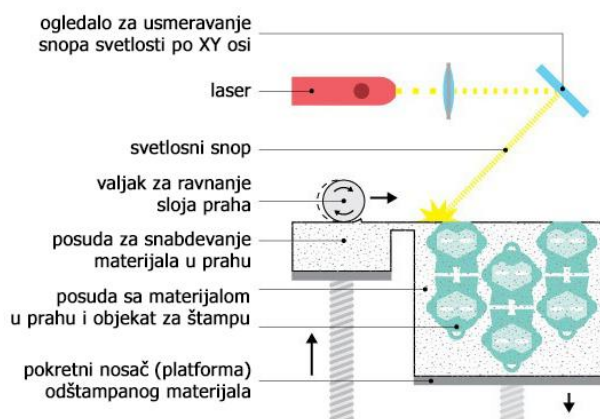
**Fotopolimerizacija tečnog materijala** - se zasniva na očvršćavanju tečnog polimera pod uticajem ultraljubičastog svetla (slika 3.9). Pokretna platforma je uronjena u posudu sa polimerom, a svaki sloj se osvetljava sa donje strane posude. Platforma sa očvrstim slojem se podiže, a postupak osvetljavanja novog sloja se ponavlja sve dok svi slojevi ne očvrstnu. U zavisnosti od konstrukcije uređaja izvor svetlosti može biti i sa gornje strane, a u tom slučaju platforma se pomera ka dole. DLP (engl. *Direct Light Processing*) tehnika kao izvor svetla koristi projektor, za razliku od SLA (engl. *Stereolithography apparatus*) koja koristi laser. Modele

proizvedene ovim tehnikama odlikuje visoka preciznost sitnih detalja, ali nešto slabija mehanička svojstva (Yan i Gu, 1996; Wendel i saradnici, 2008; Upcraft i Fletcher, 2003, Wong i Hernandez, 2012).



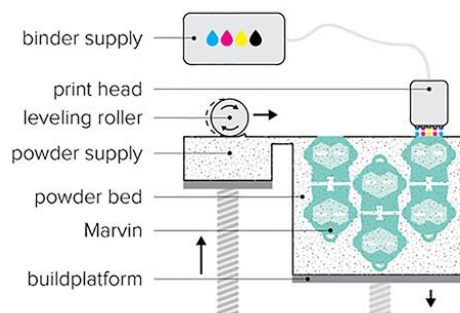
Slika 3.9: Princip fotopolimerizacije tečnog materijala (3dhubs, 2018)

**Povezivanje praškastog materijala termalnom energijom** - koristi laser za topljenje praškastog materijala (slika 3.10). Otopljeni sloj trenutno očvrstne, a na njega se nanosi novi sloj praška koji ponovo pomoću lasera očvrstne i veže se za prethodni, platforma sa očvrstim slojevima se spušta i proces se ponavlja sve dok ceo objekat ne bude izrađen.. Materijali koji se koriste u ovoj tehnici štampe su različite vrste plastike (poliamid, polistiren, termoplastični elastomeri i dr.), metali (čelik, titanijum, aluminijum, kobalt-hrom, nikl,...), keramika. Izrađeni proizvodi imaju dovoljno dobre mehaničke osobine za izradu funkcionalnih delova, a ne samo maketa (Yan i Gu, 1996; Wendel i saradnici, 2008; Upcraft i Fletcher, 2003; Wong i Hernandez, 2012).



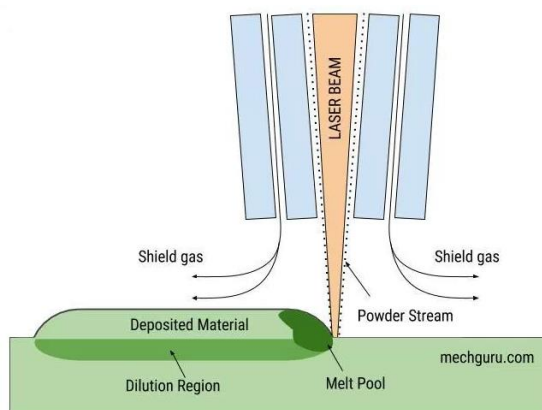
Slika 3.10: Princip tehnologije povezivanja materijala termalnom energijom (3dhubs, 2018)

**Povezivanje praškastog materijala prskanjem vezivnog sredstva** je tehnologija slična SLS štampi, jedino što se za očvršćavanje praškastog materijala ne koristi svetlost već mlaznice koje na svaki novi sloj praška prskaju kapljice vezivnog sredstva (Slika 3.11). Štampajuća platforma se spušta posle očvršćavanja svakog sloja dok se ceo predmet ne izradi. Višak praška se ukloni, a predmet se naknadno premaže sa slojem lepka kako bi se dobila bolja čvrstoća i kako bi se sačuvala boja (Yan i Gu, 1996; Wendel i saradnici, 2008; Upcraft i Fletcher, 2003; Wong i Hernandez, 2012).



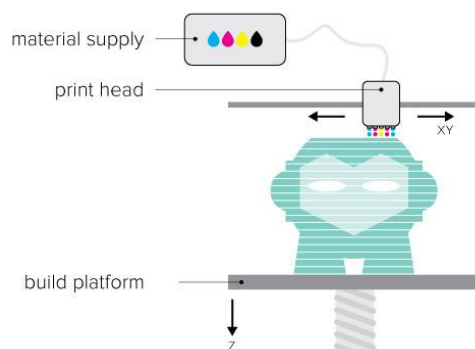
Slika 3.11: Princip Binder Jetting tehnologije 3D štampe (3dhubs, 2018)

**Povezivanje deponovanog materijala direktnim izlaganjem izvoru energije** predstavlja proces u kojem se fokusirana toplotna energija (laser, snop elektrona, plazma itd.) koristi za povezivanje materijala koji se u isto vreme deponuje na podlozi (Wong i Hernandez, 2012;) (Slika 3.12).



Slika 3.12: Princip Binder Jetting tehnologije 3D štampe (Paridhi, 2009)

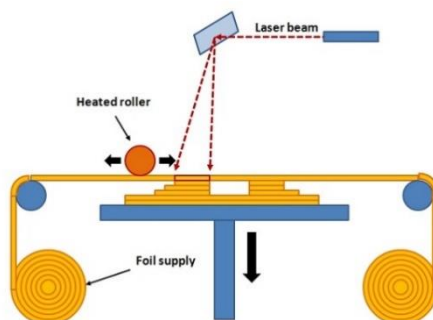
**Prskanje tečnog materijala pomoću mlaznica** je tehnologija slična inkjet štampi, samo što se umesto mastila kroz mlaznice prskaju sitne čestice tečnog fotoosetljivog polimera koji se, kad dospe na štampanjuću platformu, istog trenutka očvršćava pomoću UV izvora svetlosti. Glava sa mlaznicama se kao i kod FDM tehnologije kreće horizontalno po dve ose, a štampanjuća platforma se posle svakog očvrstlog sloja spušta po vertikalnoj osi, omogućavajući da novi sloj očvrstne i poveže sa prethodnim (Slika 3.13). Ova tehnologija koristi tečne fotopolimere različitih osobina (fleksibilni, transparentni,...) (Wong i Hernandez, 2012).



Slika 3.13: Princip Material Jetting tehnologije 3D štampe (3dhubs, 2018)



**Laminacija listova** – podrazumeva proces u kom se trodimenzionalni objekat formira povezivanjem listova materijala (papir, plastika,...) pomoću lepila (Yan i Gu, 1996; Wendel i saradnici, 2008; Upcraft i Fletcher, 2003; Wong i Hernandez, 2012) (Slika 3.14).



Slika 3.14: Princip SLS tehnologije 3D štampe (3D printing from scratch, 2015)

U istraživanju će biti korišćene dve tehnike aditivne proizvodnje za izradu alata za utiskivanje: tehnika deponovanja istopljenog materijala i tehnika fotopolimerizacije tečnog polimera.

Tehnika deponovanja istopljenog materijala je odabrana zbog svoje pristupačnosti, jednostavnosti, dobrih mehaničkih osobina i mogućnosti upotrebe biorazgradivih materijala. Takođe, ova tehnika 3D štampe proizvodi objekte lošijeg kvaliteta površina, pa ukoliko se pokaže da je moguće izraditi alate koji daju kvalitetne otiske na papiru, velika je verovatnoća da će to biti moguće uraditi koristeći ostale tehnike aditivne proizvodnje. Fotopolimerizacija tečnog materijala je odabrana zbog visokog kvaliteta proizvedenih elemenata malih dimenzija i mogućnosti štampe koristeći materijale otporne na visoke temperature (približno 235 °C) što je dovoljno za proces utiskivanja folijom. Tehnike prskanja materijala, povezivanja deponovanog materijala direktnim izlaganjem izvoru energije i povezivanja deponovanog materijala direktnim izlaganjem izvoru energije nisu odabrane zbog nepristupačnosti iako imaju potencijal za izradu kvalitetnih alata sa dobrim mehaničkim osobinama. Povezivanje praškastog materijala prskanjem vezivnog sredstva takođe nije korišćeno u ovom istraživanju, jer je poznato da delovi izrađeni ovom tehnikom nemaju dovoljno dobre mehaničke osobine što bi narušilo ne samo kvalitet utiskivanja već i stabilnost elemenata alata za utiskivanje.

#### *Materijali pogodni za korišćenje u FDM tehnici aditivne proizvodnje*

Na tržištu je mnoštvo proizvođača materijala (filamenata) za štampu FDM tehnikom 3D štampe, a detaljni sastav i osobine tih materijala su retko dostupni krajnjem korisniku. Filamenti napravljeni od termoplastičnih materijala kao što su akrolinitril butadien stiren (ABS), polilaktična kiselina (PLA), polikarbonat (PC), polietar-etar-keton (PEEK), najlon u kombinaciji sa drugim kompozitnim materijalima se najčešće koriste u FDM procesu štampe. Dva najčešće korišćena termoplastična materijala u FDM tehnici štampe su ABS i PLA.

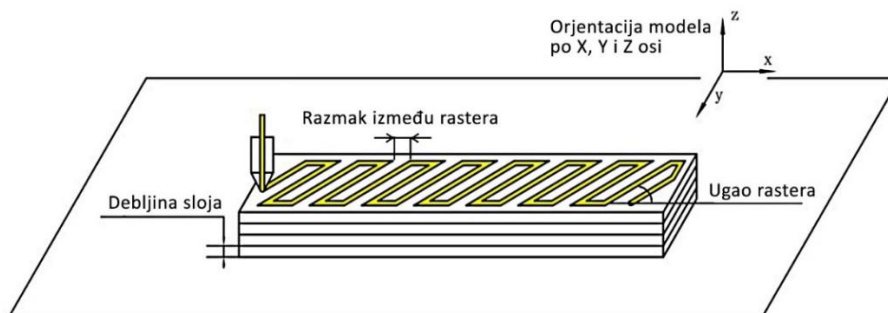
Akrolinitril butadien stiren (ABS) je termoplastični kopolimer na bazi nafte. Trokomponentni sastav pruža ovom materijalu izbalansirane osobine sa akrolinitrilom koji obezbeđuje otpornost na toplotu, butadienom koji omogućuje dobru otpornost na udarce i stirenom koji daje ovom kopolimeru krutost (Noorani, 2006). Delovi izrađeni od ABS materijala su dovoljno otporni na toplotu, hemikalije i vlagu što im omogućava široki spektar upotrebe. Temperatura stakljenja ( $T_g$ ) čistog ABS materijala u literaturi je dokumentovana između 94 °C i 173 °C (Sun i saradnici, 2008; Weng i saradnici, 2016; Nikzad i saradnici, 2011; Hwang i saradnici, 2015); temperatura topljenja ( $T_m$ ) približno 217 °C (Hwang i saradnici, 2015); koeficijent linearne ekspanzije približno  $9.82 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  (Weng i saradnici, 2016); termalna provodljivost  $k=0.177 \text{ W/mK}$ ; specifična toplota

$C_p=2,080 \text{ J/kgK}$ ; gustina  $\rho=1,050 \text{ kg/m}^3$  i viskozitet pri temperaturi od  $240 \text{ }^\circ\text{C}$   $\mu=5,100 \text{ Pa s}$  (Sun i saradnici, 2008).

Polilaktična kiselina (PLA) je biorazgradivi polimer dobijen polimerizacijom otvaranja prstena laktida i monomera laktične kiseline koji su dobijeni fermentacijom šećera (Lunt, 1998). U većini slučajeva PLA materijal je čvršći od ABS materijala, ali takođe i krtiji (Drummer i saradnici, 2012; Tymrak i saradnici, 2014; Letcher i Waytashek, 2014; Beniak i saradnici, 2015). Međutim, PLA polimer omekšava na nižim temperaturama u poređenju sa ABS materijalom, pa je ovaj materijal moguće koristiti jedino pri nižim temperaturama. Niska vrednost tačke stakljenja od  $50\text{-}64 \text{ }^\circ\text{C}$  (Tábi i saradnici, 2016; Petersson i saradnici, 2007; Celli i saradnici, 1991; Bijarimi i saradnici, 2012), tačka topljenja između  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  i  $186 \text{ }^\circ\text{C}$  (Petersson i saradnici, 2007; Celli i saradnici, 1991; Bijarimi i saradnici, 2012) i gustina ( $\rho$ ) od  $1.25 \text{ g/cm}^3$  (Petersson i saradnici, 2007) diktira ograničenu upotrebu ovog materijala pri povišenim temperaturama.

### *Radni parametri FDM tehnike 3D štampe*

Proces FDM 3D štampe obiluje mogućnostima za podešavanje parametara proizvodnje koji imaju uticaj na konačni rezultat. U nastavku će ovi parametri biti detaljno objašnjeni, a u praktičnom delu su prezentovani rezultati ispitivanja uticaja nekih od parametara.



Slika 3.15: Radni parametri FDM tehnike štampe (Wu i saradnici, 2017)

**Debljina sloja (engl. layer height)** – predstavlja parametar koji je najviše istraživani u literaturi. S obzirom da se u FDM tehnici štampe objekat formira sukcesivnim ređanjem slojeva deponovanog filameta jedan na drugi, ovaj parametar je odgovoran za takozvanu “rezoluciju” bočnih zidova štampanog objekta. S obzirom da je na bočnim površinama ovaj faktor najuočljiviji, vrednost njegove debljine definiše i izgled te površine (Slika 3.15). Što je debljina sloja manja to je finija površina bočnog zida. Kako se ova vrednost povećava sve više dolazi do izražaja takozvani “efekat stepenica” (engl. *staircase effect*), odnosno bočne stranice postaju hrapavije (Sood i saradnici, 2009; Mohamed i saradnici, 2015).

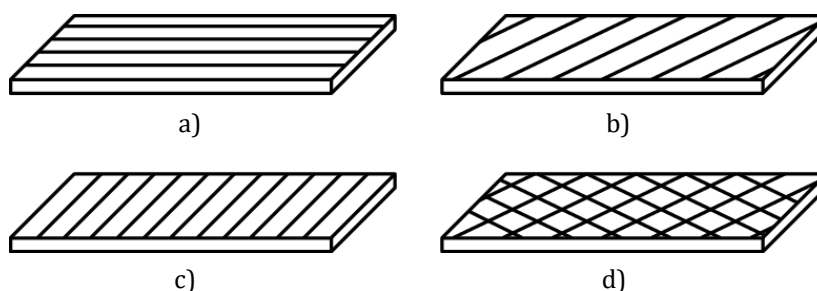
**Razmak između rastera (engl. air gap)** – pod pojmom element rastera se podrazumeva sama istopljena nit materijala unutar sloja. S obzirom na anizotropnu strukturu uzoraka izrađenih FDM tehnikom 3D štampe, svaki sloj je sačinjen iz mnoštva deponovanih niti – rastera (Slika 3.15). Ova vrednost podrazumeva rastojanje između dva elementa rastera, što definiše i procenat unutrašnje popune, odnosno samu poroznost objekta (Sood i saradnici, 2009; Mohamed i saradnici, 2015).

**Širina rastera (engl. raster width)** – se odnosi na širinu deponovanog filameta (Sood i saradnici, 2009; Mohamed i saradnici, 2015) (Slika 3.15).

**Ugao rastera (engl. raster angle)** – ovo je takođe jedan od najčešće istraživanih i najuticajnijih parametara u literaturnim izvorima. On predstavlja ugao pod kojim su niti sloja orijentisane u odnosu na x-osu platforme za štampu. Često istraživane vrednosti ovog ugla su  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  i  $90^\circ$ , mada



su u nekim istraživanjima pomenutim u narednim poglavljima ispitivani i drugi uglovi rastera (20°, 30°, 60°,...). Na slikama 3.16a-c prikazani su najčešće korišćeni uglovi rastera (Sood i saradnici, 2009; Mohamed i saradnici, 2015).

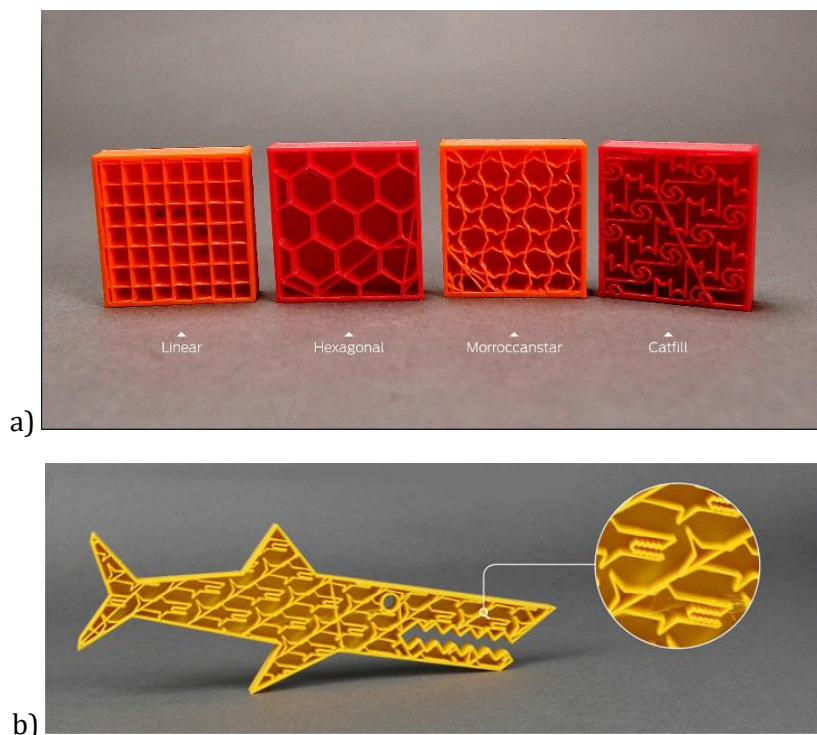


Slika 3.16: Ilustracija različitih uglova rastera slojeva na uzorku izrađenom FDM tehnikom štampe. a) ugao od 0°, b) 45°, c) 90° i d) 45°/45° (Sood i saradnici, 2009; Mohamed i saradnici, 2015)

Sa slika 3.16a-c se vidi da pored varijanti u kojoj je svaki sloj orijentisan pod istim uglom, moguće je štampati i svaki sloj pod drugim uglom (Slika 3.16d).

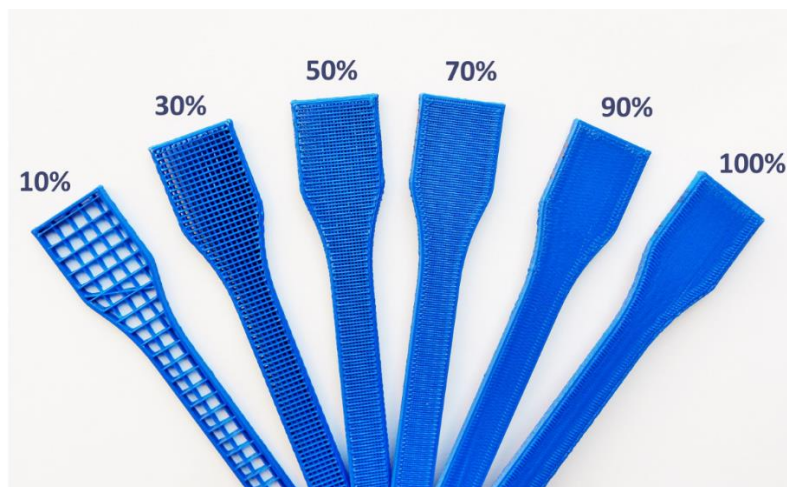
**Orijentacija modela po x, y, z osi (engl. *build orientation*)** – je parametar koji definiše pod kojim uglom u odnosu na x, y i z osu je pozicioniran ceo uzorak u toku štampe (Slika 3.15) (Thrimurthulu i saradnici, 2004; Sood i saradnici, 2009; Mohamed i saradnici, 2015).

**Vrsta unutrašnje popune objekta (engl. *type of infill*)** – se odnosi na samu geometriju unutrašnjih slojeva objekta. Postoji mnoštvo različitih oblika geometrije unutrašnje popune, ali neke od najčešćih su linijska, heksagonalna (saćasta), dijamantska (romboidna), a postoje i neke čija je uloga više estetska, kao što su marokanska zvezda (marroccanstar), ketfil (catfill) ili šarkfil (sharkfill). Na slici 3.17 prikazani su neki od njih (Mohamed i saradnici, 2015).



Slika 3.17: Prikaz različitih vrsta popune: a) linearni, heksagonalni, maroknska zvezda i ketfil, b) šarkfil (MakerBot Industries, 2013a,b)

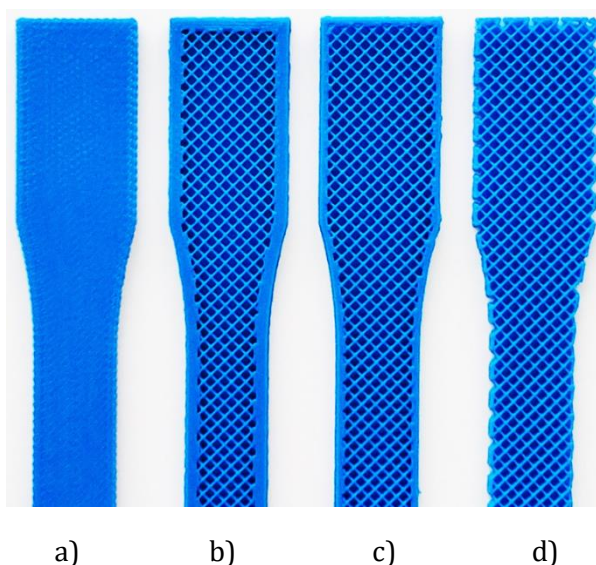
**Procenat unutrašnje popune štampanog objekta (engl. *infill*)** – je definisan razmakom između rastera. Variranjem ove vrednosti može da se dobije uzorak veće ili manje mase sa većim ili manjim šupljinama u unutrašnjosti objekta. Na slici 3.18 prikazane su različite vrednosti unutrašnje popune izražene procentualno (3D Matter, 2015; Mohamed i saradnici, 2015).



Slika 3.18: Prikaz različitih procenata unutrašnje popune od 10% do 100% (3D matter, 2015)

**Broj (debljina) konturnih zidova (engl. *number of contours*)** – se odnosi na broj deponovanih filamenata koji obrazuju spoljašnje zidove objekta. Varijacijom vrednosti ovog parametara dobija se deblji ili tanji konturni zid. Na slici 3.19 prikazane su različite vrednosti ovog parametra (Mohamed i saradnici, 2015; 3D Matter, 2015).

**Broj početnih i završnih slojeva (engl. *floor/roof thickness*)** – predstavlja parametar kojim se istraživači nisu do sada mnogo bavili, a svako je značajan. Odnosi se na broj početnih i/ili završnih slojeva koji neće biti štampani sa zadatom vrstom i procentom popune, odnosno koji će biti štampani sa 100% linijskim rasterom. Broj ovih slojeva definiše praktično debljinu „poda“ i „krova“ štampanog objekta (npr. ako je debljina sloja 0,1 mm, 5 završnih/početnih slojeva će značiti da je debljina poda i krova 0,5 mm, odnosno donjih i gornjih 0,5 mm će biti štampano sa 100% linijskog rastera). Na slici 3.19a je štampan sa određenim brojem završnih slojeva, dok su ostali uzorci štampani bez ovih slojeva (3D Matter, 2016).



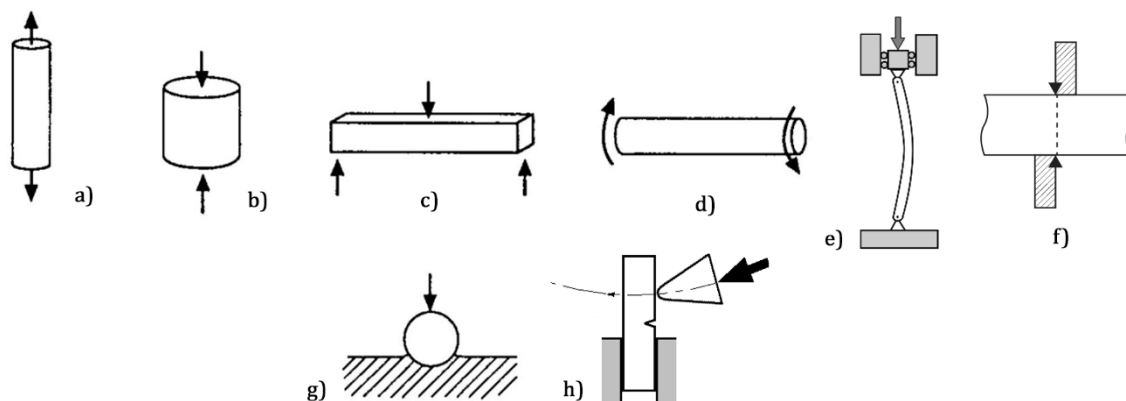
Slika 3.19: Prikaz različitog broja konturnih zidova. Uzorak a) je izrađen sa završnim „krovom“ dok ostali nisu (3D Matter, 2016)

### 3.3.3 Metode za ispitivanje mehaničkih osobina materijala korišćenih u tehnikama 3D štampe

Kako bi se odredilo ponašanje delova pod dejstvom opterećenja neophodno je odrediti kada dolazi do loma, kolika je najveća deformacija i odnos između tog opterećenja i deformacije. Prema načinu dejstva sile, ispitivanja možemo podeliti na: statička, udarna i dinamička (Gerić, 2012). Prema vrsti naprezanja, ispitivanja možemo podeliti na:

- Zatezanje i pritisak
- Savijanje
- Uvijanje
- Izvijanje
- Smicanje

Ispitivanje zatezanjem (Slika 3.20a) se najčešće primenjuje, jer pruža najpotpuniju sliku o mehaničkim svojstvima materijala. Na uzorak (epruvetu) u toku testiranja deluju sile u pravcu ose koje teže da ga produže i pokidaju. Za ovu vrstu ispitivanja se koriste mašine za ispitivanje zatezanjem koje se zovu kidalice i koje pričvršćuju uzorak na njegovim krajevima. Epruvete su definisane standardima, jer se mehaničke osobine menjaju prema dimenzijama epruvete. Standardi su definisani za uzorke koji se dobijaju rezanjem, presovanjem ili livenjem (Gerić, 2012). Za uzorke dobijene aditivnim tehnikama nisu definisani standardi pa se obično koriste neki od već definisanih standarda, najpogodniji za tehniku i materijal koji se koristi.



Slika 3.20: Ispitivanje zatezanjem a), sabijanjem b), savijanjem u tri tačke c), uvijanjem d), izvijanjem e), smicanjem f) ispitivanje tvrdoće g) i ispitivanje energije udara h) (Electronic Means of Communications, n.d.)

Ispitivanje sabijanjem (pritiskanjem) se može obavljati na istoj mašini kao i zatezanje s tim što u ovom slučaju sile koje deluju na krajeve uzorka teže da pritisnu uzorak (Slika 3.20b). Epruvete definisane standardom su drugačijih dimenzija i oblika od epruveta za zatezanje (Gerić, 2012; Rešković, n.d.).

U slučaju ispitivanja savijanja, na uzorak deluju sile sa bočne strane uzorka (Slika 3.20c). Uzorak je obično oslonjen u dve tačke na krajevima, a na sredini uzorka se deluje silom. U tom slučaju, deo tela je pod pritiskom, a deo tela pod naprežanjem (Gerić, 2012; Rešković, n.d.).

Testovima za određivanje uvijanja (Slika 3.20d) se testira čvrstoća materijala na uvijanje ili torziju određivanjem otpora materijala elastičnim deformacijama uvijanja (Rešković, n.d.).

U slučaju testova na izvijanje na uzorak dužine 90-100 mm se deluje pritisnim silama do pojave izvijanja uzorka (Slika 3.20e). Ovo isitivanje se sprovodi uglavnom na konstrukcijskim cevima (skele, noseći sttubovi, itd.)(Rešković, n.d.).

Testiranjem čistog smicanja (Slika 3.20f) određuje se čvrstoća materijala na elemente opterećene normalno na njihovu uzdužnu osu (Rešković, n.d.)

Tvrdoća materijala se definiše kao otpornost koju površina materijala pokazuje na prodiranje čelične kuglice ili dijamanta, pri definisanoj sili i vremenu (Slika 3.20g). Postoje Brinelova, Rockwellova i Schorova metoda merenja tvrdoće (Gerić, 2012; Rešković, n.d.).

Energija udara je još jedna od metoda ispitivanja mehaničkih osobina materijala (Slika 3.20h). Povezana je sa žilavosti i krutosti i definiše otpornost objekata na udar. Direktno merenje je zasnovano na klatnu koje udara u uzorak, najčešće sa zarezom na sredini uzorka kako bi se povećala osetljivost. Ovaj metod je pogodan za krte materijale (Gerić, 2012, Rešković, n.d.).

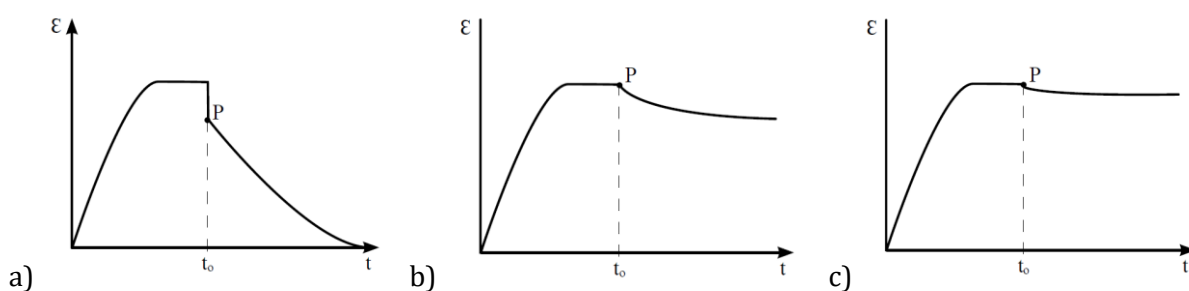
Ispitivanje otpornosti na habanje se vrši merenjem izgubljene mase tela posle kontakta sa abrazivnom rotacionom površinom. Koeficijent trenja karakteriše otpornost na pokretljivost između dve površine (Gerić, 2012).

U eksperimentalnom delu doktorske disertacije koristiće se ispitivanja zatezanjem i sabijanjem zbog prirode sila koje deluju na alat prilikom utiskivanja. Ova merenja biće obavljena i na različitim temperaturama kako bi se testirala pogodnost materijala za utiskivanje folije, jer se alat prilikom ovog procesa zagreva na temperature od 80 °C do 180 °C.

### 3.4 Radni parametri utiskivanja

Kako bi se izvršila plastična deformacija oblika materijala potrebno je savladati određeni otpor materijala u koji se utiskuje. Plastična deformacija je objektivni kriterijum za određivanje kvaliteta utiskivanja. Okvirna visina (dubina) utisnutih elemenata iznosi između 0,3 mm i 0,6 mm (Blechsmidt, 2013).

Na slici 3.21 su prikazani pojedinačni dijagrami zavisnosti vremena deformacije materijala za utiskivanje za različite vrste deformacija (Konstantinović,1997).



Slika 3.21: Deformacija prilikom utiskivanja u zavisnosti od vremena: elastična (a), elastično-plastična (b), plastična (c), gde je  $\epsilon$  veličina deformacije (opterećenje),  $p-t_0$  – rasterećenje,  $t$  - vreme deformacije i relaksacije (Konstantinović, 1997)

Utiskivanjem nastaju tri različite deformacije: elastična, elastično-plastična i plastična:

$$\epsilon_{uk} = \epsilon_e + \epsilon_{ep} + \epsilon_p \quad (1)$$

Gde je  $\epsilon_{uk}$  konačna deformacija,  $\epsilon_e$  elastična deformacija,  $\epsilon_{ep}$  elastično-plastična deformacija, a  $\epsilon_p$  plastična deformacija.

Wilken (ed. Holik, 2013) definiše utiskivanje kao formiranje materijala pritiskanjem. Kako bi se promenio oblik papira potrebno je savladati otpor materijala. Neophodan pritisak  $\sigma$  zavisi od površine elemenata koji se utiskuju  $A$  i specifičnog otpora materijala  $\sigma_0$ :

$$F = c \cdot \sigma_0 \cdot A \quad (2)$$

gde je  $c$  korekcionni faktor. Elastična deformacija materijala prestaje nakon delovanja pritiska, a plastična deformacija definiše krajnji izgled utisnutih elemenata. Papir i karton obično može biti kompresovan za približno 50%, od čega 20% čini elastična deformacija.

Po Konstantinoviću, radni parametri koji utiču na kvalitet utiskivanja su: pritisak, temperatura forme za utiskivanje i vreme kontakta forme za utiskivanje sa materijalom za utiskivanje.

Temperatura forme je uglavnom kontrolisana termostatom ili regulatorom temperature i određuje se prema materijalu za utiskivanje i vrsti folije ako je u pitanju utiskivanje sa folijom. Optimalna kombinacija pritiska i temperature proizvešće kvalitetan rezultat utiskivanja. Nižim pritiskom i višom temperaturom se postižu isti rezultati kao i primenom višeg pritiska i niže temperature. Kod utiskivanja sa folijom, veće temperature alata dovode do povećane apsolutne deformacije, boljeg poravnavanja površine presvlačnog materijala i veće oštine utisnutih ivica (Konstantinović, 1997).

Povećavanjem ili smanjivanjem prostora (zazora) između ploča za utiskivanje moguće je menjati pritisak utiskivanja. Optimalan pritisak zavisi od vrste i osobina materijala, vlažnosti materijala, temperature alata za utiskivanje i vrste forme za utiskivanje. Orijentacioni pritisak utiskivanja bez folije je 400-650 kp/cm<sup>2</sup> (39,2-63.7 MPa) na dubini utiskivanja od 0,18 mm do 0,25 mm, a sa folijom 250-300 kp/cm<sup>2</sup> (24,5-34.3 MPa) na dubini utiskivanja od 0,08 mm do 0,12 mm (Konstantinović, 1997). Blechschmidt (2013) navodi da je neophodan pritisak prilikom utiskivanja između 25 MPa i 35 MPa.

Kontaktno vreme se definiše kao vreme delovanja zagrejanog alata za utiskivanje na materijal za utiskivanje. Povećanjem vremena utiskivanja, povećava se i nepovratna deformacija na utisnutom materijalu. Vreme kontakta zavisi od stepena automatizacije i konstrukcije mašina za utiskivanje, površinske strukture materijala, sastava i osobina materijala, kao i od vrste utiskivanja (Konstantinović, 1997). Okvirno kontaktno vreme po Blechschmidt (2013) je između 0,3 i 3 sekunde.

Istraživanja u okviru ove disertacije obaviće se na tri vrste papira (nepremazni, premazni i voluminozni), različitih gramatura u okviru svake vrste, kako bi se analizirao učinak alata izrađenih aditivnim i konvencionalnim tehnikama. Alati će biti izrađeni tehnikom hemijskog nagrizanja magnezijuma, FDM i SLA tehnikom 3D štampe. Fokus će biti na tehnikama utiskivanja bez folije. Za utiskivanje bez folije se neće koristiti temperatura prilikom utiskivanja. Pritisak i kontaktno vreme utiskivanja će biti određeno u preliminarnom istraživanju kako bi se došlo do optimalnih vrednosti.



## 4. AKTUELNO STANJE U OBLASTI ISTRAŽIVANJA TEHNIKA 3D ŠTAMPE

3D štampa poslednjih godina se sve učestalije koristi za izradu konačnih funkcionalnih delova bilo da se radi o industrijskoj ili o kućnoj upotrebi. Ovim se praktično prevazilazi upotreba ograničena na modele i prototipe i zalazi se u područje aditivne proizvodnje. Karakterizacija materijala koji se koriste u procesima aditivne proizvodnje, optimizacija digitalnog 3D modela pre štampe, ispitivanje uticaja procesnih parametara i završne obrade na kvalitet 3D štampanih delova (mehaničke i termalne osobine, kvalitet proizvedenih površina, dimenzionalnu stabilnost, itd.) neke su od tema kojima se bave istraživanja u ovoj oblasti.

### 4.1 Ispitivanja mehaničkih karakteristika delova dobijenih FDM tehnikom 3D štampe

Radi adekvatne primene 3D štampanih alata u grafičkoj proizvodnji, neophodno je znati koji parametri utiču na kvalitet štampanih delova. Sprovedeno je dosta istraživanja u kojima su se autori bavili uticajem procesnih faktora na mehaničke osobine FDM štampanih delova. To su: ugao rastera (smer ekstrudovanih redova žice u odnosu na x-osu štampanjuće platforme) (Ahn i saradnici, 2002; Tymrak i saradnici, 2014; Bellini i Güçeri, 2003; Mitrović i Mišković, 2016), debljina sloja (Letcher i saradnici, 2015), temperatura ekstrudovanja filameta (Drummer i saradnici, 2012), širina deponovanog filameta (Bellini i Güçeri, 2003), orijentacija modela na platformi za štampu (Ahn i saradnici, 2002; Bellini i Güçeri, 2003), količina vazdušnih džepova između deponovanih slojeva i redova (poroznost) (Bellini i Güçeri, 2003, tip popune (infill) (Hwang i saradnici, 2015), broj spoljašnjih zidova modela (Lanzotti i saradnici, 2015) i brzina kretanja glave za štampu (Žarko i saradnici, 2017).

Sve češća upotreba FDM tehnike 3D štampe u industrijskoj proizvodnji zahteva bolje razumevanje mehaničkih i termalnih osobina korišćenih materijala. Mehaničke osobine FDM štampanih uzoraka su u dosadašnjim literaturnim navodima karakterisane upotrebom ispitivanja zatezanjem, ispitivanja sabijanjem (pritiskanjem) u cilju izučavanja različitih uticajnih faktora. Uticaj orijentacije rastera na zateznu čvrstoću štampanih uzoraka je ispitan u radovima (Ahn i saradnici, 2002; Tymrak i saradnici, 2014; Giannatsis i saradnici, 2012; Montero i saradnici, 2001). Es-Said i saradnici (2000), Thomas i Renaud (2003), Perez i saradnici (2014) otkrivaju da adhezijska veza između redova i slojeva deponovanog materijala, skupljanje redova i poroznost cele strukture utiču na zateznu čvrstoću i na anizotropnost objekta štampanog FDM tehnikom štampe.

Zatezna čvrstoća ABS štampanih delova FDM tehnikom štampe je u literaturnim navodima između 11 MPa i 40 MPa (Tymrak i saradnici, 2014; Bellini i Güçeri, 2003; Torrado i saradnici, 2015). Moguće objašnjenje u ovako velikom rasponu izmerenih vrednosti je u anizotropnosti objekata (Ahn i saradnici, 2002). Ani i saradnici (2002) su ustanovili da su test uzorci dobijeni brizganjem ABS P400 termoplastičnog materijala imali vrednost zatezne čvrstoće od 26 MPa, a FDM štampani uzorci sa isprepletanom orijentacijom rastera ( $45^\circ/45^\circ$  i  $0^\circ/90^\circ$ ) vrednost zatezne čvrstoće 28-35% manju od uzoraka dobijenih brizganjem.

Novakova-Marcincinova i Novak-Marcincin (2013) su sproveli istraživanje u kojem su testirali zateznu čvrstoću ABS uzoraka štampanih FDM tehnikom štampe. Izmerena vrednost zatezne čvrstoće je bila 28.1 MPa, a izduženje u trenutku loma 4,88%. U radu Weng i saradnika (2016) merena je vrednost zatezne čvrstoće ABS uzoraka štampanih FDM tehnikom štampe. Poređene su

vrednosti zatezne čvrstoće uzoraka dobijenih od čiste ABS termoplastike i od kompozita ABS plastike i nanočestica montmorilonita. Rezultati su pokazali da je vrednost zatezne čvrstoće čistih ABS uzoraka iznosila 27,59 MPa, a modul elastičnosti 1,2 GPa. Carrasco i saradnici (2010) su u svom radu prezentovali vrednosti mehaničkih osobina PLA uzoraka u poređenju sa polistirenom (PS), polipropilenom (PP) i polietilenteraftalat (PET). Vrednost zatezne čvrstoće 3D štampanih PLA uzoraka je varirala između 48 MPa i 110 MPa, izduženje pre loma je variralo od 2,5% do 100%, a modul elastičnosti od 3,5 GPa do 3,8 GPa.

Drummer i saradnici (2012) otkrivaju da temperatura ekstrudovanja materijala kroz diznu glave štampača, takođe ima značajan uticaj na mehaničke osobine PLA štampanih objekata. Uzorci štampani temperaturom dizne od 225 °C imali su veću zateznu čvrstoću u poređenju sa uzorcima štampanim pri temperaturi dizne od 215 °C i 235 °C. Pri temperaturi od 215 °C, uzorci su imali vrednost zatezne čvrstoće 20 i 25 MPa, izduženje pri lomu približno 0,75% i modul elastičnosti između 2,5 GPa i 3 GPa. U radu Letcher i Waytashek (2014) testiran je uticaj ugla rastera FDM štampanih 3D uzoraka od PLA materijala pomoću MakerBot Replicator 2x uređaja. U slučaju uglova od 0°, 45° i 90° uzorci su imali vrednosti zatezne čvrstoće od 58,45 MPa, 64,03 MPa i 54,01 MPa sa izduženjem prilikom loma od 2,02%, 2,5% i 4,14% respektivno.

Tymrak i saradnici (2014) su istraživali mehaničke osobine uzoraka izrađenih od ABS i PLA materijala na FDM štampaču RepRap. Testirali su uticaj dva parametra: orijentacije rastera (0°/90° i 45°/-45°) i visine slojeva (0,2 mm, 0,3 mm i 0,4 mm) na vrednost zatezne čvrstoće. Srednja vrednost zatezne čvrstoće kod uzoraka od ABS materijala bila je 27,7 MPa sa 1,92% izduženja pri lomu i elastičnim modulom od 1,867 GPa. Kod PLA uzoraka ove vrednosti pri istom uglu rastera bile su veće (54,9 MPa za zateznu čvrstoću, 1,88% izduženja pri lomu i elastičnim modulom od 3,336 GPa).

Beniak i saradnici (2015) dolaze do nižih vrednosti zatezne čvrstoće kod uzoraka izrađenih od ABS materijala, ali veće vrednosti izduženja pri lomu kod PLA uzoraka. Ove vrednosti su dobijene pri uglovima rastera svakog sloja od 0°, 45° i 90°, a ne naizmenično pod uglovima od 0°/90°. U ovom radu su takođe prijavljeni rezultati zatezne čvrstoće za uzorke dobijene brizganjem ABS (50 MPa) i PLA (40 MPa) materijala u pripremljene kalupe, kako bi se mogle porediti vrednosti sa uzorcima dobijenim FDM tehnikom 3D štampe. Ustanovljeno je da su uzorci dobijeni FDM tehnikom imali slabiju zateznu čvrstoću, ali i deset puta manju vrednost istezanja pri lomu. Slabije vrednosti zatezne čvrstoće uzoraka štampanih FDM tehnikom 3D štampe su posledica samog procesa gde uzorak nastaje topljenjem niti filameta u redovima i slojevima, što kao rezultat formira poroznu strukturu sa vazдушnim džepovima između deponovanih filamenata. Međutim ako se otopljene niti filamenata deponuju gusto jedna pored druge sa minimalnom debljinom sloja (filameta) i unutrašnjom popunom od 100%, može se postići velika gustina, a samim tim i bi se vrednosti čvrstoće približile onim dobijenim u slučaju uzoraka izrađenim brizganjem plastike. U radu Wu i saradnika (2015) otkriveno je da su uzorci dobijeni konvencionalnom tehnikom brizganja ABS plastike imali vrednost zatezne čvrstoće od 37 MPa, a uzorci dobijeni FDM tehnikom 3D štampe zateznu čvrstoću od 27,1 MPa.

Istraživači su se bavili i pritisnom čvrstoćom uzoraka izrađenih FDM tehnikom 3D štampe. Wu i saradnici (2015) su istraživali uticaj debljine sloja i ugla rastera na mehaničke osobine uzoraka od ABS i PEEK materijala izrađenih FDM tehnikom. Vrednost pritisne čvrstoće uzoraka od PEEK materijala je bilo teško uočiti jer se materijal prilikom testiranja pokazao kao duktilan. Kod oba materijala nije mogla jasno da se izdvoji vrednost pritisne čvrstoće pri kojoj dolazi do loma, jer se materijal polako sabijao, a slojevi klizali. Divyathej i saradnici (2016) su takođe istraživali uticaj debljine slojeva uzoraka od ABS materijala štampanih FDM tehnikom 3D štampe na pritisnu čvrstoću. Testirane su debljine slojeva od 0,1 mm, 0,15 mm i 0,2 mm. Rezultati su pokazali da pri

debljini sloja od 0,2 mm, uzorci imaju veće vrednosti pritiskne čvrstoće od uzoraka izrađenih tehnikom brizganja. Međutim, srednja vrednost pritiskne čvrstoće (yield strength) kod uzoraka od ABS materijala bila je između 2,467 MPa i 3,056 MPa što je iznenađujuće manje u poređenju sa rezultatima Wu i saradnika (2015). Ahn i saradnici (2002) merili su pritisku čvrstoću ABS materijala. Ispitivan je uticaj orijentacije deponovanih slojeva na pritisku čvrstoću uzoraka i pronađeno je da su uzorci sa deponovanim filamentima u pravcu delovanja sile pritiska imali veće vrednosti pritiskne čvrstoće u poređenju sa uzorcima čiji je pravac prostiranja slojeva bio normalan na pravac delovanja sile pritiska. Srednja vrednosti pritiskne čvrstoće za oba pravca filamenata bio je između 30 MPa i 40 MPa, ali nisu prikazane informacije niti grafikoni koji bi detaljnije opisali ponašanje uzorka štampanog FDM tehnikom štampe prilikom delovanja sile pritiska. Sood i saradnici (2012) istražuju uticaj pet procesnih faktora (orijentaciju rastera, debljinu sloja, ugao rastera, širinu rastera i vazdušne džepove) na pritisku čvrstoću. Vrednosti pritiskne čvrstoće priložene u ovom radu su 7,448 MPa i 16,98 MPa, što zavisi od posmatranog parametra. Lee i saradnici (2007) istražuju uticaj orijentacije deponovanih slojeva na pritisku čvrstoću uzoraka od ABS materijala izrađenog FDM tehnikom štampe. Uzorci sa orijentacijom slojeva paralelnom sa pravcem delovanja sile pritiska imali su veće vrednosti pritiskne čvrstoće (41,26 MPa) od uzoraka sa pravcem prostiranja slojeva normalnom sa pravcem delovanja sile (36,47 MPa). Iz prethodno navedenih istraživanja može se zaključiti da uzorci izrađeni FDM tehnikom štampe pokazuju anizotropnu prirodu prilikom testiranja mehaničkih osobina. Parametri procesa štampe utiču na izrađene uzorke uzoraka menjajući im unutrašnju strukturu i jačinu veza između deponovanih slojeva. Nejednaki ciklusi grejanja i hlađenja materijala u toku štampe uzorka FDM tehnikom 3D štampe takođe mogu da utiču na jačinu ovih veza, a samim tim i na mehaničke osobine (Sood i saradnici, 2010). U svim navedenim istraživanjima testirano je mnoštvo uticajnih faktora na sobnoj temperaturi od  $23 \pm 2^\circ$  i relativnoj vlažnosti vazduha od  $50 \pm 5\%$  kao što je definisano standardom ISO R291:2008 (2008). Takođe, ostaje nejasno kako su merene vrednosti pritiskne čvrstoće u ovim istraživanjima imajući na umu veoma duktilnu prirodu ovih materijala u toku samog testiranja. Nisu priloženi detaljni izveštaji o momentu merenja pritiskne čvrstoće kao ni konzistentnost mehaničkih osobina uzoraka izrađenih FDM tehnikom štampe.

## 4.2 Ispitivanja termo-mehaničkih karakteristika delova izrađenih FDM tehnikom 3D štampe

Mehaničke osobine konačnog proizvoda zavise i od karakteristika samog materijala (čvrstoća, tvrdoća, temperatura ostaklivanja i topljenja, specifična gustina itd.). Istraživanja u ovom pravcu bave se uglavnom testiranjem kompozitnih materijala koji se koriste u aditivnoj proizvodnji. Ova istraživanja imaju za cilj da pronađu sastav materijala koji će imati poboljšana mehanička, hemijska, termalna i/ili vizuelna svojstva. Za utvrđivanje termalnih i termo-mehaničkih osobina termoplastičnih materijala koriste se dinamičko mehanička termalna analiza (DMTA) i dinamičko mehanička analiza (DMA), zatim za utvrđivanje mase materijala u toku zagrevanja koristi se termogravimetrijska analiza (TGA), a za utvrđivanje energije koja se skladišti i otpušta prilikom zagrevanja materijala koristi se diferencijalno skenirajuća kalorimetrija (DSC).

Celli i saradnici (1991) istraživali su termalne osobine i fizičko starenje poli (L-laktične kiseline) različitih molekularnih težina. Zaključeno je da nakon starenja na sobnoj temperaturi do temperatura ispod tačke stakljenja ( $T_g$ ), krutost PLA materijala vremenom raste. Tačka stakljenja kod polilaktične kiseline različitih molekularnih težina bila je u rasponu između  $55^\circ\text{C}$  i  $64^\circ\text{C}$  a temperatura topljenja ( $T_m$ ) u rasponu između  $156^\circ\text{C}$  i  $186^\circ\text{C}$ .

Termalne osobine termoplastičnih materijala i njihovih kompozita takođe je istraživana. Petersson i saradnici (2007) istraživali su strukturu i termalne osobine polilaktične kiseline



pomešane sa celuloznim nano ljuspicama. Cilj ovakvog kompozita je povećanje temperaturnog opsega u kojem PLA materijal može biti korišćen. Termogravimetrijska analiza (TGA) i dinamičko mehanička termalna analiza (DMTA) pri testiranju zatezne čvrstoće je sprovedena kako bi se ispitala termalne osobine proizvedenih kompozita. PLA materijal korišćen u ovom radu imao je temperaturu stakljenja 58 °C, temperaturu topljenja 160 °C i gustinu 1,25 g/cm<sup>3</sup>. Pokazano je da je dodatak nano ljuspica poboljšao mehaničke osobine PLA materijala i u elastičnoj i u plastičnoj regiji. U radu Nikzad i saradnika (2011) istraživani su uticaj dodatka čeličnih i bakarnih čestica u ABS materijal na mehaničke osobine uzoraka izrađenih FDM tehnikom štampe. Čist ABS materijal korišćen u ovom istraživanju imao je tačku stakljenja od 118,93 °C. Dinamičko mehanička analiza (DMA) je korišćena za karakterizaciju viskoelastičnih osobina ovih kompozita. ABS kompoziti sa manjom veličinom dodatih čestica i manjom koncentracijom imali su povećanu krutost (manje vrednosti izduženja) u poređenju sa čistim ABS materijalom. Takođe je bilo primetno blago poboljšanje tačke stakljenja u slučaju kompozita sa dodatkom 10% čestica čelika. Istraživane su i mehaničke, termalne i morfološke osobine materijala od polilaktične kiseline (PLA), polipropilena (PP) i mešavine PLA/PP sa dodatkom tečne prirodne gume (LNR) u istraživanju Bijarimi i saradnika (2012). Prirodni PLA materijal je imao T<sub>g</sub> vrednost od 62 °C, a T<sub>m</sub> vrednost od 170 °C. Zatezna i savojna i udarna čvrstoća (Izod) su ispitivani pod ambijentalnim uslovima, a karakterizacija materijala je obavljena diferencijalnom skenirajućom kalorimetrijom (DSC) i termogravimetrijskom analizom (TGA). Oba kompozita (PLA/PP i PLA/PP/LNR) imali su niže temperature stakljenja i topljenja u poređenju sa prirodnim PLA materijalom. Zaključeno je da su izduženje pri lomu, savojna i udarna čvrstoća značajno povećane u slučaju PLA/PP/LNR kompozita.

Sun i saradnici su istraživali uticaj temperature platforme za štampu i temperature dizne u glavi štampača na jačinu veza između slojeva kod uzoraka od ABS P400 materijala izrađenih FDM tehnikom 3D štampe. Tačka stakljenja ovog materijala je bila 94 °C, termalna provodljivost  $k=0.177$  W/mK, specifična toplota  $C_p=2,080$  J/kgK, gustina  $\rho=1,050$  kg/m<sup>3</sup> i viskozitet na 240 °C  $\mu=5,100$  Pa·s). Eksperiment je pokazao da temperatura platforme za štampu kao i varijacija temperatura dizne, a samim tim i temperatura deponovanog filameta blizu dizne, kao i vreme hlađenja između slojeva imaju značajnog efekta na unutrašnju strukturu i celokupni kvalitet veza između filamenata. Takođe je zaključeno da donji slojevi štampanog uzorka imaju manje vazdušne razmake između filamenata nego oni u gornjim slojevima što potvrđuje značajnost ciklusa grejanja i hlađenja deponovanih filamenata na jačinu njihovih međusobnih veza, a samim tim i na mehaničke osobine uzoraka štampanih FDM tehnikom 3D štampe.

Hwang i saradnici (2015), istraživali su uticaj temperature dizne u glavi štampača i unutrašnje popunjenosti uzoraka od ABS materijala i njegovih kompozita sa česticama čelika i bakra na termalnu provodljivost i zateznu čvrstoću u cilju izrade objekata velikih dimenzija bez pojave deformacija. Termalne osobine materijala su određene termo mehaničkom analizom (TMA) i diferencijalno skenirajućom kalorimetrijom (DSC). Tačka stakljenja čistog ABS materijala korišćenog za izradu kompozita u ovom istraživanju iznosila je 173,6 °C, a temperatura topljenja je iznosila 217 °C. Otkriveno je da unutrašnja popuna ima značajan uticaj na zateznu čvrstoću. Smanjenjem unutrašnje popune, zatezna čvrstoća štampanih uzoraka opada. Uzorci štampani pri temperaturi dizne od 220 °C imali su veće vrednosti zatezne čvrstoće i veće vrednosti izduženja pri lomu. Dodatak čestica bakra i čelika ABS materijalu, je nažalost, smanjilo vrednost zatezne čvrstoće uzoraka štampanih FDM tehnikom 3D štampe.

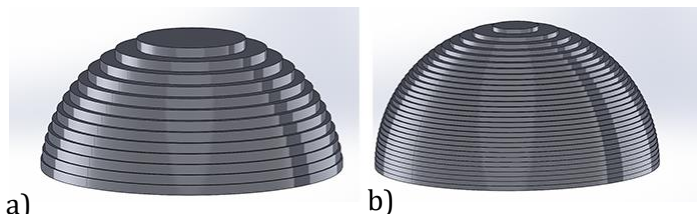
Tiganis i saradnici (2002) istraživali su starenje ABS materijala pri različitim temperaturama. Vreme starenja je bilo od 1 do 4 nedelje. Nakon određenog vremena starenja, testirana je zatezna i udarna čvrstoća na sobnoj temperaturi. Modul elastičnosti i izduženje pri lomu su takođe

beleženi. Otkriveno je da je termo-oksidativna degradacija ABS materijala zavisna od promene temperature, a da je degradacija mehaničkih osobina manja na nižim temperaturama starenja uzrokovajući veću krtost ABS polimera.

Mehaničke osobine uzoraka od ABS/montmorillonite (OMMT) nanokompozitnog materijala izrađenog FDM tehnikom štampe su istraživane i poređene sa mehaničkim osobinama uzoraka izrađenih standardnom metodom brizganja u radu Weng i saradnika (2016). Termalne osobine ovog ABS nanokompozita su takođe istražene. DMA, TGA i DSC metode su korišćene za istraživanje efekata OMMT čestica na termomehaničke i termalne osobine kompozita. Data je linearna ekspanzija, skladištena energija i termalna provodljivost materijala. Tačka stakljenja čistog ABS materijala je bila 99 °C. Koeficijent linearne ekspanzije čistog ABS materijala bio je  $9,82 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Zaključeno je da prisustvo OMMT čestica ABS materijalu značajno poboljšava termalne karakteristike uzoraka smanjujući vrednost linearne ekspanzije i povećavajući granicu stakljenja i skladištena energija. Mehaničke osobine nanokompozita su takođe poboljšane. I izmerene vrednosti zatezne čvrstoće i modula elastičnosti značajno su povećane sa dodatkom montmorilonita (OMMT). Izduženje pri lomu je u isto vreme smanjeno sa povećanjem koncentracije OMMT u ABS materijalu.

#### 4.3 Uticaj završne obrade (post-processing) na karakteristike delova dobijenih FDM tehnikom 3D štampe

Objekte proizvedene FDM tehnikom 3D štampe karakteriše loš kvalitet površina zbog same prirode procesa gde se ekstrudirani materijal dodaje u redovima i slojevima. Zbog ove karakteristike na horizontalnim površinama (u xy ravni) obično su vidljive isprepletane niti deponovanog materijala, a na bočnim površinama budu vidljivi slojevi obrazujući na taj način takozvani stepenast efekat (engl. *staircase effect*) (Slika 3.22).



Slika 3.22: Ilustracija stepenastog efekta na primeru sa debljim slojevima (a) i manje izražen stepenast efekat (b) (geekabilityblog, 2016)

Kako bi se ove nepravilnosti ublažile ili potpuno uklonile obično se koriste neke od metoda završne obrade (Gibson i saradnici, 2010):

- mehanička (popunjavanje šupljina, obrada brusnim papirom, poliranje)
- hemijska (nanošenje zaštitnog sloja i boje, reakcija sa isparljivim rastvaračima, potapanje u rastvarače, nanošenje epoksidne smole, nanošenje metalnog sloja)



Slika 3.23: (S leva na desno) Neobrađen uzorak izrađen FDM tehnikom 3D štampe, mehanički obrađen uzorak i hemijski obrađen uzorak (Armstrong, 2018)

Pandey i saradnici (2003) istraživali su upotrebu mašine sa zagrejanim alatom za sečenje za poboljšanje izgleda površine uzoraka štampanih FDM tehnikom štampe. U radu Galantucci i saradnika (2010), uzorci od ABS materijala izrađeni FDM tehnikom štampe potapani su u rastvor dimetil ketona (acetona -  $(\text{CH}_3)_2\text{CO}$ ) i vode od 180 do 420 sekundi kako bi se postigla glatka površina štampanih uzorka. Rezultati ovog rada ukazuju da hemijska obrada može drastično da poboljša izgled površina ABS uzoraka, poveća njihovu savojnu čvrstoću i smanji zavisnost ovih osobina od ugla rastera štampanog uzorka. Međutim, zatezna čvrstoća ovako tretiranih uzoraka je smanjena. Peroco i saradnici (2012) su istraživali uticaj obrade uzoraka rastvorom dimetil ketona (acetona) i vode na površinsku hrapavost uzoraka od ABS materijala izrađenih FDM tehnikom 3D štampe. U ovom istraživanju uzorci su tretirani ovim rastvorom u trajanju od 300 sekundi. Zaključeno je da je površinska hrapavost uzoraka smanjena za približno 90% sa poboljšanjem mehaničkih osobina u pojedinim slučajevima. Singh i saradnici (2016) su istraživali uticaj oblika štampanih uzoraka, procenat unutrašnje popune i izloženost isparenjima acetona na površinsku hrapavost i dimenzionalnu stabilnost uzoraka od ABS materijala. Izloženost isparenjima acetona su bila 10 s, 15 s i 20 s. Zaključeno je da se površinska hrapavost smanjuje povećanjem izloženosti uzoraka isparenjima acetona.

Za merenje vrednosti površinske hrapavosti najčešće se koristi parametar srednje vrednosti ( $R_a$ ). Ovaj faktor predstavlja aritmetičku sredinu devijacija profila površine od centralne linije ( $l_m$ ) duž merenja uzorka (ISO 4287, 1997). Ova definicija može da se prikaže jednačinom:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (3)$$

Gde je  $y(x)$  vrednost profila hrapavosti, a  $l$  merena dužina.

Još jedan parametar koji se često primenjuje je RMS hrapavost ( $R_q$ ). Nasuprot  $R_a$  parametru,  $R_q$  parametar bolje detektuje greške merenja. Međutim  $R_q$  parametar ne može da odredi da li je u pitanju greška u toku merenja ili generalna tendencija pogoršanja površinske hrapavosti (Pérez, 2002).  $R_q$  parametar se definiše pomoću jednačine:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l y^2(x) dx} \quad (4)$$

Pérez (2002) u svom radu dolazi do zaključka da je površinska hrapavost u velikoj meri zavisna od debljine deponovanog sloja uzorka izrađenog FDM tehnikom štampe. Međutim, Perez ističe da je veoma bitno koji od ova dva parametra se uzima u obzir i da li su dobijene vrednosti tih parametara posledica greške merenja ili samog proizvodnog procesa.

Garg i saradnici (2016) su u svom istraživanju merili površinsku hrapavost uzoraka od ABS materijala izrađenih FDM tehnikom štampe. Izučavan je uticaj sedam različitih orijentacija rastera ( $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  i  $90^\circ$ ) i hemijskog tretmana hladnim isparenjima acetona na površinsku hrapavost i dimenzionalnu stabilnost uzoraka. Rezultati su pokazali da najmanja vrednost površinske hrapavosti je dobijena pri orijentaciji štampe uzorka od  $90^\circ$ . Rezultati su pokazali da je tretman hladnim isparenjima acetona prouzrokovalo značajno poboljšanje parametara površinske hrapavosti i uklanjanje stepenastog efekta sa veoma malom promenom u dimenzijama uzorka. U radu Zhang i saradnika (2017) istraživao je uticaj završne hemijske obrade na termomehaničke osobine uzoraka od ABS materijala izrađenih FDM tehnikom štampe. Korišćena su isparenja acetona u procesu završne obrade, a za merenje termo mehaničkih osobina korišćena je dinamičko mehanička analiza (DMA). Zaključeno je da proces završne obrade acetonom slabi termo-mehaničke osobine FDM štampanih uzoraka od ABS materijala.

U svom istraživanju Jin i saradnici (2017) su ispitivali hemijsku obradu FDM štampanih PLA uzoraka i njen uticaj na njihovu zateznu čvrstoću. Kao rastvarač je korišćen dihlormetan -  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  (p.a. 99%), odnosno njegova hladna isparenja, a sam tretman je trajao 30 sekundi. Obradeni uzorci su pokazali manju površinsku hrapavost i veću vrednost istezanja, ali smanjenu zateznu čvrstoću. Takođe, poznato je da uticaj na površinske osobine ima tretman tetrahidrofuranom -  $(\text{CH}_2)_4\text{O}$ , ali istraživanja sa ovim rastvaračem nisu rađena na PLA uzorcima. Završna obrada PLA uzoraka štampanih FDM tehnikom 3D štampe i obradenim hemijskom metodom u acetonskoj kupki ili pomoću isparenja acetona nije detaljno istražena. Po rezultatima istraživanja Sato i saradnika (2013), može se zaključiti da acetone kao organski rastvarač može da se koristi za hemijsku obradu uzoraka od PLA materijala. Oni su u svom istraživanju ispitali uticaj 60 različitih organskih rastvarača na amorfne PLA filmove. Acetone kao polarni rastvarač ( $\text{HSP}_{\text{ACETON}} = 20,1 \text{ MPa}^{1/2}$ ) je pogodan za rastvaranje PLA filma ( $\text{HSP}_{\text{PLA}} = 21,2 \text{ MPa}^{1/2}$ ). Ako su HSP vrednosti organskog rastvarača i testiranog polimera približne, za rastvarač se podrazumeva da kompatibilan sa polimerom. Glavni problem kod završne obrade FDM štampanih uzoraka je u većini slučajeva gubitak mehaničkih osobina, zatim promene dimenzija (tolerancije) ili vreme potrebno za završnu obradu.

Kvalitet odštampane površine može se predvideti i poboljšati još pre samog procesa štampe, optimizacijom nekih od procesnih faktora FDM tehnike 3D štampe. Po rečima iz istraživanja Bual i Kumar (2014) metode za poboljšanje površinske hrapavosti FDM štampanih uzoraka mogu da se podele u četiri kategorije:

1. Optimizacija orijentacije uzorka na platformi za štampu
2. Strategije sečenja STL modela (slajsing metode)
3. Optimizacija parametara proizvodnje
4. Završna obrada

Sa prvom metodom su se bavili u svom istraživanju Thrimurthulu i saradnici (2004) koji su predložili algoritam za postizanje optimalne orijentacije objekta na podlozi za štampu kako bi se još pri samoj štampi poboljšao kvalitet površina, i smanjilo vreme štampe.

Drugom metodom su se bavili u svom radu Mahapatra i Sood (2012) u kom je zaključeno da na površinsku hrapavost najviše utiče vrsta popune, a da su orijentacija objekta prilikom štampe i debljina deponovanog sloja odgovorni za poboljšanje kvaliteta donjih i bočnih površina. Prilikom slanja STL dokumenta softveru za pripremu štampe, 3D model prolazi kroz proces „sečenja“ (*slicing*), odnosno proces deljenja modela na slojeve. Što je ovaj proces bolje rešen veća je verovatnoća da će se izbeći greške prilikom štampe, a time će konačni izgled objekta biti bolji. Rianmora i Koomsap (2010) su predložili pristup „adaptivnog sečenja“ koji koristi tehnike obrade slike za određivanje optimalne debljine sloja koja će dovesti do brže štampe sa očuvanjem dobrog kvaliteta površine.

Treću metodu su istraživali Vasudevarao i saradnici (2000) i Anitha (2001) i saradnici koji ističu debljinu deponovanog sloja kao najbitnijeg parametra za kvalitet površine i jačinu veza između slojeva, a samim tim i mehaničkih osobina objekata. Chohan i saradnici (2016) razvili su matematički model zasnovan na Taguchi optimizaciji i ANOVA analize za srednju vrednost površinske hrapavosti uzoraka od ABS materijala izrađenih FDM tehnikom štampe tretiranih isparenjima rastvora 30% dekafluoropentana i 70% dihloretilena. Vreme izloženosti isparenjima je bilo između 10 i 20 s. Ovaj model je sposoban da izračuna izlazni parametar u formi promene procenta površinske hrapavosti u funkciji vremena izloženosti isparenjima i predvidi finalnu površinsku hrapavost FDM štampanih uzoraka.

#### 4.4 Uticajni faktori na proizvodnju objekata FDM tehnikom 3D štampe

Kvalitet uzorka izrađenog FDM tehnikom 3D štampe može se karakterisati preko više izlaznih parametra. Jedna od najbitnijih i najčešće istraživanih je površinska hrapavost. Pored površinske hrapavosti u literaturi je najčešće istraživan izlazni parametar zatezne čvrstoće, zatim pritisne čvrstoće, savojne čvrstoće, dimenzionalne stabilnosti i izučavanje termalnih i morfoloških karakteristika.

U radu Mohamed i saradnika (2015) navedena je većina ulaznih parametara obuhvaćena dosadašnjom literaturom koji utiču na završni kvalitet štampanog uzorka. Na slici 3.24 prikazani su ti parametri. S obzirom da u ovoj tehnici štampe na kvalitet izlaznih parametara utiče mnoštvo ulaznih parametara, neophodno je osmisliti eksperiment definišući željene nivoe ulaznih parametara, kako bi se što preciznije okarakterisale željene osobine izrađenog uzorka. Poslednjih godina, za optimizaciju dizajna procesa i dizajna proizvoda, često se koriste Taguchi tehnike zasnovane na pojednostavljenju nacrta eksperimentalnog plana. Ovo omogućava kraće vreme i manje troškove izvođenja eksperimenta. Tehnike optimizacije omogućavaju podešavanja vrednosti parametara koji mogu da obezbede:

1. Maksimalni povrat budžeta
2. Najefikasnija podešavanja mašina
3. Najefikasniju raspodelu sirovina
4. Optimalnu raspodelu radne snage kako bi se smanjio potreban rad i ukupno vreme proizvodnje

UTICAJNI PARAMETRI U FDM TEHNICI 3D ŠTAMPE					
KONCEPT MODELA	ORIJENTACIJA UZORKA NA PLATFORMI ZA ŠTAMPU		RAZMAK IZMEĐU DEPONOVA FILAMENATA	ORIJENTACIJA UZORKA NA PLATFORMI ZA ŠTAMPU	
	PODEŠAVANJA FDM ŠTAMPAČA	NEPROCESIRANI MATERIJAL			
STL FAJL	U PRAVCU X OSE	TEMPERATURA DIZNE	RAZMAK IZMEĐU DEPONOVA FILAMENATA	U PRAVCU X OSE	GUSTINA
	U PRAVCU Y OSE	PREČNIK DIZNE	UGAO RASTERA	U PRAVCU Y OSE	BOJA
	U PRAVCU Z OSE	TEMPERATURA PLATFORME ZA ŠTAMPU	VRSTA UNUTRAŠNJE POPUNE	U PRAVCU Z OSE	
		KALIBRACIJA ŠTAMPAČA	DEBLJINA SLOJA		
			PROCENAT UNUTRAŠNJE POPUNE		
			SKUPLJANJE OBJEKTA PO X, Y I Z OSI		
			DEBLJINA (BROJ) KONTURNIH (SPOLJAŠNJIH) ZIDOVA OBJEKTA		

Slika 3.24: Uticajni parametri na kvalitet uzoraka izrađenih FDM tehnikom 3D štampe (Mohamed i saradnici, 2015)

Dizajn eksperimenata (engl. *Design of experiments - DOE*) kao koncept, uveo je Fisher (Fisher, 1925), ali najviše istraživanja o ovoj temi je urađeno u okviru akademske zajednice (Ranjit, 2001). U svom radu Fisher je demonstrirao korisnost svog koncepta u oblasti poljoprivrede. Analizirao je optimalnu količinu vode, kiše, sunčeve svetlosti, prehranjivača i stanja zemljišta potrebnih da se dobije najbolji prihod (Fisher, 1926). Taguči je proširio koncept dizajna eksperimenta uvođenjem novog pristupa (Taguchi, 1986). Ovaj pristup sastojao se u podeli problema optimizacije u dve kategorije, koristeći logaritamsku funkciju željenog izlaza kao ciljanu funkciju za optimizaciju (nazvan signal-šum odnos – engl. Signal to Noise – S/N ratio). Problemi optimizacije su podeljeni u dve kategorije:

- Statični problemi (više kontrolnih faktora direktno određuju željenu vrednost izlazne promenjive). Ovde se koriste tri pristupa: manje je bolje (smaller-the-better), kada je poželjna što manja vrednost izlazne promenjive; veće je bolje (larger-the-better), kada je poželjna što veća vrednost izlazne promenjive; i nominalno je bolje (nominal-is-better), kada je definisana poželjna vrednost i nijedna vrednost ispod ili iznad te vrednosti izlazne promenjive nije poželjna.
- Dinamični problemi (kada jedan ulazni faktor direktno određuje vrednost izlazne promenjive)

Cilj svakog proizvodnog procesa se može okarakterisati kao: najbolji kvalitet – najmanje kvarova – visoka produktivnost. Ovo se može postići u potpunim faktorskim nacrtom eksperimenta, međutim u tom slučaju je potrebno testirati interakciju svakog nivoa ulaznih faktora međusobno što produžava proces i povećava troškove. Suprotno od potpunog faktorskog nacrta, Taguči metod smanjuje broj potrebnih eksperimenata na razuman broj, koristeći ortogonalne nizove. Odabir adekvatnog ortogonalnog niza je najteži korak Taguči pristupa (Bolboaca i Jäntschi, 2007). Primer ortogonalnog niza za četiri ulazna faktora sa po tri nivoa vrednosti prikazan je u tabeli 3.1.

Tabela 3.1: Primer ortogonalnog L9 nacrta

L9 NACRT				
Test #	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

U tabeli 3.1 je prikazan L9 ortogonalni niz Taguči metode, kojim bi se potreban broj eksperimenata od 81 (3<sup>4</sup>) ukoliko bi se koristio potpuni faktorski nacrt, smanjio na svega devet.

U radu Anitha i saradnika (2001) korišćena je Taguči metoda za optimizaciju eksperimentalnog plana za definisanje kvaliteta uzoraka izrađenih FDM tehnikom štampe pomoću izlaznog parametra površinske hrapavosti (R<sub>a</sub>). Testirane su tri ulazne promenjive: debljina sloja, širina deponovane niti i brzina kretanja glave za štampu svaka sa po tri nivoa vrednosti. Za punu

faktorsku analizu bilo bi neophodno testirati ukupno  $3^3$  kombinacija nivoa ulaznih faktora (ukupno 27 kombinacija). Pomoću Taguči metode, odnosno L18 nacrta, broj potrebnih kombinacija za testiranje sveden je na 18, što znatno skraćuje vreme i troškove eksperimenta. Pripremom eksperimentalnog plana i analizom rezultata, dobija se značaj svakog od testiranih faktora, odnosno njihov rank i koja kombinacija nivoa testiranih faktora vodi do najboljih vrednosti testiranog izlaznog parametra. Anitha i saradnici (2001) su zaključili da je debljina sloja najuticajniji faktor i da debljina sloja od 0,3556 mm, širina niti od 0,537 mm i brzina kretanja glave za štampu od 200 mm/min, proizvodi uzorke sa najmanjom  $R_a$  vrednosti površinske hrapavosti.

Lee i saradnici (2005) koriste Taguči metodu za optimizaciju dizajna eksperimenta, kako bi pronašli optimalne procesne parametre za štampu prototipa katapulta od ABS materijala FDM tehnikom štampe. Korišteni su ortogonalni nacrti, glavni efekti, signal-to-noise (S/N) odnos i analiza varijanse ANOVA kako bi se pronašla kombinacija ulaznih faktora koja će proizvesti prototip sa optimalnim vrednostima elastičnosti u cilju postizanja najveće razdaljine izbačenog projektila koju ovaj katapult može da postigne. Testirana su ukupno četiri ulazna faktora (razmak između deponovanih filamenata, ugao rastera, širina rastera, debljina sloja), svaki sa tri nivoa vrednosti. Ova četiri faktora sa tri nivoa ukupno imaju osam stepeni slobode. U Taguči metodi stepeni slobode ortogonalnog niza mora da bude veći ili bar jednak stepenu slobode procesnih parametra. Prvi ortogonalni niz za ovu vrstu eksperimenta je standardni L9 niz, sa četiri kolone i devet redova (ukupno devet kombinacija sa varijacijom nivoa svakog faktora). Sa ovako pripremljenim eksperimentom (uzorcima) Lee i saradnici su bili u mogućnosti da odrede da kombinacija sa duplom vrednošću razmaka između deponovanih filamenta, cik-cak rasporedom rastera pod uglovima od  $30^\circ/60^\circ$ , širinom rastera od 0,655 mm i debljinom sloja od 0,178 mm dovode do željenih vrednosti izlaznih promenljivih.

Sood i saradnici (2009) takođe koriste Taguči metodu za poboljšanje dimenzionalne stabilnosti uzoraka od ABSP400 materijala izrađenih FDM tehnikom 3D štampe. Kao ulazni parametri testirani su: debljina sloja, orijentacija uzorka na platformi za štampu, ugao rastera, razmak između deponovanih filamenata i širina rastera na dimenzionalnu stabilnost kao zavisne promenjive. Rezultati su pokazali da su najveće razlike primećene u vrednostima širine i dužine testiranih uzoraka. Pronađeni su najuticajniji parametri kao i kombinacija nivoa svakog faktora koja dovodi do optimalnih vrednosti razlike dimenzija. S obzirom da je optimalna kombinacija nivoa parametara bila različita u slučaju sve tri dimenzije, pronađena je optimalna kombinacija koja uzima u obzir sve tri izlazne promenjive (širina, dužina i visina), pomoću sive Taguči metode (grey Taguch method). Testirano je ukupno pet ulaznih promenljivih, svaka sa po tri nivoa. Za punu faktorsku analizu bi bilo potrebno sprovesti ukupno 243 eksperimenta ( $3^5$ ), ali validni rezultati mogu se dobiti i korišćenjem Taguči metode koja smanjuje broj potrebnih eksperimenata. Ovde je korišćen L27 ortogonalni niz, koji smanjuje broj potrebnih eksperimenata na 27. Rezultati pokazuju da za minimalne promene u širini, dužini i visini uzorka optimalne vrednosti nivoa ulaznih promenljivih bile su za debljinu sloja od 0,178mm, orijentaciju od  $0^\circ$ , ugao rastera od  $0^\circ$ , širinu rastera od 0,4564 i maksimalan razmak između deponovanih filamenata od 0,008 mm.

U radu Xinhua i saradnika (2015) ustanovljen je teoretski model zasnovan na teoriji elastičnih filmova iz oblasti termoelastičnosti, a nacrt eksperimenta je urađen pomoću Taguči metode, kako bi se istražili mehanizmi koji utiču na deformaciju tankih ploča od PLA materijala izrađenih FDM tehnikom 3D štampe. Testirane su kombinacije ukupno pet procesnih parametara (debljina sloja, brzina kretanja glave za štampu, temperatura dizne, vrsta unutrašnje ispune i širina rastera), svaki sa po tri nivoa vrednosti. Za optimizaciju nacrta eksperimenta odabran je ortogonalni niz L27 sa ukupno 27 kombinacija nivoa odabrana četiri ulazna faktora. Analiza rezultata je sprovedena koristeći odnos signal-šum (signal-to-noise ratio – S/N ratio) i analiza varijanse –

ANOVA. Rezultati su pokazali da smanjenjem debljine sloja (koji je najuticajni faktor), značajno se povećava vrednost deformacije izrađene ploče. Takođe, što je štampani objekat veći i tanji veće su deformacije. Zatim, što je veća brzina kretanja glave za štampu, manje su deformacije. Manja temperatura dizne, vodi do manjih deformacija. Korišćenjem rastera koji se menja tako da su niti uvek paralelne ivicama objekta smanjuje procenat deformacije, a parametar širine rastera ima veoma mali uticaj na deformaciju objekta.

Optimizacijom procesa FDM tehnike 3D štampe bavili su se i mnogi drugi istraživači (Thrimurthulu i saradnici, 2004; Nancharaiah i saradnici, 2010; Horvath i saradnici, 2007; Wang i saradnici, 2007; Zhang i Peng, 2012; Sahu i saradnici, 2013; Laeng i saradnici, 2006; Zhang i Chou, 2008; Kumar i Regalla, 2012; Ahn i saradnici, 2002; Ang i saradnici, 2006; Percoco i saradnici, 2012; Rayegani i Onwubolu, 2014).

#### 4.5 Primena tehnika 3D štampe u industrijskoj proizvodnji

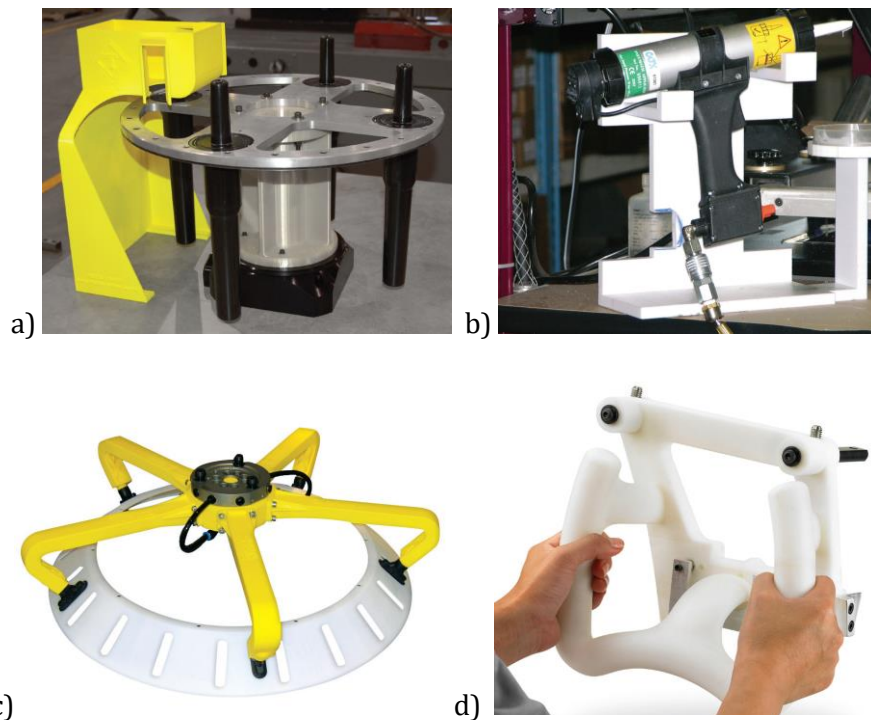
Aditivna proizvodnja podrazumeva proces izrade 3D objekata, baziranih na digitalnom 3D modelu. Za razliku od konvencionalnih tehnika obrade materijala (hemijsko nagrizanje, struganje, glodanje, brušenje i dr.) gde se konačni oblik dobija uklanjanjem materijala, kod 3D tehnika štampe konačni objekat se formira dodavanjem slojeva materijala. 3D štampa je svoju široku primenu našla u raznim granama industrije. Najzastupljenija je njena primena u automobilskoj i avio industriji kao i u medicini za izradu protetike, alata, zubnih proteza. U 2014. godini 3D štampa je bila najzastupljenija u aeronautičkoj (uključujući i vojnu industriju) sa 18%, u proizvodnom mašinstvu sa takođe 18%, u medicini 15-17%, u automobilskoj industriji sa 12%, u juvelirstvu sa 12%, u energetici sa manje od 5% i u drugim granama industrije sa manje od 20%, a do 2020. godine se predviđa da će udeo 3D štampe na tržištu porasti za približno 25% (ATKearney, 2015).

Glavni zadatak proizvodnje je poboljšanje kvaliteta, skraćivanje vremena proizvodnje i smanjenje troškova. U pojedinim segmentima proizvodnje upotreba tradicionalnih tehnika izrade alata može biti zamenjena efikasnijim metodama. Zamena tradicionalnih tehnika izrade alata, pribora i gotovih proizvoda tehnikama 3D štampe ne samo da je tema razmatranja, već su kod pojedinih kompanija poput BMW, Thermal Dynamics, Thogus i drugih, tehnike 3D štampe postale integralni deo industrijske proizvodnje.

Jedna od značajnih primena 3D tehnika štampe je u proizvodnji pribora za fiksiranje ili rukovanje proizvoda u toku proizvodnje ili za njegov lakši transport kroz proizvodni lanac. Kompanija Thogus je zamenila tradicionalnu metodu izrade pribora za fiksiranje FDM tehnikom 3D štampe, tvrdeći da je isplativije izraditi pribor pomoću 3D štampača, nego da čekaju od 7 do 10 dana koliko je potrebno trećem licu da im ovaj pribor izradi i dostavi. Uvođenjem FDM tehnike u svoj proizvodni pogon, zabeležene su uštede vremena od 40% do 90% (Hiemenz, 2011). Na slici 3.25 prikazana je upotreba 3D tehnika štampe u proizvodnji pribora za fiksiranje i rukovanje proizvodima.

U domenu izrade prototipova, veoma je rasprostranjena upotreba 3D tehnika štampe u oblasti elektronike i optoelektronike. Willis i saradnici (2012) predstavili su pristup inkorporiranja optičkih elemenata (FTIR senzora, displeja, LED dioda) u 3D štampani objekat. Ideja njihovog rada je da se optičke komponente direktno ugrade u interaktivne uređaje izrađene nekom od tehnika 3D štampe, kako bi se izbeglo njihovo naknadno sklapanje. MacDonald i saradnici (2014) istražuju upotrebu stereolitografije i FDM tehnike štampe za izradu funkcionalne kockice za društvene igre sa 3D štampanim električnim kolom. Leigh i saradnici (2012) u svom radu predstavljaju kompozitni termoplastični materijal sposoban da provodi električnu energiju. Upotrebom FDM štampača ovaj materijal je iskorišćen za štampu senzora za detekciju pokreta i pritiska ugrađenih u 3D štampane uređaje.





*Slika 3.25: Primena 3D tehnika štampe u izradi pribora za fiksiranje i rukovanje proizvoda u toku procesa proizvodnje (Hiemenz, 2011)*

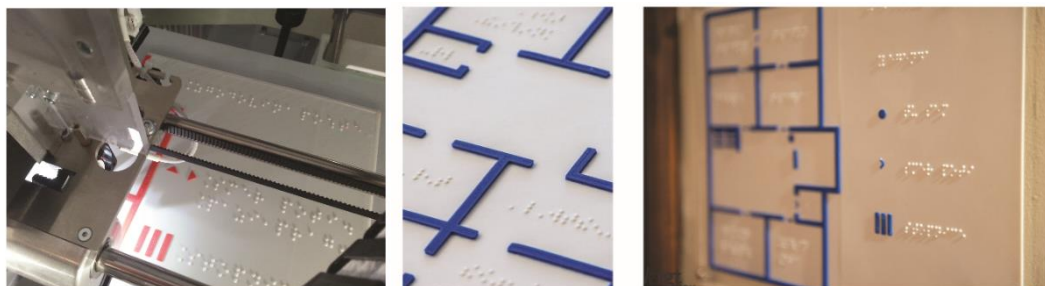
Značajnu primenu tehnike aditivne proizvodnje pronalaze u oblasti medicine i farmakologije. Autori poput Murphy i Atala (2014), Nune i saradnika (2015) i Kang i saradnika (2016) istraživali su upotrebu 3D tehnika za štampu tkiva i organa. Melocchi i saradnici su istraživali mogućnost primene FDM tehnike štampe za izradu kalupa rastvorivih kapsula za oralnu upotrebu i njihove sposobnosti da se rastvore i oslobode sadržaj leka u njima.

Sprovedena su i istraživanja mogućnosti izrade kalupa uz pomoć tehnika aditivne proizvodnje (Snelling i saradnici; Singh, 2010). Singh (2010) u svom radu navodi da upotrebom tehnika 3D štampe može značajno da se smanje vreme i troškovi izrade kalupa tehnikom povezivanja praškastog keramičkog materijala prskanjem vezivnog sredstva. Zaključeno je da su upotrebom tehnika 3D štampe uspešno izrađeni kalupi za izlivanje bronze, bakra, aluminijuma, nerđajućeg čelika i alatnog čelika.

U grafičkoj industriji, upotreba tehnika aditivne proizvodnje nije detaljno istraživana, pa je upravo značaj ove disertacije u proširivanju znanja u primeni ovih tehnika u procesima grafičke proizvodnje. Nastavak izlaganja će biti skoncentrisan na istraživanja iz oblasti grafičke proizvodnje.

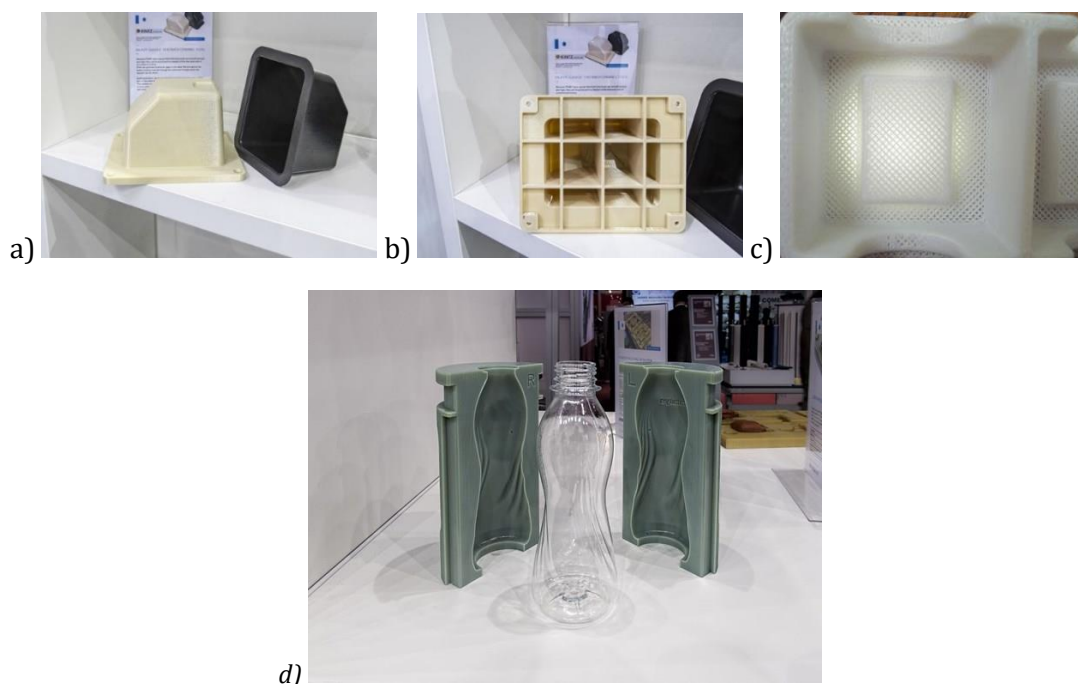
## 4.6 Istraživanja u oblasti grafičke proizvodnje

Na Univerzitetu u Ljubljani na Fakultetu prirodnih nauka i inženjerstva, sprovedeno je istraživanje u kojem je upotrebljena FDM tehnika 3D štampe za izradu Brajevog pisma, taktilnih elemenata i mapa za osobe sa oštećenim vidom (Urbas i saradnici, 2016).



Slika 3.26: FDM štampa Brajevog pisma i elemenata taktilne mape (Urbas i saradnici, 2016)

Primenu u grafičkoj proizvodnji FDM tehnika 3D štampe je pronašla i u procesu izrade ambalaže termoformiranjem (Naitove, 2016). Objekat dobijen FDM tehnikom 3D štampe ima poroznu strukturu zbog načina na koji se predmet formira u toku štampe. Otopljeni redovi žice formiraju svaki sloj. Što je veza između ovih redova bolja (popunjenost – *infill* je veći) to je poroznost manja, pa se upravo kontrolom tipa popunjenosti i razmaka između slojeva i redova deponovane žice, omogućava kontrola poroznosti izrađenog elementa, što omogućava bolji vakuum između zagrejane plastične folije i alata. S obzirom da se ovaj proces odvija u okruženju sa povišenom temperaturom veoma je bitan odabir materijala koji ima veću otpornost na toplotu odnosno višu temperaturu ostaklivanja i topljenja.



Slika 3.27: Izgled FDM štampanog kalupa za a), b) termoformiranje, c) porozna struktura kalupa za termoformiranje i d) duvanje plastičnih boca (Naitove, 2016)

Prednosti korišćenja 3D štampe u proizvodnji su: produkcija komplikovanih geometrijskih oblika za kraće vreme bez potrebe za izradom skupih konvencionalnih alata (Upcraft i Fletcher, 2003; Mansour i Hague, 2003); mogućnost štampanja sklopova iz jednog digitalnog fajla, bez potrebe za naknadnim spajanjem ili obradom, smanjivanje broja delova, skraćivanje vremena izrade, ušteta

na prostoru (Hopkinson i saradnici, 2006; Bernard i Fischer, 2002) mogućnost da se optimizuje potrošnja materijala konstrukcijom delova koji su komplikovani ili ih je čak nemoguće proizvesti konvencionalnim tehnikama proizvodnje, mogućnost da se smanji otpad, a samim tim i uticaj na okolinu.

Kad je reč o nedostacima 3D tehnika štampe one iz godinu u godinu, napretkom tehnologije, postaju sve manje. Za ugrađivanje aditivnih tehnika u proizvodni proces treba imati na umu sledeće: povećani troškovi u slučaju većih tiraža, manji izbor materijala, ograničen dijapazon boja i postojanje potrebe za završnom obradom, ograničenja u mehaničkim osobinama i izdržljivosti konačnog proizvoda, manja preciznost odštampanih elemenata i spor proces izrade većih komada.

Imajući gore navedeno na umu, ostaje samo pitanje da li postoji potreba da se aditivna proizvodnja integriše u proizvodni proces i ako postoji koji su razlozi za to. U ovom procesu odlučivanja neophodno je znati koje su tehnike aditivne proizvodnje na raspolaganju, koje su osobine materijala koji se koriste, koji faktori utiču na kvalitet 3D štampanog dela. Zbog brzog razvoja i dinamičnih promena u ovoj oblasti neophodno je aktivno pratiti nova dostignuća, jer upravo nepoznavanje savremenih mogućnosti dovodi do korišćenja proverenih, ali i zastarelih konvencionalnih tehnika proizvodnje.

#### 4.7 Efekti primene tehnika 3d štampe na životnu sredinu

U eri pojačanog konzumerizma veoma je teško odgovoriti zahtevima tržišta za što bržom proizvodnjom i sve učestalijom zamenom starih proizvoda novim. Alati za utiskivanje izrađeni tradicionalnim tehnikama obrade materijala rezanjem ili nagrizanjem imaju odlične mehaničke i fizičke karakteristike i u stanju su da proizvedu otisak vrhunskog kvaliteta. Međutim, za izradu konvencionalnih alata za utiskivanje, potreban je veliki broj mašina i uređaja, a nakon proizvodnje, javlja se problem uklanjanja otpadnih hemikalija ili strugotina materijala. Ukoliko je potreba za bržom izmenom poslova sve veća, sve je izraženiji problem rukovanja sa nusproizvodima proizvodnog procesa, što na kraju i povećava cenu i trajanje proizvodnje, a ukoliko s otpadnim materijalom nije rukovano po propisanim standardima, javlja se pojačano zagađenje radne i životne sredine čoveka.

S obzirom na brzu izmenu poslova, smanjuje se potreba za konvencionalnim tehnikama izrade alata, koji svoju primenu pravdaju izradom velikih tiraža vrhunskog kvaliteta. Sve više postaje upitna upotreba tradicionalnih tehnika izrade alata za utiskivanje za poslove manjih tiraža, s obzirom na vreme i cenu izrade, kompleksnost procesa i uticaj koje ove tehnike imaju na životnu sredinu čoveka. Iz ovih razloga potrebno je istražiti mogućnosti tehnika aditivne proizvodnje, odnosno njihovu implementaciju u proizvodni proces izrade alata za utiskivanje.

##### 4.7.1 Konvencionalne metode izrade alata za utiskivanje na papirnim podlogama

Konvencionalne tehnike izrade alata za utiskivanje hemijskim nagrizanjem zahtevaju upotrebu različitih hemikalija koje u reakciji sa čovekovim organizmom i njegovom okolinom mogu imati štetan uticaj. Često i sama proizvodnja repromaterijala štetno utiče na životnu sredinu. U tehnici hemijskog nagrizanja magnezijuma koristi se azotna kiselina ( $\text{HNO}_3$ ), ulje za nagrizanje i voda. Sastav ulja za nagrizanje nije poznat, jer je razvijen od strane kompanije koja proizvodi ploče za hemijsko nagrizanje. Njegova uloga je da zaštiti kose ivice elemenata od preteranog hemijskog nagrizanja koje može da dovede do nestabilnosti elemenata za nagrizanje. Kupka za hemijsko nagrizanje se vremenom zasiti magnezijumom, što usporava proces hemijskog nagrizanja, pa ju je neophodno vremenom dopuniti ili zameniti. Iskorišćeno sredstvo za nagrizanje potrebno je odložiti, a uz dodatnu neutralizaciju upotrebiti i kao đubrivo. Azotna kiselina u reakciji sa kožom

ostavlja opekotine, a duže izlaganje njenim isparenjima može izazvati oštećenje respiratornog sistema. Azotna kiselina se ne taloži u velikim količinama u organizmima biljaka i životinja jer je veoma reaktivno jedinjenje. Za rad sa azotnom kiselinom poznate su određene regulative. Granična vrednost koncentracije isparenja azotne kiseline prilikom kojih ne dolazi do štetnog uticaja na čovekovo zdravlje u toku osmočasovnog radnog vremena su  $5 \text{ mg/m}^3$  (Centers for Disease Control and Prevention, 2014, National Academy of Sciences, 2013). Preporučeno vreme boravka u prostoriji sa koncentracijom azotne kiseline od  $10 \text{ mg/m}^3$  je približno 15 minuta (Centers for Disease Control and Prevention, 2014). Ispuštanje azotne kiseline u kanalizaciju je zabranjeno (University of Pittsburgh, n.d.). Za magnezijum nisu poznata štetna dejstva, jer se u određenoj količini nalazi u morskoj i rečnoj vodi.

Postrojenja za proizvodnju azotne kiseline ispuštaju u atmosferu velike količine azotnog oksida ( $\text{N}_2\text{O}$ ) za kojeg je poznato da doprinosi efektu staklene bašte, potrošnji ozonskog omotača, a samim tim i globalnom zagrevanju (Perez-Ramirez, 2003). Proizvodnja magnezijuma takođe štetno utiče na okolinu jer zahteva velike količine prirodnih resursa čija eksploatacija dovodi do zagađenja životne sredine (Feng i saradnici, 2008).

#### 4.7.2 Aditivne tehnologije izrade alata za utiskivanje na papirnim podlogama

FDM tehnika 3D štampe ima mogućnost štampe biorazgradivih polimera kao što je polilaktična kiselina (PLA). PLA se proizvodi fermentacijom šećerne repe, šećerne trske ili kukuruza, što su obnovljivi izvori. Fermentacijom se uz pomoć mikroorganizama proizvodi laktična kiselina. Ovaj proces ima visoku efikasnost, jer se od jednog molekula šećera dobijaju dva molekula laktične kiseline, bez ostataka. PLA materijal je pogodan za kombinovanje sa drugim polimerima fosilnog ili biljnog porekla uz dodatak aditiva kao što su pigmenti boje, UV stabilizatori, modifikatori za pojačanje otpornosti na mehanička opterećenja, visoke temperature, otvoren plamen i dr. Na taj način PLA materijal može da zadovolji širok spektar primene. Krieger i Pearce (2013) sprovedli su istraživanje u kojem su poredili potrošnju energije i emisiju štetnih zračenja konvencionalne tehnike brizganja plastike sa merenjima sprovedenim na RepRap FDM 3D štampaču za izradu delova od ABS i PLA polimera. Zaključeno je da je ušteda energije, za izradu proizvoda od plastike na 3D štampaču, između 41% i 64% sa znatnim smanjenjem emisije štetnih gasova. Veća potrošnja energije je zabeležena kod izrade predmeta od ABS materijala jer on zahteva više energije za zagrevanje podloge za štampu i više temperature ekstrudiranja. Generalni zaključak istraživača je da upotreba tehnika 3D štampe i PLA materijala ima potencijal za smanjenje štetnog uticaja na životnu sredinu.

Alati za utiskivanje se često koriste za izradu malih tiraža gde se ne zahteva velika otpornost na habanje, a nakon upotrebe se skladište, uništavaju ili u najboljem slučaju recikliraju. Uzimajući u obzir energetska ušteda upotrebom FDM tehnike 3D štampe i izbegavanje upotrebe visoko reaktivnih hemikalija u procesu izrade alata, a naročito mali ekološki efekat biorazgradivog PLA materijala, ističe se doprinos ovog rada iz ugla zaštite životne sredine uvođenjem ovako izrađenih alata u tehnološki proces utiskivanja.

## 5. PREDMET, PROBLEM I CILJ ISTRAŽIVANJA

Eksperimentalni deo doktorske disertacije obuhvata karakterizaciju materijala za utiskivanje, zatim karakterizaciju uticajnih parametara FDM tehnike 3D štampe na fizičke, mehaničke i termalne osobine štampanih uzoraka, opis metodologije izrade alata za utiskivanje, opis metodologije utiskivanja i analizu rezultata utiskivanja.

Tradicionalni način izrade alata za utiskivanje podrazumeva hemijsko nagrizanje metala ili uklanjanje materijala rezanjem i zahteva upotrebu različitih tehnika, mašina i materijala, a često i velike površine radnog i skladištenog prostora. Takođe, nusproizvodi procesa (otpadne hemikalije i strugotina) zahtevaju adekvatno rukovanje i odlaganje/reciklažu koje mora biti u skladu sa zakonima o zaštiti životne sredine, kako bi uticao na nju bio što manji.

3D štampa omogućava relativno jednostavan proces izrade alata, upotrebu materijala pogodnih za reciklažu kao i upotrebu biorazgradivih termoplastičnih materijala, kao što je PLA (polilaktična kiselina), manje dimenzije uređaja i sve veću dostupnost na tržištu. Ona pruža dosta mogućnosti za istraživanja u ovom pravcu, modifikaciju i optimizaciju procesa kako bi se opravdala njena upotreba u proizvodnom procesu grafičke proizvodnje.

**Predmet istraživanja.** *Predmet ovog rada je istraživanje mogućnosti korišćenja FDM tehnike 3D štampe u procesu izrade alata za utiskivanje za grafičku industriju i zamene tradicionalne tehnike izrade alata hemijskim nagrizanjem, što bi rezultiralo skraćivanjem vremena proizvodnje, smanjenjem otpadnog materijala i cene konačnog proizvoda. Takođe, ovim radom će biti predloženi parametri za prilagođavanje oblika alata i procesa izrade FDM tehnikom 3D štampe.*

Kako bi bilo moguće dati konačni sud o podobnosti zamene tradicionalnih tehnika izrade alata za utiskivanje 3D tehnikama štampe, neophodno je ispitati karakteristike materijala za izradu alata i podloge na kojoj se vrši utiskivanje (termoplastičnih materijala i papira) pri različitim eksploatacionim uslovima, zatim proces izrade alata i njegove upotrebe, evaluaciju konačnog rezultata utiskivanja, odnosno poređenje sa utisnutim elementima dobijenim konvencionalno izrađenim alatima, uz definisanje eventualnih ograničenja.

**Problem istraživanja.** *Proces zamene tradicionalnih tehnika izrade alata za utiskivanje tehnikama aditivne proizvodnje zahteva niz istraživanja u kojima je neophodno karakterisati što veći broj uticajnih parametara i definisati odgovarajuću metodologiju. Nedovoljna istraženost uticajnih parametara na karakteristike objekata izrađenih tehnikama 3D štampe kao i nepostojanje dovoljnog broja standarda u ovoj oblasti ukazuju na aktuelnost problema istraživanja i potrebu za njihovim unapređenjem.*

Pored FDM tehnike štampe istraživanje će obuhvatiti tehnike stereolitografije – SLA za izradu alata za utiskivanje kao i tri različite vrste papira za utiskivanje (nepremazni, premazni i voluminozni) sa varijacijom gramatura. Takođe, biće izrađeni i alati za utiskivanje korišćenjem tradicionalne tehnike hemijskog nagrizanja metala kako bi rezultati utiskivanja bili upoređeni sa rezultatima dobijenim korišćenjem 3D tehnike štampe. Tehnika stereolitografije biće iskorišćena za reprodukciju sitnih detalja s obzirom na prednosti u odnosu FDM tehniku.

**Cilj istraživanja.** *Osnovni cilj istraživanja je definisanje optimalnih procesnih parametara izrade alata za utiskivanje FDM tehnike 3D štampe. Dodatni ciljevi obuhvataju definisanje ograničenja FDM tehnike 3D štampe i primenu stečenih znanja na ostale tehnike aditivne proizvodnje.*



## 6. HIPOTEZE

Pregledom i analizom prethodno sprovedenih istraživanja u oblasti karakterizacije procesnih parametara FDM tehnike 3D štampe, ispitivanja mehaničkih, termo-mehaničkih i površinskih karakteristika kao i istraživanja u oblasti poboljšanja kvaliteta uzoraka proizvedenih ovom tehnikom postavljene su sledeće hipoteze:

### Hipoteza 1:

*Primena 3D štampe u procesu izrade alata za utiskivanje na grafičkim proizvodima je moguća.*

### Hipoteza 2:

*Moguće je definisati procesne parametre izrade alata za utiskivanje FDM tehnikom 3D štampe tako da se zadovolji kriterijum kvaliteta i postignu rezultati utiskivanja dobijeni upotrebom konvencionalno izrađenih alata (hemijskim nagrizanjem metala).*

### Hipoteza 3:

*Definisane procesne parametre FDM tehnike 3D štampe za izradu alata za utiskivanje moguće je primeniti i na druge tehnike aditivne proizvodnje i tako prevazići ograničenja FDM tehnike u domenu reprodukcije sitnih elemenata forme za utiskivanje.*

### Hipoteza 4:

*Adekvatnim odabirom materijala i tehnike 3D štampe, moguće je proizvesti alate koji zadovoljavaju uslove upotrebe u grafičkoj proizvodnji, a koji će svoju upotrebu opravdati lakšom izradom, nižom cenom i smanjenjem štetnog uticaja na životnu sredinu.*

Razvijena je metodologija istraživanja i urađena su eksperimentalna istraživanja kako bi se potvrdile postavljene hipoteze.

## 7. MATERIJALI I METODOLOGIJA

U eksperimentalnom delu doktorske disertacije potrebno je ispitati osobine materijala koji će se koristiti. Osobine materijala za izradu alata konvencionalnom metodom su poznate iz dokumentacije dobijene od proizvođača, pa se one neće dodatno ispitivati. Specifikacije korištenih vrsta papira su takođe poznate od strane proizvođača, tako da će one biti samo navedene u istraživanju, a analiza uticaja smera vlakana na zateznu čvrstoću papira je dodatno sprovedena. Pored karakteristika materijala za utiskivanje, neophodno je istražiti karakteristike materijala za izradu alata FDM tehnikom 3D štampe, kao i procesne faktore koji utiču na kvalitet izrade ovih alata. Nakon karakterizacije korišćenih materijala, izrađeni su alati i testiran je kvalitet utisnutih elemenata korišćenjem tih alata. U proceni kvaliteta upotrebljene su kvalitativne i kvantitativne metode. U narednom poglavlju biće navedene karakteristike materijala kao i korišćene metode eksperimentalnog dela doktorske disertacije.

### 7.1 Plan istraživanja

Za postizanje navedenih ciljeva eksperiment je podeljen na sledeće celine:

#### 1. Priprema materijala i alata

- Karakterizacija papirnih materijala za utiskivanje – ispitivanje fizičkih i mehaničkih osobina podloge za utiskivanje;
- Karakterizacija procesnih parametara uzoraka štampanih FDM tehnikom 3D štampe – priprema i štampa uzoraka variranjem osam različitih ulaznih parametara u cilju dobijanja optimalnih vrednosti izlaznih parametara (vreme štampe, količina potrošenog materijala, površinska hrapavost i zatezna čvrstoća);
- Ispitivanje ponovljivosti mehaničkih osobina uzoraka izrađenih FDM tehnikom 3D štampe (zatezna i pritisna čvrstoća);
- Ispitivanje termo-mehaničkih osobina uzoraka izrađenih FDM tehnikom 3D štampe (zatezna i pritisna čvrstoća);
- Ispitivanje uticaja završne obrade (mehaničke i hemijske) na fizičke i mehaničke osobine uzoraka izrađenih FDM tehnikom 3D štampe (površinska hrapavost i zatezna čvrstoća);
- Izrada alata za utiskivanje, njegovo modelovanje u CAD aplikaciji kroz seriju preliminarnih istraživanja i definisanje reprezentativnih elemenata alata za utiskivanje;
- Izrada kontrolnog alata za utiskivanje tehnikom hemijskog nagrivanja;
- Izrada kontrolnog alata za utiskivanje SLA tehnikom 3D štampe.

#### 2. Utiskivanje

- Definisane optimalnih sila pritiska za sve vrste papira i alata;
- Testiranje otpornosti na habanje alata za utiskivanje.

#### 3. Analiza dobijenih rezultata utiskivanja

- Analiza skeniranih uzoraka dobijenih utiskivanjem alata izrađenih tehnikom hemijskog nagrivanja, FDM tehnikom i SLA tehnikom 3D štampe;
- Analiza rezultata istraživanja vizuelne procene utisnutih uzoraka od strane eksperata iz oblasti grafičkog inženjerstva i dizajna.

## 7.2 Karakterizacija papirnih materijala za utiskivanje

Jedan od faktora koji utiče na rezultat utiskivanja jeste vrsta papira. Za potrebe ovog istraživanja odabrane su tri različite vrste papira:

- Nepremazni papir (u gramaturama od 80, 100, 120, 140 i 170 g/m<sup>2</sup>),
- Premazni mat papir (u gramaturama od 130, 150, 170 i 200 g/m<sup>2</sup>) i
- Voluminozni (u gramaturama od 60, 70 i 80 g/m<sup>2</sup>).

Karakteristike papira prikazane su u Tabeli 7.1.

Tabela 7.1: Karakteristike papira korišćenih u eksperimentu (Mondigroup, 2017; Fedrigoni, 2016; Hellefoss Paper AS, 2018)

NEPREMAZNI	Jedinice	Standard	1	2	3	4	5
Gramatura	g/mm <sup>2</sup>	ISO 536	80 ± 3.0	100 ± 4.0	120 ± 4.5	140 ± 5.5	170 ± 7.0
Debljina	µm	ISO 534	105 ± 4.0	126 ± 5	144 ± 6	164 ± 6	198 ± 7
Hrapavost (Bendsten)	ml/min	ISO 8791-2	225 ± 75	225 ± 75	225 ± 75	225 ± 75	225 ± 75
Opacitet	%	ISO 2471	min 91.0	min 93.0			
Vlažnost	%	ISO 287	6.2 ± 0.7	6.2 ± 0.7	6.2 ± 0.7	6.2 ± 0.7	6.2 ± 0.7
Svetlina UV	%	ISO 2470	103.5 ± 1.5	103.5 ± 1.5	103.5 ± 1.5	103.5 ± 1.5	103.5 ± 1.5
CIE belina	%	ISO 11475	145 ± 3.0	145 ± 3.0	145 ± 3.0	145 ± 3.0	145 ± 3.0
PREMAZNI MAT	Jedinice	Standard	1	2	3	4	
Gramatura	g/mm <sup>2</sup>	ISO 536	130 ± 3.9	150 ± 4.5	170 ± 5.1	200 ± 8	
Debljina	µm	ISO 534					
Hrapavost (Bendsten)	ml/min	ISO 8791-2	20 ± 10	20 ± 10	20 ± 10	20 ± 10	
Opacitet	%	ISO 2471	95 ± 2	97 ± 2			
Svetlina UV	%	ISO 2470	104 ± 2	104 ± 2	104 ± 2	104 ± 2	
VOLUMINOZNI	Jedinice	Standard	1	2	3		
Gramatura	g/mm <sup>2</sup>	ISO 536	60 ± 4.0	70 ± 4.0	80 ± 4.0		
Spec.Zapremina	g/cm <sup>3</sup>		1.6 / 16 do 2.4 /24				
Debljina	µm	ISO 534	80 - 180 ± 3				
Svetlina	%	ISO 2470	70 ± 0.75				
Opacitet	%	ISO 2471	88 - 96 ± 1				
Vlažnost	%	ISO 287	8% ± 0.5				

Ove tri odabrane vrste papira predstavljaju najčešće korišćene papire u grafičkoj industriji, pa rezultati istraživanja izvršenih na ovim papirima predstavljaju značajnu bazu znanja i osnovu za predviđanje ponašanja prilikom procesa utiskivanja alatima proizvedenim nekonvencionalnim metodama. Pored karakteristika navedenih u tabeli 7.1 dobijenih od strane proizvođača, potrebno je ustanoviti i kako smer vlakana utiče na mehaničke osobine, jer prilikom utiskivanja na površinu papira elementi alata deluju silom iz različitih uglova u odnosu na smer vlakana papira. Istraživanjem je obuhvaćeno samo ispitivanje zatezne čvrstoće, jer spada u jednu od bitnijih karakteristika u procesu proizvodnje i fizičkoj karakterizaciji papira i kartona (Yokoyama i saradnici, 2007).

### Uzorci

Za istraživanje pripremljeno je deset uzoraka od svake gramature papira i za svaki smer vlakana. Testirani su uglovi vlakana od 0° (MD), 20°, 45°, 70° i 90° (CD). Ovo su najčešće testirani uglovi



navođeni u radovima (Yokoyama i Kenji, 2010; Yokoyama i saradnici, 2009). Uzorci su pripremljeni i testirani po TAPPI T494 standardu (TAPPI, 2006). Dužina uzorka između čeljusti za fiksiranje je bila 180 mm, a širina 25 mm. Uzorci su isečeni mašinom za rezanje naslage materijala Perfecta 76 HTVC. Prikaz i karakteristike mašine za rezanje prikazani su na slici 7.1, a njene specifikacije u tabeli 7.2.



Slika 7.1: Mašina za rezanje naslage materijala Perfecta 76 HTVC (Graffin s.r.o. n.d.)

Tabela 7.2: Karakteristike mašine za rezanje naslage materijala Perfecta 76 HTVC (Graffin s.r.o. n.d.)

Širina stola za rezanje	760 mm
Maksimalna visina naslage	110 mm
Minimalna dubina graničnika	15 mm
Sila prese	25 kN
Snaga motora	2,2 kW
Visina stola za rezanje	870 mm

### **Procedura**

Pripremljeno je i testirano ukupno 600 uzoraka, po 10 uzoraka za svaku gramaturu i za pet različitih smerova vlakana. Testiranje zatezne čvrstoće sprovedeno je po TAPPI T494 standardu (TAPPI, 2006) koristeći univerzalni uređaj Shimadzu Compact Tabletop Testing EZ-LX sa mernom glavom od 2.5 kN i brzinom kretanja stege od 25 mm/min na temperaturi vazduha od 23 °C i 50% relativne vlažnosti vazduha. Na slici 7.2 prikazan je uređaj za testiranje zatezne čvrstoće, a u tabeli 7.3 i njegove karakteristike.



Slika 7.2: Uređaj za testiranje zatezne čvrstoće materijala Shimadzu Compact Tabletop Testing EZ-LX (Shimadzu Corporation, 2013)

Tabela 7.3: Karakteristike uređaja za testiranje zatezne čvrstoće materijala Shimadzu Compact Tabletop Testing EZ-LX (Shimadzu Corporation, 2013)

Maksimalni kapacitet testiranja	5 kN
Opseg brzine kretanja glave za testiranje	0.001 – 1000 mm/min
Preciznost brzine kretanja glave za testiranje	± 0.1% od zadate brzine
Maksimalna brzina povratka glave za testiranje	1500 mm/min
Preciznost testiranja (high-precision type)	± 0.5% (odgovara JIS B 7721 class 0.5, ISO 7500-1 class 0.5, EN 10002-2 grade 0.5 i ASTM E4 standardima)
Preciznost testiranja (standard-precision type)	± 1% (odgovara JIS B 7721 class 1, ISO 7500-1 class 1, EN 10002-2 grade 1 i ASTM E4 standardima)
Kalibracija sile testiranja	automatska

Rezultati testiranja su zabeleženi i obrađeni pomoću softvera TrapeziumX, izračunate su vrednosti zatezne čvrstoće i procenta izduženja. Rezultati ovog istraživanja prikazani su u poglavlju 8.1.

### 7.3 Karakterizacija procesnih parametara FDM tehnike 3D štampe

Osobine materijala korišćenih u procesu izrade alata aditivnim tehnikama su poznate i dokumentovane od strane proizvođača. Osobine izrađenih uzoraka procesom aditivne proizvodnje nisu poznate i najčešće su predmet istraživanja navedenih u literaturi, pa će u ovoj doktorskoj disertaciji posebna pažnja biti posvećena mehaničkim osobinama izrađenih uzoraka i različitim uticajnim parametrima na te osobine.

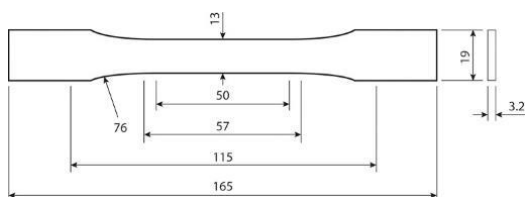
#### **Uzorci**

Osobine sirovinskog materijala od polilaktične kiseline (PLA) korištenog za izradu uzoraka za karakterizaciju i za izradu alata za utiskivanje prikazane su u Tabeli 7.4.

Tabela 7.4 Karakteristike polimera od polilaktične kiseline - PLA (Makeitfrom.com, 2018)

Naziv materijala	Polilaktična kiselina (PLA)
Hemijska familija	Polimer, kopolimer
Naziv komponenti	1,4-dioksan-2,5-dion, 3,6-dimetil- (3R-cis)- polimer sa: (3S-cis)-3,6-dimetil-1,4-dioksan-2,5-dion i trans-3,6-dimetil-1,4-dioksan-2,5- dion (>98%)
Oblik u kojem se koristi za 3D štampu	Nit, žica, namotaj
Miris	Nema jak miris/sladak miris
Tačka topljenja	150-180 °C
Rastvorljivost u vodi	Nije rastvorljiv
Dekompozicija	>250 °C
Gustina	1.25 g/cm <sup>3</sup>
Agregatno stanje	Čvrsto
Prirodna boja	providna
Temperatura toplotne defleksije na 455 kPa (66 psi)	65 °C
Specifični temperaturni kapacitet	1800 J/kg-K
Tačka stakljenja	60 °C
Termalna provodljivost	0.13 W/m-K

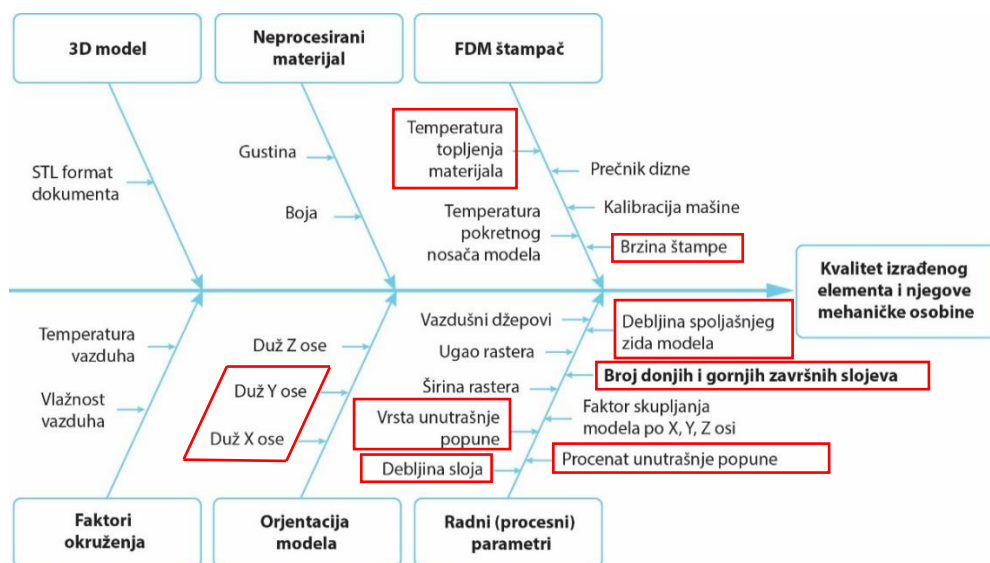
Kako bi se okarakterisali uticajni faktori na fizičke i mehaničke osobine uzorka dobijenih FDM tehnikom štampe, izrađeni su uzorci za testiranje zatezne čvrstoće. Za dimenzije uzorka korišćen je standard za plastične materijale ASTM D638-14 (ASTM International, 2014), odnosno njegov ekvivalent ISO 527-1 (International Organization of Standardization, 2012). Dimenzije uzorka su prikazane na slici 7.3.



Slika 7.3: Dimenzije uzorka za ispitivanje zatezanja (Tip 1) po ASTM D638-14 standardu (mm)

CAD modeli su izrađeni u softverskom alatu Autodesk Inventor Professional 2016, a zatim su konvertovani u STL dokument, pogodan za rad u programu za „sečenje“ (*slicing*) što je u ovom slučaju bio Makerbot Desktop softver.

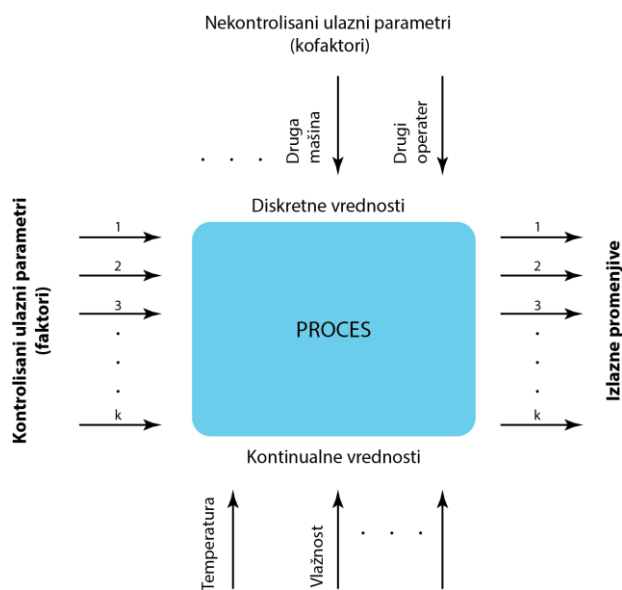
Pre ispitivanja fizičkih i mehaničkih osobina uzorka izrađenih FDM tehnikom 3D štampe, neophodno je istražiti koji procesni faktori mogu imati uticaj na njih, a zatim izdvojiti one sa najvećim uticajem. Odabir uticajnih parametara FDM tehnike štampe izveden je na osnovu istraženih literaturnih izvora. Najveći broj radova napisan je na temu uticaja orijentacije uzorka u toku štampe, orijentacije deponovanih filamenata materijala unutar strukture uzorka (raster), debljine štampanog sloja, procenta unutrašnje popune i dr. (Mohamed i saradnici, 2015). Na slici 7.4 prikazani su svi uticajni faktori koji utiču na konačne osobine uzorka izrađenih FDM tehnikom štampe, navedeni u radu Mohamed i saradnici (2015). Izdvojeni su faktori za koje se pretpostavlja da mogu imati značajan uticaj prilikom izrade alata za utiskivanje, a neki od njih biće obuhvaćeni istraživanjem. Imajući u vidu tipična opterećenja i kritična mesta habanja alata za utiskivanje, dodat je i faktor broja gornjih i donjih završnih slojeva, mada je ovu listu uticajnih parametara neophodno dalje proširivati, kako bi se stekao još detaljniji uvid uticaja faktora na konačni kvalitet objekata izrađenih FDM tehnikom štampe. Podaci o ispitivanjima ovog faktora nisu pronađeni u literaturi, a MakerBot Replicator 5<sup>th</sup> Generation FDM štampač omogućuje podešavanja ovog parametra. Donji i gornji slojevi, ukoliko su definisani, štampaju se sa 100% popune, bez obzira koji je procenat unutrašnje popune štampanog uzorka upotrebljen.



Slika 7.4: Uticajni faktori na kvalitet štampanog uzorka i njegove mehaničke osobine u FDM tehnici štampe (Mohamed i saradnici, 2015)

Istraživanje koje obuhvata testiranje uticaja svih navedenih parametara i njihovih međusobnih kombinacija zahteva velik broj uzoraka, pa se u literaturi obično navodi uticaj samo određenih. To su najčešće parametri FDM štampača, radni parametri i parametri orijentacije modela prilikom štampe. Neki od ovih faktora, kao što je temperatura pokretnog nosača modela nisu primenjivi na modele FDM štampača koji nemaju grejač nosača modela. U okviru istraživanja većina eksperimenata je izvedena na FDM štampaču MakerBot Replicator 5<sup>th</sup> Generation.

Statistički nacrt eksperimenta (Design of Experiments - DOE) predstavlja efikasnu proceduru za planiranje eksperimenta kako bi se dobijeni podaci iskoristili za validnije i objektivnije zaključke (NIST Sematech, 2003). DOE započinje određivanjem ciljeva eksperimenta i procesnih faktora koji utiču na željene izlazne rezultate (Slika 7.5).



Slika 7.5: Statistički nacrt eksperimenta (DOE). Šematski prikaz procesnih faktora koji utiču na željene izlazne promenjive (NIST Sematech, 2003)

Za ovakvu vrstu istraživanja uobičajeno je da se koriste faktorski nacrti (Todorović, 2008) u kojima se ispituje više uticajnih faktora (nezavisne promenjive) na jednu ili više izlaznih (zavisnih) promenjivih. U ovakvim nacrtima osnovni problem je što sa povećanjem broja faktora i njihovih nivoa, raste i neophodan broj testova, a samim tim postoji potreba za izradom velikog broja uzoraka. Kako bi se izbegao ovaj problem i dobio optimalan broj eksperimenata neophodan za donošenje zaključaka o najuticajnijim parametrima u toku proizvodnje, istraživači najčešće koriste Taguchi (*Genichi Taguchi*) nacrt (Karna i Sahai, 2012) za sprovođenje eksperimenta koji se zasniva na ortogonalnim nizovima (Hedayat, Sloane i Stufken, 2012).

U ovom eksperimentu odabrano je osam najuticajnijih parametara, a ako se uzme u obzir da svaki od ovih parametara može da ima veliki broj nivoa, potrebno je ograničiti izbor na broj dovoljan da se stekne uvid u stepen uticaja na odabrane izlazne promenjive. Zbog pojednostavljenja kasnije obrade podataka, ali i potrebnog broja uzoraka za testiranje, koristeći metodologiju iz radova (Anitha i saradnika, 2001; Lee i saradnika, 2005; Sood i saradnika, 2009; Xinhua i saradnika, 2015; Thrimurthulu i saradnika, 2004; Nancharaiah i saradnika, 2010; Horvath i saradnika, 2007; Wang i saradnika, 2007; Zhang i Peng, 2012; Sahu i saradnika, 2013; Laeng i saradnika, 2006; Zhang i Chou, 2008; Kumar i Regalla, 2012; Ahn i saradnika, 2002; Ang i saradnika, 2006; Percoco i saradnika, 2012; Rayegani i Onwubolu, 2014) odabrana su po tri nivoa za svaki ulaznu promenjivu. Ukoliko bi se izvodila puna faktorska analiza, bilo bi potrebno odštampati 3<sup>8</sup> odnosno 6561 test uzoraka, a ako se uzme u obzir da je za svaku kombinaciju potrebno pripremiti po tri uzorka, bilo bi potrebno odštampati ukupno 19683 test uzorka. Ovo bi naravno povećalo i vreme

i cenu izvođenja eksperimenta, pa je osmišljen nacrt eksperimenta koji će smanjiti broj testiranih kombinacija, a samim tim i potrebnih test uzoraka.

U ovom eksperimentu, odabranih osam faktora je podeljeno u dva bloka. U prvom bloku su testirani parametri koji definišu samu konstrukciju štampanog uzorka (debljina sloja, procenat unutrašnje popune, vrsta unutrašnje popune i broj konturnih zidova). U drugom bloku su testirani parametri samog procesa 3D štampe (orijentacija modela na platformi za štampu, brzina kretanja glave za štampu i temperatura dizne) sa izuzetkom jednog faktora (debljina završnih slojeva) koji je naknadno dodat. Kako bi oba bloka imala jednak broj ulaznih promenljivih, faktor debljine završnih slojeva je pridružen drugom bloku. Podela na dva bloka sa po četiri faktora (svaki faktor po tri nivoa) je odabrana zbog mogućnosti upotrebe L9 Tagučići nacrta eksperimenta (Tabela 7.5). Ovaj nacrt eksperimenta zahteva pripremu ukupno devet različitih kombinacija nivoa parametara po bloku. Za svaku kombinaciju parametara proizvedena su po tri uzorka. Ukupno je, za ceo eksperiment, odštampano 54 uzorka. Ovim eksperimentom određene su vrednosti nivoa osam odabranih ulaznih promenljivih čija kombinacija rezultuje optimalnim vrednostima četiri izlazne promenjive. Za statističku obradu podataka korišćena je kombinacija delimične faktorske analize Tagučići dizajna eksperimenta (*Analysis of Taguchi Design*), u softverskom alatu MiniTab 17 i frakcionalnog rangiranja kombinacija testiranih ulaznih promenljivih.

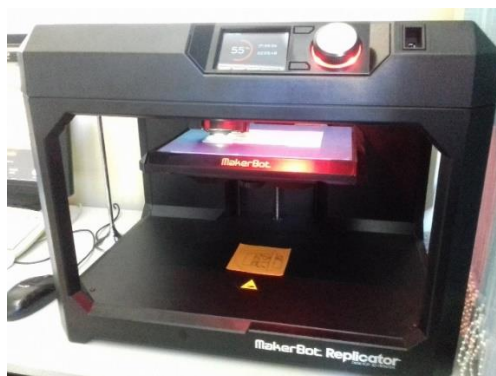
Tabela 7.5: Kodiran Tagučićev L9 nacrt i Tagučićev L9 nacrt sa uvrštenim vrednostima nivoa uticajnih faktora za oba bloka eksperimenta

L9 NACRT					BLOK I					BLOK II				
Test #	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4	Test #	Debljina sloja (mm)	Procenat unutrašnje popune (%)	Vrsta unutrašnje popune	Broj konturnih zidova	Test #	Debljina završnih slojeva (mm)	Orijentacija (°)	Brzina kretanja glave za štampu (mm/s)	Temperatura dizne (°C)
1	1	1	1	1	1	0,1	60	lin	1	1	0,2	0	30	210
2	1	2	2	2	2	0,1	80	hex	3	2	0,2	45	60	225
3	1	3	3	3	3	0,1	100	diam	5	3	0,2	90	90	235
4	2	1	2	3	4	0,15	60	hex	5	4	0,6	0	60	235
5	2	2	3	1	5	0,15	80	diam	1	5	0,6	45	90	210
6	2	3	1	2	6	0,15	100	lin	3	6	0,6	90	30	225
7	3	1	3	2	7	0,2	60	diam	3	7	1	0	90	225
8	3	2	1	3	8	0,2	80	lin	5	8	1	45	30	235
9	3	3	2	1	9	0,2	100	hex	1	9	1	90	60	210

## Procedura

Po L9 nacrtu eksperimenta prikazanog u tabeli 7.5 odštampano je po tri uzorka za svaku kombinaciju uticajnih parametara na FDM štampaču Makerbot Replicator 5<sup>th</sup> Generation (Slika 7.6).

Parametri za svaku kombinaciju podešeni su u podrazumevanom MakerBot Desktop okruženju (slajseru) verzija 3.10.1.1389. Pre početka štampe beležena je predviđena masa materijala i vreme potrebno za izradu alata, radi poređenja sa izmerenim vrednostima nakon štampe.

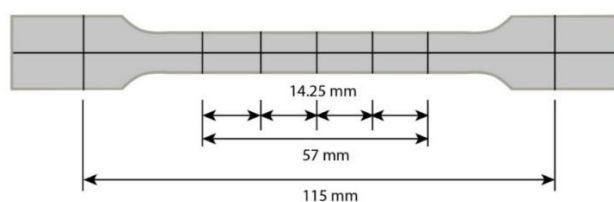


Slika 7.6: MakerBot Replicator 5th Generation FDM štampač (RedStack, n.d.)

Tabela 7.6: Karakteristike MakerBot Replicator 5th Generation FDM štampača (RedStack, n.d.)

Rezolucija (debljina) sloja	Do 100 $\mu\text{m}$ (0.1mm)
Maksimalna veličina štampe (d x š x v)	252 x 199 x 150 mm
Brzina kretanja glave za štampu	20 – 150 mm/sec
Štampajuća platforma	Staklo + izmenjiva samolepljiva papirna podloga
Temperatura dizne	180 – 260 $^{\circ}\text{C}$
Prečnik dizne	0.4 mm
Prečnik niti materijala	1.75 mm
Materijal koji podržava	PLA
Softver za sečenje	MakerBot Desktop
Gabaritne mere (d x š x v)	528 x 441 x 410 mm
Tehnika štampe	Fused Deposition Modeling (FDM)

Uzorci za svaki eksperimentalni test štampani su u toku jednog dana, pri konstantnim uslovima okruženja. Nakon štampe svakog uzorka izmerene su dimenzije pomoću digitalnog kljunastog pomičnog merila sa mernom skalom dužine 150 mm i preciznošću 0,01 mm. Uzorci su potom obeleženi (Slika 7.7) kako bi se videlo u kojoj zoni je došlo do loma uzorka.



Slika 7.7: Način obeležavanja test epruvete za testiranje zatezne čvrstoće

Zatim su izmerene vrednosti površinske hrapavosti svakog uzorka koristeći uređaj za merenje površinske hrapavosti TR200 - Time Group Inc, China (RP Electronics, 2017) sa sledećim podešavanjima: pet isečaka od 0.8 mm, opseg  $\pm 80 \mu\text{m}$ , RC filter (slika 7.8). Rezultati merenja prikazani su u Poglavlju 8.2. Karakteristike ovog uređaja prikazane su u tabeli 7.7.



Slika 7.8: Uređaj za merenje površinske hrapavosti TR200 - Time Group Inc, China (RP Electronics, 2017)

Tabela 7.7: Karakteristike uređaja za merenje površinske hrapavosti TR200 - Time Group Inc, China (RP Electronics, 2017)

Proizvođač/Model	Time Group Inc./TR 200
Prilagođen standardima	ISO/DIN/JIS/ANSI
Tip detektora	Induktivni detektor sa dijamantski vrhom radijusa 5 $\mu\text{m}$
Parametri hrapavosti	Ra, Rz, Ry, Rq, Rt, Rp, Rmax, Rm, R3z, S, Sm, Sk, tp
Merni opseg	Ra, Rq: 0.01- 40 $\mu\text{m}$ ; Rz, Ry, Rp, Rt, R3z: 0.2 - 160 $\mu\text{m}$ ; Sm, S: 2 to 4000 $\mu\text{m}$ ; tp: 1 to 100% (%Ry)
Rezolucija prikaza	0.001 $\mu\text{m}$ /0.01 uin
Uvećanje profila	Vv: 200x - 20,000x; Vh: 20x, 50x, 200x
Dužina isečaka (cut-off lengths)	0.009", 0.0315", 0.098" / 0.25mm, 0.8mm, 2.5mm
Broj isečaka	1-5
Brzina uzorkovanja	1.00 mm/s
Rezolucija displeja	128 x 64 dot matrix LCD

Nakon merenja površinske hrapavosti, svakom uzorku je izmerena masa koristeći digitalnu tehničku vagu Radwag PS 2100/C2 (Slika 7.9 i Tabela 7.8) u cilju poređenja sa predviđenom masom u softveru. Zabeležene vrednosti dimenzija i mase uzoraka prikazani su u Poglavlju 8.2.



Slika 7.9: Digitalna tehnička vaga Radwag PS 211/C2 (Radwag, 2018)

Tabela 7.8: Karakteristike digitalne tehničke vage Radwag PS 211/C2 (Radwag, 2018)

Proizvođač/Model	RADWAG PS 2100.R2 Precision Balance
Maksimalni kapacitet	2100 g
Minimalno opterećenje	500 mg
Opseg težine	-2100 g
Tačnost	$\pm 10$ mg
Vreme stabilizacije	1,5 s
Radna temperatura	od +10 do +40 $^{\circ}\text{C}$
Dimenzije tasa	195 x 195 mm

Testiranje zatezne čvrstoće je sprovedeno na Shimadzu Compact Tabletop Testing EZ-LX mašini sa mernom ćelijom predviđenom za sile do 2.5 kN (Slika 7.2), brzinom kretanja stege od 5 mm/min, na temperaturi od  $23 \pm 2$   $^{\circ}\text{C}$  i relativnoj vlažnosti vazduha od  $50 \pm 5\%$  (ISO R291, 2008). Kod ispitivanja zatezanjem beležene su vrednosti maksimalne sile i sile prekida, maksimalno izduženje, izduženje prilikom prekida i modul elastičnosti. Kod ispitivanja pritiskne čvrstoće beležena je maksimalna sila pre nastanka plastične deformacije. Zatezna čvrstoća se može izračunati na osnovu maksimalne sile istezanja/sabijanja i površine poprečnog preseka:



$$\sigma_m = \frac{F_{max}}{A_0} \quad (5)$$

gde je  $\sigma_m$  zatezna čvrstoća,  $F_{max}$ , maksimalna sila zatezanja i  $A_0$  početni poprečni presek na koji deluje sila zatezanja. Da bi se izmerilo izduženje materijala prilikom testiranja, koristi se sledeće jednačine:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (6)$$

gde je  $\varepsilon$  istezanje,  $\Delta L$  promena dužine objekta, a  $L_0$  početna dužina objekta. Znajući ove vrednosti može se izračunati Jungov modul elastičnosti E, pomoću jednačine:

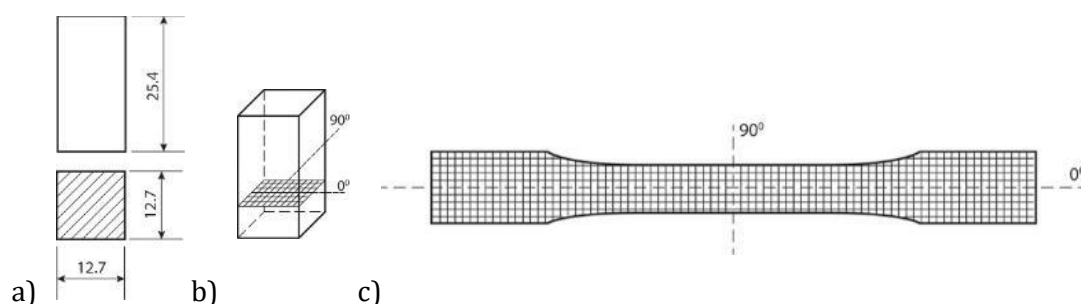
$$E = \frac{\text{zatezna čvrstoća}}{\text{istezanje}} = \frac{\sigma_m}{\varepsilon} = \frac{F_{max}/A_0}{\Delta L/L_0} = \frac{F_{max}L_0}{A_0\Delta L} \quad (7)$$

#### 7.4 Ponovljivost mehaničkih osobina uzoraka izrađenih FDM tehnikom štampe

S obzirom na to da uzorci štampani FDM tehnikom štampe imaju anizotropnu strukturu, bilo je neophodno utvrditi ponovljivost mehaničkih osobina, kako bi se proverila konzistentnost tih osobina kod svakog odštampanog alata, a samim tim ustanovila predvidljivost eksploatacionih karakteristika alata. U ovom delu eksperimenta štampani su uzorci za testiranje zatezne i pritisne čvrstoće za dva najčešće zastupljena materijala u FDM tehnici štampe - PLA i ABS.

##### Uzorci

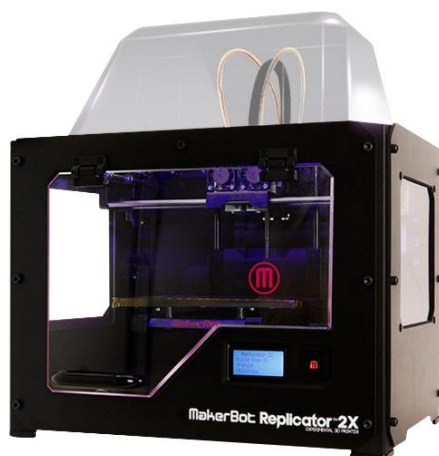
Kako bi se ustanovila ponovljivost merenja, rađena su ispitivanja na većem broju uzoraka i praćena su odstupanja od srednje vrednosti kod oba materijala. Za dimenzije uzoraka za zatezanje korišćen je standard za plastične materijale ASTM D638-14 (ASTM International, 2014), odnosno njegov ekvivalent ISO 527-1 (International Organization of Standardization, 2012), a za uzorke za sabijanje je korišćen standard ASTM D695-15 (ASTM International, 2015), odnosno njegov ekvivalent ISO-604 (International Organization of Standardization, 2002). Ovi standardi su korišćeni od strane velikog broja istraživača u ovoj oblasti (Tymrak i saradnici, 2014; Novakova-Marcincinova i Novak-Marcincin, 2013; Weng i saradnici, 2016; Wu i saradnici, 2015; Lee i saradnici, 2007). Dimenzije uzoraka za testiranje zatezne čvrstoće prikazane su na slici 7.10a, a dimenzije uzorka za testiranje pritisne čvrstoće na slici 7.10b. Slika 7.10c predstavlja orijentaciju rastera odnosno smer niti dva uzastopna sloja.



Slika 7.10: a) Dimenzije uzoraka za ispitivanje sabijanjem po ASTM D695-15 standardu (mm), b) orijentacija deponovanih niti filameta na uzorku za testiranje pritisne čvrstoće i c) orijentacija deponovanih niti filameta na uzorku za testiranje zatezne čvrstoće

Deset uzoraka od svakog materijala je štampano koristeći dva različita FDM štampača. Za štampu ABS uzorka korišćen je Makerbot Replicator 2x (Slika 7.11), a za štampu PLA uzorka Makerbot Replicator 5<sup>th</sup> Generation (Slika 7.6).





Slika 7.11: FDM štampač MakerBot Replicator 2x (MakerBot, 2018)

Tabela 7.9: Karakteristike FDM štampača MakerBot Replicator 2x (MakerBot, 2018)

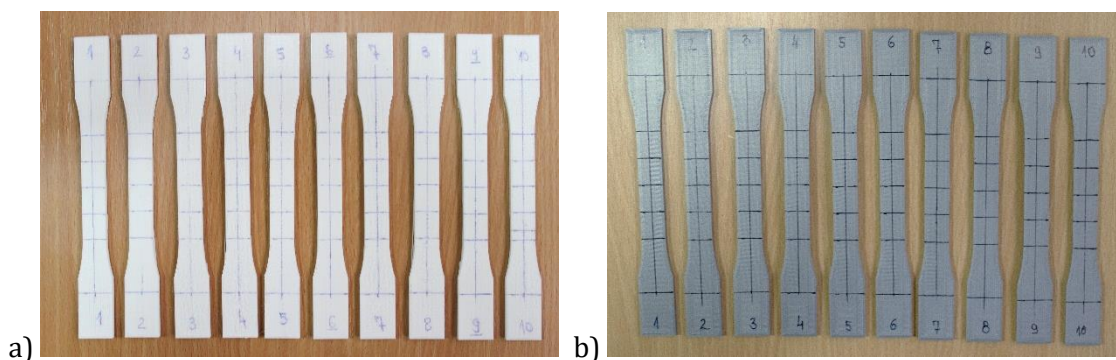
Rezolucija (debljina) sloja	Do 100 $\mu\text{m}$ (0.1mm)
Maksimalna veličina štampe (d x š x v)	246 x 152 x 155 mm
Brzina kretanja glave za štampu	20 – 120 mm/sec
Štampajuća platforma	Crni anodizirani 356F aluminijum (zagreva se)
Temperatura dizne	180 – 260 °C
Prečnik dizne	0.4 mm
Prečnik niti materijala	1.75 mm
Materijal koji podržava	ABS, PLA, materijal za potporne strukture
Softver za sečenje	MakerBot Desktop
Gabaritne mere (d x š x v)	490 x 420 x 531 mm
Tehnika štampe	Fused Deposition Modeling (FDM)

Parametri štampe uzoraka za oba štampača prikazani su u tabeli 7.10. Štampa uzoraka od PLA materijala sprovedena je u laboratorijama na Departmanu za grafičko inženjerstvo i dizajn, a uzoraka od ABS materijala na Katedri za mašinske elemente, teoriju mašina i mehanizama i poljoprivredno mašinstvo na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu.

Tabela 7.10: Podešavanja parametara FDM štampača MakerBot Replicator 5th Generation i Replicator 2x

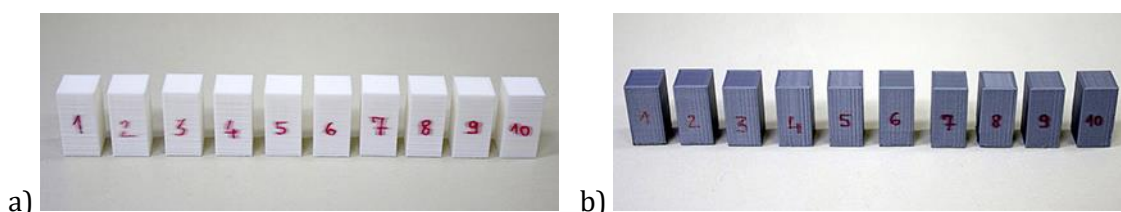
Materijal	PLA	ABS
<b>3D štampač</b>	<b>MakerBot Replicator 5th generation</b>	<b>MakerBot Replicator 2x</b>
Procenat unutrašnje popune	100%	100%
Debljina sloja	0.15 mm	0.15 mm
Broj konturnih zidova	3	3
Orijentacija rastera	0°/90° unakrsna popuna	0°/90° unakrsna popuna
Brzina kretanja glave za štampu	90 mm/s	90 mm/s
Podupiruće strukture	-	-
Podloška	Da	Da
Temperatura dizne	215 °C	230 °C
Temperatura platforme za štampu	-	120 °C

Uzorci za testiranje zatezne čvrstoće štampani su pojedinačno sa dodatkom početnih slojeva podloge (engl. *raft*), centrirani na platformi za štampu, kako bi se izbegli potencijalni problemi u nivelaciji platforme za štampu, a samim tim i nejednaka debljina uzorka. Slojevi su štampani tako da su niti jednog sloja bile normalne u odnosu na niti drugog sloja (Slika 7.10c). Prvi sloj je štampan pod uglom od  $0^\circ$  u odnosu na dužu osu uzorka, a sledeći pod uglom od  $90^\circ$ . Uzorci za testiranje zatezanja bili su sačinjeni iz ukupno 22 sloja. Odštampani uzorci su odvojeni od podloške (raft) i očišćeni od eventualnih zalepljenih niti podloške. Ovako pripremljeni uzorci su obeleženi i podvrgnuti testu zatezne čvrstoće (Slika 7.12).



Slika 7.12: Uzorci za testiranje zatezne čvrstoće od a) PLA materijala i b) od ABS materijala štampani FDM tehnikom 3D štampe

Za potrebe izvođenja testa pritisne čvrstoće izrađeno je 10 uzoraka. S obzirom da su u ovom slučaju uzorci manjih dimenzija potencijalni problemi sa nivelacijom su minorni te su isti štampani zajedno centrirani na platformi za štampu. Slojevi su štampani kao i u slučaju uzoraka za test zatezne čvrstoće, pod uglom od  $90^\circ$  jedni u odnosu na druge. Ukupan broj slojeva uzorka za testiranje pritisne čvrstoće je bio 167.



Slika 7.13: Uzorci za testiranje pritisne čvrstoće od a) PLA materijala i b) ABS materijala štampani FDM tehnikom 3D štampe

Pre izvođenja testa zatezne i pritisne čvrstoće, merena je površinska hrapavost uzorka uređajem TR200 (Slika 7.8). Parametri merenja su podešeni na sledeći način: 5 isečaka od 0.8 mm, opseg merenja  $\pm 80 \mu\text{m}$ , RC filter. Izmereno je svih deset uzoraka po pet puta u svakom smeru (u smeru vlakana i normalno na smer vlakana).

Izgled površine uzoraka oba materijala zabeležen je pomoću mikroskopa Leitz Orthoplan (Slika 7.14) pri uveličanju od 20x i prikazan je na slici 7.15a-d. Mikroskopski snimci su izrađeni u laboratorijama Katedre za materijale i tehnologije spajanja.

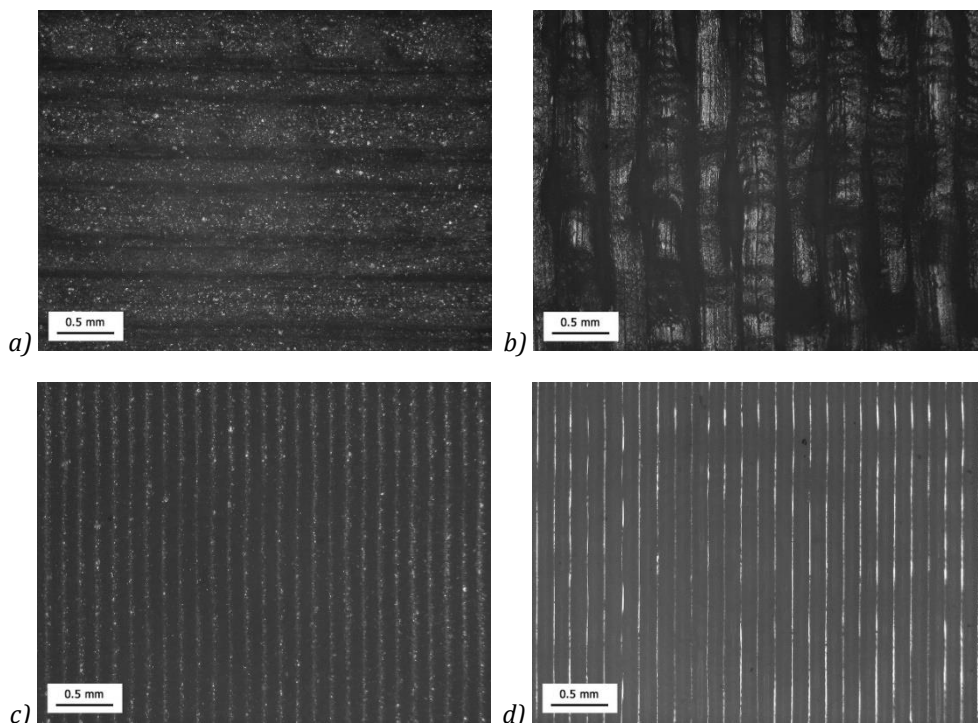


Slika 7.14: Mikroskop Leitz Orthoplan (Hofstra Group, n.d; HiTechTrader, 2018)

Tabela 7.11: Karakteristike mikroskopa Leitz Orthoplan (Hofstra Group, n.d; HiTechTrader, 2018)

Proizvođač/Model	Leitz Orthoplan Microscope
Okulari	Jedan par - Periplan GW10x18
Cev tela	Trinocular
Objektivi	Leitz NPL Fluotar 160/0.45, Plapo 100/1.32, NPL Fluotar L25/0.35
Tri sočiva	0.63 x 12", 2/3"
Prečnik platforme za uzorke	Ø 150 mm, rotaciona, sa nonijusom koraka 0.1°
Napajanje	14v/100w

Gornji slojevi ABS uzoraka su štampani normalno na uzdužni pravac uzorka. Izgled gornjih površina prikazan je na slici 7.15a i b bočnih površina štampanih duž z ose prikazani su na slikama 7.15c i d.



Slika 7.15: Mikroskopski snimci gornje površine uzorka od a) ABS i b) PLA materijala i bočnih strana uzorka od c) ABS i d) PLA materijala pri uveličanju od 20x štampanih FDM tehnikom 3D štampe

Test zatezne čvrstoće je izveden uređajem Shimadzu Compact Tabletop Testing EZ-LX, sa mernom ćelijom predviđenom za sile do 2.5 kN, brzinom kretanja stege od 5 mm/min, pri temperaturi od  $23 \pm 2$  °C i relativnoj vlažnosti vazduha od  $50 \pm 5$  % (ISO R291:2008). Test pritiskne čvrstoće je

izveden uređajem VEB ZDM 5/91, sa mernom ćelijom predviđenom za sile do 50 kN i brzinom kretanja stege od 2 mm/min. Korišćeni uređaji prikazani su na slikama 7.16a-d.



Slika 7.16: a) mašina za testiranje zatezne čvrstoće Shimadzu Compact Tabletop Testing Machine EZ-LX; b) uveličan prikaz ćeljasti za pričvršćavanje uzoraka; c) mašina za testiranje pritisne čvrstoće VEB ZDM 5/91; d) uveličan prikaz ploča za pritiskanje uzoraka

Podaci o zateznoj čvrstoći i istezanju prikupljeni su u toku testiranja Trapezium X softverom, izračunate su vrednosti modula elastičnosti i iscrtani su grafikoni napon-istezanje. Potrebne pritisne sile su prevazilazile maksimalnu moguću silu od 2.5 kN uređaja Shimadzu EZ-LX, te je za testiranje pritisne čvrstoće korišćen uređaj VEB ZDM 5/91 čija merna glava detektuje sile do 50 kN. Brzina kretanja pritisne ploče iznosila je 2 mm/min. Imajući u vidu da su slojevi kod uzoraka za sabijanje raspoređeni normalno na pravac delovanja sile, nije bilo vidljivo pucanje materijala, pa je za maksimalnu vrednost sile pritiska uzeta sila pri kojoj je prvi put došlo do plastične deformacije. Ovakva orijentacija slojeva u odnosu na silu pritiska biće primenjena i prilikom izrade alata za utiskivanje. Merenja pritisne čvrstoće izvedena su u laboratorijama Katedre za materijale i tehnologije spajanja. Za snimanje mesta loma kod uzoraka testiranih zatezanjem korišćen je digitalni mikroskop Veho VMS-004D sa uveličanjem do 400x. Uređaj i njegove specifikacije prikazane su na slici 7.17.



Slika 7.17: USB digitalni mikroskop Veho VMS-004D (cNet, n.d.)

Tabela 7.12: Karakteristike USB digitalnog mikroskopa Veho VMS-004D (cNet, n.d.)

Proizvođač/Model	Veho VMS-004D
Senzor	CMOS
Rezolucija	2 Mega Piksela
Kontroler	DSP
Brzina treperenja	50 MHz/ 60 Hz
Izvor svetla	Ugrađene 4 LED diode
Uveličanje	20x do 400x
Rezolucija slika	Do 1600 x 1200 piksela
Rezolucija videa	Do 1280 x 960 piksela



Vrednosti zatezne i pritisne čvrstoće opisuju mehaničke osobine FDM štampanih uzoraka, odnosno koje sile istezanja i pritiska mogu da podnesu bez trajne deformacije. Ovo je veoma bitno imati na umu prilikom podešavanja maksimalnog pritiska za utiskivanje alatom izrađenim ovom tehnikom 3D štampe. Rezultati zatezne i pritisne čvrstoće Poglavlju 8.3.

## 7.5 Termo-mehaničke osobine uzoraka izrađenih FDM tehnikom štampe

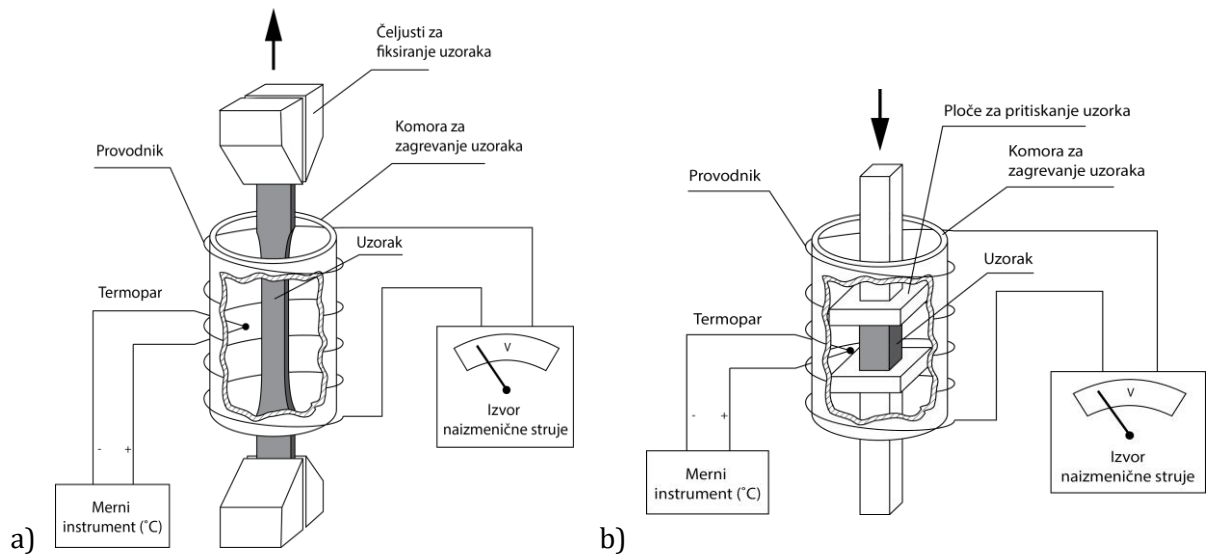
S obzirom na to da je predmet doktorske disertacije istraživanje mogućnosti zamene konvencionalnih tehnika, tehnikama 3D štampe, pri izradi alata za utiskivanje potrebno je ispitati mehaničke osobine materijala korištenih u FDM tehnici 3D štampe, pri različitim temperaturama. Imajući u vidu da su u upitanju termoplastični materijali, promene temperature radnog okruženja mogu uticati na mehaničke karakteristike. Posebno je bitno utvrditi ove osobine za procenu mogućnosti primene ovakvih alata za tehnike utiskivanja sa folijom koje zahtevaju rad alata na znatno povišenim temperaturama. Za potrebe eksperimenta konstruisana je posebna aparatura, prikazana na slici 7.18, čija je uloga da održava temperaturu uzorka konstantnom prilikom testiranja.

### Uzorci

Dimenzije uzoraka za zatezanje pri povišenoj temperaturi definisane su prema standardu za plastične materijale ASTM D638-14 (ASTM International, 2014), odnosno njegov ekvivalent ISO 527-1, a za uzorke za sabijanje je korišćen standard ASTM D695-15 (ASTM International, 2015), odnosno njegov ekvivalent ISO-604. Uzorci su proizvedeni pod istim uslovima kao i za potrebe prethodnog istraživanja (3D štampači - slika 7.6 i 7.11 i procesni parametri - Tabela 7.10). PLA uzorci su testirani na pet različitih temperatura dok su ABS uzorci testirani na sedam. Razlog ove metodologije je u različitoj tački stakljenja PLA i ABS materijala. ABS materijal ima višu tačku stakljenja, pa je potrebno testirati veći raspon temperatura okruženja. Aparatura konstruisana za ovo ispitivanje se može videti na slici 7.18a, a njena montaža na uređaj za testiranje zatezne čvrstoće na slici 7.18b. Šematski prikaz konstruisane aparature prikazan je na slici 7.19.



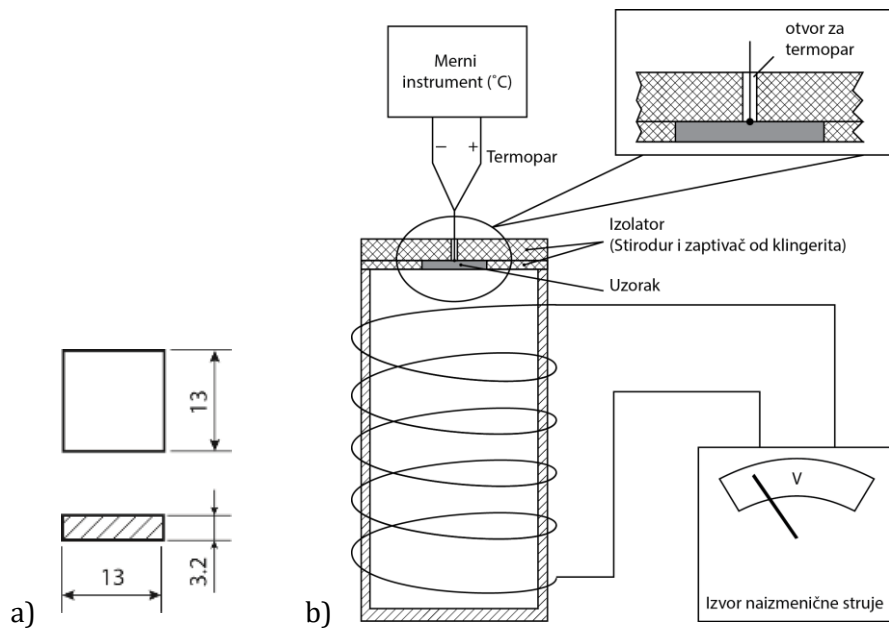
Slika 7.18: a) Aparatura za zagrevanje uzorka tokom testiranja zatezne čvrstoće i b) montirana aparatura na čeljusti za fiksiranje uzorka prilikom testiranja zatezne čvrstoće



Slika 7.19: Ilustracija aparature za zagrevanje uzoraka tokom testiranja a) zatezne čvrstoće i b) pritiskne čvrstoće

## Procedura

Ovom istraživanju je prethodilo preliminarno istraživanje čiji je cilj bio da se ustanovi vreme za koje se postigne željena temperatura u komori aparature, odnosno vreme koje je potrebno da se uzorak zagreje. Uzorci dimenzija 13 x 13 mm sa debljinom 3.2 mm, proizvedeni su pod istim uslovima kao i uzorci za utvrđivanje zatezne čvrstoće. Donji deo uzorka je bio izložen temperaturi unutar komore, dok je gornji deo bio izolovan zaptivačem od klingerita i stirodurom sa otvorom malog prečnika, dovoljnog za postavljanje termo para na površinu uzorka. Ovim su empirijski dobijene vrednosti termalne provodljivosti uzorka debljine 3.2 mm odštampanog FDM tehnikom 3D štampe. Dimenzije preliminarnih uzoraka i šematski prikaz postavke aparature za preliminarno istraživanje prikazani su na slici 7.20.



Slika 7.20: Ilustracija a) uzorka i njegovih dimenzija i b) šema aparature za preliminarno testiranje toplotne provodljivosti

Vreme postizanja stabilne željene temperature komore i vreme postizanja željene temperature gornje strane uzorka su mereni i zabeleženi. Temperatura je merena termometrom Testo 735-2 - Multichannel thermometer (Slika 7.21).



Slika 7.21: Testo 735-2 – Višekanalni termometar (Testo Limited, 2018)

Tabela 7.13: Karakteristike Testo 735-2 – Višekanalnog termometra (Testo Limited, 2018)

Proizvođač/Model	Testo 735-2 Multichannel thermometer
Preciznost sistema	do 0.05 °C
Radna temperatura	od -20 do +50 °C
Opseg merenja (sonda K)	od -200 do +1370 °C
Preciznost merenja (sonda K)	± 0.3 °C (u opsegu od -60 to +60 °C) ±(0.2 °C + 0.3% od merene vrednosti) (ostatak opsega)
Rezolucija	0.1 °C

Vreme potrebno da se zagreje ceo uzorak unutar aparature izračunato je koristeći jednačinu (8) za uzorke za testiranje zatezne čvrstoće i jednačinu (9) za uzorke za testiranje pritiskne čvrstoće.

$$t_s = t_u - \frac{t_u}{3} \quad (8)$$

$$t_s = \left( t_u - \frac{t_u}{3} \right) \times 4 \quad (9)$$

Gde je  $t_s$  vreme potrebno da se zagreje ceo uzorak,  $t_u$  – vreme potrebno da se na željenu temperaturu zagreje gornja strana uzorka u preliminarnom testu. Jednačina (8) je korištena za uzorke za istezanje gde je  $t_s < t_u$ , jer će u glavnom eksperimentu uzorak sa svih strana biti okružen grejačima, pa će vreme za zagrevanje celog uzorka biti kraće. U jednačini (9) korišćenoj za proračun potrebnog vremena zagrevanja uzorka za sabijanje, vrednost dobijena jednačinom (8) je pomnožena sa 4 jer su ti uzorci četiri puta deblji od uzorka za istezanje.

Nakon određivanja vrednosti vremena zagrevanja komore i uzorka, pristupilo se glavnom eksperimentu. Ukupno je sprovedeno pet merenja na različitim temperaturama pri testiranju zatezne čvrstoće i četiri merenja na različitim temperaturama pri testiranju pritiskne čvrstoće za PLA materijal. Za ABS materijal sprovedeno je po sedam merenja na različitim temperaturama za testiranje zatezne i pritiskne čvrstoće. Testovi su izvedeni na tri uzorka pod identičnim uslovima. Ukupno je testirano 15 PLA i 21 ABS uzorka za merenje zatezne čvrstoće, a 12 PLA i 21 ABS uzorak za testiranje pritiskne čvrstoće.

Testiranje zatezne čvrstoće je izvedeno uređajem Shimadzu Compact Tabletop Testing Machine EZ-LX sa montiranom aparaturom za zagrevanje uzorka (slika 7.3). Korišćena je merna ćelija predviđena za sile do 2.5 kN. Kada je unutar aparature postavljene između čeljusti za fiksiranje uzorka temperatura postigla željenu vrednost, ubačen je i fiksiran uzorak. Vreme zagrevanja

uzorka pre pokretanja testa je definisano prethodnim preliminarnim testom i iznosilo je 13,5 min. Svaki uzorak je testiran brzinom kretanja stege od 5 mm/min.

Testiranje pritiskne čvrstoće sprovedeno je na Veb-Leipzieg ZMGi 500 u opsegu od 5 kN. Brzina kretanja pritiskne ploče je bila 2 mm/min. Uzorci za testiranje pritiskne čvrstoće zagrevani su u aparaturi 54 min pre samog testa. Zbog nepristupačnosti montaže aparature na samom mernom uređaju, uzorci su zagrevani u aparaturi pored mernog uređaja, a potom su montirani između pritisknih ploča u koje je bio uperen ručni industrijski grejač, kako bi se održala željena temperatura prilikom testiranja. Temperatura komore i vazduha kod pritisknih ploča praćena je uređajem Testo 735-2 - Multichannel thermometer (Slika 7.22).

Temperature testiranja oba materijala ( $\pm 2$  °C) prikazani su u tabeli 8.22 (Poglavlje 8.4). Relativna vlažnost vazduha u prostoriji prilikom testiranja bila je  $50 \text{ °C} \pm 5\%$  - po ISO R291:2008 (ISO, 2008). Za svaku temperaturu testirana su po tri uzorka, pojedinačno. Za zateznu čvrstoću podaci su prikupljeni i obrađeni Trapezium X softverom.

Korak promene temperature tokom testiranja za oba materijala iznosi 10 °C. Prikazane su srednje vrednosti za pritisku čvrstoću. Beležena je minimalna sila pritiska potrebna da se uzorak trajno deformiše za 0,1 mm, odnosno 0,4% od svoje visine. Mikrometrom je merena visina uzorka posle svakog delovanja pritiskne sile. Ukoliko nije zabeležena trajna deformacija, uzorak je ponovo testiran većom silom od prethodne, a postupak je ponavljan dok nije primećena promena od 0,4% visine uzorka. Poslednja sila je zabeležena kao sila prilikom koje dolazi do permanentne deformacije visine uzorka. Na osnovu zabeleženih sila, izračunate su vrednosti napona.

Termalne slike zagrevanih uzoraka za testiranje zatezne čvrstoće na montiranoj aparaturi su zabeležene pomoću termalne kamere Fluke TiS45 Thermal Imager (Slika 7.22).



Slika 7.22: Termalna kamera Fluke TiS45 (Fluke, 2018)

Tabela 7.14: Karakteristike termalne kamere Fluke TiS45 (Fluke, 2018)

Proizvođač/Model	Fluke TiS45 Infrared Camera
IFOV (spacijalna rezolucija)	3.9 mRad
Rezolucija detektora	160x120
Polje vidljivosti	35.7° x 26.8°
Rastojanje do tačke	257:1
Termalna osetljivost (NETD)	$\leq 0.09$ °C pri 30 °C ciljane temperature (90mK)
Temperaturni merni opseg	-20 °C do +350 °C
Tačnost merenja temperature	$\pm 2$ °C ili 2% (pri 25 °C)
Infracrveni spektralni opseg	od 7.5 $\mu\text{m}$ do 14 $\mu\text{m}$

Rezultati dobijeni ovim eksperimentom prikazani su u Poglavlju 8.4.



## 7.6 Istraživanje uticaja završne obrade uzoraka dobijenih FDM tehnikom 3D štampe na površinsku hrapavost, zateznu čvrstoću i promenu dimenzija finih detalja za utiskivanje

U okviru ovog istraživanja rađena je i analiza površinske hrapavosti uzoraka štampanih FDM tehnikom 3D štampe posle završne obrade mehaničkom i hemijskom metodom. Jin i saradnici (2017) su istraživali uticaj završne obrade rastvorom dihlormetana na površinsku hrapavost i zateznu čvrstoću FDM štampanih uzoraka od PLA materijala. Takođe je poznat povoljan uticaj rastvora tetrahidrofurana na smanjenje površinske hrapavosti, ali nisu poznati uticaji ovakve završne obrade na mehaničke osobine uzoraka. Istraživan je i uticaj isparavanja i potapanja ABS uzoraka u rastvor acetona na njihove mehaničke osobine, međutim, uticaj ovog jedinjenja na PLA uzorke nije testiran. Takođe, nisu rađena istraživanja uticaja mehaničke obrade FDM štampanih uzoraka na površinsku hrapavost i mehaničke osobine.

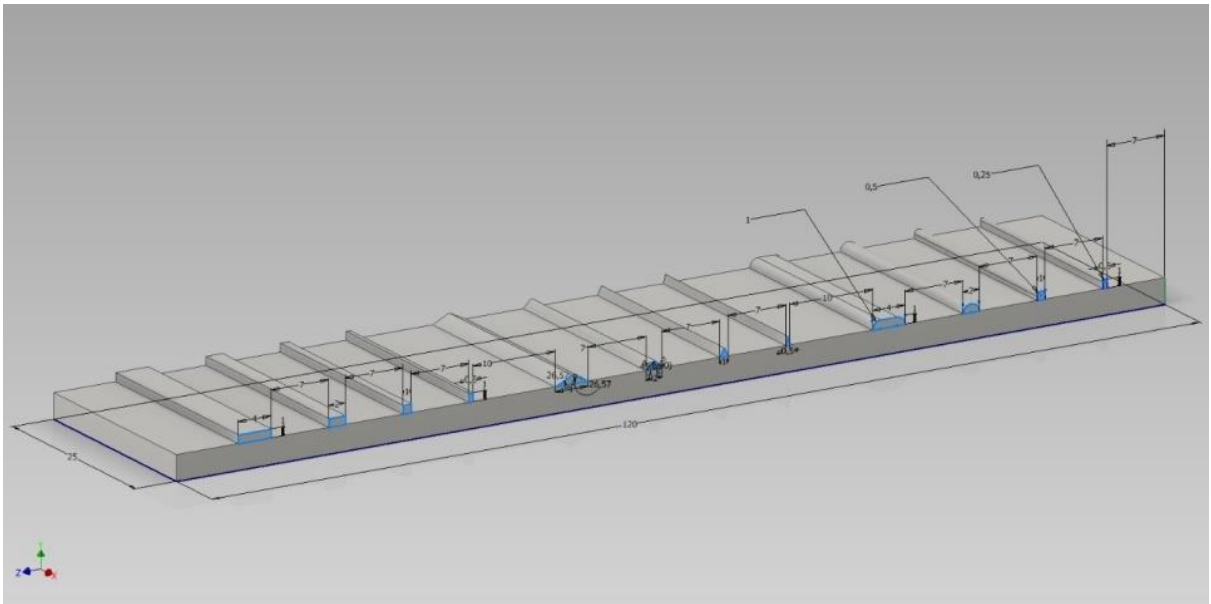
Ovim eksperimentom, testirane su tri pretpostavke:

- *Završna obrada PLA uzoraka, dobijenih FDM aditivnom tehnologijom, utiče na njihovu zateznu čvrstoću i dimenzije.*
- *Mehanički obrađena površina PLA uzoraka, dobijenih FDM aditivnom tehnologijom, utiče nepovoljnije na njihovu zateznu čvrstoću i dimenzije u poređenju sa hemijskom obradom.*
- *Završna obrada PLA uzoraka, dobijenih FDM aditivnom tehnologijom, imaće najmanji uticaj na elemente sa oblim završetkom, a najveći na elemente koji imaju oštre završetke.*

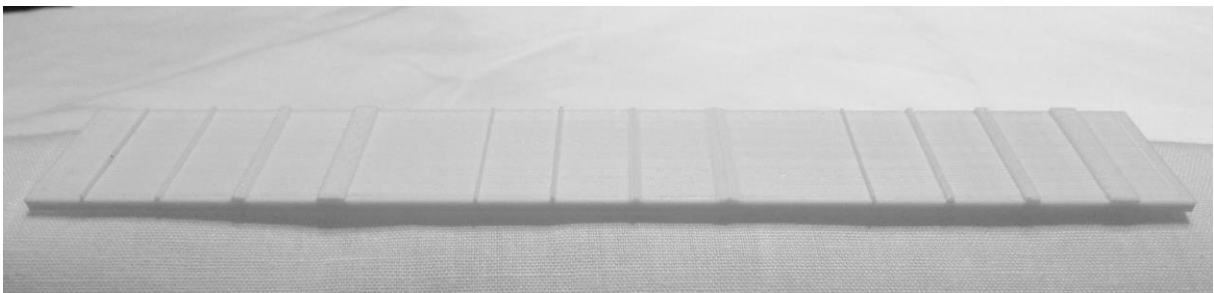
Ispitivanje zatezanjem sprovedeno je saglasno sa ASTM D638-14 standardom na standardnim epruvetama Tipa 1 (Slika 7.3), a analiza finih detalja pre i nakon završne obrade na uzorcima posebno razvijenim za ovu namenu. Svi uzorci su izrađeni od PLA materijala FDM tehnikom 3D štampe. Posmatrane su neobrađene, mehanički obrađene i hemijski obrađene epruvete. Mehanička obrada je izvršena brusnim papirom različitih granulacija, a hemijska obrada se sastojala u potapanju uzoraka u acetonsku kupku.

### **Uzorci**

Ukupno je izrađeno devet epruveta sa dimenzijama i oblikom prikazanim na slici 7.3. Tri uzorka su bila neobrađena, tri su mehanički obrađena upotrebom brusnog papira, a preostala tri uzorka su obrađena hemijskim postupkom koristeći acetonsku kupku. Merene su dimenzije uzoraka pre i posle završne obrade digitalnim pomičnim merilom sa mernom skalom od 150 mm i preciznošću 0,01 mm. Pored standardnih epruveta za testiranje zatezne čvrstoće, štampani su uzorci sa finim detaljima za utiskivanje (Slike 7.23 i 7.24). Uzorci su konstruisani i izrađeni u laboratorijama Departmana za grafičko inženjerstvo i dizajn.



*Slika 7.23: Test uzorci sa finim detaljima za utiskivanje (CAD model)*



*Slika 7.24: Odštampani uzorak sa finim detaljima za utiskivanje*

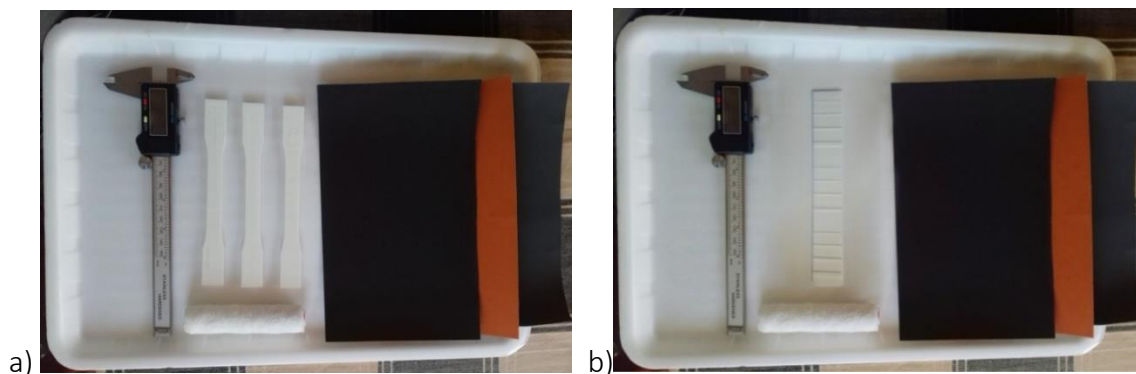
Ovi uzorci su konstruisani kako bi se istražio uticaj završne obrade na elemente za utiskivanje. Sadržali su linijske elemente sa ivicama koje obrazuju oštri ugao, zatim ugao od  $90^\circ$  i sa zaobljenim ivicama. Širine linija su bile 0,5 mm, 1 mm, 2 mm i 4 mm. Visina linijskih elemenata je bila 1 mm, a dužina 25 mm. Odštampana su tri uzorka sa finim detaljima.

### **Procedura**

Nakon proizvodnje uzoraka i evidentiranja dimenzija pre obrade, tri uzorka su obrađena mehaničkim putem, a tri hemijskim. Cilj mehaničke obrade je postizanje glatke površine, tj. uklanjanje površinskih neravnina karakterističnih za FDM tehniku štampe. Preliminarnim testiranjem uzoraka pokazalo se da najbolje rezultate daje kontinualna mehanička obrada sa dva brusna papira različitih granulacija uz konstantno vodeno hlađenje, kako bi se sprečilo zagrevanje i topljenje plastične mase.

Alati za mehaničku obradu uzoraka (slika 7.25) su:

- brusni papir finoće P100 otporan na vodu;
- brusni papir finoće P320 otporan na vodu;
- valjak za čišćenje obrađenih površina;
- kontinualni izvor vode za hlađenje;
- aparatura za merenje dimenzija nakon mehaničke obrade.



Slika 7.25: Prikaz potrebnih alata za obradu brusnim papirom: a) epruveta za testiranje zatezne čvrstoće i b) modela sa sitnim elementima za utiskivanje

Postupak obrade brusnim papirom test epruvete i uzorka sa finim detaljima bio je sledeći:

- obrada površine blagim pritiskom prvo 3 min i 30 s brusnim papirom finoće P100,
- obrada površine blagim pritiskom dodatnih 1 min i 30 s koristeći brusni papir finoće P320.

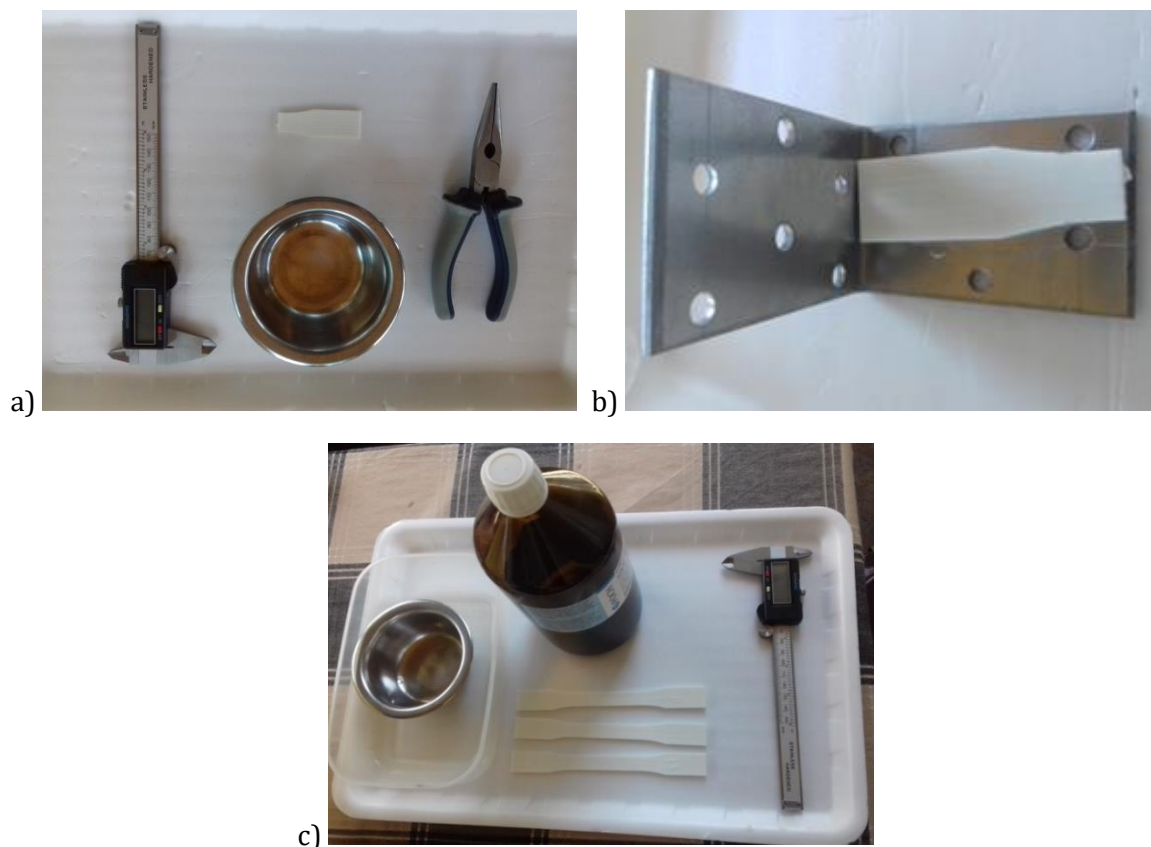
Obrada brusnim papirom vršila se ravnomernim pritiskom kružnim pokretima uz kontinualno vodeno hlađenje.

Hemijska obrada uzoraka potapanjem u acetonsku kupku pokazala se kao delotvorna metoda za smanjenje površinske hrapavosti kod ABS uzoraka (Ho Jo i saradnici, 2016). U ovom ispitivanju isti metod je bio primenjen na uzorke od PLA materijala. Kod hemijske obrade, test epruvete i uzorci sa finim detaljima potapani su u acetonsku kupku ( $(\text{CH}_3)_2\text{CO}$  - p.a.  $\geq 99\%$ ). Pre potapanja test epruveta, postupak je isproban preliminarnim eksperimentom, kako bi se ustanovilo da korišćene hemikalije ne utiču na instrumente i kako bi se odredilo vreme potapanja koje ne dovodi do neprihvatljivog oštećenja test epruvete. Nakon testiranja, utvrđeno je da ne dolazi do reakcije acetona i instrumenata i ustanovljeno je optimalno vreme potapanja u trajanju od 40 sec.

Alati korišćeni pri hemijskoj obradi (slika 7.26) površina test epruveta i test uzorka sa finim detaljima su:

- aceton;
- metalna posuda;
- žica savijena u L koja se koristi za spustanje epruvete i uzorka u aceton;
- metalni profil koji se koristi za sušenje;
- aparatura za merenje dimenzija nakon hemijske obrade.

Nakon mehaničke i hemijske obrade test epruveta, površina uzoraka je snimljena digitalnim USB mikroskopom Vitiny VT300 (Slika 7.27) sa uveličanjem 10x, a zatim se pristupilo ispitivanju zatezne čvrstoće na kitalici Shimadzu Compact Tabletop Testing Machine EZ-LX (slika 7.2) sa mernom ćelijom predviđenom za sile do 2.5 kN i brzinom kretanja čeljusti od 5 mm/min. Testiranje je sprovedeno na temperaturi od  $23 \pm 2$  °C pri relativnoj vlažnosti vazduha od  $50 \pm 5\%$  (ISO R291:2008). Podaci o zateznoj čvrstoći i istezanju prikupljeni i obrađeni su softverskim alatom Trapezium X. Posle testiranja, snimljeni su i poprečni preseki u predelu loma epruveta, kako bi se stekao bolji uvid u eventualne promene unutrašnje strukture slojeva obrađenih i neobrađenih uzoraka.



Slika 7.26: Prikaz alata potrebnih za hemijsku obradu potapanjem u acetonsku kupku



Slika 7.27: Digitalni USB mikroskop ViTiny VT-300 (Oasis Scientific, Inc. N.d.)

Tabela 7.15: Karakteristike digitalnog USB mikroskopa ViTiny VT-300 (Oasis Scientific, Inc. N.d.)

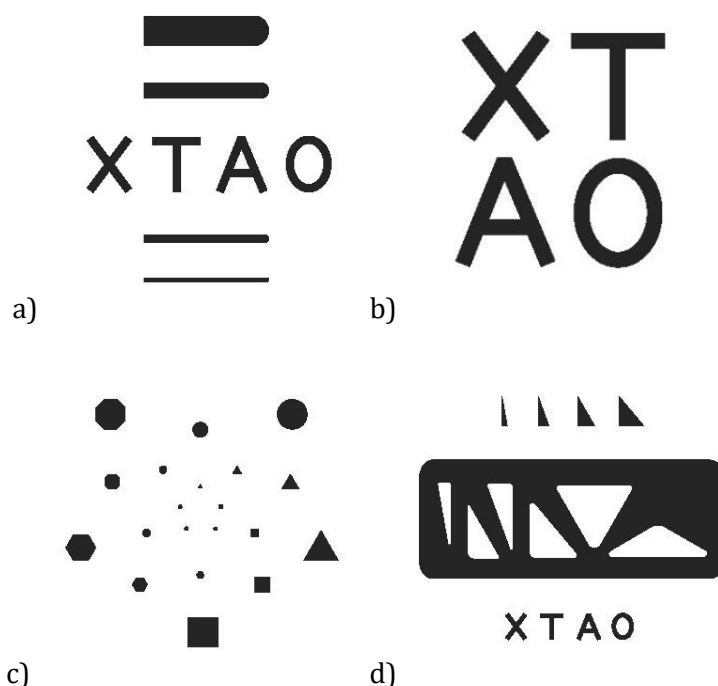
Proizvođač/Model	ViTiny VT300
Sočivo i CMOS senzor	2 Mega piksela
Rezolucija slika	1600 x 1200 piksela, JPG
Rezolucija videa	640 x 480 piksela, AVI
Uveličanje	10x – 200x
Optički zoom	10x – 40x
Digitalni zoom	5x
Ugrađeni ekran	2.8" full color TFT LCD, 320 x 240 piksela za prikaz
Izvor svetla	4 ugrađene bele LED diode
Ugrađene merne funkcije	Dužina, obim, površina, prečnik i poluprečnik, ugao

Rezultati prikupljeni ovim istraživanjem prikazani su u Poglavlju 8.5.

## 7.7 Izrada alata za utiskivanje

Za potrebe poređenja rezultata utiskivanja alata izrađenih FDM tehnikom štampe i konvencionalno izrađenih alata za utiskivanje koncipirani su i izrađeni ogledni alati sa specifičnim elementima. Elementi su konstruisani uzimajući u obzir rezultate prethodnih istraživanja, iskustava iz realnog procesa proizvodnje grafičkih proizvoda, a sa ciljem procene upotrebljivosti FDM tehnologije za izradu alata za utiskivanje papira.

Pri izboru elementa birani su često korišćeni elementi kao što su osnovni geometrijski oblici (trougao, krug, kvadrat, linija, šestougao, osmougao) koji su sastavni elementi komplikovanijih oblika. Odabrana su i slova (X, T, A, O) koji sadrže slovne poteze od kojih mogu biti konstruisana ostala slova. Ti potezi su: kosi (X, A), vertikalni i horizontalni (T), obli (O), kao i zatvorene forme slova (A i O). I geometrijski oblici i slovni znaci izrađeni su u različitim veličinama kako bi se ustanovila ograničenja rezultata utiskivanja alatima proizvedenim konvencionalnom i tehnikom 3D štampe. Odabrani elementi alata za utiskivanje su prikazani na slici 7.28.

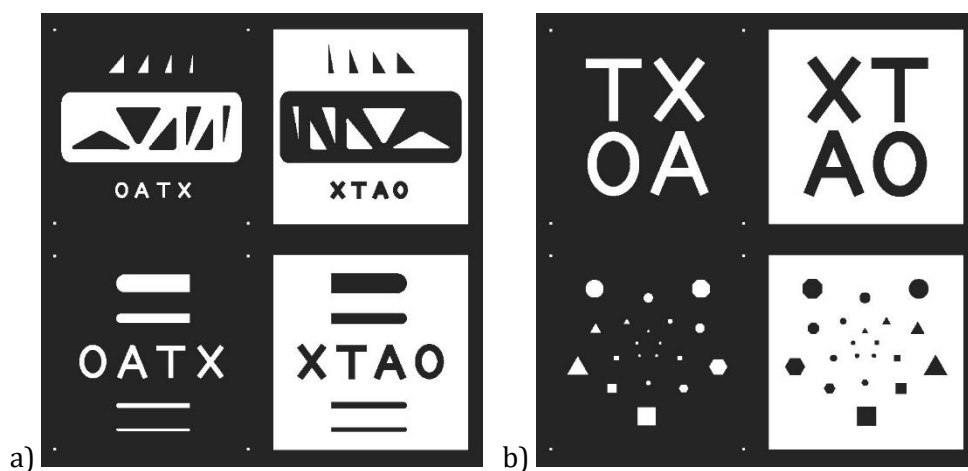


Slika 7.28: Elementi alata za utiskivanje na formi za a) prvi, b) drugi, c) treći i d) četvrti set alata

### 7.7.1 Izrada alata za utiskivanje konvencionalnom tehnikom hemijskog nagrivanja

#### Uzorci

Za potrebe ovog istraživanja izrađene su forme konvencionalnom tehnikom hemijskog nagrivanja, a zatim FDM i SLA tehnikom 3D štampe. Uzorci su sadržali elemente sa slike 7.28 ili u slučaju SLA tehnike kombinaciju ovih elemenata uzimajući u obzir specifičnosti ove tehnike. Na slici 7.29 prikazan je predložak za izradu filma korišćenog za hemijsko nagrivanje ploča od magnezijuma. Potrebno je uraditi pripremu za patricu i matricu. Elementi na matrici su uvećani tako da zazor između elemenata patrice i matrice bude 0,4 mm.



Slika 7.29: Pripremni fajlovi za izradu alata za utiskivanje tehnikom hemijskog nagrivanja

### **Procedura**

Nakon pripreme digitalnog predloška pristupa se izradi filmova uređajem Laser Imagesetter Ultrre 5400 (Slika 7.30).



Slika 7.30. Uređaj za izradu filmova Laser Imagesetter Ultrre 5400

Tabela 7.16: Karakteristike uređaja za izradu filmova Laser Imagesetter Ultrre 5400

Proizvođač/Model	Heidelberg Ultrre 5400 Laser Imagesetter
Izvor svetla	Crvena laserska dioda, talasne dužine 670 nm
Princip osvetljavanja	Rotaciono
Širina osvetljavanja	406 mm
Maksimalna frekvencija rastera	Do 78 L/cm (200 lpi) pri rezoluciji od 3386 dpi
Preciznost ponavljanja	Tipično $\pm 25 \mu\text{m}$ , maks. $40 \mu\text{m}$
Materijal za osvetljavanje	VR-osetljiv materijal sa maksimalnom osetljivošću pri 670 nm, 0.1 do 0.18 debljine
Širine osvetljavanja	150 mm, 200, 250, 280, 305, 310, 338, 355, 380, 400, 406 mm
Potrošnja el. Energije	0.5 kW u radnim uslovima
Dimenzije (š x v x d)	720 x 895 x 635 mm
Težina	130 kg

Maksimalne brzine osvetljavanja filma mogu se videti u tabeli 7.17.

Tabela 7.17: Maksimalne brzine osvetljavanja filma na uređaju Laser Imagesetter Ultra 5400

Rezolucija pixel/cm	Maks. Brzina cm/min	Rezolucija tačkica/inču	Maks. Brzina inč/min
394	64.6	1000	25.4
400	62.5	1016	24.6
472	56.1	1200	22.1
500	50.1	1270	19.7
630	42.2	1600	16.6
667	37.6	1692	14.8
787	32.3	2000	12.7
796	31.2	2032	12.3
945	28	2400	11.0
1000	25.2	2540	9.9
1180	18	3000	7.1
1332	14	3386	5.5

Nakon izrade filmova, magnezijumove ploče (kliše) osvetljavaju se uređajem Duplomat Rectoplan (Slika 7.31).



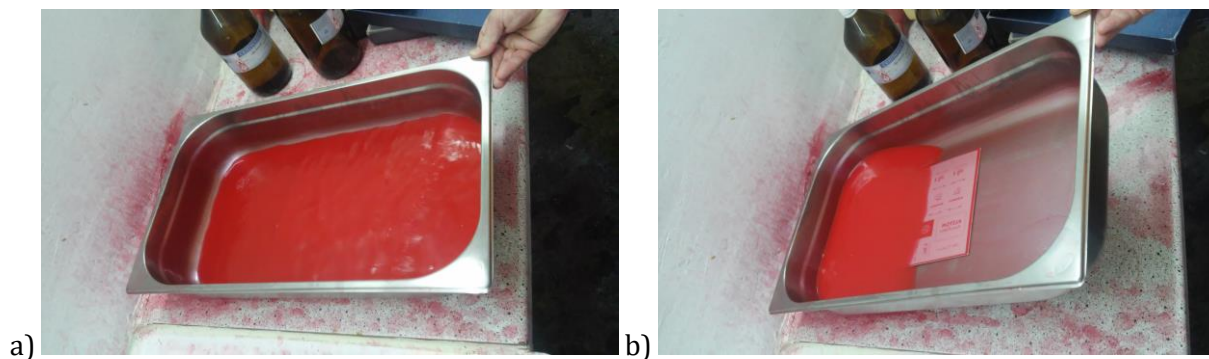
Slika 7.31: Uređaj za osvetljavanje ploča Rectoplan Duplomat

Tabela 7.18: Karakteristike uređaja za osvetljavanje ploča Rectoplan Duplomat

Proizvođač/Model	Rectoplan Duplomat
Princip osvetljavanja	Ravno osvetljavanje
Maksimalni format	500 x 700 mm
Dimenzija površine za osvetljavanje	500 x 600 mm
Izvori svetla	<ul style="list-style-type: none"> <li>- jedna živina sijalica od 400 W</li> <li>- 4 LED sijalice od 300 W</li> <li>- Point svetlo od 100W</li> </ul>



Osvetljavanje ploča traje prosečno 15 min za korišćene Red Top ploče kompanije Magnesium Electron. Predugačka ekspozicija ovih ploča može da rezultira preteranim zapušenjem rasterske tačke u senkama i ne obezbeđuje otpornost gornjeg sloja na hemijsko nagrivanje. Kratka ekspozicija uzrokuje ispiranje elemenata u toku razvijanja, što dovodi do neadekvatnog nagrivanja. Nakon osvetljavanja ploča, sledi razvijanje ploča. Razvijanje se vrši u posudi, rastvorom trihloretilena  $C_2HCl_3$  (p.a. > 99%). Na slikama 7.32a i b prikazan je postupak razvijanja.



*Slika 7.32: Proces razvijanja magnezijumske ploče*

Cilj ovog postupka je da se odstrani crveni foto osetljivi sloj koji nije polimerizovan u postupku osvetljavanja forme. Proces razvijanja ploča traje 10min. Nakon razvijanja, ploča se suši mlazom toplog vazduha približno 5 min. Zatim sledi proces početnog nagrivanja razblaženim rastvorom azotne kiseline, kako bi se postupak hemijskog nagrivanja započeo i kako bi se odstranio višak foto osetljivog sloja. Nakon ove faze sledi hemijsko nagrivanje koje je vršeno pomoću uređaja posebno konstruisanih za tu namenu (slike 7.33a-c).



*Slika 7.33: Uređaj za hemijsko nagrivanje magnezijumskih ploča i fiksiranje ploče spremne za proces hemijskog nagrivanja*

Hemijsko nagrivanje ploča se obavlja u regulisanim uslovima (slika 7.34) praćenjem brzine kretanja lopatica unutar uređaja, čiji je zadatak da omogući cirkulaciju sredstva za nagrivanje i njeno ravnomerno nanošenje po celoj površini ploče. Sredstvo za nagrivanje je sastavljeno od azotne kiseline ( $HNO_3$ ), vode i mineralnog ulja za nagrivanje REV-FLEX Etch Additive. Na 20 l vode, dodaje se 8 l azotne kiseline i 1.4 l ulja za nagrivanje. Vreme hemijskog nagrivanja zavisi od debljine ploče koja se nagriva i zasićenosti sredstva za nagrivanje. Hemijsko nagrivanje alata za utiskivane prema predlošku prikazanom na slici 7.29 trajalo je 20 min.



Slika 7.34: Uređaj za regulaciju brzine kretanja lopatica, vremena hemijskog nagrivanja i temperature sredstva za nagrivanje

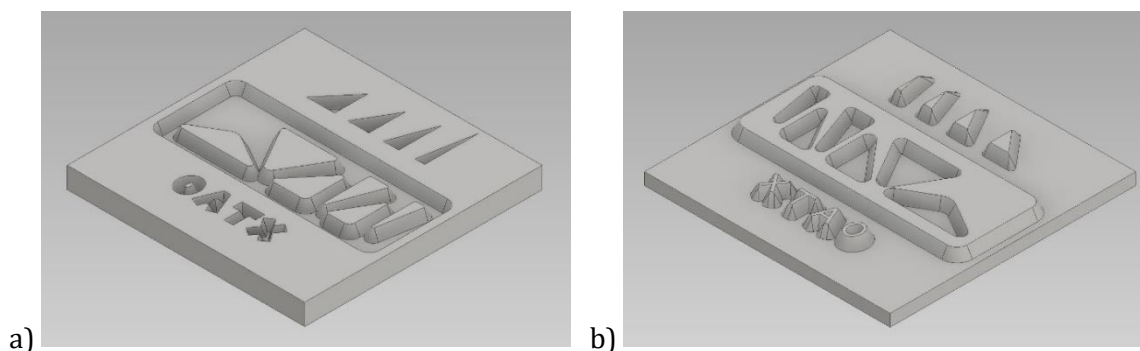
Za potrebe eksperimenta izrađeno je ukupno četiri para alata (patrica i matrica) za utiskivanje konvencionalnom tehnikom hemijskog nagrivanja. Ukupno vreme izrade sva četiri seta alata iznosilo je približno 90 min. Izgled alata prikazan je na slici 7.35.



Slika 7.35: Komplet alata izrađenih tehnikom hemijskog nagrivanja magnezijuma namenjenih za istraživanje obuhvaćeno doktorskom disertacijom

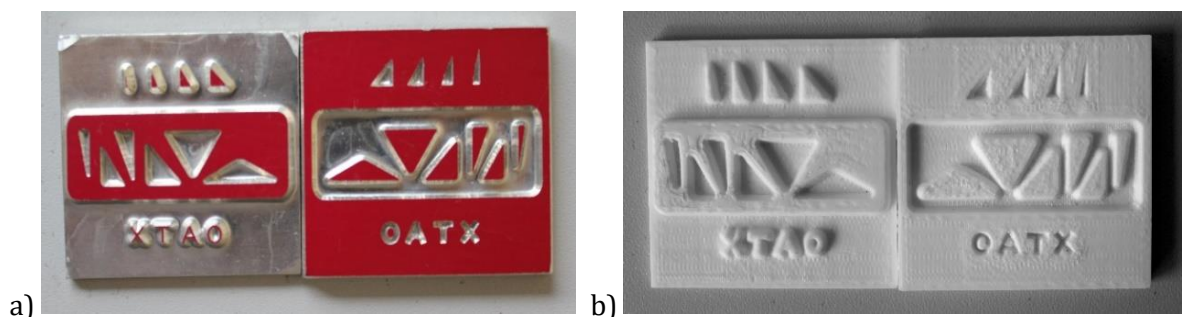
### 7.7.2 Izrada alata za utiskivanje FDM tehnikom 3D štampe

Prvobitno je izrađen model alata za utiskivanje identičnih dimenzija onim izrađenim tehnikom hemijskog nagrivanja. Analizirane su dimenzije i uglovi na elementima i na osnovu toga urađen je 3D model koristeći CAD aplikaciju Autodesk Inventor. Kao izlazni format odabrana je STL datoteka, koja je potom uvezena u softver za sečenje 3D modela na slojeve (engl. slicing) koje će štampač izraditi (Slike 7.36a i b). Ukupno vreme izrade jednog seta alata za utiskivanje iznosilo je približno 70 min.



Slika 7.36: 3D model jednog seta replike alata za utiskivanje izrađenog tehnikom hemijskog nagrivanja magnezijuma

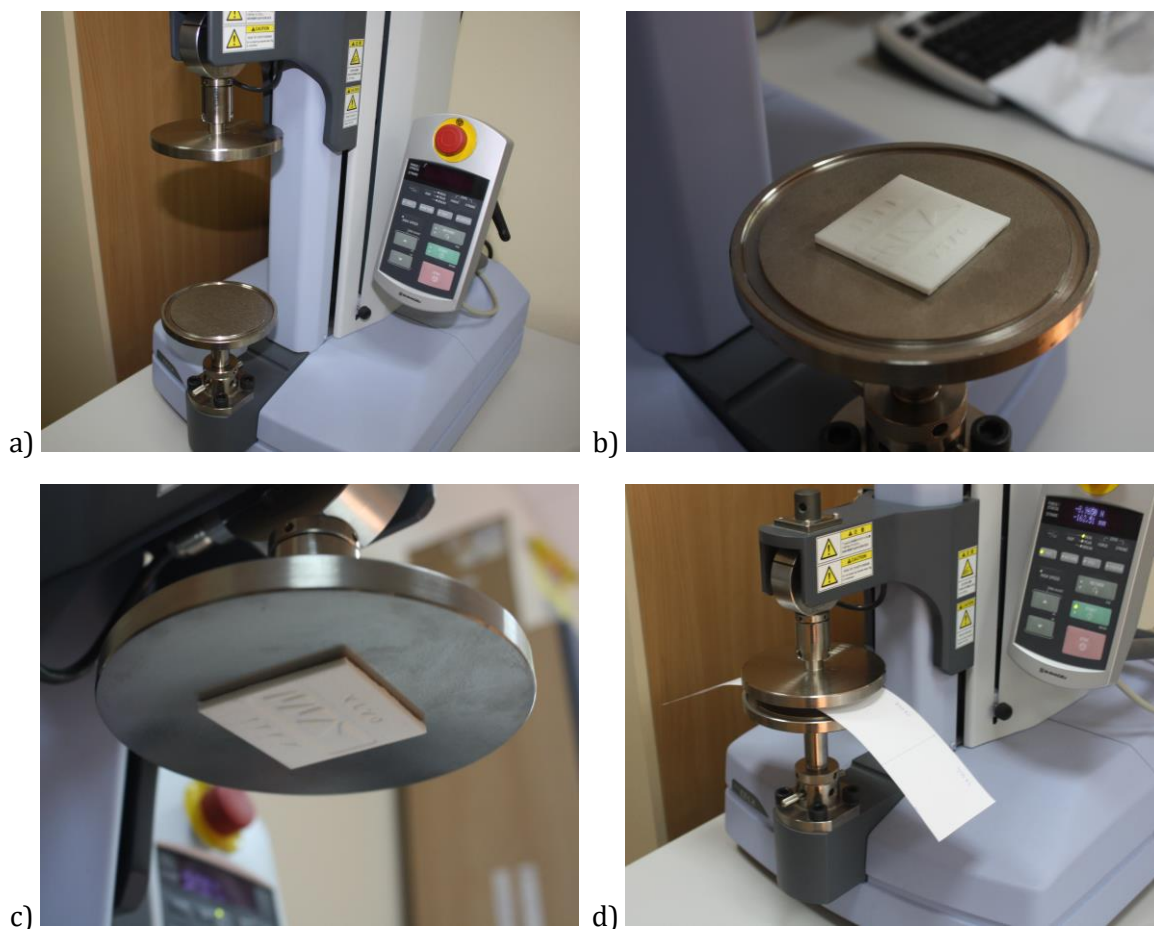
Izgled alata izrađenog tehnikom hemijskog nagrizanja i prvobitni alat po uzoru na koji je izrađen alat FDM tehnikom štampe na štampaču MakerBot Replicator 5th generation mogu se videti na slici 7.37.



Slika 7.37: Paralelni prikaz a) alata za utiskivanje izrađenog tehnikom hemijskog nagrizanja magnezijuma i b) FDM tehnikom 3D štampe od PLA materijala

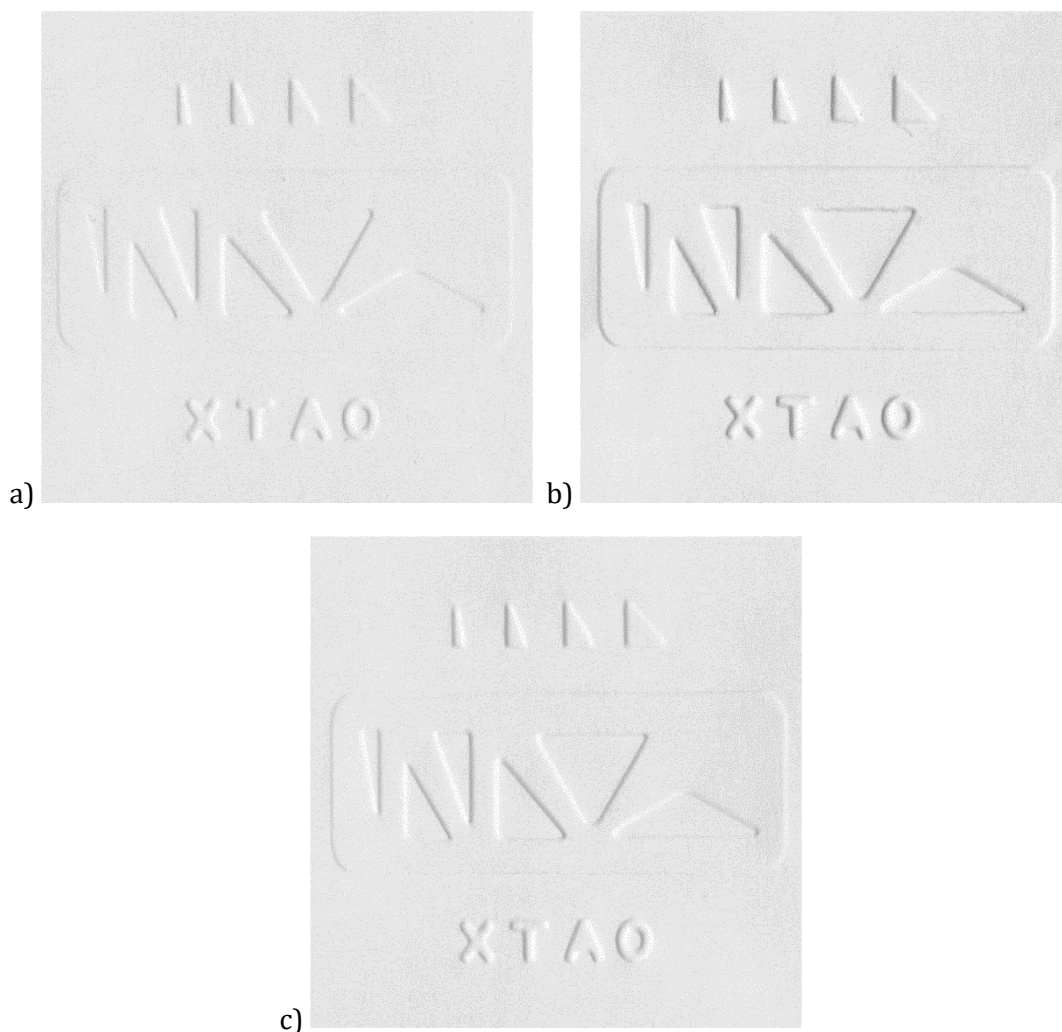
### **Procedura**

Izvršeno je uporedno utiskivanje konvencionalno izrađenim alatom i alatom izrađenim FDM tehnikom 3D štampe (slika 7.37). Uređajem Shimadzu EZ-L, priborom za testiranje pritiskne čvrstoće u modu Compression, izvršeno je utiskivanje kontrolisanim silama pritiska. Eksperimentalna postavka prikazana je na slici 7.38.



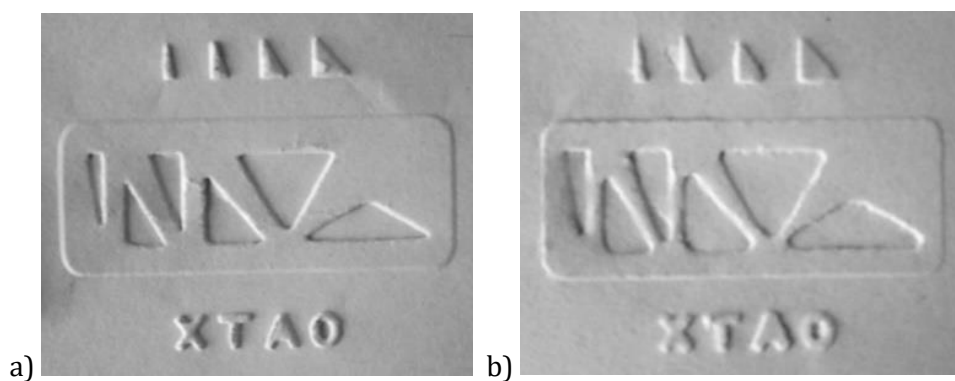
Slika 7.38: a) Ploče za utiskivanje papirnih uzoraka, b) fiksirana patrica alata za utiskivanje na donjoj ploči, c) fiksirana matrica alata za utiskivanje na gornjoj ploči za utiskivanje i d) utiskivanje papirnih uzoraka na uređaju Shimadzu EZ-LX

Utiskivanje konvencionalnim alatom izvršeno je na različitim vrstama papira, adekvatnim pritiskom za svaku vrstu papira određenim tako da ne dođe do oštećenja papira, a pri tom da su utisnuti elementi jasno vidljivi. Na slikama 7.39a-c može se videti uzorci papira na koje je delovano različitom silom pritiska.



*Slika 7.39: Uzorci nepremaznog papira iste gramature utisnuti različitim silama pritiska*

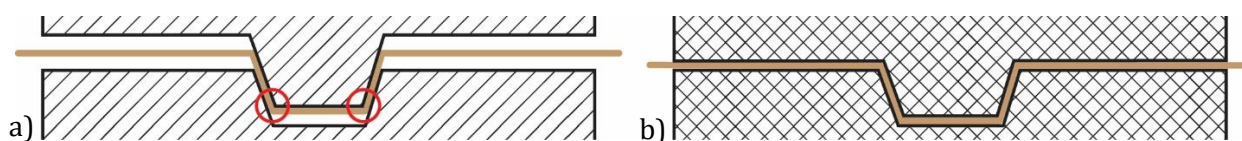
Uzorci utisnuti konvencionalnim alatom poslužili su kao etalon za odabir adekvatne sile za utiskivanje alatom izrađenim FDM tehnikom štampe. Na slikama 7.40a i b se vidi razlika između rezultata utiskivanja alatima proizvedenim konvencionalnom tehnikom i FDM tehnikom 3D štampe.



*Slika 7.40: a) Rezultat utiskivanja konvencionalnim alatom i b) neoptimizovanim alatom za utiskivanje izrađenim FDM tehnikom 3D štampe sa PLA materijalom*

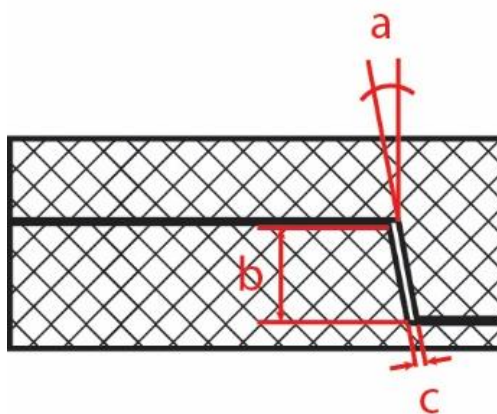


Na slici 7.40 jasno se vidi da je uzorak papira utisnut alatom izrađenim FDM tehnikom identičnih dimenzija kao konvencionalni alat imao vidljivo krzavije i oštećenije ivice utisnutih elemenata. Uzrok ovih oštećenja je kvalitet površine uzoraka dobijenih FDM tehnikom štampe. Alat proizveden na ovaj način sačinjen je iz mnoštva slojeva i u zavisnosti od debljine deponovanih slojeva stepen nepravilnosti, odnosno površinske hrapavosti, biće veći. Ako se uzme u obzir da patrica alata izrađenog na ovaj način dolazi u kontakt sa matricom preko papira i praktično vrši smicanje materijala, može se zaključiti da što je hrapavost ivica veća, to je veće oštećenje koje će alat ostaviti na ivicama utisnutih elemenata. Kako bi se ovo izbeglo, neophodno je što više smanjiti kontakt između patrice i matrice, a samim tim i oštećenje ivica, tj. izmeniti dimenzije modela na osnovu kog će alat biti izrađen. Na slici 7.41a i 7.41b prikazan je princip utiskivanja alatom izrađenim konvencionalnom tehnikom i modifikovanim alatom izrađenim FDM tehnikom štampe. Ovakvom konstrukcijom alata za utiskivanje u velikoj meri su smanjena oštećenja na ivicama papira uzrokovana ograničenjima FDM tehnike 3D štampe.



Slika 7.41: Princip utiskivanja a) alatom izrađenim tehnikom nagrizanja sa obeleženim mestima kontakta između matrice i patrice i b) alatom izrađenim FDM tehnikom 3D štampe

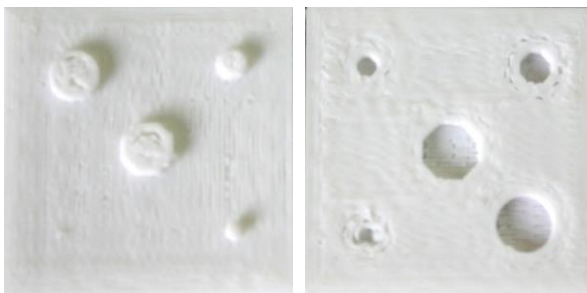
Takođe je neophodno odrediti adekvatne uglove stranica elemenata na alatu za utiskivanje. Kod alata izrađenog tehnikom hemijskog nagrizanja, ovaj ugao kao i dubina elemenata definisani su vremenom nagrizanja osvetljene forme i iznosili su približno  $30^\circ$  za ugao i 1.8 mm za dubinu (visinu). Kako bi se odredio optimalan ugao, zazor između patrice i matrice, kao i dubina elemenata alata za utiskivanje izrađenog FDM tehnikom, konstruisan je veći broj uzoraka sa varijacijom uglova, zazora i dubina elemenata, kako bi se rezultati utiskivanja mogli uporediti. Na slici 7.42 prikazani su parametri alata za utiskivanje izrađenog FDM tehnikom štampe koji su varirani.



Slika 7.42: Testirani parametri alata za utiskivanje izrađenog FDM tehnikom štampe: a – ugao zakošenja bočnih stranica elemenata, b – dubina elemenata, c – zazor između patrice i matrice

Varijacije vrednosti uglova oborenih stranica bile su:  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ; vrednosti dubina elemenata: 0,4 mm, 0,5 mm, 0,6 mm i 0,8 mm; zazor između patrice i matrice: 0,3 mm i 0,5 mm. Izrađeno je ukupno 24 različita alata, kako bi se definisala kombinacija parametara koja najpribližnije oponaša rezultate utiskivanja alatom izrađenim tehnikom hemijskog nagrizanja. Kriterijumi za odabir najbolje kombinacije parametara bili su: jasnoća ivica utisnutih elemenata, oštećenje

papira na elementima i oko utisnutih elemenata za utiskivanje kao i krzavost ivica elemenata. Odštampani alati za utiskivanje za ovaj deo eksperimenta prikazani su na slici 7.43.



*Slika 7.43: Izgled patrice i matrice alata za definisanje vrednosti parametara dubine elemenata, ugla bočnih stranica elemenata i zazora između matrice i patrice. Izrađeni elementi na alatu su: osmougao (sredina) i krugovi različitih vrednosti prečnika*

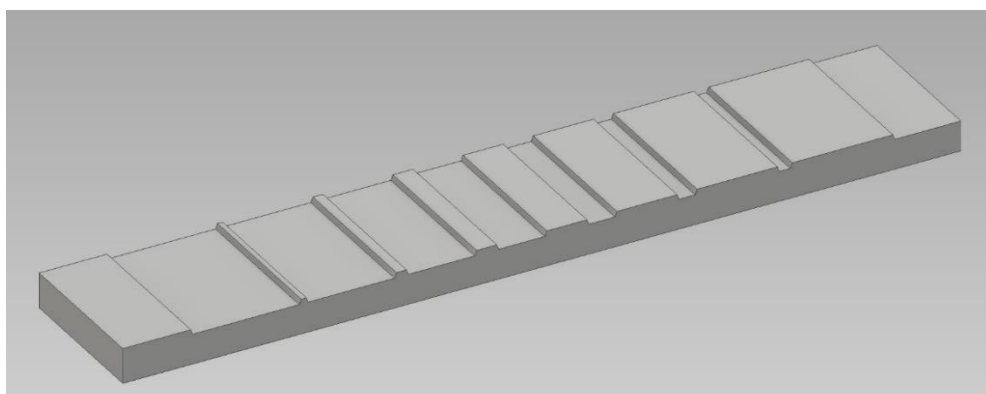
Rezultati utiskivanja ovim alatima kao i odabrane vrednosti parametara, prikazani su u Poglavlju 8.6.

## 7.8 Istraživanje promena dimenzija uzoraka izrađenih FDM tehnikom u odnosu na zadati računarski model

Nakon definisanja parametara 3D modela alata koji daju rezultate najpribližnije alatima za utiskivanje izrađenim tehnikom hemijskog nagrizanja, potrebno je odrediti vrednosti širenja (ekspanzije) PLA materijala nakon topljenja i deponovanja filameta na platformi za štampu, uzrokovanih specifičnostima FDM tehnike štampe.

### **Uzorci**

Konstruisan je 3D model i po njemu je izrađen uzorak sa ispupčenim i udubljenim elementima, različitih širina (slika 7.44 i 7.44), pomoću kojih je moguće utvrditi kako se deponovani materijal širi po  $x$ ,  $y$  i  $z$  osi u toku štampe.



*Slika 7.44: Konstruisan 3D model alata za definisanje termalne ekspanzije PLA materijala za štampu FDM tehnikom 3D štampe*

Dužina uzorka je 83 mm, širina 15 mm, dubina elemenata je 0,5 mm. Širine ispupčenih linija bile su 0,5 mm, 1 mm, 2 mm i 4 mm. Širine udubljenih linija bile su veće zbog uračunatih vrednosti zazora iz prethodnog dela eksperimenta i iznosile su 1,1 mm, 1,6 mm, 2,6 mm i 4,6 mm.

### **Procedura**

Nakon modelovanja uzorka u softverskom paketu Autodesk Inventor Professional 2016, generisan je STL fajl pogodan za dalju obradu u MakerBot Desktop softveru za pripremu modela

za štampu. Podešeni su parametri štampe definisani u eksperimentu - *Karakterizacija procesnih parametara FDM tehnike 3D štampe* Poglavlje 7.3.

Uzorci su štampani pomoću štampača MakerBot Replicator 5th Generation FDM. Odštampani uzorak prikazan je na slici 7.45.



*Slika 7.45: Odštampan uzorak za definisanje termalne ekspanzije PLA materijala nakon štampe FDM tehnikom 3D štampe*

Nakon štampe, napravljeni su mikroskopski snimci pomoću digitalnog USB mikroskopa ViTiny VT300. Mikroskopski snimci su snimljeni pri uveličanju od 30x, iz profila i odozgo, kako bi se mogle izmeriti vrednosti širenja odštampanih elemenata. Cilj ovog eksperimenta je da se utvrde vrednosti širenja elemenata, kao posledice topljenja i termalne ekspanzije PLA materijala, kako bi se izvršila kalibracija. U fazi modelovanja konačnih alata mogu se uvrstiti ove vrednosti kako bi se nakon štampe dobile precizno reprodukovane dimenzije utisnutih elemenata. Snimljeni mikroskopski snimci prikazani su u Poglavlju 8.7 zajedno sa tabelama izmerenih dimenzija odštampanih elemenata po  $x$ ,  $y$  i  $z$  osi.

## 7.9 Izrada alata za utiskivanje FDM i SLA tehnikom 3D štampe

Rezultati prethodnih eksperimenata su uzeti u obzir i izvršene su neophodne korekcije modela alata, a potom su na osnovu takvog modela izrađeni alati za utiskivanje FDM tehnikom. Nakon izrade svakog seta alata, urađeno je probno utiskivanje, kako bi se testiralo da li modifikovani parametri daju adekvatne rezultate. U drugom delu ovog eksperimenta, urađen je alat za utiskivanje SLA tehnikom 3D štampe, koji je sadržao najsitnije elemente za utiskivanje, za koje se preliminarnim ispitivanjima ustanovilo da ne mogu biti adekvatno izrađeni FDM tehnikom 3D štampe. Ovo je urađeno pod pretpostavkom da je SLA tehnikom moguće izraditi alate veće preciznosti zbog drugačijeg postupka proizvodnje u odnosu na FDM tehniku, što je opisano u Teorijskom delu doktorske disertacije.

### **Uzorci**

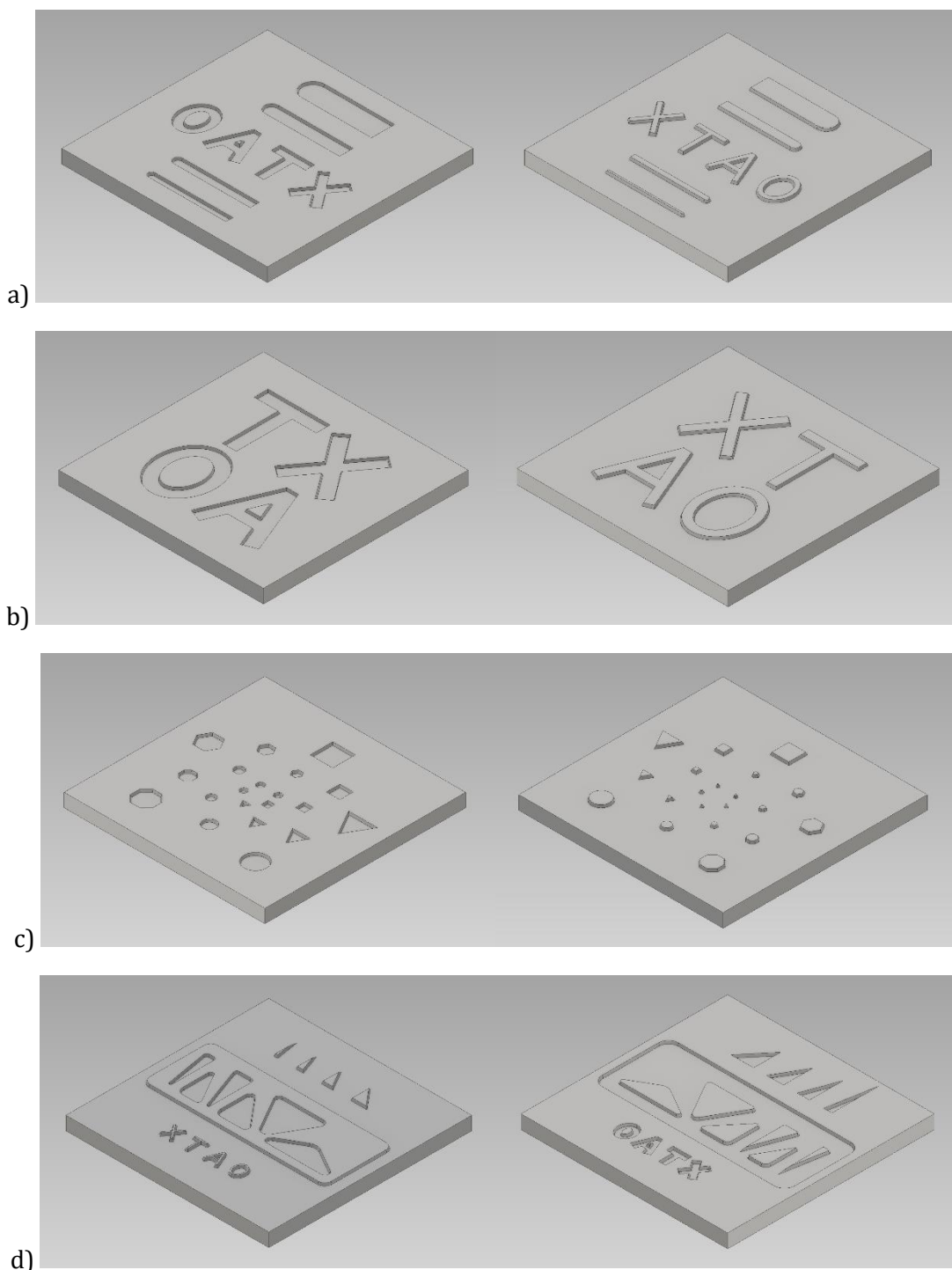
Na slici 7.46 prikazani su 3D modeli modifikovanih alata, prema prethodnim istraživanjima, kako bi rezultat utiskivanja na papiru bio što približniji rezultatima primene konvencionalnih alata.

Za elemente utiskivanja odabrani su osnovni geometrijski oblici: jednakostranični trougao (0,5 mm, 1 mm, 2 mm i 4 mm dužina stranica), krug (prečnika 0,5 mm, 1 mm, 2 mm i 4 mm), kvadrat (stranica 0,5 mm, 1 mm, 2 mm i 4 mm), šestougao i osmougao (spoljnog prečnika 0,5 mm, 1 mm, 2 mm i 4 mm), zatim linije dužine 16 mm različitih širina (0,5 mm, 1 mm, 2 mm i 4 mm) sa jednim krajem zaobljenim, zatim verzalna slova visine 3,5 mm, 7 mm i 14 mm. Konstruisani su i pravougli trouglovi sa jednim oštrim uglom od 10°, 20°, 30° i 40°, kao i trouglovi sa zaobljenim, pravouglim, tupim i oštrim uglovima. Ovako konstruisan alat ima za cilj da detaljno ukaže na mogućnosti, odnosno ograničenja odabrane tehnike izrade.

Dimenzije alata za utiskivanje su slične konvencionalno izrađenom alatu i iznose: 45x45 mm, debljina osnove alata bila je 3 mm, dubina elemenata je podešena na 0,5 mm, a zazor između patrice i matrice je 0,2 mm, odnosno veličina elemenata na matrici je za 0,4 mm veća od elemenata na patrici. Ugao stranica elemenata je 20°. Vrednosti su modifikovane na osnovu rezultata



eksperimenta - *Istraživanje promena dimenzija nakon štampe uzoraka izrađenih FDM tehnikom* - Poglavlje 7.8, kako bi se kompenzovale vrednosti ekspanzije materijala. Elementima je urađena korektura dimenzija na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 8.25.

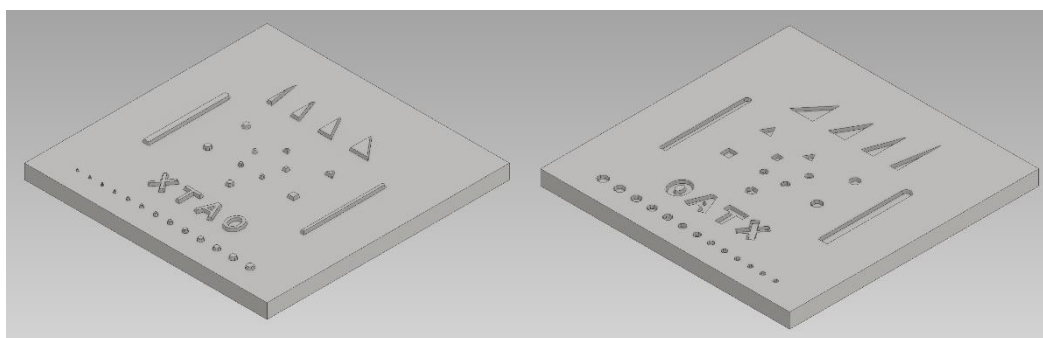


Slika 7.46: Konstruisani 3D modeli alata za utiskivanje za izradu FDM tehnikom 3D štampe – a) prvi, b) drugi, c) treći, d) četvrti set alata

Nakon konstrukcije modela alata za izradu FDM tehnikom, konstruisan je poseban alat za štampu SLA tehnikom 3D štampe. Imajući u vidu veću preciznost ove tehnike 3D štampe elementi za utiskivanje su odabrani tako da prošire istraživanje na veličine elemenata koje FDM tehnika nije u stanju da reprodukuje na zadovoljavajućem nivou. Dubina elemenata, zazor i ugao oborenih ivica je ostao nepromenjen u odnosu na alate konstruisane za štampu FDM tehnikom. Dimenzije elemenata na patrici i matrici nisu zamenjene dimenzijama definisanim eksperimentom iz

Poglavlja 8.7, s obzirom da SLA tehnika ne uzrokuje promenu dimenzija nakon štampe. Imajući u vidu da ne postoje ograničenja SLA tehnike štampe pri reprodukciji elemenata dimenzija većih od 1 mm, modelu je dodata skala sačinjena od osmouglova sa gradacijom spoljnog prečnika u rasponu od 0,025 mm do 1 mm, kako bi se stekao uvid u granične mogućnosti po pitanju reprodukcije sitnih elemenata.

Budući da je fokus istraživanja primena FDM tehnike 3D štampe detaljna karakterizacija uticajnih parametara SLA tehnike štampe nije rađena. Izrada alata SLA tehnikom ima za cilj da podrži Hipotezu 3 definisanu na početku eksperimenta i da pruži osnove za buduća istraživanja u ovoj oblasti. Izgled modela alata za štampu SLA tehnikom štampe prikazan je na slici 7.47.



Slika 7.47: Konstruisani 3D modeli seta alata za utiskivanje najsitnijih elemenata za izradu SLA tehnikom 3D štampe

Karakteristike uređaja za štampu SLA tehnikom (slika 7.48) prikazan je u tabeli 7.19.



Slika 7.48: Izgled SLA štampača FormLabs Form 2 za štampu alata za utiskivanje (FormLabs, 2018)

Tabela 7.19: Karakteristike SLA štampača FormLabs Form (FormLabs, 2018)

Proizvođač/Model	FormLabs Form 2
Tehnika štampe	Stereolitografija
Debljina sloja	25, 50, 100, $\mu\text{m}$
Tip lasera	EN 60825-1:2007sertifikovan, laser klase 1, 405nm ljubičastog izvora svetlosti, jačine 250mW
Veličina tačke lasera	140 $\mu\text{m}$
Maksimalna veličina štampe	145 × 145 × 175 mm
Radna temperatura	35 °C
Punjenje	Automatsko punjenje tečnom smolom
Napajanje	100-240 V, 1.5 A 50/60Hz, 65W
Dimenzije uređaja	35 x 33 x 52 cm
Težina uređaja	13 kg

## **Procedura**

Parametri za izradu uzoraka definisani eksperimentom - *Karakterizacija procesnih parametara FDM tehnike 3D štampe* – Poglavlje 8.2, prikazani su u tabeli 8.18. Nakon preliminarnih istraživanja, ustanovljeno je da je neophodno uraditi modifikaciju izrađenih alata, kako bi rezultati utiskivanja bili što približniji rezultatima postignutim utiskivanjem konvencionalnim alatima. Konačne vrednosti parametara za izradu alata su ustanovljene analizom rezultata utiskivanja (Tabela 7.20). Kvalitet elemenata, utisnutih alatima dobijenim FDM tehnikom i konvencionalnim alatima, međusobno su poređeni od strane tri stručna lica kako bi se postigle optimalne sile pritiska za svaki alat i vrstu papira. Nakon izrade uzorci alata su mehanički obrađeni blagim pokretima i pritiskom koristeći brusni papir granulacije 320, kako bi se uklonile površinske neravnine na elementima za utiskivanje. Cilj ovog postupka je umanjeње oštećenja papira na utisnutim elementima i oko utisnutih elemenata.

*Tabela 7.20: Konačna podešavanja vrednosti osam testiranih parametara za štampu alata za utiskivanje izrađenih FDM tehnikom štampe*

Tip unutrašnje popune	Linearni (naizmenično ukršteni slojevi pod uglom od 90°)
Procenat unutrašnje popune	80%
Broj spoljašnjih kontura	3
Debljina sloja	0,1 mm
Orijentacija alata na platformi za štampu	0°
Temperatura dizne	225 °C
Brzina kretanja glave za štampu	60 mm/min
Broj gornjih i donjih slojeva	6

Na slici 7.49 prikazan je konačni izgled alata za utiskivanje izrađenih FDM tehnikom 3D štampe.



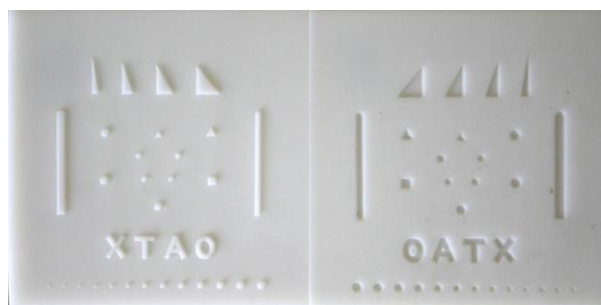
*Slika 7.49: Komplet alata izrađenih FDM tehnikom 3D štampe*

Štampanje svih alata trajalo je 4 sata. Alat je nakon štampe osvetljen UV svetlom talasne dužine 395 nm u tunelu za sušenje. Nakon potpunog očvršćavanja UV svetlom, alat se ispira rastvorom izopropil alkohola ( $C_3H_8O$ ) u trajanju od 2-3 min. Zapremina konačnog alata je 26,27 ml. Parametri FormLabs 2 štampača prikazani su u Tabeli 7.21.

Tabela 7.21: Parametri štampe SLA štampača FormLabs Form 2 za štampu alata za utiskivanje

Debljina sloja	0,05 mm
Procenat unutrašnje popune	100%
Konekcija struktura podrške sa objektom	0,4 mm
Debljina pogloge	2 mm
Udaljenost objekta od baze	5 mm

Izgled alata izrađenih SLA tehnikom 3D štampe prikazan je na slici 7.50.



Slika 7.50: Komplet alata izrađenog SLA tehnikom 3D štampe

## 7.10 Utiskivanje papirnih materijala alatima sa reprezentativnim elementima

Sledeća faza eksperimenta je utiskivanje papirnih materijala pomoću izrađenih alata. Svi papiri su utisnuti konvencionalnim alatima, a zatim sa alatima izrađenim FDM i SLA tehnikama 3D štampe. Uzorci utisnuti konvencionalnim alatima su poslužili kao etalon za odabir adekvatnog pritiska kod utiskivanja alatima izrađenim tehnikama 3D štampe. Ovaj eksperiment je sproveden u dve faze:

- U prvoj fazi izvršena su probna utiskivanja papira različitim pritiscima, nakon čega je sprovedena analiza digitalizovanih slika utisnutih uzoraka kako bi se utvrdio odgovarajući pritisak kod kojeg se javlja najveći kontrast bez oštećenja papira;
- U drugoj fazi izvršena je serija utiskivanja papira utvrđenim pritiscima iz prve faze eksperimenta.

### 7.10.1 Utvrđivanje odgovarajućeg pritiska za utiskivanje

#### **Uzorci**

Pre utiskivanja, papiri su izrezani na trake širine 70 mm i dužine 350 mm. Na svakoj traci olovkom je obeleženo pet jednakih kvadrata, u koje su utisnute različite sile pritiska. Obeležena polja su olakšala centriranje alata prilikom utiskivanja papira. Utiskivanje je izvršeno na tri različite vrste papira.

- nepremazni papir (u gramaturama od 80, 100, 120, 140 i 170 g/m<sup>2</sup>);
- premazni mat papir (u gramaturama od 130, 150, 170 i 200 g/m<sup>2</sup>) i
- voluminozni (u gramaturama od 60, 70 i 80 g/m<sup>2</sup>).

Ukupno je testirano 12 različitih papira za svaki alat i za obe tehnologije proizvodnje.

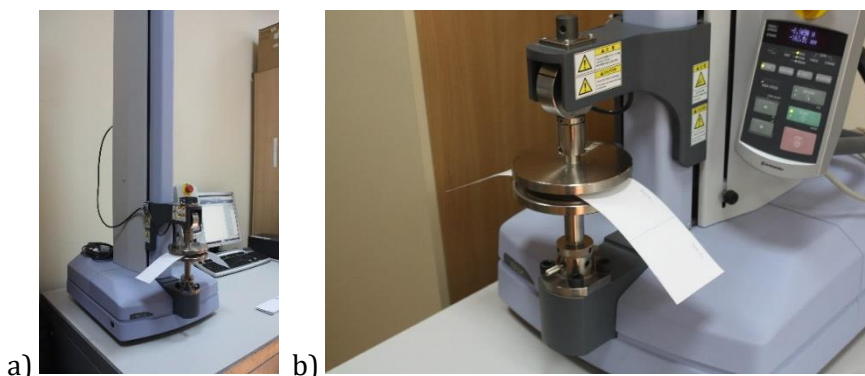
#### **Procedura**

Proces utiskivanja izvršen je pomoću mernog uređaja Shimadzu EZ-LX (Slika 7.2) sa mernom ćelijom predviđenom za sile do 2.5 kN u režimu rada za testiranje pritisne čvrstoće. Na uređaj su montirane ploče za pritisak prečnika 118 mm (Slika 7.38). Donja ploča je fiksirana, a gornja ploča

vrši kretanje i utiskivanje. Patrica je pričvršćena na donju ploču, a matrica na gornju ploču. I matrica i patrica su pričvršćene duplo lepljivom trakom. Prvo je pričvršćena patrica na centar donje ploče, a zatim je na nju postavljena matrica. Spuštanjem gornje ploče i apliciranjem pritiska, matrica se fiksira na ploči za testiranje.

Nakon fiksiranja alata za utiskivanje na ploče uređaja za testiranje, vrši se utiskivanje. Brzina kretanja pritisne ploče u toku testiranja bila je 2 mm/min. Testiranje je sprovedeno na temperaturi od  $23 \pm 2$  °C pri relativnoj vlažnosti vazduha od  $50 \pm 5\%$  (ISO R291:2008). Vreme delovanja pritiska je bila 2 s.

Za svaku vrstu papira, isečene su dve trake, pa s obzirom da je testirano 12 papira, za svaki alat pripremljeno je 24 trake. Na prvoj traci je izvršeno utiskivanje koristeći, u većini slučajeva, pet sukcesivno rastućih sila pritiska, kako bi se utvrdio onaj koji obezbeđuje što veći kontrast, odnosno onaj koji ne dovodi do krzavih ivica, nedovoljne dubine utisnutih elemenata i oštećenja papira na elementima i oko utisnutih elemenata. Utiskivanje i procena adekvatnog pritiska izvršena je od strane stručnog lica, a rezultati utiskivanja naknadno su karakterisani metodom analize slika opisane u nastavku. Na slici 7.51 prikazana je postavka aparature za proces utiskivanja.



Slika 7.51: Utiskivanje uzoraka pomoću pritisnih ploča mernog uređaja Shimadzu EZ-LX: a) izgled aparature i b) pritisne ploče za utiskivanje

Papiri su prvo utisnuti konvencionalnim alatima, a nakon toga alatima izrađenim FDM i SLA tehnikama štampe. Za alate izrađene ovim tehnikama bira se vrednost pritiska koja obezbeđuje izgled utisnutih elemenata sličan uzorcima utisnutim konvencionalnim alatima.

#### *Digitalizacija utisnutih papira*

Nakon probnog utiskivanja, uzorci su skenirani pomoću skenera sa ravnom pločom Canon CanoScan 5600F (Slika 7.52). Specifikacije uređaja prikazane su u Tabeli 7.22.



Slika 7.52: Izgled ravnog skenera Canon CanoScan 5600F korišćenog za digitalizaciju utisnutih uzoraka (Canon, 2018)



Tabela 7.22: Karakteristike ravnog skenera Canon CanoScan 5600F korišćenog za digitalizaciju utisnutih uzoraka (Canon, 2018)

Proizvođač/Model	Canon CanoScan 5600F
Skenirajući element	Šestolinijski CCD u boji
Izvor svetla	Belo LED reflektivno / hladna katodna fluorescentna lampa
Optička rezolucija	4800x9600 spi
Mogućnost selekcije rezolucije	25 – 19200 spi
Gradacija skeniranja u boji	48 bit ulaz -> 48/24 bit izlaz
Gradacija skeniranja sivi tonovi	48 bit ulaz -> 16 bit (za filmove) / 8 bit izlaz
Maksimalna veličina dokumenta	A4 (210 x 297 mm)
Brzina skeniranja (u boji)	1.8 ms/liniji (300 spi), 14.6 ms/lin (4800 spi)
Brzina skeniranja (sivi tonovi)	1.8 ms/liniji (300 spi), 14.6 ms/lin (4800 spi)
Brzina skeniranja (B&W)	1.8 ms/liniji (300 spi), 14.6 ms/lin (4800 spi)
Potrošnja energije	19 W maksimalna operativna 3.2 W u stendbaj režimu 0.4 W kad je prekidač isključen

Skenirane trake papirnih uzoraka utisnute različitim silama pritiska, korišćene su za analizu slika. Svako kvadratno polje utisnute trake papira digitalizovano je kao zasebna TIFF datoteka veličine 45 x 45 mm, rezolucije 1200 ppi u monohromatskom režimu bez dodatnih korektura osvetljenja i kontrasta. Na ovaj način ukupno je generisano 540 skeniranih slika (12 vrsta papira x 4 alata izrađenih tehnikom hemijskog nagrizanja x 5 pritisaka + 12 vrsta papira x 4 alata izrađenih FDM tehnikom 3D štampe x 5 pritisaka + 12 vrsta papira x 1 alat izrađen SLA tehnikom 3D štampe x 5 pritisaka). Sve fotografije skeniranih uzoraka su naknadno obrađene pomoću programskog alata Adobe Photoshop CS6, kako bi bile adekvatno pripremljene za digitalnu analizu slike što će biti opisano u nastavku. Fotografije obrađenih i neobrađenih skeniranih uzoraka iz ovog eksperimenta prikazane su u Poglavlju 8.8.

#### *Metoda analiza slika digitalizovanih uzoraka utisnutih elemenata*

Merenje ujednačenosti pritisaka utisnutih različitim alatima na svakom papiru pojedinačno, izvedeno je vizuelnom procenom od strane stručnog lica. Ustanovljene su vrednosti sile pritisaka koje ne dovode do oštećenja papira, i pri kojoj su utisnuti elementi jasno vidljivi. Nakon ovog koraka urađena je analiza digitalizovanih uzoraka utisnutih papira kako bi se odabrana sila pritiska dovela u spregu sa percipiranom jačinom senke koju utisnuti elementi bacaju na površinu papira, tj. kontrasta koji se stvara između osenčene i neosenčene površine, u cilju utvrđivanja minimalne vrednosti tog kontrasta.

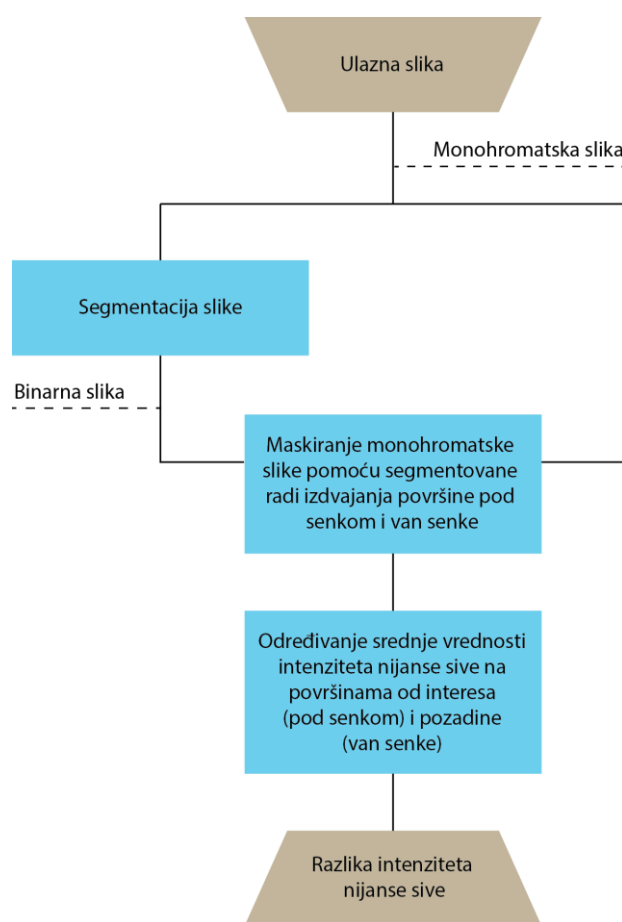
Senka je po definiciji tamna figura ili slika koju formira objekat na nekoj površini kada se nađe između izvora svetla i te površine (Oxford University press, 2018). U slučaju utisnutih elemenata, svetlosni zraci na svom putu do podloge nailaze na reljefne elemente nastale utiskivanjem, pa se kao posledica prekinutog snopa svetlosti pojavljuje senka na podlozi.

Ako ivice nisu oštre dolazi do difuzije svetla, pa je granica između senke i osvetljenog dela mutnija. Kod skeniranih uzoraka papira ravnim skenerom, izvor osvetljenja je pokretan, pa se dobija senka koja ne odgovara realnoj situaciji. Međutim, ovim je obezbeđeno da svi uzorci budu osvetljeni istom količinom svetlosti sa istim izvorom osvetljenja.

Nakon skeniranja, uzorci su pripremljeni (isečeni i rotirani) koristeći softverski paket Adobe Photoshop CS6. Razvijen je algoritam čiji su zadaci segmentacija slike sa autonomnim

određivanjem praga segmentacije, detekcija površina pod senkom i detekcija površina van senke, određivanje vrednosti intenziteta nijanse sive i računanje srednjih vrednosti i razlike srednjih vrednosti intenziteta nijanse sive na detektovanim površinama. Kako bi se zadaci algoritma obavili sa što većom preciznošću i pod istim uslovima za svih 540 slika, neophodno je voditi računa o automatizaciji rada u svim fazama obrade i analize slike. Ovo je od posebnog značaja, kako bi se smanjile greške koje potiču od subjektivnosti ljudske procene prilikom analize utisnutih elemenata uzoraka.

Sledi kratak opis razvijenog algoritma po koracima, sa neophodnim elementima pripremnih i obradnih operacija nad analiziranim slikama, korišćene metode u pojedinim segmentima algoritma, kao i ograničenja primene. Na slici 7.53 je prikazana šema algoritma radi preglednosti opisa ovog dela eksperimenta.



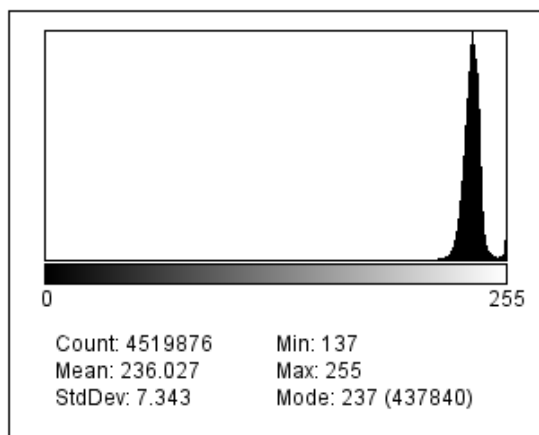
Slika 7.53: Šema algoritma za analizu skeniranih slika i određivanje razlike intenziteta nijanse sive

Za obradu uzoraka utisnutih papira pomoću razvijenog algoritma neophodno je izvesti digitalizaciju u monohromatskom režimu rada i sačuvati tako dobijenu sliku u jednom od formata bez kompresije ili kompresije bez gubitaka (BMP ili TIFF). U ovom eksperimentu skenirani uzorci su sačuvani u TIFF formatu. Prva operacija algoritma je segmentacija monohromatske slike (slike sivih tonova), stoga nakon učitavanja originalne monohromatske slike sledi izdvajanje tamnih površina pomoću Kapur metode. Ovaj algoritam je odabran, nakon preliminarnih analiza, jer najbolje izdvaja tamne od svetlih površina slike uz prisustvo najmanje količine šuma na površinama van senke u poređenju sa ostalim testiranim metodama (Slike 7.55a-f).

Segmentacijom slike sivih tonova dobija se binarna slika, na kojoj su izdvojene svetle i tamne površine originalne slike i koja predstavlja ulazni parametar za maskiranje originalne slike. Dobra i precizna segmentacija je ključan faktor za uspeh analize srednje vrednosti tonova u senkama i



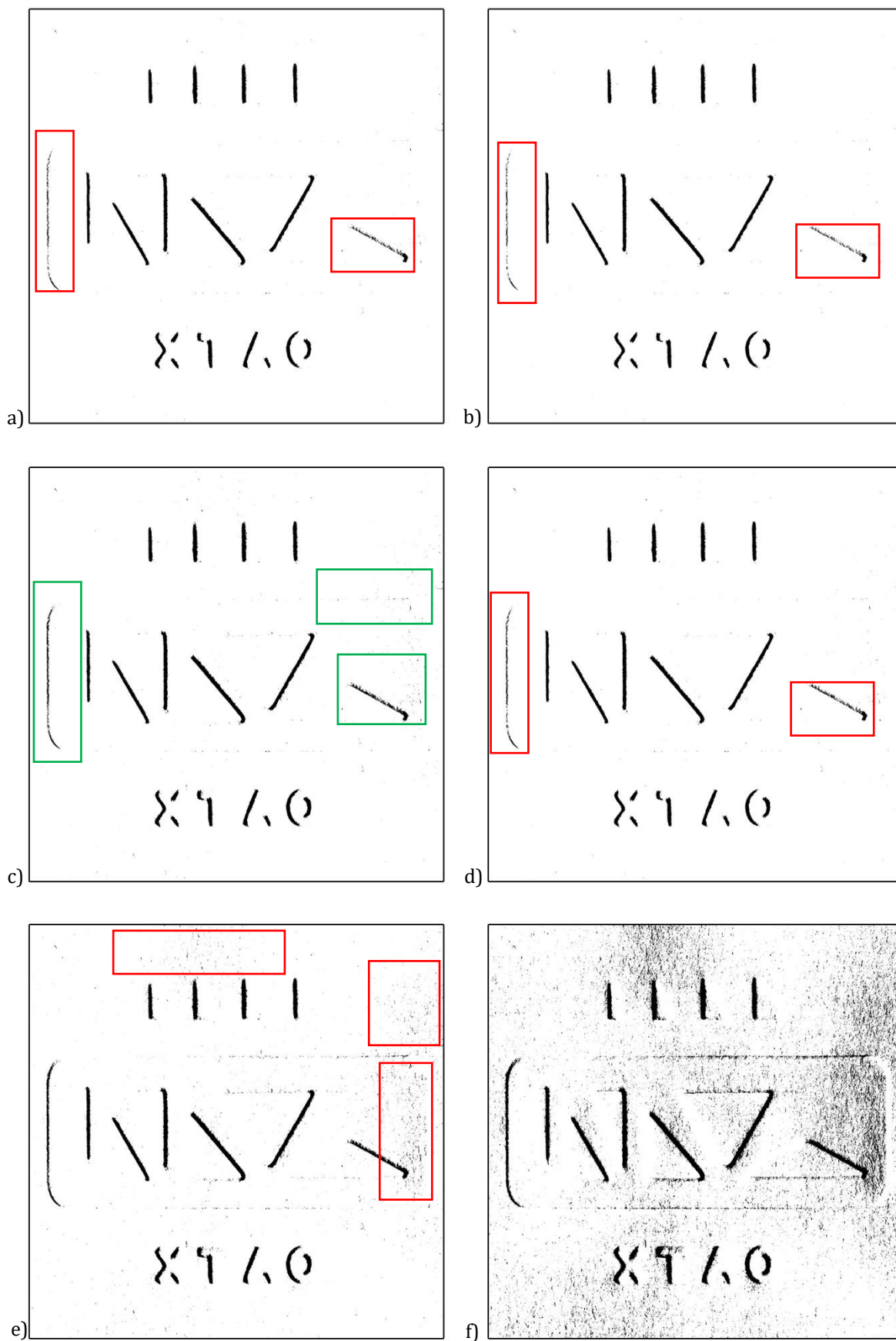
na osvetljenom papiru. Segmentacijom se digitalni uzorci utisnutog papira konvertuju na takav način da svaka tačka na slici koja pripada regionu senke dobija vrednost 1 (površina od interesa), a sve ostale tačke dobiju vrednost 0 (pozadina). Broj piksela pozadine (svetli pikseli) značajno je veći od broja piksela površine od interesa (senke) što rezultira da je histogram slike sivih tonova unimodalan (Slika 7.54).



Slika 7.54: Primer unimodalnosti histograma originalne slike sivih tonova

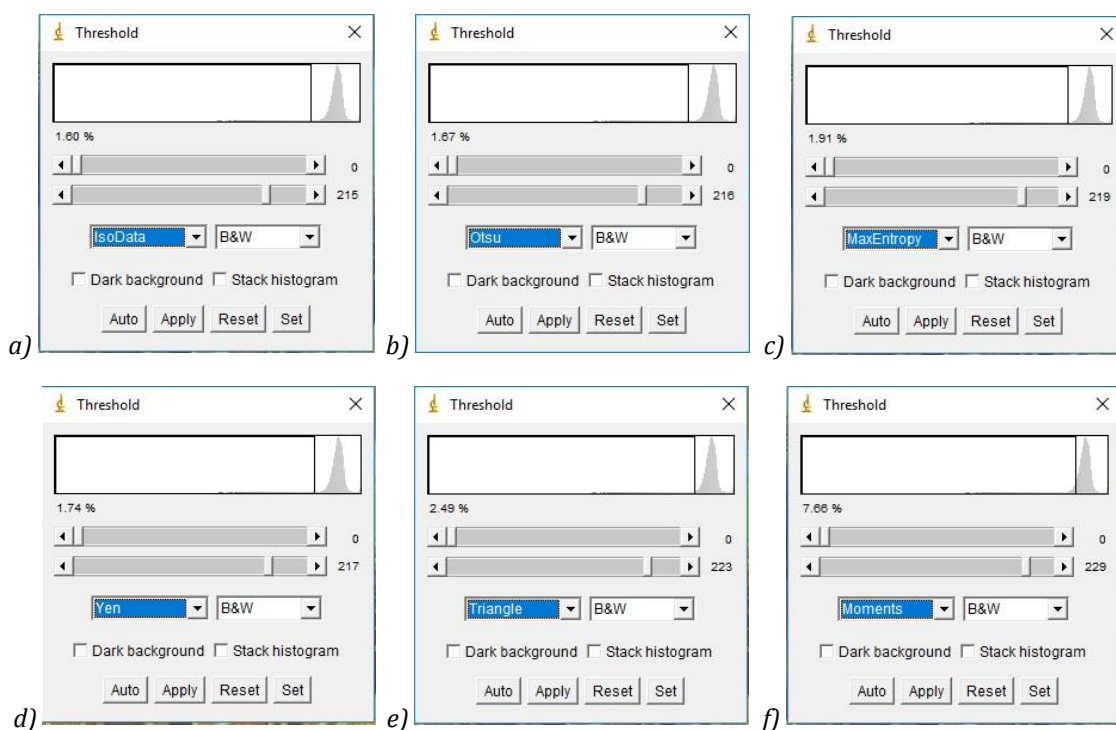
U radovima koji su se bavili sličnom tematikom (Surový i saradnici, 2014; Sinha, 2000; Rosin, 2001; Rosin i Ioannidis, 2003; Nacereddine i saradnici, 2005; Argaw, 2007; Medina-Carnicer i Madrid-Cuevas, 2008; Drobchenko i saradnici, 2011, Pál, 2014) osnovni set algoritama za segmentaciju uključivao je i dobro poznate tehnike (Otsu, Kittler, Kapur metode) i alternativne algoritme razvijene za rešavanje problema unimodalnosti histograma (Rosin i Tsai metode). Navedeni algoritmi, za proračun vrednosti praga za segmentaciju, koriste neke od parametara sa histograma analizirane slike (varijansu, entropiju, distribuciju i slično), obezbeđujući autonomnost rada razvijenog algoritma (Drobchenko i saradnici, 2011; Malek, 2012). Kapur metoda koristi parametar entropije za proračun vrednosti praga za segmentaciju (Kapur, Sahoo i Wong, 1985; Surový i saradnici, 2014). Uporedni prikaz primera preliminarnih rezultata automatske segmentacije slike pomoću Kapur (Kapur, Sahoo i Wong, 1985; Surový i saradnici, 2014; ImageJ, 2018), Ridler (Ridler i Calvard, 1978), Otsu (Otsu, 1979), Yen (Yen, Chang i Chang, 1995), Zack (Zack, Rogers i Latt, 1977) i Tsai (Tsai, 1995) metoda dat je na slici 7.55, dok je prikaz ucrtanog praga na osnovu testiranih metoda automatske segmentacije prikazan na slikama 7.61a-f. Slike su generisane koristeći softverski paket za analizu i obradu slika ImageJ (verzija 1.50b), baziranom na Java programskom jeziku.

Postoji više različitih tipova segmentacije, međutim najjednostavniji tip je segmentacija sa jednim pragom. Kod ovog tipa segmentacije se vrši poređenje osvetljenosti (intenziteta) piksela samo sa jednim pragom, a kao rezultat se dobija slika sa samo dva nivoa osvetljenosti (binarna slika). Namena ovog tipa segmentacije je odvajanje predmeta od pozadine, ukoliko pozadina ima uniformnu osvetljenost, koja je različita od osvetljenosti predmeta. Ukoliko je slika jasna, određivanje vrednosti praga, je jednostavan proces. Otežana segmentacija nastaje, ukoliko pozadina nije uniformno osvetljena. Veoma je bitno odrediti adekvatnu vrednost praga ukoliko se želi postići željeni rezultat segmentacije. Ako su vrednosti osvetljenosti piksela slike veće od praga, ti pikseli dobijaju vrednost 255, dok pikseli čije su vrednosti osvetljenosti manje od praga dobijaju vrednost 0 (Popović, 2006). Nizak prag segmentacije, uzrokuje gubitak detalja sa slike, dok visok prag segmentacije može da utiče na pojačan šum, odnosno vidljivost nekih nepoželjnih delova slike.



Slika 7.55: Primer segmentiranih slika nastalih od originalne skenirane monohromatske slike pomoću a) Ridler, b) Otsu, c) Kapur, d) Yen, e) Zack i f) Tsai metode segmentacije slike

Na slici 7.55a-f kvadratima su uokvirena posmatrana mesta na slici na osnovu kojih je izvršena selekcija adekvatne metode segmentacije. Zelenim kvadratima su obeleženi delovi slike koji su zadovoljavajućeg kvaliteta, a crvenim kvadratima delovi na kojima segmentacija ne zadovoljava očekivane kriterijume. Kod metoda Ridler, Otsu i Yen (Slike 7.55 a, b i d), dolazi do segmentacije sa niskim vrednostima praga, pa se gube detalji površina pod senkama (uokvireni delovi slike), što nije pogodno ukoliko je potrebno jasno istaći segmente slike sa tamnim površinama. Kod Zack i Tsai metode dolazi do segmentacije sa visokim pragom, pa su u znatno većoj meri prisutni crni pikseli u području papira bez senke, dok su regije od interesa neznatno izraženije u odnosu na Kapur metodu. Prema prikazanim slikama ustanovljeno je da Kapur metoda daje ujednačene rezultate segmentacije, što rezultuje segmentiranom slikom sa dovoljno istaknutim senkama i površinom osvetljenog papira bez prevelike količine šuma. Ostali algoritmi su vodili do segmentirane slike sa preniskim ili sa previsokim pragom segmentacije. Kapur metoda je poznata što potvrđuje i činjenica da, je ovaj algoritam u Matlab-u moguće implementirati pozivajući funkciju `th_entropy` (funkcije iz Matlaba su prikazane u poglavlju Prilozi – Prilog P4). Na slikama 7.56a-f prikazani su vrednosti praga svake od testiranih metoda segmentacije.

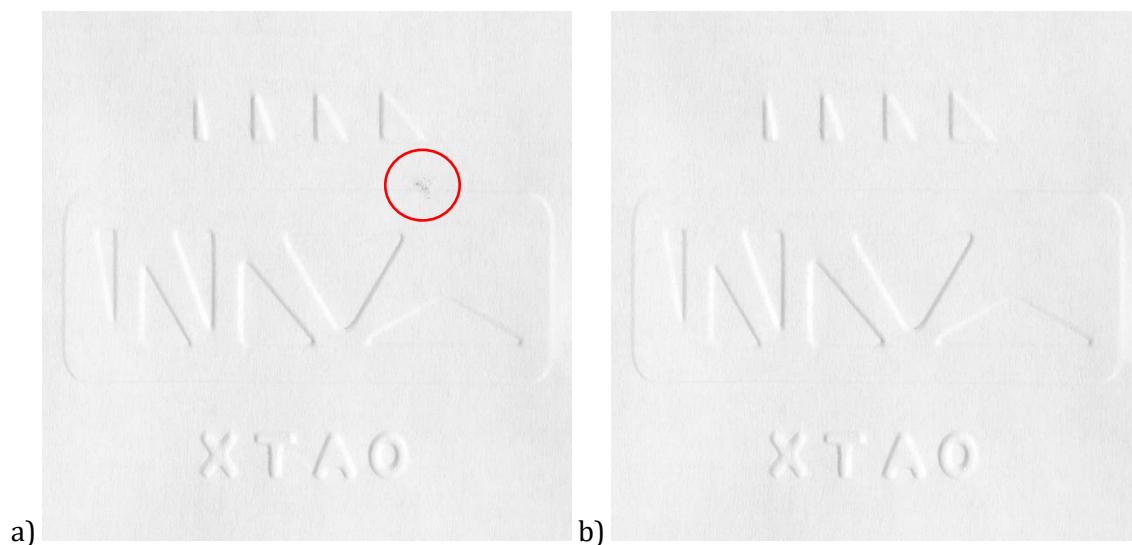


Slika 7.56: Prikaz ucrtanog praga na unimodalnom histogramu na osnovu a) Ridler, b) Otsu, c) Kapur, d) Yen, e) Zack i f) Tsai metode segmentacije slike

Sa slika 7.56a-d se vidi da prag segmentacije ima slične vrednosti. Međutim na rezultujućim segmentiranim slikama se jasno vide razlike na osnovu kojih je odabrana Kapur metoda. Na slikama 7.56 e i f, vidi se da prag zahvata oblast krive histograma uklanjajući jedan deo svetlih površina, što rezultuje pojačanim brojem tamnih površina slike (Slika 7.55 e i f).

Nakon segmentacije odabranom metodom, na nekim slikama se mogu pojaviti fleke ili druge nečistoće tj. smetnje u vidu tamnih površina, koje ne predstavljaju senku na papiru, pa ih je potrebno ukloniti u što većoj meri u cilju dobijanja što preciznijih rezultata. Uzroci fleka na segmentiranoj slici su najčešće nečistoće u samom papiru ili oštećenja na utisnutim elementima i oko elemenata. S obzirom da ove neželjene nečistoće utiču na ponovljivost i preciznost merenja, u pripremnoj fazi uzoraka ih je neophodno ukloniti, pre primene algoritma. Proces uklanjanja nečistoća sa monohromatskih slika obavljen je u programskom alatu Adobe Photoshop CS6. Obradene su slike koje bi zbog količine nečistoća smetale prilikom segmentacije, odnosno koje bi

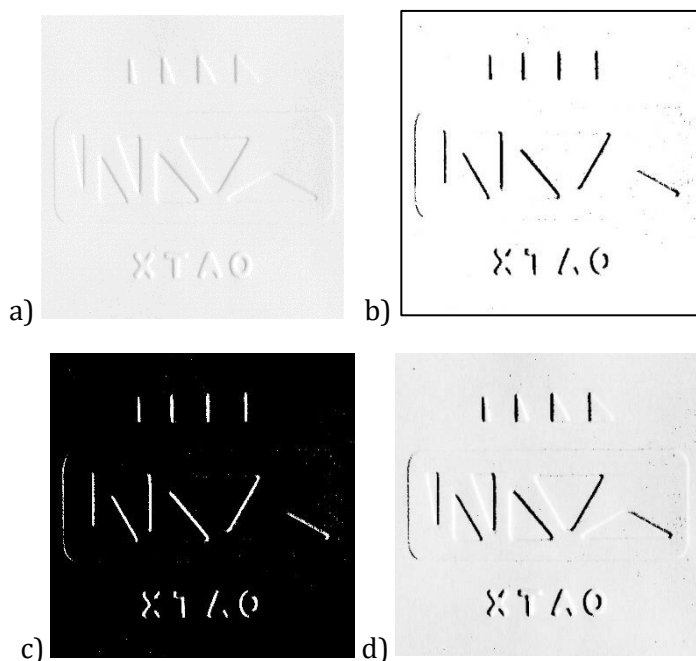
proizvele neadekvatnu segmentiranu sliku. Nakon uklanjanja nečistoća, monohromatske slike su spremne za dalju digitalnu analizu slike. Na slikama 7.57 prikazan je primer monohromatske slike pre (a) i posle (b) uklanjanja detektovane nečistoće.



Slika 7.57: Priprema uzoraka za segmentaciju slike a) neobrađen uzorak sa vidljivim oštećenjima papira i drugim vrstama šuma i b) izgled slike nakon uklanjanja šuma

U softverskom paketu MatLab R2015a sa odgovarajućim dodatkom - Image Processing Toolbox, urađena digitalna analiza slika skeniranih i pripremljenih uzoraka.

Uporedni prikazi primera originalne monohromatske slike, binarne segmentirane slike za izdvajanje površine papira van senki, binarne segmentirane slike za izdvajanje površine papira obuhvaćene senkom i maskirane monohromatske slike binarnom slikom u pozitivu prikazani su na slici 7.58.



Slika 7.58: Izgled a) originalne monohromatske slike, b) binarna pozitivna maska dobijena Kapur metodom c) binarna maska u negativu i d) maskiranje originalne slike segmentovanom za izdvajanje površine papira van senke

Nakon maskiranja monohromatske slike odgovarajućim binarnim slikama, izdvojene su površine pod senkom i van senke. Binarna slika u pozitivu se koristi za maskiranje površina pod senkom i izdvajanje površine van senke. Binarna slika u negativu se koristi za maskiranje površina van senke i izdvajanje površina koje su pod senkom. Kombiniranjem monohromatske slike pozitiv maskom nastaje kompozitna slika sa koje je moguće izračunati srednje vrednosti intenziteta nijanse sive površine van senki. Pomoću kompozitne slike, nastale spajanjem maske u negativu i originalne monohromatske slike, moguće je izračunati srednje vrednosti intenziteta nijanse sive površine pod senkom. Kao rezultat razvijenog algoritma, izračunate su vrednosti razlike intenziteta nijanse sive između površina van senke i površina obuhvaćenih senkom. Dobijena razlika predstavlja vrednost kontrasta na osnovu koje se donosi odluka o odgovarajućem pritisku za određeni papir i alat za utiskivanje.

Rezultati ovog dela eksperimenta prikazani su u Poglavlju 8.8.1, a detaljan kod korišćen u softverskom paketu Matlab kao i vrednosti odnosa svetlih i tamnih piksela u poglavlju Prilozi (Prilog P4).

### 7.10.2 Utiskivanje papira utvrđenim pritiscima iz prve faze eksperimenta

Nakon analize rezultata iz prve faze eksperimenta sprovedeno je utiskivanje odabranim pritiscima. Aparatura i metodologija za proces utiskivanja je bila ista kao i u prethodnoj fazi. Svaki uzorak papira je utisnut pet puta odabranom silom pritiska. Nakon utiskivanja, uzorci su pripremljeni na način opisan u nastavku kako bi se sprovela vizuelna metoda ocene kvaliteta utisnutih uzoraka papira.

#### *Vizuelna metoda ocene kvaliteta utisnutih uzoraka papira*

Vizuelna metoda podrazumeva rad sa ispitanicima čiji je zadatak upoređivanje i ocena kvaliteta utisnutih uzoraka papira. Definisani parametri za vizuelnu ocenu kvaliteta utisnutih elemenata su:

1. Oštrina (jasnoća) ivica utisnutih elemenata;
2. Ujednačenost visina utisnutih elemenata;
3. Oštećenje papira na utisnutim elementima;
4. Oštećenje papira oko utisnutih elemenata.

Rezultati ovog istraživanja imaju za cilj kvantifikovanje pomenutih osobina utisnutih elemenata na testiranim papirima. Ovo je izvedeno koristeći Likertovu skalu ocene kvaliteta. Likertova skala se često koristi u biheviorističkim naukama, medicini, marketingu i u ostalim oblastima kada je potrebno dobiti ocenu (mišljenje) ispitanika. U toku testa, ispitanici određuju stepen njihovog slaganja sa datom izjavom najčešće na skali od 3, 5 ili 7 podeoka. Svaka stavka na Likertovoj skali ima diskretnu vrednost, a srednja stavka na skali je obično neutralna (de Winter i Dodou, 2010).

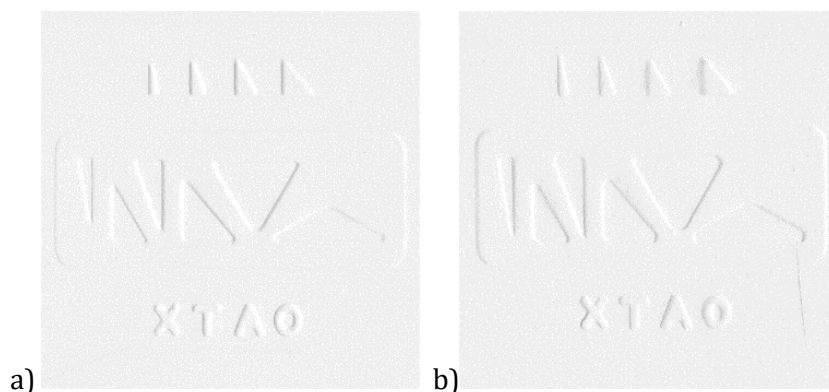
#### **Ispitanici**

U eksperimentu je učestvovalo 9 eksperata iz oblasti grafičkog inženjerstva i dizajna starosti između 24 i 40 godina sa radnim iskustvom od minimum dve godine na Departmanu za grafičko inženjerstvo i dizajn. Svi ispitanici su imali neoštećen vid ili vid korigovan uz pomoć dioptrijskih naočara ili sočiva.

#### **Uzorci**

Za ovaj eksperiment pripremljeni su utiskivani uzorci papira. Uzorci za posmatranje su bili sačinjeni od dva povezana papirna kvadrata dimenzije 70x70 mm sa elementima utisnutim

odabranim pritiskom. Uzorci su od istog papira, utisnuti pomoću dva različita alata, konvencionalnim i alatima izrađenim FDM tehnikom 3D štampe. Uzorcima papira je menjana pozicija kako bi se sprečila predvidivost i ustaljenost odgovora od strane ispitanika. Izgled jednog para uzorka za posmatranje prikazan je na slici 7.59.



Slika 7.59: Par uzorka za vizuelnu metodu ocene kvaliteta utisnutih uzoraka alatom izrađenim a) tehnikom hemijskog nagrizanja i b) FDM tehnikom 3D štampe

Redosled prikazivanja parova utisnutih papira nasumično je generisan za svakog ispitanika. Svaki ispitanik je posmatrao ukupno 48 parova uzoraka (12 različitih papira x 4 alata).

### **Procedura**

Ispitanici su testirani pojedinačno u zamračenoj prostoriji, kako bi se izbegli uticaji spoljnog osvetljenja. Uzorci su posmatrani u kontrolisanim svetlosnim uslovima kabineta za posmatranje uzoraka u grafičkoj industriji – Agile Radiant Controlled Light 5 (slika 7.60).



Slika 7.60: Kabinet za posmatranje uzoraka - Agile Radiant Controlled Light 5 (Ihara, 2016)

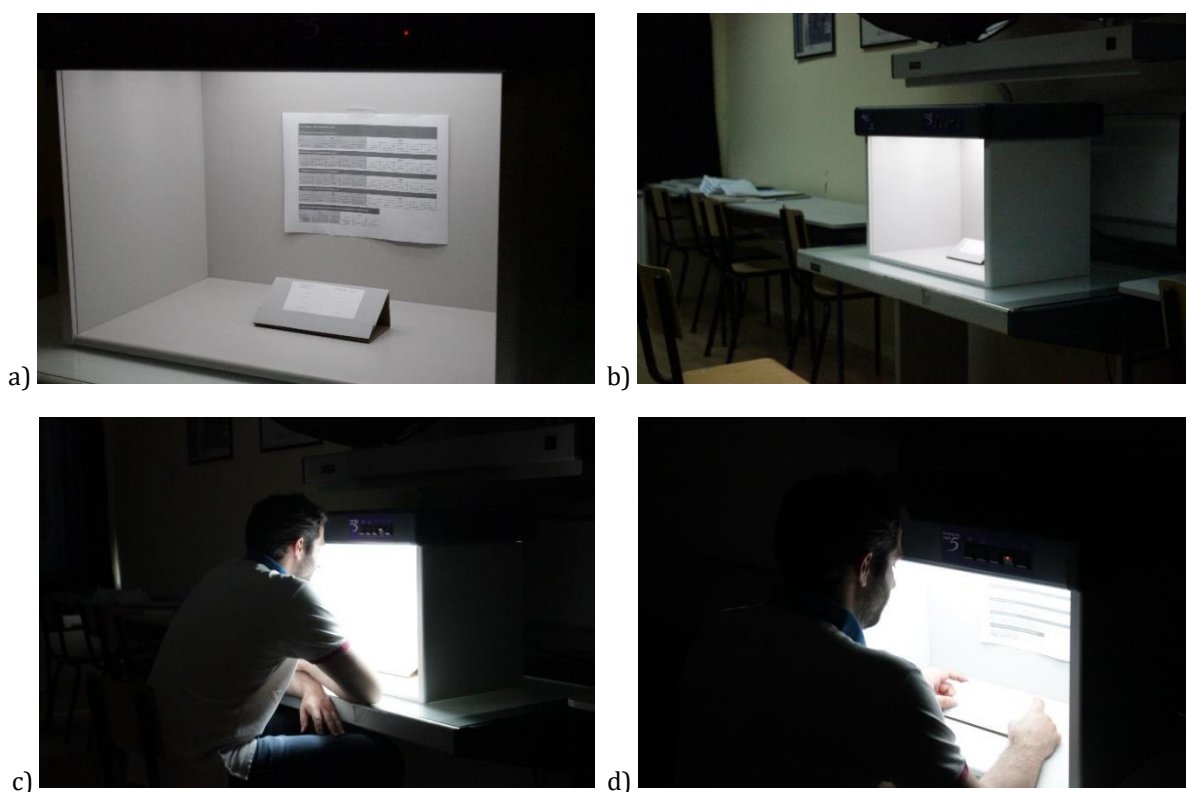
Tabela 7.23: Karakteristike kabineta za posmatranje - Agile Radiant Controlled Light 5 (Ihara, 2016)

Proizvođač/Model	Agile Radiant Controlled Light 5 - Model CVC5-2E
Broj izvora svetla	5
U skladu sa standardom	BS 950/ISO 3664:2000/CIE
Izvori osvetljenja	Store Light – TL 84 (temp. 4100K), 2x18W Home Light – Tungsten (temp. 2700K), 2x60W Daylight 1 – D65, Ra>98 (temp. 6500K), 2x18W Daylight 2 – D50, Ra>98 (temp. 5000K), 2x18W Ultra Violet – Blacklight (temp. N/A), 1x18W
Potrošnja energije	230V/50Hz/290W (maks.)



Za ovaj eksperiment korišćen je D50 svetlosni izvor. Uzorci su posmatrani pod uglom od 90° stepeni u odnosu na pogled posmatrača. Udaljenost posmatranja nije diktirana ispitanicima, već im je rečeno da se nameste u prijatan položaj za dug rad na udaljenosti od posmatranih uzoraka u rasponu od 40 cm do 70 cm. Na slici 7.61 prikazana je postavka aparature eksperimenta i položaj ispitanika u toku testiranja.

Ispitanici su imali zadatak da procene uočavaju li razliku između dva uzorka. Ukoliko je odgovor bio potvrđan, koristeći Likertovu skalu, ocenili su pet različitih tvrdnji za ocenu kvaliteta. Prve četiri tvrdnje okarakterisane su na skali od pet ocena, a poslednja na skali od tri ocene. Prva tvrdnja glasi: „Oštrina (jasnoća) ivica utisnutih elemenata je:“, sa vrednostima ocena na skali: 1 – neprihvatljiva, 2 – ispod proseka, 3 – prihvatljiva, 4 – iznad proseka, 5 – odlična. Druga tvrdnja glasi: „Ujednačenost visina utisnutih elemenata je:“ sa vrednostima ocena na skali kao i kod prve tvrdnje. Treća tvrdnja glasi: „Oštećenje papira na utisnutim elementima je:“, sa vrednostima ocena na skali: 1 – neprihvatljivo, 2 – izraženo, 3 – prihvatljivo, 4 – jedva vidljivo, 5 – bez oštećenja. Četvrta tvrdnja je glasila: „Oštećenje papira oko utisnutih elemenata je:“ sa vrednostima ocena na skali kao i kod treće tvrdnje. Peta tvrdnja služi za generalni utisak kvaliteta i ona glasi: „Ocenite ukupni kvalitet oba uzorka na osnovu prethodnih pitanja na skali“, sa vrednostima ocena na skali: 1 – neprihvatljiv kvalitet, 2 – prihvatljiv kvalitet, 3 – odličan kvalitet. Testiranje je trajalo približno 1 sat po ispitaniku. Rezultati eksperimenta prikazani su u Poglavlju 8.82.



Slika 7.61: a i b) Postavka uzoraka i kabine za posmatranje korišćenih za vizuelnu metodu ispitivanja kvaliteta i c i d) položaj ispitanika u toku testiranja

## 7.11 Ispitivanje otpornosti alata za utiskivanje na habanje pri korišćenju

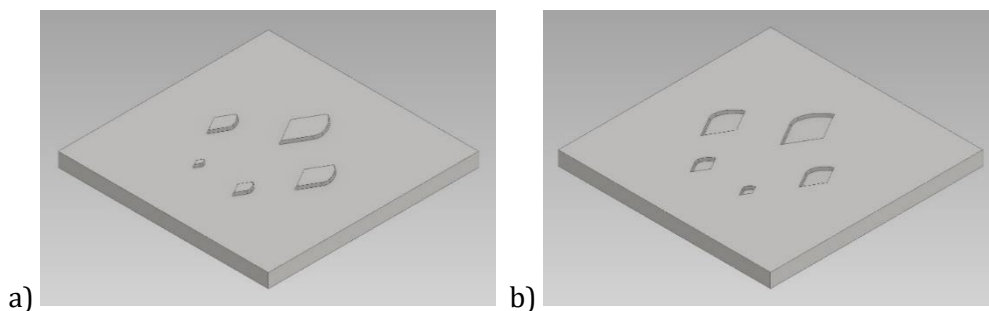
Alati za utiskivanje izrađeni konvencionalnim metodama u stanju su da izdrže tiraže i do 1.000.000 otisaka. Alati od magnezijuma, koji se najčešće koriste, u stanju su da podnesu tiraže između 100.000 i 150.000 otisaka (u-emboss, n.d.) Ispitivanjem mehaničkih karakteristika uzoraka izrađenih FDM tehnikom 3D štampe stečen je uvid u maksimalne vrednosti zatezne i pritisne čvrstoće koje PLA materijal može da podnese. Međutim, s obzirom na to da je cilj ove



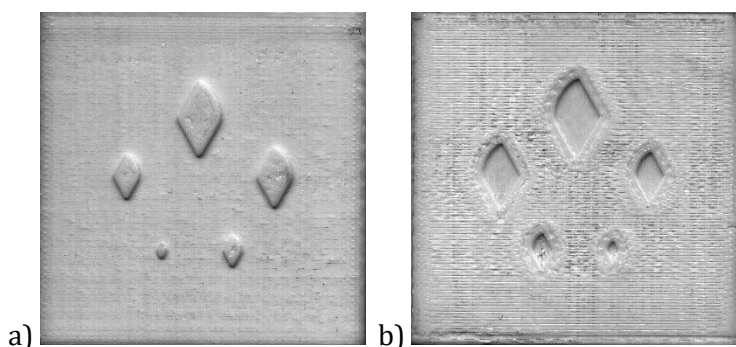
doktorske disertacije da se ispita mogućnost primene 3D tehnika štampe za izradu alata za utiskivanje, potrebno je odrediti koje tiraže ovi alati mogu da izdrže bez oštećenja, odnosno bez neželjenih promena na utisnutim uzorcima.

### Uzorci

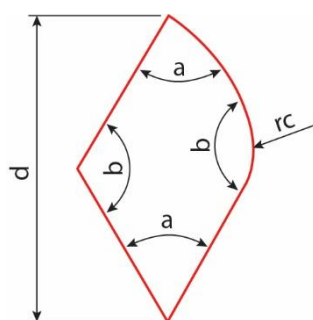
Za ovaj eksperiment osmišljeni su posebni alati za procenu oštećenja prilikom utiskivanja. Alati sadrže elemente različitih dimenzija, kako bi se ispitao uticaj veličine elemenata na oštećenje alata usled cikličnog delovanja sile pritiska. 3D model i konačni izgled alata za ispitivanje otpornosti na habanje, izrađenog FDM tehnikom štampe, prikazani su na slikama 7.62 i 7.63. Geometrija jednog elementa alata prikazana je na slici 7.64.



Slika 7.62: Konstruisani 3D model alata za testiranje otpornosti na habanje: a) patrica i b) matrica



Slika 7.63: Alat za testiranje otpornosti na habanje izrađen FDM tehnikom 3D štampe: a) patrica i b) matrica



Slika 7.64: Ilustracija elementa na alatu za testiranje otpornosti na habanje: a – oštri ugao, b – tup ugao, c – zaobljen vrh ugla i d – visina elementa za utiskivanje

Elementi su sačinjeni od dva oštra ugla ( $a = 60^\circ$ ), dva tupa ugla ( $b = 120^\circ$ ), jednom zaobljenom ivicom (c) i dužinom (d). Vrednosti uglova (a i b) nisu menjane, dok su vrednosti c iznosile: 2,5 mm, 2 mm, 1,5 mm, 1 mm i 0,5 mm, a vrednosti dužina elemenata d: 10 mm, 8 mm, 6 mm, 4 mm i 2 mm. Nisu izrađeni elementi dužine manje od 2 mm zbog ograničenja FDM tehnike štampe da precizno reprodukuje toliko sitne elemente. Ovako konstruisan alat za testiranje otpornosti na habanje osmišljen je kako bi se ispitao uticaj učestalih pritisaka na elemente sa različitim veličinama i uglovima ivica elemenata.

## **Procedura**

Modelovanje alata za testiranje otpornosti na habanje izvedeno je programskim alatom Autodesk Inventor Professional 2016. Kao izlazni format generisana je STL datoteka. Sečenje i priprema STL fajla kao i podešavanje parametara za štampu izvedeno je pomoću softverskog alata MakerBot Desktop (verzija 3.10.1.1389). Parametri za štampu podešeni su po definisanim parametrima iz *Karakterizacija procesnih parametara FDM tehnike 3D štampe* – Poglavlje 8.2. Uzorci su proizvedeni na FDM štampaču MakerBot Replicator 5th Generation (slika 7.6). Vreme štampe matrice iznosilo je 49 min, patrice 47 min, a ukupna masa alata (patrice i matrice) iznosila je 17,86 g. Uzorci su štampani koristeći podlogu (raft), a nakon štampe su od iste odvojeni i pripremljeni za proces utiskivanja. Uzorci su naknadno obrađeni mehaničkim postupkom pomoću brusnog papira granulacije 320, kako bi se uklonile neravnine na površini elemenata za štampu i smanjila količina oštećenja utisnutog papira.

Nakon pripreme, alati su pričvršćeni na ploče za utiskivanje uređaja Shimadzu EZ-L. Utiskivanje je izvedeno na premaznom papiru gramature 200 g/m<sup>2</sup> sa silom pritiska od 1000 N. Pre utiskivanja papir je isečen u trake širine 70 mm i dužine 350 mm. Procedura utiskivanja izvedena je na identičan način kao u prethodnom eksperimentu, a alat je posle određenog broja utiskivanja, demontiran sa ploča i skeniran. Pored alata, skenirani su i utisnuti uzorci. Ova procedura je sprovedena kako bi se ustanovilo posle kog broja utiskivanja dolazi do oštećenja alata. Uzorci alata i papira su skenirani posle prvog, 25. 50. i 100. utiskivanja i kad je ustanovljeno da u prvih 100 utiskivanja nema vidljivih promena ni na alatu ni na utisnutom uzorku, svako sledeće uzorkovanje je vršeno nakon 100 utiskivanja i tako do konačnog broja od 1000 otisaka. Ovaj broj utiskivanja je odabran pod pretpostavkom da će alati izrađeni FDM tehnikom štampe biti korišćeni za manje tiraže.

Alati i utisnuti uzorci snimani su i analizirani u toku eksperimenta pomoću skenera Canon CanoScan 5600F (slika 7.56). Specifikacije uređaja prikazane su u Tabeli 7.22. Podešena je rezolucija od 1200 spi, a slike su skenirane u monohromatskom režimu. Digitalizacija alata i uzoraka izvršena je i pomoću digitalnih mikroskopa Veho VMS-004D na uveličanju od 20x i ViTiny VT300 na uveličanju od 10x, kako bi se bolje uočile promene na uzorcima. Snimci alata i utisnutih papira prikazani su u Poglavlju 8.9.

Nakon ovog eksperimenta izdvojeni su reprezentativni uzorci utisnutih papira kako bi bili pripremljeni za sledeći eksperiment u kom su prikazivani ispitanicima sa ciljem da se utvrdi da li ima uočljivih promena. U slučaju da ispitanici uoče razlike između utisnutih uzoraka pretpostavlja se da je alat pretrpeo oštećenja koja utiču na izgled utisnutih elemenata. Rezultati testiranja ispitanika prikazani su u Poglavlju 8.9.1.

## 8. REZULTATI

U ovom poglavlju su predstavljeni i komentarisani reprezentativni rezultati eksperimenata izvedenih u okviru ove disertacije, čija je metodologija opisana u prethodnom poglavlju. Kompletan i detaljan pregled rezultata dat je u poglavlju Prilozi.

### 8.1 Karakterizacija papirnih materijala za utiskivanje

Papirni materijali za utiskivanje karakterisani su u ovom eksperimentu tako što je testiran uticaj smera vlakana papira na zateznu čvrstoću i procenat izduženja. Procedura izvođenja eksperimenta opisana je u Poglavlju 7.2. Detaljni pregled rezultata prikazan je u poglavlju Prilozi - Prilog 1.

#### Nepremazni papiri

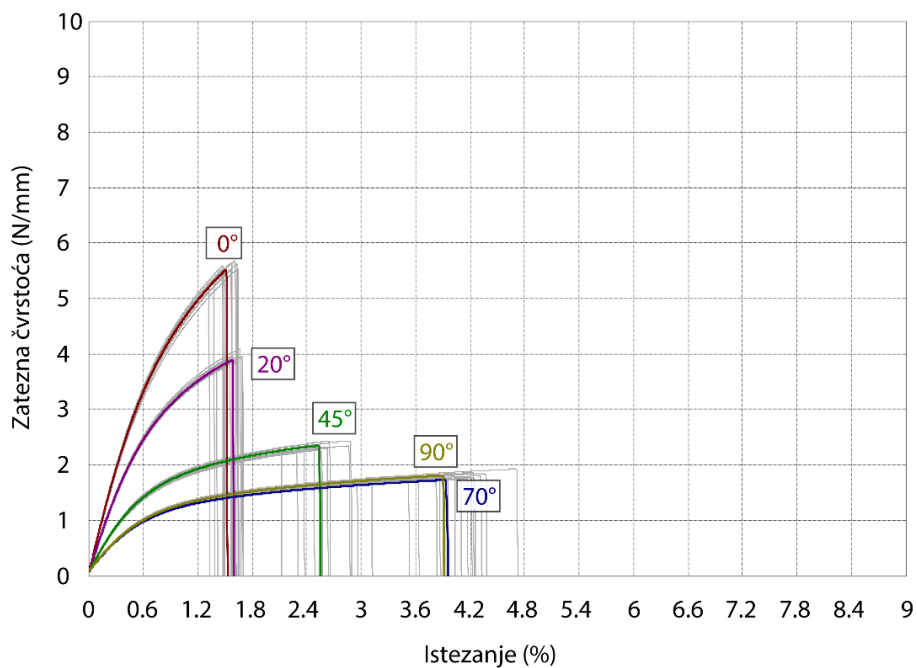
U Tabeli 8.1 prikazane su srednje vrednosti, standardna devijacija i opseg vrednosti zatezne čvrstoće, kao i izduženja nepremaznog papira za svih pet smerova vlakana.

Tabela 8.1: Srednje vrednosti zatezne čvrstoće i istežanja za nepremazne papire

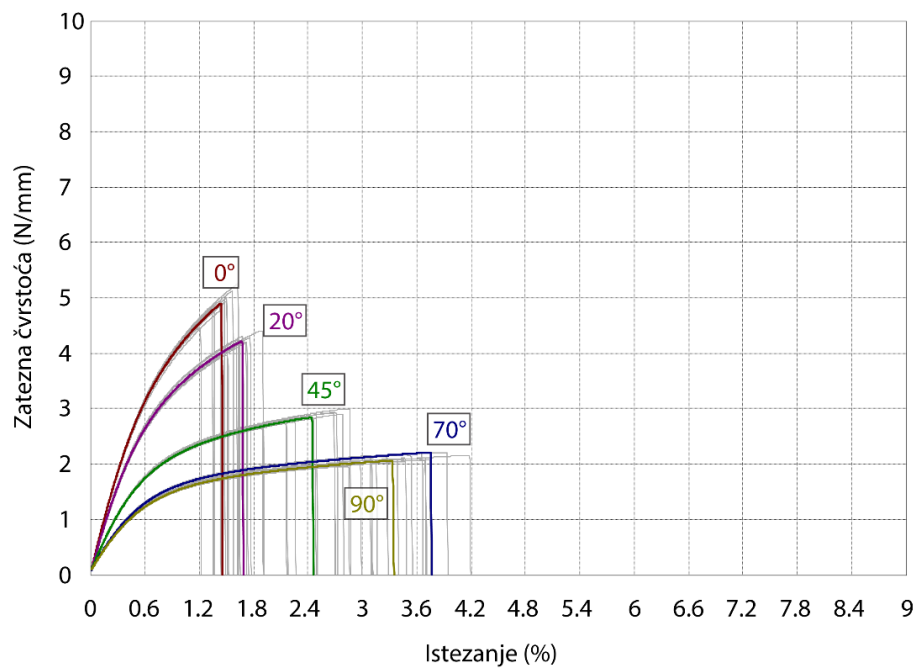
Gramatura			80 g/m <sup>2</sup>		100 g/m <sup>2</sup>		120 g/m <sup>2</sup>		140 g/m <sup>2</sup>		170 g/m <sup>2</sup>	
Ugao vlakana	Vrednosti	Zatezna čvrstoća papira [N/mm]	Istežanje [%]	Zatezna čvrstoća papira [N/mm]	Istežanje [%]	Zatezna čvrstoća papira [N/mm]	Istežanje [%]	Zatezna čvrstoća papira [N/mm]	Istežanje [%]	Zatezna čvrstoća papira [N/mm]	Istežanje [%]	
		Nepremazni papir										
0°	Sr.Vr.	<b>5,521</b>	<b>1,516</b>	<b>4,901</b>	<b>1,445</b>	<b>7,421</b>	<b>1,887</b>	<b>8,378</b>	<b>2,460</b>	<b>9,422</b>	<b>1,970</b>	
	StDev	0,130	0,109	0,216	0,119	0,121	0,042	0,609	0,216	0,190	0,087	
	Opseg	0,422	0,320	0,798	0,415	0,364	0,140	2,202	0,797	0,573	0,254	
20°	Sr.Vr.	<b>3,888</b>	<b>1,585</b>	<b>4,211</b>	<b>1,670</b>	<b>6,565</b>	<b>2,271</b>	<b>8,188</b>	<b>2,570</b>	<b>9,129</b>	<b>2,060</b>	
	StDev	0,113	0,089	0,118	0,116	0,146	0,121	0,250	0,154	0,107	0,082	
	Opseg	0,381	0,283	0,441	0,389	0,471	0,384	0,890	0,558	0,348	0,226	
45°	Sr.Vr.	<b>2,343</b>	<b>2,520</b>	<b>2,836</b>	<b>2,429</b>	<b>5,204</b>	<b>3,674</b>	<b>6,618</b>	<b>3,064</b>	<b>7,115</b>	<b>2,950</b>	
	StDev	0,060	0,239	0,110	0,311	0,135	0,180	0,240	0,230	0,090	0,130	
	Opseg	0,178	0,771	0,348	0,942	0,325	0,584	0,733	0,699	0,321	0,447	
70°	Sr.Vr.	<b>1,749</b>	<b>3,894</b>	<b>2,132</b>	<b>3,230</b>	<b>4,531</b>	<b>5,842</b>	<b>5,561</b>	<b>4,308</b>	<b>5,754</b>	<b>4,674</b>	
	StDev	0,039	0,294	0,074	0,466	0,078	0,236	0,172	0,421	0,155	0,226	
	Opseg	0,115	0,908	0,229	1,555	0,237	0,869	0,562	1,422	0,467	0,738	
90°	Sr.Vr.	<b>1,805</b>	<b>3,880</b>	<b>2,057</b>	<b>3,308</b>	<b>4,024</b>	<b>6,096</b>	<b>5,115</b>	<b>5,037</b>	<b>5,532</b>	<b>5,086</b>	
	StDev	0,071	0,535	0,066	0,532	0,110	0,468	0,085	0,294	0,081	0,216	
	Opseg	0,246	1,732	0,194	1,669	0,322	1,412	0,293	0,954	0,268	0,712	

Iz Tabele 8.1 se vidi da kod svake gramature papira s povećanjem ugla koji vlakna zaklapaju sa pravcem testiranja, vrednosti zatezne čvrstoće opadaju. Najveće vrednosti zatezne čvrstoće imaju papiri čija su vlakna u toku testiranja postavljena u pravcu kretanja fiksacionih čeljusti (ugao 0°). Zatezna čvrstoća papira u CD (cross-machine direction - 90°) smeru najniža je kod svih gramatura nepremaznih papira.

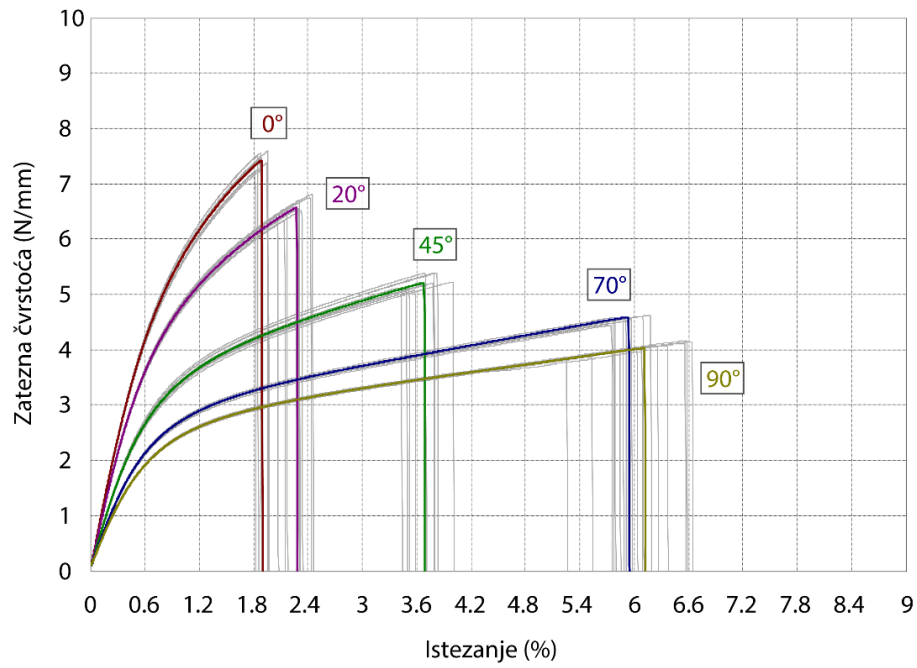
Procenat izduženja za sve gramature testiranih papira raste sa povećanjem ugla koji vlakna papira zaklapaju sa pravcem testiranja. Nepremazni papiri imaju najveće vrednosti izduženja pri uglu od 90°. Na graficima 8.1-8.5 prikazane su krive napon-izduženje za nepremazne papire gramatura 80 g/m<sup>2</sup>, 100 g/m<sup>2</sup>, 120 g/m<sup>2</sup>, 140 g/m<sup>2</sup> i 170 g/m<sup>2</sup>.



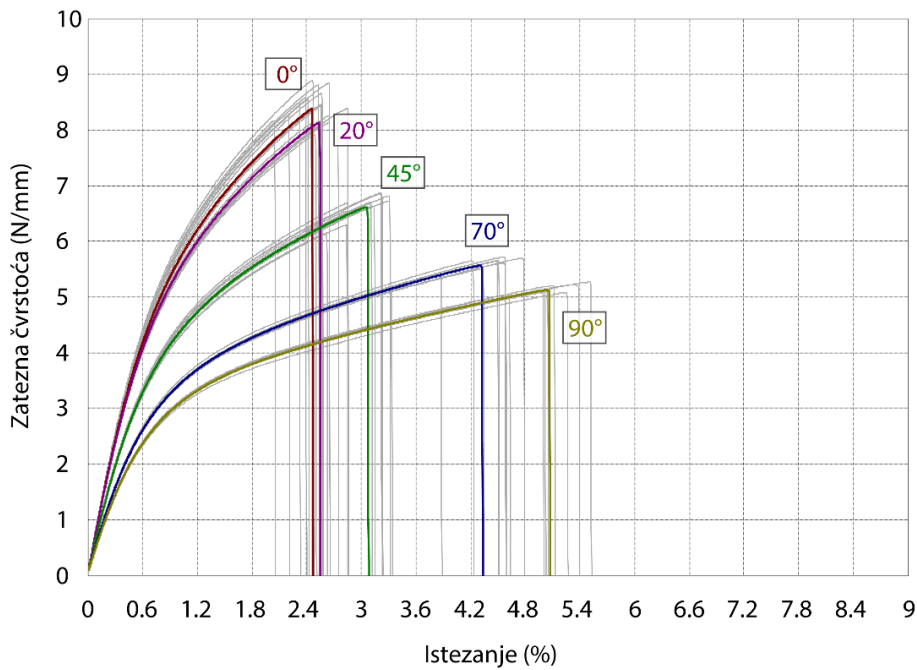
Grafik 8.1: Krive napon-izduženje sa različitim smerom vlakana kod nepremaznog papira gramature 80 g/m<sup>2</sup>



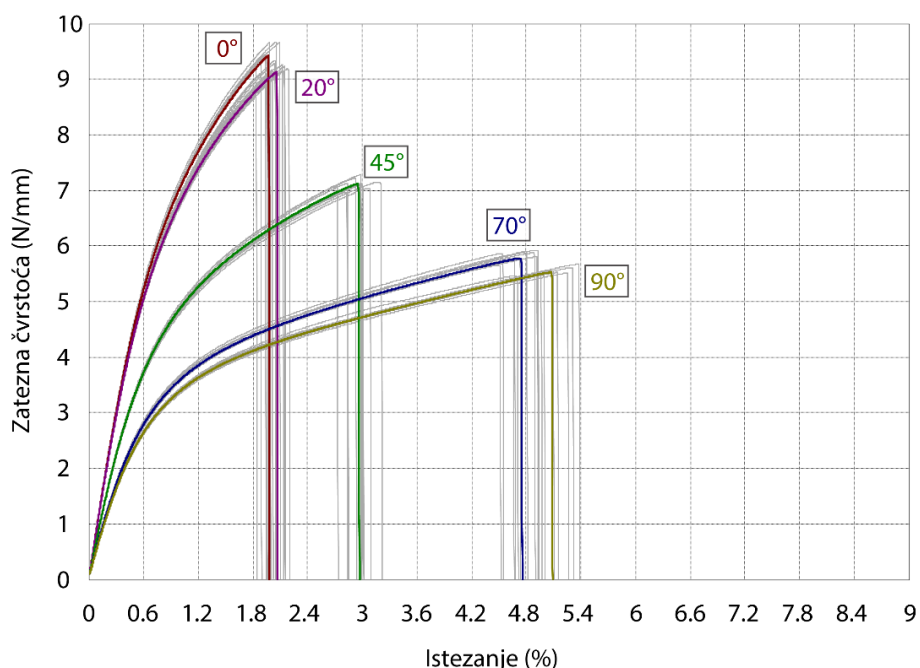
Grafik 8.2: Krive napon-izduženje sa različitim smerom vlakana kod nepremaznog papira gramature 100 g/m<sup>2</sup>



Grafik 8.3: Krive napon-izduženje sa različitim smerom vlakana kod nepremaznog papira gramature 120 g/m<sup>2</sup>



Grafik 8.4: Krive napon-izduženje sa različitim smerom vlakana kod nepremaznog papira gramature 140 g/m<sup>2</sup>



Grafik 8.5: Krive napon-izduženje sa različitim smerom vlakana kod ofset papira gramature 170 g/m<sup>2</sup>

Na prikazanim grafikonima uočava se da gramatura utiče na vrednosti zatezne čvrstoće tako da papiri sa najvećom gramaturom imaju najveće vrednosti zatezne čvrstoće. Približne su vrednosti zatezne čvrstoće kod uglova 0° i 20°, kao i kod uglova 70° i 90°. U slučaju izduženja se vidi nešto manji uticaj gramature papira. Najviše vrednosti izduženja izmerene su kod papira gramature 120 g/m<sup>2</sup>, a najniže kod papira gramature 80 g/m<sup>2</sup> i 100 g/m<sup>2</sup>.

### Premazni papiri

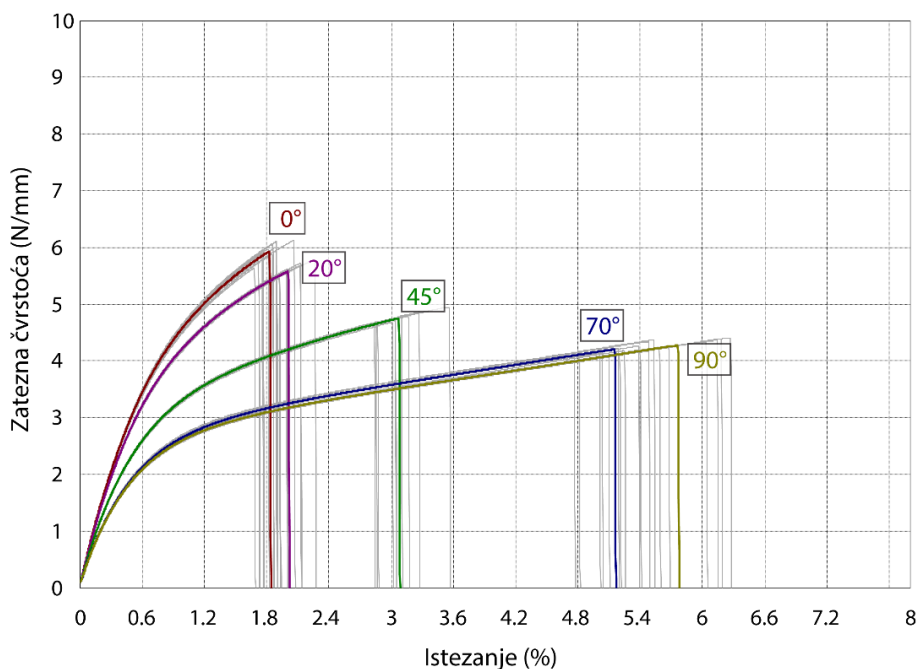
U Tabeli 8.2 prikazane su srednje vrednosti, standardna devijacija i opseg vrednosti zatezne čvrstoće, kao i izduženja premaznih mat papira za svih pet smerova vlakana.

Tabela 8.2: Srednje vrednosti zatezne čvrstoće i istezanja za premazne mat papire

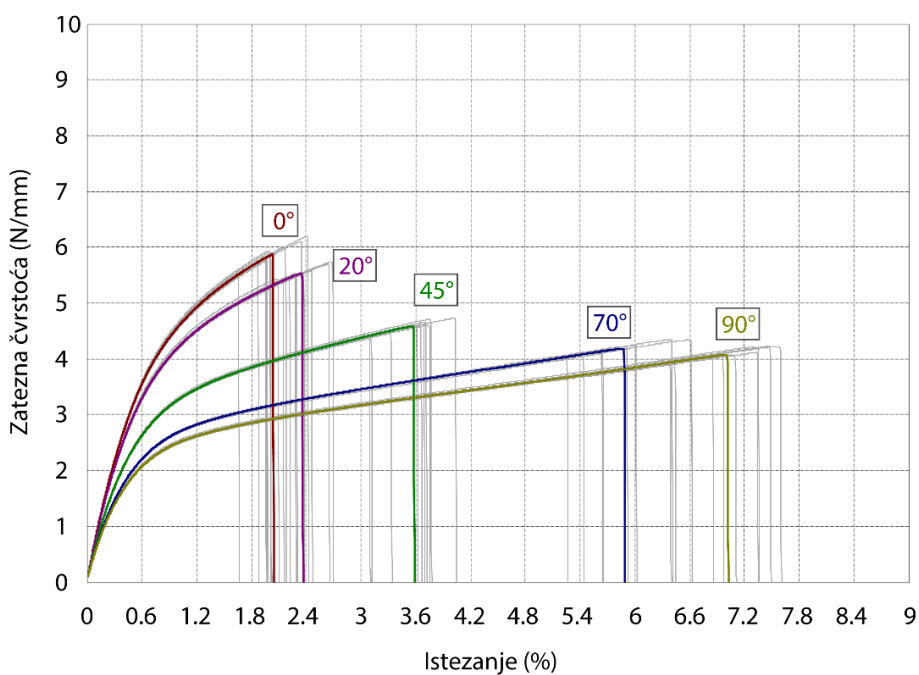
Gramatura			130 g/m <sup>2</sup>		150 g/m <sup>2</sup>		170 g/m <sup>2</sup>		200 g/m <sup>2</sup>			
Premazni	Ugao vlakana	Vrednosti	Zatezna čvrstoća papira [N/mm]	Istezanje [%]	Zatezna čvrstoća papira [N/mm]	Istezanje [%]	Zatezna čvrstoća papira [N/mm]	Istezanje [%]	Zatezna čvrstoća papira [N/mm]	Istezanje [%]		
			0°	Sr.Vr.	<b>5,930</b>	<b>1,829</b>	<b>5,872</b>	<b>2,032</b>	<b>6,911</b>	<b>2,146</b>	<b>7,530</b>	<b>2,357</b>
				StDev	0,153	0,110	0,196	0,224	0,125	0,124	0,200	0,191
	Opseg	0,491		0,382	0,655	0,764	0,462	0,471	0,683	0,623		
	20°	Sr.Vr.	<b>5,576</b>	<b>2,006</b>	<b>5,535</b>	<b>2,353</b>	<b>6,350</b>	<b>2,400</b>	<b>7,401</b>	<b>2,684</b>		
		StDev	0,133	0,142	0,108	0,197	0,118	0,136	0,188	0,228		
		Opseg	0,460	0,528	0,323	0,596	0,377	0,489	0,528	0,626		
	45°	Sr.Vr.	<b>4,747</b>	<b>3,072</b>	<b>4,585</b>	<b>3,565</b>	<b>5,548</b>	<b>3,510</b>	<b>6,538</b>	<b>4,057</b>		
		StDev	0,095	0,221	0,103	0,300	0,094	0,278	0,144	0,272		
		Opseg	0,298	0,724	0,309	0,936	0,324	1,047	0,399	0,866		
70°	Sr.Vr.	<b>4,199</b>	<b>5,148</b>	<b>4,194</b>	<b>5,840</b>	<b>4,952</b>	<b>5,102</b>	<b>5,637</b>	<b>5,940</b>			
	StDev	0,099	0,266	0,103	0,410	0,110	0,273	0,115	0,329			
	Opseg	0,294	0,773	0,281	1,329	0,335	0,922	0,401	1,169			
90°	Sr.Vr.	<b>4,273</b>	<b>5,780</b>	<b>4,072</b>	<b>6,982</b>	<b>4,939</b>	<b>5,794</b>	<b>5,362</b>	<b>5,985</b>			
	StDev	0,099	0,384	0,124	0,429	0,112	0,361	0,056	0,210			
	Opseg	0,290	1,067	0,344	1,171	0,333	1,150	0,183	0,731			

Kod premaznih, kao i kod nepremaznih papira, primetno je opadanje vrednosti zatezne čvrstoće sa povećanjem ugla između vlakana papira i pravca testiranja zatezne čvrstoće. Svi testirani papiri imaju veću vrednost zatezne čvrstoće pod uglom od 0° u odnosu na osu testiranja.

Nasuprot tome, procenat izduženja se povećava sa povećanjem ugla. Najveća vrednost izduženja zabeležena je u CD (90°) smeru. Na graficima 8.6-8.9 prikazane su krive napon-izduženje za premazne papire.

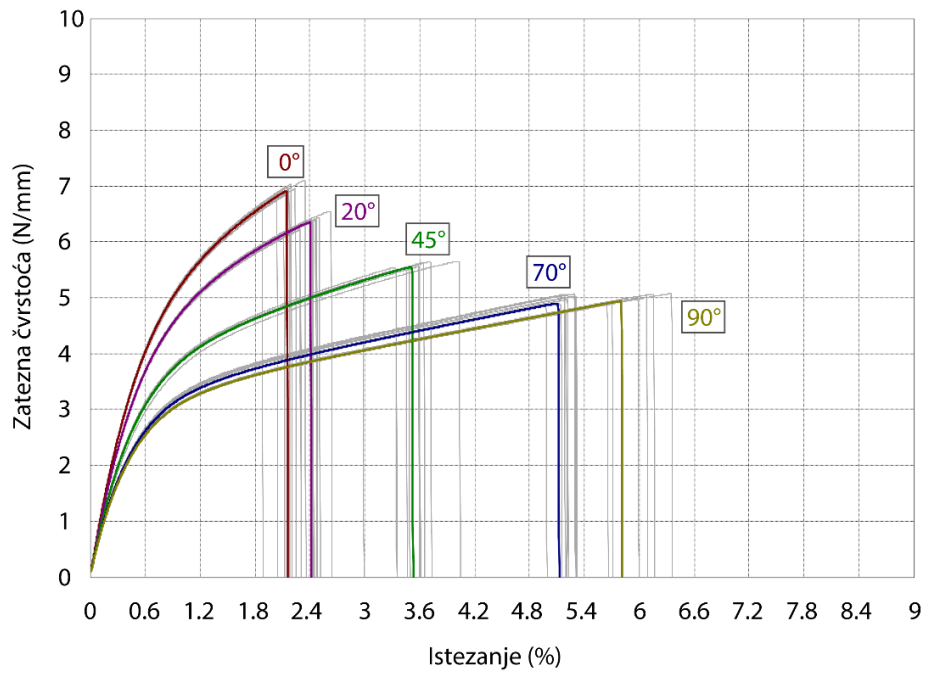


Grafik 8.6: Krive napon-izduženje sa različitim smerom vlakana kod premaznog papira gramature 130 g/m<sup>2</sup>

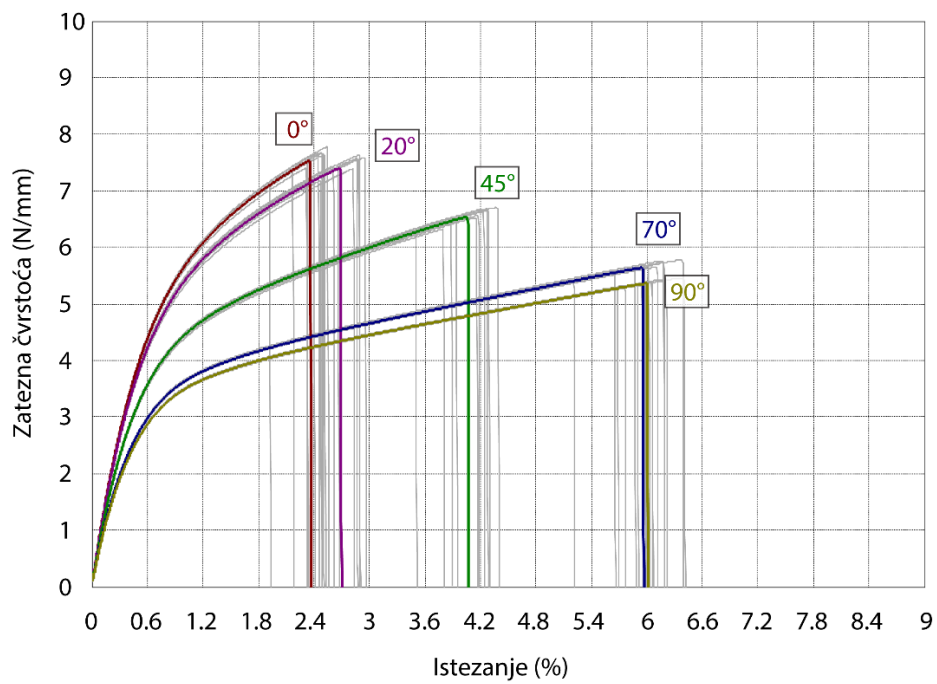


Grafik 8.7: Krive napon-izduženje sa različitim smerom vlakana kod premaznog papira gramature 150 g/m<sup>2</sup>





Grafik 8.8: Krive napon-izduženje sa različitim smerom vlakana kod premaznog papira gramature 170 g/m<sup>2</sup>



Grafik 8.9: Krive napon-izduženje sa različitim smerom vlakana kod premaznog papira gramature 200 g/m<sup>2</sup>

Pokazalo se da i u slučaju premaznih papira gramatura ima uticaj na vrednost zatezne čvrstoće, ali u manjoj meri nego što je to slučaj kod nepremaznih papira. Dok je kod nepremaznih papira razlika između 80 i 170 g/mm<sup>2</sup> skoro dvostruka, kod premaznih papira je razlika između gramatura 130 i 200 g/mm<sup>2</sup> znatno manja. Kod premaznih papira od 130 i 150 g/mm<sup>2</sup> vrednosti zatezne čvrstoće su približne. Papir od 150 g/mm<sup>2</sup> ima nižu vrednost zatezne čvrstoće i to u slučaju svih pet testiranih uglova.

Procenat izduženja raste sa povećanjem gramature, ali samo u slučaju uglova od 0° i 20°. Pod uglom od 45°, 70° i 90°, papir od 170 g/mm<sup>2</sup> ima niže vrednosti izduženja od papira od 150 g/mm<sup>2</sup>, dok papir od 200 g/mm<sup>2</sup> u CD smeru ima najviše vrednosti izduženja. Najveće vrednosti izduženja pri većim uglovima su uočene kod papira gramature 150 g/mm<sup>2</sup>.

### **Voluminozni papiri**

U Tabeli 8.3 prikazane su srednje vrednosti, standardna devijacija i opseg vrednosti zatezne čvrstoće, kao i izduženja voluminoznih papira za svih pet smerova vlakana.

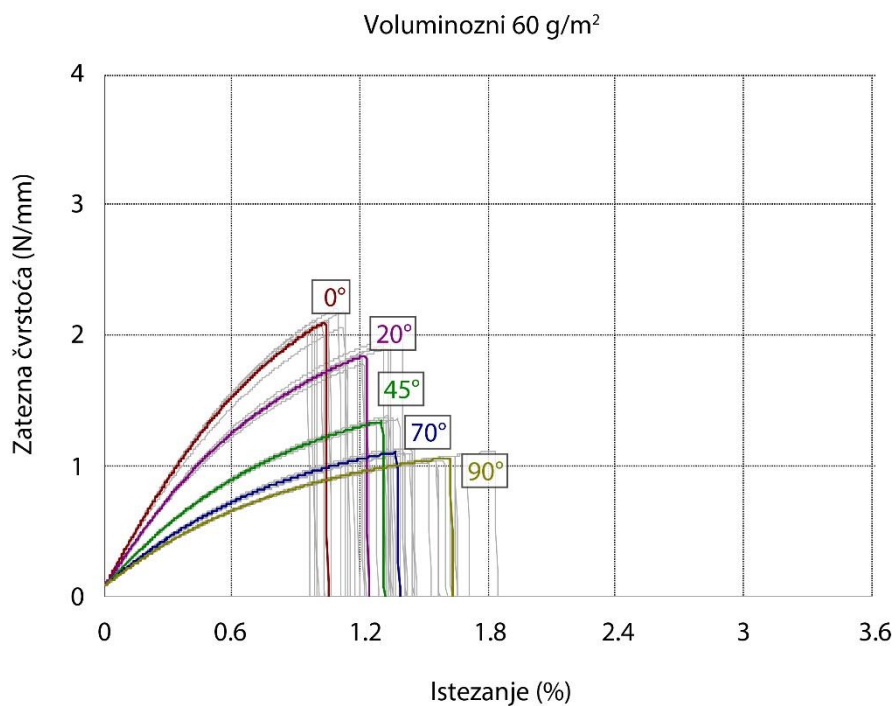
*Tabela 8.3: Srednje vrednosti zatezne čvrstoće i istežanja za voluminozne papire*

Gramatura			60 g/m <sup>2</sup>		70 g/m <sup>2</sup>		80 g/m <sup>2</sup>	
Voluminozni	Ugao vlakana	Vrednosti	Zatezna čvrstoća papira [N/mm]	Istežanje [%]	Zatezna čvrstoća papira [N/mm]	Istežanje [%]	Zatezna čvrstoća papira [N/mm]	Istežanje [%]
	0°	Sr.Vr.	<b>2,100</b>	<b>1,039</b>	<b>2,987</b>	<b>1,209</b>	<b>3,407</b>	<b>1,269</b>
		StDev	0,058	0,064	0,087	0,059	0,046	0,045
		Opseg	0,171	0,179	0,258	0,222	0,140	0,148
	20°	Sr.Vr.	<b>1,843</b>	<b>1,227</b>	<b>2,462</b>	<b>1,073</b>	<b>2,786</b>	<b>1,462</b>
		StDev	0,094	0,115	0,077	0,068	0,094	0,121
		Opseg	0,277	0,376	0,235	0,227	0,333	0,466
	45°	Sr.Vr.	<b>1,335</b>	<b>1,302</b>	<b>1,805</b>	<b>1,248</b>	<b>1,960</b>	<b>1,834</b>
		StDev	0,036	0,063	0,068	0,104	0,045	0,150
		Opseg	0,126	0,215	0,234	0,400	0,134	0,395
70°	Sr.Vr.	<b>1,089</b>	<b>1,348</b>	<b>1,478</b>	<b>1,574</b>	<b>1,529</b>	<b>1,965</b>	
	StDev	0,037	0,109	0,039	0,116	0,076	0,246	
	Opseg	0,120	0,286	0,112	0,359	0,266	0,834	
90°	Sr.Vr.	<b>1,055</b>	<b>1,615</b>	<b>1,294</b>	<b>1,543</b>	<b>1,507</b>	<b>1,954</b>	
	StDev	0,025	0,089	0,116	0,271	0,033	0,116	
	Opseg	0,073	0,303	0,398	0,893	0,088	0,332	

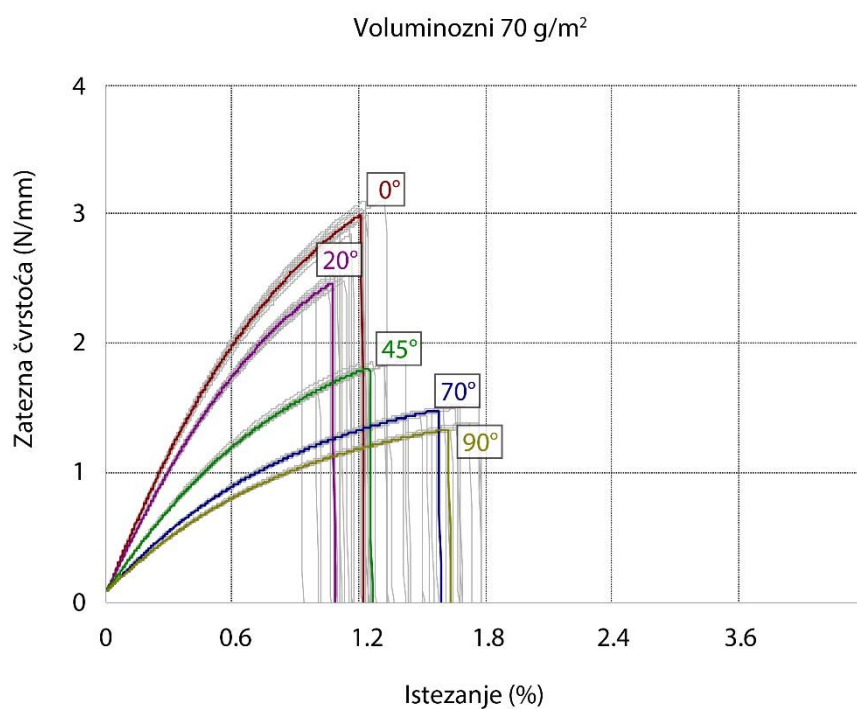
Kod voluminoznih, kao i kod prethodne dve vrste papira, primetno je opadanje vrednosti zatezne čvrstoće sa povećanjem ugla između vlakana papira i pravca testiranja. Svi papiri imaju veću vrednost zatezne čvrstoće pod uglom od 0° u odnosu na osu testiranja.

Procenat izduženja se povećava sa povećanjem ugla vlakana. Kod papira gramature 60 g/mm<sup>2</sup> ova promena je linearna, dok je kod ostale dve gramature najveća vrednost izduženja prilikom testiranja pod uglom od 70°.

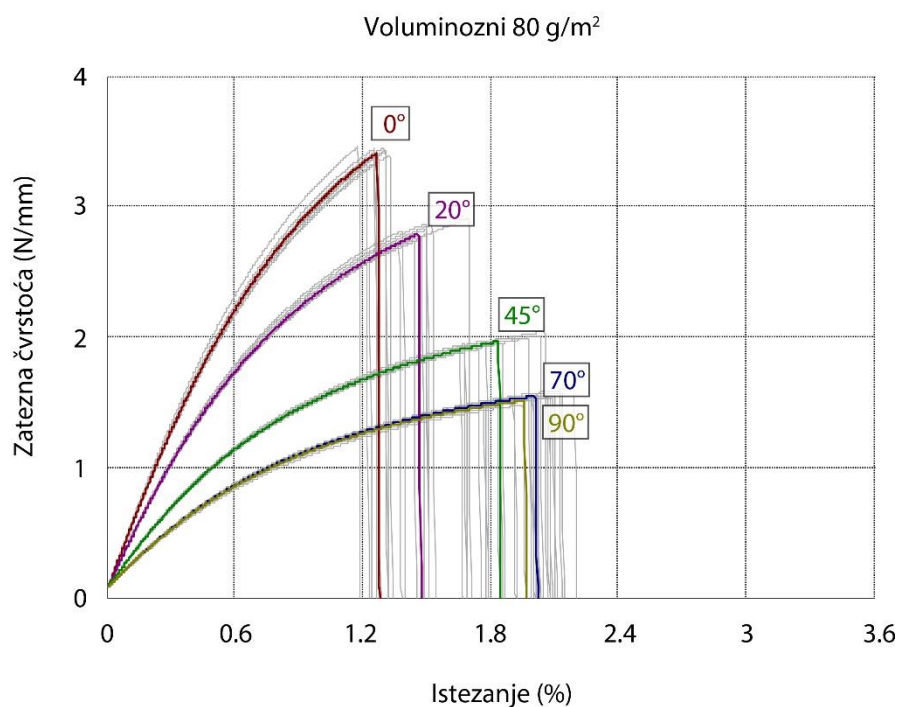
Na graficima 8.10-8.12 prikazane su krive napon-izduženje za voluminozne papire.



Grafik 8.10: Krive napon-izduženje sa različitim smerom vlakana kod voluminoznog papira gramature 60 g/m<sup>2</sup>



Grafik 8.11: Krive napon-izduženje sa različitim smerom vlakana kod voluminoznog papira gramature 70 g/m<sup>2</sup>



Grafik 8.12: Krive napon-izduženje sa različitim smerom vlakana kod voluminoznog papira gramature 80 g/m<sup>2</sup>

Kod voluminoznih papira se javlja sličan trend kao i kod prethodne dve vrste papira. Vrednosti zatezne čvrstoće rastu kako raste i gramatura. U slučaju izduženja nije uočljiv ovakav rast. Papir gramature 70 g/mm<sup>2</sup> imao je najniže vrednosti izduženja prilikom testiranja pod uglom vlakana od 20°, 45° i 90° u odnosu na ostale testirane gramature.

## 8.2 Karakterizacija procesnih parametara FDM tehnike 3D štampe

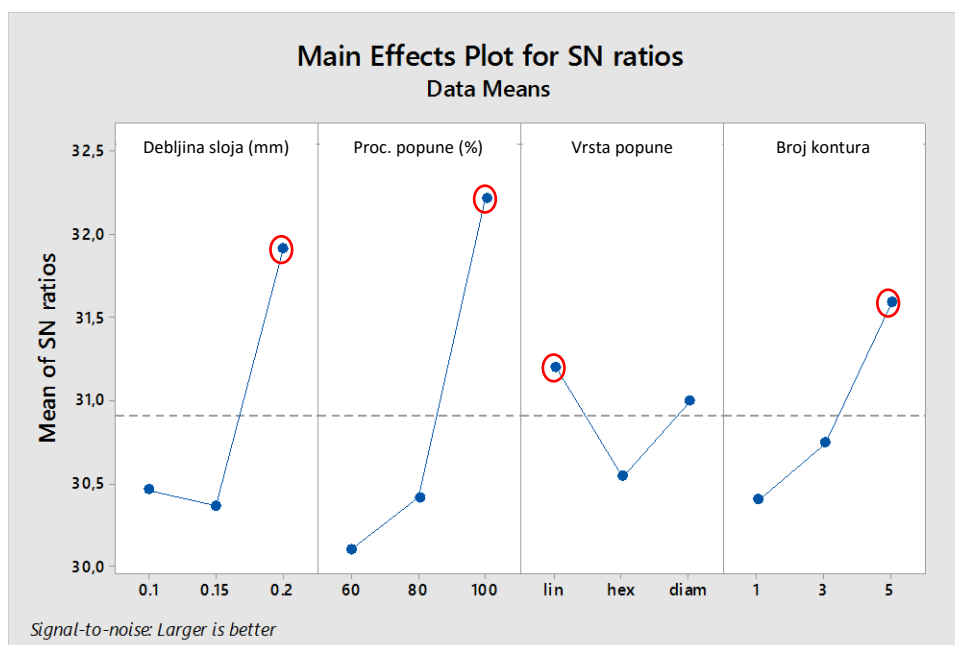
Kako bi se okarakterisali uticajni procesni parametri FDM tehnike štampe, potrebno je odabrati one za koje se pretpostavlja da imaju najveći uticaj na željene izlazne faktore. Odabir ulaznih parametara za potrebe ovog eksperimenta opisani su u Poglavlju 7.3. Izlazni faktori su u slučaju ovog eksperimenta: zatezna čvrstoća, površinska hrapavost, količina potrošenog materijala (masa) i vreme štampe. Ovi parametri su odabrani u skladu sa ciljem rada, odnosno istraživanjem mogućnosti zamene konvencionalnih tehnika izrade alata za utiskivanje tehnikama 3D štampe, gde mehaničke i fizičke osobine, količina potrošenog materijala i vreme štampe imaju značajnu ulogu.

### **BLOKI**

U prvom bloku eksperimenta posmatrane su ulazne promenjive debljina sloja, procenat unutrašnje popune, tip unutrašnje popune i broj kontura spoljašnjeg zida proizvedenih uzoraka i izlazne promenjive zatezna čvrstoća, površinska hrapavost, vreme štampe i masa uzorka. Na graficima 8.13-8.16 prikazan je uticaj ulaznih promenjivih (glavnih efekata) na posmatrane izlazne promenjive. S/N (Signal to Noise) odnos je mera osetljivosti izlaznih faktora (promenjivih) na nekontrolisane faktore u eksperimentu. Signal predstavlja nivo ulazne promenjive. Za ovaj eksperiment uzeta je pretpostavka da nekontrolisanih faktora (engl. *noise*) nije bilo, jer je istraživanje sprovedeno pod striktno kontrolisanim laboratorijskim uslovima. Na grafiku se očitavaju najveće vrednosti parametra S/N. Ovaj odnos se može posmatrati kroz vrednosti *Veće je bolje (Larger is better)*, *Manje je bolje (Smaller is better)* i *Nominalna vrednost je bolja (Nominal is better)*. Za izlazni parametar zatezne čvrstoće, podrazumeva se opcija *Veće je bolje*, a za ostala tri

parametara opcija *Manje je bolje*, jer su za te parametre poželjne što niže vrednosti. Na S/N grafikonima, očitavaju se uvek najveće vrednosti S/N odnosa.

Na grafiku 8.13 prikazan je uticaj debljine sloja, procenta unutrašnje popune, tipa unutrašnje popune i broja kontura spoljašnjeg zida uzorka na zateznu čvrstoću uzoraka. Najveće srednje vrednosti zatezne čvrstoće uzorci su pokazali u kombinaciji: debljina sloja 0,2 mm, 100% linijske unutrašnje popune sa 5 zidova konture spoljašnjeg zida.



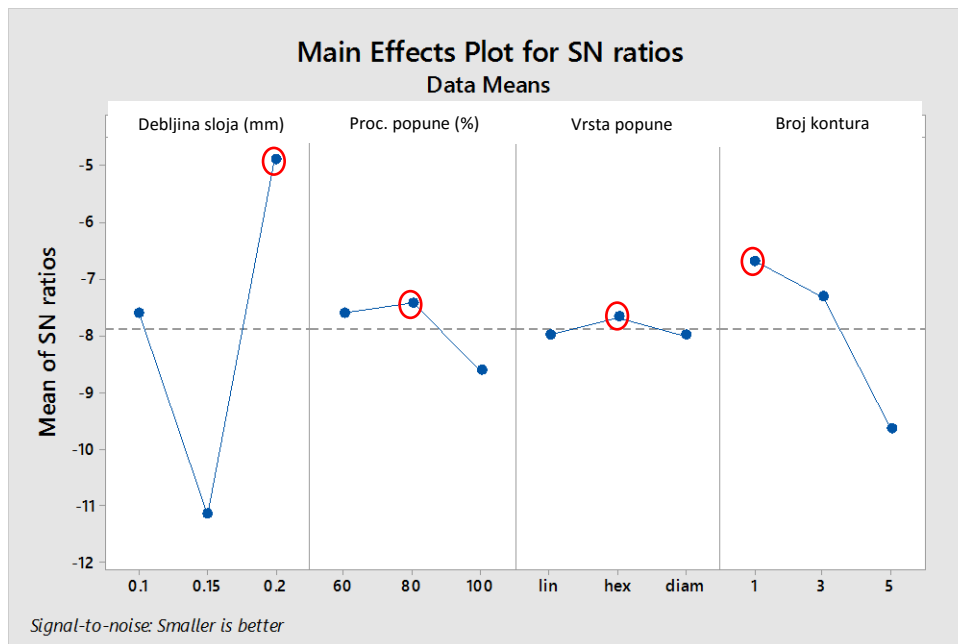
Grafik 8.13: Uticaj glavnih efekata S/N (Signal to Noise) odnosa na zateznu čvrstoću

U tabeli 8.4 prikazane su srednje vrednosti zatezne čvrstoće za svaki faktor i svaki njegov nivo, kao i izračunate delta vrednosti. Faktori sa najvećom razlikom srednjih vrednosti (delta vrednost) ocenjeni su kao najuticajniji za merenu izlaznu promenljivu. Procenat unutrašnje popune je detektovan kao najuticajniji faktor na vrednost zatezne čvrstoće.

Tabela 8.4: Rezultati analize uticaja testiranih faktora na srednje vrednosti zatezne čvrstoće sa dodeljenim vrednostima ranga za svaki faktor

Nivo	Debljina sloja	Procenat u. popune	Vrsta u. popune	Broj kontura
1	33,84	32,10	36,69	33,53
2	33,21	33,60	34,02	34,65
3	39,49	40,84	35,83	38,36
Delta	6,28	8,74	2,68	4,82
Rang	2	1	4	3

Na grafiku 8.14 prikazan je uticaj četiri ulazna parametara na površinsku hrapavost uzoraka. Beležene su vrednosti  $R_a$  parametra površinske hrapavosti.



Grafik 8.14: Uticaj glavnih efekata S/N (Signal to Noise) odnosa na površinsku hrapavost

Uočljivo je da najveći uticaj na površinsku hrapavost ima debljina sloja i broj kontura. Promena unutrašnje popune i vrsta unutrašnje popune u manjoj meri utiče na hrapavost. Najniže  $R_a$  vrednosti površinske hrapavosti pokazuju uzorci sa kombinacijom parametara debljine sloja od 0,2 mm, 80% heksagonalne unutrašnje popune i jednom konturom spoljašnjeg zida.

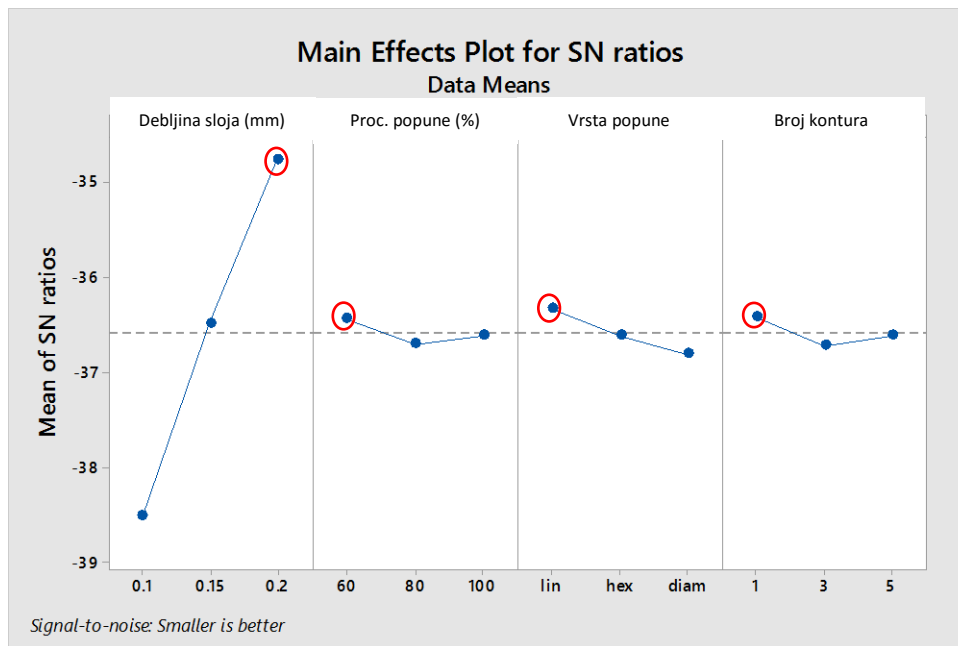
U tabeli 8.5 mogu se videti srednje vrednosti površinske hrapavosti za svaki faktor i svaki njegov nivo, kao i izračunate delta vrednosti. Faktori sa najvećom razlikom srednjih vrednosti (delta vrednost) ocenjeni su kao najuticajniji za merenu izlaznu promenjivu.

Tabela 8.5: Rezultati analize uticaja testiranih faktora na srednje vrednosti površinske hrapavosti sa dodeljenim vrednostima ranga za svaki faktor

Nivo	Debljina sloja	Procenat u. popune	Vrsta u. popune	Broj kontura
1	2,456	2,612	2,612	2,233
2	3,642	2,391	2,628	2,473
3	1,767	2,864	2,626	3,160
Delta	1,875	0,473	0,016	0,926
Rang	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>2</b>

Na grafiku 8.15 prikazani su dijagrami uticaja četiri ulazna parametara na vreme potrebno za proizvodnju jednog uzorka. Merena su dva vremena: predviđeno vreme štampe izračunato u MakerBot Desktop programu i konačno vreme mereno digitalnom štopericom. Predviđena vremena su kraća i odstupaju od izmerenih vremena maksimalno deset minuta. U analizi su korišćena vremena izmerena štopericom. Uticaj ulaznih parametara na vreme potrebno za proizvodnju uzoraka FDM tehnikom štampe značajno je zbog definisanja vrednosti koje dovode do optimalne brzine izrade i konačno zbog poređenja sa vremenom potrebnim za izradu konvencionalnog alata.





Grafik 8.15: Uticaj glavnih efekata S/N (Signal to Noise) odnosa na vreme

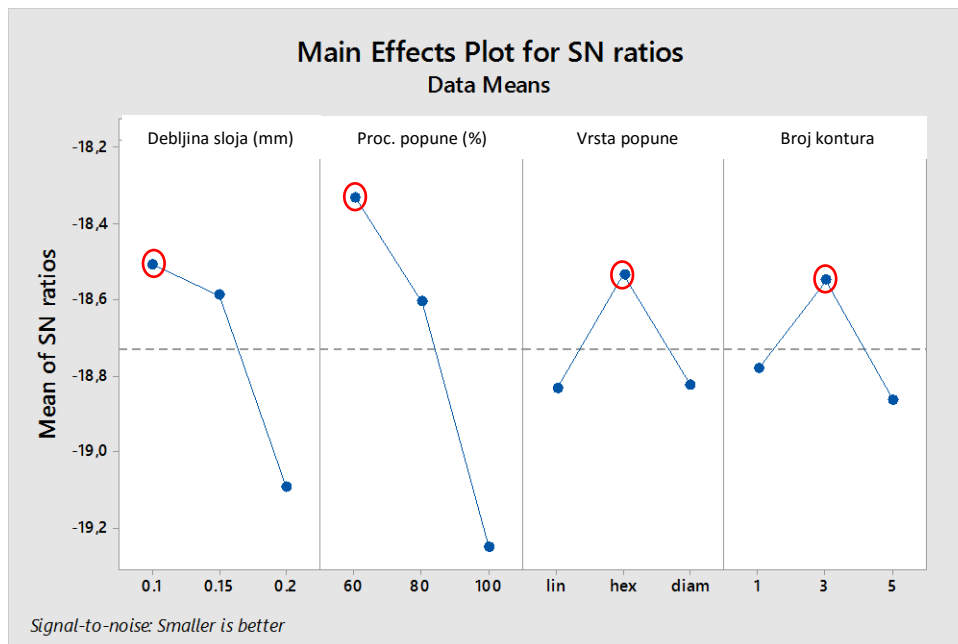
Uočljivo je da najveći uticaj na vreme štampe ima debljina sloja. Ostala tri faktora u znatno manjoj meri utiču na vreme štampe. Podešavanje vrednosti debljine sloja na 0,2 mm, procenat linijske popune na 60% sa jednom konturom spoljašnjeg zida, vode do najkraćeg vremena za štampu uzoraka.

U tabeli 8.6 prikazane su srednje vrednosti vremena potrebnog za štampu uzoraka izmerenih za svaki faktor i svaki njegov nivo, kao i izračunate delta vrednosti. Faktori sa najvećom razlikom srednjih vrednosti (delta vrednost) ocenjeni su kao najuticajniji za merenu izlaznu promenjivu.

Tabela 8.6: Rezultati analize uticaja testiranih faktora na srednje vrednosti vremena štampe sa dodeljenim vrednostima ranga za svaki faktor

Nivo	Debljina sloja	Procenat u. popune	Vrsta u. popune	Broj kontura
1	84,33	67,00	66,33	67,00
2	66,67	69,67	69,00	69,67
3	54,67	69,00	70,33	69,00
Delta	29,67	2,67	4,00	2,67
Rang	<b>1</b>	3,5	2	3,5

Na grafiku 8.16 prikazani su dijagrami uticaja četiri ulazna parametara na masu štampanog uzoraka odnosno na količinu materijala neophodnog za njegovu štampu. Ovde su takođe beležene dve vrednosti. Jedna vrednost je predviđena od strane MakerBot Desktop softvera, dok je druga izmerena nakon štampe uz pomoć tehničke vage Radwag PS 2100/C2 čije su karakteristike date u Tabeli 7.8 (Poglavlje 7.3). Posmatranjem uticaja ulaznih faktora na ovu izlaznu promenjivu moguće je definisati vrednosti nivoa neophodnih za izradu uzorka najmanje mase. Masa krajnjeg uzorka utiče na njegovu cenu, što je značajno iz ugla poređenja sa cenom konvencionalnog alata.



Grafik 8.16: Uticaj glavnih efekata S/N (Signal to Noise) odnosa na masu

Uočljivo je da najveći uticaj na masu uzorka štampanog FDM tehnikom 3D štampe ima procenat unutrašnje popune, a zatim debljina sloja. Vrsta popune i broj kontura spoljašnjeg zida u manjoj meri doprinose vrednosti izlazne mase uzorka. Najnižu vrednost mase imaju uzorci sa 60% heksagonalne popune, visinom sloja od 0,1 mm i tri konture spoljašnjeg zida.

U tabeli 8.7 prikazane su srednje vrednosti izmerene mase potrebne za štampu uzorka za svaki faktor i svaki njegov nivo, kao i izračunate delta vrednosti. Faktori sa najvećom razlikom srednjih vrednosti (delta vrednost) ocenjeni su kao najuticajniji za merenu izlaznu promenjivu.

Tabela 8.7: Rezultati analize uticaja testiranih faktora na srednje vrednosti mase pojedinačnog uzorka sa dodeljenim vrednostima ranga za svaki faktor

Nivo	Debljina sloja	Procenat u. popune	Vrsta u. popune	Broj kontura
1	8,440	8,257	8,757	8,707
2	8,510	8,533	8,473	8,473
3	9,020	9,180	8,740	8,790
Delta	0,580	0,923	0,283	0,317
Rang	2	1	4	3

U tabeli 8.8 prikazane su kombinacije nivoa prva četiri testirana faktora, dobijene analizom Tagučijeve metode, koje dovode do optimalnih rezultata svake izlazne promenjive pojedinačno.

Tabela 8.8: Optimalne kombinacije nivoa za svaku izlaznu promenjivu posebno dobijene analizom Tagučijevog L9 nacrtu

Izlazne promenjive	Debljina sloja (mm)	Procenat unutrašnje popune (%)	Vrsta unutrašnje popune	Broj konturnih zidova
Zatezna čvrstoća	0,2	100	Linijska	5
Površinska hrapavost	0,2	80	heksagonalna	1
Vreme štampe	0,2	60	linijska	1
Masa	0,1	60	heksagonalna	3

U tabeli 8.9 je prikazan redosled važnosti faktora za određenu izlaznu promenjivu (1 – najuticajnije, 4 – najmanje uticajan).

Tabela 8.9: Važnost uticaja ulaznih faktora na svaku od izlaznih promenjivih

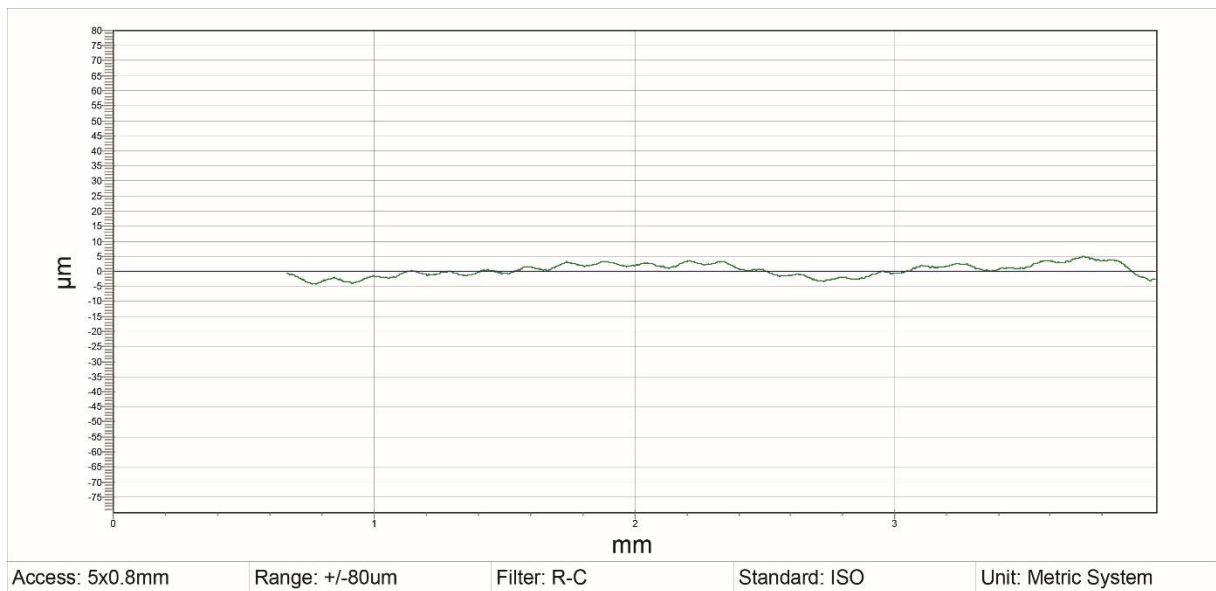
Izlazne promenjive	Debljina sloja (mm)	Procenat unutrašnje popune (%)	Vrsta unutrašnje popune	Broj konturnih zidova
Zatezna čvrstoća	2.	1.	4.	3.
Površinska hrapavost	1.	3.	4.	2.
Vreme štampe	1.	3.	2.	3.
Masa	2.	1.	4.	3.

Ukoliko se primeni neparametrička metoda frakcionalnog rangiranja rezultata (Rodgers, 2013) izlaznih promenjivih, može se izdvojiti kombinacija nivoa parametara koja daje optimalne vrednosti. U tabeli 8.10 prikazane su srednje vrednosti merenja zatezne čvrstoće, hrapavosti, vremena i mase kao i izračunat rang dobijen frakcionalnim rangiranjem rezultata testova. U ovom proračunu uzete su i vrednosti hrapavosti u poprečnom smeru za razliku od Tagučijevim metode, gde je uzeta u obzir samo uzdužna površinska hrapavost. Prikazane su  $R_a$  vrednosti površinske hrapavosti, a ostali parametri prikazani su u poglavlju Prilozi (Prilog P2).

Tabela 8.10: Rezultati frakcionalnog rangiranja kombinacija nivoa faktora definisanih L9 Tagučijevim ortogonalnim nizom

Test #	Debljina sloja (mm)	Procenat unutrašnje popune (%)	Vrsta unutrašnje popune	Broj konturnih zidova	Vreme (min)	Rank Vreme	Zatezna čvrstoća (MPa)	Rank Zatezna čvrstoća	Hrapavost (uzdužna) ( $\mu\text{m}$ )	Rank Hrapavost (uzdužna)	Hrapavost (poprečna) ( $\mu\text{m}$ )	Rank Hrapavost (poprečna)	Masa	Rank Masa	Ukupni rank
7	0,2	60	diam	3	56	3,0	35,5334	5,0	1,6123	1,0	4,2815	2,5	8,52	4,5	16,0
9	0,2	100	hex	1	54	1,5	41,3427	3,0	1,6261	2,0	4,3061	2,5	9,41	9,0	18,0
8	0,2	80	lin	5	54	1,5	41,6044	2,0	2,0635	4,0	5,4111	5,0	9,13	7,0	19,5
2	0,1	80	hex	3	87	8,5	29,5684	9,0	2,0822	5,0	4,0381	1,0	7,95	1,0	24,5
1	0,1	60	lin	1	79	7,0	29,6180	8,0	2,0472	3,0	6,2044	6,0	8,19	3,0	27,0
4	0,15	60	hex	5	66	4,5	31,1373	6,0	4,1754	9,0	7,3008	7,0	8,06	2,0	28,5
3	0,1	100	diam	5	87	8,5	42,3240	1,0	3,2398	7,0	5,0744	4,0	9,18	8,0	28,5
6	0,15	100	lin	3	66	4,5	38,8546	4,0	3,7247	8,0	7,8055	8,5	8,95	6,0	31,0
5	0,15	80	diam	1	68	6,0	29,6397	7,0	3,0259	6,0	7,8195	8,5	8,52	4,5	32,0

Analizom vrednosti ukupnog ranga iz tabele 8.10, primećuje se da uzorci testa sa rednim brojem 7 imaju najniži rang (najvišu ocenu). Na grafiku 8.17 prikazan je profil dobijen merenjem površinske hrapavosti u softverskom paketu Time Surf.

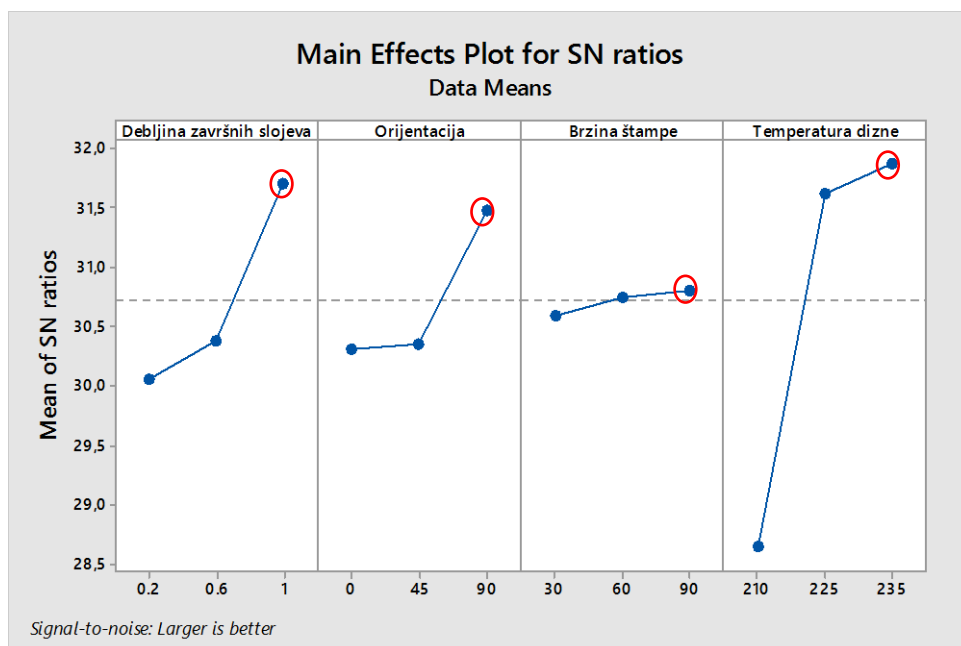


Grafik 8.17: Primer površinske hrapavosti uzorka za Test #7 (0,2mm; 60%; diam; 3)

## BLOK II

Fiksiranjem prve četiri ulazne promenjive, testirane u prethodnom bloku, na procenjenu optimalnu vrednost svakog nivoa, pripremljen je još jedan blok eksperimenta sa četiri ulazna faktora: debljina završnih i početnih slojeva, temperatura dizne u glavi štampača, orijentacija objekta na platformi za štampu i brzina kretanja glave za štampu. Na sledećim graficima očitavaju se uvek najveće vrednosti S/N odnosa.

Na graficima 8.18-8.21 su prikazani uticaji druga četiri ulazna parametara na zateznu čvrstoću, površinsku hrapavost, vreme štampe i masu uzorka. Na grafiku 8.18 prikazan je uticaj debljine završnih slojeva, orijentacije uzoraka na platformi za štampu, brzine kretanja glave za štampu i temperature dizne u glavi za štampanje na zateznu čvrstoću uzoraka. Najveće srednje vrednosti zatezne čvrstoće imaju uzorci sa debljinom završnih slojeva od 1 mm (5 slojeva po 0,2 mm), orijentacijom 90°, brzinom štampe 90 mm/min i temperaturom dizne od 235 °C.



Grafik 8.18: Uticaj glavnih efekata S/N (Signal to Noise) odnosa na zateznu čvrstoću

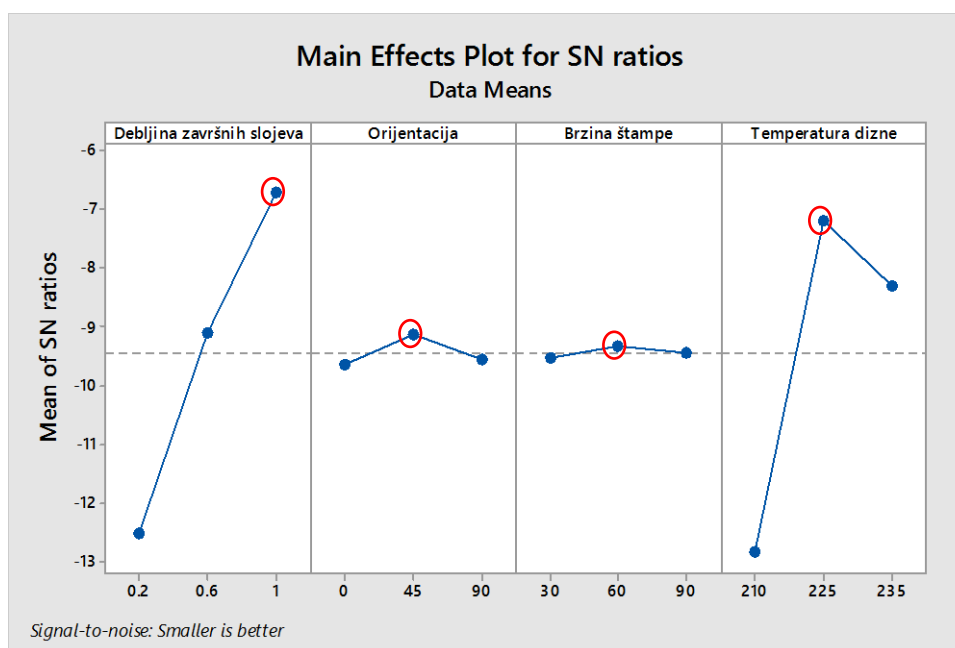
Vidi se da temperatura dizne i debljina završnih slojeva imaju najveći uticaj na zateznu čvrstoću (ugao nagiba krive je veći), dok parametar orijentacije i brzine kretanja glave za štampu imaju manji uticaj (ugao nagiba krive je manji).

U tabeli 8.11 mogu se videti srednje vrednosti zatezne čvrstoće za svaki faktor i svaki njegov nivo, kao i delta vrednosti za svaki faktor. Faktori sa najvećom razlikom srednjih vrednosti (delta vrednost) ocenjeni su kao najuticajniji za merenu izlaznu promenjivu.

Tabela 8.11: Rezultati analize uticaja testiranih faktora na srednje vrednosti zatezne čvrstoće pojedinačnog uzorka sa dodeljenim vrednostima ranga za svaki faktor

Nivo	Debljina završnih slojeva	Orijentacija uzorka	Brzina kretanja glave za štampu	Temperatura dizne
1	32,58	33,65	34,89	27,39
2	33,65	33,64	34,51	38,22
3	38,67	37,61	35,49	39,29
Delta	6,09	3,97	0,98	11,89
Rang	2	3	4	1

Na grafiku 8.19 prikazan je uticaj četiri ulazna parametara na površinsku hrapavost štampanog uzorka. Obeležene su vrednosti nivoa ulaznih faktora koji proizvode uzorak najmanje površinske hrapavosti.



Grafik 8.19: Uticaj glavnih efekata S/N (Signal to Noise) odnosa na površinsku hrapavost

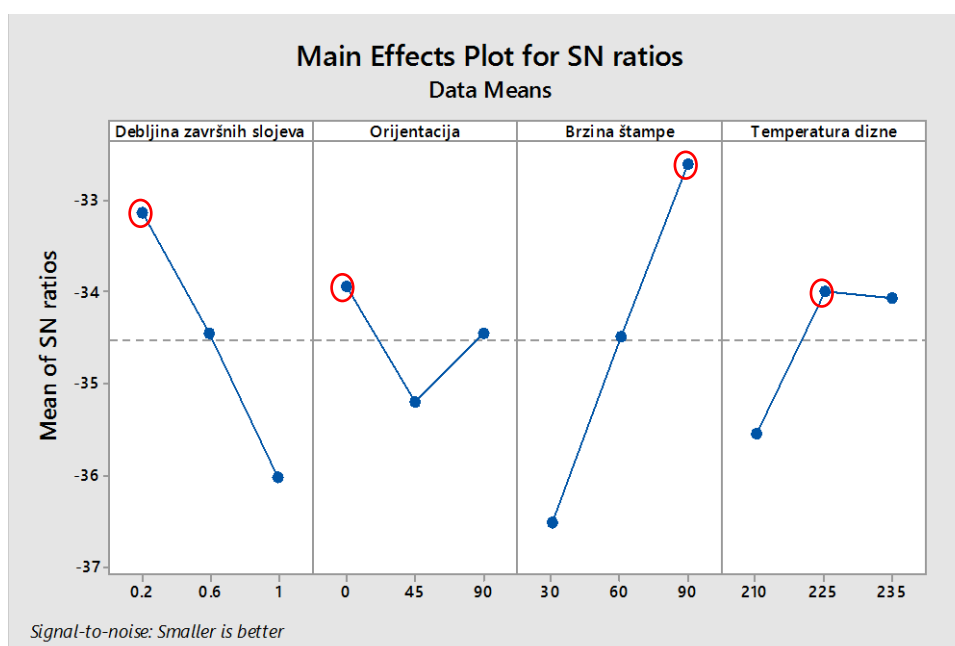
Jasno se uočava da temperatura dizne i debljina završnih slojeva imaju najveći uticaj na površinsku hrapavost (ugao nagiba krive je veći), dok parametar orijentacije i brzine štampe imaju manji uticaj (ugao nagiba krive je manji). Najmanje srednje vrednosti površinske hrapavosti uzorci imaju pri debljini završnih slojeva od 1 mm (5 slojeva po 0,2 mm), orijentaciji 45°, brzini štampe 60 mm/min i temperaturi dizne od 225 °C.

U tabeli 8.12 prikazane su srednje vrednosti površinske hrapavosti za svaki faktor i svaki njegov nivo, kao i razlike srednjih (delta) vrednosti za svaki faktor. Faktori sa najvećom razlikom srednjih vrednosti ocenjeni su kao najuticajniji za merenu izlaznu promenjivu.

Tabela 8.12: Rezultati analize uticaja testiranih faktora na srednje vrednosti površinske hrapavosti pojedinačnog uzorka sa dodeljenim vrednostima ranga za svaki faktor

Nivo	Debljina završnih slojeva	Orijentacija uzorka	Brzina kretanja glave za štampu	Temperatura dizne
1	4,437	3,563	3,517	4,575
2	2,952	3,010	2,948	2,356
3	2,258	3,074	3,182	2,716
Delta	2,178	0,554	0,569	2,219
Rang	2	4	3	<u>1</u>

Na grafiku 8.20 prikazani su dijagrami uticaja četiri ulazna parametara na izmereno vreme štampe uzorka. Obeležene su vrednosti nivoa koji za zadati ulazni faktor daju najkraće vreme štampe.



Grafik 8.20: Uticaj glavnih efekata S/N (Signal to Noise) odnosa na vreme

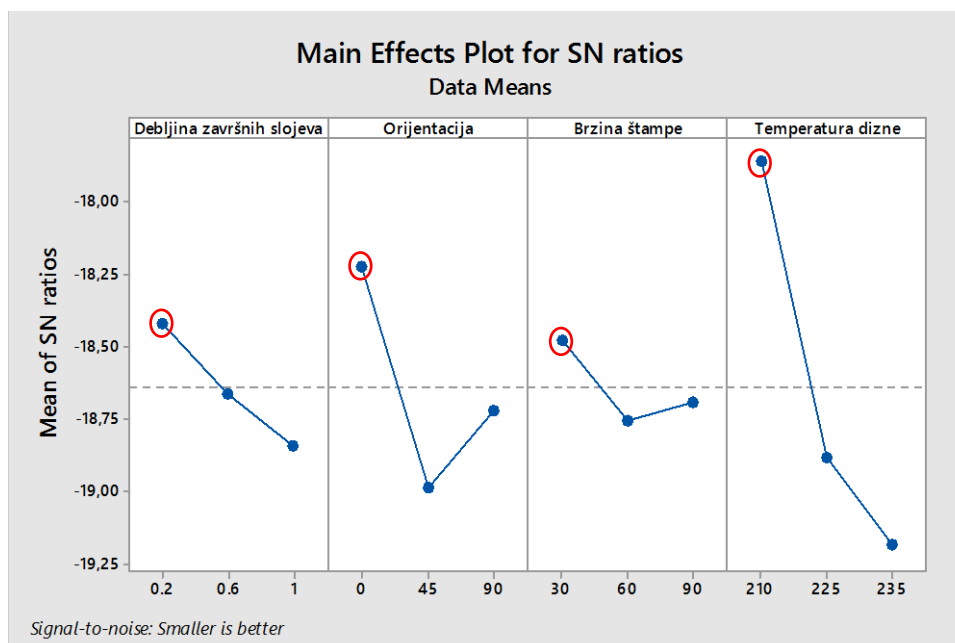
Na osnovu grafika 8.20 primećuje se da brzina kretanja glave za štampu i debljina završnih slojeva najviše utiču na vreme štampe, dok temperatura dizne i orijentacija uzorka imaju manji uticaj na ovu izlaznu promenjivu. Najmanje vrednosti vremena štampe pokazuju uzorci štampani sa debljinom završnih slojeva od 0,2 mm (1 sloj od 0,2 mm), orijentacijom 0°, brzinom štampe 90 mm/min i temperaturom dizne od 225 °C.

U tabeli 8.13 prikazane su srednje vrednosti vremena štampe uzorka za svaki faktor i svaki njegov nivo, kao i razlike srednjih (delta) vrednosti za svaki faktor. Faktori sa najvećom razlikom srednjih vrednosti ocenjeni su kao najuticajniji za merenu izlaznu promenjivu.

Tabela 8.13: Rezultati analize uticaja testiranih faktora na srednje vrednosti vremena štampe pojedinačnog uzorka sa dodeljenim vrednostima ranga za svaki faktor

Nivo	Debljina završnih slojeva	Orijentacija uzorka	Brzina kretanja glave za štampu	Temperatura dizne
1	46,49	50,17	67,63	60,32
2	53,11	59,42	54,02	50,63
3	65,26	55,27	43,21	53,91
Delta	18,76	9,24	24,43	9,69
Rang	2	4	<u>1</u>	3

Na grafiku 8.21 prikazani su dijagrami uticaja četiri ulazna parametara na izmerenu masu štampanog uzorka. Beležena je predviđena masa uzorka od strane softvera MakerBot Desktop, kao i masa nakon štampe. Obeležene su vrednosti nivoa koji za zadati ulazni faktor daju najmanju masu uzorka, odnosno najmanju potrebnu količinu materijala za štampu.



Grafik 8.21: Uticaj glavnih efekata S/N (Signal to Noise) odnosa na masu

Sa grafika 8.21 uočava se da parametri temperature dizne i orijentacije uzorka na platformi za štampu imaju najveći uticaj na promene u vrednosti izmerene mase, a zatim debljina završnih slojeva i brzina kretanja glave za štampu. Najmanje srednje vrednosti izmerene mase imaju uzorci štampani sa debljinom završnih slojeva od 0,2 mm (1 sloj od 0,2 mm), orijentacijom 0°, brzinom štampe 30 mm/min i temperaturom dizne od 210 °C.

U tabeli 8.14 mogu se videti srednje vrednosti mase uzorka za svaki faktor i svaki njegov nivo, kao i razlike srednjih (delta) vrednosti za svaki faktor. Faktori sa najvećom razlikom srednjih vrednosti ocenjeni su kao najuticajniji za merenu izlaznu promenjivu.

Tabela 8.14: Rezultati analize uticaja testiranih faktora na srednje vrednosti mase pojedinačnog uzorka sa dodeljenim vrednostima ranga za svaki faktor

Nivo	Debljina završnih slojeva	Orijehtacija uzorka	Brzina kretanja glave za štampu	Temperatura dizne
1	8,384	8,185	8,455	7,832
2	8,580	8,913	8,673	8,793
3	8,770	8,636	8,606	9,109
Delta	0,386	0,728	0,218	1,276
Rang	3	2	4	<u>1</u>

U tabeli 8.15 prikazane su kombinacije nivoa druga četiri testirana faktora, nakon analize Tagučić metode, koje dovode do optimalnih rezultata svake izlazne promenjive pojedinačno.



Tabela 8.15: Optimalne kombinacije nivoa za svaku izlaznu promenjivu posebno dobijene analizom Tagučijevog L9 nacrta

Izlazne promenjive	Debljina završnih slojeva (mm)	Orijentacija (°)	Brzina kretanja glave za štampu (mm/min)	Temperatura dizne (°C)
Zatezna čvrstoća	1	90	90	235
Površinska hrapavost - uz	1	45	60	225
Vreme štampe	0,2	0	90	225
Masa	0,2	0	30	210

U tabeli 8.16 je prikazan redosled važnosti faktora za određenu izlaznu promenjivu (1 – najuticajniji, 4 – najmanje uticajan).

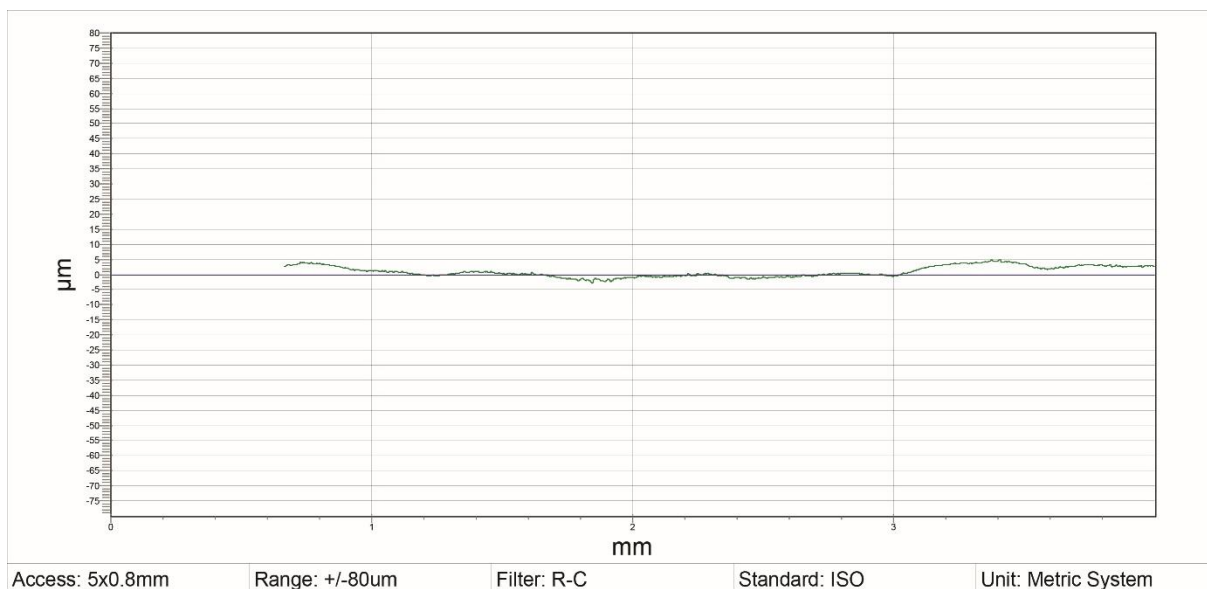
Tabela 8.16: Važnost uticaja ulaznih faktora na svaku od izlaznih promenjivih

Izlazne promenjive	Debljina završnih slojeva (mm)	Orijentacija (°)	Brzina kretanja glave za štampu (mm/min)	Temperatura dizne (°C)
Zatezna čvrstoća	2.	3.	4.	1.
Površinska hrapavost - uz	1.	3.	4.	2.
Vreme štampe	2.	4.	1.	3.
Masa	3.	2.	4.	1.

Ukoliko se primeni sistem frakcionalnog rangiranja rezultata korišćenog i u prethodnom bloku eksperimenta može se izdvojiti kombinacija nivoa ulaznih parametara koja dovodi do optimalnih vrednosti izlaznih parametara. Kao i u prethodnom bloku i ovde se proračun izvodi na isti način. U tabeli 8.17 prikazane su testirane kombinacije nivoa ulaznih parametara, srednje vrednosti merenja zatezne čvrstoće, hrapavosti, vremena i mase kao i izračunat rang dobijen frakcionalnim rangiranjem rezultata testova. U ovom proračunu uzete su i vrednosti hrapavosti u poprečnom smeru, za razliku od Tagučij metode gde je uzeta u obzir samo uzdužna površinska hrapavost. Na grafiku 8.22 prikazan je profil dobijen merenjem površinske hrapavosti uzorka za test #7.

Tabela 8.17: Rezultati frakcionalnog rangiranja kombinacije nivoa faktora definisanih L9 Tagučij ortogonalnim nizom

Test #	Debljina završnih slojeva (mm)	Orijentacija (°)	Brzina kretanja glave za štampu (mm/s)	Temp. dizne (°C)	Vreme (min)	Rank Vreme	Zatezna čvrstoća (MPa)	Rank Zatezna čvrstoća	Hrapavost (uzdužna) (µm)	Rank Hrapavost (uzdužna)	Hrapavost (poprečna) (µm)	Rank Hrapavost (poprečna)	Masa	Rank Masa	Ukupni rank
7	1	0	90	225	44	2,0	41,13	2,0	1,7128	1,0	7,01	5,0	8,62	4,0	14,0
6	0,6	90	30	225	62	7,0	39,47	4,0	2,2519	4,0	5,03	1,0	8,73	5,0	21,0
4	0,6	0	60	235	46	3,5	36,19	5,0	2,5320	5,0	5,67	3,0	8,81	6,0	22,5
8	1	45	30	235	81	9,0	41,59	1,0	1,8538	2,0	5,26	2,0	9,51	9,0	23,0
3	0,2	90	90	235	34	1,0	40,07	3,0	3,7617	8,0	8,16	7,0	9,00	7,0	26,0
1	0,2	0	30	210	60	6,0	23,61	9,0	1,8850	3,0	11,00	9,0	7,12	1,0	28,0
2	0,2	45	60	225	46	3,5	34,06	6,0	3,1030	6,0	7,91	6,0	9,03	8,0	29,5
9	1	90	60	210	70	8,0	33,28	7,0	3,2083	7,0	7,00	4,0	8,18	3,0	29,0
5	0,6	45	90	210	51	5,0	25,28	8,0	4,0723	9,0	10,04	8,0	8,20	2,0	32,0



Grafik 8.22: Primer površinske hrapavosti uzorka za Test #7 (1mm, 0°; 90 mm/s; 225 °C)

Nakon izvedena oba bloka ovog eksperimenta, utvrđene su vrednosti nivoa osam odabranih ulaznih parametara za optimalne vrednosti izlaznih promenjivih. U tabeli 8.18 prikazane su sve odabrane vrednosti nivoa ulaznih parametara.

Tabela 8.18: Rezultati frakcionalnog rangiranja kombinacija nivoa faktora drugog bloka definisanih L9 Tagučijevim ortogonalnim nizom

Ulazni parametri	Vrednost nivoa
Debljina sloja (mm)	0,2
Procenat unutrašnje popune (%)	80
Vrsta unutrašnje popune	Linijska
Broj konturnih zidova	3
Debljina završnih slojeva (mm)	0.6 mm (3 završna sloja)
Orijentacija (°)	0
Brzina kretanja glave za štampu (mm/min)	60
Temperatura dizne (°C)	225

U toku izrade alata za utiskivanje, ostavljena je mogućnost izmene nekih od ulaznih parametara, ukoliko ta izmena bude opravdana poboljšanim kvalitetom rezultata utiskivanja.

### 8.3 Ponovljivost mehaničkih osobina uzoraka izrađenih FDM tehnikom štampe

Zbog anizotropne strukture uzoraka izrađenih FDM tehnikom 3D štampe (Ahn i saradnika, 2002), neophodno je utvrditi ponovljivost mehaničkih osobina uzoraka izrađenih ovom tehnikom 3D štampe. Štampani su uzorci od dva najčešće korišćena materijala – PLA i ABS kako bi se testirala njihova zatezna i pritiska čvrstoća.

#### 8.3.1 Merenje zatezne čvrstoće

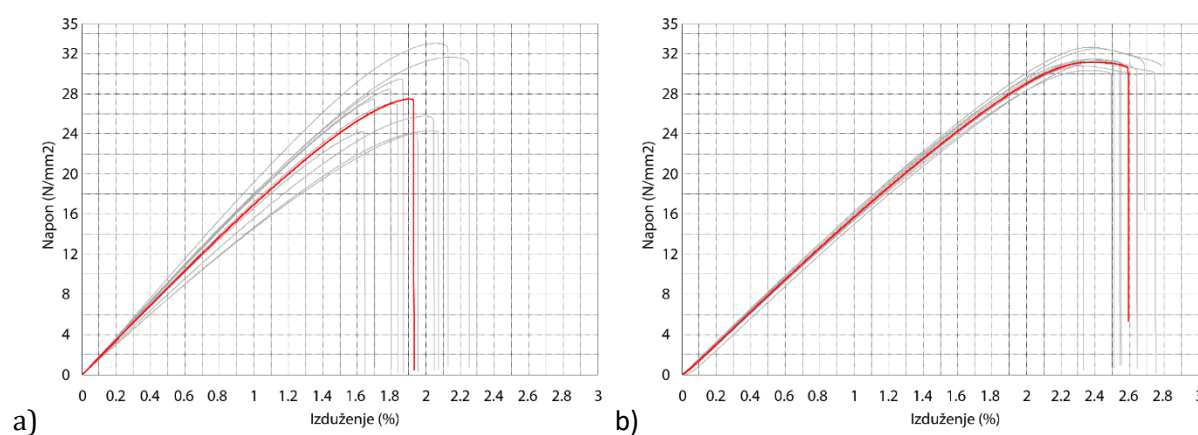
U tabeli 8.19 prikazane su vrednosti zatezne čvrstoće za deset testiranih uzoraka od PLA i ABS materijala izrađenih FDM tehnikom 3D štampe na MakerBot Replicator 5th Generation i MakerBot Replicator 2x štampačima opisanim u Poglavlju 7.4.

Tabela 8.19: Mehaničke osobine uzoraka od PLA i ABS materijala štampanih FDM tehnikom 3D štampe

Materijal	Zatezna čvrstoća	Izduženje	Modul elastičnosti		Materijal	Zatezna čvrstoća	Izduženje	Modul elastičnosti
Jedinica	MPa	%	MPa		Jedinica	MPa	%	MPa
PLA 1	24,23	1,64	1759,75		ABS 1	30,18	2,74	1676,11
PLA 2	28,46	1,79	1851,75		ABS 2	30,98	2,56	1577,67
PLA 3	25,46	2,04	1653,70		ABS 3	30,80	2,32	1610,16
PLA 4	23,96	1,95	1581,79		ABS 4	31,05	2,49	1582,86
PLA 5	24,20	2,07	1592,02		ABS 5	30,08	2,48	1585,88
PLA 6	32,69	2,12	1990,56		ABS 6	31,01	2,53	1614,67
PLA 7	31,15	2,25	1873,81		ABS 7	31,66	2,63	1649,94
PLA 8	29,43	1,86	1848,55		ABS 8	31,25	2,74	1632,24
PLA 9	27,44	1,70	1713,18		ABS 9	31,20	2,54	1556,23
PLA 10	26,93	1,83	1751,94		ABS 10	29,92	2,63	1590,54
<b>Sre. Vre.</b>	<b>27,3932</b>	<b>1,92557</b>	<b>1761,71</b>		<b>Sre. Vre.</b>	<b>30,8125</b>	<b>2,56552</b>	<b>1607,63</b>
<b>Std. Dev.</b>	<b>3,04335</b>	<b>0,19514</b>	<b>131,603</b>		<b>Std. Dev.</b>	<b>0,56734</b>	<b>0,12622</b>	<b>36,6053</b>

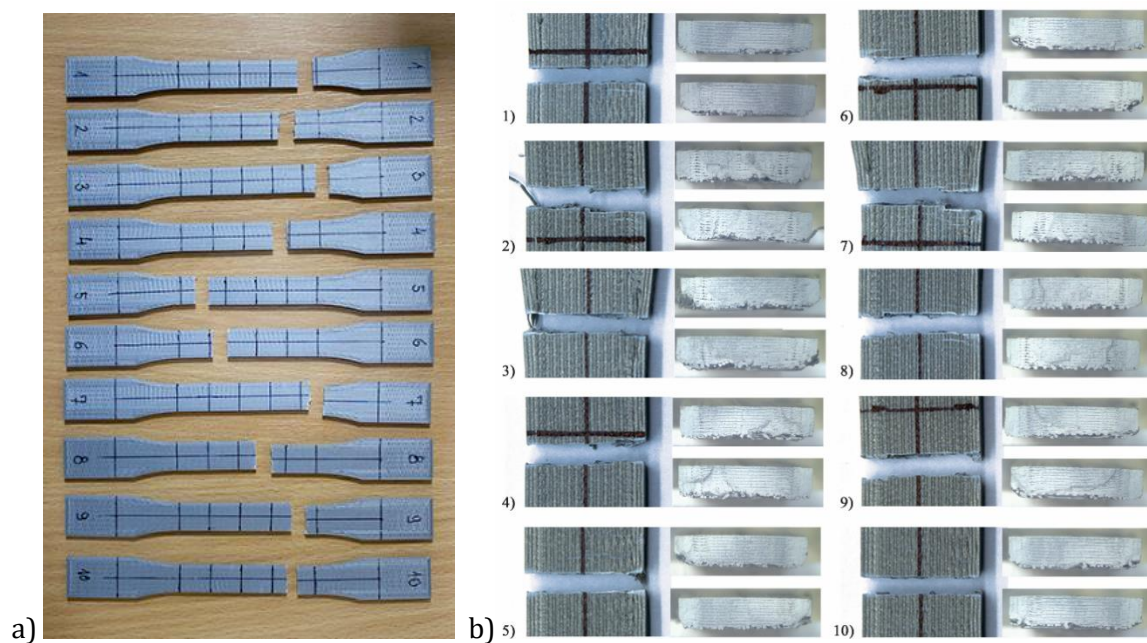
Iz tabele 8.19 se vidi da uzorci izrađeni od PLA materijala ispoljavaju veća odstupanja izmerenih vrednosti. Vrednosti zatezne čvrstoće variraju za 8,991 MPa, odnosno za 28,65% od izračunate srednje vrednosti, a vrednosti izduženja variraju za 0,61%, odnosno za 31,68% od srednje vrednosti. Modul elastičnosti varira za 408,77 MPa ili 23,2% od srednje vrednosti. Srednja vrednost zatezne čvrstoće je 27,39 MPa (sa standardnom devijacijom SD = 3,04 MPa; i koeficijentom varijanse CV = 11,09%). Srednja vrednost izduženja prilikom loma je 1,93% (SD = 0,19514%; CV = 10,11%), a modula elastičnosti 1,761 GPa (SD = 0,132 GPa; CV = 7,49%).

Uzorci izrađeni od ABS materijala pokazuju manja odstupanja izmerenih vrednosti u poređenju sa PLA uzorcima. Vrednosti zatezne čvrstoće variraju za 2,31 MPa, odnosno za 7,35% od izračunate srednje vrednosti, a vrednosti izduženja variraju za 0,42%, odnosno za 16% od srednje vrednosti. Modul elastičnosti varira za 119,88 MPa ili 7,46% od srednje vrednosti. Srednja vrednost zatezne čvrstoće je 30,81 MPa (SD = 0,56734 MPa; CV = 1,84%). Srednja vrednost izduženja prilikom loma je 2,57 % (SD = 0,12622%; CV = 4,91%), a modula elastičnosti 1,607 GPa (SD = 0,037 GPa; CV = 2,3%). Krive napon-izduženje za sve uzorke prikazane su na graficima 8.21a i 8.21b. Crvenom linijom obeležena je kriva srednje vrednosti testiranih uzoraka.



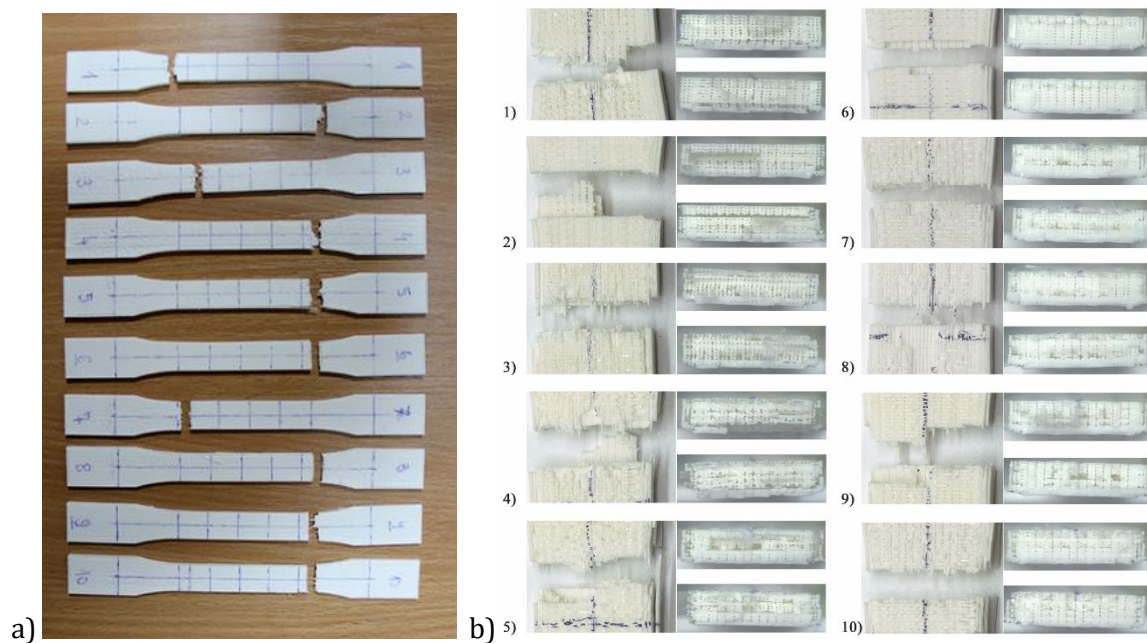
Grafik 8.23: a) Kriva napon-izduženje uzoraka od PLA materijala i b) kriva napon-izduženje uzoraka od ABS materijala

Na slikama 8.1 i 8.2 prikazan je uvećan izgled zona loma na svih deset PLA i ABS. Sa slike 8.1 primećuje se da ABS uzorci imaju gušću strukturu spojenih filamenata u zonama loma, manje šupljine između deponovanih niti, a vidljivost mreže deponovanih filamenata u poređenju sa PLA uzorcima je manja.



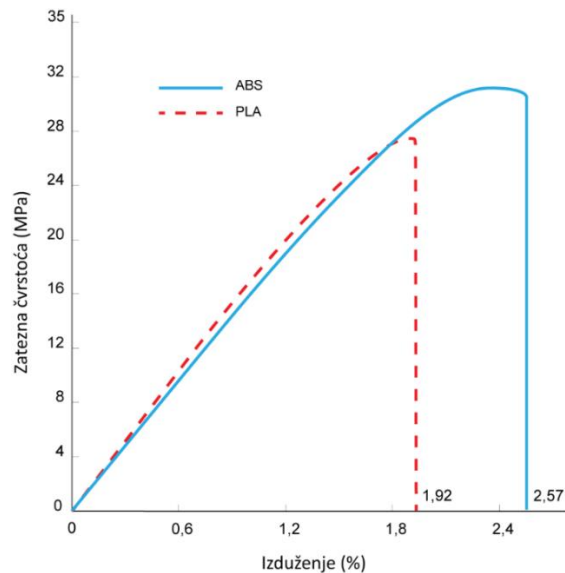
Slika 8.1: a) Uzorci od ABS materijala štampanih FDM tehnikom nakon testiranja zatezne čvrstoće  
b) Prikaz mesta loma i njegov poprečni presek

Uzorci od PLA materijala (Slika 8.2) su pokazali pojačanu krtost, pa su na mestu loma vidljive pojedinačne niti filameta koje izlaze izvan strukture uzorka, kao i razdvajanje pojedinačnih slojeva. Kod PLA uzoraka u poprečnom preseku mesta loma vidljiva je mnogo ređa isprepletana struktura filamenata, pa su i šupljine između deponovanih filamenata veće. Filamenti nisu međusobno čvrsto povezani kao u slučaju ABS uzoraka.



Slika 8.2: a) Uzorci od PLA materijala štampanih FDM tehnikom nakon testiranja zatezne čvrstoće  
b) Prikaz mesta loma i njegov poprečni presek

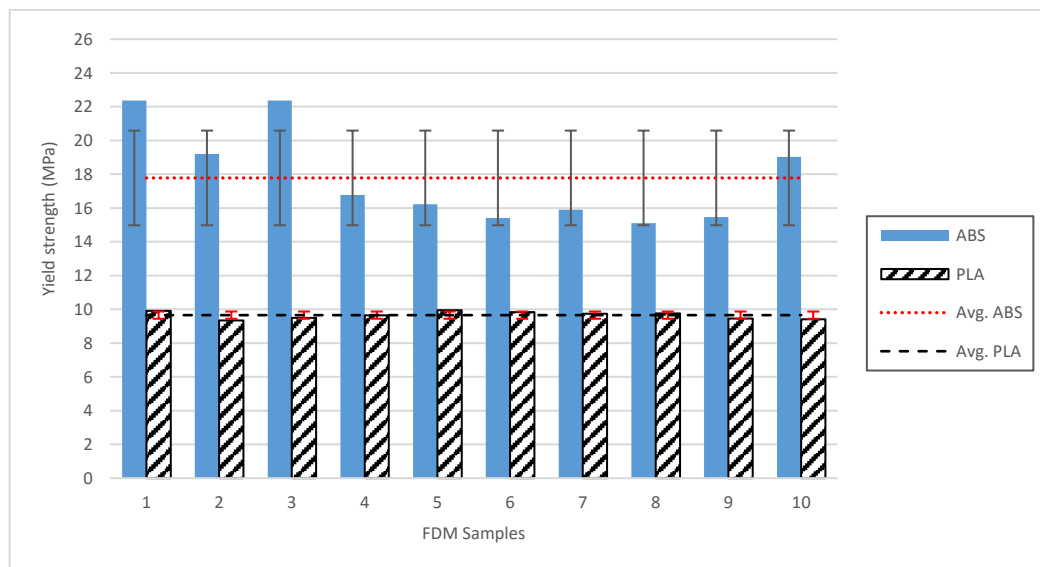
Na grafiku 8.24 vidi se paralelan prikaz kriva napon-izduženje za oba testirana materijala. Uzorci izrađeni od ABS materijala pokazuju veće vrednosti zatezne čvrstoće, kao i izduženja. U toku testiranja, ABS uzorci su pokazali veću duktilnost, dok su PLA uzorci bili krtiji, što se vidi iz srednjih vrednosti izduženja.



Grafik 8.24: Srednje vrednosti zatezne čvrstoće ABS i PLA uzoraka na krivoj napon-izduženje

### 8.3.2 Merenje pritiskne čvrstoće

Pritisna čvrstoća predstavlja bitnu karakteristiku uzoraka izrađenih FDM tehnikom štampe. Otpornost na pritiskne sile koje nastaju prilikom procesa utiskivanja utiču na postojanost strukture alata, pa je neophodno odrediti opseg sila koje alati izrađeni ovom tehnikom mogu izdržati. Srednja vrednosti pritiskne čvrstoće u tački prelaza iz elastične u plastičnu deformaciju za ABS materijal iznosi 17,781 MPa, a za PLA materijal 9,655 MPa. Na testu pritiskne čvrstoće PLA uzorci pokazuju veću konzistentnost, sa vrednostima standardne devijacije  $SD = 0,215$  MPa i koeficijentom varijanse  $CV = 2,23\%$  u poređenju sa ABS uzorcima ( $SD = 2,803$  MPa;  $CV = 15,76\%$ ). Uzorci od ABS materijala imaju veća odstupanja od srednjih vrednosti što se može videti na grafiku 8.25.



Grafik 8.25: Sila prelaza iz elastične u plastičnu oblast sa standardnim devijacijama, dobijene nakon testa za određivanje pritiskne čvrstoće za ABS i PLA termoplastične materijale

U tabeli 8.20 i 8.21 prikazane su dimenzije uzoraka za sabijanje i vrednosti pritiskne čvrstoće u momentu prelaza materijala iz elastične u plastičnu oblast.



Tabela 8.20: Mehaničke osobine uzoraka od ABS materijala nakon testa za određivanje pritiskne čvrstoće

Uzorak	Dužina	Širina	Visina	Poprečni presek	Sila tečenja	Napon tečenja
Jedinica	mm	mm	mm	mm <sup>2</sup>	N	MPa
ABS 1	12,60	12,65	25,10	159,39	3564,00	22,36
ABS 2	12,55	12,65	25,20	158,76	3049,20	19,21
ABS 3	12,60	12,65	25,25	159,39	3564,00	22,36
ABS 4	12,70	12,55	25,30	159,39	2673,00	16,77
ABS 5	12,65	12,55	25,30	158,76	2574,00	16,21
ABS 6	12,65	12,70	25,25	160,66	2475,00	15,41
ABS 7	12,55	12,65	25,30	158,76	2524,50	15,90
ABS 8	12,75	12,60	25,15	160,65	2425,50	15,10
ABS 9	12,70	12,60	25,10	160,02	2475,00	15,47
ABS 10	12,75	12,65	25,20	161,29	3069,00	19,03
<b>Sre.Vre.</b>	<b>12,650</b>	<b>12,625</b>	<b>25,215</b>	<b>159,705</b>	<b>2839,320</b>	<b>17,781</b>
<b>Std.Dev.</b>	<b>0,075</b>	<b>0,049</b>	<b>0,078</b>	<b>0,906</b>	<b>444,847</b>	<b>2,803</b>

Tabela 8.21: Mehaničke osobine uzoraka od PLA materijala nakon testa za određivanje pritiskne čvrstoće

Uzorak	Dužina	Širina	Visina	Poprečni presek	Sila tečenja	Napon tečenja
Jedinica	mm	mm	mm	mm <sup>2</sup>	N	MPa
PLA 1	12,68	12,77	25,40	161,92	1603,80	9,90
PLA 2	12,78	12,77	25,40	163,20	1524,60	9,34
PLA 3	12,70	12,80	25,40	162,56	1544,40	9,50
PLA 4	12,82	12,80	25,40	164,10	1584,00	9,65
PLA 5	12,73	12,82	25,38	163,20	1623,60	9,95
PLA 6	12,89	12,82	25,38	165,25	1623,60	9,83
PLA 7	12,66	12,85	25,36	162,68	1584,00	9,74
PLA 8	12,74	12,89	25,39	164,22	1603,80	9,77
PLA 9	12,88	12,67	25,40	163,19	1544,40	9,46
PLA 10	12,71	12,83	25,40	163,07	1534,50	9,41
<b>Sre.Vre.</b>	<b>12,759</b>	<b>12,802</b>	<b>25,391</b>	<b>163,339</b>	<b>1577,070</b>	<b>9,655</b>
<b>Std.Dev.</b>	<b>0,081</b>	<b>0,059</b>	<b>0,014</b>	<b>0,953</b>	<b>37,350</b>	<b>0,215</b>

Uzorci izrađeni od ABS materijala pokazuju bolju konzistentnost mehaničkih osobina na testu zatezne čvrstoće. Vrednosti zatezne čvrstoće PLA uzoraka variraju, ukazujući na veću nekonzistentnost mehaničkih osobina. Međutim, na testu pritiskne čvrstoće, PLA uzorci pokazuju veću konzistentnost mehaničkih osobina u poređenju sa ABS uzorcima. U oba testa ABS uzorci su pokazali veću duktilnost od PLA uzoraka.

S obzirom da kod procesa utiskivanja na alate deluju sile pritiska, veoma je značajno da se alat posle delovanja sile pritiska trajno ne deformiše, odnosno da ima izraženije elastične osobine. S obzirom na to da je PLA materijal u testu pritiskne čvrstoće pokazao i veću konzistentnost i veću elastičnost, odabran je kao pogodan materijal za izradu alata za utiskivanje.

#### 8.4 Termo-mehaničke osobine uzoraka izrađenih FDM tehnikom štampe

Kako bi se odredile mehaničke osobine uzoraka pri različitim temperaturama ambijenta, konstruisana je aparatura opisana u Poglavlju 7.5. Odabran je test zatezne i pritiskne čvrstoće na različitim temperaturama za ABS i za PLA uzorke. Testirano je po tri uzorka na svakoj temperaturi. Mehaničke osobine ABS uzoraka testirane su na sedam različitih temperatura, dok su kod PLA uzoraka ove osobine testirane na pet temperatura. Ovo je bio slučaj jer ABS materijal ima višu tačku stakljenja od PLA materijala, pa je potrebno obuhvatiti širi opseg temperatura.

### 8.4.1 Zatezna čvrstoća pri različitim temperaturama

Vrednosti zatezne čvrstoće pri različitim temperaturama za PLA i ABS uzorke štampane FDM tehnikom štampe prikazani su u tabeli 8.22.

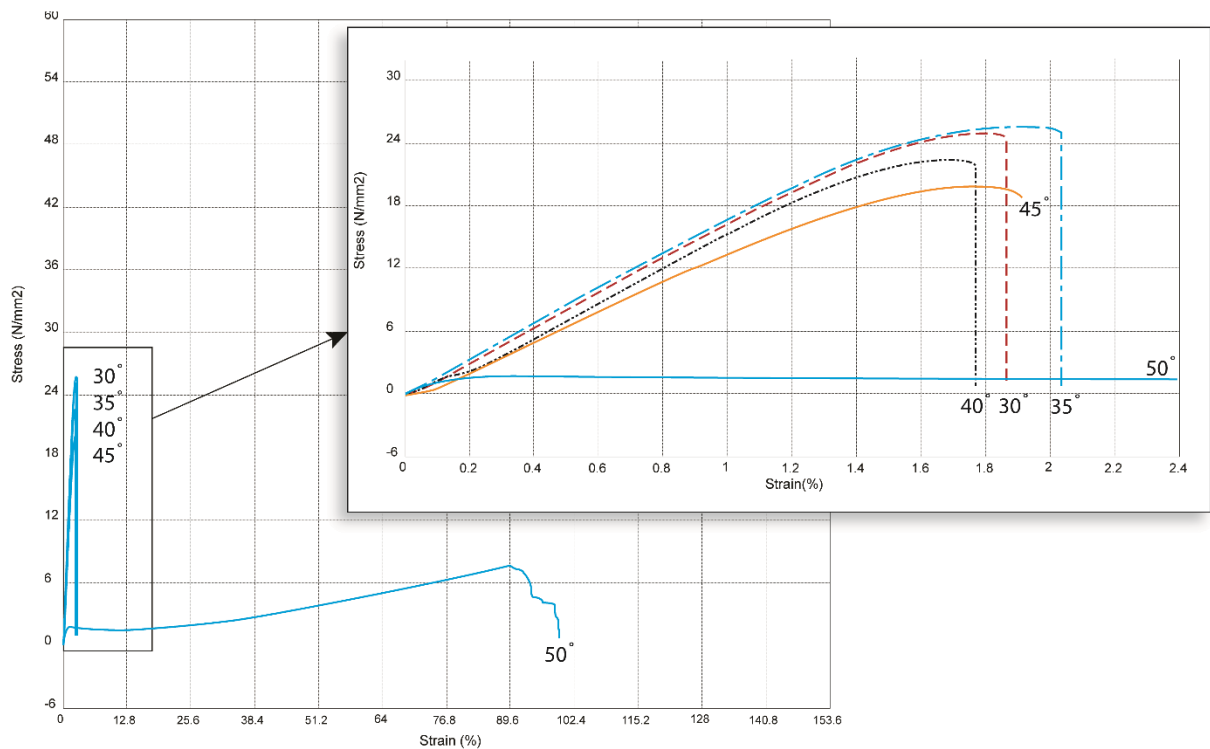
Tabela 8.22: Rezultati testiranja zatezne čvrstoće štampanih uzoraka od PLA i ABS materijala pri različitim vrednostima temperature

Temperatura		Maksimalna sila		Maks. napon		Sila pri lomu		Napon pri lomu		Maks. izduženje		Izduženje pri lomu		Modul elastičnosti	
		N		N/mm <sup>2</sup>		N		N/mm <sup>2</sup>		%		%		N/mm <sup>2</sup>	
°C		PLA	ABS	PLA	ABS	PLA	ABS	PLA	ABS	PLA	ABS	PLA	ABS	PLA	ABS
30	Avg.	1071,09	1183,65	24,95	29,00	1059,38	1172,23	24,67	28,72	1,79	2,25	1,86	2,36	1371,04	1142,45
	StDev	115,78	13,55	2,95	0,61	113,46	24,33	2,89	0,78	0,11	0,06	0,15	0,08	47,12	150,20
35	Avg.	1118,71	-	25,82	-	1089,56	-	25,15	-	1,84	-	2,02	-	1580,39	-
	StDev	36,93	-	0,73	-	28,32	-	0,56	-	0,07	-	0,19	-	151,45	-
40	Avg.	978,89	1102,85	22,65	26,62	950,10	1080,16	21,98	26,08	1,64	2,21	1,76	2,40	1558,14	1217,28
	StDev	248,97	36,84	5,75	0,34	264,48	8,37	6,10	0,71	0,23	0,10	0,26	0,24	262,89	424,82
45	Avg.	846,48	-	19,91	-	834,81	-	19,64	-	1,76	-	1,85	-	1471,68	-
	StDev	148,33	-	3,22	-	144,30	-	3,14	-	0,11	-	0,13	-	150,46	-
50	Avg.	336,27	1006,10	7,77	24,62	145,67	970,51	3,37	23,74	90,44	2,15	97,03	2,44	668,27	1053,04
	StDev	46,80	14,59	1,10	0,94	121,19	9,73	2,81	0,37	9,37	0,11	8,80	0,37	159,03	462,41
60	Avg.	-	909,41	-	22,28	-	862,78	-	21,14	-	2,17	-	2,62	-	774,87
	StDev	-	15,99	-	0,42	-	20,89	-	0,53	-	0,04	-	0,04	-	289,33
70	Avg.	-	772,68	-	18,58	-	722,69	-	17,38	-	2,23	-	2,69	-	707,22
	StDev	-	45,23	-	0,91	-	46,51	-	0,94	-	0,04	-	0,14	-	302,03
80	Avg.	-	697,63	-	16,85	-	577,44	-	13,94	-	2,00	-	2,79	-	447,01
	StDev	-	4,86	-	0,27	-	78,83	-	1,83	-	0,12	-	0,49	-	182,44
90	Avg.	-	273,25	-	6,66	-	250,23	-	6,10	-	44,75	-	45,38	-	148,17
	StDev	-	2,65	-	0,06	-	20,33	-	0,50	-	0,52	-	0,51	-	32,79

Primećuje se da srednje vrednosti zatezne čvrstoće i izduženja drastično opadaju pri porastu temperature okoline (tabela 8.22 i grafik 8.24). Pri temperaturi uzorka of 30 °C i 35 °C zatezna čvrstoća ( $\sigma_m$ ) PLA uzorka iznosi 24,95 MPa i 25,82 MPa (standardna devijacija (SD) = 2,95 MPa, koeficijent varijanse (CV) = 11,82% pri 30 °C i (SD) = 0,73 MPa, (CV) = 2,82% pri 35 °C). Izduženje prilikom loma ( $\epsilon$ ) pri 30 °C i 35 °C iznosi 1,86% i 2,02% (SD = 0,15%, CV = 8,06% pri 30 °C i SD = 0,19%, CV = 9,41% pri 35 °C). Pri temperaturi uzorka od 40 °C i 45 °C primetan je pad zatezne čvrstoće sa 22,65 MPa na 19,91 MPa (SD = 5,75 MPa, CV = 25,39% i SD = 3,22 MPa, CV = 16,17%). Izduženje pre loma na 40 °C bilo je 1,76% (SD = 0,26%, CV = 14,77%), a pri 45 °C, 1,85% (SD = 0,13%, CV = 7,03%). Na temperaturi od 50 °C, PLA uzorci su značajno gube zateznu čvrstoću (Figure 5) i u velikoj meri pokazuju svoje plastične osobine ( $\sigma_m = 7,77$  MPa, SD = 1,1 MPa, CV = 14,16% i  $\epsilon = 90,44%$ , SD = 9,37%, CV = 10,36%). Modul elastičnosti raste sa 1,371.04 MPa (SD = 47,12 MPa, CV = 3,44%) pri 30 °C na 1.580,39 MPa (SD = 151,45 MPa, CV = 9,58%) pri 35 °C a zatim opada na 1.558,14 MPa (SD = 262,89 MPa, CV = 16,87%) pri 40 °C i 1.471,68 MPa (SD = 150,46 MPa, CV = 10,22%) pri 45 °C. Pri temperaturi od 50 °C modul elastičnosti PLA uzorka drastično opada na 668,27 MPa (SD = 159,03 MPa, CV = 23,8%).

Na grafiku 8.26 prikazana je kriva napon-izduženje za PLA uzorke na pet različitih temperatura. Sa slike se vidi da vrednost zatezne čvrstoće ovog materijala počinje da opada već na 35 °C, sa značajnim padom na 50 °C.

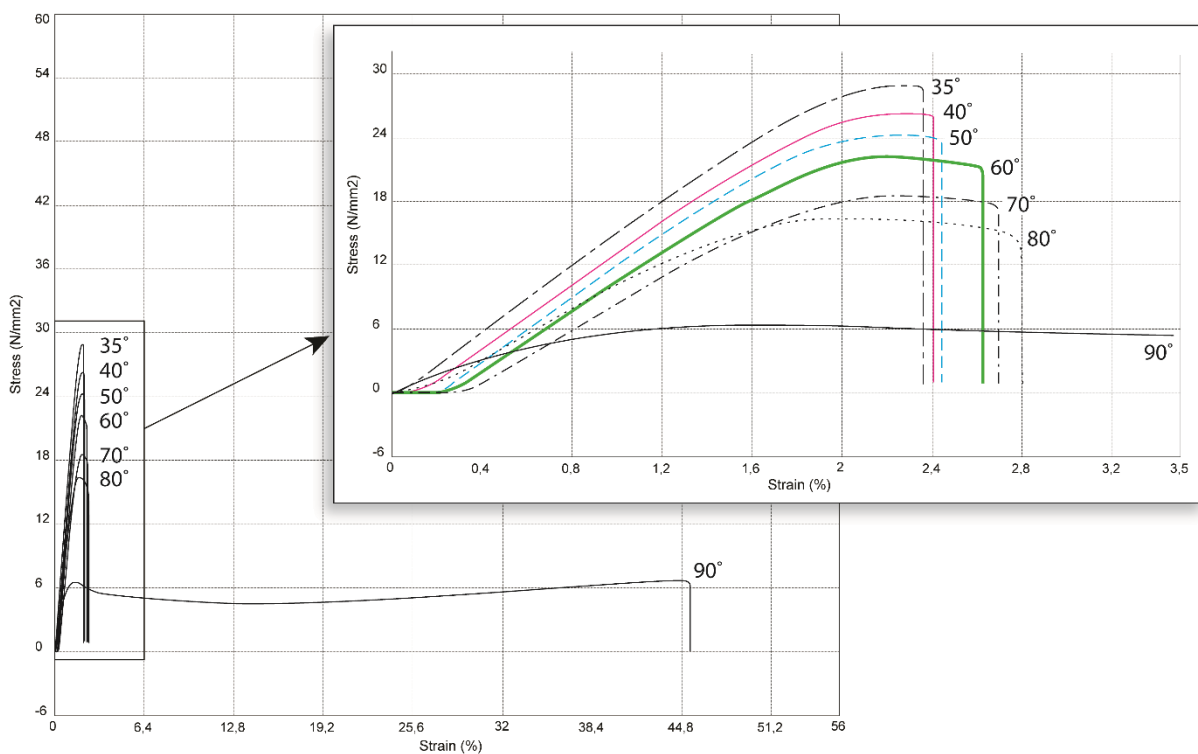




Grafik 8.26: Kriva napon-izduženje za uzorke od PLA materijala pri različitim temperaturama

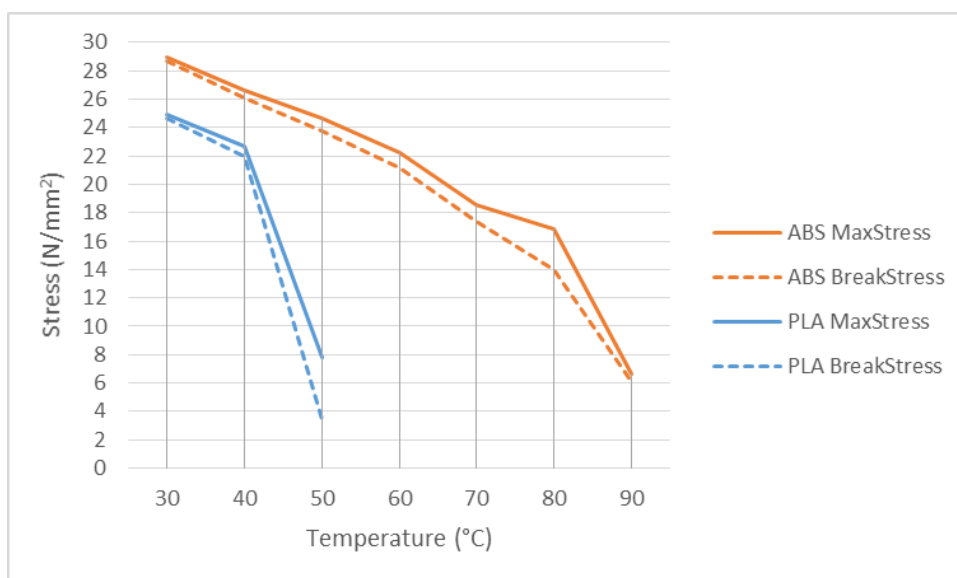
Uzorci štampani ABS materijalom u stanju su da izdrže veće sile zatezanja na povišenim temperaturama, kao što je i očekivano, ali takođe pokazuju i veće vrednosti izduženja. Prilikom testiranja ABS uzoraka korišćen je korak od 10 °C, u poređenju sa korakom od 5 °C kod PLA uzoraka, s obzirom da ABS materijal podnosi više temperature (Sun i saradnici, 2008; Weng i saradnici, 2016; Nikzad i saradnici, 2011; Hwang i saradnici, 2015). Na 30 °C zatezna čvrstoća ABS uzoraka je  $\sigma_m = 29$  MPa (SD = 0,61 MPa, CV = 2,1%), izduženje prilikom loma  $\varepsilon = 2,25\%$  (SD = 0,06%, CV = 2,67%), a modul elastičnosti  $E = 1,142.45$  MPa (SD = 150,2 MPa, CV = 13,15%). Srednja vrednost zatezne čvrstoće opada za 2,3 MPa između svih testiranih temperatura do 80 °C. Između 80 °C i 90 °C primetan je znatan pad zatezne čvrstoće od 16,85 MPa do 6,66 MPa. Izduženje pri lomu ima vrednosti između 2% i 2,25% za sve testirane temperature sem na temperaturi od 90 °C gde ova vrednost iznosi 45,38% (SD = 0,51%, CV = 1,12%), istežući uzorak za skoro pola njegove dužine. Modul elastičnosti je niži od PLA uzoraka do temperature od 50 °C gde su PLA uzorci znatno deformisani na 668,27 MPa. Na ovoj temperaturi ABS uzorci imaju vrednost modula elastičnosti od  $E = 1.053,04$  MPa (SD = 462,41 MPa, CV = 43,92%). Od ove temperature modul elastičnosti drastično opada do 774,87 MPa na 60 °C (SD = 289,33 MPa, CV = 37,34%) a zatim na 447,01 MPa (SD = 182,44 MPa, CV = 40,81%) pri temperaturi od 80 °C. Na temperaturi od 90 °C izmerena vrednost modula elastičnosti za ABS materijal je 148,17 MPa (SD = 32,79 MPa, CV = 22,13%).

Na grafiku 8.27 prikazane su krive napon-izduženje srednjih vrednosti za ABS uzorke na sedam testiranih temperatura. Primećuje se da vrednosti izduženja rastu, a vrednosti zatezne čvrstoće opadaju sve jačim intenzitetom do temperature od 50 °C, nakon čega su ove promene vrednosti intenzivnije do temperature od približno 90 °C posle koje ABS materijal znatno gubi na zateznoj čvrstoći i istezanju dovodeći do potpune deformacije uzoraka.



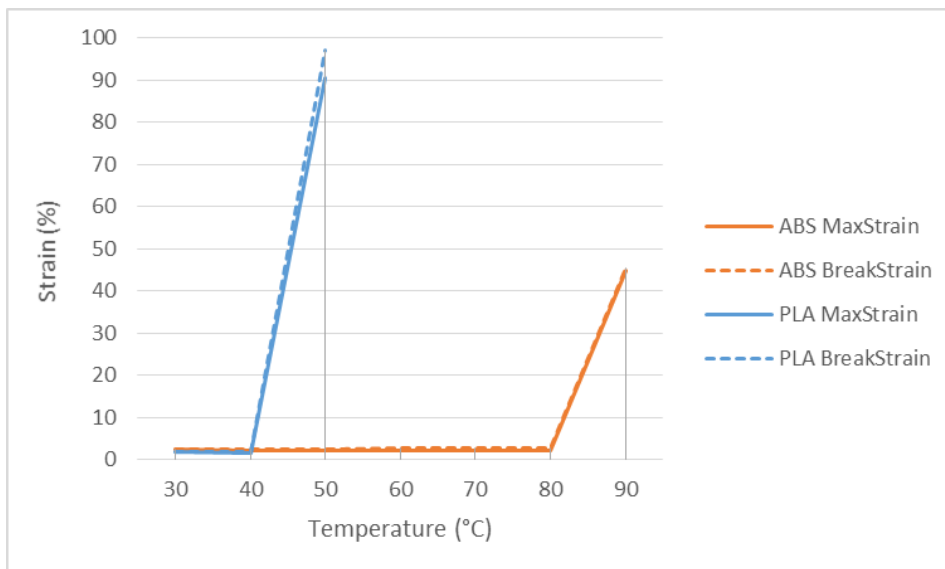
Grafik 8.27: Kriva napon-izduženje za uzorke od ABS materijala pri različitim temperaturama

Na grafiku 8.28, prikazane su srednje vrednosti sile napona uzoraka od PLA i ABS materijala na različitim temperaturama. Prikazan je maksimalan napon i napon prilikom loma kako bi se uporedila zatezna čvrstoća za oba materijala.



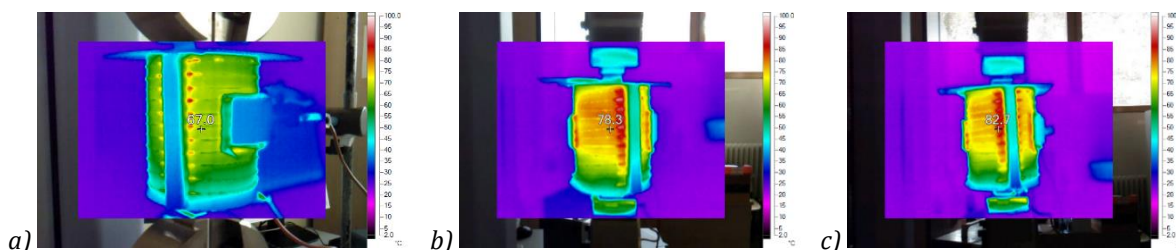
Grafik 8.28: Krive srednjih vrednosti zatezne čvrstoće uzoraka od PLA i ABS materijala

Na grafiku 8.29 uporedo su prikazane vrednosti izduženja PLA i ABS uzoraka na različitim temperaturama. Primećuje se da se manje promene izduženja uočavaju do 40 °C za PLA uzorke. Posle toga PLA materijal počinje da se deformiše povećanom brzinom. Za ABS uzorke ta granična temperatura je 80 °C.

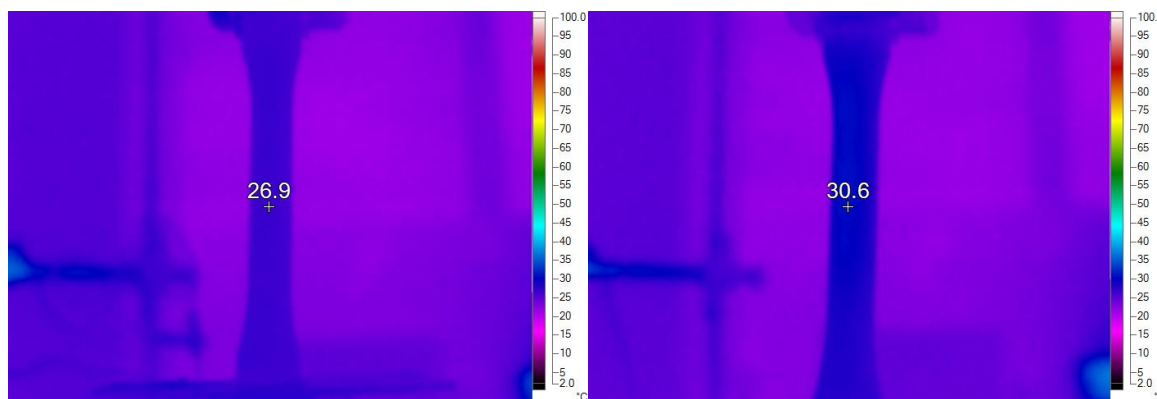


Grafik 8.29: Uticaj temperature okoline na izduženje uzoraka od PLA i ABS materijala štampanih FDM tehnikom štampe

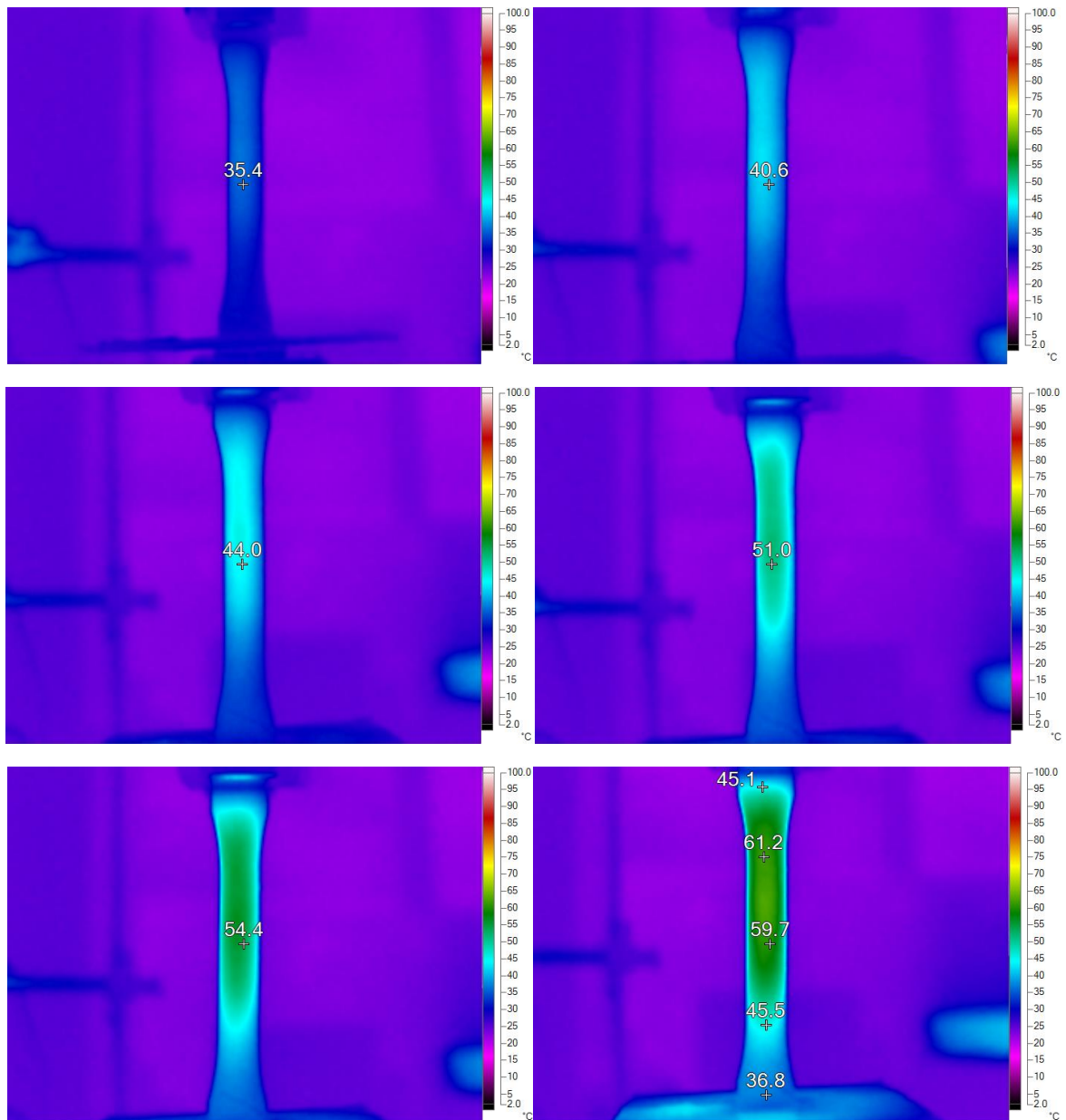
Uzorci za izvođenje testa zatezne čvrstoće su snimljeni termalnom kamerom Fluke TiS45 Thermal Imager čije su karakteristike prikazane u Poglavlju 7.5. Snimci uzoraka za testiranje zatezne čvrstoće su zabeleženi, kako bi se definisala mesta na uzorku koja akumuliraju najviše toplote i kako bi se proverilo vreme neophodno za zagrevanje uzorka do željene temperature. Na slici 8.3 prikazana je zagrejana aparatura prilikom testiranja, a na slici 8.4 prikazani su snimci uzorka nakon uklanjanja aparature za zagrevanje.



Slika 8.3: Snimci aparature za testiranje uticaja različitih temperatura na zateznu čvrstoću uzoraka snimljeni termalnom kamerom Fluke TiS45 pri temperaturi od a) 67 °C, b) 78,3 °C i c) 82,7 °C



Slika 8.4: Snimci zagrejanog PLA uzorka pričvršćenog na čeljusti uređaja za testiranje zatezne čvrstoće pri različitim temperaturama (°C) snimljeni termalnom kamerom Fluke TiS45



Slika 8.4 (nastavak): Snimci zagrejanog PLA uzorka pričvršćenog na čeljusti uređaja za testiranje zatezne čvrstoće pri različitim temperaturama (°C) snimljeni termalnom kamerom Fluke TiS45

#### 8.4.2 Pritisna čvrstoća pri različitim temperaturama

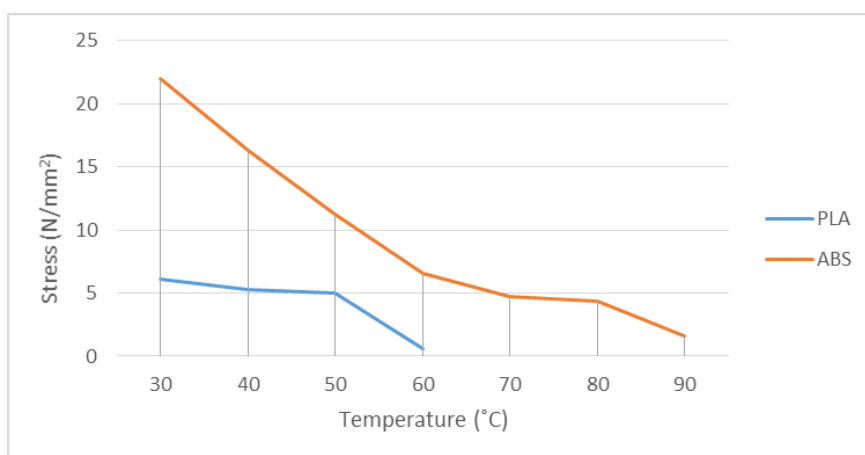
Rezultati ovog dela eksperimenta prikazani su u tabeli 8.23. Metodologija ovog eksperimenta opisana je u Poglavlju 7.5.

Iz Tabele 8.23 vidi se da PLA uzorci pokazuju znatnu degradaciju vrednosti pritisne čvrstoće u rasponu od 50 °C i 60 °C. U slučaju ABS materijala je primetno kontinualno opadanje pritisne čvrstoće sa povećanjem temperature. Između 70 °C i 80 °C vrednosti napona su bile slične.

Tabela 8.23: Rezultati testa pritiskne čvrstoće kod uzoraka od PLA i ABS materijala štampanih FDM tehnikom štampe pri promeni temperature okoline

Temperatura (°C)	Srednje vrednosti sila pritiska (N)		Srednje vrednosti pritisknog napona (N/mm <sup>2</sup> )	
	PLA	ABS	PLA	ABS
30	1004,85	3517,80	6,15	22,03
40	858,00	2600,40	5,25	16,28
50	811,80	1795,20	4,97	11,24
60	90,42	1056,00	0,55	6,61
70	/	762,30	/	4,77
80	/	702,90	/	4,40
90	/	252,78	/	1,58

Na grafiku 8.30 prikazana je promena vrednosti napona u zavisnosti od promene temperature za oba materijala. Iz ovog grafikona može se uočiti da ABS uzorci imaju veće vrednosti pritiskne čvrstoće na višim temperaturama, ali su dimenzionalno nestabilniji u odnosu na PLA uzorke. PLA materijal, zadržava svoj oblik i dimenzije na svim temperaturama, do naglog opadanja vrednosti pritiskne čvrstoće na temperaturama između 50 °C i 60 °C.



Grafik 8.30: Srednje vrednosti pritiskne čvrstoće pri različitim temperaturama za oba materijala

Prilikom testiranja zatezne čvrstoće pri različitim temperaturama, PLA uzorci pokazuju značajnu plastičnu deformaciju pri nižim silama već na 45 °C, a na 50 °C uzorak u potpunosti gubi svoju čvrstoću. Uzorci štampani ABS materijalom u stanju su da izdrže više temperature. Na 60 °C ABS materijal postaje duktilniji, a na 90 °C potpuno gubi svoju čvrstoću. Ovo istraživanje pokazuje da ABS materijal zadržava čvrstoću na višim temperaturama u poređenju sa PLA materijalom i da je u odnosu na njega duktilniji. PLA materijal se pokazao kao pogodan isključivo za izradu alata za utiskivanje bez folije. Za utiskivanje sa folijom su uobičajene temperature između 80 i 180 °C, pa za tu namenu PLA materijal nije pogodan, a ABS bi se morao testirati u eksploatacionim uslovima sa folijama koje se utiskuju na nižim temperaturama, kako bi se doneo konačan zaključak.

## 8.5 Istraživanje uticaja završne obrade uzoraka proizvedenih FDM tehnikom 3D štampe na površinsku hrapavost, zateznu čvrstoću i promenu dimenzija finih detalja za utiskivanje

Uticaj završne obrade uzoraka štampanih FDM tehnikom 3D štampe na njihove mehaničke osobine, izučavan je od strane naučne zajednice (Galantucci i saradnici, 2010; Percoco i saradnici, 2012). U ovim radovima istražen je hemijski uticaj dimetil ketona i vodenog rastvora na smanjenje površinske hrapavosti ABS uzoraka. Takođe je testirana i zatezna čvrstoća uzoraka.

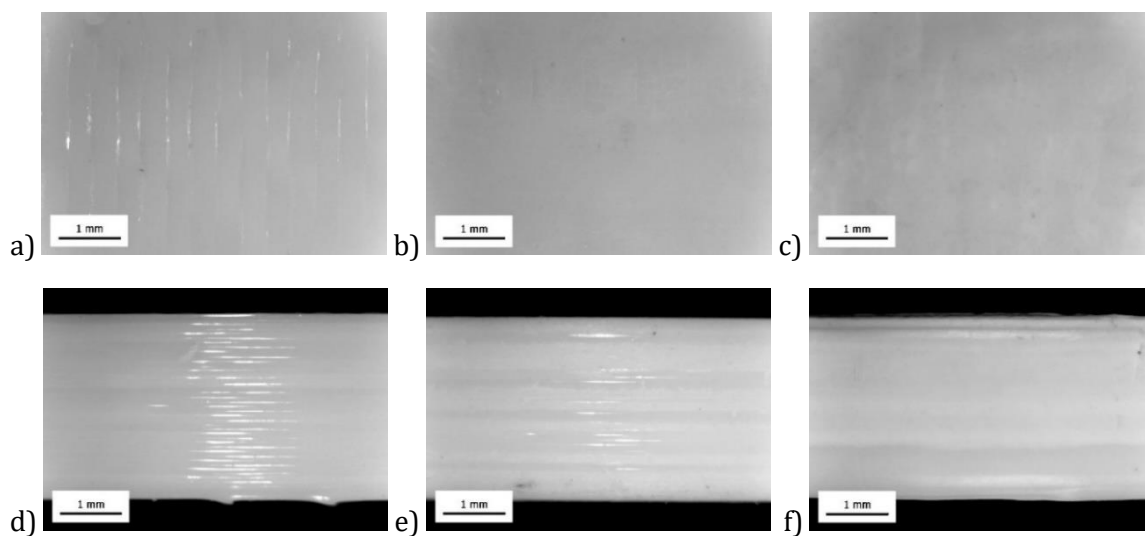
Ovaj eksperiment ima za cilj da dopuni prethodna istraživanja, radi sticanja boljeg uvida u oblast završne obrade FDM štampanih uzorka, odnosno njenog uticaja na površinsku hrapavost i mehaničke osobine. Uzorci od PLA materijala štampanih FDM tehnikom, metodom opisanom u Poglavlju 7.6, mehanički su obrađeni brusnim papirima (P100 i P300) i hemijski, upotrebom acetona (p.a.  $\geq 99\%$ ).

U tabeli 8.24 prikazane su dimenzije štampanih uzoraka pre i posle završne obrade.

Tabela 8.24: Srednje vrednosti izmerenih dimenzija uzoraka od PLA materijala štampanih FDM tehnikom 3D štampe pre i posle završne obrade

		Netretirani uzorci		Mehanički tretirani uzorci		Hemijski tretirani uzorci	
		Visina (mm)	Širina (mm)	Visina (mm)	Širina (mm)	Visina (mm)	Širina (mm)
Pre završne obrade							
	Sred. Vre.	3,27	13,14	3,23	13,13	3,20	13,14
	Std. Dev.	0,02	0,0451	0,036	0,031	0,005	0,046
Posle završne obrade							
	Sred. Vre.	-	-	2,96	12,98	3,27	13,15
	Std. Dev.	-	-	0,031	0,061	0,012	0,075

Rezultati mehaničke i hemijske obrade uzoraka prikazani su na slici 8.5. Površine uzoraka snimljene su digitalnim USB mikroskopom ViTiny VT300 sa uvećanjem od 10x. Na slikama 8.5a, 8.5b i 8.5c se mogu videti gornje površine neobrađenog, mehanički obrađenog i hemijski obrađenog uzorka, a na slikama 8.5d, 8.5e i 8.5f bočne površine uzoraka.

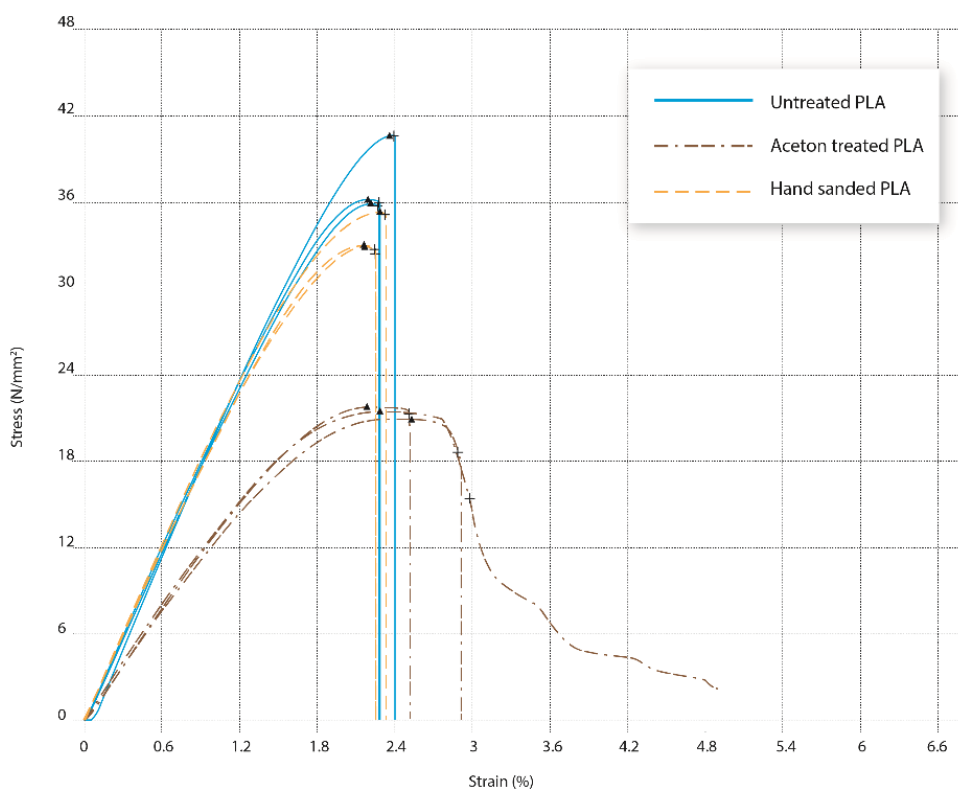


Slika 8.5: Mikroskopski snimak gornjih (a,b,c) i bočnih površina (d,e,f) netretiranih, mehanički tretiranih i hemijski tretiranih uzoraka (s leva na desno)

Na površini netretiranih uzoraka vidljive su konture deponovanog filameta i stepenast efekat kod bočnih površina, što je karakteristika FDM tehnike štampe. Mehanički tretirani uzorci imaju ravnu gornju površinu sa jedva vidljivim filamentima. Ovo je slučaj kod površina kod kojih nema velikih rastojanja između deponovanih filamenata. Bočna površina mehanički obrađenih uzoraka je takođe ravna, sa delimično vidljivim slojevima. Da bi se proizvela ravna površina uzorka bez vidljivih slojeva ili filamenata, obično se koristi hemijska metoda. U ovom eksperimentu, potapanje u acetonsku kupku proizvelo je veoma dobar izgled i gornje i bočne površine uzoraka. Gornje površine imaju uniformnu strukturu bez vidljivih filamenata, ali samo u delovima gde nisu vidljiva velika rastojanja između filameta. Stepenast izgled bočnih strana je uklonjen.

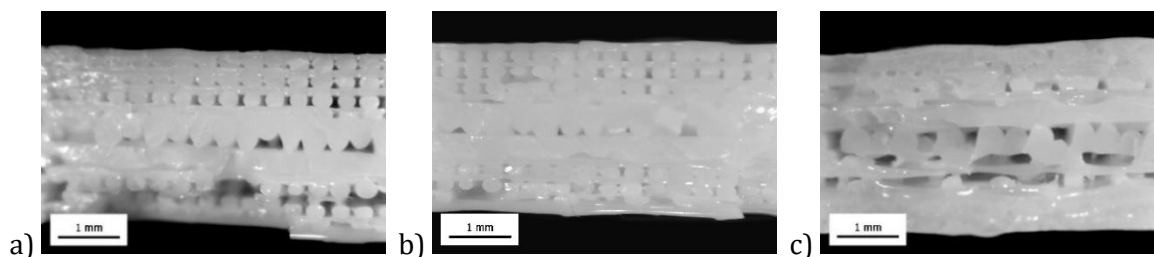
Vrednosti napona prekida za netretirane, mehanički i hemijski tretirane uzorke su 37,58 MPa (StDev. = 2,67 MPa), 33,72 MPa (StDev. = 1,37 MPa) i 21,37 MPa (StDev. = 0,41 MPa), a vrednosti istezanja pri lomu 2,32% (StDev. = 0,071%), 2,28% (StDev. = 0,051%) i 2,79% (StDev. = 0,25%) respektivno. Vrednosti modula elastičnosti su 2057,11 MPa (StDev. = 50,4 MPa) za netretirane, 2061,47 MPa (23,61 MPa) za mehanički tretirane i 1388,41 MPa (StDev. = 32,99 MPa) za hemijski tretirane uzorke. Rezultati pokazuju da završna obrada bilo kojom od ove dve metode dovodi do smanjene zatezne čvrstoće. Manja degradacija zatezne čvrstoće je izmerena kod mehanički tretiranih uzoraka. Vrednosti istezanja su slične kao i kod netretiranih uzoraka. Hemijski tretirani uzorci su duktilniji i imaju veću vrednost istezanja u poređenju sa mehanički tretiranim i netretiranim uzorcima.

Krive napon-izduženje za netretirane, mehanički i hemijski tretirane uzorke prikazane su na grafiku 8.31.



Grafik 8.31: Kriva napon-izduženje za različito tretirane uzorke od PLA materijala

Na slici 8.6 prikazani su mikroskopski snimci poprečnih preseka neobrađenog, mehanički obrađenog i hemijski obrađenog uzorka.

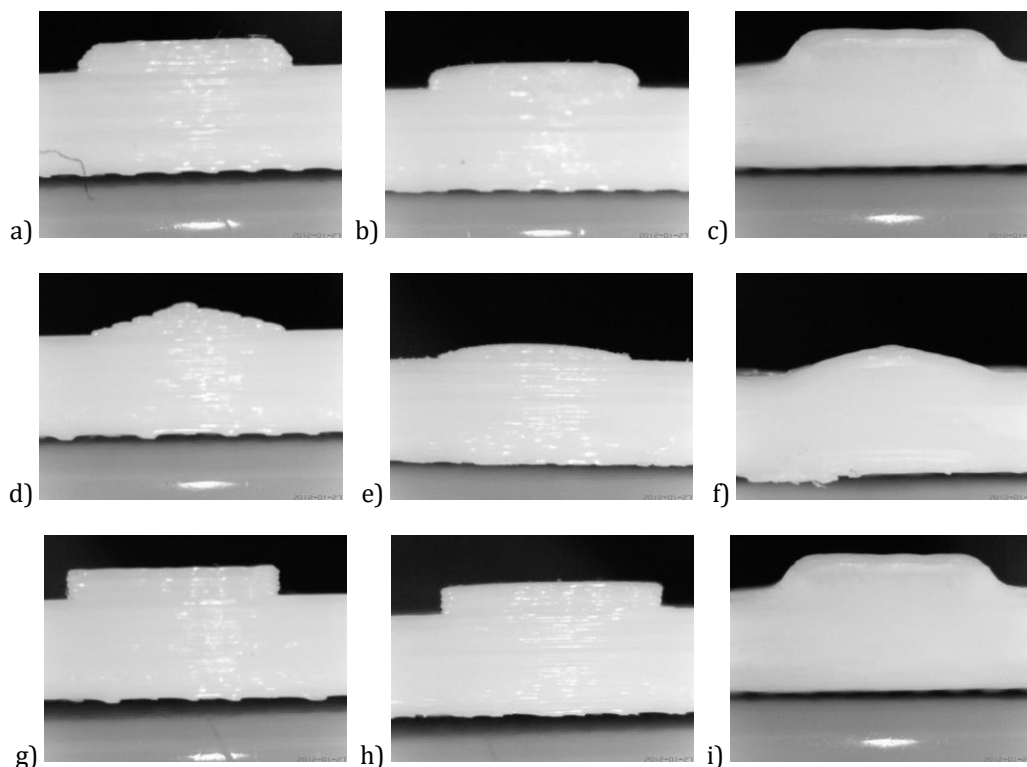


Slika 8.6: Poprečni presek zone prekida uzorka posle ispitivanja zatezne čvrstoće kod a) netretiranog, b) mehanički tretiranog c) hemijski tretiranog PLA uzorka

Na ovim slikama se vidi da je u slučaju hemijski obrađenog uzorka, aceton prodro u poroznu unutrašnjost uzorka i na taj način izmenio strukturu i vezu između slojeva.



U okviru ovog istraživanja napravljeni su i mikroskopski snimci neobrađenih, mehanički i hemijski obrađenih uzoraka alata za utiskivanje sa elementima različitih oblika i širina. Na slici 8.7 prikazan je deo snimljenih uzoraka elemenata za utiskivanje jedne dimenzije. Detaljni pregled snimljenih slika svih dimenzija prikazan je u poglavlju Prilozi – Prilog 3.

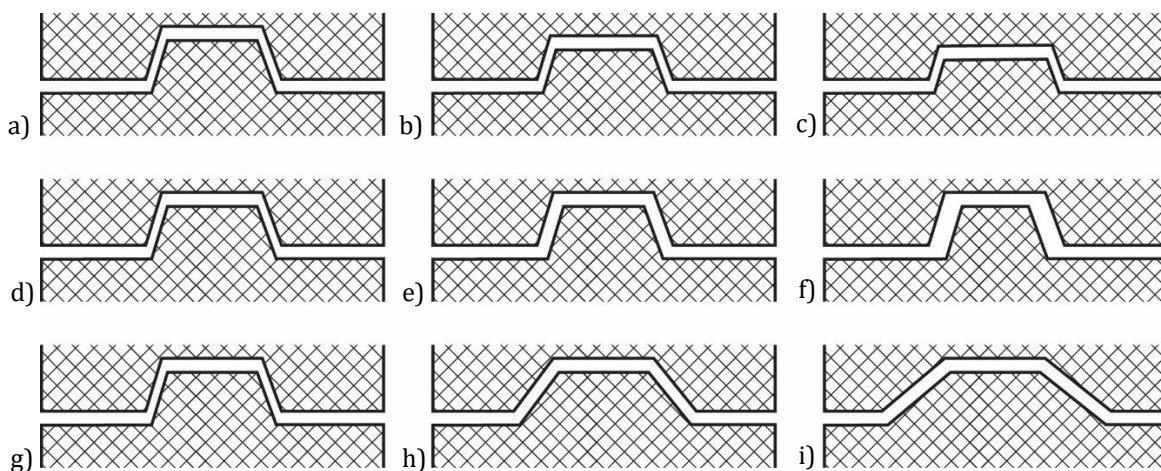


*Slika 8.7: Mikroskopski snimci profila za utiskivanje kod različito tretiranih PLA uzoraka: (a, d, g) neobrađenih, (b, e, h) mehanički obrađenih i (c, f, i) hemijski obrađenih*

Na osnovu priloženih slika vidi se da mehanička obrada uzorka nepovoljno utiče na elemente koji imaju izražen vrh. Pored toga, ovi elementi su zahtevni za mehaničku obradu, jer ugao obrade brusnim papirom treba da se uskladi sa nagibom obrađivane površine. Elemente sa oblom gornjom površinom moguće je mehanički obraditi, bez većeg uticaja na oblik elementa. Najbolji rezultati su vidljivi kod elemenata sa ravnom gornjom površinom bez zaobljenih ivica. U svakom od ova tri slučaja treba se obratiti pažnja na jačinu primenjene sile u toku obrade brusnim papirom i na vreme same obrade, kako se ne bi uklonilo previše materijala. Hemijska obrada daje zadovoljavajuće rezultate, uklanjajući stepenast efekat sa bočnih površina. Međutim, kod elemenata sa ivicama pod uglom od  $90^\circ$  hemijskom obradom se rastvara materijal na površini i tako rastvoren popunjava ćoškovne, menjajući nagib bočnih stranica. Kod hemijske obrade potrebno je voditi računa o dužini potapanja uzorka u acetonsku kupku, kako ne bi došlo do degradacije mehaničkih osobina, kao i do smanjenja dimenzija ili potpunog uklanjanja sitnih elemenata.

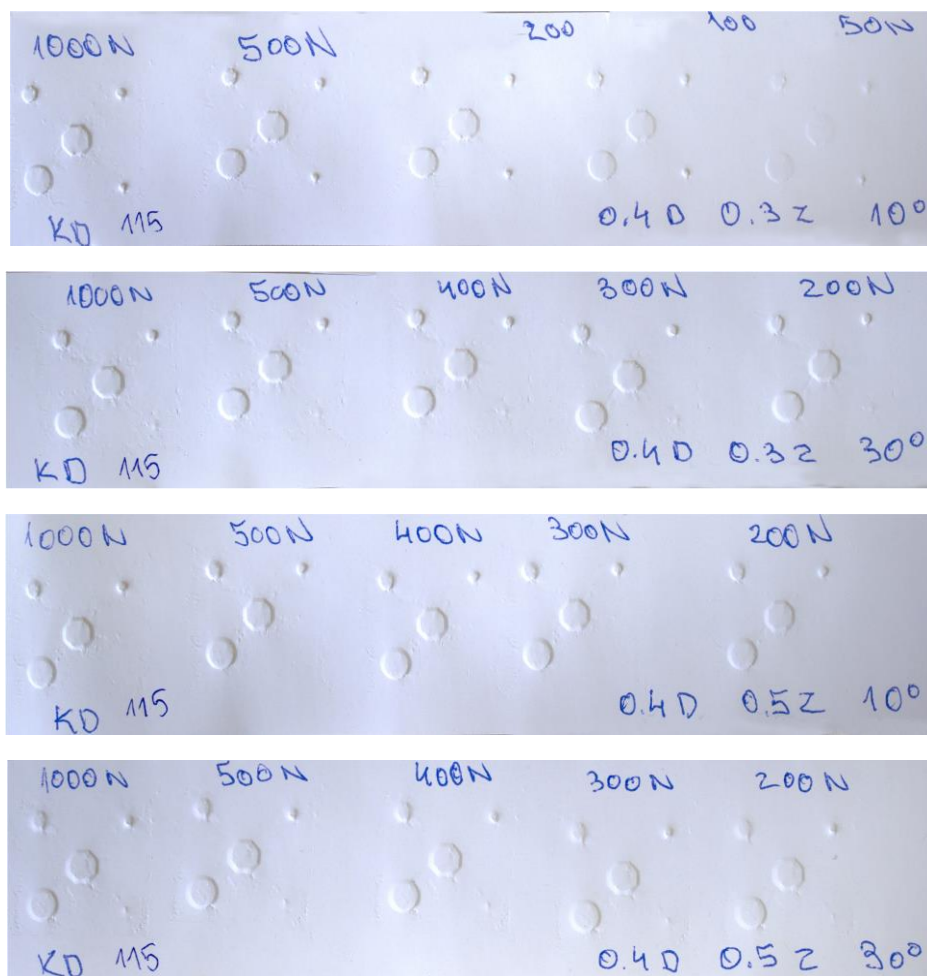
## 8.6 Izrada alata za utiskivanje FDM tehnikom 3D štampe – Definisane elementa

Nakon izrade alata za utiskivanje tehnikom hemijskog nagrizanja, opisanom u Poglavlju 7.9, izrađen je alat FDM tehnikom 3D štampe. Ovim alatom je izveden određen broj probnih utiskivanja, nakon čega je alat modifikovan, kako bi rezultati utiskivanja bili što bliži rezultatima dobijenim konvencionalnim alatima. Ove modifikacije podrazumevaju definisanje optimalne dubine elemenata, zazora između elemenata patrice i matrice, i ugla kosina elemenata alata. Na slici 8.8 prikazani su menjani parametri.



Slika 8.8: Ilustracije primera testiranih parametara elemenata alata za utiskivanje – a), b), c) različite dubine elemenata, d), e), f) različiti zazori između patrice i matrice, g), h), i) različite kosine bočnih ivica elemenata alata za utiskivanje

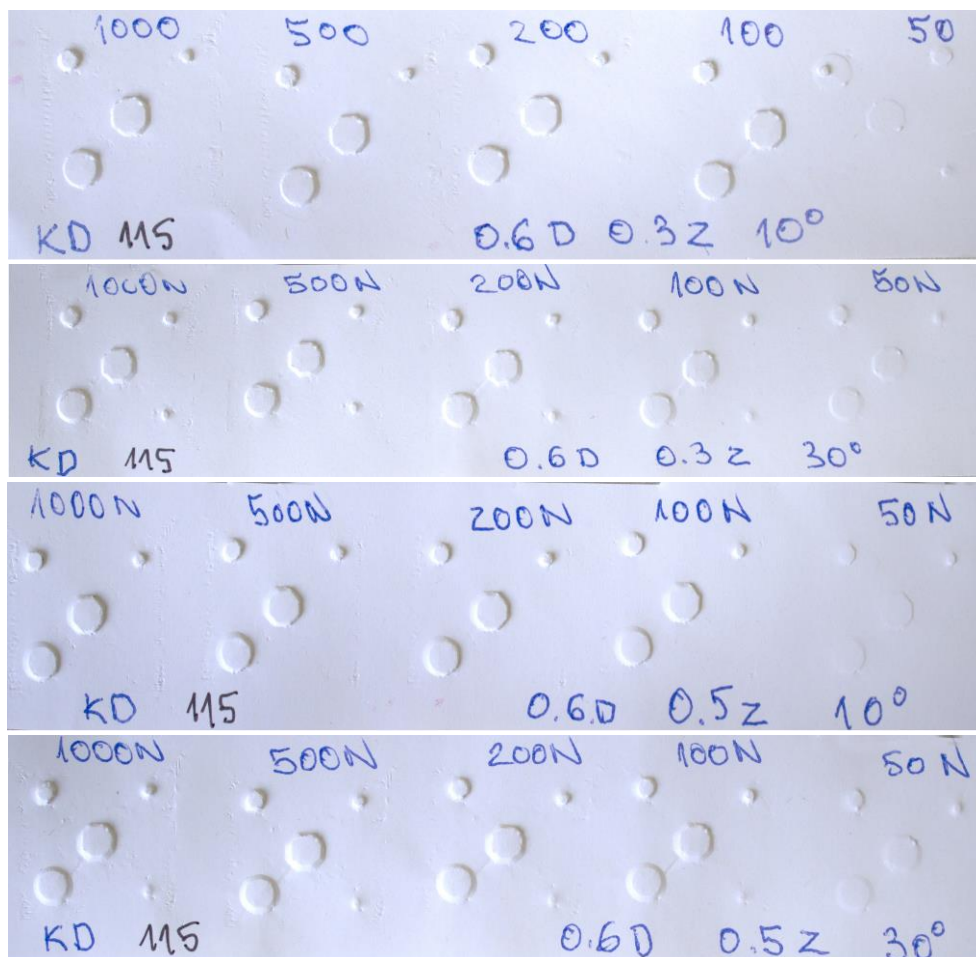
Na slici 8.9 prikazani su uzorci utisnuti na premaznom papiru alatima različitih vrednosti testiranih parametara. Na osnovu rezultata ovog istraživanja, definisani su parametri elemenata na alatu za utiskivanje izrađenom FDM tehnikom štampe. Kriterijum za procenu je jasnoća ivica, dubina/visina utisnutih elemenata, ujednačenost dubina i oštećenja papira na utisnutim elementima i oko elementa. Procena je vršena od strane tri stručne osobe kvalifikovane za procenu rezultata utiskivanja.



Slika 8.9: Rezultati utiskivanja alatom izrađenim FDM tehnikom 3D štampe na premaznom papiru. Dubina elemenata 0,4 mm, zazor 0,3 mm i 0,5 mm i kosina bočnih ivica  $10^\circ$  i  $30^\circ$

Utiskivanje je izvršeno alatima dubine elemenata 0,4 mm, vrednostima zazora između patrice i matrice od 0,3 mm i 0,5 mm i vrednosti ugla bočnih stranica od 10° i 30°. Vidi se da zazor od 0,3 mm dovodi do jasnijih ivica, ali dolazi do oštećenja papira. Ugao od 10° zahteva jače pritiske kako bi elementi bili utisnuti. Zazor od 0,5 mm i ugao od 30°, proizvode manje oštre i definisane ivice utisnutih elemenata, ali i manje oštećuju papir.

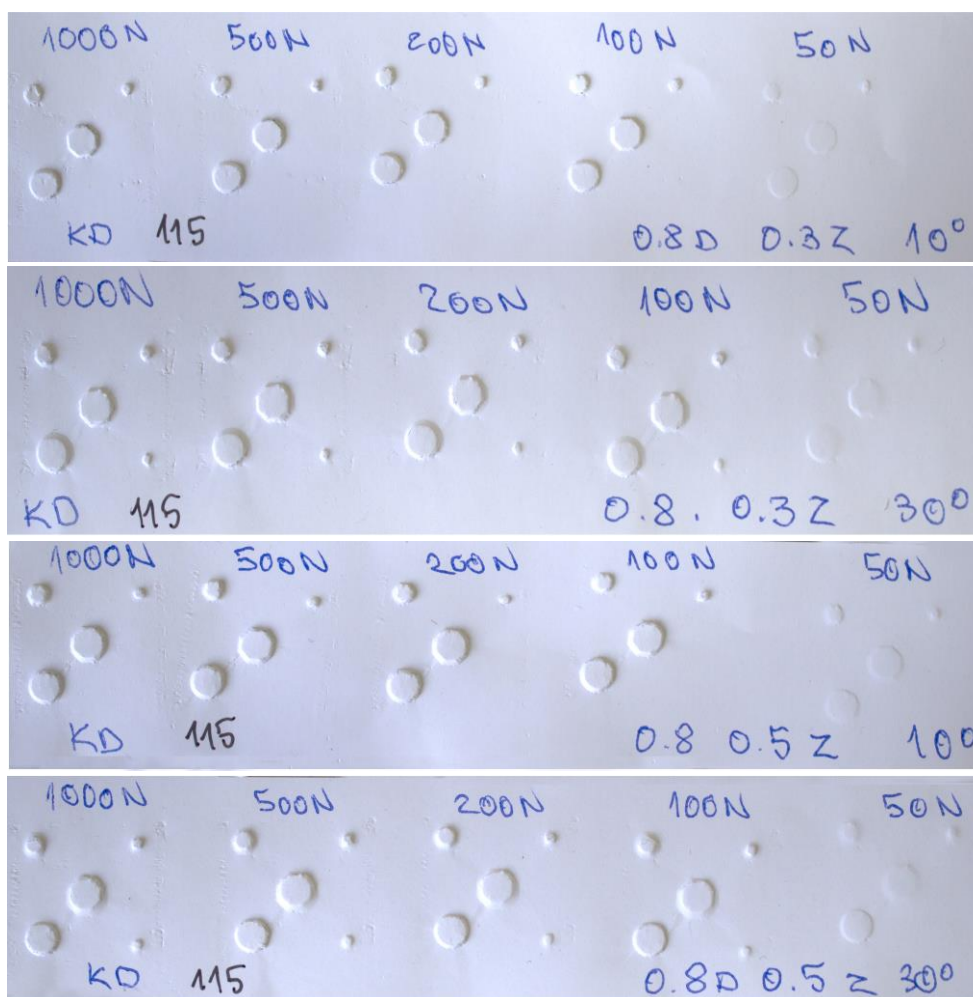
Na slici 8.10 prikazani su rezultati utiskivanja alatima sa dubinom elemenata 0,6 mm, takođe na premaznom papiru, sa varijacijom zazora i ugla bočnih stranica elemenata alata za utiskivanje.



Slika 8.10: Rezultati utiskivanja alatom izrađenim FDM tehnikom 3D štampe na premaznom papiru. Dubina elemenata 0,6 mm, zazor 0,3 mm i 0,5 mm i kosina bočnih ivica 10° i 30°

Upotrebljena je vrednost zazora između patrice i matrice od 0,3 mm i 0,5 mm i vrednosti ugla bočnih stranica sa 10° na 30°. Uočava se da zazor od 0,3 mm proizvodi jasnije ivice, ali dolazi do oštećenja papira. Ugao od 10° takođe dovodi do jasnijih ivica utisnutih elemenata sa vidljivim oštećenjima papira kod ivica elemenata. Zazor od 0,5 mm i ugao od 30°, proizvode nejasne ivice utisnutih elemenata i manje oštećuju papir, ali zbog prevelikog zazora matrica i patrica ne mogu biti dovoljno poravnate, pa se dobija asimetričan izgled utisnutih elemenata. Dubina od 0,6 mm se pokazala na većini sila pritisaka kao prevelika, jer vidno oštećuje papir na ivicama utisnutih elemenata.

Na slici 8.11 prikazani su rezultati utiskivanja alatima sa dubinom elemenata 0,8 mm, takođe na premaznom papiru, sa varijacijom zazora i ugla bočnih stranica elemenata alata za utiskivanje.

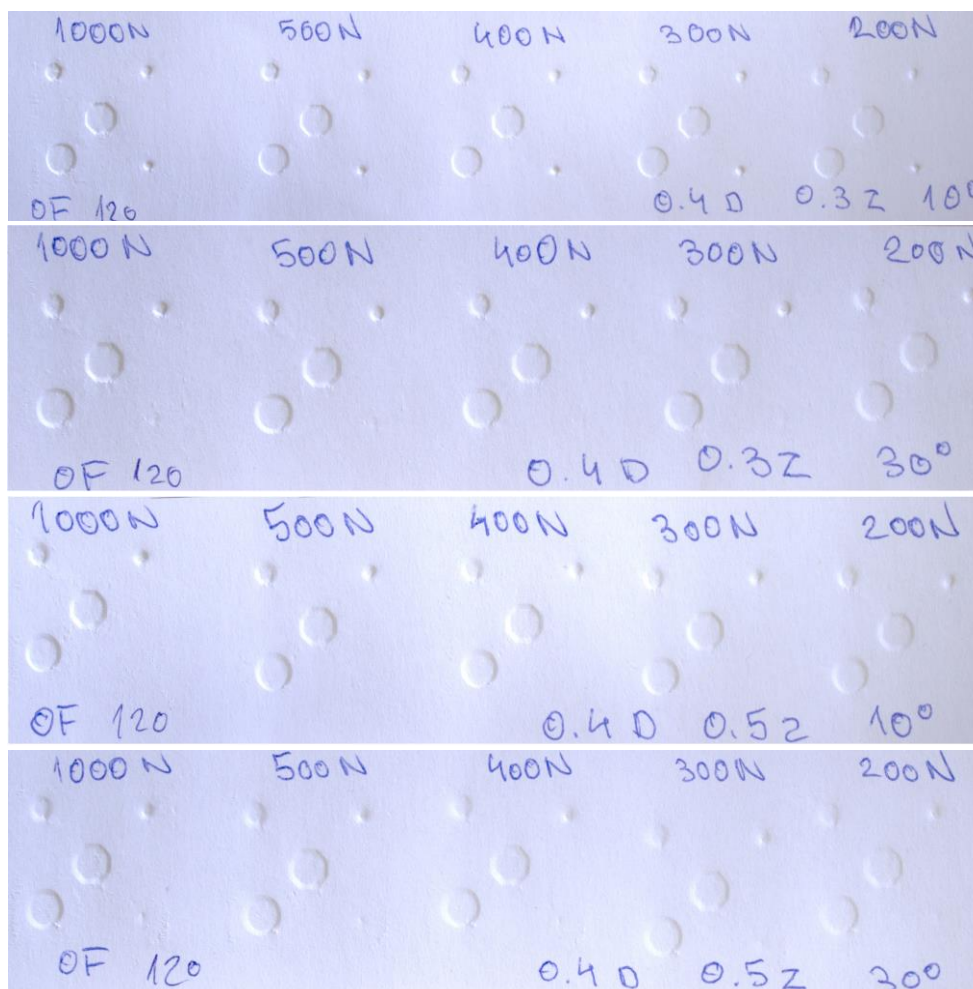


Slika 8.11: Rezultati utiskivanja alatom izrađenim FDM tehnikom 3D štampe na premaznom papiru. Dubina elemenata 0,8 mm, zazor 0,3 mm i 0,5 mm i kosina bočnih ivica  $10^\circ$  i  $30^\circ$

Na ovim uzorcima alata upotrebljena je vrednost zazora između patrice i matrice od 0,3 mm i 0,5 mm i vrednosti ugla bočnih stranica sa  $10^\circ$  na  $30^\circ$ . Zazor od 0,3 mm daje i u ovom slučaju jasnije ivice, sa manjim oštećenjima na papiru nego sa prethodnim alatima. Ugao od  $10^\circ$  takođe dovodi do jasnijih ivica utisnutih elemenata. Zazor od 0,5 mm i ugao od  $30^\circ$  proizvode manje oštre, odnosno nejasne ivice utisnutih elemenata, ali je i ovde prisutan problem sa poravnanjem matrice i patrice, pa se dobija asimetričan izgled utisnutih elemenata. Dubina od 0,8 mm se pokazala na većini sila pritisaka kao prevelika u odnosu na uzorke utisnute konvencionalnim alatima, pa su utisnuti elementi previsoki, a kod manjeg zazora i ugla bočnih stranica, oštećeni.



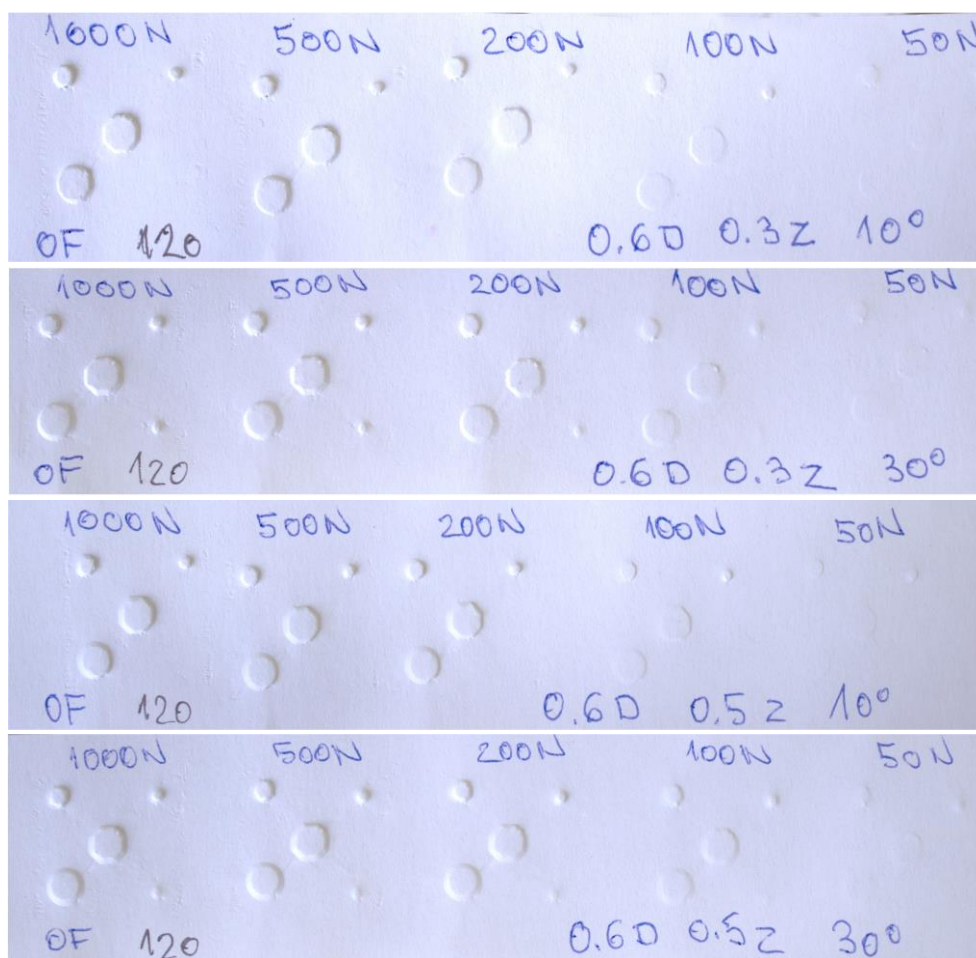
Na slici 8.12 prikazani su rezultati utiskivanja alatima sa dubinom elemenata 0,4 mm, na nepremaznom papiru, sa varijacijom zazora i ugla bočnih stranica elemenata alata za utiskivanje. Utiskivanje je vršeno istim alatima kao i kod premaznih papira.



Slika 8.12: Rezultati utiskivanja alatom izrađenim FDM tehnikom 3D štampe na ofset papiru. Dubina elemenata 0,4 mm, zazor 0,3 mm i 0,5 mm i kosina bočnih ivica 10° i 30°

Na nepremaznom papiru su manje vidljiva oštećenja, s obzirom da ne dolazi do oštećenja premazne površine kao kod premaznih papira. Kod ovog papira vidi se da zazor od 0,3 mm vodi ka ivicama veće oštine nego alati sa zazorom od 0,5 mm. Ugao od 10° zahteva veće pritiske, a utisnuti elementi izgledaju niži, doduše sa jasnijom i delimično oštećenom ivicom. Zazor od 0,5 mm, sa druge strane, proizvodi manje oštre i definisane ivice utisnutih elemenata sa boljim rezultatima kod ugla od 10°. Kod ugla bočnih stranica od 30° potrebni su veći pritisci da bi se videli utisnuti elementi, ali na tim jačim pritiscima dolazi do oštećenja papira oko elemenata.

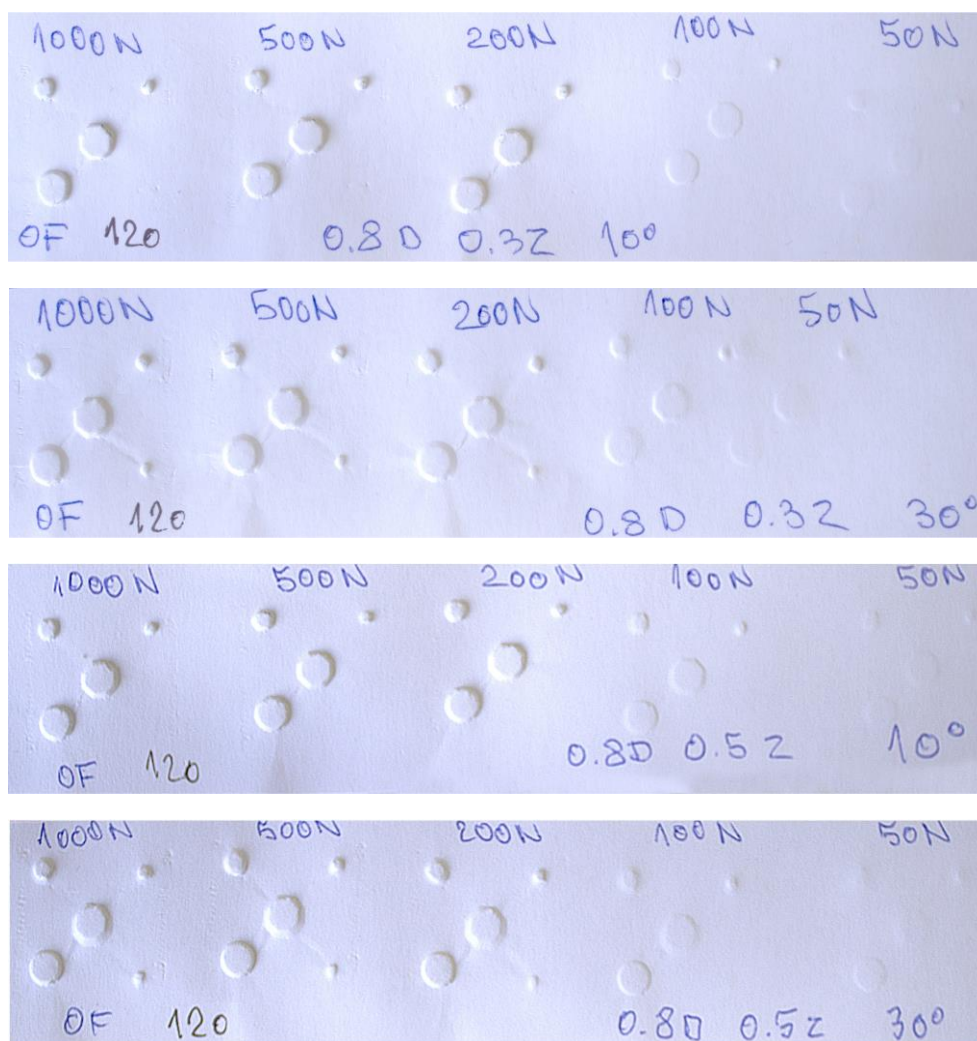
Na slici 8.13 prikazani su rezultati utiskivanja alatima sa dubinom elemenata 0,6 mm, takođe na nepremaznom papiru, sa varijacijom zazora i ugla bočnih stranica elemenata alata za utiskivanje.



Slika 8.13: Rezultati utiskivanja alatom izrađenim FDM tehnikom 3D štampe na ofset papiru. Dubina elemenata 0,6 mm, zazor 0,3 mm i 0,5 mm i kosina bočnih ivica 10° i 30°

Upotrebljena je vrednost zazora između patrice i matrice od 0,3 mm i 0,5 mm i vrednosti ugla bočnih stranica sa 10° na 30°. Sa slika se vidi da su kod svih alata utisnuti elementi izraženi, međutim elementi postaju neprepoznatljivi (svi liče na krug). Kod zazora od 0,3 mm i ugla od 30° dolazi do krzavosti ivica utisnutih elemenata, dok za isti ugao i zazor od 0,5 mm nisu u toj meri vidljiva oštećenja.

Na slici 8.14 prikazani su rezultati utiskivanja alatima sa dubinom elemenata 0,8 mm, takođe na nepremaznom papiru, sa varijacijom zazora i ugla bočnih stranica elemenata alata za utiskivanje.

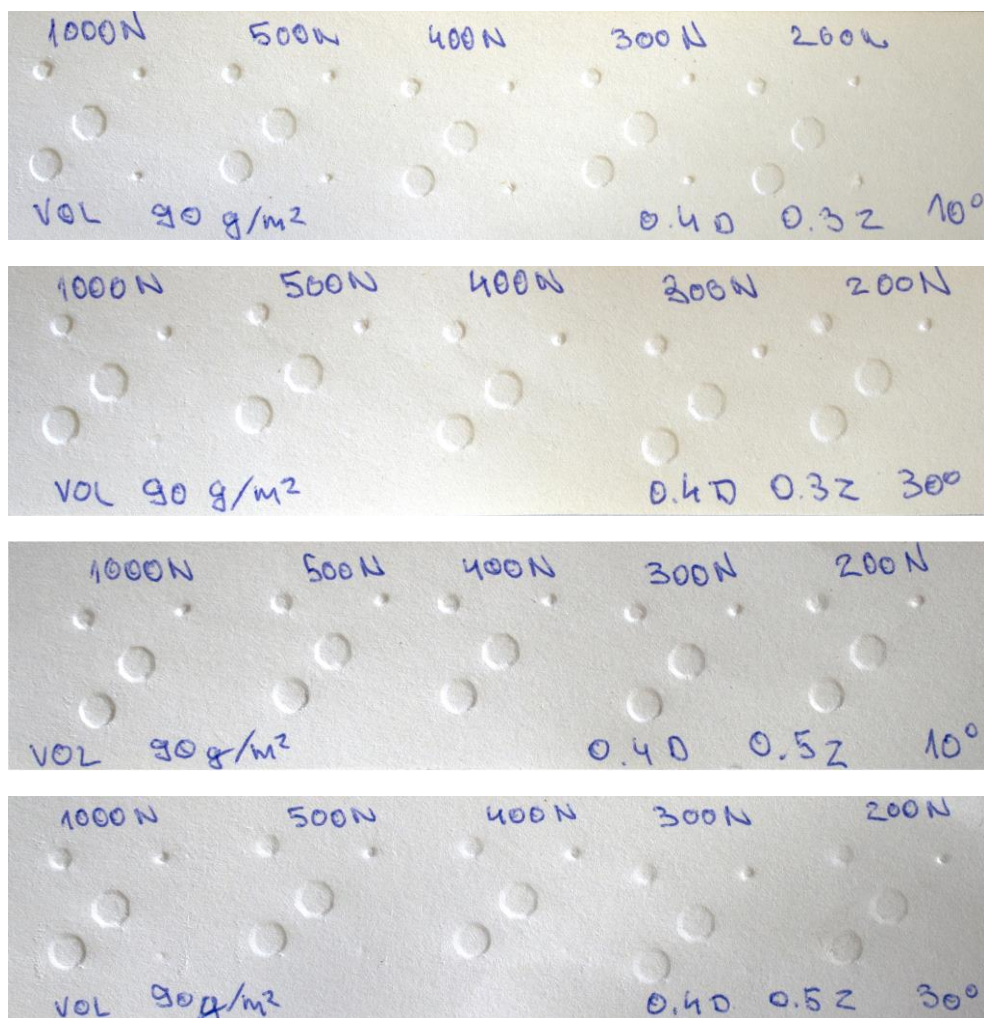


Slika 8.14: Rezultati utiskivanja alatom izrađenim FDM tehnikom 3D štampe na ofset papiru. Dubina elemenata 0,8 mm, zazor 0,3 mm i 0,5 mm i kosina bočnih ivica 10° i 30°

Kod ovih uzoraka veoma je naglašena dubina elemenata i oštećenje papira oko utisnutih elemenata, pogotovo kod ugla bočnih stranica od 30°. Ovaj ugao na elementima alata dovodi do nejasnih ivica utisnutih elemenata. Za ugao od 10° ivice su oštrije, ali elementi gube svoj oblik, a ivice izgledaju oštećenije. Zazor od 0,5 mm ne oštećuje u tolikoj meri papir kod samih utisnutih elemenata, ali su oblici elemenata promenjeni, a centriranje patrice i matrice je otežano, pa su utisnuti elementi asimetrični na određenim mestima.



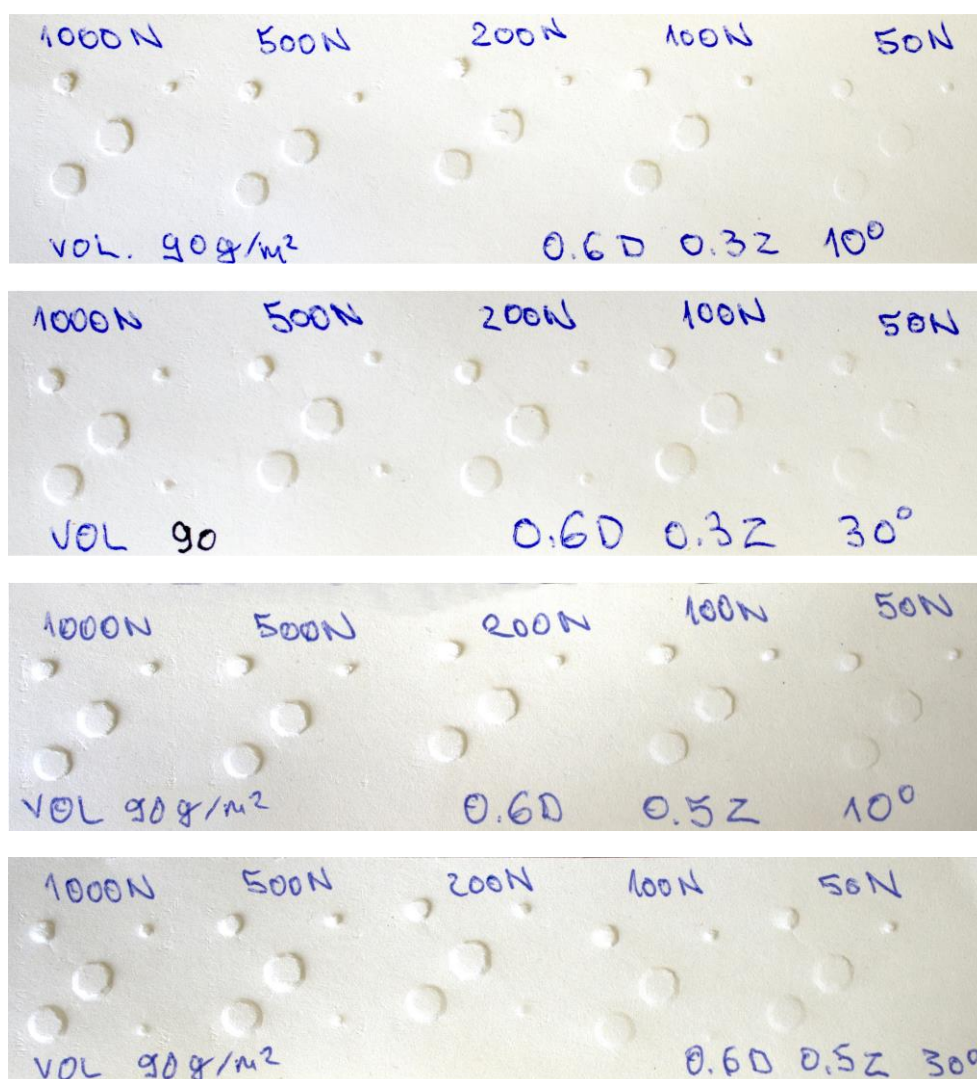
Na slici 8.15 prikazani su rezultati utiskivanja alatima sa dubinom elemenata 0,4 mm, na voluminoznom papiru, sa varijacijom zazora i ugla bočnih stranica elemenata alata za utiskivanje. Utiskivanje je izvedeno istim alatima kao i kod premaznih i nepremaznih papira.



Slika 8.15: Rezultati utiskivanja alatom izrađenim FDM tehnikom 3D štampe na voluminoznom papiru. Dubina elemenata 0,4 mm, zazor 0,3 mm i 0,5 mm i kosina bočnih ivica 10° i 30°

Na voluminoznom papiru zazor između patrice i matrice od 0,3 mm, dovodi do utisnutih elemenata jasnijih ivica u poređenju sa zazorom od 0,5 mm. Takođe, alat sa zazorom 0,3 mm i uglom 10° uspeo je da reprodukuje i najsitnije elemente na papiru, za razliku od ostalih, međutim sa izraženijim oštećenjima ivica utisnutih elemenata. Ugao bočnih stranica od 10° dovodi do oštrijih ivica utisnutih elemenata. Zazor od 0,5 mm i ugao od 10°, proizvodi približno iste rezultate kao i zazor od 0,3 mm i ugao od 30°, što se tiče oblika elemenata, ali sa izraženijom dubinom. Zazor od 0,5 mm i ugao bočnih stranica 30° dovodi do utisnutih elemenata nejasnih ivica i asimetričnosti utisnutih elemenata, sa vidljivim oštećenjima papira oko utisnutih elemenata.

Na slici 8.16 prikazani su rezultati utiskivanja alatima sa dubinom elemenata 0,6 mm, takođe na voluminoznom papiru, sa varijacijom zazora i ugla bočnih stranica elemenata alata za utiskivanje.



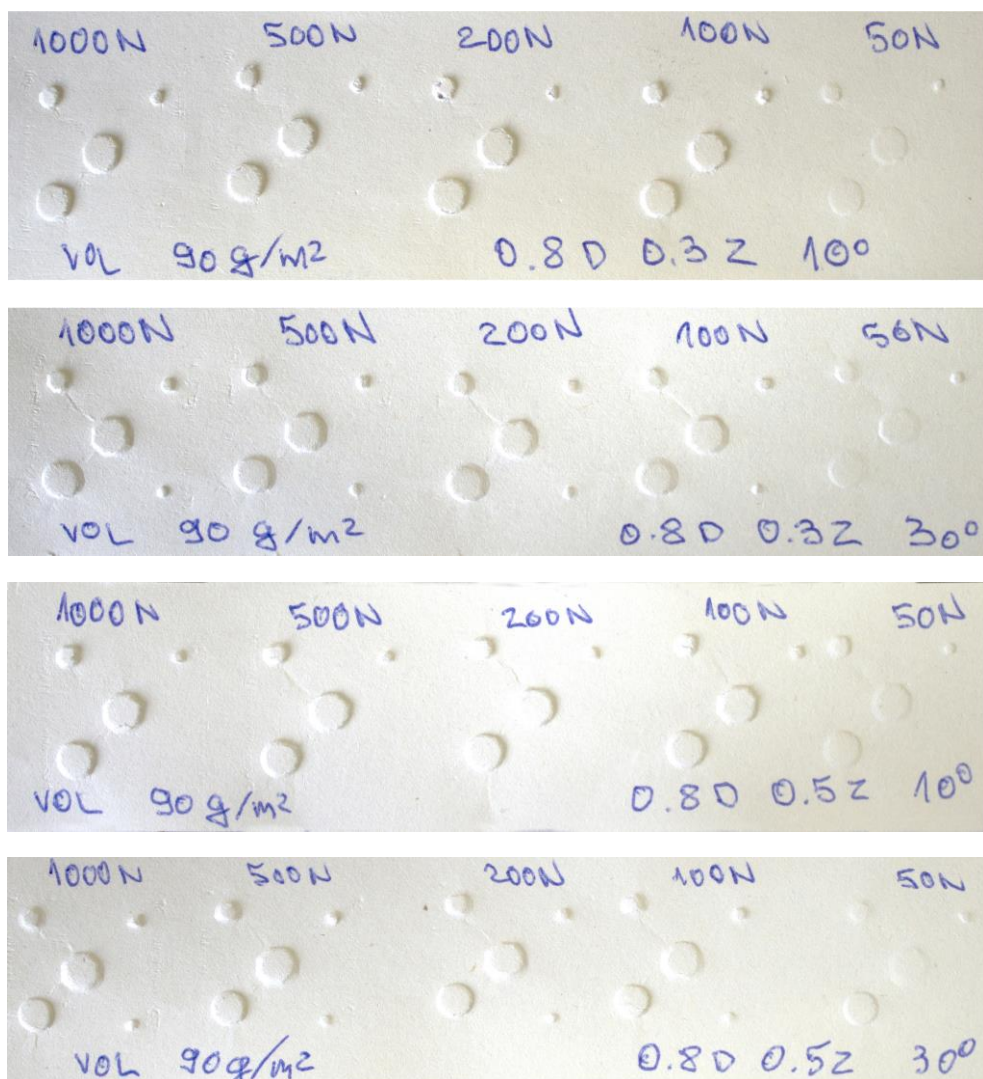
Slika 8.16: Rezultati utiskivanja alatom izrađenim FDM tehnikom 3D štampe na voluminoznom papiru. Dubina elemenata 0,6 mm, zazor 0,3 mm i 0,5 mm i kosina bočnih ivica 10° i 30°

Na slici 8.16 jasno je uočljivo da dolazi do povećanog oštećenja papira u svim slučajevima. Jedan od razloga za ovu pojavu jesu same karakteristike voluminoznog papira, koji je podložniji mehaničkim oštećenjima (videti rezultate eksperimenta - *Karakterizacija papirnih materijala za utiskivanje – Poglavlje 8.1*), a drugi razlog je dubina samih elemenata. Alati sa kosinom ivica od 30° proizveli su i najsitnije elemente, ali su ivice ovako utisnutih elemenata nejasnije i deformisanog oblika. Alati sa kosinom ivica od 10° dovode do utisnutih elemenata pravilnijeg oblika, ali sa većim oštećenjima papira na utisnutim elementima. Kod zazora matrice i patrice od 0,5 mm i uglom od 30°, utisnuti elementi su nejasni i asimetrični.

Na slici 8.17 prikazani su rezultati utiskivanja alatima sa dubinom elemenata 0,8 mm, takođe na voluminoznom papiru, sa varijacijom zazora i ugla bočnih stranica elemenata alata za utiskivanje.

Kod alata za utiskivanje sa dubinom elemenata od 0,8 mm, pojačana su oštećenja papira na utisnutim elementima i oko elemenata. Elementi alata sa kosinom bočnih stranica od 30° uspešno su reprodukovali i najsitnije elemente na papiru, ali sa nedovoljno oštrim ivicama i vidnim oštećenjima papira oko utisnutih elemenata. Alat sa zazorom od 0,3 mm i kosinom bočnih stranica od 10°, doveo je do poprilično oštećenih ivica utisnutih elemenata i do probijanja samog papira.

Alat sa zazorom od 0,5 mm i kosinom bočnih stranica od 10° proizveo je dobre rezultate, ali uz gubljenje oblika elemenata, delimično oštećenje papira i vidnu preveliku visinu elemenata u poređenju sa rezultatima utiskivanja konvencionalnim alatima.

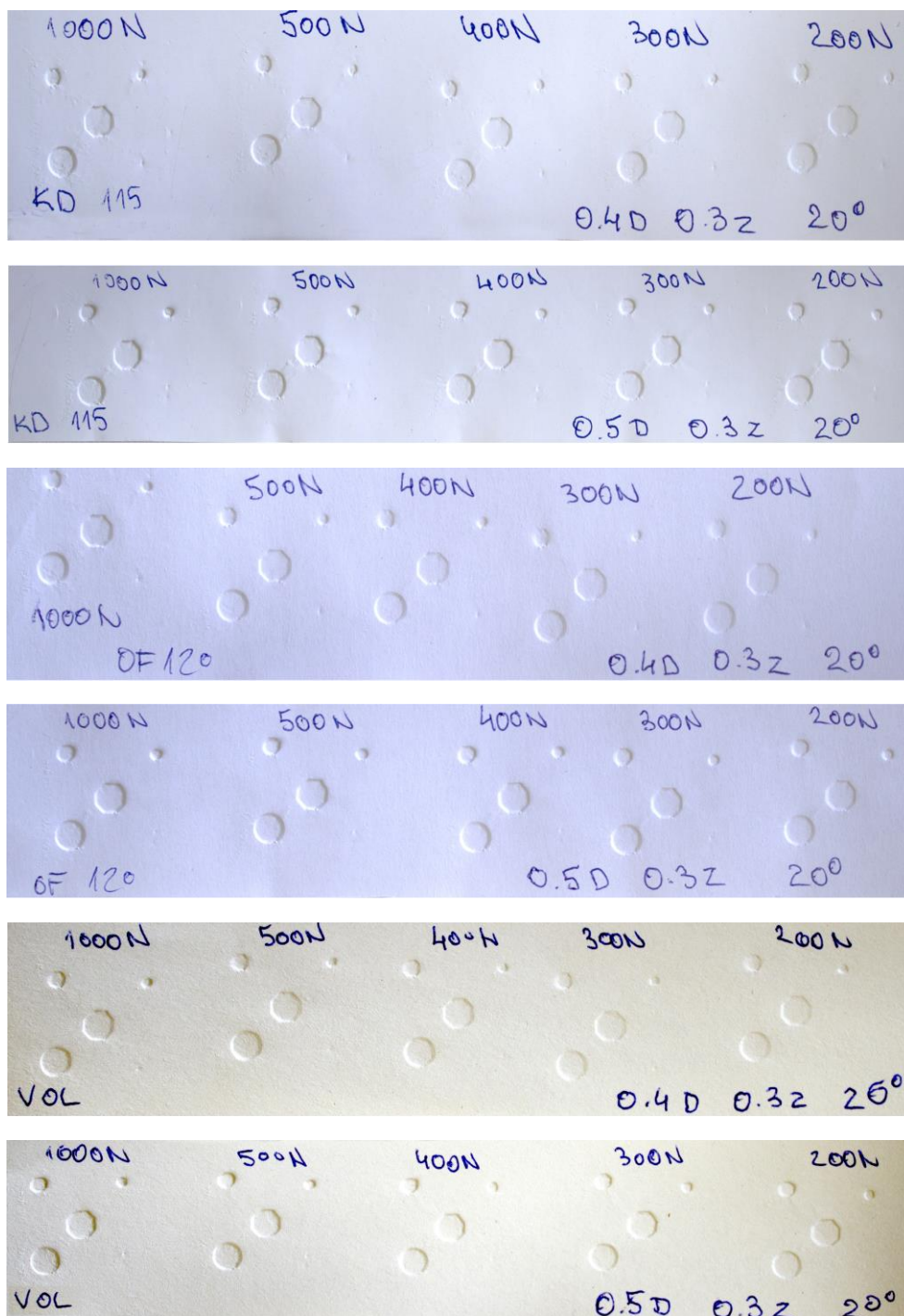


Slika 8.17: Rezultati utiskivanja alatom izrađenim FDM tehnikom 3D štampe na voluminoznom papiru. Dubina elemenata 0,8 mm, zazor 0,3 mm i 0,5 mm i kosina bočnih ivica 10° i 30°

Sumiranjem rezultata, zaključuje se da je zazor između patrice i matrice od 0,5 mm prevelik, jer dovodi do nedovoljno oštih ivica, izmenjenog oblika i često ne centriranih, odnosno asimetričnih utisnutih elemenata, pa je eliminisan iz daljeg razmatranja za izradu konačnog alata za utiskivanje. Dubine elemenata od 0,6 mm i 0,8 mm su takođe eliminisane, jer dovode do elemenata koji su previše utisnuti u poređenju sa elementima utisnutim konvencionalni alatima. Kosina bočnih stranica od 30° je takođe nepovoljna, jer je u većini slučajeva dovodi do nedovoljno jasnih ivica. S obzirom na to da su kod ugla od 10° na dosta mesta bila vidljiva oštećenja papira na ivicama samih elemenata, kao i krzavost samih ivica, odlučeno je da se testira ugao od 20°. Visina elemenata alata od 0,4 mm takođe nije bila zadovoljavajuća, pa su napravljena dva nova alata. Jedan sa dubinom elemenata od 0,4 mm, a drugi sa dubinom elemenata od 0,5 mm. Kosina bočnih stranica je 20°, a zazor 0,3 mm.



Na slici 8.18 prikazani su rezultati utiskivanja sa alatima konačno definisanih elemenata..



Slika 8.18: Rezultati utiskivanja alatom izrađenim FDM tehnikom 3D štampe na premaznom, ofset i voluminoznom papiru. Dubina elemenata 0,4 mm i 0,5 mm, zazor 0,3 mm i kosina bočnih ivica 20°

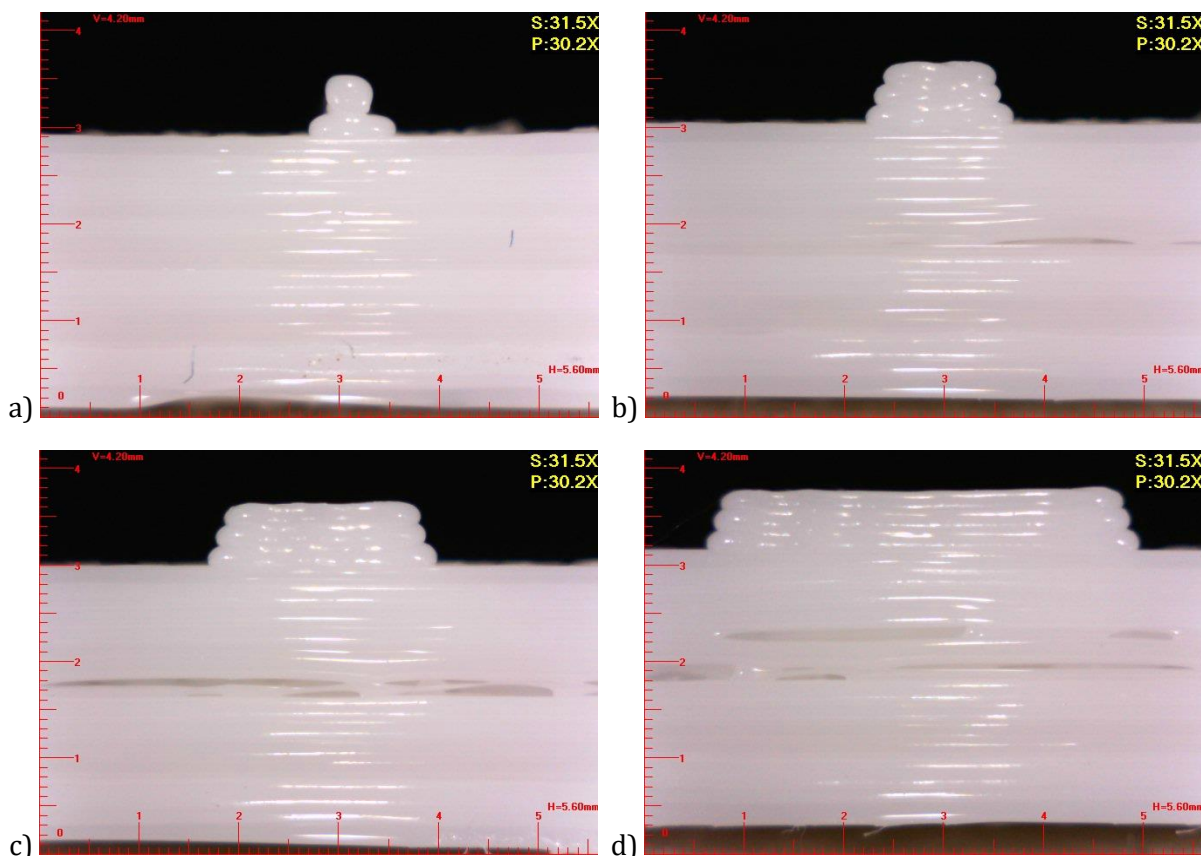
Rezultati utiskivanja alatima sa ovako konstruisanim elementima pokazuju znatno bolje rezultate od prethodnih alata. Za izradu probnih alata za utiskivanje odabrana je visina elemenata od 0,5 mm, jer su ivice utisnutih elemenata oštrije, a uzorci imaju sličnu visinu utisnutih elemenata kao i oni utisnuti konvencionalnim alatima.

Nakon ovog eksperimenta potrebno je istražiti koliko se deponovan filament skuplja ili širi i koliko izrađeni elementi za utiskivanje menjaju svoje originalne dimenzije, kako bi se ove promene kompenzovala u fazi modelovanja alata.

## 8.7 Istraživanje promena dimenzija uzoraka izrađenih FDM tehnikom u odnosu na zadati računarski model

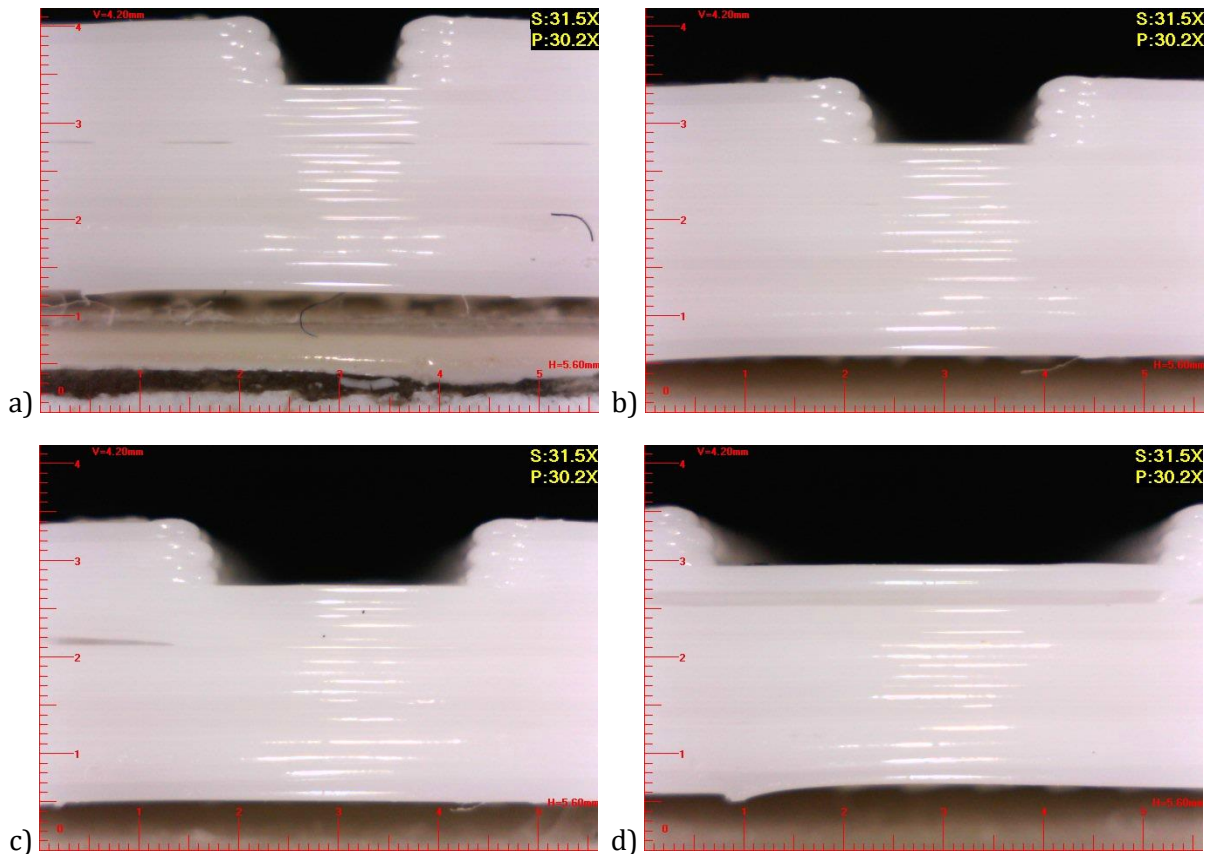
Neophodno je utvrditi promene dimenzija elemenata, definisanih STL dokumentom, nakon procesa štampe FDM tehnikom. Za potrebe ovog istraživanja konstruisan je alat dimenzija 83 mm x 15 mm prikazanim u Poglavlju 7.8. Model sadrži ispupčene i udubljene elemente, slične onima koji će se naći na budućem alatu za utiskivanje, tako da uzorak koji je na osnovu modela odštampan dobro reprezentuje promene dimenzija alata u odnosu na računarske modele na osnovu kojih su izrađeni.

Na slici 8.19 prikazani su snimci ispupčenih elemenata alata urađeni sa USB mikroskopom ViTiny VT300.



Slika 8.19: Mikroskopski snimci profila alata štampanog FDM tehnikom od PLA materijala: (a-d) ispupčeni elementi širina 0,5 mm, 1 mm, 2 mm i 4 mm respektivno

Na prikazanim snimcima izražene su vrednosti podeoka merne skale u pikselima nakon čega su izmerene širine i visine (x i z ose) odštampanih elemenata pomoću softverskog paketa Adobe Photoshop. Na slici 8.20 prikazani su snimci udubljenih elemenata alata.



Slika 8.20: Mikroskopski snimci profila alata štampanog FDM tehnikom od PLA materijala: (a-d) udubljeni elementi širina 1,1 mm, 1,6 mm, 2,6 mm i 4,6 mm respektivno

Promene dimenzija po y osi merene su na uzorcima modela čija je orijentacija na platformi za štampu bila 90°. Rezultati merenja prikazani su u tabeli 8.25.

Tabela 8.25: Izmerene stvarne vrednosti elemenata alata štampanog FDM tehnikom 3D štampe

3D MODEL	Ispupčenje				Udubljenje				
	Širina [mm]	0,5	1	2	4	1,1	1,6	2,6	4,6
	Visina [mm]	0,5				0,5			
NEKORIGOVAN ŠTAMPANI MODEL	Promena dimenzije u pravcu x-ose [%]	43,32	12,00	12,56	6,31	-5,35	-2,22	-1,47	-2,16
	Promena dimenzije u pravcu y-ose [%]	27,04	0,97	8,35	2,09	13,19	7,89	6,85	1,78
	Promena dimenzije u pravcu z-ose [%]	3,77	-11,80	-7,78	-14,26	18,99	20,39	24,07	32,82

Iz tabele se primećuje da su najsitniji izdignuti elementi (0,5 mm) po x osi pretrpeli najveće promene. U pravcu x ose ova promena iznosi 43,32%, što znači da se širina elementa po x osi povećala za tu vrednost. U pravcu y ose proširenje iznosi 27,04%, a u pravcu z ose 3,77%. Kod širih elemenata ovaj procenat je znatno manji, pa je najmanja promena dimenzija po x osi zabeležena kod elementa širine 4 mm. Po y osi ove vrednosti variraju, pa je najmanja promena izmerena kod elementa širine 1 mm, a zatim kod elementa širine 4 mm. Po z osi kod elemenata od 1 mm, 2 mm i 4 mm vrednosti proširenja opadaju, pa su elementi bili niži od projektovanih dimenzija. U slučaju udubljenih elemenata, situacija je bila obrnuta obzirom da nakon širenja deponovanog materijala dimenzije udubljenja smanjuju. Najveće smanjenje dimenzije po x osi je vidno je kod najužih udubljenih elemenata. Po y osi primećena su odstupanja, odnosno elementi su bili širi. Po z osi je vidljivo povećanje dimenzija.



Nakon definisanja promena dimenzija uzorka po sve tri ose, konstruisan je novi model sa uvršćenim korekcijama na osnovu koga je izrađen novi uzorak. U tabeli 8.26 prikazani su rezultati merenja dimenzija nakon modifikacije 3D modela.

Tabela 8.26: Izmerene vrednosti elemenata alata štampanog FDM tehnikom 3D štampe nakon korigovanog 3D modela

3D MODEL	Ispupčenje				Udubljenje				
	Veličina [mm]	0,5	1	2	4	1,1	1,6	2,6	4,6
	Visina [mm]	0,5				0,5			
KORIGOVAN ŠTAMPANI MODEL	Promena dimenzije u pravcu x-ose [%]	-4,82	3,68	-0,87	0,88	0,46	-2,56	-4,67	-2,95
	Promena dimenzije u pravcu y-ose [%]	5,34	-0,69	-0,87	0,88	1,25	-0,36	-1,40	-2,25
	Promena dimenzije u pravcu z-ose [%]	12,16	2,02	2,54	7,62	13,88	8,51	7,45	4,35

Iz priloženih rezultata se može primetiti da su izračunate vrednosti promene dimenzija FDM štampanih uzoraka i njihova primena povoljno uticale na smanjenje odstupanja od dimenzija računarskog modela. Ovim eksperimentom su definisana ograničenja FDM tehnike 3D štampe u domenu dimenzionalne predvidivosti, i način kompenzacije tih ograničenja kako bi se proizveli alati što preciznijih dimenzija utisnutih elemenata.

## 8.8 Utiskivanje papirnih materijala alatima sa reprezentativnim elementima

### 8.8.1 Utvrđivanje odgovarajućeg pritiska za utiskivanje



Nakon karakterizacije svih prethodno opisanih parametara neophodnih za preciznu i kvalitetnu izradu alata za utiskivanje kao i njihovih finalnih modifikacija sledi proces utiskivanja i digitalne analize utisnutih uzoraka papira u cilju definisanja odgovarajućeg pritiska koji je opisan u Poglavlju 7.10.1.

#### Metoda analize slika digitalizovanih utisnutih uzoraka papira

Metodom analize slika određene su odgovarajuće sile pritiska za sve testirane papire i alate za utiskivanje. Skenirani su uzorci svih vrsta papira utisnutih sa pet različitih pritisaka za svaku tehniku i sva četiri seta alata. S obzirom da sila pritiska varira u slučaju različitih setova alata, vrsta papira, gramature i korišćene tehnike izrade alata, metodom analize slika su odabrane sile pritisaka izražene preko razlike vrednosti nijanse sive svetlih i tamnih delova slike digitalizovanog uzorka utisnutog papira. Ova razlika predstavlja kontrast između površina pod senkom i površina van senke. Ukoliko je veća vrednost razlike podrazumeva se da je veći kontrast. Ukoliko je vrednost kontrasta visoka, jasnije će se videti utisnuti elementi, odnosno deformacija papira je veća. Međutim, potrebno je obratiti pažnju da na uzorcima sa većim kontrastom, ne dođe do oštećenja papira na utisnutim elementima i oko elemenata. U Poglavlju Prilozi (Prilog P4) data je tabela sa vrednostima razlika za sve pritiske, a u ovom poglavlju će biti prikazane samo vrednosti za pritiske odabrane za utiskivanje uzoraka za naknadnu vizuelnu analizu kvaliteta utisnutih papira.

U tabeli 8.27 prikazane su srednje vrednosti intenziteta nijanse sive delova slike pod senkom i van senke kao i razlika tih vrednosti za prvi set alata.

Tabela 8.27: Vrednosti intenziteta nijanse sive delova slike pod senkom i van senke kao i razlika tih vrednosti za prvi set alata

		KONVENCIONALNI ALAT ZA UTISKIVANJE				FDM ALAT ZA UTISKIVANJE			
									
Vrsta papira	Gramatura [g/m <sup>2</sup> ]	Sile utiskivanja [N]	Nijanse sive svetlih površina slike	Nijanse sive tamnih površina slike	Razlika nijanse sive tamnih i svetlih površina	Sile utiskivanja [N]	Nijanse sive svetlih površina slike	Nijanse sive tamnih površina slike	Razlika nijanse sive tamnih i svetlih površina
Nepremazni	80	400	233	207	26	650	236	201	35
	100	600	235	207	28	1000	237	202	34
	120	750	237	206	31	1100	238	207	31
	140	800	239	211	28	1100	240	210	30
	170	800	241	218	23	1250	242	213	29
Premazni	130	700	236	209	27	800	233	205	29
	150	800	238	209	29	1000	239	209	30
	170	900	240	212	28	1250	241	208	33
	200	1000	242	215	27	1250	239	209	30
Voluminozni	60	275	229	197	32	400	226	181	45
	70	300	231	199	32	500	233	193	40
	80	350	233	205	29	700	233	203	30

Pored srednjih vrednosti intenziteta nijanse sive svetlih i tamnih površina slike i razlike ovih vrednosti, u tabeli 8.27 su prikazane i gramature papira i sile utiskivanja za obe tehnike izrade alata za utiskivanje. Pikseli na svetlim površinama skeniranog papira mogu imati maksimalnu vrednost intenziteta nijanse sive 255, dok pikseli na tamnim površinama mogu imati maksimalnu vrednosti nijanse sive 0. Obzirom da su i tamne i svetle površine originalne monohromatske slike sačinjene od različitih nijansi sive, delovi van senke imaju srednje vrednosti intenziteta nijanse sive bliže broju 255, a delovi slike pod senkom dalje od ove vrednosti.



Iz tabele 8.27 se uočava da vrednosti razlike intenziteta nijanse sive izmerenih kod uzoraka dobijenih utiskivanjem sa oba alata imaju približne vrednosti (Avg. = 28, SD = 3 u slučaju konvencionalnih alata i Avg. = 33, SD = 5 u slučaju FDM alata). Uočavaju se i veće sile pritisaka za alate izrađene FDM tehnikom.

Sile odabranih pritisaka prouzrokovale su slične vrednosti razlike intenziteta nijanse sive između svetlih i tamnih površina slike kod premaznih i nepremaznih papira, što nije bio slučaj kod

voluminoznih. Kod ovih papira se primećuju neznatno veće razlike u intenzitetu nijanse sive između svetlih i tamnih površina papira u slučaju oba alata, što znači da je kod ovih papira došlo do veće deformacije, pri manjoj sili pritiska zbog slabijih mehaničkih osobina u poređenju sa druge dve vrste papira.

U tabeli 8.28 prikazane su srednje vrednosti intenziteta nijanse sive delova slike pod senkom i van senke kao i razlika tih vrednosti za drugi set alata.


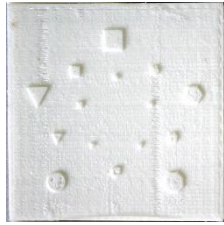
Tabela 8.28: Vrednosti intenziteta nijanse sive delova slike pod senkom i van senke kao i razlika tih vrednosti za drugi set alata

		KONVENCIONALNI ALAT ZA UTISKIVANJE				FDM ALAT ZA UTISKIVANJE			
									
Vrsta papira	Gramatura [g/m <sup>2</sup> ]	Sile utiskivanja [N]	Nijanse sive svetlih površina slike	Nijanse sive tamnih površina slike	Razlika nijanse sive tamnih i svetlih površina	Sile utiskivanja [N]	Nijanse sive svetlih površina slike	Nijanse sive tamnih površina slike	Razlika nijanse sive tamnih i svetlih površina
Nepremazni	80	400	235	207	28	400	231	204	27
	100	600	233	203	30	550	235	209	27
	120	700	238	209	28	750	237	207	30
	140	900	239	210	29	850	239	210	28
	170	1100	239	208	31	1050	241	212	29
Premazni	130	600	235	211	24	450	236	169	39
	150	700	239	214	25	650	238	164	45
	170	800	240	213	27	700	241	218	23
	200	1000	242	215	27	850	242	219	22
Voluminozni	60	300	229	201	27	275	227	167	35
	70	325	232	204	27	300	230	180	37
	80	375	233	207	26	350	231	201	31

Kod drugog seta alata, razlike vrednosti intenziteta nijanse sive je u slučaju utiskivanja uzoraka konvencionalnim alatom bila slična kao i u slučaju prvog seta alata (Avg. = 27, SD = 2). Kod FDM alata, ove vrednosti su veće u odnosu na prvi set (Avg. = 31, SD = 7). Kod konvencionalnog alata razlike vrednosti intenziteta nijanse sive su ujednačene kod svih vrsta papira i kreću se od 24 do 31, kod FDM alata ove vrednosti se kreću u opsegu od 22 do 45. Najveće odstupanje se javlja kod premaznog papira gramatura 130 g/m<sup>2</sup> i 150 g/m<sup>2</sup> i voluminoznog papira gramature 60 g/m<sup>2</sup> i 70 g/m<sup>2</sup>. Kod nepremaznog papira razlika vrednosti intenziteta nijanse sive su ujednačene. Sile pritiska u slučaju drugog seta alata su veće kod uzoraka utisnutih konvencionalnim alatima.

U tabeli 8.29 prikazane su srednje vrednosti intenziteta nijanse sive delova slike pod senkom i van senke kao i razlika tih vrednosti za treći set alata.



Tabela 8.29: Vrednosti intenziteta nijanse sive delova slike pod senkom i van senke kao i razlika tih vrednosti za treći set alata

		KONVENCIONALNI ALAT ZA UTISKIVANJE				FDM ALAT ZA UTISKIVANJE			
									
Vrsta papira	Gramatura [g/m <sup>2</sup> ]	Sile utiskivanja [N]	Nijanse sive svetlih površina slike	Nijanse sive tamnih površina slike	Razlika nijanse sive tamnih i svetlih površina	Sile utiskivanja [N]	Nijanse sive svetlih površina slike	Nijanse sive tamnih površina slike	Razlika nijanse sive tamnih i svetlih površina
Nepremazni	80	250	235	206	29	500	232	203	29
	100	300	236	211	24	550	235	207	28
	120	400	237	209	28	600	238	211	27
	140	450	240	214	26	700	239	214	25
	170	550	240	216	24	800	241	216	25
Premazni	130	325	236	213	23	600	236	208	28
	150	375	239	215	24	600	238	216	22
	170	425	240	215	24	750	240	209	32
	200	475	242	219	22	750	241	219	22
Voluminozni	60	150	229	198	31	400	227	192	35
	70	160	233	204	29	300	233	205	28
	80	200	233	202	31	350	234	173	32

Kod trećeg seta alata za utiskivanje, uzorci utisnuti alatima izrađenim sa obe tehnike imaju približno slične razlike vrednosti intenziteta nijanse sive između delova pod senkom i van senke. Srednja vrednost ove razlike kod uzoraka utisnutih konvencionalnim alatom iznosi Avg. = 26 (SD = 3), a kod uzoraka utisnutih alatom izrađenim FDM tehnikom iznosi Avg. = 28 (SD = 4). Vrednosti sile pritisaka veće su prilikom utiskivanja uzoraka alatom izrađenim FDM tehnikom u slučaju svih vrsta papira, u poređenju sa uzorcima utisnutim konvencionalnim alatom. Najveće odstupanje razlike vrednosti intenziteta nijanse sive uočljivo je kod uzoraka utisnutih FDM alatom na voluminoznom papiru gramature 60 g/m<sup>2</sup>.

U tabeli 8.30 prikazane su srednje vrednosti intenziteta nijanse sive delova slike pod senkom i van senke kao i razlika tih vrednosti za četvrti set alata.

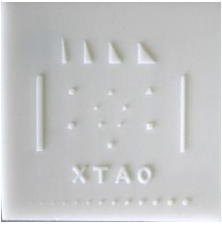
Tabela 8.30: Vrednosti intenziteta nijanse sive delova slike pod senkom i van senke kao i razlika tih vrednosti za četvrti set alata

		KONVENCIONALNI ALAT ZA UTISKIVANJE				FDM ALAT ZA UTISKIVANJE			
									
Vrsta papira	Gramatura [g/m <sup>2</sup> ]	Sile utiskivanja [N]	Nijanse sive svetlih površina slike	Nijanse sive tamnih površina slike	Razlika nijanse sive tamnih i svetlih površina	Sile utiskivanja [N]	Nijanse sive svetlih površina slike	Nijanse sive tamnih površina slike	Razlika nijanse sive tamnih i svetlih površina
Nepremazni	80	600	234	196	38	800	233	201	32
	100	800	235	198	36	1000	236	208	29
	120	1000	237	199	38	1300	238	208	30
	140	1200	238	201	37	1500	238	209	29
	170	1350	240	203	36	1500	241	214	27
Premazni	130	800	235	198	37	1000	236	208	29
	150	900	238	199	38	1150	236	209	27
	170	1000	239	201	38	1250	241	215	25
	200	1200	242	203	39	1200	242	220	21
Voluminozni	60	325	230	197	33	400	230	197	33
	70	375	231	202	29	400	231	198	33
	80	430	233	199	34	550	234	203	31

Iz tabele 8.30 se uočava da je u slučaju četvrtog seta alata, srednja vrednost razlike intenziteta nijanse sive tamnih i svetlih područja slike veća u slučaju konvencionalnog alata (Avg.=36, SD=3). U slučaju utiskivanja FDM alatima kod uzoraka je приметna manja razlika vrednosti intenziteta nijanse sive (Avg. = 29, SD = 4). Za utiskivanje konvencionalnim alatom u slučaju četvrtog seta alata je potrebna manja sila pritiska u poređenju sa uzorcima utisnutim alatom izrađenim FDM tehnikom štampe. Kod voluminoznih papira utisnutih FDM alatima uočena je veća razlika srednjih vrednosti nijanse sive između površina pod senkom i van senke što asocira na veći kontrast koji je potreban da bi utisnuti elementi bili jasno istaknuti. Analizom slika uzoraka utisnutih konvencionalnim alatima i uzoraka utisnutih FDM alatima nema većih odstupanja od srednjih vrednosti intenziteta nijanse sive u područjima senke i van senki, niti u kontrastu.

U tabeli 8.31 prikazane su srednje vrednosti intenziteta nijanse sive delova slike pod senkom i van senke kao i razlika tih vrednosti uzoraka utisnutih alatom izrađenim SLA tehnikom 3D štampe.

Tabela 8.31: Vrednosti intenziteta nijanse sive delova slike pod senkom i van senke kao i razlika tih vrednosti kod uzoraka utisnutih alatom izrađenog SLA tehnikom 3D štampe

		SLA ALAT ZA UTISKIVANJE			
					
Vrsta papira	Gramatura [g/m <sup>2</sup> ]	Sile utiskivanja [N]	Nijanse sive svetlih površina slike	Nijanse sive tamnih površina slike	Razlika nijanse sive tamnih i svetlih površina
Nepremazni	80	450	231	202	29
	100	550	234	209	25
	120	650	237	211	26
	140	800	237	210	27
	170	1000	239	212	27
Premazni	130	550	233	210	24
	150	600	236	212	24
	170	750	238	214	24
	200	900	240	216	24
Voluminozni	60	275	226	200	26
	70	375	231	204	27
	80	400	233	209	24

U slučaju alata izrađenog SLA tehnikom 3D štampe, utisnuti uzorci imaju niže srednje vrednosti razlike intenziteta nijanse sive između površina pod senkom i van senke svetlih, što ukazuje na niži kontrast. Ove vrednosti su približne vrednostima izmerenim u slučaju uzoraka utisnutim konvencionalnim alatima. Veća odstupanja razlike intenziteta nijanse sive površina pod senkom i van senke nisu primetna, odnosno kod svih papira je postignut kontrast sličnog intenziteta. Kod uzoraka utisnutih alatom izrađenim SLA tehnikom su zabeležene niske srednje vrednosti razlike intenziteta svetlih i tamnih područja slike (Avg. = 26, SD = 2).

### 8.8.2 Utiskivanje papira utvrđenim pritiscima iz prve faze eksperimenta

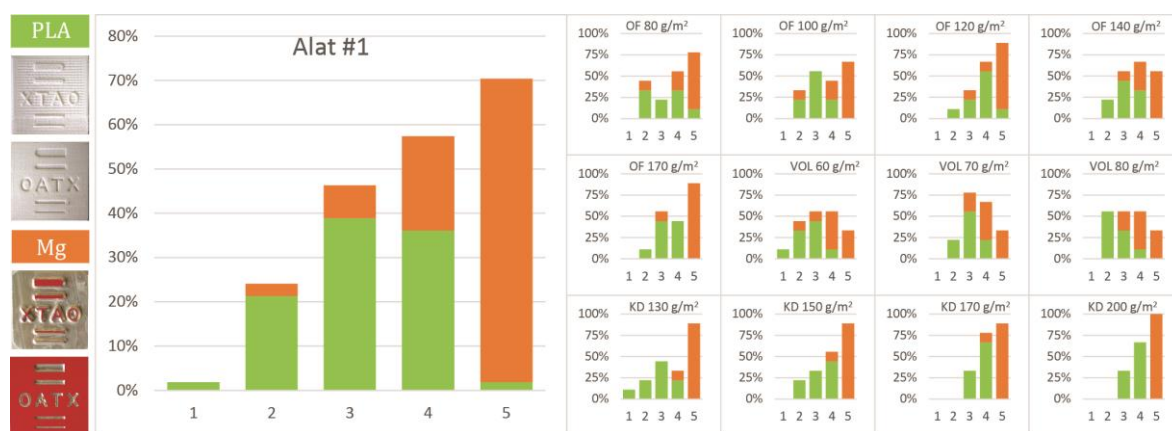
Nakon karakterizacije sila pritisaka pomoću metoda analize slika, utisnuti su novi uzorci papira odabranim silama pritisaka prikazanim u Tabelama 8.27 – 8.31. Pripremljeni su uzorci za procenu kvaliteta utisnutih uzoraka pomoću vizuelne metode. Procedura ovog dela eksperimenta opisana je u Poglavlju 7.10.2.



### Ocena oštine ivica

Odgovori ispitanika za ocenu oštine ivica prikazani su na graficima 8.21-8.24. Ocene za kvalitet oštine ivica na skali imaju definisane sledeće vrednosti: 1 – neprihvatljiva, 2 – ispod proseka, 3 – prihvatljiva, 4 – iznad proseka, 5 – odlična. Prikazani su rezultati za sva četiri seta alata i sve papire. Na slikama su manjim grafikonima prikazani odgovori ispitanika za svaku vrstu papira pojedinačno, a na većem grafikonu je prikazana ukupna ocena za sve papire zbirno. Odgovori ispitanika su prikazani procentualno. Zelenom bojom su predstavljene ocene za uzorke utisnute alatom od PLA materijala izrađenim FDM tehnikom štampe, a narandžastom bojom ocene ispitanika za uzorke utisnute konvencionalnim alatom.

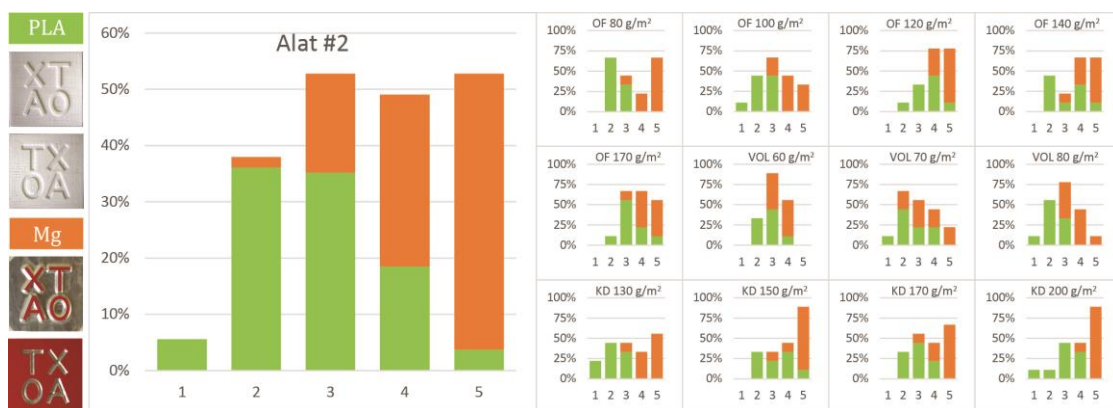
Na slici 8.21 prikazani su odgovori ispitanika za ocenu oštine ivica uzoraka utisnutih prvim setom alata.



Slika 8.21: Ocene ispitanika za parametar oštine ivica utisnutih uzoraka za prvi set alata

Ako se posmatraju ocene oštine ivica za svaki pojedinačni papir, uočava se da je konvencionalni alat kod svih papira imao najviše ocena 5 (odlična). Ispitanici su ocenili da je oština (jasnoća) ivica utisnutih elemenata ovim alatom bolja od uzoraka utisnutih FDM alatom. Uzorci utisnuti konvencionalnim alatom na nepremaznom i premaznom papiru su ocenjeni ocenom 5. Na voluminoznom papiru ocena ovog parametra je lošija (mod 4 – iznad proseka). Na nepremaznom papiru ni jedan uzorak nije ocenjen ocenom 1 (neprihvatljiva). Kod većih gramatura nepremaznog papira (120-170 g/m<sup>2</sup>) uzorci utisnuti FDM alatom imaju mod ukupnih ocena ispitanika – 3 (prihvatljiv). Na premaznom papiru gramatura 170 g/m<sup>2</sup> i 200 g/m<sup>2</sup> uzorci utisnuti FDM alatom imaju vrednost moda ukupnih ocena 4 (iznad proseka). Na voluminoznim papirima ima najmanje uzoraka ocenjenih ocenom 5 (odlična) u poređenju sa ostalim papirima. Konvencionalni alat proizvodi uzorke boljeg kvaliteta po pitanju oštine ivica u odnosu na FDM alat. Nepremazni i premazni papiri su se pokazali kao najpogodniji za utiskivanje FDM alatom i to na većim gramaturama. Gledajući zbirno sve papire, odnosno gledajući ocenu oštine ivica utisnutih elemenata prvim setom, konvencionalni alat ima mod ukupnih ocena 5 (odlična), dok FDM alat mod 3 (prihvatljiv).

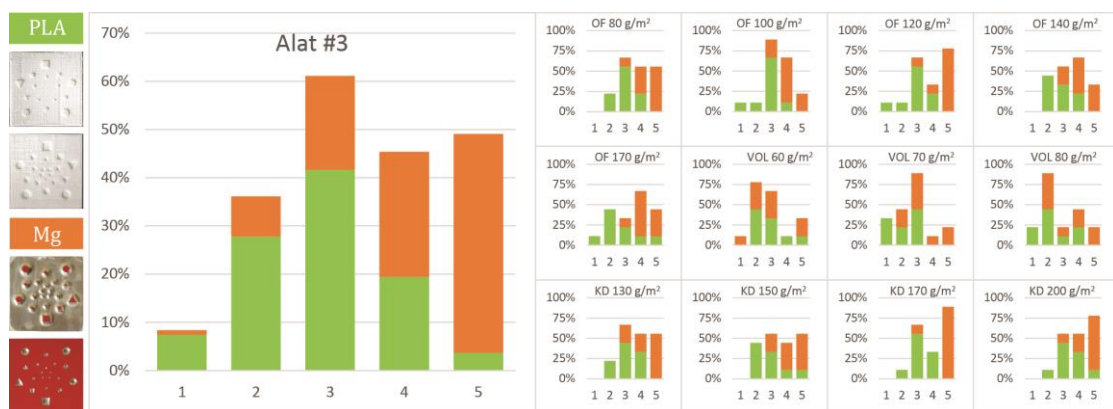
Na slici 8.22 prikazani su odgovori ispitanika za ocenu oštine ivica uzoraka utisnutih drugim setom alata.



Slika 8.22: Ocene ispitanika za parametar oštine ivica utisnutih uzoraka za drugi set alata

U slučaju drugog seta alata, ako se vrste papira posmatraju pojedinačno, uzorci utisnuti konvencionalnim alatom su u većini slučajeva ocenjeni ocenama u rasponu od 3 (prihvatljiva) do 5 (odlična). Najvišom ocenom uzorci utisnuti konvencionalnim alatom su ocenjeni u slučaju nepremaznog papira gramature 120 g/m<sup>2</sup> i premaznog papira gramature 200 g/m<sup>2</sup>. Uzorci utisnuti FDM alatom su ocenjeni ocenom 5 (odlična) na ofset papiru gramature 120 g/m<sup>2</sup> i 170 g/m<sup>2</sup> i premaznom papiru gramature 200 g/m<sup>2</sup>. Ako se posmatra zbirna ocena za sve vrste papira utisnute drugim setom alata, ispitanici su ocenili da konvencionalni alati proizvode oštrije ivice elemenata u odnosu na uzorke utisnute FDM alatom. Kod obe tehnike izrade alata primetne su niže ocene za drugi set alata. Vrednost moda ocene oštine ivice za uzorke utisnute FDM alatom iznosi 2 (ispod proseka), mada je približno isti broj odgovora sa ocenom 3 (prihvatljiva).

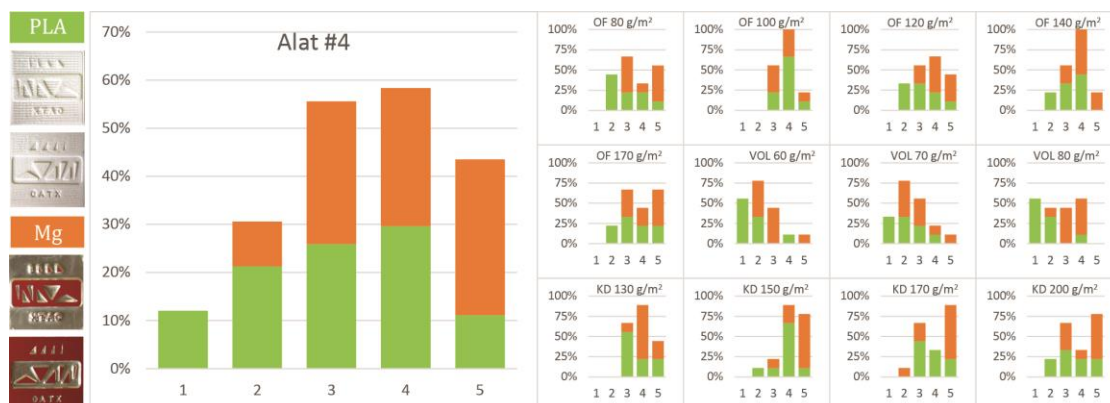
Na slici 8.23 prikazani su odgovori ispitanika za ocenu oštine ivica uzoraka utisnutih trećim setom alata.



Slika 8.23: Ocene ispitanika za parametar oštine ivica utisnutih uzoraka za treći set alata

Na slici 8.23 prikazani su rezultati ocene ispitanika za treći set alata. Ako se posmatra oština ivica utisnutih elemenata kod svakog papira pojedinačno, vrednost moda uzoraka utisnutih konvencionalnim alatom na nepremaznom papiru gramature 120 g/m<sup>2</sup> i premaznom papiru gramature 170 g/m<sup>2</sup> i 200 g/m<sup>2</sup> iznosi 5 (odlična). Uzorci utisnuti FDM alatom imali su vrednost moda 3 (odlična) na nepremaznom papiru gramature 80 g/m<sup>2</sup>, 100 g/m<sup>2</sup> i 120 g/m<sup>2</sup> i premaznom papiru gramature 130 g/m<sup>2</sup>, 170 g/m<sup>2</sup> i 200 g/m<sup>2</sup>. Vrednost moda ocene oština elemenata utisnutih na voluminoznom papiru imaju vrednost 2 (ispod proseka). Ako se svi papiri posmatraju

zbirno za treći set alata, uzorcima utisnutim FDM alatom vrednost moda ocena iznosi 3 (prihvatljiv), dok uzorcima utisnutim konvencionalnim vrednost moda ocena iznosi 5 (odlična). Na slici 8.24 prikazani su odgovori ispitanika za ocenu oštine ivica uzoraka utisnutih četvrtim setom alata.



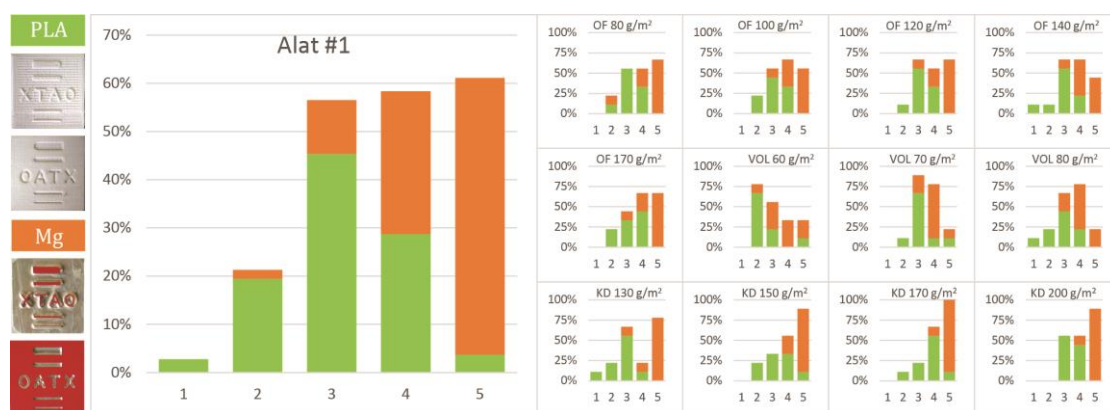
Slika 8.24: Ocene ispitanika za parametar oštine ivica utisnutih uzoraka za četvrti set alata

U slučaju četvrtog seta alata, kod uzoraka utisnutih konvencionalnim alatom mod ocene za nepremazne papire iznosi 4 (iznad proseka). Vrednost moda za voluminozne papire iznosi 2 (ispod proseka). U slučaju premaznih papira, vrednost moda za ocene oštine ivica iznosi 5 (odlična). Uzorci utisnuti na voluminoznom papiru ocenjeni su najnižim ocenama u slučaju oba alata. Po pitanju oštine ivica utisnutih elemenata u slučaju FDM alata vidljiva je bimodalnost ocena 3 (prihvatljiva) i ocena 4 (iznad proseka) kod nepremaznih papira. U slučaju voluminoznih papira vrednost moda iznosi 1 (neprihvatljiva, a premaznih 3 (prihvatljiva). Kada se analizira zbirna ocena za sve papire, u slučaju četvrtog seta uzorci utisnuti konvencionalnim alatima imaju vrednost moda oštine ivica 5 (odlična), a uzorci utisnuti FDM alatima vrednost moda 4 (iznad proseka).

#### Ocena ujednačenosti visine elemenata

Odgovori ispitanika po pitanju drugog parametra kvaliteta (ujednačenost visina utisnutih elemenata) prikazani su na slikama 8.25-8.28. Ocene na skali imaju sledeće vrednosti: 1 – neprihvatljiva, 2 – ispod proseka, 3 – prihvatljiva, 4 – iznad proseka, 5 – odlična. Prikazani su rezultati utiskivanja za sva četiri seta alata na svim papirima za obe tehnike izrade alata.

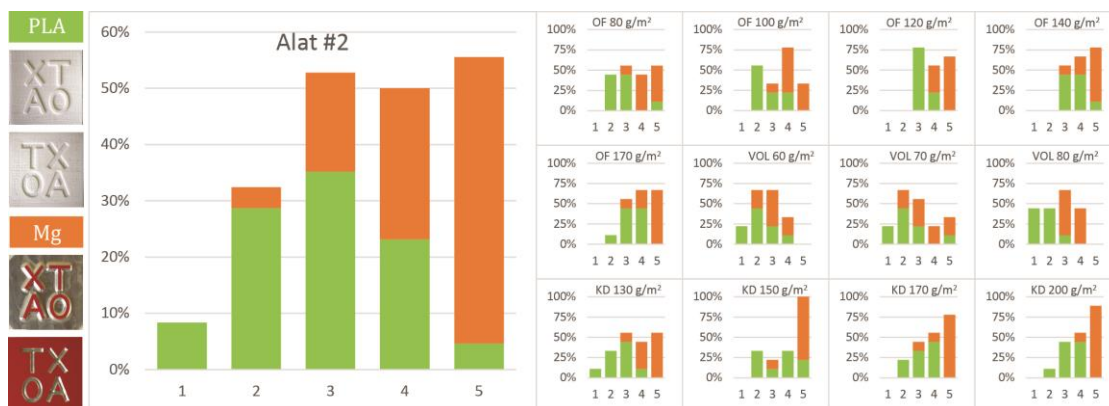
Na slici 8.25 su prikazani odgovori ispitanika za ocenu ujednačenosti visine elemenata uzoraka utisnutih prvim setom alata.



Slika 8.25: Ocene ispitanika za parametar ujednačenosti visine elemenata utisnutih uzoraka za prvi set alata

Ukoliko se posmatraju rezultati utiskivanja na pojedinačnim papirima, uzorci dobijeni utiskivanjem konvencionalnim alatima imaju vrednost moda ocena 5 (odlična) za nepremazne, mod 4 (iznad proseka) za voluminozne i mod 5 (odlična) za premazne papire. Uzorci dobijeni utiskivanjem FDM alatom imaju vrednost moda ocena 3 (prihvatljiva) u slučaju nepremaznih, mod 3 (prihvatljiva) kod voluminoznih mod 3 (prihvatljiva) i kod premaznih mod 4 (iznad proseka). Posmatrano zbirno sve papire u slučaju prvog seta alata, uzorci utisnuti konvencionalnim alatom imaju vrednost moda 5 (odlična) za ocenu ujednačenosti visine elemenata, dok uzorci utisnuti FDM alatima imaju vrednost moda 3 (prihvatljiva).

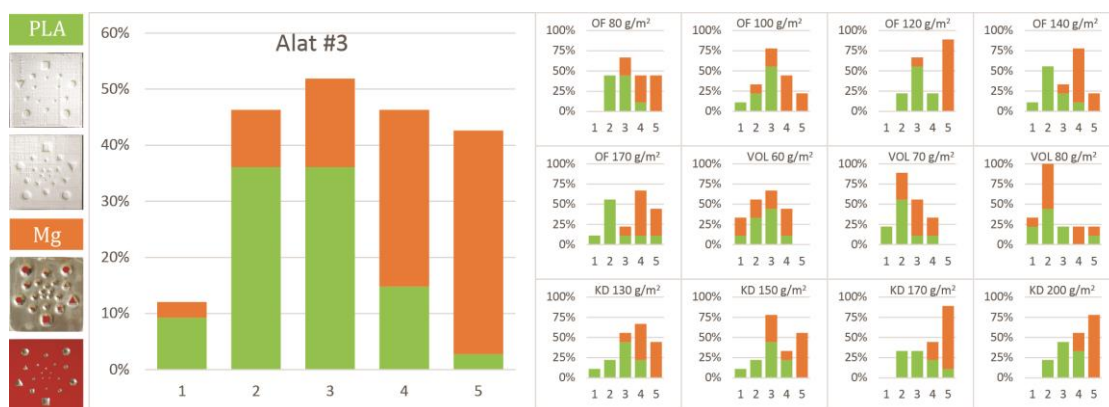
Na slici 8.26 su prikazani odgovori ispitanika za ocenu ujednačenosti visine elemenata uzoraka utisnutih drugim setom alata.



Slika 8.26: Ocene ispitanika za parametar ujednačenosti visine elemenata utisnutih uzoraka za drugi set alata

Ukoliko se posmatraju rezultati utiskivanja na pojedinačnim papirima u slučaju drugog seta alata, uzorci dobijeni utiskivanjem konvencionalnim alatima imaju vrednost moda ocena 5 (iznad proseka) za nepremazne, mod 3 (prihvatljiva) kod voluminoznih papira i mod 5 (odlična) za premazne papire. Uzorci dobijeni utiskivanjem FDM alatom imaju vrednost moda ocena 4 (iznad proseka) u slučaju nepremaznih, mod 2 (ispod proseka) kod voluminoznih i mod 4 (iznad proseka) i kod premaznih mod 3 (prihvatljiva). Posmatrano zbirno sve papire u slučaju drugog seta alata, uzorci utisnuti konvencionalnim alatom imaju vrednost moda 5 (odlična) za ocenu ujednačenosti visine elemenata, dok uzorci utisnuti FDM alatima imaju vrednost moda 3 (prihvatljiva).

Na slici 8.27 su prikazani odgovori ispitanika za ocenu ujednačenosti visine elemenata uzoraka utisnutih trećim setom alata.



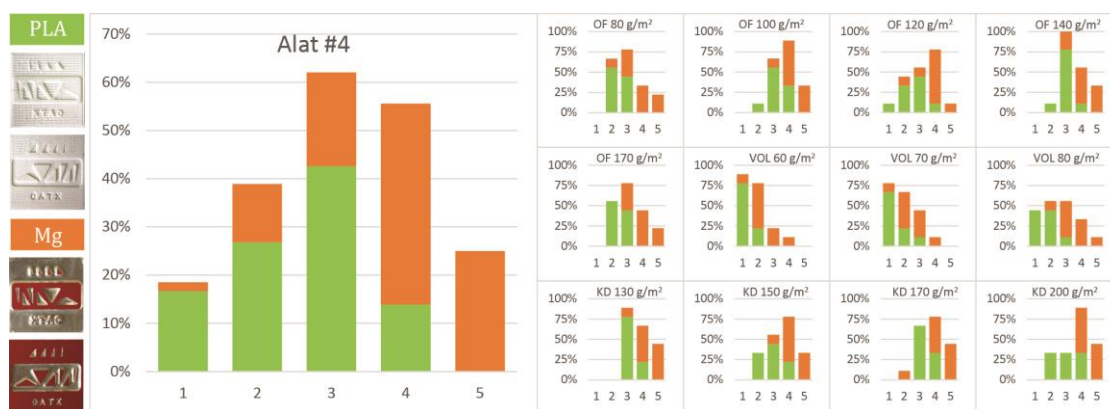
Slika 8.27: Ocene ispitanika za parametar ujednačenosti visine elemenata utisnutih uzoraka za treći set alata



Ukoliko se posmatraju rezultati utiskivanja na pojedinačnim papirima u slučaju trećeg seta alata, uzorci dobijeni utiskivanjem konvencionalnim alatima imaju vrednost moda ocena 4 (iznad proseka) za nepremazne, tri različite vrednosti moda (od 2 - ispod proseka do 4 – iznad proseka) za svaku gramaturu voluminoznih papira i mod 5 (odlična) za premazne papire. Uzorci dobijeni utiskivanjem FDM alatom imaju vrednost moda ocena 3 (prihvatljiva) u slučaju nepremaznih, mod 2 (ispod proseka) kod voluminoznih i mod 3 (prihvatljiva) kod premaznih papira.

Posmatrano zbirno sve papire u slučaju trećeg seta alata, uzorci utisnuti konvencionalnim alatom imaju vrednost moda 5 (odlična) za ocenu ujednačenosti visine elemenata, dok uzorci utisnuti FDM alatima imaju vrednost moda 3 (prihvatljiva).

Na slici 8.28 su prikazani odgovori ispitanika za ocenu ujednačenosti visine elemenata uzoraka utisnutih četvrtim setom alata.



Slika 8.28: Ocene ispitanika za parametar ujednačenosti visine elemenata utisnutih uzoraka za četvrti set alata

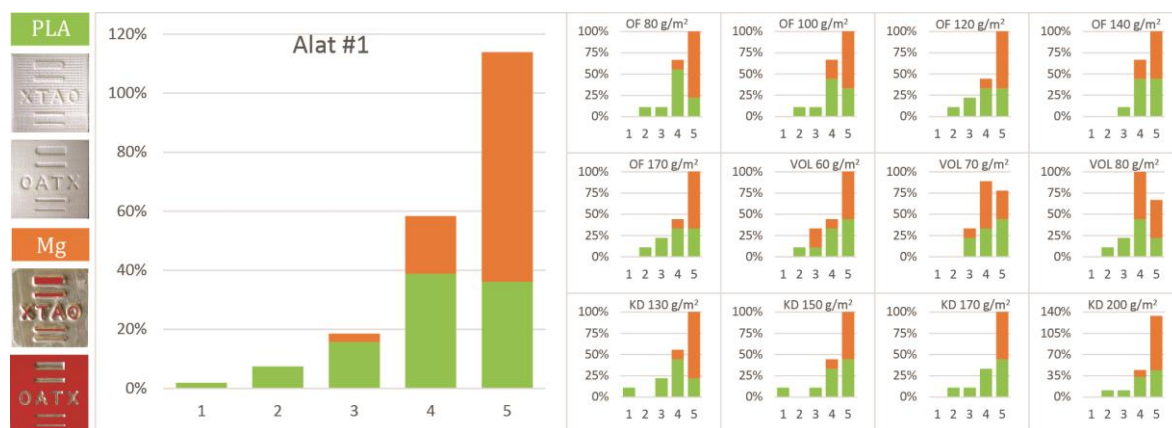
Ukoliko se posmatraju rezultati utiskivanja na pojedinačnim papirima u slučaju četvrtog seta alata, uzorci dobijeni utiskivanjem konvencionalnim alatima imaju vrednost moda ocena 4 (iznad proseka) za nepremazne, mod 2 (ispod proseka) za voluminozne papire i mod 4 (iznad proseka) za premazne papire. Uzorci dobijeni utiskivanjem FDM alatom imaju vrednost moda ocena 2 (ispod proseka) u slučaju nepremaznih, mod 1 (neprihvatljiva) kod voluminoznih i mod 3 (prihvatljiva) kod premaznih papira.

Posmatrano zbirno sve papire u slučaju četvrtog seta alata, uzorci utisnuti konvencionalnim alatom imaju vrednost moda 4 (iznad proseka) za ocenu ujednačenosti visine elemenata, dok uzorci utisnuti FDM alatima imaju vrednost moda 3 (prihvatljiva).

#### Ocene oštećenja papira na utisnutim elementima

Odgovori ispitanika po pitanju trećeg parametra kvaliteta prikazani su na slikama 8.29-8.32. Ocene oštećenja na skali imaju sledeće vrednosti: 1 – neprihvatljivo, 2 – izraženo, 3 – prihvatljivo, 4 – jedva vidljivo, 5 – bez oštećenja. Prikazani su rezultati za sva četiri seta alata na svim papirima.

Na slici 8.29 su prikazani odgovori ispitanika za ocenu oštećenja papira na elementima uzoraka utisnutih prvim setom alata.

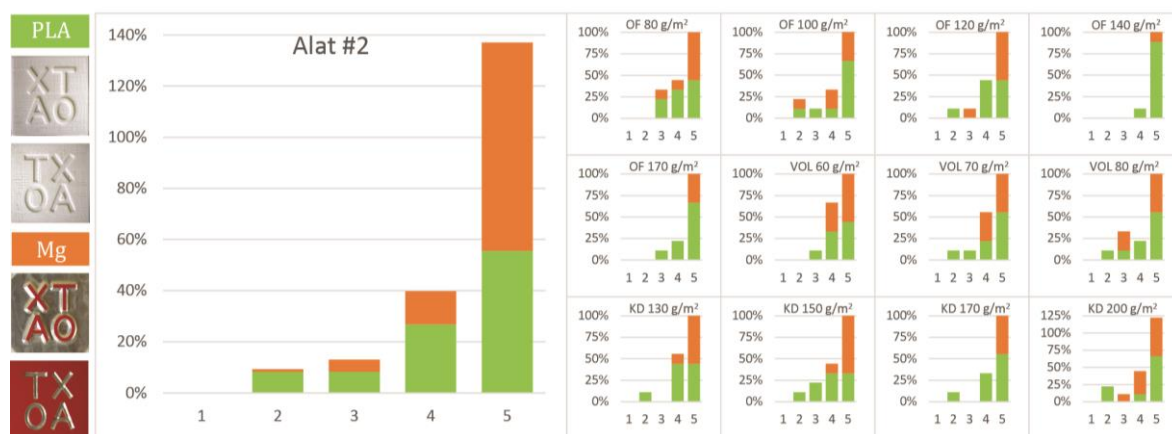


Slika 8.29: Ocene ispitanika za parametar oštećenja papira na elementima uzoraka utisnutih prvim setom alata

Ukoliko se posmatraju rezultati utiskivanja na pojedinačnim papirima u slučaju prvog seta alata, uzorci dobijeni utiskivanjem konvencionalnim alatima imaju vrednost moda za ocenu oštećenja na utisnutim elementima 5 (bez oštećenja) kod nepremaznih, mod 4 (jedva vidljivo) kod voluminoznih papira i mod 5 (bez oštećenja) kod premaznih papira. Uzorci dobijeni utiskivanjem FDM alatom imaju vrednost moda ocene oštećenja 4 (jedva vidljivo) u slučaju nepremaznih, mod 5 (bez oštećenja) kod voluminoznih i mod 5 (bez oštećenja) kod premaznih papira.

Posmatrano zbirno sve papire u slučaju prvog seta alata, uzorci utisnuti konvencionalnim alatom imaju vrednost moda 5 (bez oštećenja) za ocenu oštećenja na utisnutim elementima, dok uzorci utisnuti FDM alatima imaju vrednost moda 4 (jedva vidljivo).

Na slici 8.30 su prikazani odgovori ispitanika za ocenu oštećenja papira na elementima uzoraka utisnutih drugim setom alata.



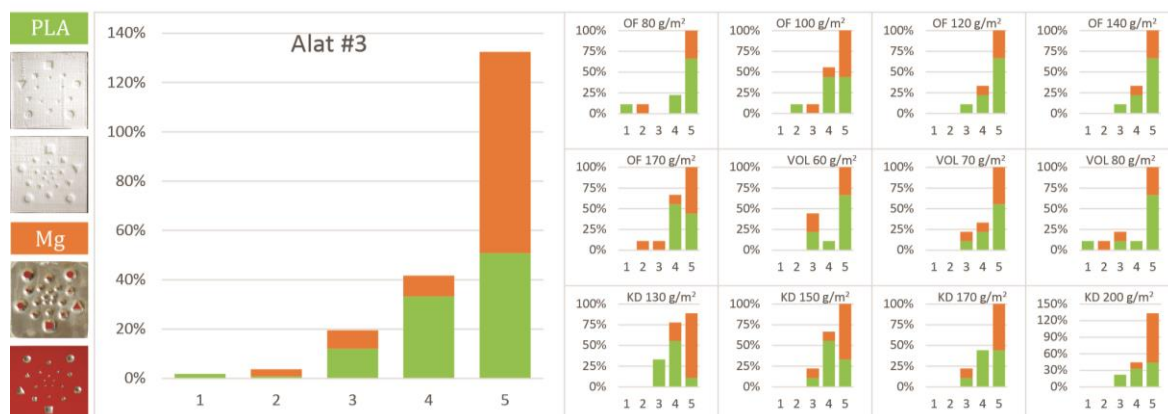
Slika 8.30: Ocene ispitanika za parametar oštećenja papira na elementima uzoraka utisnutih drugim setom alata

Ukoliko se posmatraju rezultati utiskivanja na pojedinačnim papirima u slučaju drugog seta alata, uzorci dobijeni utiskivanjem konvencionalnim alatima imaju vrednost moda za ocenu oštećenja na utisnutim elementima 5 (bez oštećenja) kod nepremaznih, mod 5 (bez oštećenja) kod voluminoznih papira i mod 5 (bez oštećenja) kod premaznih papira. Uzorci dobijeni utiskivanjem FDM alatom imaju vrednost moda ocene oštećenja 5 (bez oštećenja) u slučaju nepremaznih, mod 5 (bez oštećenja) kod voluminoznih i mod 5 (bez oštećenja) kod premaznih papira.



Posmatrano zbirno sve papire u slučaju drugog seta alata, uzorci utisnuti konvencionalnim alatom imaju vrednost moda 5 (bez oštećenja) za ocenu oštećenja na utisnutim elementima, dok uzorci utisnuti FDM alatima imaju vrednost moda 5 (bez oštećenja).

Na slici 8.31 su prikazani odgovori ispitanika za ocenu oštećenja papira na elementima uzoraka utisnutih trećim setom alata.

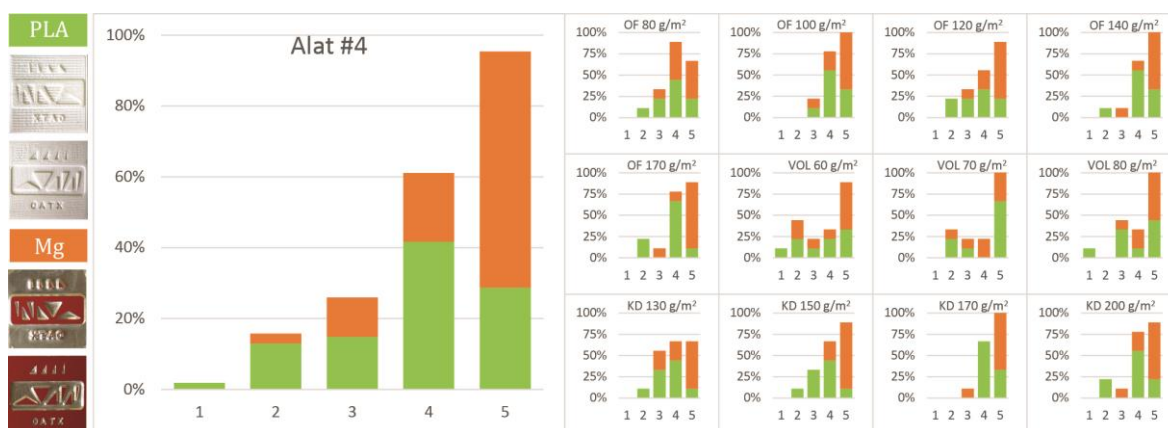


Slika 8.31: Ocene ispitanika za parametar oštećenja papira na elementima uzoraka utisnutih trećim setom alata

Ukoliko se posmatraju rezultati utiskivanja na pojedinačnim papirima u slučaju trećeg seta alata, uzorci dobijeni utiskivanjem konvencionalnim alatima imaju vrednost moda za ocenu oštećenja na utisnutim elementima 5 (bez oštećenja) kod nepremaznih, mod 5 (bez oštećenja) kod voluminoznih papira i mod 5 (bez oštećenja) kod premaznih papira. Uzorci dobijeni utiskivanjem FDM alatom imaju vrednost moda ocene oštećenja 5 (bez oštećenja) u slučaju nepremaznih, mod 5 (bez oštećenja) kod voluminoznih i mod 4 (jedva vidljivo) kod premaznih papira.

Posmatrano zbirno sve papire u slučaju trećeg seta alata, uzorci utisnuti konvencionalnim alatom imaju vrednost moda 5 (bez oštećenja) za ocenu oštećenja na utisnutim elementima, dok uzorci utisnuti FDM alatima imaju vrednost moda 5 (bez oštećenja).

Na slici 8.32 su prikazani odgovori ispitanika za ocenu oštećenja papira na elementima uzoraka utisnutih četvrtim setom alata.



Slika 8.32: Ocene ispitanika za parametar oštećenja papira na elementima uzoraka utisnutih četvrtim setom alata

Ukoliko se posmatraju rezultati utiskivanja na pojedinačnim papirima u slučaju četvrtog seta alata, uzorci dobijeni utiskivanjem konvencionalnim alatima imaju vrednost moda za ocenu oštećenja na utisnutim elementima 5 (bez oštećenja) kod nepremaznih, mod 5 (bez oštećenja) kod

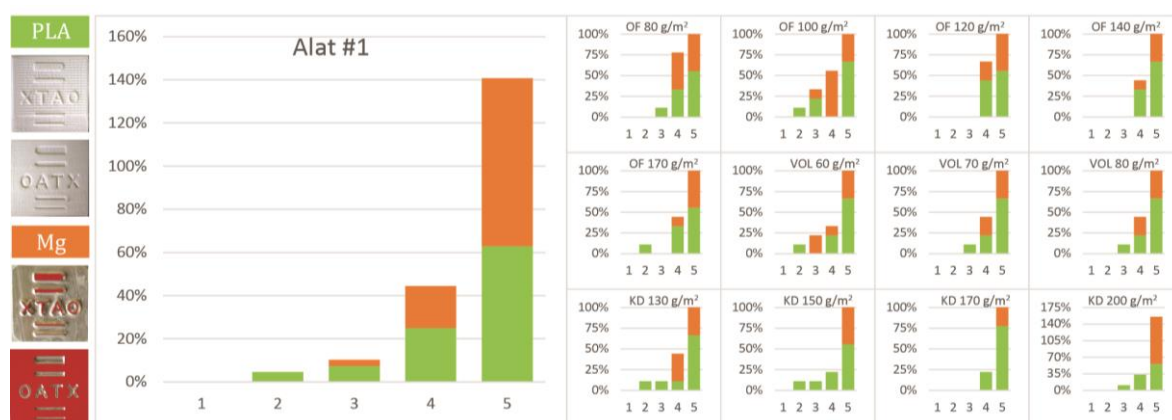
voluminoznih papira i mod 5 (bez oštećenja) kod premaznih papira. Uzorci dobijeni utiskivanjem FDM alatom imaju vrednost moda ocene oštećenja 4 (jedva vidljivo) u slučaju nepremaznih, mod 5 (bez oštećenja) kod voluminoznih i mod 4 (jedva vidljivo) kod premaznih papira.

Posmatrano zbirno sve papire u slučaju četvrtog seta alata, uzorci utisnuti konvencionalnim alatom imaju vrednost moda 5 (bez oštećenja) za ocenu oštećenja na utisnutim elementima, dok uzorci utisnuti FDM alatima imaju vrednost moda 4 (jedva vidljivo).

#### Ocene oštećenja papira oko utisnutih elemenata

Odgovori ispitanika po pitanju četvrtog parametra kvaliteta prikazani su na slikama 8.33-8.36. Ocene na skali imaju sledeće vrednosti: 1 – neprihvatljivo, 2 – izraženo, 3 – prihvatljivo, 4 – jedva vidljivo, 5 – bez oštećenja. Prikazani su rezultati za sva četiri seta alata za sve papire.

Na slici 8.33 su prikazani odgovori ispitanika za ocenu oštećenja papira oko elemenata uzoraka utisnutih prvim setom alata.

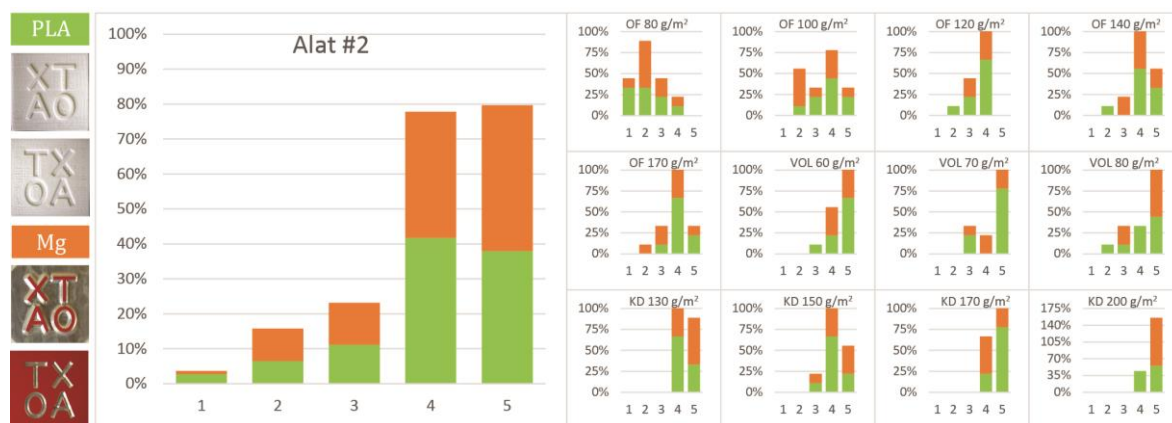


Slika 8.33: Ocene ispitanika za parametar oštećenja papira oko elemenata uzoraka utisnutih prvim setom alata

Ukoliko se posmatraju rezultati utiskivanja na pojedinačnim papirima u slučaju prvog seta alata, uzorci dobijeni utiskivanjem konvencionalnim alatima imaju vrednost moda za ocenu oštećenja papira oko utisnutih elementa 5 (bez oštećenja) kod nepremaznih, mod 5 (bez oštećenja) kod voluminoznih papira i mod 5 (bez oštećenja) kod premaznih papira. Uzorci dobijeni utiskivanjem FDM alatom imaju vrednost moda ocene oštećenja 5 (bez oštećenja) u slučaju nepremaznih, mod 5 (bez oštećenja) kod voluminoznih i mod 5 (jedva vidljivo) kod premaznih papira.

Posmatrano zbirno sve papire u slučaju prvog seta alata, uzorci utisnuti konvencionalnim alatima imaju vrednost moda 5 (bez oštećenja) za ocenu oštećenja oko utisnutih elementa, dok uzorci utisnuti FDM alatima imaju vrednost moda 5 (bez oštećenja).

Na slici 8.34 su prikazani odgovori ispitanika za ocenu oštećenja papira oko elemenata uzoraka utisnutih drugim setom alata.

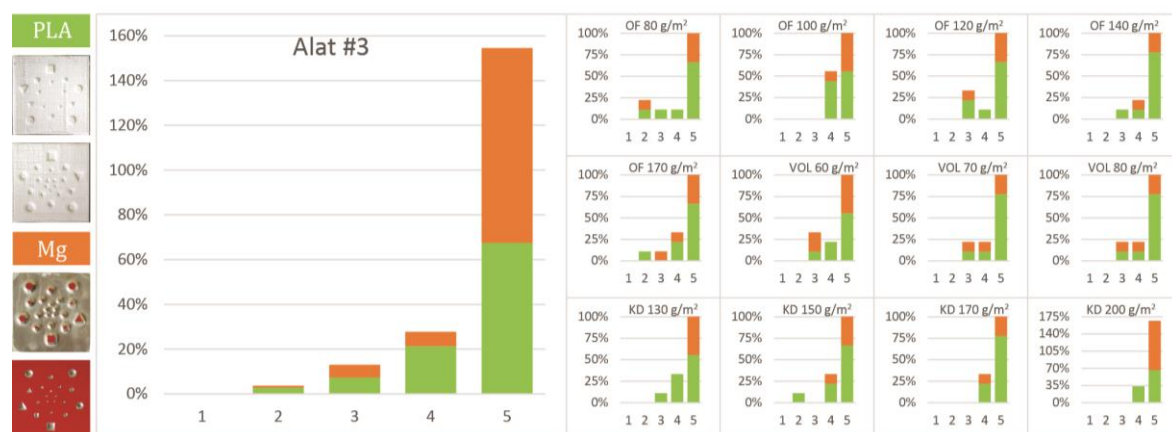


Slici 8.34: Ocene ispitanika za parametar oštećenja papira oko elemenata uzoraka utisnutih drugim setom alata

Ukoliko se posmatraju rezultati utiskivanja na pojedinačnim papirima u slučaju drugog seta alata, uzorci dobijeni utiskivanjem konvencionalnim alatima imaju vrednost moda za ocenu oštećenja papira oko utisnutih elementa 4 (jedva vidljivo) kod nepremaznih, mod 4 (jedva vidljivo) kod voluminoznih papira i mod 5 (bez oštećenja) kod premaznih papira. Uzorci dobijeni utiskivanjem FDM alatom imaju vrednost moda ocene oštećenja 4 (jedva vidljivo) u slučaju nepremaznih, mod 5 (bez oštećenja) kod voluminoznih i bimodalnost sa vrednostima 4 (jedva vidljivo) i 5 (bez oštećenja) kod premaznih papira.

Posmatrano zbirno sve papire u slučaju drugog seta alata, uzorci utisnuti konvencionalnim alatom imaju vrednost moda 5 (bez oštećenja) za ocenu oštećenja oko utisnutih elementa, dok uzorci utisnuti FDM alatom imaju vrednost moda 4 (jedva vidljivo).

Na slici 8.35 su prikazani odgovori ispitanika za ocenu oštećenja papira oko elemenata uzoraka utisnutih trećim setom alata.



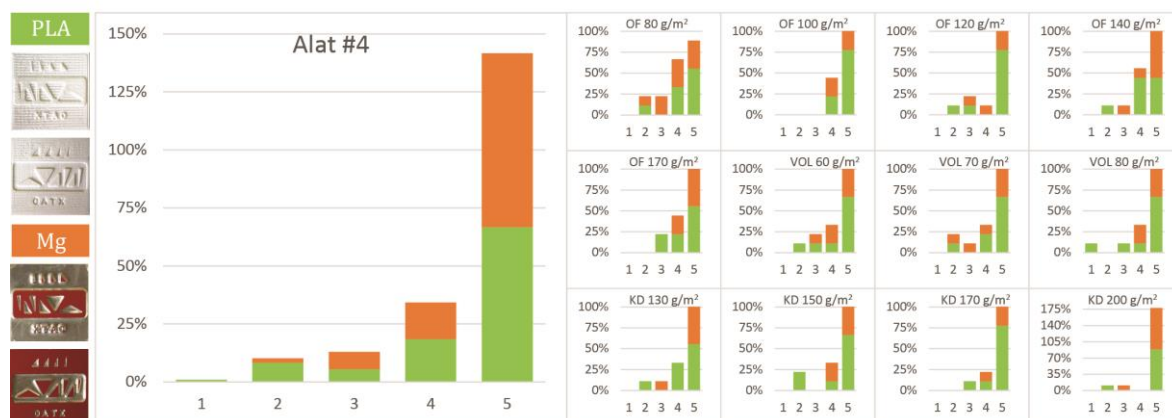
Slika 8.35: Ocene ispitanika za parametar oštećenja papira oko elemenata uzoraka utisnutih trećim setom alata

Ukoliko se posmatraju rezultati utiskivanja na pojedinačnim papirima u slučaju trećeg seta alata, uzorci dobijeni utiskivanjem konvencionalnim alatima imaju vrednost moda za ocenu oštećenja papira oko utisnutih elementa 5 (bez oštećenja) kod nepremaznih, mod 5 (bez oštećenja) kod voluminoznih papira i mod 5 (bez oštećenja) kod premaznih papira. Uzorci dobijeni utiskivanjem

FDM alatom imaju vrednost moda ocene oštećenja 5 (bez oštećenja) u slučaju nepremaznih, mod 5 (bez oštećenja) kod voluminoznih i mod 5 (jedva vidljivo) kod premaznih papira.

Posmatrano zbirno sve papire u slučaju trećeg seta alata, uzorci utisnuti konvencionalnim alatom imaju vrednost moda 5 (bez oštećenja) za ocenu oštećenja oko utisnutih elementa, dok uzorci utisnuti FDM alatima imaju vrednost moda 5 (bez oštećenja).

Na slici 8.36 su prikazani odgovori ispitanika za ocenu oštećenja papira oko elemenata uzoraka utisnutih četvrtim setom alata.



Slika 8.36: Ocene ispitanika za parametar oštećenja papira oko elemenata uzoraka utisnutih četvrtim setom alata

Ukoliko se posmatraju rezultati utiskivanja na pojedinačnim papirima u slučaju četvrtog seta alata, uzorci dobijeni utiskivanjem konvencionalnim alatima imaju vrednost moda za ocenu oštećenja papira oko utisnutih elementa 5 (bez oštećenja) kod nepremaznih, mod 5 (bez oštećenja) kod voluminoznih papira i mod 5 (bez oštećenja) kod premaznih papira. Uzorci dobijeni utiskivanjem FDM alatom imaju vrednost moda ocene oštećenja 5 (bez oštećenja) u slučaju nepremaznih, mod 5 (bez oštećenja) kod voluminoznih i mod 5 (jedva vidljivo) kod premaznih papira.

Posmatrano zbirno sve papire u slučaju četvrtog seta alata, uzorci utisnuti konvencionalnim alatom imaju vrednost moda 5 (bez oštećenja) za ocenu oštećenja oko utisnutih elementa, dok uzorci utisnuti FDM alatima imaju vrednost moda 5 (bez oštećenja).

Odgovori ispitanika na pitanje o ukupnom kvalitetu posmatranih uzorka na osnovu prethodnih parametara prikazani su na slikama 8.37-8.40. Ocene na skali imaju sledeće vrednosti: 1 – neprihvatljiv kvalitet, 2 – prihvatljiv kvalitet, 3 – odličan kvalitet. Prikazani su rezultati za sva četiri seta alata i sve papire.

Na slici 8.37 su prikazani odgovori ispitanika za ocenu ukupnog kvaliteta uzorka utisnutih prvim setom alata.



Slika 8.37: Ocene ispitanika za parametar ukupnog kvaliteta uzorka utisnutih prvim setom alata

Ukoliko se posmatraju rezultati utiskivanja na pojedinačnim papirima u slučaju prvog seta alata, uzorci dobijeni utiskivanjem konvencionalnim alatima imaju vrednost moda za ocenu ukupnog kvaliteta utisnutih uzoraka 3 (odličan kvalitet) za sve vrste papira. Uzorci dobijeni utiskivanjem FDM alatima imaju vrednost moda ocene ukupnog kvaliteta 2 (prihvatljiv kvalitet) u slučaju nepremazanih, mod 3 (odličan kvalitet) kod voluminoznih i mod 3 (odličan kvalitet) kod premazanih papira.

Posmatrano zbirno sve papire u slučaju prvog seta alata, uzorci utisnuti konvencionalnim alatima imaju vrednost moda 3 (odličan kvalitet) za ocenu ukupnog kvaliteta utisnutih uzoraka, dok uzorci utisnuti FDM alatima imaju vrednost moda 2 (prihvatljiv kvalitet).

Na slici 8.38 su prikazani odgovori ispitanika za ocenu ukupnog kvaliteta uzorka utisnutih drugim setom alata.



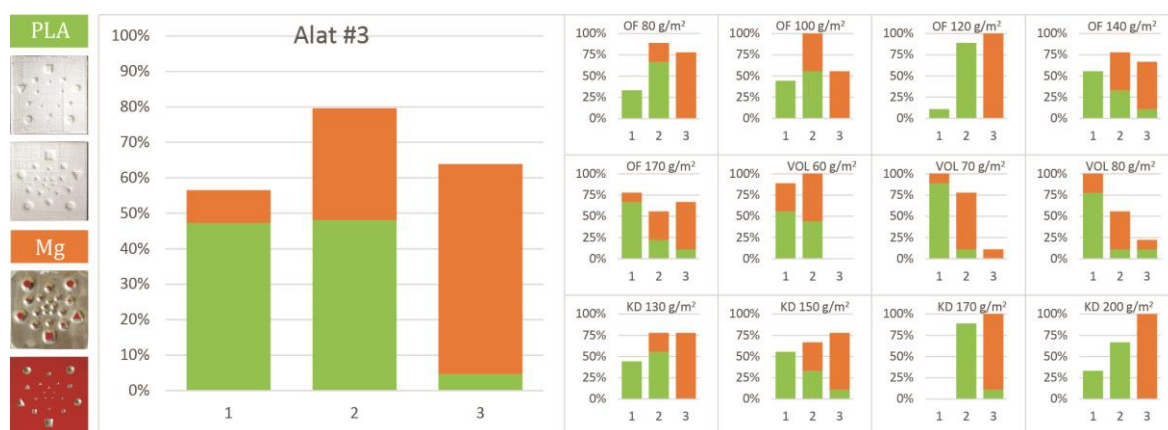
Slika 8.38: Ocene ispitanika za parametar ukupnog kvaliteta uzorka utisnutih drugim setom alata



Ukoliko se posmatraju rezultati utiskivanja na pojedinačnim papirima u slučaju drugog seta alata, uzorci dobijeni utiskivanjem konvencionalnim alatima imaju vrednost moda za ocenu ukupnog kvaliteta utisnutih uzoraka 3 (odličan kvalitet) za nepremazne papire, mod 2 (prihvatljiv kvalitet) za voluminozne papire i mod 3 (odličan kvalitet) za premazne papire. Uzorci dobijeni utiskivanjem FDM alatom imaju vrednost moda ocene ukupnog kvaliteta 2 (prihvatljiv kvalitet) u slučaju nepremaznih, mod 1 (neprihvatljiv kvalitet) kod voluminoznih i mod 2 (prihvatljiv kvalitet) kod premaznih papira.

Posmatrano zbirno sve papire u slučaju drugog seta alata, uzorci utisnuti konvencionalnim alatom imaju vrednost moda 3 (odličan kvalitet) za ocenu ukupnog kvaliteta utisnutih uzoraka, dok uzorci utisnuti FDM alatima imaju vrednost moda 2 (prihvatljiv kvalitet).

Na slici 8.39 su prikazani odgovori ispitanika za ocenu ukupnog kvaliteta uzoraka utisnutih trećim setom alata.



Slika 8.39: Ocene ispitanika za parametar ukupnog kvaliteta uzoraka utisnutih trećim setom alata

Ukoliko se posmatraju rezultati utiskivanja na pojedinačnim papirima u slučaju trećeg seta alata, uzorci dobijeni utiskivanjem konvencionalnim alatima imaju vrednost moda za ocenu ukupnog kvaliteta utisnutih uzoraka 3 (odličan kvalitet) za nepremazne papire, mod 2 (prihvatljiv kvalitet) za voluminozne papire i mod 3 (odličan kvalitet) za premazne papire. Uzorci dobijeni utiskivanjem FDM alatom imaju vrednost moda ocene ukupnog kvaliteta 2 (prihvatljiv kvalitet) u slučaju nepremaznih, mod 1 (neprihvatljiv kvalitet) kod voluminoznih i mod 2 (prihvatljiv kvalitet) kod premaznih papira.

Posmatrano zbirno sve papire u slučaju trećeg seta alata, uzorci utisnuti konvencionalnim alatom imaju vrednost moda 3 (odličan kvalitet) za ocenu ukupnog kvaliteta utisnutih uzoraka, dok uzorci utisnuti FDM alatima imaju vrednost moda 2 (prihvatljiv kvalitet).

Na slici 8.40 su prikazani odgovori ispitanika za ocenu ukupnog kvaliteta uzoraka utisnutih četvrtim setom alata.





Slika 8.40: Ocene ispitanika za parametar ukupnog kvaliteta uzoraka utisnutih četvrtim setom alata

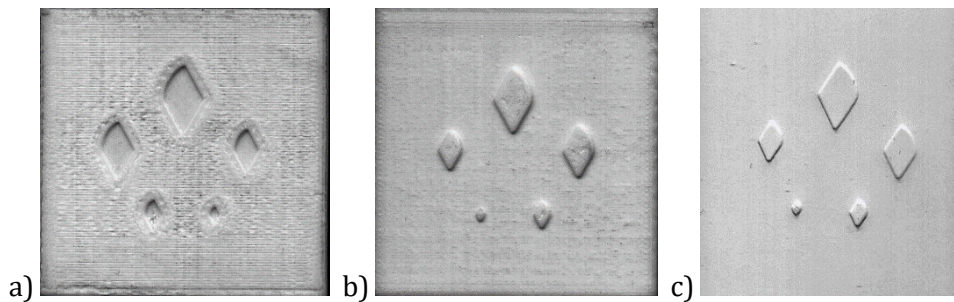
Ukoliko se posmatraju rezultati utiskivanja na pojedinačnim papirima u slučaju četvrtog seta alata, uzorci dobijeni utiskivanjem konvencionalnim alatima imaju vrednost moda za ocenu ukupnog kvaliteta utisnutih uzoraka 3 (odličan kvalitet) za nepremazne papire, mod 2 (prihvatljiv kvalitet) za voluminozne papire i mod 3 (odličan kvalitet) za premazne papire. Uzorci dobijeni utiskivanjem FDM alatima imaju vrednost moda ocene ukupnog kvaliteta 2 (prihvatljiv kvalitet) u slučaju nepremaznih, mod 1 (neprihvatljiv kvalitet) kod voluminoznih i mod 2 (prihvatljiv kvalitet) kod premaznih papira.

Posmatrano zbirno sve papire u slučaju četvrtog seta alata, uzorci utisnuti konvencionalnim alatima imaju vrednost moda 3 (odličan kvalitet) za ocenu ukupnog kvaliteta utisnutih uzoraka, dok uzorci utisnuti FDM alatima imaju vrednost moda 2 (prihvatljiv kvalitet).

## 8.9 Ispitivanje otpornosti alata za utiskivanje na habanje pri korišćenju

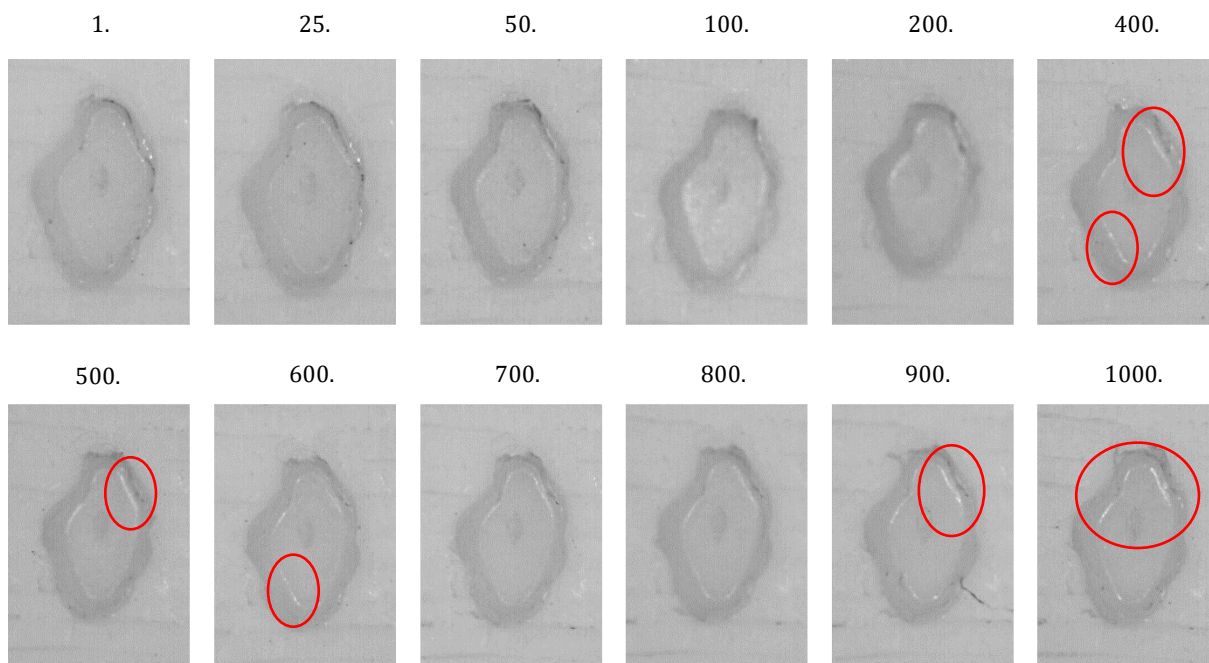
Jedan od zahteva postavljen pred alate za utiskivanje je otpornost na habanje u toku njegove eksploatacije, pa je upravo ovu osobinu alata izrađenih FDM tehnikom štampe neophodno istražiti. Ovim istraživanjem se stiče uvid u maksimalne tiraže koji FDM alati mogu da izdrže bez oštećenja na elementima za utiskivanje i bez promena na utisnutim uzorcima. Za ovaj eksperiment konstruisan je alat opisan u Poglavlju 7.11. Posle prvog, 25, 50, 100, 200, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000. utiskivanja, skenirani su alati i utisnuti papiri, kako bi se odredilo da li je došlo do njihovog oštećenja. Očekivano je da alati izrađeni FDM tehnikom mogu dostići do 1000. utiskivanja bez oštećenja, što ih čini adekvatnim za personalizovanu proizvodnju malih serija.

Na slikama 8.41a-c prikazan je primer skenirane matrice, patrice i utisnutog papira posle 25. utiskivanja. Na osnovu skeniranih slika i slika snimljenih digitalnim mikroskopom donošena je odluka o nastavku ili prekidu eksperimenta, na osnovu eventualnih oštećenja. Cilj je bio da se proveriti da li je moguće postići 1000 utisnutih uzoraka bez vidljivih oštećenja na ivicama alata ili utisnutim elementima na papiru.



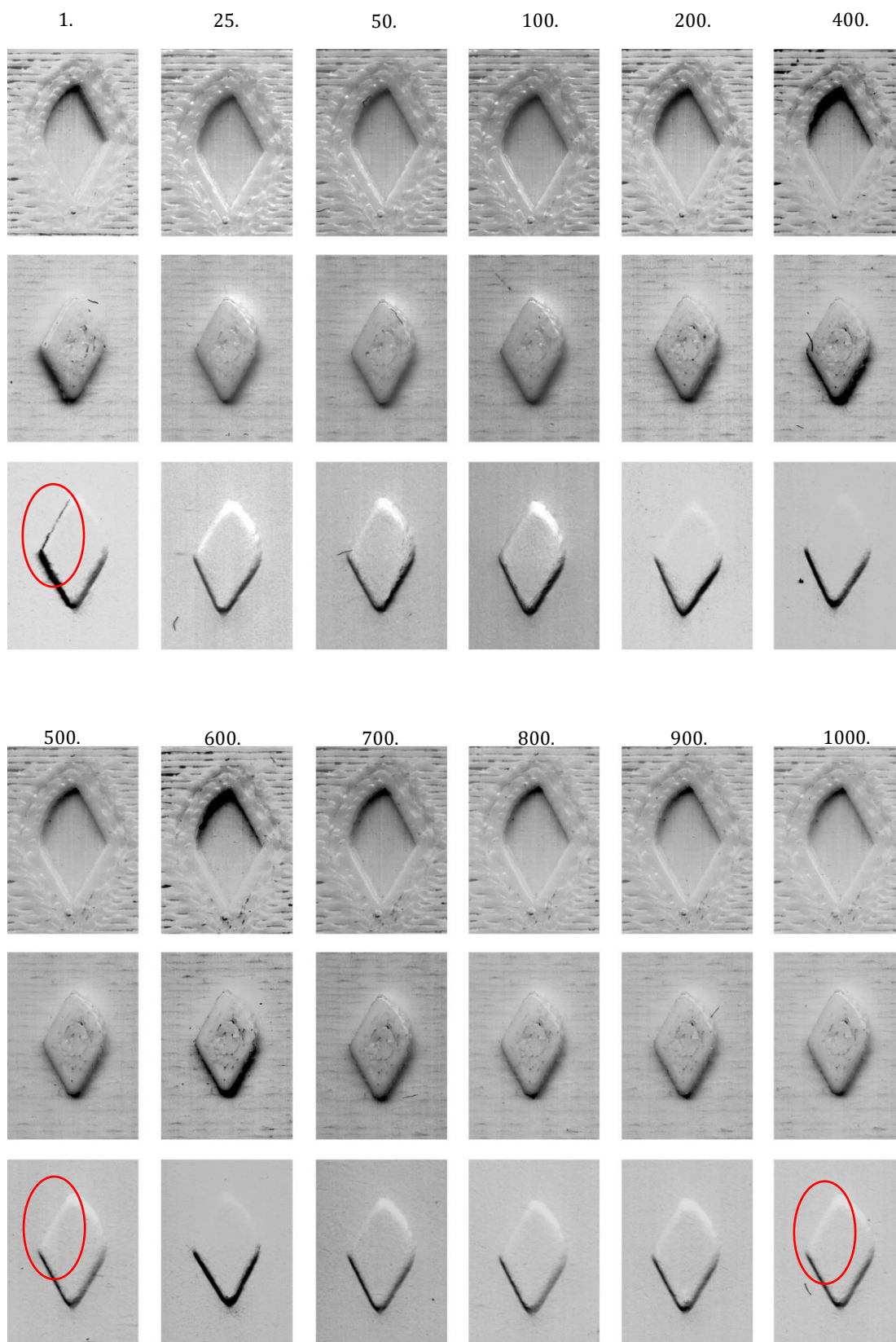
Slika 8.41: Izgled alata za testiranje otpornosti na oštećenja a) matrica, b) patrica i c) izgled utisnutih elemenata na papiru posle 25. utiskivanja

Na slici 8.42 prikazan je najsitniji element dužine 2 mm od prvog do 1000. utiskivanja, jer su se na njemu očekivale najveće promene ili njegova potpuna degradacija. Snimci su napravljeni digitalnim USB mikroskopom ViTiny VT 300 u monohromatskom režimu rada pri uveličanju od 10x. Ukoliko je primetna bilo kakva promena oblika ili oštećenje ivica, značilo bi da u tom momentu staje eksperiment, a postignuti tiraž je definisan kao maksimalni koji se alatom za utiskivanje izrađenim FDM tehnikom 3D štampe može postići.



Slika 8.42: Mikroskopski snimci najsitnijeg elementa dužine 2 mm posle 25, 50, 100, 200, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000-og utiskivanja urađeni digitalnim USB mikroskopom ViTiny VT300. Zaokružene su vidljive promene na ivicama alata

Na slici 8.42 se vidi da do 500. utiskivanja nisu uočljive bilo kakve promene oblika. Tek od 500. utiskivanja počinje da se pojavljuje zaobljena ivica vidljiva kroz pojavljivanje sjaja ivice elementa alata, pri tome ne menjajući rezultat utiskivanja, pa je odlučeno da se nastavi sa eksperimentom. Posle 900. i 1000. utiskivanja sjaj ivica na elementu alata je izraženiji. Sjajne ivice ovih elemenata su verovatno posledica trošenja alata prilikom eksploatacije. S obzirom na to da je za utiskivanje odabran premazni papir gramature 200 g/m<sup>2</sup>, moguće je da je sloj premaza, zbog svoje tvrdoće, uticao da se ove ivice uglačaju. Međutim, utisnuti uzorci nisu pretrpeli značajne vidljive promene ni nakon 1000. utiskivanja. Na slici 8.43 dat je prikaz elementa alata (matrice i patrice) dužine 4 mm i utisnutog papira, kako bi se utvrdilo da li je došlo do vidljivih promena na sledećem većem elementu. Ovi snimci su skenirani ravnim skenerom Canon CanoScan 5600F, pri rezoluciji od 1200 spi u monohromatskom režimu rada.



*Slika 8.43: Skenirani snimci elementa dužine 4 mm posle 25, 50, 100, 200, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000-og utiskivanja. Zaokružene su vidljive promene na ivicama utisnutih elemenata*

Na snimcima prikazanim slikom 8.43 ne uočavaju se primetne razlike na samim ivicama elemenata alata kao što je bio slučaj kod najsitnijih elemenata. Međutim, ako se pogledaju utisnuti uzorci, mogu se videti određene promene (obeležene crvenim okvirom). Vidi se da je kod prvih 500 uzoraka na određenim mestima došlo do neznatnog oštećenja ivica, dok posle 500.

utiskivanja ta oštećenja nestaju, obzirom da alatu nije obrađena površina nakon štampe. Posle 500. uzorka čak je poboljšan izgled utisnutih elemenata na papiru. Naravno, ovo je prihvatljivo samo do određene granice. Previše zaobljene ivice utisnutih elemenata bi znatno uticale na doživljeni kvalitet utisnutih uzoraka. Detaljno istraživanje razlike između utisnutih papira je prikazano u Poglavlju 8.8.2.

#### 8.9.1 Ocena otpornosti na habanje alata za utiskivanje prilikom upotrebe

Nakon dela eksperimenta u kom su ispitanici ocenjivali kvalitet utisnutih uzoraka dobijenih alatima za utiskivanje, dati su im i uzorci utisnuti alatom za testiranje otpornosti na oštećenja. Ispitanici su imali zadatak da se izjasne da li uočavaju bilo kakvu razliku između šest utisnutih uzoraka. U tabeli 8.32 prikazano je šest odabranih uzoraka utisnutih alatom za testiranje otpornosti na habanje koji su prikazivani ispitanicima i redni broj utiskivanja svakog od njih.

Tabela 8.32: Šest odabranih uzoraka utisnutih alatom za testiranje otpornosti na habanje i redni broj utiskivanja svakog od njih prikazivan ispitanicima

Uzorak	Redni broj utiskivanja
A	1.
B	800.
C	400.
D	600.
E	1000.
F	200.

Četiri od devet ispitanika je odgovorilo da ne vidi nikakve razlike između utisnutih uzoraka. Ostalih pet ispitanika, s obzirom da su uočili razlike između prikazanih uzoraka, dobili su zadatak da poređaju uzorke određenim redosledom. U tabeli 8.33 prikazani su odgovori ispitanika koji su primetili određene razlike između uzoraka i redosled po kojem su ih poređali.

Tabela 8.33 Odgovori ispitanika koji su uočili razliku između utisnutih uzoraka

Ispitanik #	Kriterijum	Niz uzoraka					
		B	D	A	C	F	E
1	Krzavost ivica	B	D	A	C	F	E
2	vidljivost	A	C	B	D	E	F
3	Oštrina i dubina elemenata	D	A	B	E	C	F
4	Ivice uzorka A su krzavije od uzorka B						
5	Uzorak F ima najmanju oštrinu utisnutih elemenata						

Analizom dobijenih rezultata zaključuje se da su ispitanici percipirali razlike na osnovu različitih kriterijuma i da je za uzorak F više njih uočio određenu razliku u odnosu na ostale. Međutim ova razlika nema nikakve veze sa rednim brojem utiskivanja, s obzirom da se radi o 200. utisnutom uzorku. Jedan ispitanik je postavio uzorak E (1000.) na poslednje mesto niza, ali ni taj rezultat se ne može uzeti u obzir s obzirom da je na početku niza postavljen uzorak pod rednim brojem 800.



## 9. DISKUSIJA

Diskusija rezultata izvedenih eksperimenata biće predstavljena kroz tematske celine u cilju jednostavnijeg praćenja.

### 9.1 Karakterizacija papirnih materijala za utiskivanje

Radi sticanja uvida u osobine papirnih materijala koji će biti korišćeni u procesu utiskivanja i proceni kvaliteta utisnutih elemenata urađena je karakterizacija mehaničkih osobina papira, tačnije testiranje zatezne čvrstoće. Za ovaj eksperiment odabrani su nepremazni, premazni i voluminozni papiri različitih gramatura.

#### 9.1.1 Uticaj smera vlakana na zateznu čvrstoću i izduženje

Uočena je zavisnost zatezne čvrstoće od ugla koji vlakna zaklapaju sa pravcem delovanja zatezne sile na osnovu rezultata prikazanih u tabelama 8.1, 8.2 i 8.3. Najveće vrednosti zatezne čvrstoće primetne su kod svih testiranih papira i gramatura pri uglu vlakana od 0° (MD smer) u odnosu na pravac delovanja sile, što je i očekivano s obzirom da se istežu sama vlakna koja pružaju veći otpor silama istezanja. U slučaju orijentacije vlakana pod uglom od 90°, tj. normalnim na pravac delovanja sile zatezanja (CD pravac), svi testirani uzorci su pokazali najnižu vrednost zatezne čvrstoće, što je takođe očekivano s obzirom se sili zatezanja ne suprotstavlja struktura vlakna već veze koje su formirane između njih. Ovo je u skladu sa rezultatima iz prethodnih istraživanja (Yokoyama i sardnici, 2007, Yokoyama i sardnici, 2009; Yokoyama i Nakai, 2010; ). Pored uglova od 0° i 90°, sto odgovaraju MD i CD smeru vlakana, izvršeno je i ispitivanje zatezne čvrstoće i izduženja pod uglovima 20°, 45° i 70°, radi utvrđivanja karakterističnih razlika u pomenutim parametrima koji bi imali direktan uticaj na ponašanje odabranih papirnih uzoraka u toku utiskivanja. Radi preglednosti analize su grupisane po vrstama ispitanih papira.

#### Nepremazni papiri

Uzorci sa orijentacijom vlakana od 20° u odnosu na osu zatezanja imaju manje srednje vrednosti zatezne čvrstoće u odnosu na papire sa MD smerom vlakana. Ova razlika se kreće u rasponu od 0,293 N/mm do 1,633 N/mm (za 3%-29,5% manje). Uzorci sa smerom vlakana od 45° imaju srednje vrednosti zatezne čvrstoće u odnosu na papire sa vlaknima u MD smeru u rasponu od 1,76 N/mm do 3,178 N/mm (24,5%-57,5%). Razlika srednjih vrednosti zatezne čvrstoće papira sa CD smerom vlakana i papira sa vlaknima raspoređenim pod uglom od 45° bila je u rasponu od 0,538 N/mm do 1,583 N/mm (22%-27,5%). Ovi rezultati ukazuju da papiri sa smerom vlakana od 45° imaju zateznu čvrstoću manju od papira sa vlaknima pod uglom od 20° i 0°, a veću od zatezne čvrstoće papira sa uglom vlakana od 70° i 90°, međutim približniju zateznoj čvrstoći papira sa vlaknima pod 90°. Uzorci sa orijentacijom vlakana od 70° pokazuju veće srednje vrednosti zatezne čvrstoće u poređenju sa papirima sa vlaknima raspoređenim pod uglom od 90° sem u slučaju papira gramature 80 g/m<sup>2</sup>. Razlike vrednosti zatezne čvrstoće se kreću u opsegu od 0,075 N/mm do 0,507 N/mm (3,1%-12%).

Srednje vrednosti izduženja kod papira sa uglom vlakana od 20° u odnosu na osu zatezanja su veće u odnosu na papire sa vlaknima u MD smeru. Razlika u srednjim vrednostima izduženja između ove dve orijentacije vlakana iznosi od 0,069% do 0,384% (za 4,3%-17% veće). Papiri sa vlaknima pod uglom od 45° imaju srednje vrednosti izduženja veće u odnosu na papire sa vlaknima u MD smeru, a kreću se u rasponu od 0,604% do 1,787% (za 20%-49% veće). U poređenju sa papirima sa CD smerom vlakana, papiri sa uglom vlakana pod 45° imaju manje vrednosti izduženja, a razlike srednjih vrednosti izduženja kreću su se u rasponu od 0,879% do



2,422% (za 26%-42% manje). Ovo ukazuje da papiri sa smerom vlakana od 45° imaju srednje vrednosti izduženja približnije papirima sa vlaknima u CD smeru. Kod papira sa vlaknima raspoređenim pod uglom od 70° srednje vrednosti izduženja su u većini slučajeva manje, posmatrane u odnosu na papire sa vlaknima u CD smeru, a kreću se u rasponu od 0,14% do 0,729% (za 1%-15% manje).

Iz ovih rezultata se uočava da će nepremazni papir na mestima utiskivanja elementa čije ivice zaklapaju ugao od 20°, imati manju zateznu čvrstoću do približno 29,5%, a izduženje za približno 17% veće u odnosu na MD smer vlakana. Na mestima utiskivanja gde ivice elemenata obrazuju ugao od 45° u odnosu na vlakna, papir će imati za približno 43% manju zateznu čvrstoću, a izduženje za približno 49% veće. Papir će na mestima gde ivice utisnutih elemenata obrazuju ugao od 70° u odnosu na smer vlakana imati do 61% manju vrednost zatezne čvrstoće, ali će izduženje papira da se poveća do približno 60%.

#### Premazni papiri

Srednje vrednosti zatezne čvrstoće premaznih papira sa smerom vlakana od 20° u odnosu na pravac sile zatezanja niže su u poređenju sa papirima sa MD smerom. Kod papira sa smerom vlakana od 70° u većini slučajeva srednje vrednosti zatezne čvrstoće su veće od papira sa vlaknima u CD smeru. Papiri sa smerom vlakana od 45° u odnosu na smer sile zatezanja, niže su od papira sa vlaknima u MD smeru, a više u odnosu na papire sa vlaknima u CD smeru. Razlike srednjih vrednosti zatezne čvrstoće između papira sa vlaknima pod uglom od 20° i papira sa MD smerom je kreće se u rasponu od 0,129 N/mm do 0,501 N/mm (za 1,8%-8,2% niža). Srednje vrednosti zatezne čvrstoće papira sa smerom vlakana od 45° su približnije vrednostima izmerenih kod papira sa CD smerom, kod kojih je razlika vrednosti zatezne čvrstoće između 0,474 N/mm i 0,609 N/mm (10%-11%), sa izuzetkom papira gramature 200 g/m<sup>2</sup> gde je ova razlika veća za 51%. Razlika između papira sa smerom vlakana pod uglom od 70° i papira sa CD smerom vlakana u rasponu od 0,013 N/mm do 0,122 N/mm (0,3%-3%).

Srednje vrednosti izduženja kod papira sa uglom vlakana od 20° u odnosu na silu zatezanja su veće u odnosu na papire sa vlaknima u MD smeru. Razlika u srednjim vrednostima izduženja između ove dve orijentacije vlakana je u rasponu od 0,177% do 0,327% (za 8%-13% veća). Papiri sa vlaknima pod uglom od 45° imaju srednje vrednosti izduženja veće u odnosu na papire sa vlaknima u MD smeru, razlika vrednosti se kreće u rasponu od 1,243% do 1,7% (za 40,5%-43% veće). U poređenju sa papirima sa CD smerom vlakana papiri sa uglom vlakana od 45° imaju manje vrednosti izduženja, a razlike srednjih vrednosti izduženja kreću se u rasponu od 2,284% do 3,417% (39,5%-47%). Ovo ukazuje da papiri sa smerom vlakana od 45° imaju srednje vrednosti izduženja približnije papirima sa vlaknima u MD smeru. Kod papira sa vlaknima raspoređenim pod uglom od 70° srednje vrednosti izduženja su u većini slučajeva manje, posmatrane u odnosu na papire sa vlaknima u CD smeru, a kreću se u rasponu od 0,632% do 1,142% (11%-16%).

Iz ovih rezultata se može zaključiti da će premazni papir na mestima utiskivanja elementa čije ivice zaklapaju ugao od 20°, imati manju zateznu čvrstoću do približno 8,2%, a izduženje za približno 13% veće u odnosu na MD smer vlakana. Na mestima utiskivanja gde ivice elemenata obrazuju ugao od 45° u odnosu na vlakna, papir će imati za približno 20% manju zateznu čvrstoću, a izduženje za približno 47% veće. Papir će na mestima gde ivice utisnutih elemenata obrazuju ugao od 70° u odnosu na smer vlakana imati do 30% manju vrednost zatezne čvrstoće, ali će izduženje papira da se poveća do približno 66%.

### Voluminozni papiri

Srednje vrednosti zatezne čvrstoće voluminoznih papira sa smerom vlakana od 20° u odnosu na pravac sile zatezanja niže su u poređenju sa papirima sa MD smerom. Papiri sa smerom vlakana od 45° u odnosu na smer sile zatezanja, niže su od papira sa vlaknima u MD smeru, a više u odnosu na papire sa vlaknima u CD smeru. Kod papira sa smerom vlakana od 70° srednje vrednosti zatezne čvrstoće su veće od papira sa vlaknima u CD smeru. Razlike srednjih vrednosti zatezne čvrstoće između papira sa vlaknima pod uglom od 20° i papira sa MD smerom kreću se u rasponu od 0,257 N/mm do 0,621 N/mm (12%-17%). Razlika srednjih vrednosti zatezne čvrstoće papira sa smerom vlakana od 45° i papira sa MD smerom vlakana, je u rasponu između 0,765 N/mm i 1,447 N/mm (36,5%-42,5%). Razlika srednje vrednosti zatezne čvrstoće između papira sa vlaknima pod 45° i papira sa vlaknima u CD smeru kreće se u opsegu između 0,28 N/mm i 0,511 N/mm (21%-29%). Ovo ukazuje da su srednje vrednosti zatezne čvrstoće papira sa uglom vlakana od 45° približnije vrednostima papira sa CD smerom vlakana. Razlika između papira sa smerom vlakana pod uglom od 70° i papira sa CD smerom vlakana je u rasponu od 0,022 N/mm do 0,184 N/mm (1,5%-12,5%).

Srednje vrednosti izduženja kod papira sa uglom vlakana od 20° su, u odnosu na papire sa MD smerom vlakana, u većini slučajeva su veće. Jedino je kod papira gramature 70 g/m<sup>2</sup> ova vrednost manja za 0,136% (11,25% manje). Razlika u srednjim vrednostima izduženja između ove dve orijentacije vlakana kreće se u rasponu od 0,188% do 0,193% (15,3%-18%). Papiri sa vlaknima pod uglom od 45° imaju srednje vrednosti izduženja veće u odnosu na papire sa vlaknima u MD smeru, a kreću se u rasponu od 0,039% do 0,565% (21,5%-31%). U poređenju sa papirima sa CD smerom vlakana papiri sa uglom vlakana pod 45° imaju manje vrednosti izduženja, a razlike srednjih vrednosti izduženja kreću se u rasponu od 0,12% do 0,313% (6,2%-19,5%). Kod papira sa vlaknima raspoređenim pod uglom od 70° srednje vrednosti izduženja su u većini slučajeva veće, posmatrane u odnosu na papire sa vlaknima u CD smeru, a kreću se u rasponu od 0,011% do 0,031% (0,5%-2%). Kod papira sa smerom vlakana od 70° i gramature 60 g/m<sup>2</sup>, vrednost izduženja je manja za 0,267% (17%) od papira sa CD smerom vlakana.

Iz ovih rezultata se može zaključiti da će premazni papir na mestima utiskivanja elementa čije ivice zaklapaju ugao od 20°, imati manju zateznu čvrstoću do približno 17%, a izduženje za približno 18% veće u odnosu na MD smer vlakana. Na mestima utiskivanja gde ivice elemenata obrazuju ugao od 45° u odnosu na vlakna, papir će imati za približno 42,5% manju zateznu čvrstoću, a izduženje za približno 31% veće. Papir će na mestima gde ivice utisnutih elemenata obrazuju ugao od 70° u odnosu na smer vlakana imati do 51% manju vrednost zatezne čvrstoće, ali će izduženje papira da se poveća do približno 36%.

#### 9.1.2 Uticaj gramature papira na zateznu čvrstoću i izduženje

### Nepremazni papiri

U slučaju papira sa vlaknima raspoređenim pod uglom od 20° u odnosu na pravac sile zatezanja zatezna čvrstoća raste sa porastom gramature. Između papira gramature 100 g/m<sup>2</sup> i 120 g/m<sup>2</sup> uočljiva je najveća razlika vrednosti zatezne čvrstoće (do 53%). Najmanje promene zatezne čvrstoće u većini slučajeva su između 80 g/m<sup>2</sup> i 100 g/m<sup>2</sup> i 140 g/m<sup>2</sup> i 170 g/m<sup>2</sup>. I kod papira sa smerom vlakana 45° i 70°, ova tendencija je ista. Može se uočiti da gramatura papira u većoj meri utiče na promene zatezne čvrstoće između papira gramature 100 g/m<sup>2</sup> i 120 g/m<sup>2</sup> u slučaju svih orijentacija vlakana. Prilikom utiskivanja uzoraka ove dve gramature, dolazi do većih promena zatezne čvrstoće, pa je neophodno znati koje sile pritiska upotrebiti da se utisnuti elementi jasno vide, a da ne dođe do oštećenja papira.

U slučaju izduženja se uočava drugačiji uticaj gramature papira. Nije primećen jednoznačni trend promene izduženja kod svih gramatura i uglove vlakana. U najvećem broju slučajeva se javio pad vrednosti izduženja (kod svih uglova) između gramatura 80 g/m<sup>2</sup> i 100 g/m<sup>2</sup> za 18%. Na uzorku od 100 g/m<sup>2</sup> zabeležene su najmanje vrednosti istezanja. Nakon uzoraka od 100 g/m<sup>2</sup> u većini slučajeva sledi rast izduženja, a najveća promena je zabeležena između gramatura 120 g/m<sup>2</sup> i 140 g/m<sup>2</sup> kod orijentacije vlakana od 70° (do 27%). Između uzoraka 140 g/m<sup>2</sup> i 170 g/m<sup>2</sup> javlja se pad vrednosti izduženja do 20% u slučaju orijentacija 0° i 20°. Prilikom utiskivanja najveće vrednosti izduženja će se pojaviti na gramaturi papira 120 g/m<sup>2</sup> pri uglu od 70° i 90°. Na većim gramaturama (140 g/m<sup>2</sup> i 170 g/m<sup>2</sup>) izduženje se smanjuje sem u slučaju ugla od 70° i 90° gde bi vrednosti izduženja papira bile neznatno više.

### Premazni papiri

Vrednosti zatezne čvrstoće kod premaznih papira su sa porastom gramature od 130 g/m<sup>2</sup> do 150 g/m<sup>2</sup> prvo opadale u slučaju svih testiranih smerova vlakana. Između gramature 150 g/m<sup>2</sup> i 200 g/m<sup>2</sup> vrednosti zatezne čvrstoće rastu. Prilikom utiskivanja će se kod većih gramatura javiti jača zatezna čvrstoća. S obzirom da premaz nema izraženu anizotropnost kao što je slučaj kod baznog papira, kod papira sa većim procentom premaza se javljaju odstupanja od trenda koji se javlja kod nepremaznih papira. Prilikom utiskivanja papira veće gramature ukoliko su ivice elemenata za utiskivanje 0°, 20° i 45° dolazi do veće vrednosti zatezne čvrstoće.

Izduženje papira sa smerom vlakana 0° i 20° raste sa porastom gramature. Kod papira sa smerom vlakana 45° i 70° izduženje prvo raste, zatim između papira gramature 150 g/m<sup>2</sup> i 170 g/m<sup>2</sup> opada, a između papira gramature 170 g/m<sup>2</sup> i 200 g/m<sup>2</sup> ponovo raste. Kod papira sa CD smerom vlakana vrednosti izduženja rastu između gramatura 130 g/m<sup>2</sup> i 150 g/m<sup>2</sup>, a potom opadaju sa porastom gramature, da bi na gramaturi od 200 g/m<sup>2</sup> neznatno porasla vrednost izduženja. Prilikom utiskivanja manje vrednosti izduženja na većim gramaturama se mogu javiti na ivicama elemenata za utiskivanje koji obrazuju ugao od 0°, 20° i 45° sa smerom vlakana pa na ovim mestima može doći do oštećenja papira.

### Voluminozni papiri

U slučaju zatezne čvrstoće voluminoznih papira, primetne su veće promene s porastom gramature između papira gramature 60 g/m<sup>2</sup> i 70 g/m<sup>2</sup> kod svih uglova vlakana. Manji porast vrednosti zatezne čvrstoće zabeležen je između gramatura papira 70 g/m<sup>2</sup> i 80 g/m<sup>2</sup>. Takođe je uočljiv veći rast zatezne čvrstoće sa porastom gramature kako se ugao vlakana približava uglu od 0°. Prilikom utiskivanja papira većih gramaturama na mestima gde dolazi do kontakta ivica elemenata za utiskivanje koje obrazuju manji ugao sa smerom vlakana javiće se veća zatezna čvrstoća papira i potencijalno oštećenje papira.

Izduženje raste s porastom gramature papira 60 g/m<sup>2</sup> i 80 g/m<sup>2</sup> u slučaju uglova vlakana od 0°, 70° i 90°, dok kod uglova 20° i 45° vrednosti izduženja prvo opadaju između 60 g/m<sup>2</sup> i 70 g/m<sup>2</sup>, a zatim rastu. Na mestima papira gramature 70 g/m<sup>2</sup> gde ivice elemenata obrazuju manje uglove sa smerom vlakana, smanjena je vrednost izduženja što može da dovede do pojačanog oštećenja na tim mestima prilikom procesa utiskivanja.

#### 9.1.3 Uticaj vrste papira na zateznu čvrstoću i izduženje

U slučaju nepremaznih papira promena ugla vlakana najviše utiče na promene u zateznoj čvrstoći, a najmanje u slučaju voluminoznih. Vrednosti zatezne čvrstoće kod premaznih papira menjaju se u manjoj meri, a razlike između papira sa uglom vlakana od 0° i 20° kao i papira između 70° i 90° su minimalne. Zbog izraženije anizotropnosti nepremaznog papira u odnosu na premazni, dolazi

do većih razlika u vrednostima zatezne čvrstoće, pa se prilikom utiskivanja može očekivati da će na mestima gde elementi za utiskivanje obrazuju ugao približniji smeru vlakana, biti veća verovatnoća oštećenja papira.

Procenat izduženja varira u najvećem rasponu u slučaju premaznih papira različitih uglova vlakana. Najmanji uticaj na izduženje papira svih uglova vlakana ima voluminozni papir. Najmanje promene vrednosti izduženja uočljive su kod voluminoznog papira gramature 70 g/m<sup>2</sup>, zatim nepremaznom papiru gramature 100 g/m<sup>2</sup>. Zbog količine premaza i smanjene anizotropnosti u slučaju premaznih papira zabeležene su najveće promene u vrednostima izduženja. Prilikom utiskivanja papir će se najviše izdužiti na mestima gde ivice elemenata sa smerom vlakana obrazuju ugao što približniji uglu od 90°. Međutim, na mestima gde je ugao između ivica elemenata za utiskivanje i smera vlakana manji drastično opada vrednost izduženja papira. Zbog ove razlike dolazi do različitog procenta izduženja papira na različitim mestima elementa za utiskivanje, pa je veća verovatnoća da će doći do oštećenja papira ukoliko ivice elemenata menjaju ugao u odnosu na smer vlakana.

## 9.2 Karakterizacija procesnih parametara FDM tehnike 3D štampe

Eksperiment je podeljen u dva bloka. U prvom bloku, testirano je ukupno četiri ulazna parametara: debljina sloja, procenat unutrašnje popune, vrsta unutrašnje popune, broj kontura spoljašnjeg zida. U drugom bloku testirana su takođe četiri ulazna parametra: debljina završnih slojeva, orijentacija uzorka na platformi za štampu, brzina kretanja glave za štampu i temperatura dizne. U oba bloka praćene su vrednosti četiri izlazne (zavisne) promenjive: vreme štampe, masa uzoraka, površinska hrapavost i zatezna čvrstoća. Za analizu rezultata eksperimenta korišćen je signal-šum (signal-to-noise – S/N) odnos i frakcionalno rangiranje. S obzirom da je uzeta pretpostavka da je šum smanjen na beznačajnu vrednost, izvučeni su zaključci samo na osnovu posmatranja signala, odnosno ulaznih promenljivih.

### Prvi blok eksperimenta

Analizom rezultata prvog bloka eksperimenta uočava se da je optimalna kombinacija za maksimalnu zateznu čvrstoću: debljina sloja 0,2 mm, 100% linijske popunjenosti sa pet kontura spoljašnjeg zida. Za najmanju vrednost površinske hrapavosti: debljina sloja 0,2 mm, 80% heksagonalne popune sa jednim spoljašnjim zidom. Ukoliko je potrebno postići najkraće vreme štampe, optimalne vrednosti su: 0,2 mm debljina sloja, 60% linijske popunjenosti sa jednim spoljnim zidom. Za najmanju potrošnju materijala optimalna podešavanja su: 0,1 mm debljina sloja, 60% heksagonalne popunjenosti sa tri spoljašnja zida.

Praćenjem uticaja debljine sloja, procenta i vrste unutrašnje popune i broja kontura spoljašnjih zidova na zateznu čvrstoću testiranih uzoraka, uočeno je da procenat unutrašnje popune ima najveći značaj. Pored ovog faktora, najveći uticaj ima parametar debljine sloja, a zatim parametar broja konturnih zidova i vrste unutrašnje popune.

Na vrednost površinske hrapavosti najviše utiče parametar debljine sloja, zatim broj spoljašnjih kontura, procenat unutrašnje popune i na kraju vrsta unutrašnje popune.

Na vreme štampe najveći uticaj ima parametar debljine sloja. Kod ostala tri parametara uočen je manji uticaj. Što je debljina deponovanog sloja manja potrebno je odštampati više slojeva, pa se samim tim produžava i vreme štampe. Za linijski tip popune potrebno je najmanje vremena, jer glava štampača u toku štampe prati linijsku putanju za razliku od heksagonalne i dijamantske popune, gde su česte promene pravca i smera glave, što produžava vreme proizvodnje.

Na masu uzoraka uočeno je da najviše utiče faktor procenta unutrašnje popune, zatim debljina sloja, broj kontura i vrsta unutrašnje popune.

Uzimajući u obzir sve četiri zavisne promenjive uočava se da su dva najuticajnija parametra debljina sloja i procenat popunjenosti, što je potvrđeno i pregledom literature (Anitha i saradnici, 2001; Sood i saradnici, 2009; Lee i saradnici, 2005; Galantucci i saradnici, 2010). Prema Tagučići L9 ortogonalnom nacrtu i analizi devet različitih kombinacija četiri posmatrana uticajna faktora, na prvom mestu po važnosti se ističe debljina sloja, na drugom procenat unutrašnje popune, na trećem broj konturnih zidova i na četvrtom mestu vrsta unutrašnje popune.

U cilju definisanja podešavanja parametara koji daju najbolje rezultate, izračunate su srednje vrednosti dobijenih optimalnih vrednosti za sve četiri izlazne promenjive iz Tabele 8.8. Izračunate vrednosti iznose: 0,175 mm za debljinu sloja, 75% linijske ili heksagonalne vrste popunjenosti i 2,5, odnosno, 3 konturna zida. Za vrstu popunjenosti odabran je linijski tip, zbog kraćeg vremena štampe u odnosu na heksagonalni tip.

Koliko će debljina sloja uticati na površinsku hrapavost zavisi od ukupne visine predmeta koji se štampa, pa ukoliko se kao količnik visine predmeta i debljine sloja dobije ceo broj veća je verovatnoća da će poslednji sloj biti dobro odštampan. Iz tog razloga, ukupnu visinu alata za utiskivanje potrebno je podeliti sa debljinom sloja, kako bi se adekvatno podesila ova ulazna promenjiva, što je u daljoj analizi uzeto u obzir.

Ukoliko se primeni neparametrička metoda frakcionalnog rangiranja rezultata (Rodgers, 2013) izlaznih promenjivih, može se preciznije odrediti kombinacija nivoa parametara koja daje optimalne vrednosti sve četiri izlazne promenjive zajedno. Za razliku od Tagučići metode, koja rangira uticaj jedne ulazne promenjive na jednu izlaznu, nezavisno od ostalih ulaznih faktora, metoda frakcionalnog rangiranja uzima u obzir kombinaciju nivoa svih ulaznih promenjivih na jednu izlaznu promenjivu. Ova metoda rangira devet kombinacija nivoa uticajnih parametara dodeljujući najmanju ocenu najboljoj kombinaciji za određenu izlaznu promenjivu. Ako su dva ili više rezultata jednakih vrednosti, računa se srednja vrednost zbira njihovih pozicija. Ukoliko su npr. dve najniže ocene (najbolje kombinacije za dati parametar) istih vrednosti obe će biti rangirane ocenom  $(1+2)/2=1,5$ . Kombinacije čiji zbir ocena sve četiri izlazne promenjive daje najmanju ocenu rangira se kao optimalna. Analizom dobijenih rezultata, pokazano je da testirana kombinacija sa debljinom sloja 0,2 mm, procentom dijamantske popune od 60% sa 3 spoljašnje konture ima najbolju ocenu.

Kad se uporede nivoi parametara prve tri kombinacije sa rezultatima dobijenim analizom S/N odnosa iz Tagučići nacrtu, donesen je zaključak o optimalnom podešavanju prva četiri uticajna faktora. U obe analize debljina sloja od 0,2 mm i procenat popunjenosti od približno 80% vode do optimalnih vrednosti četiri izlazne promenjive. Linijska i heksagonalna popuna se ističu kao optimalni nivoi u većini slučajeva, ali zbog kraćeg vremena štampe linijska popuna bolje zadovoljava zadate kriterijume. Veća vrednost zatezne čvrstoće i kraće vreme štampe uzeti su u obzir prilikom odabira tri konturna zida kao optimalnog nivoa.

#### Drugi blok eksperimenta

Za analizu rezultata dobijenih u drugom bloku eksperimenta korišćene su iste metode kao i u prvom bloku eksperimenta. U toku štampe uzoraka za drugi blok, četiri ulazne promenjive iz prvog bloka su fiksirane na dobijene vrednosti nivoa, dok su druge četiri promenjive varirane (broj završnih slojeva, orijentacija uzorka na platformi za štampu, brzina kretanja glave za štampu i temperatura dizne).

Uočava se da ukoliko je potrebno postići maksimalnu zateznu čvrstoću, optimalna kombinacija dobijena Tagučići metodom je: debljina završnih slojeva 1 mm, orijentacija uzorka 90°, brzina kretanja glave za štampu 90 mm/min i temperatura dizne 235 °C. Za najmanju vrednost površinske hrapavosti: debljina završnih slojeva 1, orijentacija uzorka 45°, brzina kretanja glave za štampu 60 mm/min i temperatura dizne 225 °C. Ukoliko se želi postići najkraće vreme štampe, optimalne vrednosti su: debljina završnih slojeva 0,2 mm, orijentacija uzorka 0°, brzina kretanja glave za štampu 90 mm/min i temperatura dizne 225 °C. Za najmanju potrošnju materijala optimalna podešavanja su: 0,2 mm debljina završnih slojeva, 0° orijentacija uzorka, 90 mm/min brzina kretanja glave za štampu i 210 °C temperatura dizne.

Ako se posmatra uticaj druge četiri promenjive na zateznu čvrstoću, vidi se da temperatura dizne ima najveći uticaj, zatim broj završnih slojeva, orijentacija rastera i na kraju, brzina kretanja glave za štampu.

U slučaju površinske hrapavosti, uočava se da najveći uticaj takođe ima temperatura dizne, zatim broj završnih slojeva, brzina kretanja glave za štampu i orijentacija uzorka.

Parametar brzine kretanja glave za štampu najviše ima uticaj na vreme štampe. Na drugom mestu po značaju je debljina sloja, zatim temperatura dizne i na kraju orijentacija uzorka.

Na masu izrađenog uzorka najveći uticaj ima parametar temperature dizne, zatim orijentacija uzorka, broj završnih slojeva i na kraju brzina kretanja glave za štampu.

Ako se uzmu u obzir sve četiri izlazne promenjive u isto vreme, može se videti da su dva najuticajnija parametra iz ovog bloka temperatura dizne i broj završnih slojeva (Tabela 8.17). Analizom vrednosti sve četiri izlazne promenjive i računanjem srednjih vrednosti rezultata iz Tabele 8.15, kao optimalni faktori definisani su sledeći: 0,6 mm debljina završnih slojeva (3 sloja), približno 67,5 mm/min brzina kretanja glave za štampu, približno 223,75 °C temperatura dizne i 0° optimalna orijentacija uzorka na platformi za štampu.

Kako bi se preciznije definisala optimalna podešavanja ulaznih parametara iz drugog bloka eksperimenta urađeno je frakcionalno rangiranje rezultata. Kombinacija sa podešavanjima debljine završnih slojeva od 1 mm, orijentacije rastera od 0°, brzine štampe od 90 mm/min i temperature dizne od 225 °C rangirana je najboljom ocenom. Na drugom i trećem mestu su kombinacije sa debljinom završnih slojeva od 0,6 mm, dok su ostale vrednosti različite. Uzimajući u obzir parametre ove tri kombinacije ulaznih parametara i rezultate dobijene analizom Tagučićijevog nacrt, donesen je zaključak o optimalnom podešavanju druga četiri procesna faktora. Odabrani nivoi ulaznih parametara u drugom bloku ovog eksperimenta su: 0,6 mm debljina završnih slojeva, 0° orijentacija uzorka, brzina kretanja glave za štampu od 60 mm/min i temperatura dizne od 225 °C. Brzina kretanja glave za štampu od 60 mm/min je odabrana zbog preciznosti izrade sitnih elemenata alata za utiskivanje i relativno kraćeg vremena štampe u odnosu na brzinu od 30 mm/min. Nakon analize rezultata ovog eksperimenta, date su konačne preporuke podešavanja vrednosti za svih osam ulaznih (Tabela 8.18).

### 9.3 Ponovljivost mehaničkih osobina uzoraka izrađenih FDM tehnikom štampe

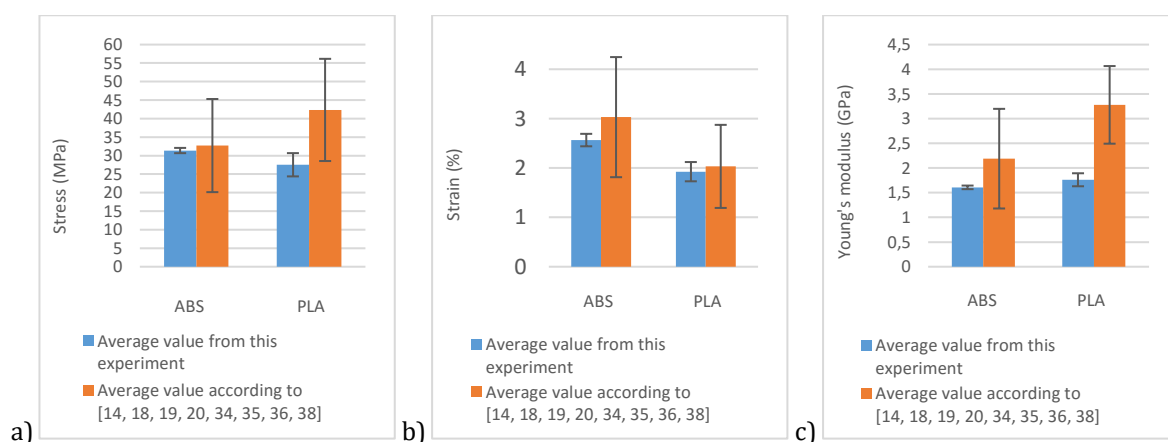
Rezultati ovog eksperimenta pokazuju da u poređenju sa PLA uzorcima, uzorci izrađeni od ABS materijala pokazuju veću ponovljivost prilikom testiranja zatezne čvrstoće i izduženja. U slučaju osam od deset ABS uzoraka došlo je do loma u obeleženom ravnom delu epruvete za testiranje. PLA uzorci su se u osam slučajeva polomili izvan ravnog dela. Za ovaj oblik uzorka za testiranje zatezne čvrstoće poznato je da može da dođe do loma izvan obeleženog područja, što je posledica akumuliranja napona u zaobljenim delovima epruvete (Letcher i saradnici, 2015; Torrado i



saradnici, 2016; Croccolo i saradnici, 2013). Ahn i saradnici (2002) smatraju da je uzrok ovih odstupanja veliki radijus zaobljenja, na kojima se deponovani filament prekida, slabeći strukturu uzorka na tim mestima. Rankouhi i saradnici (2016) smatraju da povećanjem broja slojeva ovaj problem može da se umani. Međutim, iako je korišćena debljina sloja od 0,15 mm za štampu uzoraka u ovom eksperimentu, odnosno izrađen je veći broj tanjih slojeva, i dalje se javio problem pucanja uzoraka izvan obeleženih ravnih mesta. Ovu problematiku je potrebno dodatno istražiti u budućim istraživanjima.

Još jedno objašnjenje nekonzistentnosti PLA uzoraka pri testiranju zatezne čvrstoće je u jačini međusobnih veza deponovanih slojeva. PLA uzorci su štampani na štampaču sa otvorenom komorom i sa nižom temperaturom dizne glave za štampanje. Poznato je da temperatura dizne može da utiče na mehaničke osobine FDM štampanih uzoraka (Drummer i saradnici, 2012). Temperatura platforme u toku štampanja PLA uzoraka bila je  $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  u poređenju sa temperaturom platforme za štampu od  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  korišćene za ABS uzorke. Štampa ABS uzoraka je sprovedena u bolje kontrolisanim uslovima što može da prouzrokuje bolju povezanost štampanih slojeva, a samim tim i bolju ponovljivost zatezne čvrstoće.

Na grafiku 9.1 upoređeni su rezultati zatezne čvrstoće, izduženja i modula elastičnosti, prikupljeni ovim eksperimentom, sa rezultatima pronađenim u literaturi. Rezultati zatezne čvrstoće uzoraka od ABS materijala pokazuju vrednosti slične rezultatima drugih istraživača. Takođe, izduženje uzoraka od PLA materijala je slično vrednostima izduženja pronađenih u literaturi. U slučaju modula elastičnosti rezultati ovog eksperimenta pokazuju niže vrednosti u poređenju sa rezultatima iz literature (Ahn i saradnici, 2002; Drummer i saradnici, 2012; Letcher i saradnici, 2015; Tymrak i saradnici, 2014; Novakova-Marcincinova i Novak-Marcincin, 2013; Weng i saradnici, 2016; Carrasco i saradnici, 2010; Beniak i saradnici, 2015).



Grafik 9.1: Poređenje srednjih vrednosti sa prikazom standardnih devijacija za a) zateznu čvrstoću, b) izduženje i c) Modul elastičnosti uzoraka štampanih FDM tehnikom 3D štampe iz ovog eksperimenta sa rezultatima prikupljenim iz literaturnih izvora (Ahn i saradnici, 2002; Drummer i saradnici, 2012; Letcher i saradnici, 2015; Tymrak i saradnici, 2014; Novakova-Marcincinova i Novak-Marcincin, 2013; Weng i saradnici, 2016; Carrasco i saradnici, 2010; Beniak i saradnici, 2015).

Testiranjem pritisne čvrstoće, izmerene su vrednosti napona prelaska iz elastične u plastičnu oblast. Rezultati pokazuju da PLA uzorci imaju bolju konzistentnost mehaničkih osobina u poređenju sa ABS uzorcima, dok ABS uzorci podnose veće sile pritiska pre plastične deformacije. ABS uzorci pokazuju izraženije plastične osobine u oba testa. Ovi rezultati su u skladu sa rezultatima objavljenim u radovima (Drummer i saradnici, 2012; Tymrak i saradnici, 2014; Letcher i Waytashek, 2014; Beniak i saradnici, 2015). Rezultati testiranja pritisne čvrstoće u ovom eksperimentu, pokazuju bolju konzistentnost PLA uzoraka u poređenju sa rezultatima sa testa zatezne čvrstoće. Ovo može biti posledica osobina materijala i drugačijeg delovanja sila pritiska

na slojeve uzorka. Kod merenja zatezne čvrstoće, primenjena sila razdvaja slojeve odštampanog FDM uzorka. U tom slučaju ključnu ulogu igraju veze formirane između samih slojeva. Ako je ova veza jaka, zatezna čvrstoća će biti jača. Kvalitet i konzistentnost veza između štampanih slojeva utiču na mehaničke osobine uzoraka što je prikazano u radovima (Ahn i saradnici, 2002; Perez i saradnici, 2014; Es-Said i saradnici, 2000; Thomas i Renaud, 2003; Rankouhi i saradnici, 2016). Sa druge strane, kod testiranja pritiskne čvrstoće, mehaničke osobine samih materijala su značajnije od međusobnih veza slojeva, jer aplicirana sila teži da stisne slojeve, a ne da ih rastavi. U ovom slučaju PLA uzorci pokazuju povećanu krutost u poređenju sa ABS uzorcima, dovodeći do naglog prelaza iz elastične u plastičnu oblast. U radovima Ahn i saradnika (2002), Wu i saradnika (2015), Sood i saradnika (2012) i Lee i saradnika (2007) informacije o sili prelaska iz elastične u plastičnu oblast testiranih uzoraka nisu priložene, pa nije poznato kada uzorci gube svoje elastične osobine. U radu Divyathej i saradnika (2016), navedene su vrednosti sile prelaska iz elastičnog u plastično stanje, ali su ove vrednosti za ABS uzorke drastično niže (2,51 MPa) u poređenju sa rezultatima ovog testa.

Ovim eksperimentom je takođe utvrđeno da, u toku testiranja zatezne čvrstoće, ključnu ulogu ima jačina veza obrazovanih između deponovanih slojeva, dok kod testova pritiskne čvrstoće, ove veze imaju slabiji uticaj u poređenju sa osobinama korišćenog materijala.

#### 9.4 Termo-mehaničke osobine uzoraka izrađenih FDM tehnikom štampe

U slučaju testiranja zatezne i pritiskne čvrstoće uzoraka izrađenih FDM tehnikom 3D štampe, rezultati pokazuju da ABS uzorci imaju višu temperaturu stakljenja ( $T_g$ ), što je i očekivano. U literaturnim izvorima je pronađeno da na sobnoj temperaturi, PLA uzorci imaju vrednost zatezne čvrstoće približno 54 MPa (Letcher i saradnici, 2015; Tymrak i saradnici, 2014; Beniak i saradnici, 2015), a ABS uzorci približno 27 MPa (Ahn i saradnici, 2002; Novakova-Marcincinova i Novak-Marcincin, 2013; Weng, ; Wu i saradnici 2015). Vrednost zatezne čvrstoće ABS uzoraka testiranih u ovom eksperimentu veća je prilikom testiranja na svim temperaturama, u poređenju sa PLA uzorcima. Razlika između izmerenih vrednosti zatezne čvrstoće ABS i PLA uzoraka mogu biti posledica različitih procesnih faktora FDM tehnike štampe. ABS materijal zahteva zagrejanu platformu prilikom štampe kako bi se umanjile nepravilnosti oblika i netačnosti dimenzija (Perez i saradnici, 2014). PLA materijal zbog svoje niže tačke stakljenja  $T_g$  i topljenja  $T_m$ , ne zahteva zagrevanje platforme za štampu. Takođe, poznato je da više temperature dizne u glavi štampača i više temperature platforme za štampu FDM štampača uzrokuju bolje povezivanje slojeva uzorka, a samim tim i bolje mehaničke osobine (Sun i saradnici, 2008), što može biti uzrok jače zatezne čvrstoće ABS uzoraka.

Vrednosti izduženja u trenutku loma ispod tačke stakljenja  $T_g$ , su veće kod ABS uzoraka, dok iznad ove vrednosti, PLA uzorci imaju veću vrednost izduženja ( $\epsilon = 90,44\%$ ) u poređenju sa ABS uzorcima ( $\epsilon = 44,75\%$ ). Ispod tačke stakljenja ABS uzorci pokazuju veće izduženje prilikom loma, dok se iznad ove vrednosti, ponašaju kruće u poređenju sa PLA materijalom, koji se izdužio za skoro celu svoju dužinu.

Vrednosti modula elastičnosti za ABS uzorke pri povišenim temperaturama kreću se između 1050 MPa i 1200 MPa na temperaturama do 50 °C, dok iznad 50 °C ove vrednosti opadaju ispod 800 MPa i nastavljaju da opadaju do 150 MPa na temperaturi od 90 °C. PLA materijal pokazuje veće vrednosti modula elastičnosti od ABS uzoraka (između 1370 MPa i 1580 MPa) do 45 °C, a u rasponu temperatura između 45 °C i 50 °C ove vrednosti opadaju do 668,27 MPa. Rezultati ukazuju da PLA materijal podnosi veće sile u elastičnoj oblasti bez permanentne deformacije skoro do tačke stakljenja, gde PLA naglo gubi svoju elastičnost i naglo se deformiše. ABS materijal,

sa druge strane, pokazuje nižu vrednost modula elastičnosti koja počinje da opada nakon 50 °C, što je ispod tačke stakljenja, pokazujući veću plastičnost u ovom području.

Vrednosti pritisne čvrstoće uzoraka od ABS materijala su veće u poređenju sa uzorcima od PLA materijala na svim temperaturama. Ispod temperature stakljenja ( $T_g = 60\text{ °C}$ ), PLA uzorci imaju manja odstupanja vrednosti pritiskog napona (između 4,97 MPa i 6,15 MPa), što ukazuje na povećanu krutost pri temperaturama nižim od  $T_g$ . Ovo je u skladu sa ostalim istraživanjima iz oblasti (Drummer i saradnici, 2012; Tymrak i saradnici, 2014; Letcher i Waytashek, 2014; Beniak i saradnici, 2015). ABS materijal, za razliku od PLA materijala, pri temperaturama ispod  $T_g$  ima veća odstupanja vrednosti pritiskog napona (od 22,03 MPa do 6,61 MPa), a samim tim i veću duktilnost. U rasponu temperatura od 60 °C do 90 °C pritisna čvrstoća ABS uzoraka kreće se u opsegu od 4,77 MPa do 1,58 MPa gde dolazi do izražaja veća krutost uzoraka.

Rezultati ovog istraživanja ukazuju na činjenicu da ABS materijal ima veću vrednost pritisne čvrstoće od PLA materijala na svim testiranim temperaturama. Povećanjem temperature ABS uzorcima postepeno opada elastičnost, za razliku od PLA materijala koji zadržava svoju elastičnost do temperature stakljenja nakon čega postaje duktilniji. Ovi rezultati su u skladu sa nalazima da je PLA materijal pogodan za upotrebu jedino pri nižim temperaturama (Tábi i saradnici, 2016; Petersson i saradnici, 2007; Celli i saradnici, 1991; Bijarimi i saradnici, 2012).

Analizom rezultata iz ovog eksperimenta ustanovljeno je da su za izradu alata za utiskivanje na sobnoj temperaturi, pogodna oba alata. PLA materijal je odabran jer je u elastičnoj oblasti pokazao manje vrednosti deformacije. Međutim za proces utiskivanja zagrevanjem alata, ni jedan ni drugi materijal ne bi bio adekvatan zbog svoje niske tačke stakljenja.

## 9.5 Istraživanje uticaja završne obrade uzoraka dobijenih FDM tehnikom 3D štampe na površinsku hrapavost, zateznu čvrstoću i promenu dimenzija finih detalja za utiskivanje

U cilju postizanja glatke površine uzoraka izrađenih FDM tehnikom, sproveden je eksperiment u kom su uzorci od PLA materijala obrađeni mehaničkom i hemijskom metodom. Glatka površina FDM uzoraka smanjuje potencijalna oštećenja papira prilikom utiskivanja. Merene su dimenzije uzoraka, zatezna čvrstoća uzoraka i izgled gornjih i bočnih površina netretiranih, mehanički i hemijski tretiranih uzoraka. Kod mehaničke obrade uzoraka, postignute su ravne površine, ali zbog velike količine uklonjenog materijala, dolazi do smanjenja dimenzija uzoraka. Kod uzoraka koji su hemijski tretirani acetonom dolazi do neznatnog povećanja dimenzija. Mehanički obrađeni uzorci imaju umanjene dimenzije zbog uklanjanja materijala tokom procesa. Hemijski tretirani uzorci imaju neznatno povećane dimenzije u poređenju sa ne tretiranim uzorcima. Ovo je verovatno bio slučaj zbog hemijske reakcije sa acetonom u kojoj je PLA materijal nabubrio.

Uočene su jasno vidljive razlike na gornjim i bočnim površinama između netretiranih, mehanički tretiranih i hemijski tretiranih uzoraka. Kod netretiranih uzoraka su uočljive deponovane niti, dok kod mehanički tretiranih uzoraka vidljivost niti je znatno smanjena. Međutim ovo je slučaj samo na površinama kod kojih su deponovane niti blizu jedna drugoj. Na mestima gde je ovaj razmak veći, niti ostaju vidljive i nakon obrade. Ukoliko deponovane niti nisu dovoljno blizu jedna drugoj, nakon mehaničke obrade one se ne dodiruju, ostavljajući vidljiv razmak, a samim tim i neujednačenu površinu uzorka. Kod bočnih površina, delimično je uklonjen „stepenast“ efekat. Ovaj efekat, kao što je navedeno u teorijskom delu, može biti smanjen podešavanjem niže vrednosti parametra debljine sloja. Kod hemijski tretiranih uzoraka, gornje i bočne površine su potpuno homogene, bez vidljivih tragova deponovanih filamenata.

Vrednost zatezne čvrstoće uzoraka posle obe metode završne obrade je manja. Drastično manju zateznu čvrstoću pokazuju uzorci obrađeni hemijskom metodom, jer je aceton, zbog porozne prirode uzoraka, prodro u unutrašnje slojeve, utičući na međusobne veze deponovanih slojeva materijala. Mehanički obrađeni uzorci su imali neizmenjenu unutrašnju strukturu što je očekivano, s obzirom da su uzorci tretirani brusnim papirom samo na površini. Vrednost izduženja nakon mehaničke obrade je slična izmerenim vrednostima kod netretiranih uzoraka. Hemijski tretirani uzorci su duktilniji i imaju veću vrednost izduženja u poređenju sa mehanički tretiranim i ne tretiranim uzorcima.

U delu eksperimenta gde su obrađeni uzorci sa sitnim elementima za utiskivanje mogu se izvesti slični zaključci. Kod netretiranih uzoraka vidljivi su deponovani filamenti što utiče na formiranje stepenastih stranica elemenata, odnosno povećanja njihove hrapavosti. Kod mehanički tretiranih uzoraka, kao i u prethodnom delu eksperimenta dolazi do uklanjanja veće količine materijala što je u slučaju kosih bočnih stranica najuočljivije. Ako se posmatraju hemijski tretirani uzorci, primećuje se potpuno uklanjanje stepenastog efekta na elementima, dobija se površina fine strukture, međutim vertikalne stranice postaju zakošene. Deo materijala nakon hemijske obrade popunjava ćoškovice, obrazujući na taj način kose stranice elemenata.

Primenom odgovarajuće metode završne obrade može se dobiti glatka površina alata za utiskivanje, koja utiče na smanjenje oštećenja utisnutih papira. Završnu obradu je potrebno primeniti samo do mere do koje neće doći do znatnog slabljenja mehaničkih osobina i oštećenja alata prilikom procesa utiskivanja. Primenom različitih hemikalija, variranjem vremena i načina izlaganja hemikaliji, moguće je kontrolisati u različitoj meri uticati na hrapavost površine i mehaničke osobine alata za utiskivanje izrađenih FDM tehnikom štampe.

Na osnovu rezultata ovog eksperimenta, donesena je odluka da se alati za utiskivanje izrađeni FDM tehnikom 3D štampe, obrade mehaničkom metodom pomoću brusnog papira fine granulacije (P320), kako bi se otklonile eventualne nepravilnosti u toku štampe. Hemijska metoda iako pogodna za obradu finih detalja, nije još dovoljno istražena kako bi se bezbedno mogla primeniti bez negativnog uticaja na unutrašnju strukturu i mehaničke osobine alata za utiskivanje.

## 9.6 Izrada alata za utiskivanje FDM tehnikom 3D štampe – Definisane elementa

Kako bi se upotrebom alata izrađenih FDM tehnikom štampe obezbedili rezultati utiskivanja što približniji rezultatima dobijenim konvencionalnim alatom, definisana je adekvatna dubina elemenata, veličina zazora između matrice i patrice i kosina bočnih stranica. Za ocenu kvaliteta utisnutih elemenata, posmatrani su sledeći parametri: jasnoća ivica utisnutih elemenata, ujednačenost dubina/visina elemenata i oštećenja papira na utisnutim elementima i oko elemenata. Procena je vršena od strane tri stručne osobe.

Rezultati ovog dela rada pokazuju da veća dubina elemenata u većini slučajeva prouzrokuje oštećenja papira, jer za razliku od konvencionalnog alata, princip uklapanja matrice i patrice FDM alata je drugačije osmišljen. Kod ovih alata patrica se uklapa sa matricom do same osnove alata, pa veće vrednosti visina elemenata uzrokuju da se papir ošteti. S druge strane ako se smanji sila pritiska, onda se dobijaju nedovoljno jasno utisnuti elementi. Povećanjem zazora kod ovakve izvedbe alata rizikuje se da matrica i patrica budu asimetrično centrirani, što uzrokuje smanjenu jasnoću pojedinih stranica elemenata. Takođe, povećanjem zazora i ugla bočnih stranica smanjuje se jasnoća ivica, jer se dobija veća kosina utisnutih elemenata, a samim tim i manja vrednost kontrasta između utisnutih elemenata i papira.

Potrebno je naći kombinaciju vrednosti ulaznih parametara koja dovodi do zadovoljavajućeg kvaliteta utisnutih elemenata. Analizom rezultata, zaključuje se da je zazor između patrice i

matrice od 0,5 mm prevelik, jer dovodi do nedovoljno oštarih ivica asimetrično utisnutih elemenata. Dubine elemenata od 0,6 mm i 0,8 mm nisu odabrane, jer dovode do elemenata koji su previše utisnuti u poređenju sa elementima utisnutim konvencionalnim alatima, kao i do povećanog oštećenja papira oko utisnutih elemenata. Kosina bočnih stranica od 30° je takođe neodgovarajuća, jer dovodi do nedovoljno jasnih ivica utisnutih elemenata. Kod ugla od 10° vidljiva su oštećenja papira na ivicama samih elemenata, kao i krzavost samih ivica, pa je testiran ugao od 20°. Visina elemenata alata od 0,4 mm takođe nije zadovoljavajuća, pa su napravljena dva nova alata. Jedan sa dubinom elemenata od 0,4 mm, a drugi sa dubinom elemenata od 0,5 mm. Kosina bočnih stranica je podešena na 20°, a zazor na 0,3 mm. Ova kombinacija ulaznih parametara dovela je do utisnutih uzoraka sličnog izgleda i kvaliteta kao što su proizveli alati izrađeni konvencionalnim alatom.

## 9.7 Istraživanje promena dimenzija uzoraka izrađenih FDM tehnikom u odnosu na zadati računarski model

Jedan od nedostataka FDM tehnike 3D štampe je nepreciznost dimenzija izrađenih uzoraka što je posledica smene hladnih i toplih ciklusa deponovanog materijala na platformi za štampu. Kako bi dimenzije elemenata na alatu za utiskivanje bile što približnije digitalnom predlošku (.stl fajl), izvedeno je istraživanje u kom su posmatrane promene dimenzija uzorka u  $x$ ,  $y$  i  $z$  pravcu. Izmerene promene dimenzija su nakon istraživanja primenjene za izradu novog 3D modela.

Deponovani filament od PLA materijala ima tendenciju da se širi nakon topljenja, pa ciklusi zagrevanja i hlađenja materijala u toku štampe uzorka, doprinose deformaciji i nestabilnosti zadatih dimenzija. Ovim eksperimentom je ustanovljen procenat širenja/skupljanja materijala mereći ispupčene i udubljene elemente alata posebno konstruisanog za ovaj eksperiment.

Analizom snimaka primećena je tendencija širenja elemenata nakon štampe. Najizraženije promene dimenzija uočene su kod najsitnijih elemenata i iznosile su do +43%. U slučaju ispupčenih elemenata dolazi do uvećanja dimenzija, dok je kod udubljenja bila obrnuta situacija, odnosno širina udubljenja se smanjivala, širenjem bočnih zidova. Zbog nepreciznosti, velikih varijacija, kao i same prirode postupka FDM tehnike štampe prisutna su odstupanja kod pojedinih elemenata, ali je moguće ustanoviti šemu po kojoj se dešavaju promene dimenzija. Najveće promene dimenzija po  $x$  i  $y$  osi su izmerene kod najsitnijih elemenata, odnosno bočno širenje deponovanih niti je kod njih najveće. Najizraženije promene u dimenzijama elemenata po  $z$  osi su pretrpeli najširi elementi. Što je širi element, zagrejana dizna u glavi štampača je duže u kontaktu sa plastikom prethodno deponovanog sloja, čineći da se on ponovo delimično zagreva. Posledica ovog procesa jesu zbijeniji deponovani slojevi širih elemenata. Najsitniji elementi imaju najveće nepravilnosti oblika u vidu ispupčenog filameta, jer je kod štampe ovih elemenata, glava štampača najkraće u kontaktu sa prethodno štampanim slojem, pa se često deponuje različita količina materijala. Ove nepravilnosti su delimično i posledica nekonzistentnosti FDM tehnike štampe PLA materijala, što se primećuje iz rezultata eksperimenta - *Ponovljivost mehaničkih osobina uzoraka izrađenih FDM tehnikom štampe* u Poglavlju 8.3, gde su primetne varijacije u mehaničkim osobinama PLA materijala. Još jedno objašnjenje za ove razlike je i postojanje mnoštva faktora koji utiču na finalne osobine objekata izrađenih FDM tehnikom štampe i nemogućnosti da se svi ovi faktori kontrolišu.

Na osnovu rezultata napravljani su novi modeli uzimajući u obzir izmerene vrednosti, kako bi se promene u dimenzijama elemenata nakon štampe kompenzovale. Nakon izrade modifikovanih alata izmerene su dimenzije elemenata. Rezultati ponovljenih merenja pokazuju da su znatno uklonjena odstupanja dimenzija kod modifikovanih alata, što je i bio cilj ovog postupka.



## 9.8 Utiskivanje papirnih materijala alatima sa reprezentativnim elementima

Nakon definisanja parametara za izradu alata za utiskivanje FDM tehnikom štampe, sprovedena su dva eksperimenta za konačnu procenu kvaliteta utisnutih papira. U prvom eksperimentu, korišćena je metoda analiza slika kako bi se kvantifikovale odabrane sile pritisaka za sve papire i alate, a u drugom eksperimentu je upotrebljena vizuelna metoda u kojoj su ispitanici imali zadatak da ocene kvalitet utisnutih papira.

### 9.8.1 Utvrđivanje odgovarajućeg pritiska za utiskivanje

Ova metoda je osmišljena kako bi se definisale odgovarajuće sile pritisaka za sve vrste papira i sve setove alata. Pronalaženje odgovarajućeg pritiska je bitno kako bi se dobio utisnuti uzorak sa jasno vidljivim utisnutim elementima. Što je bolji kontrast između intenziteta nijanse sive u područjima obuhvaćenim senkom i područjima van senke, biće bolja vidljivost utisnutih elemenata. Utisnuti papiri, međutim, ne smeju imati bilo kakva oštećenja na utisnutim elementima i oko elemenata. Zbog različite konstrukcije i principa funkcionisanja alati izrađeni FDM tehnikom i tehnikom hemijskog nagrizanja, zahtevaju različite sile pritisaka kako bi se dobili uzorci jasno utisnutih elemenata. Stručno lice je imalo zadatak da upotrebom različitih sila pritisaka dobije slične vrednosti kontrasta na uzorku papira. Veći kontrast između tamnih i svetlih delova slike, znači da su senke jače, odnosno ivice elemenata oštrije. Nakon preliminarnih utiskivanja različitim silama pritiska, uzorci su digitalizovani i sprovedena je metoda analize slika, opisana detaljnije u Poglavlju 7.10.

U slučaju prvog seta alata uočene su slične razlike vrednosti intenziteta nijanse sive delova slike pod senkom i van senke kod uzoraka utisnutih sa oba alata. Odabrane sile pritisaka dovele su do sličnih vrednosti jačine kontrasta, odnosno do slične jasnoće i vidljivosti utisnutih elemenata. Uočene su veće sile pritisaka potrebnih za utiskivanje alatima izrađenim FDM tehnikom štampe. Ovo može biti posledica izrade alata različitim tehnikama. Kod tehnike hemijskog nagrizanja, alat je konstruisan tako da patrica ulazi delimično u matricu, pa prilikom utiskivanja bez obzira na zazor, ostvaruje se direktan kontakt u predelu ivica elemenata alata i papira. Kod FDM alata patrica potpuno ulazi u matricu, a zazor se prilikom utiskivanja ne smanjuje, pa nema direktnog kontakta ivica elemenata alata preko materijala (ilustrovano na slici 7.42). Princip konstrukcije FDM alata je izmenjen, jer ova tehnika nije u stanju da proizvede ravne ivice (deponovani filamenti će uvek obrazovati manje ili više reckavu ivicu), što bi dovelo i do krzavih ivica utisnutih elemenata na papiru. Kod voluminoznih papira je uočljivo da je manja razlika u silama pritiska dovoljna da se kontrast između površine pod senkom i van senke drastično poveća, što je u većini slučajeva dovelo do oštećenja papira. Pronalaženje adekvatnog pritiska koji će dovesti do jasno istaknutih elemenata bez oštećenja papira je u slučaju voluminoznih papira bio najteži zadatak.

Prilikom kvantifikovanja pritisaka za utiskivanje drugim setom alata izrađenog FDM tehnikom primećena su veća odstupanja razlike vrednosti intenziteta nijanse sive površina slike pod senkom i van senke. Kod pojedinih uzoraka premaznog i voluminoznog papira je došlo do odstupanja. U većini slučajeva je sila pritiska bila manja u slučaju utiskivanja FDM alatom. Ovde je potrebno napomenuti da kod konvencionalnih alata dubinu utiskivanja diktira jačina sile pritiska do granice kada ivice elemenata na patrici i matrici počnu da seku materijal. Kod FDM alata to nije slučaj. Dubina elemenata alata raste sa silom pritiska samo do granice kad se papir deformiše, odnosno popuni zazor između patrice i matrice, pa daljim povećanjem pritiska kod FDM alata bi došlo do oštećenja papira oko elemenata za utiskivanje.



U slučaju trećeg seta alata veća razlika uočljive su veće varijacije u razlikama vrednosti intenziteta nijansi sive površina pod senkom i van senki kod uzoraka utisnutih alatima izrađenim FDM tehnikom. Kod ovog alata nisu uspešno reprodukovani najsitniji elementi za utiskivanje, a elementi koji su izrađeni, zbog svoje veličine i nedovoljne preciznosti FDM tehnike štampe za izradu ovako sitnih elemenata, teško je bilo uklopiti sve elemente matrice i patrice. Iz ovog razloga bio je potreban jači pritisak kako bi svi utisnuti elementi bili vidljivi, što je dovelo do pojačane deformacije papirnih uzoraka. Najveće vrednosti razlike intenziteta nijanse sive između površina pod senkom i van senke uočene su kod voluminoznih papira. Zbog svoje strukture, kod voluminoznih papira je bilo najkomplikovanije odrediti pritisak na kom će jasno biti vidljivi utisnuti elementi, pa je to jedno od objašnjena ovih vrednosti.

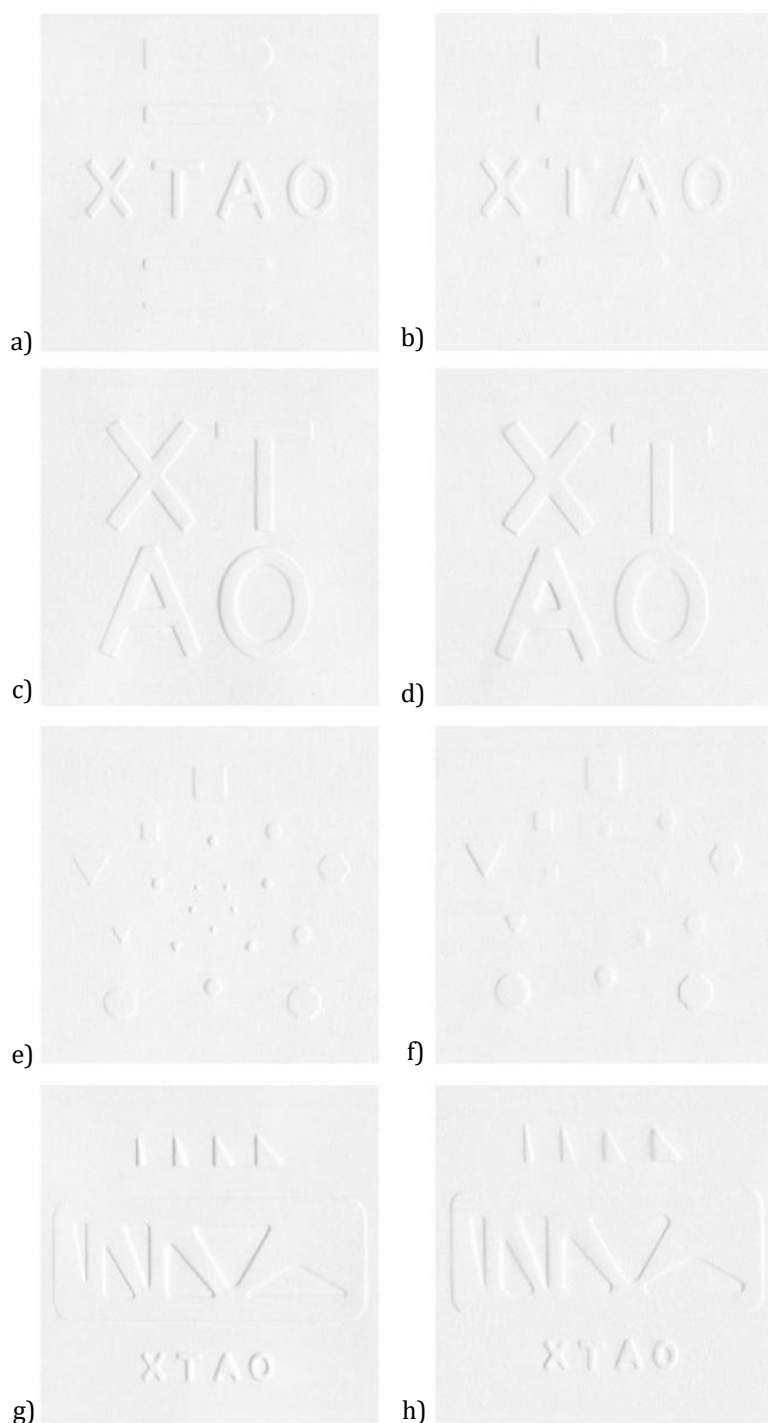
Uzorci utisnuti četvrtim setom konvencionalnog alata obezbedili su veće vrednosti razlike intenziteta nijanse sive površina pod senkom i van senke što ukazuje na jači kontrast između ovih površina, odnosno jasniju vidljivost utisnutih elemenata u odnosu na uzorke utisnute FDM alatima. Kada se posmatraju različite vrste papira utisnutih svakim alatom posebno odabrani pritisci proizveli su utisnute elemente sličnog intenziteta nijanse sive u područjima pod senkom i van senke. Nije bilo većih odstupanja. Međutim, kod ovog seta alata, zbog samog izgleda elemenata (pozitiv i negativ elementi) bio je izazov u slučaju FDM alata, uklopiti sve elemente matrice i patrice, pa je bez obzira na jače pritiske prilikom utiskivanja, kontrast između površina pod senkom i van senke bio manji u odnosu na uzorke utisnute konvencionalnim alatom.

U slučaju uzoraka utisnutim alatom izrađenim SLA tehnikom, izmerene su slične vrednosti razlike intenziteta nijanse sive površina pod senkom i van senke, kao i u slučaju uzoraka utisnutih konvencionalnim alatima. Ove sličnosti su posledica veće preciznosti izrade alata ovom tehnikom 3D štampe, pa su utisnuti elementi na papiru imali slične vrednosti kontrasta u odnosu na ne utisnute površine papira. S obzirom da je sa ovim alatom bila namera da se prikažu mogućnosti drugih tehnika 3D štampe, sadržao je drugačije elemente za utiskivanje, međutim za ovu metodu analize slike ovo ne pravi razliku jer je posmatrana srednja vrednost intenziteta nijanse sive površina pod senkom i van senke. U odnosu na uzorke utisnute alatima izrađenim sa druge dve tehnike, na uzorcima utisnutim SLA alatom su zabeležene su neznatno niže vrednosti razlike intenziteta nijanse sive. Moguć razlog ovih nižih vrednosti je veća kosina bočnih stranica utisnutih elemenata i veći zazor između matrice i patrice, koje je u slučaju ove tehnike 3D štampe potrebno modifikovati.

Ovi rezultati ukazuju na to da su odabrane vrednosti sila pritisaka za utiskivanje papira alatima izrađenim sa sve tri tehnike, u većini slučajeva dovele do sličnih vrednosti razlika intenziteta nijansi sive između površina slike pod senkom i van senke. To znači da su za sve papire postignute slične vrednosti kontrasta prilikom utiskivanja, odnosno da su upotrebljene adekvatne sile pritiska koje povoljno utiču na vidljivost utisnutih elemenata. Zbog tehničkih razloga, ovom disertacijom nije bilo moguće obuhvatiti testiranje većeg broja uzoraka, kako bi se obezbedio još bolji uvid u ponašanje papira prilikom definisanja adekvatnih pritisaka, pa to ostaje zadatak narednih istraživanja.

### 9.8.2 Utiskivanje papira utvrđenim pritiscima iz prve faze eksperimenta

Na slici 9.1 prikazan je primer uzoraka utisnutih konvencionalnim i FDM alatima. Kroz ovaj primer će biti opisani delovi utisnutog uzorka kod kojih su se javila određena odstupanja prisutna kod svih papira i koja su posledica određenih nedostataka prilikom izrade alata za utiskivanje FDM tehnikom 3D štampe.



*Slika 9.1: Prikaz skeniranih uzoraka papira utisnutih konvencionalnim alatom (a, c, e, g) i alatima izrađenim FDM tehnikom 3D štampe (b, d, f, h)*

Zbog velikog broja slika prikazani su samo primeri utisnutih elemenata na jednoj gramaturi papira. Uzorci a, c, e i g su utisnuti konvencionalnim alatom, a uzorci b, d, f, h alatom izrađenim FDM tehnikom 3D štampe. Uzorci a i b predstavljaju prvi set alata, c i d drugi set, e i f treći set, a g i h četvrti set alata.

U slučaju prvog seta alata za utiskivanje izrađenog FDM tehnikom 3D štampe primetna je neznatno manja dubina utisnutih elemenata uzorka b. Kod slova „O“ se primećuje manja dubina utisnutih elemenata i oštrina samih ivica, što je verovatno posledica neujednačenog pritiska. Jedan od uzroka neujednačenog pritiska kod slova „O“ je nedovoljna preciznost prilikom štampe obliha

zatvorenih formi. Ukoliko se zbog ove nepreciznosti ne poklopi forma i kontraforma slovnog znaka ili se neka od ivica ošteti, javlja se nedovoljno naleganje elementa, što uzrokuje manju dubinu i oštrinu elementa. Takođe, kod samog alata na mestu kod slova „O“ su vidljive promene u debljini baze, što je posledica deformisanja PLA materijala tokom štampe FDM tehnikom. Poznato je da se prvih nekoliko slojeva koji dolaze u kontakt sa platformom za štampu, mogu deformisati kao posledica hlađenja deponovanog filameta. Pologa za štampu (raft) može da smanji ove deformacije, ali u primeru prikazanom na slici 9.2, to nije bio slučaj.



*Slika 9.2: Deformacija u donjem delu alata za utiskivanje izrađenog FDM tehnikom 3D štampe – mogući uzrok nejednačene visine utisnutih elemenata*

Drugi set alata izrađenog FDM tehnikom je proizveo utisnute elemente oštrih ivica (slika 9.2d) u poređenju sa utisnutim elementima sa slike 9.2c. Primećuje se veća debljina slovnih poteza, što je u ovom slučaju najverovatnije posledica pripreme samog modela. U toku izrade alata, urađeno je više iteracija izrade alata kako bi se dobile što oštrije ivice, približnije uzorku utisnutom konvencionalnim alatom. U toku ovih iteracija odabrana je verzija alata koja je proizvela najoštrije elemente, ali sa povećanim širinama poteza. U slučaju visine slovnog znaka od 14 mm kod ovog alata, to ne predstavlja veliki problem, jer se prepravkom samog 3D modela mogu dobiti željene širine poteza. Ovo bi bio problem uraditi u slučaju manje veličine slovnih znakova, s obzirom na preciznost same FDM tehnike štampe. Na slici 9.2d primećuje se zadovoljavajući kvalitet utisnutih elemenata bez većih promena u jasnoći ivica, visini elemenata ili oštećenju papira.

Kod trećeg seta alata izrađenog FDM tehnikom štampe, kao što se vidi na slici 9.2f, nisu reprodukovani najsitniji elemente za utiskivanje (dužine 0,5 mm). Čak i elementi dužine 1 mm su delimično izrađeni i imali su lošiju reprodukciju na papiru. Tek se kod elemenata dužine 2 mm vidi rezultat utiskivanja elemenata lošije jasnoće ivica u poređenju sa elementima utisnutim konvencionalnim alatom (slika 9.2e). Kod najkrupnijih elemenata (dužine 4 mm) došlo je do dobre reprodukcije utisnutih elemenata jasnih ivica, ujednačenih visina elemenata i bez oštećenja papira.

Četvrti set alata je bio najzahtevniji za modelovanje i samu izradu FDM tehnikom 3D štampe, s obzirom na to da sadrži sitne trouglove različitih uglova, zatim elemente u negativu sa zaobljenim uglovima i najsitniji tekst (dužine 3,5 mm). Elementi utisnuti alatom izrađenim FDM tehnikom (slika 9.2h) imali su manju dužinu i nešto manje oštrine ivica u poređenju sa konvencionalnim alatom (slika 9.2g). Najsitniji tekst je reprodukovano sa dosta visokom oštrinom ivica. Kod slova „O“ je, kao i u slučaju prvog alata, najvidljivije smanjenje oštrine ivica. Ovde je takođe prisutno „zagušenje“ unutrašnje beline slovnog znaka. Kod sitnih trouglova na desnoj strani utisnutog uzorka takođe se javlja nedovoljna jasnoća ivica, što je u slučaju poslednjeg trougla uzrok oštećenja samog elementa u toku testiranja (vidljivo na vertikalnoj stranici trougla). Bez obzira

na oštećenja koja se javljaju kod uzoraka utisnutog ovim alatom, uzorci su pokazali bolji kvalitet u poređenju sa alatima izrađenim pre karakterizacije uticajnih parametara i primene znanja za unapređenje alata.

Za testiranje Hipoteze 3, kojom se žele istražiti mogućnosti prevazilaženja ograničenja FDM tehnike u domenu reprodukcije sitnih elemenata forme za utiskivanje, izrađen je alat SLA tehnikom 3D štampe (Slika 9.3). Na ovom alatu postavljeni su najsitniji elementi sa prethodnih formi FDM alata koji nisu proizveli rezultate utiskivanja dobrog kvaliteta. Pored ovih elemenata dodata je skala sitnijih elemenata šestougla sa gradacijom spoljnog prečnika u rasponu od 0,025 mm do 1 mm, kako bi se ustanovila ograničenja SLA tehnike štampe.



*Slika 9.3: Prikaz skeniranog uzoraka papira utisnutog alatom izrađenim SLA tehnikom 3D štampe*

Po specifikaciji FormLabs 2 SLA 3D štampe, minimalna debljina štampanog sloja iznosi 0,025 mm, pa je ideja da se testira mogućnost izrade izuzetno sitnih elemenata za utiskivanje. Rezultati pokazuju da je ovom tehnikom štampe moguće izraditi skoro celu skalu najsitnijih elemenata. Moguće je utisnuti u papir i element dužine 0,1 mm. Sa slike 9.3 se vidi da je uspešno izrađeno slovo „A“, odnosno njegova unutrašnja belina, što nisu bili u stanju da reprodukuju ni konvencionalni alati ni alati izrađeni FDM tehnikom 3D štampe. Ovaj alat je izrađen sa podešavanjima dubine elemenata od 0,5 mm, zazorom od 0,2 mm i kosinom bočnih stranica 20°, ali bez kompenzacije vrednosti širenja materijala po  $x$ ,  $y$  i  $z$  osi dobijenih za tehniku FDM štampe. U poređenju sa rezultatima utiskivanja prethodna dva alata, kod ovog alata se vidi da je parametre izrade modela i štampe potrebno modifikovati, u skladu sa SLA tehnikom štampe.

#### *Vizuelna metoda ocene kvaliteta utisnutih uzoraka papira*

Nakon analize ujednačenosti pritisaka metodom analize slika, izvedena je vizuelna procena kvaliteta utisnutih uzoraka od strane ispitanika. Zadatak ispitanika je da ocene uzorke utisnute konvencionalnim alatom i alatom izrađenim FDM tehnikom štampe po kriterijumima definisanim u Poglavlju 7.10.2.

Rezultati pokazuju da ispitanici jasno uočavaju razliku između uzoraka utisnutih alatima izrađenim sa ove dve tehnike. Za sva četiri seta alata i za sve vrste papira uzorci utisnuti konvencionalnim alatom su ocenjeni većom ocenom u poređenju sa uzorcima utisnutim FDM alatom. Po pitanju druga dva parametra obe tehnike su proizvele utisnute uzorke sa minimalnim

oštećenjima. Generalno gledajući, prvi i četvrti set alata je proizvela utisnute uzorke dobrog kvaliteta, po sva četiri parametra, i u slučaju konvencionalnih i u slučaju FDM alata za utiskivanje. Drugi set alata je proizveo uzorke koji su ocenjeni generalno manjom ocenom, dok je treći set alata proizveo najlošije ocenjene uzorke, pogotovo u slučaju FDM tehnike, gde najsitniji elementi nisu ni izrađeni. Kada se posmatraju ocene ispitanika po vrsti papira, uzorci utisnuti na nepremaznim i premaznim papirima na većim gramaturama ocenjeni su najvećom ocenom. Voluminozni papiri su kod obe tehnike ocenjeni najmanjim ocenama. Kod nepremaznih papira najbolje su ocenjeni papiri gramature 140 g/m<sup>2</sup> i 170 g/m<sup>2</sup>, a kod premaznih, papiri gramature 170 g/m<sup>2</sup> i 200 g/m<sup>2</sup>.

Pored definisana četiri parametara kvaliteta, zadatak ispitanika je bio da ocene celokupan kvalitet utisnutih uzoraka na skali od 1 do 3 (1 – neprihvatljiv, 2 – prihvatljiv, 3 - odličan). Uzorci utisnuti konvencionalnim alatom su u većini slučajeva ocenjeni ocenom 3 (odličan), dok su uzorci utisnuti FDM tehnikom štampe ocenjeni ocenom 2 (prihvatljiv). Najviše ocene kod parametra generalnog kvaliteta utisnutih uzoraka ima prvi set alata. Mali procenat uzoraka utisnutih FDM alatom su ocenjeni ocenom 3 (odličan). Najmanjom ocenom su ocenjeni uzorci utisnuti trećim setom alata.

Analizom rezultata ovog eksperimenta se zaključuje da uzorci utisnuti FDM alatom imaju zadovoljavajući kvalitet, ali s obzirom da se radi o jednoj od nepreciznijih tehnika 3D štampe, ovo je očekivan rezultat. Korišćenjem drugih tehnika 3D štampe, kod kojih je kvalitet površina i stabilnosti dimenzija na višem nivou, mogle bi se postići i mnogo više ocene ispitanika.

## 9.9 Ispitivanje otpornosti alata za utiskivanje na habanje

U ovom eksperimentu praćene su promene na alatu za utiskivanje, izrađenog FDM tehnikom 3D štampe. Alat i utisnuti uzorci su posmatrani pre utiskivanja, posle 25, 50, 100, 200. i 400. utiskivanja, a nakon toga na svakih sto utisnutih uzoraka. Praćene su promene na ivicama elemenata alata i promene samih utisnutih uzoraka.

Rezultati ukazuju na blage promene nakon 400. utiskivanja u vidu minimalnih zaobljenja ivica elemenata alata. Zaobljene ivice ovih elemenata, odnosno pojava odsjaja na njima, ukazuju na eventualno trošenje alata prilikom eksploatacije. S obzirom da je za utiskivanje odabran premazni papir gramature 200 g/m<sup>2</sup>, moguće da je sloj premaza dodatno pospešio glačanje ivica alata. Premazna suspenzija sadrži nekoliko komponenata od kojih su najbitniji beli pigmenti (glina, kalcijum karbonat, talk, titan dioksid) i sredstva za vezivanje (skrob i lateks), čiji je udeo u premazu i do 70% (Holik, 2013). Moguće je da je veličina i oblik čestica suve materije premazne suspenzije uticao na pojačano habanje alata za utiskivanje. Međutim, bez obzira na ovu pojavu, utisnuti uzorci nisu pretrpeli značajne promene. Promene na utisnutom papiru su primetne tek posle 500. uzorka. Naravno, ove promene su prihvatljive samo do određene granice. Previše zaobljene ivice utisnutih elemenata bi znatno promenile njihov oblik i dimenzije. Posle 500. uzorka je primetan poboljšan izgled utisnutih elemenata na papiru, što je verovatno posledica trošenja sitnih neravnina na površini alata, koje u slučaju ovog eksperimenta nisu obrađene mehaničkom niti hemijskom metodom.

Promene uočene posmatranjem mikroskopskih i skeniranih snimaka nisu vidljive golim okom. Ovi nalazi potvrđuju pretpostavku da je alatima za utiskivanje, izrađenim FDM tehnikom 3D štampe, moguće utiskivati manje tiraže bez oštećenja alata i bez većih promena u samom kvalitetu utisnutih uzoraka. Da bi ova pretpostavka bila u potpunosti potvrđena sprovedeno je istraživanje sa ispitanicima koje upotpunjuje sliku o tome da li je primetna razlika između 1. i 1000. utisnutog uzorka.

Ispitanici su ocenili uočavaju li bilo kakvu razliku između 1. 200. 400. 600. 800. i 1000. utiskivanja. Četiri od devet ispitanika je odgovorilo da ne vidi nikakve razlike između utisnutih uzoraka.

Ostalih pet ispitanika, s obzirom da su uočili razlike između prikazanih uzoraka, dobili su zadatak da poređaju uzorke u niz određenim redosledom. Analizom dobijenih rezultata zaključuje se da su ispitanici percipirali razlike na osnovu različitih kriterijuma i da je za uzorak dobijen 200. utiskivanjem više njih uočio određenu razliku u odnosu na ostale. Međutim ova razlika nije povezana sa rednim brojem utiskivanja, s obzirom da se radi o 200. utisnutom uzorku. Jedan ispitanik je postavio 1000. utisnuti uzorak na poslednje mesto niza, ali ni taj rezultat se ne može uzeti u obzir s obzirom da je na početku niza postavljen uzorak pod rednim brojem 800.

Ovi rezultati pokazuju da ispitanici nisu bili u stanju da uoče razliku između 1. i 1000. utisnutog uzorka, što potvrđuje pretpostavku da alat izrađen FDM tehnikom 3D štampe proizvodi konzistentne rezultate u okviru tiraža do 1000. utiskivanja. Alati izrađeni od PLA materijala tehnikom FDM 3D štampe potencijalno mogu biti korišćeni za tiraže veće od 1000 utiskivanja, ali na početku istraživanja to nije predviđeno obzirom na prvenstvenu namenu ovakvih alata za personalizovanu proizvodnju malih serija.



## 10. ZAKLJUČCI

Predmet ovog rada je istraživanje mogućnosti zamene tradicionalne tehnike izrade alata za utiskivanje hemijskim nagrizanjem, FDM tehnikom 3D štampe u cilju skraćivanja vremena proizvodnje, smanjenja otpadnog materijala i cene konačnog proizvoda. Bilo je neophodno istražiti i okarakterisati parametre koji utiču i način na koji utiču na proces izrade alata za utiskivanje i njegove osobine.

Urađena je karakterizacija materijala za utiskivanje, testiranjem uticaja smera vlakana na zateznu čvrstoću.

- Analiza mehaničkih karakteristika papira pokazuje da smer vlakana papira značajno utiče na vrednosti zatezne čvrstoće i izduženja. Najveće vrednosti zatezne čvrstoće izmerene su kod nepremaznih papira, dok su najveće vrednosti izduženja izmerene kod premaznih papira i to na većim gramaturama. Kod voluminoznih papira, zabeležene su znatno manje vrednosti zatezne čvrstoće i izduženja. Zatezna čvrstoća papira raste sa smanjenjem ugla pod kojim su vlakna raspoređena u odnosu na osu testiranja, dok izduženje raste povećanjem ovog ugla. Može se zaključiti da je najveći uticaj smera vlakana na zateznu čvrstoću uočen kod nepremaznih papira. Na mestima utiskivanja elementa čije ivice zaklapaju ugao od  $20^\circ$  u odnosu na smer vlakana nepremazni papiri imaju manju zateznu čvrstoću za približno 29,5%. Na mestima gde ivice utisnutih elemenata obrazuju ugao od  $45^\circ$  u odnosu na smer vlakana vrednost zatezne čvrstoće je za približno 43% manja. Pri uglu ivica elemenata od  $70^\circ$  vrednost zatezne čvrstoće na mestima utiskivanja je za približno 61% manja od zatezne čvrstoće u smeru vlakana papira. Vrednosti izduženja se slično menjaju sa promenom smera vlakana i kod premaznih i kod nepremaznih papira. Voluminozni papiri pokazuju najmanju vrednost izduženja i zatezne čvrstoće u svim orijentacijama vlakana. Prilikom procesa utiskivanja elementa sa ivicama koje zaklapaju različite uglove sa smerom vlakana papira, očekivano je da će se prilikom deformacije papir ponašati drugačije. Nepremazni papiri većih gramatura su se po svojim mehaničkim osobinama pokazali kao dobar izbor za proces utiskivanja. Premazni papiri zbog većih vrednosti izduženja predstavljaju takođe dobar odabir, ali zbog sloja premaza na svojoj površini, pokazuju veću sklonost ka oštećenjima prilikom utiskivanja. Voluminozni papiri su se po svojim mehaničkim osobinama i po rezultatima utiskivanja pokazali kao neadekvatan izbor za proces utiskivanja.

Nakon ispitivanja mehaničkih osobina materijala za utiskivanje, urađena je karakterizacija procesnih parametara FDM tehnike štampe. Testiran je uticaj osam različitih ulaznih promenljivih na četiri izlazne promenjive.

- Rezultati karakterizacije procesnih parametara FDM tehnike 3D štampe ukazuju da se odabirom adekvatnog nacrta eksperimenta i detaljnom analizom dobijenih vrednosti izlaznih promenljivih, može izvesti zaključak o potrebnim podešavanjima 3D štampača. Metode analize S/N odnosa kao i frakcionalno rangiranje testiranih kombinacija daju uvid u najuticajnije faktore FDM tehnike štampe i vrednosti njihovih nivoa u cilju postizanja optimalnih rezultata zatezne čvrstoće, površinske hrapavosti, vremena potrebnog za štampu, kao i količine potrošenog materijala. Optimalna podešavanja ulaznih parametara za izradu alata FDM tehnikom 3D štampe izrađenog u ovoj disertaciji iznose 0,2 mm za debljinu sloja, 80% unutrašnje linijske popune, 3 konture spoljašnjih zidova, 0,6 mm debljine završnih slojeva, sa orijentacijom na platformi u toku štampe od  $0^\circ$ , brzinom kretanja glave za štampu od 60 mm/min i temperaturom dizne od  $225^\circ\text{C}$ .

Za karakterizaciju uzoraka od PLA materijala testirana je ponovljivost mehaničkih osobina uzoraka izrađenih FDM tehnikom 3D štampe. Urađena su merenja zatezne i pritisne čvrstoće.

- Uzorci izrađeni od PLA materijala FDM tehnikom 3D štampe, u odnosu na ABS uzorke, pokazuju veća odstupanja testiranih mehaničkih karakteristika, veću krutost i manju podložnost plastičnoj deformaciji. Vrednost zatezne čvrstoće PLA uzoraka iznosi 27,39 MPa, izduženje 1,93% i modul elastičnosti 1,76 GPa. U slučaju ABS uzoraka vrednost zatezne čvrstoće iznosi 30,81 MPa, izduženje 2,57% i modul elastičnosti 1,6 GPa. Prilikom utiskivanja, poželjna je veća krutost i manja deformacija alata za utiskivanje pa je za njegovu izradu odabran PLA materijal. Međutim veća odstupanja mehaničkih osobina su nepovoljne osobine prilikom izrade sitnih elemenata, pa su urađene naknadne izmene 3D modela alata, kako bi li se ova odstupanja kompenzovala.

Nakon karakterizacije mehaničkih osobina uzoraka izrađenih FDM tehnikom štampe, testiran je uticaj promene temperature uzoraka na mehaničke osobine. Ovim eksperimentom istražena je mogućnost upotrebe alata izrađenih ovom tehnikom štampe za proces utiskivanja sa folijom u kojem se alat zagreva na temperature između 80 °C i 180 °C.

- Istraživanje termo-mehaničkih osobina uzoraka izrađenih FDM tehnikom štampe pokazuju da ni PLA materijal ni ABS materijal nisu pogodni za utiskivanje sa folijom, s obzirom da su im izmerene vrednosti temperature stakljenja ( $T_g$ ) dosta niže od zahtevanih za ovaj tip utiskivanja ( $T_{g(PLA)}=50$  °C,  $T_{g(ABS)}=80$  °C). Procedura testiranja zatezne čvrstoće sa ručno izrađenom aparaturom za zagrevanje uzorka u toku testa se pokazala kao pogodna. Izmerene  $T_g$  vrednosti su se poklapale sa vrednostima pronađenim u literaturi. Procedura testiranja pritisne čvrstoće bi se mogla unaprediti, kako bi se dobili što precizniji rezultati merenja.

Dalja karakterizacija proizvodnih parametara uzoraka izrađenih FDM tehnikom štampe sprovedena je odabirom dve metode završne obrade čiji je cilj poboljšanje finoće površine uzoraka bez degradacije njihovih mehaničkih osobina. Korišćena je metoda mehaničke obrade i metoda hemijske obrade uzoraka.

- Mehanička i hemijska metoda završne obrade pogodne su za poboljšanje površinske hrapavosti uz smanjenje zatezne čvrstoće FDM uzoraka. Mehanički obrađeni uzorci manje utiču na mehaničke osobine ( $\sigma= 33,72$  MPa,  $\epsilon=2,28\%$ ,  $E=2,062$  GPa). Uzorci tretirani hemijskom metodom imaju izmenjenu unutrašnju strukturu, koja vodi do znatnog smanjenja zatezne čvrstoće ( $\sigma= 21,37$  MPa,  $\epsilon=2,79\%$ ,  $E=1,39$  GPa). Umerenom upotrebom mehaničke obrade brusnim papirom moguće je smanjiti površinsku hrapavost uzoraka, bez veće degradacije mehaničkih osobina. Detaljnijim istraživanjem uticaja različitih hemikalija i same procedure izvođenja eksperimenta, može se pronaći metoda koja bi uticala na poboljšanje površinskih karakteristika alata izrađenih FDM tehnikom štampe, bez veće degradacije njegovih mehaničkih osobina.

Nakon karakterizacije pomenutih parametara za izradu alata FDM tehnikom 3D štampe, konstruisan je alat za utiskivanje koji zbog ograničenja same tehnike izrade, funkcioniše po drugačijem principu od alata izrađenog konvencionalnom tehnikom hemijskog nagrizanja. Definisani su parametri dubine elemenata alata, zazora između patrice i matrice i kosine bočnih ivica elemenata alata.

- Osmišljeni mehanizam funkcionisanja, geometrija i dimenzije elemenata FDM alata za utiskivanje, vode do sličnih rezultata utiskivanja kao i u slučaju konvencionalnih alata. Odabrana je dubina elemenata alata od 0,5 mm, zazor između elemenata 0,2 mm i kosina

bočnih stranica od 20°. Promenom parametara dubine elemenata, zazora između patrice i matrice i kosine bočnih stranica, moguće je izraditi alate za utiskivanje prilagođene FDM tehnici 3D štampe.

Definisanjem principa rada i geometrije elemenata alata za utiskivanje izrađenog FDM tehnikom štampe, određen je procenat promene dimenzija elemenata alata po  $x$ ,  $y$  i  $z$  osi, odnosno određen je procenat širenja/skupljanja elemenata alata za utiskivanje. Konstruisan je poseban alat za definisanje promena dimenzija elemenata alata nakon štampe. Posle merenja odstupanja, urađene su korekture 3D modela i izrađeni su novi uzorci sa uvrštenim vrednostima odstupanja, kako bi odštampani alat imao dimenzije što približnije željenim.

- Analizom sitnih elemenata na alatu za utiskivanje izrađenom FDM tehnikom štampe moguće je odrediti procenat širenja PLA materijala i na osnovu tih rezultata izraditi modifikovan alat. Dimenzije elemenata utisnutih modifikovanim alatom približne su definisanim vrednostima, odnosno dobija se izgled sličan uzorcima utisnutim konvencionalnim alatima.

Posle sakupljenih rezultata iz prethodnih eksperimenata izrađeni su alati za utiskivanje FDM i SLA tehnikom 3D štampe. Uzorci utisnuti ovim alatima su digitalizovani, kako bi se metodom digitalne analize slike odredile odgovarajuće sile pritisaka za svaki papir i svaki alat pojedinačno.

- Metodom analize digitalizovanih slika utisnutih uzoraka zaključuje se da su odabrane vrednosti sila pritisaka za utiskivanje papira alatima izrađenim sa sve tri tehnike, u većini slučajeva dovele do sličnih vrednosti razlika intenziteta nijansi sive između površina slike pod senkom i van senke. To znači da su za sve papire postignute slične vrednosti kontrasta prilikom utiskivanja, odnosno da su upotrebljene adekvatne sile pritiska koje povoljno utiču na vidljivost utisnutih elemenata. Zbog tehničkih razloga, ovom disertacijom nije bilo moguće obuhvatiti testiranje većeg broja uzoraka, kako bi se obezbedio još bolji uvid u ponašanje papira prilikom definisanja adekvatnih pritisaka, pa to ostaje zadatak narednih istraživanja.

Nakon definisanja odgovarajućih pritisaka sproveden je eksperiment u kojem je utisnutim uzorcima pomoću vizuelne metode ocenjen kvalitet, na osnovu definisanih parametara kvaliteta.

- Vizuelnom metodom ocene kvaliteta utisnutih uzoraka, pomoću Likertove skale, po pitanju četiri odabrana parametra moguće je dobiti uvid u percipirani kvalitet utisnutih uzoraka. Ispitivanje pokazuje da FDM alat pokazuje zadovoljavajući kvalitet na osnovu prva tri parametra, a odličan po pitanju parametra oštećenja papira. Zaključuje se da je FDM tehnika štampe, kao jedna od nepreciznijih tehnika 3D štampe, u stanju da proizvede utisnute uzorke zadovoljavajućeg kvaliteta bez oštećenja papira. Unapređenjem metode opisane ovim radom i korišćenjem kvalitetnijih 3D štampača, moguće je izraditi kvalitetne alate, a samim tim i kvalitetnije utisnute uzorke, što će biti tema budućih istraživanja.

Da bi se odredila otpornost izrađenih alata za utiskivanje na habanje u toku eksploatacije urađen je eksperiment u kojem je određen broj utiskivanja, koji odgovara personalizovanoj upotrebi i koji neće dovesti do oštećenja alata za utiskivanje.

- Pokazano je da alati izrađeni FDM tehnikom 3D štampe, mogu izdržati tiraže do 500 utisnutih uzoraka bez oštećenja niti promena na utisnutim elementima. Preko ovog broja vidljive su neznatne promene na alatu u vidu zaobljenja ivica. Ispitanici nisu bili u stanju da primete razliku između 1. i 1000. utisnutog uzorka. Eksperiment sa ispitanicima je

dopunio merenja urađena ovim eksperimentom tako da se može zaključiti da su ovi alati pogodni za tiraže do 1000 utiskivanja.

Analizom rezultata svih prethodno sprovedenih istraživanja, zaključuje se da je upotreba 3D štampe za izradu alata za utiskivanje na grafičkim proizvodima, moguća što potvrđuje Hipotezu 1.

Karakterizacijom proizvodnih parametara alata za utiskivanje izrađenih FDM tehnikom 3D štampe u cilju poboljšanja samog procesa izrade alata za utiskivanje, moguće je proizvesti rezultate utiskivanja približno slične rezultatima utiskivanja dobijenim upotrebom konvencionalnih alata, čime je delimično potvrđena Hipoteza 2.

Istraživanjem proizvodnih parametara FDM tehnike štampe i njihovom karakterizacijom definisana je metodologija koju je moguće primeniti i na druge tehnike aditivne proizvodnje prevazilazeći ograničenja FDM tehnike u domenu reprodukcije sitnih elemenata forme za utiskivanje, što je i učinjeno izradom alata za utiskivanje SLA tehnikom 3D štampe. Ovim je potvrđena Hipoteza 3.

Generalni zaključak ove doktorske disertacije je u skladu sa Hipotezom 4 u kojoj je pretpostavljeno da je adekvatnim odabirom materijala i tehnike 3D štampe, moguće proizvesti alate koji zadovoljavaju uslove upotrebe u grafičkoj proizvodnji uz smanjene troškove i olakšan proces izrade alata za utiskivanje sa minimalnim štetnim uticajem na životnu sredinu. Ova tvrdnja je dopunjena uporednim prikazom potrebnog prostora, vremena izrade alata za utiskivanje, kompleksnosti procesa, troškova materijala i potencijalnog štetnog uticaja na čoveka i njegovu životnu sredinu, obe tehnike proizvodnje alata za utiskivanje (Tabela 10.1).

*Tabela 10.1 Uporedni prikaz potrebnog prostora (za postavku mašina, uređaja i repromaterijala), vremena izrade alata za utiskivanje, kompleksnosti procesa, troškova materijala i potencijalnog štetnog uticaja na čoveka i njegovu životnu sredinu, za obe tehnike proizvodnje*

Parametar	Tehnika hemijskog nagrizanja magnezijuma	FDM tehnika 3D štampe
Površina potrebnog prostora (m <sup>2</sup> )	~ 60 m <sup>2</sup>	~ 4 m <sup>2</sup>
Vreme izrade alata dimenzije 45x45mm (patrica + matrica)	~ 90 min*	~ 70 min*
Troškovi izrade (patrica + matrica dimenzija 45x45mm)	10 evra	~ 1.5 evro
Kompleksnost izrade pripremnog fajla	manja	veća
Kompleksnost procesa proizvodnje alata	mного veća	veoma jednostavna
Uticaj na životnu sredinu	veći**	manji**
Štetnost po zdravlje radnika	veća***	manja***

\* data su vremena za jedan set alata. Međutim, tehnikom hemijskog nagrizanja se za isto vreme može izraditi više setova, dok se kod FDM tehnike štampe dodavanjem svakog narednog seta produžava vreme izrade

\*\* potencijalni uticaj na životnu sredinu je ocenjen na osnovu potrebnog broja hemikalija koje učestvuju u procesu hemijskog nagrizanja magnezijumskih ploča, problemom skladištenja iskorišćenih hemikalija i nedovoljne zastupljenosti postrojenja za reciklažu magnezijuma

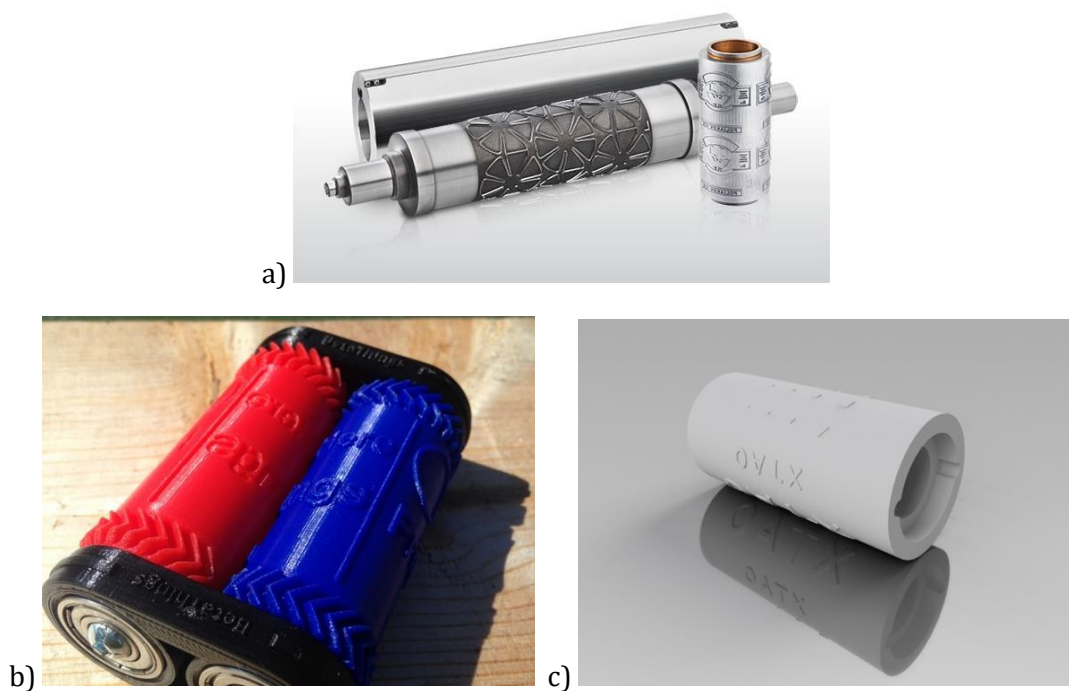
\*\*\* rad sa kiselinama koje se koriste u procesu izrade alata konvencionalnom tehnikom može biti štetan po zdravlje radnika što je i navedeno u teorijskom delu disertacije. FDM tehnika štampe je pogodna za upotrebu biorazgradive PLA plastike, što znatno smanjuje njen uticaj na životnu sredinu čoveka.

## 10.1 Buduća istraživanja

Poslednjih godina prisutan je sve brži napredak tehnika 3D štampe, što otvara nove mogućnosti ka istraživanjima u ovoj oblasti. Ovim radom su postavljene smernice za dalji razvoj metodologije, uključivanje i primenu različitih tehnika 3D štampe u oblasti grafičke struke.

Buduća istraživanja bi se mogla bazirati na istraživanju sve većeg broja novih materijala kao na primer materijala koji podnose pojačana mehanička opterećenja, materijala sa većom otpornošću na visoke temperature, zatim fleksibilnih materijala, elektroprovodljivih materijala itd. Pored novih materijala, jedna od mogućih smernica daljeg istraživanja je karakterizacija drugih tehnika 3D štampe kao što je tehnika povezivanja praškastog materijala termalnom energijom. Ovom tehnikom je moguće izraditi metalne alate za utiskivanje kojima bi bilo moguće postići utiskivanje uz prisustvo povišene temperature, utiskivanje sa folijom, utiskivanje u različite materijale itd.

Ustanovljeni proces i rezultati optimizacije oblika elemenata i karakterizacije pritiska pri utiskivanju moguće je generalno primeniti pri unapređenju kvaliteta utiskivanja po principu ploče prema ploči. U slučaju cilindričnih alata (rotacioni princip utiskivanja) (Slika 10.1) potrebno je ustanoviti da li su primenjivi proces i rezultati optimizacije oblika elemenata i karakterizacije pritiska, do kojih se došlo istraživanjem ravnih formi ili je neophodna posebna procedura.



*Slika 10.1: a) Izgled konvencionalne cilindrične forme alata za utiskivanje, b) alata za utiskivanje cilindričnog izgleda izrađen FDM tehnikom 3D štampe i c) koncept 3D modela cilindrične forme za utiskivanje*

## 11. MOGUĆNOST PRIMENE REZULTATA U PROIZVODNJI

Nakon analize rezultata i zaključaka dobijenih istraživanjima u okviru doktorske disertacije, stiče se uvid u mogućnosti uvođenja tehnika 3D štampe u proces izrade alata za utiskivanje u grafičkoj proizvodnji. Naročito interesantno polje primene je personalizovana proizvodnja alata za pojedinačno ili malo-serijsko utiskivanje u hobi ili polu-profesionalnim primenama, gde se alati često menjaju, a obim tiraža ne zahteva visoku otpornost alata na habanje.

Značajna oblast primene rezultata je uključivanje ovih tehnika u proizvodni proces malih i srednjih proizvodnih celina, sa benefitom smanjivanja troškova nabavke novih uređaja, propratnih hemikalija i suvišne logistike, uz značajno povećanje brzine pripreme i smanjenje negativnog ekološkog efekta. Uz navedeno, bitno je naglasiti da je osposobljavanje za rad i samo rukovanje 3D štampačima manje zahtevno i značajno bezbednije od konvencionalnih tehnika izrade alata.

Pristupačnost 3D štampača omogućava proizvođačima koji do sad nisu samostalno pravili alate za utiskivanje, mogu to samostalno obavljati. Omogućeno im je da ponude novu uslugu ili da uvrste operaciju utiskivanja na proizvodima na kojima zbog manjeg tiraža to do sada nije bilo opravdano.



Slika 11.1: Mogućnosti izrade alata aditivnim tehnikama štampe su personalizovani proizvodi sa elementima u više nivoa i izraženim detaljima (Jukeboxprint, 2018)

Privrednim subjektima koji se već bave delatnošću izrade alata za utiskivanje, kao primarnom delatnošću, uključivanje ovih tehnika bi pružilo mogućnost ponude novih usluga i otvorilo nove segmente tržišta, omogućilo smanjenje proizvodnog i skladišnog prostora, bolju zaštitu zdravlja zaposlenih uz skraćivanje proizvodnog procesa u domenu logistike repromaterijala i zbrinjavanja nusproizvoda. U ovom slučaju uvek treba imati u vidu i moguće probleme prihvatanja nove tehnologije zbog već razrađenog procesa proizvodnje i potrebe za usvajanjem novih znanja.

Rezultati karakterizacije proizvodnih parametara alata izrađenih FDM tehnikom 3D štampe mogu se primeniti na ostale tehnike aditivne proizvodnje. Izmenjeni parametri alata, definisani u ovom radu, mogu se primeniti na alate izrađene vat fotopolimerizacijom što je i prikazano izradom SLA alata. Kod ovih alata moguće je precizno izraditi sitne elemente za utiskivanje sa veoma kvalitetnim i ujednačenim utisnutim uzorcima papira.



## 12. LITERATURA

- 3D Hubs. (2018) *What is 3D Printing? The definitive guide to additive manufacturing*. [online] 3D Hubs. Available at: <https://www.3dhubs.com/what-is-3d-printing#owledge-base> [Accessed 25th July 2017].
- 3D Matter. (2015) *What is the influence of infill %, layer height and infill pattern on my 3D prints?*. [online] 3D Matter. Available at: <http://my3dmatter.com/influence-infill-layer-height-pattern/> [Accessed 3rd July 2017].
- 3D Matter (2016). *Shells matter more than meets the eye*. [online] 3D Matter. Available at: <http://my3dmatter.com/shells-matter-more-than-meets-the-eye/> [Accessed 16th October 2017].
- 3D printing from scratch (2015). *Types of 3D printers or 3D printing technologies overview / 3D Printing from scratch*. [online] 3D Printing from scratch. Available at: <http://3dprintingfromscratch.com/common/types-of-3d-printers-or-3d-printing-technologies-overview/> [Accessed 11th April 2017].
- Ahn, S., Montero, M., Odell, D., Roundy, S. and Wright, P. (2002). Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*, 8(4), pp.248-257.
- Alava, M., and Niskanen, K. (2006). The physics of paper. *Reports on progress in physics*, 69(3), 669-723.
- Anitha, R., Arunachalam, S. and Radhakrishnan, P. (2001). Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling. *Journal of Materials Processing Technology*, 118(1-3), pp.385-388.
- Ankerfors, M., and Lindström, T. (2011). *Mouldable material*, International patent WO 2011/087438 A1.
- Anson, M. (2011). *Bindagraphics - The Ins and Outs of Stamping and Embossing Dies [Column #39, 3/98]*. [online] Bindagraphics.com. Available at: <http://www.bindagraphics.com/pubs/pub39.html> [Accessed 12 January 2018].
- Argaw, G. A. (2007) Sugar crystal size characterization using digital image processing, PhD thesis, University of KwaZulu-Natal, Durban, South Africa, [Online] Available at: [http://researchspace.ukzn.ac.za/xmlui/bitstream/handle/10413/1490/Argaw\\_Getachew\\_Abebe\\_2007.pdf?sequence=1](http://researchspace.ukzn.ac.za/xmlui/bitstream/handle/10413/1490/Argaw_Getachew_Abebe_2007.pdf?sequence=1) [Accessed 12 October 2017]
- Armstrong, C. (n.d.). *Post processing for FDM printed parts*. [online] 3D Hubs. Available at: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/post-processing-fdm-printed-parts> [Accessed 18th December 2017].
- ASTM International (2012). F2792 – 12a. *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*. Pennsylvania, ASTM.
- ASTM International (2014). ASTM D638-14. *Test Method for Tensile Properties of Plastics*. Pennsylvania, ASTM.
- ASTM International (2015). ASTM 52900:2015. *Additive manufacturing - General principles – Terminology*. Pennsylvania, ASTM.
- ASTM International (2015). ASTM D695-15. *Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics*. Pennsylvania, ASTM.

- Back, E. L. (1982). Glass transitions of wood components hold implications for molding and pulping processes. *Tappi*, 65, 107-110.
- Back, E., and Salmén, L. (1989). The properties of NSSC-based and waste-based corrugating medium. *Paper Technology*, 10(30), pp.16-23.
- Beex, L. and Peerlings, R. (2009). An experimental and computational study of laminated paperboard creasing and folding. *International Journal of Solids and Structures*, 46(24), pp.4192-4207.
- Bellini, A. and Güçeri, S. (2003). Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling. *Rapid Prototyping Journal*, 9(4), pp.252-264.
- Beniak, J., Križan, P. and Matúš, M. (2015). A comparison of the tensile strength of plastic parts produced by a fused deposition modeling device. *Acta Polytechnica*, 55(6), pp.359-365.
- Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, 55(2), pp.155-162.
- Bernard, A. and Fischer, A. (2002). New Trends in Rapid Product Development. *CIRP Annals*, 51(2), pp.635-652.
- Bhattacharyya, D., Bowis, M. and Jayaraman, K. (2003). Thermoforming woodfibre-polypropylene composite sheets. *Composites Science and Technology*, 63(3-4), pp.353-365.
- Bijarimi, M., Ahmad, S. and Rasid, R. (2012). Mechanical, thermal and morphological properties of PLA/PP melt blends. In: *International Conference on Agriculture, Chemical and Environmental Sciences*, Dubai, pp.6-7.
- Blechs Schmidt, J. (2013). *Papierverarbeitungstechnik*. München: Hanser Verlag.
- Bogue, R. (2013). 3D printing: the dawn of a new era in manufacturing? *Assembly Automation*, 33(4), pp.307-311.
- Bolboacă, S. and Jäntschi, L. (2007). Design of Experiments: Useful Orthogonal Arrays for Number of Experiments from 4 to 16. *Entropy*, 9(4), pp.198-232.
- Brandtjen & Kluge, Inc. (1983). Embossing and foil stamping. Techniques made easy. [online] mohawkconnects.com. Available at: <https://kluge.biz/wp-content/uploads/2015/10/Embossing-and-Foil-Stamping-Techniques-Made-Easy-Reference-Guide.pdf> [Accessed 12 March 2018].
- Bual, G. S. (2014). Methods to improve surface finish of parts produced by fused deposition modeling. *Manufacturing Science and Technology*, 2(3), pp.51-55.
- Canon (2018). *Canon CanoScan 5600F - Specifications - CanoScan Flatbed Scanners - Canon Ireland*. [online] Canon.ie. Available at: [https://www.canon.ie/scanners/flatbed-scanners/canoscan\\_5600f/specification.aspx](https://www.canon.ie/scanners/flatbed-scanners/canoscan_5600f/specification.aspx) [Accessed 8th May 2018].
- Carrasco, F., Pagès, P., Gámez-Pérez, J., Santana, O. and Maspoch, M. (2010). Processing of poly(lactic acid): Characterization of chemical structure, thermal stability and mechanical properties. *Polymer Degradation and Stability*, 95(2), pp.116-125.
- Celli, A. and Scandola, M. (1992). Thermal properties and physical ageing of poly (l-lactic acid). *Polymer*, 33(13), pp.2699-2703.
- Centers for Disease Control and Prevention (2014). *CDC - Immediately Dangerous to Life or Health Concentrations (IDLH): Nitric acid - NIOSH Publications and Products*. [online] Cdc.gov. Available at: <https://www.cdc.gov/niosh/idlh/7697372.html> [Accessed 10th August 2017].

- Centers for Disease Control and Prevention (2014). *Nitric Acid: Acute Exposure Guideline Levels*. [online] Ncbi.nlm.nih.gov. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK201482/> [Accessed 5th July 2017].
- Chin Ang, K., Fai Leong, K., Kai Chua, C. and Chandrasekaran, M. (2006). Investigation of the mechanical properties and porosity relationships in fused deposition modelling-fabricated porous structures. *Rapid Prototyping Journal*, 12(2), pp.100-105.
- Chohan, J., Singh, R. and Boparai, K. (2016). Mathematical modelling of surface roughness for vapour processing of ABS parts fabricated with fused deposition modelling. *Journal of Manufacturing Processes*, 24, pp.161-169.
- Chua, C., Leong, K. and Lim, C. (2010). *Rapid prototyping*. Singapore: World Scientific.
- Chulilla Cano, J. (2011). The Cambrian Explosion of Popular 3D Printing. *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*, 1(4), pp.31-33.
- Chung Wang, C., Lin, T. and Hu, S. (2007). Optimizing the rapid prototyping process by integrating the Taguchi method with the Gray relational analysis. *Rapid Prototyping Journal*, 13(5), pp.304-315.
- cNet (n.d.). *Veho Discovery VMS-004 Deluxe Specs*. [online] CNET. Available at: <https://www.cnet.com/products/veho-discovery-vms-004-deluxe-microscope-series/specs/> [Accessed 24th May 2018].
- Crocco, D., De Agostinis, M. and Olmi, G. (2013). Experimental characterization and analytical modelling of the mechanical behaviour of fused deposition processed parts made of ABS-M30. *Computational Materials Science*, 79, pp.506-518.
- De Winter, J. C., and Dodou, D. (2010). Five-point Likert items: t test versus Mann-Whitney-Wilcoxon. *Practical assessment, research & evaluation*, 15(11), pp.1-12.
- Delić, G., Vladić, G., Pál, M., Dedijer, S., Stančić, M. (2017). Performance evaluation of paper embossing tools produced by fused deposition modeling additive manufacturing technology. *Journal of graphic engineering and design*, 8(2).
- Divyathej, M.V., Varun, M., Rajeev, P. (2016). Analysis of mechanical behavior of 3D printed ABS parts by experiments. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 7(3), pp.116-124.
- Drobchenko, A., Kamarainen, J-K., Lensu, L., Vartiainen, J., Kälviäinen, H., Eerola, T. (2011) Thresholding-based detection of fine and sparse details, *Front. Electr. Electron. Eng. China*, 6(2), pp.328-338.
- Drummer, D., Cifuentes-Cuéllar, S. and Rietzel, D. (2012). Suitability of PLA/TCP for fused deposition modeling. *Rapid Prototyping Journal*, 18(6), pp.500-507.
- Dumbleton, D. P. (1971). *Longitudinal compression of individual pulp fibers*. Doctoral Thesis, Georgia Institute of Technology.
- Ek, M., Gellerstedt, G., Henriksson, G. (2009). *Paper Products Physics and Technology*, Pulp and Paper Chemistry and Technology, Vol. 4, de Gruyter, Berlin.
- Electronic Means of Communications (n.d.). *Strength of Materials Virtual Laboratory*. [online] Em2lab.yolasite.com. Available at: <http://em2lab.yolasite.com/> [Accessed 27th August 2017].
- Espalin, D., Muse, D., MacDonald, E. and Wicker, R. (2014). 3D Printing multifunctionality: structures with electronics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 72(5-8), pp.963-978.

- Es-Said, O., Foyos, J., Noorani, R., Mendelson, M., Marloth, R. and Pregger, B. (2000). Effect of Layer Orientation on Mechanical Properties of Rapid Prototyped Samples. *Materials and Manufacturing Processes*, 15(1), pp.107-122.
- Fedrigoni (2016). *Symbol Freelifa Satin Data Sheet*. [online] Fedrigonipapers.com. Available at: [http://www.fedrigonipapers.com/sites/default/files/Symbol\\_Freelifa%20Satin\\_ENG.pdf](http://www.fedrigonipapers.com/sites/default/files/Symbol_Freelifa%20Satin_ENG.pdf) [Accessed 8th March 2018].
- Fisher, R.A. (1925). *Statistical Methods for researcher Workers*. London: Oliver and Boyd.
- Fisher, R.A. (1926). The arrangement of field experiments. *Journal of the Ministry Agriculture of Great Britain*, 33, pp.503-513.
- Fluke (2018). *Fluke TiS45 Infrared Camera with manual focus*. [online] En-us.fluke.com. Available at: <http://en-us.fluke.com/products/infrared-cameras/fluke-tis45-infrared-camera.html#features> [Accessed 30th May 2018].
- FormLabs (2018). *Form 2: Desktop Stereolithography (SLA) 3D Printer*. [online] Formlabs. Available at: <https://formlabs.com/3d-printers/form-2/> [Accessed 12 May 2018].
- Galantucci, L., Lavecchia, F. and Percoco, G. (2010). Quantitative analysis of a chemical treatment to reduce roughness of parts fabricated using fused deposition modeling. *CIRP Annals*, 59(1), pp.247-250.
- GAO, F., NIE, Z., WANG, Z., GONG, X. and ZUO, T. (2008). Assessing environmental impact of magnesium production using Pidgeon process in China. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 18(3), pp.749-754.
- Garg, A., Bhattacharya, A. and Batish, A. (2015). On Surface Finish and Dimensional Accuracy of FDM Parts after Cold Vapor Treatment. *Materials and Manufacturing Processes*, 31(4), pp.522-529.
- Gerić, K. (2012). *Savremeni materijali. Plastični materijali*. Skripta sa predavanja. Novi Sad: Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka.
- Giannatsis, J, Sofos, K, Canellidis, V, Karalekas, D and Dedoussis, V. (2012). Investigating the influence of build parameters on the mechanical properties of FDM parts. In: *Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping - Proceedings of the 5th International Conference on Advanced Research and Rapid Prototyping*, pp. 525–529.
- Gibson, I., Rosen, D. and Stucker, B. (2010). *Additive Manufacturing Technologies*. New York, NY: Springer.
- Glavny (2017). *Книги для слепых из Екатеринбургa*. [online] donbass.glavny.tv. Available at: <https://donbass.glavny.tv/news/62917> [Accessed 5th July 2017].
- Goring, D. A. I. (1963). Thermal softening of lignin, hemicellulose, and cellulose. *Pulp and Paper Magazine of Canada*, 64(12), 517-527.
- Graffin s.r.o. (n.d.). High-Speed guillotines: Perfecta 76-92/115-132/168-225. [online] Graffin.cz. Available at: <https://www.graffin.cz/upload/pdf/49368.pdf> [Accessed 2nd June 2018].
- Gurnagul, N., and Seth, R. (1997). "Wet web strength of hardwood kraft pulps," *Pulp and Paper Canada*, 98 (9), pp.305-309.
- Haslach, H. W. Jr. (2000). "The moisture and rate-dependent mechanical properties of paper: A review," *Mechanics of Time-dependent Mater.* 4 (3), 169-210.

- Hauptmann, M. and Majschak, J. (2011). New Quality Level of Packaging Components from Paperboard through Technology Improvement in 3D Forming. *Packaging Technology and Science*, 24(7), pp.419-432.
- Hedayat, A., Sloane, N. and Stufken, J. (2013). *Orthogonal arrays*. [New York]: Springer.
- Hellefoss Paper AS (2018). *Technical data snowbulk*. [online] Hellefoss.com. Available at: <http://www.hellefoss.com/files/Snowbulk.pdf> [Accessed 14th February 2018].
- Hiemenz, J. (2011). *3D Printing Jigs, Fixtures and Other Manufacturing Tools. How to realize an extreme reduction in time and cost by making your custom manufacturing tools via 3D printing*. [online] Stratasys.com. Available at: <http://www.stratasys.com/~media/main/files/white%20papers/ssyswp3dprintingjigsfixtures0112> [Accessed 28th June 2018].
- Hine, D. J. (1964). Verpackungs Rundschau. *Technisch wissenschaftliche Beilage*, 15(2), pp. 9.
- Hofstra Group (n.d.). *Leitz Orthoplan-Pol Polarization Microscope :: Hofstra Group*. [online] Hofstragroup.com. Available at: <https://www.hofstragroup.com/product/leitz-orthoplan-pol-polarization-microscope/> [Accessed 7th May 2018].
- Holik, H. (2013). *Handbook of paper and board*. Revised and Enlarged Edition, Weinheim: Wiley-VCH Verlag.
- Hopkinson, N., Hague, R. and Dickens, P. (2006). *Rapid manufacturing*. Chichester, England: John Wiley.
- Horvath, D., Noorani, R. and Mendelson, M. (2007). Improvement of Surface Roughness on ABS 400 Polymer Using Design of Experiments (DOE). *Materials Science Forum*, 561-565, pp.2389-2392.
- Hwang, S., Reyes, E., Moon, K., Rumpf, R. and Kim, N. (2014). Thermo-mechanical Characterization of Metal/Polymer Composite Filaments and Printing Parameter Study for Fused Deposition Modeling in the 3D Printing Process. *Journal of Electronic Materials*, 44(3), pp.771-777.
- Iggesund (2018). *Embossing and debossing*. [online] Iggesund. Available at: <https://www.iggesund.com/en/knowledge/knowledge-publications/graphics-handbook/finishing/hot-foil-stamping12/> [Accessed 2nd February 2018].
- Ihara (2016). *Ihara U.S. Inc. - Products - Agile Radiant™ Controlled Light 5*. [online] Ihara-us.com. Available at: [http://www.ihara-us.com/products/prod\\_lightbox\\_cl5.html](http://www.ihara-us.com/products/prod_lightbox_cl5.html) [Accessed 18th May 2018].
- ImageJ (2018). *Auto Threshold*. [online] ImageJ. Available at: [https://imagej.net/Auto\\_Threshold#MaxEntropy](https://imagej.net/Auto_Threshold#MaxEntropy) [Accessed 23 November 2018].
- International Organization of Standardization (2002). ISO-604:2002. *Plastics - Determination of compressive properties*. Geneva, ISO.
- International Organization of Standardization (2008). ISO 291:2008. *Plastics – Standard Atmospheres for Conditioning and Testing*. Geneva, ISO.
- International Organization of Standardization (2008). ISO R291:2008. *Plastics - Standard atmospheres for conditioning and testing*. Geneva, ISO.
- International Organization of Standardization (2012). ISO 527-1. *Plastics - Determination of tensile properties - Part 1: General principles*. Geneva, ISO.

- Jezek, G. (2015). *The process of embossing. What is embossing.* [online] Whatisembossing.com. Available at: <http://www.whatisembossing.com/process.html> [Accessed 14th May 2017].
- Jin, Y., Wan, Y., Zhang, B. and Liu, Z. (2017). Modeling of the chemical finishing process for polylactic acid parts in fused deposition modeling and investigation of its tensile properties. *Journal of Materials Processing Technology*, 240, pp.233-239.
- Joutsimo, O. (2004). *Effect of mechanical treatment on softwood kraft fiber properties*, Doctoral Thesis, Helsinki University of Technology.
- Joutsimo, O., Wathén, R., and Tamminen, T. (2005). Effects of fiber deformations on pulp sheet properties and fiber strength. *Paperi ja Puu – Paper and Timber*, 87(6), pp. 392-397.
- Jukeboxprint (2018). *Lord Fern 3D Embossed Cards.* [online] jukeboxprint.com. Available at: <https://www.jukeboxprint.com/> [Accessed 14th May 2018]
- Kang, H., Lee, S., Ko, I., Kengla, C., Yoo, J. and Atala, A. (2016). A 3D bioprinting system to produce human-scale tissue constructs with structural integrity. *Nature Biotechnology*, 34(3), pp.312-319.
- Kapur, J.N., Sahoo, P. K. and Wong, A. C. K. (1985). A New Method for Gray-Level Picture Thresholding Using the Entropy of the Histogram. *Graphical Models and Image Processing*, 29, 273–285.
- Karna, S. K., and Sahai, R. (2012). An overview on Taguchi method. *International Journal of Engineering and Mathematical Sciences*, 1(1), pp.1-7.
- Kipphan, H. (2001). *Handbook of Print Media: Technologies and production methods.* Berlin, Heidelberg: Springer Science & Business Media.
- Kirwan, M. (2013). *Handbook of paper and paperboard packaging technology.* 2nd ed. Chichester, West Sussex: Wiley-Blackwell.
- Konstantinović, V. (1997). *Tehnologija grafičke dorade I i II*, Beograd: Zavod za udžbenike i nastavna sredstva.
- Kumar, G. and Regalla, S. (2012). Optimization of Support Material and Build Time in Fused Deposition Modeling (FDM). *Applied Mechanics and Materials*, 110-116, pp.2245-2251.
- Kunnari, V., Jetsu, P. and Retulainen, E. (2007). Formable paper for new packaging applications. In: *Proceedings of 23rd Symposium International Association of Packaging Research Institutes (IAPRI)*. Windsor.
- Kurki, M., Kouko, J., Kekko P., and Saari, T. (2004). Laboratory scale measurement procedure of paper machine wet web runnability, Part 1. *Paperi ja Puu*, 86 (4), 256-262.
- Laeng, J., Khan, Z. A., & Khu, S. Y. (2006). Optimizing flexible behaviour of bow prototype using Taguchi approach. *Journal of Applied Sciences*, 6, pp.622-630.
- Lanzotti, A., Grasso, M., Staiano, G. and Martorelli, M. (2015). The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer. *Rapid Prototyping Journal*, 21(5), pp.604-617.
- Lee, B., Abdullah, J. and Khan, Z. (2005). Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object. *Journal of Materials Processing Technology*, 169(1), pp.54-61.
- Lee, C., Kim, S., Kim, H. and Ahn, S. (2007). Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 187-188, pp.627-630.



- Leigh, S., Bradley, R., Pursell, C., Billson, D. and Hutchins, D. (2012). A Simple, Low-Cost Conductive Composite Material for 3D Printing of Electronic Sensors. *PLoS ONE*, 7(11), p.e49365.
- Cold Foil (2014). K Laser Technology. [online] Coldfoil.com. Available at: <http://www.coldfoil.com/howitworks.html> [Accessed 2nd August 2017].
- Letcher, T. and Waytashek, M. (2014). Material property testing of 3D-printed specimen in PLA on an entry-level 3D printer. In: *ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. American Society of Mechanical Engineers, pp. V02AT02A014-V02AT02A014.
- Letcher, T., Rankouhi, B. and Javadpour, S. (2015). Experimental study of mechanical properties of additively manufactured ABS plastic as a function of layer parameters. In: *ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, American Society of Mechanical Engineers, pp.V02AT02A018-V02AT02A018.
- Liebau, D. and Heinze, I. (2010). *Industrielle Buchbinderei*. Itzehoe: Verl. Beruf + Schule.
- Lunt, J. (1998). Large-scale production, properties and commercial applications of polylactic acid polymers. *Polymer Degradation and Stability*, 59(1-3), pp.145-152.
- Macdonald, E., Salas, R., Espalin, D., Perez, M., Aguilera, E., Muse, D. and Wicker, R. (2014). 3D Printing for the Rapid Prototyping of Structural Electronics. *IEEE Access*, 2, pp.234-242.
- MakerBot (2015). *Polylactic Acid (PLA, Polylactide)* [online] Makeitfrom.com. Available at: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/Polylactic-Acid-PLA-Polylactide> [Accessed 3rd July 2018].
- MakerBot (2018). *Replicator 2X Experimental 3D Printer*. [online] Store.makerbot.com. Available at: <https://store.makerbot.com/printers/replicator2x/> [Accessed 13th January 2018].
- MakerBot Industries (2013a). *MakerWare 2.2.0 | More Features | MakerBot*. [online] MakerBot. Available at: <https://www.makerbot.com/stories/news/makerware-2-2-0-more-features/> [Accessed 9th June 2017].
- MakerBot Industries (2013b). *MakerWare 2.2.2 | Sharkfill For Shark Week | MakerBot*. [online] MakerBot. Available at: <https://www.makerbot.com/stories/design/makerware-2-2-2-sharkfill-for-shark-week/> [Accessed 12 October 2017].
- Malek, A. S. (2012) Online Fabric Inspection by Image Processing Technology, PhD thesis, Université De Haute Alsace, Mulhouse, France, [Online] Available at: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00720041/document> [Accessed 14 October 2017]
- Mansour, S. and Hague, R. (2003). Impact of rapid manufacturing on design for manufacture for injection moulding. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 217(4), pp.453-461.
- Masood, S.H. and Song, W.Q. (2004). Development of new metal/polymer materials for rapid tooling using fused deposition modelling. *Materials & Design*, 25(7), pp. 587-594.
- McIntosh Embossing (2018). *McIntosh Embossing - Specifying Papers for Foil Stamping and Embossing*. [online] Mcintoshemboss.com. Available at: <http://mcintoshemboss.com/Papers.html> [Accessed 12 January 2018].
- Medina-Carnicer, R. Madrid-Cuevas, F. J. (2008) Unimodal thresholding for edge detection, *Pattern Recognition*, 41, pp.2337 – 2346.
- Melocchi, A., Parietti, F., Loreti, G., Maroni, A., Gazzaniga, A. and Zema, L. (2015). 3D printing by fused deposition modeling (FDM) of a swellable/erodible capsular device for oral pulsatile release of drugs. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 30, pp.360-367.

- Mitrović, R., Mišković, Ž. (2016). Investigation on influence of 3D printing direction on mechanical properties of abs plastic prototypes. In: *3<sup>rd</sup> International Scientific Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications*. University of East Sarajevo, Jahorina. pp. 293-300.
- Mohamed, O., Masood, S. and Bhowmik, J. (2015). Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. *Advances in Manufacturing*, 3(1), pp.42-53.
- Mohawk (2008). Embossing and foil stamping tips. [online] mohawkconnects.com. Available at: [https://d2sg07zx6lm3f.cloudfront.net/s3fs-public/2018-02/Embossing\\_and\\_Foil\\_Stamping\\_Tips.pdf?MDT0Fhniwxtkl95.A755yvRb0oRxxgESe](https://d2sg07zx6lm3f.cloudfront.net/s3fs-public/2018-02/Embossing_and_Foil_Stamping_Tips.pdf?MDT0Fhniwxtkl95.A755yvRb0oRxxgESe) [Accessed 14th February 2018].
- Mohlin, U. B., Dahlblom, J., and Hornatowska, J. (1996). Fibre deformation and sheet strength. *Tappi Journal* 79 (6), pp.105-111.
- Mondigroup (2017). *Technical customer service*. [online] Igepa-plana.hr. Available at: <http://www.igepa-plana.hr/media/1271/maestro-print.pdf> [Accessed 19th March 2018].
- Montero, M., Roundy, S., Odell, D., Ahn, S.H., Wright, P.K. (2001). Material characterization of fused deposition modeling (FDM) ABS by designed experiments. *Society of Manufacturing Engineers*, 10, pp.1-21.
- MultiGraphic Marketing (2014). *Marketing in an Omnichannel World – MultiGraphic Marketing*. [online] MultiGraphic Marketing. Available at: <http://www.thinkmulti.com/marketing-in-an-omnichannel-world/> [Accessed 14th March 2017].
- Murphy, S. and Atala, A. (2014). 3D bioprinting of tissues and organs. *Nature Biotechnology*, 32(8), pp.773-785.
- Nacereddine, N., Hamami, L., Tridi, M. and Oucief, N. (2005) Non-Parametric Histogram-Based Thresholding Methods for Weld Defect Detection in Radiography, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 9, pp.213-217.
- Naitove, M. (2016). *3D-Printed Plastic Molds: K Exhibit Would Make You a Believer*. [online] Ptonline.com. Available at: <https://www.ptonline.com/blog/post/3d-printed-plastic-molds-k-exhibit-would-make-you-a-believer> [Accessed 3rd May 2018].
- Nancharaiah, T., Raju, D. R., & Raju, V. R. (2010). An experimental investigation on surface quality and dimensional accuracy of FDM components. *International Journal on Emerging Technologies*, 1(2), pp.106-111.
- Nikzad, M., Masood, S. and Sbarski, I. (2011). Thermo-mechanical properties of a highly filled polymeric composites for Fused Deposition Modeling. *Materials & Design*, 32(6), pp.3448-3456.
- Niskanen, K. (ed.) (1998). *Paper Physics*. In: *Papermaking Science and Technology* (series) by Gullichsen, J., Paulapuro, H., and Niskanen, K. (eds.), Fapet Oy, Helsinki, Finland: ISBN 952-5216-16-0, 324.
- Niskanen, K., Kärenlampi, P., and Alava, M. (1996). Stochastic analysis of paper toughness. *J. Pulp Paper Sci.* 22(10), pp.392-397.
- NIST Sematech (2003). *What are Taguchi designs?*. [online] Itl.nist.gov. Available at: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pri/section5/pri56.htm> [Accessed 10th January 2018].

- Noorani, R. (2006). *Rapid prototyping: principles and applications*, New Jersey, John Wiley & Sons Incorporated.
- Novakova-Marcincinova L. Novak-Marcincin J. (2013). Verification of mechanical properties of ABS materials used in FDM rapid prototyping technology. In: *Proceedings in Manufacturing Systems*, 8, (2), pp.87-92.
- Nune, K., Kumar, A., Murr, L. and Misra, R. (2015). Interplay between self-assembled structure of bone morphogenetic protein-2 (BMP-2) and osteoblast functions in three-dimensional titanium alloy scaffolds: Stimulation of osteogenic activity. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 104(2), pp.517-532.
- Oasis Scientific, Inc. (n.d.). *VT-300 Portable Digital Microscope*. [online] Oasis Scientific Inc. Available at: <http://www.oasisscientific.com/vt-300-portable-digital-microscope.html> [Accessed 19th May 2018].
- Otsu, N., (1979). A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, (9), pp.62-66.
- Östlund, M., Borodulina, S. and Östlund, S. (2011). Influence of Paperboard Structure and Processing Conditions on Forming of Complex Paperboard Structures. *Packaging Technology and Science*, 24(6), pp.331-341.
- Oxford University press (2018). Shadow. [online] Oxforddictionaries.com. Available at: <https://en.oxforddictionaries.com/definition/shadow> [Accessed 2nd June 2018].
- Page, D. H., and Seth, R. S. (1980). The elastic modulus of paper III: The effects of dislocation, microcompressions, curls, crimps and kinks. *Tappi Journal*, 63(10), pp.99-102.
- Pandey, P., Venkata Reddy, N. and Dhande, S. (2003). Improvement of surface finish by staircase machining in fused deposition modeling. *Journal of Materials Processing Technology*, 132(1-3), pp.323-331.
- Paridhi (n.d.). *Additive Manufacturing Technologies - Directed Energy Deposition* | mechGuru. [online] mechGuru. Available at: <https://mechguru.com/how-products-are-made/7-important-3d-printing-technologies-you-must-know/attachment/directed-energy-deposition/> [Accessed 13th November 2017].
- Pál, M (2014). *Razvoj modela objektivne kontrole površinskih oštećenja premaznih papira u procesu savijanja*. Doktorska disertacija. Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Departman za grafičko inženjerstvo i dizajn.
- Percoco, G., Lavecchia, F., & Galantucci, L. M. (2012). Compressive properties of FDM rapid prototypes treated with a low cost chemical finishing. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 4(19), pp.3838-3842.
- Pérez, C. (2002). Analysis of the surface roughness and dimensional accuracy capability of fused deposition modelling processes. *International Journal of Production Research*, 40(12), pp.2865-2881.
- Pérez-Ramirez, J., Kapteijn, F., Schöffel, K., & Moulijn, J. A. (2003). Formation and control of N<sub>2</sub>O in nitric acid production: where do we stand today? *Applied Catalysis B: Environmental*, 44(2), pp.117-151.
- Petersson, L., Kvien, I. and Oksman, K. (2007). Structure and thermal properties of poly(lactic acid)/cellulose whiskers nanocomposite materials. *Composites Science and Technology*, 67(11-12), pp.2535-2544.

- Polydiam Industries Ltd (n.d.). *Photopolymer Plates – Polydiam Industries Ltd*. [online] Polydiam.com. Available at: <https://polydiam.com/product-category/photopolymer-plates/> [Accessed 27th March 2018].
- Popović, M. (2006). *Digitalna obrada slike*. Akademska misao, Elektrotehnički fakultet, Beograd, pp.253-256.
- Post, P., Huttel, D., Groche, P. and Schabel, S. (2011). Paper characteristics influencing the deep drawing ability of paper. In: *Proceeding of Progress in Paper Physics 2011*. Graz, pp.137-145.
- Radwag (2018). *PS 2100.R2 Precision Balance - RADWAG Balances And Scales*. [online] Radwag.com. Available at: <http://radwag.com/en/ps-2100-r2-precision-balance,w1,447,101-102-112#1> [Accessed 8th March 2018].
- Ranjit, K.R. (2001). *Design of Experiments Using the Taguchi Approach: 16 Steps to Product and Process Improvement*. New York: John Wiley.
- Rankouhi, B., Javadpour, S., Delfanian, F. and Letcher, T. (2016). Failure Analysis and Mechanical Characterization of 3D Printed ABS With Respect to Layer Thickness and Orientation. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 16(3), pp.467-481.
- Rayegani, F. and Onwubolu, G. (2014). Fused deposition modelling (FDM) process parameter prediction and optimization using group method for data handling (GMDH) and differential evolution (DE). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73(1-4), pp.509-519.
- RedStack (n.d.). *MakerBot Replicator 5th Generation Quick Specs*. [online] Redstack.com.au. Available at: <http://redstack.com.au/lib/pdf/Hardware/MakerBotReplicator5thGenquickspecs.pdf> [Accessed 16th May 2018].
- Rešković, S. (n.d.). *Ispitivanje materijala*. Materijala sa predavanja. Metalurški fakultet sveučilišta u Zagrebu.
- Retulainen, E., and Salminen, K., (2009). Effects of furnish related factors on tension and relaxation of wet webs. In: *Advances in Pulp and Paper Research, 14th Fundamental Research Symposium*. Oxford, pp.1019-1038.
- Rhim, J. (2010). Effect of moisture content on tensile properties of paper-based food packaging materials. *Food Science and Biotechnology*, 19(1), pp.243-247.
- Richard, R., Oliveira, R., Soares, G. and Thiré, R. (2014). Direct-write assembly of 3D scaffolds using colloidal calcium phosphates inks. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 19(1), pp.61-67.
- Ridler, T. W., and Calvard, S. (1978). Picture thresholding using an iterative selection method. *IEEE trans syst Man Cybern*, 8(8), pp.630-632.
- Rikard (2016). *The Graphic Designer's Guide to Embossing - ZevenDesign*. [online] ZevenDesign. Available at: <https://zevendesign.com/graphic-designers-guide-embossing/> [Accessed 15th March 2017].
- Rodgers, T. (2013). Fractional Rank [Tableau Community Forums. [online] Community.tableau.com. Available at: <https://community.tableau.com/docs/DOC-1388> [Accessed 4th July 2018].
- Rodríguez, J., Thomas, J. and Renaud, J. (2003). Design of Fused-Deposition ABS Components for Stiffness and Strength. *Journal of Mechanical Design*, 125(3), p.545.
- Rosin, P. L. (2001) Unimodal thresholding, *Pattern Recognition* 34, pp.2083-2096.

- Rosin, P.L., Ioannidis, E. (2003) Evaluation of global image thresholding for change detection, *Pattern Recognition Letters*, 24 (14), pp.2345-2356.
- RP Electronics (2017). *Surface Roughness Tester - Menu Driven S/W*. [online] RP Electronics. Available at: <https://www.rpelectronics.com/tr200-surface-roughness-tester-menu-driven-s-w.html> [Accessed 4th May 2018].
- Sahu, R., Mahapatra, S. and Sood, A. (2013). A Study on Dimensional Accuracy of Fused Deposition Modeling (FDM) Processed Parts using Fuzzy Logic. *Journal for Manufacturing Science & Production*, 13(3), pp.183-197.
- Salmén, L., Back, E. and Alwarsdotter, Y. (1984). Effects of Non-Aqueous Plasticizers on the Thermal Softening of Paper. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 4(3), pp.347-365.
- Salmen, N. L., & Back, E. L. (1977). The influence of water on the glass transition temperature of cellulose. *Tappi*, 60(12), pp. 137-140.
- Salminen, L. (2003). *Aspects of fracture processes in paper*. Doctoral thesis, University of Helsinki, ISBN 951-22-6556-7.
- Sato, S., Gondo, D., Wada, T., Kanehashi, S. and Nagai, K. (2012). Effects of various liquid organic solvents on solvent-induced crystallization of amorphous poly(lactic acid) film. *Journal of Applied Polymer Science*, 129(3), pp.1607-1617.
- Scallan, A. M. (1974). The structure of the cell wall of wood - A consequence of anisotropic inter-microfibrillar bonding? *Wood Science* 6(3), 266-271.
- Sergeysapiro78 (2016). *3D печать и высота слоя*. [online] Geekability. Available at: <https://geekabilityblog.wordpress.com/2016/05/04/3D-печать-и-высота-слоя> [Accessed 29th February 2018].
- Seth, R. S. (2004). Understanding sheet extensibility. In: *Annual meeting-pulp and paper technical association of Canada*. 90(A), pp. 51-60.
- Sharp Print Finishers (2016). *Embossing & Debossing - Sharp Print Finishers*. [online] Sharp Print Finishers. Available at: <http://printfinishing.co.nz/services/embossing/> [Accessed 29th May 2017].
- Shimadzu Corporation (2016). *Table-Top Universal Testing Instruments EZ Test*. [online] Shimadzu.com. Available at: <https://www.ssi.shimadzu.com/sites/ssi.shimadzu.com/files/Products/literature/testing/C224-E055c.pdf> [Accessed 2nd June 2018].
- Shiraishi, N. (1991). Wood plasticization. In: *N. Shiraishi and D.N.-S. Hon (eds.), Wood and Cellulosic Chemistry*, Marcel Dekker, pp.861-906.
- Singh, R. (2009). Three Dimensional Printing for Casting Applications: A State of Art Review and Future Perspectives. *Advanced Materials Research*, 83-86, pp.342-349.
- Singh, R. (2009). Three Dimensional Printing for Casting Applications: A State of Art Review and Future Perspectives. *Advanced Materials Research*, 83-86, pp.342-349.
- Singh, R., Singh, S., Singh, I., Fabbrocino, F. and Fraternali, F. (2017). Investigation for surface finish improvement of FDM parts by vapor smoothing process. *Composites Part B: Engineering*, 111, pp.228-234.
- Sinha, S. K. (2000) Automated Underground Pipe Inspection Using a Unified Image Processing and Artificial Intelligence Methodology, PhD thesis, University of Waterloo, Civil Engineering and Systems Design Engineering, Waterloo, Ontario, Canada, [Online] Available at: <http://ocho.uwaterloo.ca/Research/Theses/sinhaphd.pdf> [Accessed 16th October 2017]

- Snelling, D., Blount, H., Forman, C., Ramsburg, K., Wentzel, A., Williams, C., Druschitz, A. (2013). The effects of 3D printed molds on metal castings. In: *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 827-845.
- Sood, A., Ohdar, R. and Mahapatra, S. (2009). Improving dimensional accuracy of Fused Deposition Modelling processed part using grey Taguchi method. *Materials & Design*, 30(10), pp.4243-4252.
- Sood, A., Ohdar, R. and Mahapatra, S. (2010). Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. *Materials & Design*, 31(1), pp.287-295.
- Sood, A., Ohdar, R. and Mahapatra, S. (2012). Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement. *Journal of Advanced Research*, 3(1), pp.81-90.
- Stangl, A., Kim, J., Yeh, T. (2014). 3D printed tactile picture books for children with visual impairments: a design probe. In: *Proceedings of the 2014 conference on Interaction design and children*, pp.321-324.
- Stratasys Ltd (2016). *3D Printing & Additive Manufacturing | Stratasys*. [online] Stratasys.com. Available at: <http://www.stratasys.com> [Accessed 7th December 2017].
- Sun, Q., Rizvi, G., Bellehumeur, C. and Gu, P. (2008). Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. *Rapid Prototyping Journal*, 14(2), pp.72-80.
- Surový, P., Dinis, C., Marušák, R., de Almeida Ribeiro, N. (2014). Importance of automatic threshold for image segmentation for accurate measurement of fine roots of woody plants/Význam automatického prahovania na obrazovú segmentáciu pre presné merania jemných koreňov drevín. *Forestry Journal*, 60(4) pp.244-249.
- Tábi, T., Kovács, N., Sajó, I., Czígány, T., Hajba, S. and Kovács, J. (2016). Comparison of thermal, mechanical and thermomechanical properties of poly(lactic acid) injection-molded into epoxy-based Rapid Prototyped (PolyJet) and conventional steel mold. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 123(1), pp.349-361.
- Taguchi, G. (1986). *Introduction to Quality Engineering: Designing Quality into Products and Processes*. New York: Asian Productivity Organization.
- Testo Limited (2018). *Testo 735-2 - Multi-channel Thermometer | Temperature measurement | Pharma and Health - Distribution - Pharmacies | Pharma and Health - Distribution | Pharma | Target groups | Testo Ltd*. [online] Testolimited.com. Available at: <http://www.testolimited.com/testo-735-2-multi-channel-thermometer> [Accessed 21st May 2018].
- The Technical Association of Pulp and Paper Industry (2006). TAPPI T494. Tensile properties of paper and paperboard (using constant rate of elongation apparatus). Georgia, TAPPI.
- Thrimurthulu, K., Pandey, P. and Venkata Reddy, N. (2004). Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(6), pp.585-594.
- Tiganis, B., Burn, L., Davis, P. and Hill, A. (2002). Thermal degradation of acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) blends. *Polymer Degradation and Stability*, 76(3), pp.425-434.
- Todorović, D. (2008). *Metodologija psiholoških istraživanja*. Beograd: Centar za primenjenu psihologiju.



- Torrado Perez, A., Roberson, D. and Wicker, R. (2014). Fracture Surface Analysis of 3D-Printed Tensile Specimens of Novel ABS-Based Materials. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 14(3), pp.343-353.
- Torrado, A. and Roberson, D. (2016). Failure Analysis and Anisotropy Evaluation of 3D-Printed Tensile Test Specimens of Different Geometries and Print Raster Patterns. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 16(1), pp.154-164.
- Torrado, A., Shemelya, C., English, J., Lin, Y., Wicker, R. and Roberson, D. (2015). Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing. *Additive Manufacturing*, 6, pp.16-29.
- Tsai, W. (1985). Moment-preserving thresholding: a new approach. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, (29), pp.377-393.
- Tymrak, B., Kreiger, M. and Pearce, J. (2014). Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. *Materials & Design*, 58, pp.242-246.
- U-emboss (n.d.). *Detailed Information on Materials / U-Emboss.com*. [online] U-emboss.com. Available at: <http://u-emboss.com/information/materials-for-die-making/detailed-information-on-materials/> [Accessed 24th December 2018].
- Uesaka, T. (2005). Principal factors controlling web breaks in pressrooms-Quantitative evaluation. *Appita Journal: Journal of the Technical Association of the Australian and New Zealand Pulp and Paper Industry*, 56(6), pp.425.
- Uesaka, T., Ferahi, M., Hristopolus, D., Deng, N., and Moss, C. (2001). Factors controlling pressroom runnability of papers, In: *Transactions of the 12th Fundamental Research Symposium*, Edited by C. F. Baker, Vol. 2, 1423-1440.
- University of Pittsburgh Safety Manual. (n.d.). Guidelines for the safe use of nitric acid. University of Pittsburgh Safety Manual. [online] ccc.chem. Available at: [http://ccc.chem.pitt.edu/wipf/SOPs/Nitric%20Acid\\_SOP.pdf](http://ccc.chem.pitt.edu/wipf/SOPs/Nitric%20Acid_SOP.pdf) [Accessed 19th September 2017].
- Upcraft, S., and Fletcher, R. (2003). The rapid prototyping technologies. *Assembly Automation*. 23(4), pp.318-330.
- Urbas, R., Pivar, M. and Stankovič Elesini, U. (2016). Development of tactile floor plan for the blind and the visually impaired by 3D printing technique. *Journal of Graphic Engineering and Design*, 7(1), pp.19-26.
- Van den Akker, J. A. (1950). The elastic and rheological properties of papermaking fibers. *Tappi*, 33, pp.398-402.
- Van den Akker, J. A., Lathrop, A. L., Voelker, M. H., & Dearth, L. R. (1958). Importance of fiber strength to sheet strength. *Tappi*, 41(8), 416-425.
- Verso Corporation (2018). *First Impressions Last - Ed #6 Embossing / Foil Stamping - Ed Lives Here*. [online] Edliveshere.com. Available at: [https://edliveshere.com/content/embossing\\_foil\\_stamping/9/first\\_impressions\\_last](https://edliveshere.com/content/embossing_foil_stamping/9/first_impressions_last) [Accessed 2nd June 2018].
- Visital, A., & Retulainen, E. (2012). Deep-drawing of paper and paperboard: The role of material properties. *BioResources*, 7(3), 4424-4450.
- Waterhouse, J. F. (1984). The ultimate strength of paper. In: *Proceedings of Progress in Paper Physics – A Seminar, Design Criteria for paper performance*. Stockholm, Sweden, June 25-29

- Wendel, B., Rietzel, D., Kühnlein, F., Feulner, R., Hülder, G., Schmachtenberg, E. (2008). Additive processing of polymers. *Macromolecular materials and engineering*, 293(10), pp.799-809.
- Weng, Z., Wang, J., Senthil, T. and Wu, L. (2016). Mechanical and thermal properties of ABS/montmorillonite nanocomposites for fused deposition modeling 3D printing. *Materials & Design*, 102, pp.276-283.
- Werblow, S. (2009). Anti-Counterfeiting Packaging. In: K. Yam, ed., *The Wiley encyclopedia of packaging*, 3rd ed. New York: A John Wiley & Sons, Inc., p.47.
- Wilken, R. (2013). Paper and Board Converting and Printing. Converting Processes for Paper and Board. In: H. Holik, ed., *Handbook of Paper and Board*, 1st ed. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, p.913.
- Willis, K., Brockmeyer, E., Hudson, S., & Poupyrev, I. (2012). Printed optics: 3D printing of embedded optical elements for interactive devices. In *Proceedings of the 25th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp.589-598.
- Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A review of additive manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 2012, pp.1-10.
- Wu, W., Geng, P., Li, G., Zhao, D., Zhang, H. and Zhao, J. (2015). Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS. *Materials*, 8(9), pp.5834-5846.
- Wu, W., Ye, W., Wu, Z., Geng, P., Wang, Y. and Zhao, J. (2017). Influence of Layer Thickness, Raster Angle, Deformation Temperature and Recovery Temperature on the Shape-Memory Effect of 3D-Printed Polylactic Acid Samples. *Materials*, 10(8), p.970.
- Xinhua, L., Shengpeng, L., Zhou, L., Xianhua, Z., Xiaohu, C. and Zhongbin, W. (2015). An investigation on distortion of PLA thin-plate part in the FDM process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 79(5-8), pp.1117-1126.
- Yan, X. and Gu, P. (1996). A review of rapid prototyping technologies and systems. *Computer-Aided Design*, 28(4), pp.307-318.
- Yen, J. C., Chang, F. J. and Chang, S. (1995). A New Criterion for Automatic Multilevel Thresholding. *IEEE Transactions on Image Processing*, (4), pp.370-378.
- Yokoyama, T., Nakai, K., and Odamura, T. (2007). Tensile stress-strain properties of paper and paperboard and their constitutive equations. *Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics*, 7 (Special\_Issue), pp.68-73.
- Yokoyama, T., Nakai, K., and Inagaki, T. (2009). Orientation dependence of in-plane tensile properties of paper: experiments and theories. *Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics*, 9(Special\_Issue), pp.86-91.
- Yokoyama, T., and Nakai, K. (2010). Orientation Dependence of In-Plane Tensile Properties of Paperboard and Cardboard: Experiments and Theories. *Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics*, 10 (Special\_Issue), pp.146-151.
- Zack, G. W., Rogers, W. E. and Latt, S. A. (1977). Automatic measurement of sister chromatid exchange frequency. *Journal of Histochemistry & Cytochemistry*, (25), pp.741-53.
- Žarko, J., Vladić, G., Pál, M. and Dedijer, S. (2017). Influence of printing speed on production of embossing tools using FDM 3d printing technology. *Journal of Graphic Engineering and Design*, 8(1), pp.19-27.
- Zhang, J. and Peng, A. (2012). Process-Parameter Optimization for Fused Deposition Modeling Based on Taguchi Method. *Advanced Materials Research*, 538-541, pp.444-447.

Zhang, S. U., Han, J., Kang, H. W., Shin, B. C. (2017). Thermo-mechanical properties of ABS parts fabricated by fused deposition modeling and vapor smoothing. In: *Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE), 2017 18th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems*, pp.1-6.

## 13. PRILOZI

### Prilog P1 - Karakterizacija papirnih materiala za utiskivanje

#### Nepremazni papiri

Name	Ofset 80 g/m <sup>2</sup>		Ofset 100 g/m <sup>2</sup>		Ofset 120 g/m <sup>2</sup>		Ofset 140 g/m <sup>2</sup>		Ofset 170 g/m <sup>2</sup>	
	Zatezna čvrstoća papira	Istezanje	Zatezna čvrstoća papira	Istezanje	Zatezna čvrstoća papira	Istezanje	Zatezna čvrstoća papira	Istezanje	Zatezna čvrstoća papira	Istezanje
Unit	N/mm	%	N/mm	%	N/mm	%	N/mm	%	N/mm	%
OF0	5,52472	1,64007	5,12804	1,56889	7,4768	1,89271	8,6616	2,56361	9,4424	1,93229
OF0	5,62016	1,63097	5,25392	1,62681	7,22548	1,8166	8,84202	2,64472	9,40036	1,95083
OF0	5,6754	1,61243	4,99436	1,50417	7,43292	1,88778	8,1669	2,04979	9,28348	1,83514
OF0	5,51752	1,46847	4,95768	1,47341	7,51356	1,84438	8,81227	2,52681	9,3864	1,88264
OF0	5,64384	1,57542	4,79424	1,34354	7,23544	1,8791	8,43598	2,56445	9,66988	2,05702
OF0	5,50992	1,56882	4,7716	1,43702	7,58916	1,95702	8,88948	2,46674	9,28236	2,03875
OF0	5,35436	1,37639	4,93244	1,50097	7,40932	1,87424	8,25259	2,20521	9,34156	2,04778
OF0	5,52472	1,49216	4,45544	1,2116	7,3734	1,94785	8,48885	2,32028	9,09712	1,88361
OF0	5,58456	1,47528	4,86064	1,42493	7,55044	1,88153	8,54459	2,41118	9,65388	2,08944
OF0	5,25304	1,32035	4,85724	1,36069	7,40304	1,88556	6,68736	2,84639	9,65988	1,98313
SrVr	5,52082	1,51604	4,90056	1,4452	7,42096	1,88668	8,37816	2,45991	9,42173	1,97006
StDev	0,13019	0,10877	0,21583	0,11934	0,12122	0,04172	0,60892	0,21556	0,18993	0,08683
Opseg	0,42236	0,31972	0,79848	0,41521	0,36368	0,14042	2,20212	0,7966	0,57276	0,2543
OF20	3,81355	1,5541	4,40356	1,88806	6,40772	2,06146	7,91774	2,49701	8,997	1,9716
OF20	3,74226	1,48806	4,1918	1,72813	6,52756	2,28639	8,12624	2,64438	9,25304	2,12194
OF20	3,92512	1,68944	4,2814	1,76146	6,69176	2,30007	8,15311	2,57125	9,16724	2,00778
OF20	3,87977	1,57757	4,22952	1,67986	6,80488	2,44542	7,68843	2,28604	9,18704	2,04042
OF20	3,71404	1,40632	4,1288	1,60841	6,52568	2,2675	8,04494	2,52653	8,90492	1,94861
OF20	3,85725	1,61479	4,15756	1,51042	6,5094	2,33077	8,45764	2,56181	9,17924	2,17507
OF20	3,96174	1,68417	4,24868	1,63743	6,74612	2,41972	8,38569	2,8441	9,15768	2,14104
OF20	3,93057	1,58264	4,30904	1,68	6,3338	2,1382	8,25494	2,64472	9,23244	2,14958
OF20	3,96495	1,58694	3,96292	1,49938	6,55348	2,16354	8,57868	2,38736	9,1106	2,0548
OF20	4,09492	1,66764	4,20088	1,70938	6,54672	2,29778	8,27276	2,73972	9,1002	1,98722
SrVr	3,88842	1,58517	4,21142	1,67025	6,56471	2,27109	8,18801	2,57029	9,12894	2,05981
StDev	0,11325	0,0887	0,11787	0,1157	0,14572	0,12065	0,24983	0,15372	0,10701	0,08187
Opseg	0,38088	0,28312	0,44064	0,38868	0,47108	0,38396	0,89025	0,55806	0,34812	0,22646
OF45	2,25288	2,48542	2,73722	2,15139	5,05832	3,48236	6,87375	3,22396	7,0722	2,72091
OF45	2,3167	2,58486	2,73544	2,15458	5,21728	3,99271	6,54297	2,84681	7,1184	2,83014
OF45	2,34041	2,84181	2,89831	2,76722	5,06944	3,50875	6,69874	3,10528	7,28256	2,98466
OF45	2,43092	2,87896	2,91937	2,66847	5,16136	3,68222	6,85323	3,21375	7,22144	2,92271
OF45	2,29746	2,54952	2,64767	1,88827	5,06852	3,57827	6,14036	2,61257	7,124	3,00153
OF45	2,34286	2,28417	2,88623	2,46479	5,38068	3,78875	6,29276	2,83458	7,03524	3,07035
OF45	2,36651	2,35146	2,76246	2,24944	5,38328	3,69347	6,71744	3,30174	7,14044	3,16757
OF45	2,27394	2,10827	2,99556	2,83	5,1162	3,40889	6,81788	3,31181	6,962	2,82806
OF45	2,38085	2,46202	2,9295	2,67208	5,38316	3,82382	6,62529	3,1257	7,11028	2,99938
OF45	2,42923	2,65236	2,85161	2,44771	5,20316	3,77889	6,6284	3,1257	7,08772	2,97389
SrVr	2,34318	2,51989	2,83634	2,4294	5,20414	3,67381	6,61908	3,07019	7,11543	2,94992
StDev	0,06038	0,23877	0,10982	0,31096	0,13451	0,18016	0,22733	0,21874	0,08976	0,12959
Opseg	0,17804	0,77069	0,34789	0,94173	0,32496	0,58382	0,73339	0,69924	0,32056	0,44666

OF70	1,68249	3,49444	2,20645	3,73319	4,6064	6,07806	5,64467	4,22347	5,87428	4,87819
OF70	1,75706	4,18667	1,98162	2,30007	4,56312	5,90672	5,70965	4,56188	5,86556	4,53646
OF70	1,73179	4,05424	2,21065	3,85535	4,57968	5,89506	5,14739	3,32243	5,89652	4,78841
OF70	1,68838	3,39014	2,19501	3,64521	4,58104	5,77656	5,67635	4,74424	5,92308	4,91986
OF70	1,76496	4,16597	2,1164	3,06653	4,38108	5,29264	5,39753	3,86549	5,78588	4,70535
OF70	1,76312	3,84646	2,14979	3,08438	4,55156	5,87133	5,63598	4,47611	5,4564	4,67708
OF70	1,74352	3,85077	2,03287	2,84646	4,61776	6,16133	5,50083	4,32292	5,72548	4,6541
OF70	1,78733	3,78563	2,16273	3,46632	4,478	5,76322	5,60017	4,55417	5,80236	4,89931
OF70	1,79718	4,29785	2,13346	3,08694	4,51996	5,94139	5,65713	4,50382	5,64664	4,49611
OF70	1,77704	3,87146	2,12716	3,21882	4,43304	5,73489	5,64245	4,50174	5,566	4,18153
SrVr	1,74929	3,89436	2,13161	3,23033	4,53116	5,84212	5,56122	4,30763	5,75422	4,67364
StDev	0,03876	0,29407	0,07429	0,46582	0,07785	0,23551	0,17219	0,42085	0,15471	0,22619
Opseg	0,11469	0,90771	0,22903	1,55528	0,23668	0,86869	0,56226	1,42181	0,46668	0,73833
OF90	1,79909	4,00854	2,09556	3,34438	4,14268	6,62361	5,07876	4,97097	5,60424	5,25091
OF90	1,83787	4,31202	2,10495	3,46208	4,07512	6,3535	5,08054	5,25333	5,523	4,95931
OF90	1,78916	3,84208	1,9867	2,46236	4,07264	6,22783	5,09775	5,0341	5,40176	4,65222
OF90	1,92242	4,67299	1,96225	2,67452	4,01888	6,00822	5,03063	4,60757	5,66952	5,36431
OF90	1,85369	4,23021	2,06958	3,72313	3,9672	6,07756	5,18861	5,07708	5,5128	5,24889
OF90	1,67682	2,94146	2,14972	4,13132	3,97557	5,821	5,10912	5,00806	5,45152	4,91632
OF90	1,81472	3,92986	2,07343	3,1216	3,87187	5,52743	5,1335	5,05445	5,55772	5,07486
OF90	1,70938	3,10083	2,10479	3,68694	4,10992	6,53639	4,97481	4,5425	5,46876	4,97375
OF90	1,79431	3,62653	2,0675	3,66535	4,1654	6,57517	5,19048	5,32257	5,5232	5,13091
OF90	1,84881	4,1382	1,95581	2,80396	3,84293	5,21188	5,26738	5,49625	5,61188	5,29097
SrVr	1,80463	3,88027	2,05703	3,30756	4,02422	6,09626	5,11516	5,03669	5,53244	5,08625
StDev	0,07089	0,53515	0,06613	0,53247	0,10953	0,46836	0,08451	0,29351	0,08106	0,21627
Opseg	0,2456	1,73153	0,19391	1,66896	0,32247	1,41173	0,29257	0,95375	0,26776	0,71209

## Premazni papiri

Name	Premazni 130 g/m <sup>2</sup>		Premazni 150 g/m <sup>2</sup>		Premazni 170 g/m <sup>2</sup>		Premazni 200 g/m <sup>2</sup>	
	Zatezna čvrstoća papira	Istezanje	Zatezna čvrstoća papira	Istezanje	Zatezna čvrstoća papira	Istezanje	Zatezna čvrstoća papira	Istezanje
Unit	N/mm	%	N/mm	%	N/mm	%	N/mm	%
KD0	5,63292	1,68174	6,19492	2,41313	2,17042	6,85936	7,773	2,5432
KD0	6,12396	2,06375	5,74944	1,95077	2,03854	6,83728	7,5482	2,36243
KD0	5,87256	1,85271	6,09384	2,33903	2,34472	7,09944	7,65576	2,49403
KD0	5,89324	1,76458	5,93432	1,99903	2,13806	6,86672	7,40148	2,31785
KD0	5,76404	1,71889	5,785	1,96438	2,23813	6,9484	7,5044	2,32577
KD0	5,897	1,75313	5,54016	1,64903	2,17069	6,94836	7,09032	1,92007
KD0	6,00304	1,88993	5,91088	2,00563	1,87341	6,6372	7,36172	2,1675
KD0	6,04616	1,85972	5,699	1,86771	2,15674	6,97484	7,62764	2,5125
KD0	6,1044	1,8966	6,014	2,17042	2,14049	6,91576	7,66796	2,47556
KD0	5,967	1,81104	5,79984	1,95708	2,19139	7,02688	7,6678	2,44855
SrVr	5,93043	1,82921	5,87214	2,03162	2,14626	6,91142	7,52983	2,35675
StDev	0,15267	0,11002	0,19633	0,22383	0,12352	0,1251	0,20043	0,19132
Opseg	0,49104	0,38201	0,65476	0,7641	0,47131	0,46224	0,68268	0,62313

KD20	5,5878	1,99702	5,73808	2,68493	2,43153	6,35984	7,54756	2,87341
KD20	5,46128	1,92688	5,69664	2,64521	2,11653	6,15728	7,38744	2,8257
KD20	5,31564	1,72819	5,51304	2,3716	2,41389	6,39852	7,17532	2,46896
KD20	5,62412	2,01049	5,53476	2,35806	2,29271	6,20512	7,09464	2,31549
KD20	5,77564	2,25583	5,46124	2,21743	2,49875	6,43052	7,5814	2,94118
KD20	5,67676	2,12111	5,42464	2,08896	2,45958	6,39904	7,19372	2,39716
KD20	5,53424	1,98952	5,52632	2,27736	2,42243	6,41144	7,5654	2,86049
KD20	5,50888	1,91841	5,41504	2,14	2,60507	6,53468	7,6226	2,88799
KD20	5,7172	2,12639	5,57012	2,45521	2,47146	6,38248	7,40492	2,66118
KD20	5,55632	1,98681	5,46892	2,28833	2,29097	6,2176	7,43576	2,60486
SrVr	5,57579	2,00607	5,53488	2,35271	2,40029	6,34965	7,40088	2,68364
StDev	0,13333	0,14221	0,10829	0,19713	0,13577	0,11829	0,18836	0,22754
Opseg	0,46	0,52764	0,32304	0,59597	0,48854	0,3774	0,52796	0,62569
KD45	4,71292	3,03569	4,56668	3,6382	2,97806	5,3244	6,5194	4,15611
KD45	4,85692	3,26722	4,621	3,67931	3,44785	5,53108	6,32016	3,79847
KD45	4,94572	3,56097	4,60688	3,7416	3,64229	5,62416	6,56016	4,17743
KD45	4,64728	2,85049	4,41672	3,10854	3,31361	5,5346	6,67808	4,26979
KD45	4,76496	3,09417	4,49032	3,32278	3,57778	5,58352	6,51968	3,87153
KD45	4,67272	2,83667	4,65384	3,69063	3,33222	5,49428	6,64652	4,27458
KD45	4,67972	2,86514	4,71152	3,75771	3,47577	5,54292	6,70128	4,36188
KD45	4,67416	3,00833	4,5988	3,605	3,71604	5,6414	6,30212	3,49618
KD45	4,71584	3,03847	4,72556	4,02257	3,58903	5,55024	6,67072	4,2232
KD45	4,79496	3,16077	4,46156	3,0866	4,02458	5,64844	6,4642	3,93681
SrVr	4,74652	3,07179	4,58529	3,56529	3,50972	5,5475	6,53823	4,0566
StDev	0,09523	0,22093	0,10292	0,29989	0,27764	0,09384	0,14352	0,27238
Opseg	0,29844	0,7243	0,30884	0,93597	1,04652	0,32404	0,39916	0,8657
KD70	4,14136	5,00111	4,33524	6,57322	5,12611	4,8848	5,62132	5,84628
KD70	4,177	5,24	4,17848	5,906	4,96702	4,85184	5,7706	6,35794
KD70	4,09272	4,79945	4,21676	5,86478	5,11278	4,89312	5,7594	6,16333
KD70	4,07072	4,75611	4,23736	5,99656	5,20077	4,95664	5,56868	5,64756
KD70	4,22516	5,17896	4,108	5,62144	4,37827	4,73112	5,6126	5,97439
KD70	4,339	5,48306	4,09796	5,41833	5,27153	5,00428	5,64384	6,09333
KD70	4,26124	5,38299	4,08788	5,61878	5,30028	5,02404	5,62556	5,93672
KD70	4,13916	5,08208	4,34724	6,39728	5,28868	5,06596	5,73108	6,17989
KD70	4,1736	5,02716	4,06596	5,24417	5,19736	5,04908	5,66272	6,01528
KD70	4,36508	5,52944	4,2602	5,75533	5,17972	5,05668	5,37008	5,18847
SrVr	4,1985	5,14804	4,19351	5,83959	5,10225	4,95176	5,63659	5,94032
StDev	0,09861	0,26625	0,10259	0,4102	0,27295	0,1096	0,11512	0,32856
Opseg	0,29436	0,77333	0,28128	1,32905	0,92201	0,33484	0,40052	1,16947
KD90	4,37832	6,17044	4,20888	7,28556	5,802	4,96384	5,37984	6,05461
KD90	4,1862	5,38327	4,07748	6,84128	6,075	5,04356	5,43592	6,20283
KD90	4,25576	5,6675	4,22812	7,47572	6,13056	5,05956	5,45588	6,38333
KD90	4,21896	5,58044	4,21592	7,53156	5,295	4,79768	5,3276	5,97828
KD90	4,11776	5,20063	3,9683	6,6035	5,63083	4,87924	5,27228	5,652
KD90	4,36004	6,13306	4,07208	7,06106	5,98028	4,98984	5,33468	5,89417
KD90	4,40776	6,26722	4,11408	7,32967	5,7005	4,894	0,01332	0,00059
KD90	4,32832	6,02394	4,03244	6,93189	5,18625	4,73452	0,01329	0,00057
KD90	4,16592	5,38042	3,91367	6,40117	6,33639	5,06792	0,01345	0,0006
KD90	4,30644	5,99245	3,88403	6,36022	5,80022	4,95532	0,01347	0,0006



SrVr	4,27255	5,77994	4,0715	6,98216	5,7937	4,93855	3,22597	3,61676
StDev	0,0985	0,3836	0,12398	0,42877	0,36132	0,11202	2,76545	3,118
Opseg	0,29	1,06659	0,34409	1,17134	1,15014	0,3334	5,44259	6,38276

## Voluminozni papiri

Name	Voluminozni 60 g/m2		Voluminozni 70 g/m2		Voluminozni 80 g/m2	
	Zatezna čvrstoća papira	Istezanje	Zatezna čvrstoća papira	Istezanje	Zatezna čvrstoća papira	Istezanje
Unit	N/mm	%	N/mm	%	N/mm	%
VOL0	2,03883	0,9525	2,84826	1,16535	3,34276	1,26556
VOL0	2,18657	1,13125	2,96537	1,23285	3,40718	1,25681
VOL0	2,06486	1,12424	2,92187	1,15639	3,39263	1,32819
VOL0	2,20534	1,09938	3,10645	1,22847	3,31529	1,2191
VOL0	2,1112	0,99208	2,88933	1,10341	3,43394	1,30889
VOL0	2,11228	1,05542	2,98683	1,23966	3,45522	1,18042
VOL0	2,07	0,98299	2,96327	1,22139	3,43981	1,25583
VOL0	2,09956	1,05028	3,04486	1,20264	3,41428	1,30507
VOL0	2,03404	0,97382	3,03558	1,21681	3,45224	1,30452
VOL0	2,07426	1,02479	3,10448	1,32577	3,41632	1,27035
SrVr	2,09969	1,03868	2,98663	1,20927	3,40697	1,26947
StDev	0,0575	0,06419	0,08682	0,05925	0,04602	0,04513
Opseg	0,1713	0,17875	0,25819	0,22236	0,13993	0,14777
VOL20	1,78471	1,13577	2,54933	1,08458	2,86646	1,5016
VOL20	1,69104	1,01952	2,50713	1,09903	2,90788	1,69653
VOL20	1,89765	1,33035	2,31392	0,92528	2,81332	1,39042
VOL20	1,77802	1,21653	2,41768	1,05674	2,57464	1,23083
VOL20	1,76156	1,13979	2,52403	1,08	2,77732	1,47577
VOL20	1,83919	1,2091	2,47532	1,135	2,73962	1,43924
VOL20	1,95794	1,29966	2,41678	1,08271	2,78206	1,49681
VOL20	1,93624	1,34188	2,53782	1,15188	2,85626	1,52646
VOL20	1,81274	1,17952	2,38231	0,99389	2,71667	1,36966
VOL20	1,9684	1,39514	2,49508	1,11688	2,82188	1,49702
SrVr	1,84275	1,22673	2,46194	1,0726	2,78561	1,46243
StDev	0,09362	0,11503	0,07661	0,06773	0,09429	0,12063
Opseg	0,27736	0,37562	0,23541	0,2266	0,33324	0,4657
VOL45	1,3771	1,33542	1,80852	1,23007	2,03826	2,0516
VOL45	1,34249	1,32813	1,8209	1,22514	1,96977	1,78111
VOL45	1,36626	1,32778	1,83155	1,20271	1,9939	1,91083
VOL45	1,34428	1,30903	1,82486	1,32299	1,93876	1,68028
VOL45	1,31445	1,23063	1,85669	1,27049	1,91244	1,65625
VOL45	1,33309	1,32139	1,82403	1,24229	1,98248	1,96222
VOL45	1,31648	1,27174	1,83078	1,3216	1,9472	1,85569
VOL45	1,35339	1,35069	1,77674	1,23966	1,90441	1,74146

VOL45	1,35492	1,38104	1,62277	1,01306	2,00335	2,03195
VOL45	1,25116	1,16618	1,85507	1,41292	1,90991	1,67222
SrVr	1,33536	1,3022	1,80519	1,24809	1,96005	1,83436
StDev	0,03563	0,06321	0,06797	0,10378	0,04501	0,14985
Opseg	0,12594	0,21486	0,23392	0,39986	0,13385	0,39535
VOL70	1,08534	1,42694	1,41964	1,40597	1,4847	1,77736
VOL70	1,08309	1,40174	1,49145	1,60118	1,53537	2,06625
VOL70	1,08627	1,43681	1,50274	1,66146	1,53982	1,99458
VOL70	1,11718	1,33063	1,53141	1,76493	1,53233	1,97792
VOL70	1,13398	1,43604	1,47182	1,53813	1,59794	2,17424
VOL70	1,11699	1,40493	1,43546	1,52014	1,56108	2,01778
VOL70	1,05804	1,20472	1,48867	1,65966	1,33198	1,33993
VOL70	1,07037	1,22792	1,53074	1,67104	1,5786	2,11521
VOL70	1,12939	1,44986	1,4782	1,49	1,57216	2,13035
VOL70	1,01364	1,16368	1,43282	1,42993	1,55398	2,06125
SrVr	1,08943	1,34833	1,4783	1,57424	1,5288	1,96549
StDev	0,03692	0,10934	0,03921	0,11635	0,07577	0,24562
Opseg	0,12034	0,28618	0,11177	0,35896	0,26596	0,83431
VOL90	1,02954	1,55694	1,31407	1,62	1,48058	1,83063
VOL90	1,0414	1,51097	1,3364	1,67535	1,46939	1,76694
VOL90	1,0327	1,55194	1,29504	1,555	1,46491	1,84202
VOL90	1,05861	1,61216	1,2373	1,32792	1,47079	1,94049
VOL90	1,10278	1,81382	0,98955	0,87479	1,52513	2,07549
VOL90	1,08193	1,69611	1,37958	1,76778	1,5028	1,90424
VOL90	1,0668	1,63771	1,36253	1,76493	1,5346	2,08042
VOL90	1,0375	1,56889	1,33268	1,62674	1,53405	2,01313
VOL90	1,03135	1,55653	1,38787	1,72403	1,55282	2,09938
VOL90	1,06959	1,64	1,30849	1,49174	1,53096	1,98708
SrVr	1,05522	1,61451	1,29435	1,54283	1,5066	1,95398
StDev	0,02487	0,0888	0,11578	0,2705	0,03284	0,11637
Opseg	0,07324	0,30285	0,39832	0,89299	0,08791	0,33244

Prilog P2 - Karakterizacija procesnih parametrov FDM tehnike 3D štampe

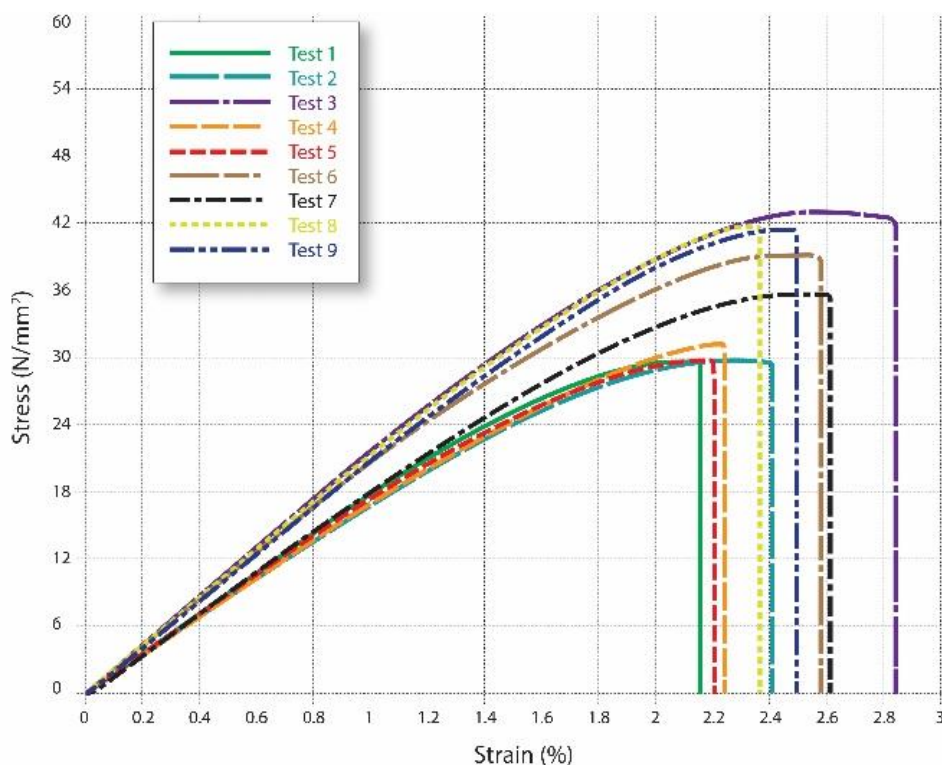
BLOK I

\* ZATEZNA ČVRSTOČA EPRUVETA IZRAĐENIH FDM TEHNIKOM 3D ŠTAMPE

BLOK I							
Br. testa		Maks.Sila	Maks.Napon	Sila loma	Napon loma	Istezanje pri lomu	Modul elastičnosti
		N	N/mm <sup>2</sup>	N	N/mm <sup>2</sup>	%	N/mm <sup>2</sup>
Test #1	PLA_1	1306,60	31,12	1304,66	31,07	2,14	1740,92
	PLA_2	1339,21	31,22	1334,23	31,10	2,24	1741,43
	PLA_3	1116,03	26,70	1115,22	26,68	2,08	1678,59
	Sred.Vredn.	1253,95	29,68	1251,37	29,62	2,15	1720,31
	Std.Dev.	120,55	2,58	118,83	2,54	0,08	36,13
	Opseg	223,18	4,51	219,01	4,42	0,17	62,84
Test #2	PLA_1	1334,67	31,95	1331,74	31,88	2,40	1826,68
	PLA_2	1153,94	27,57	1144,82	27,36	2,39	1703,87
	PLA_3	1224,88	29,65	1217,14	29,47	2,43	1794,33
	Sred.Vredn.	1237,83	29,73	1231,23	29,57	2,41	1774,96
	Std.Dev.	91,06	2,19	94,25	2,26	0,02	63,66
	Opseg	180,73	4,38	186,92	4,52	0,04	122,81
Test #3	PLA_1	1945,32	46,21	1896,98	45,06	3,06	2110,18
	PLA_2	1786,75	42,47	1739,71	41,35	2,86	1501,69
	PLA_3	1726,90	40,82	1715,72	40,56	2,59	2175,43
	Sred.Vredn.	1819,66	43,17	1784,14	42,32	2,84	1929,10
	Std.Dev.	112,87	2,76	98,46	2,40	0,23	371,58
	Opseg	218,42	5,39	181,26	4,51	0,47	673,74
Test #4	PLA_1	1373,96	32,18	1370,65	32,10	2,48	1382,65
	PLA_2	1286,12	30,02	1285,76	30,02	2,05	1586,67
	PLA_3	1353,28	31,38	1349,68	31,30	2,18	1851,44
	Sred.Vredn.	1337,79	31,19	1335,36	31,14	2,24	1606,92
	Std.Dev.	45,92	1,09	44,22	1,05	0,22	235,05
	Opseg	87,84	2,16	84,89	2,09	0,44	468,79
Test #5	PLA_1	1226,29	29,55	1225,84	29,54	2,31	1479,24
	PLA_2	1258,67	29,61	1258,43	29,60	2,13	1742,12
	PLA_3	1274,11	29,79	1273,56	29,78	2,15	1794,64
	Sred.Vredn.	1253,02	29,65	1252,61	29,64	2,20	1672,00
	Std.Dev.	24,40	0,12	24,39	0,12	0,10	168,99
	Opseg	47,82	0,24	47,72	0,24	0,18	315,40
Test #6	PLA_1	1674,33	40,03	1660,47	39,70	2,55	2087,91
	PLA_2	1590,96	37,89	1581,75	37,67	2,38	1740,31
	PLA_3	1644,61	39,70	1623,71	39,19	2,80	2076,83
	Sred.Vredn.	1636,63	39,21	1621,98	38,85	2,58	1968,35
	Std.Dev.	42,25	1,15	39,39	1,06	0,21	197,57
	Opseg	83,37	2,14	78,72	2,03	0,42	347,60

Test #7	PLA_1	1545,30	35,18	1542,70	35,12	2,49	1955,70
	PLA_2	1583,66	37,70	1574,61	37,48	2,82	1810,02
	PLA_3	1483,93	34,04	1481,85	33,99	2,53	1331,93
	Sred.Vredn.	1537,63	35,64	1533,05	35,53	2,61	1699,22
	Std.Dev.	50,31	1,87	47,13	1,78	0,18	326,31
	Opseg	99,73	3,66	92,76	3,49	0,33	623,77
Test #8	PLA_1	1790,34	41,68	1783,89	41,53	2,49	1889,16
	PLA_2	1691,59	40,04	1690,65	40,02	2,29	2010,15
	PLA_3	1824,82	43,44	1817,44	43,26	2,31	2208,72
	Sred.Vredn.	1768,92	41,72	1763,99	41,60	2,36	2036,01
	Std.Dev.	69,15	1,70	65,70	1,62	0,11	161,34
	Opseg	133,23	3,39	126,79	3,24	0,21	319,56
Test #9	PLA_1	1786,03	41,45	1783,15	41,38	2,56	1628,02
	PLA_2	1761,83	40,72	1760,62	40,70	2,36	1763,13
	PLA_3	1822,24	42,18	1812,24	41,95	2,56	2021,28
	Sred.Vredn.	1790,03	41,45	1785,34	41,34	2,49	1804,14
	Std.Dev.	30,40	0,73	25,88	0,63	0,12	199,81
	Opseg	60,41	1,46	51,62	1,26	0,20	393,26

\* KRIVE SREDNJIH VREDNOSTI NAPON-ISTEZANJE ZA DEVET TESTIRANIH KOMBINACIJA PRVE ČETIRI ULAZNE PROMENJIVE



*Krive srednjih vrednosti napon-istezanje za devet testiranih kombinacija prve četiri ulazne promenjive*

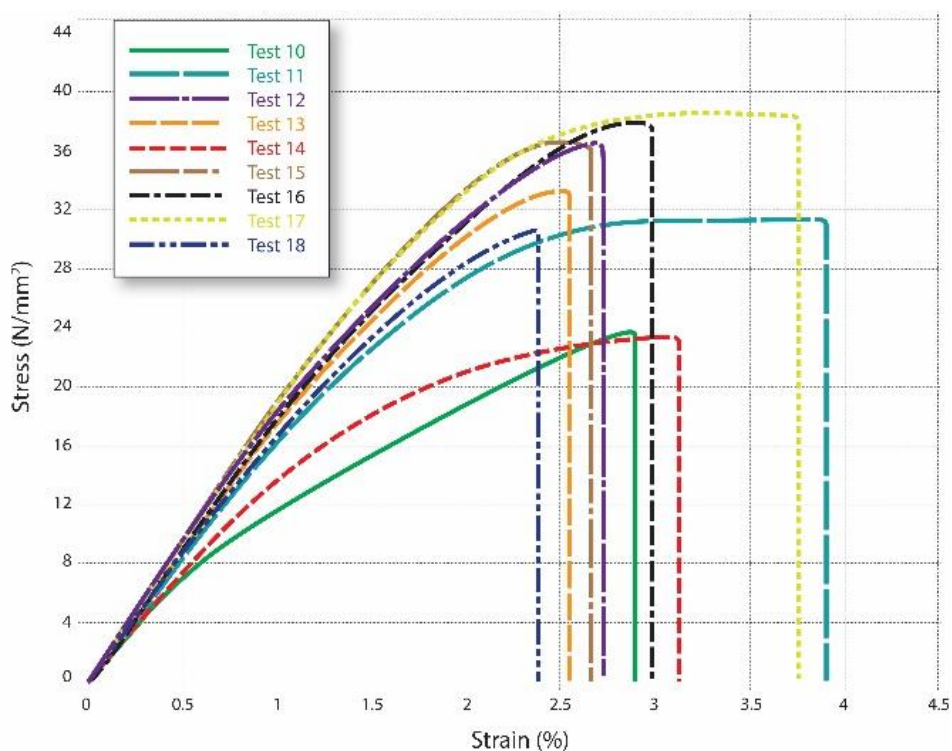
## BLOK II

\* ZATEZNA ČVRSTOĆA EPRUVETA IZRAĐENIH FDM TEHNIKOM 3D ŠTAMPE

BLOK II							
Br. testa		Maks.Sila	Maks.Napon	Sila loma	Napon loma	Istezanje pri lomu	Modul elastičnosti
		N	N/mm <sup>2</sup>	N	N/mm <sup>2</sup>	%	N/mm <sup>2</sup>
Test #10	PLA_1	958,07	24,04	957,70	24,03	2,88	1574,68
	PLA_2	986,18	24,26	974,72	23,98	3,01	1530,50
	PLA_3	911,18	22,92	907,81	22,83	2,79	1314,99
	Sred.Vredn.	951,81	23,74	946,74	23,61	2,89	1473,39
	Std.Dev.	37,89	0,72	34,78	0,68	0,11	138,95
	Opseg	75,00	1,34	66,92	1,20	0,22	259,69
Test #11	PLA_1	1466,96	33,77	1463,57	33,70	3,95	1789,07
	PLA_2	1465,56	33,75	1461,50	33,66	4,23	1645,39
	PLA_3	1472,20	34,96	1466,63	34,82	3,52	1426,41
	Sred.Vredn.	1468,24	34,16	1463,90	34,06	3,90	1620,29
	Std.Dev.	3,50	0,69	2,58	0,66	0,36	182,63
	Opseg	6,64	1,21	5,13	1,17	0,72	362,66
Test #12	PLA_1	1688,89	40,05	1682,96	39,91	2,76	2005,40
	PLA_2	1650,71	39,39	1647,95	39,33	2,58	2076,26
	PLA_3	1704,26	41,56	1679,97	40,97	2,79	2099,09
	Sred.Vredn.	1681,29	40,33	1670,29	40,07	2,71	2060,25
	Std.Dev.	27,57	1,11	19,41	0,83	0,12	48,85
	Opseg	53,55	2,17	35,01	1,64	0,21	93,69
Test #13	PLA_1	1478,72	34,68	1474,38	34,58	2,57	1222,40
	PLA_2	1550,37	37,17	1548,58	37,13	2,59	1446,32
	PLA_3	1544,00	36,94	1541,39	36,88	2,47	2028,11
	Sred.Vredn.	1524,36	36,26	1521,45	36,19	2,54	1565,61
	Std.Dev.	39,66	1,38	40,92	1,41	0,07	415,89
	Opseg	71,65	2,49	74,20	2,55	0,12	805,71
Test #14	PLA_1	1013,61	23,49	997,63	23,12	3,03	1454,28
	PLA_2	1274,33	30,27	1261,52	29,97	4,35	1644,20
	PLA_3	976,22	22,83	972,57	22,74	1,99	1674,34
	Sred.Vredn.	1088,05	25,53	1077,24	25,28	3,12	1590,94
	Std.Dev.	162,40	4,12	160,08	4,07	1,18	119,31
	Opseg	298,11	7,44	288,95	7,22	2,36	220,06
Test #15	PLA_1	1595,16	38,69	1582,29	38,38	2,58	2015,94
	PLA_2	1701,45	41,39	1674,60	40,74	2,63	2029,70
	PLA_3	1627,38	39,74	1609,42	39,30	2,77	2102,77
	Sred.Vredn.	1641,33	39,94	1622,10	39,47	2,66	2049,47
	Std.Dev.	54,50	1,36	47,44	1,19	0,10	46,67
	Opseg	106,29	2,70	92,31	2,36	0,19	86,83

Test #16	PLA_1	1758,42	41,73	1747,80	41,48	3,32	1570,28
	PLA_2	1737,29	42,37	1728,61	42,16	2,89	1809,56
	PLA_3	1688,85	40,07	1675,31	39,75	2,73	1978,18
	Sred.Vredn.	1728,19	41,39	1717,24	41,13	2,98	1786,01
	Std.Dev.	35,67	1,19	37,56	1,24	0,30	204,97
	Opseg	69,57	2,30	72,49	2,41	0,59	407,90
Test #17	PLA_1	1751,14	41,52	1739,92	41,25	2,97	2038,36
	PLA_2	1743,08	41,90	1705,73	41,01	4,29	1561,49
	PLA_3	1853,09	43,34	1817,89	42,52	4,03	1578,30
	Sred.Vredn.	1782,44	42,26	1754,51	41,59	3,76	1726,05
	Std.Dev.	61,32	0,96	57,49	0,81	0,70	270,60
	Opseg	110,01	1,82	112,16	1,51	1,32	476,87
Test #18	PLA_1	1418,79	34,06	1408,72	33,82	2,43	1736,43
	PLA_2	1384,35	32,97	1382,48	32,93	2,28	1576,96
	PLA_3	1358,25	33,14	1356,77	33,10	2,42	1908,87
	Sred.Vredn.	1387,13	33,39	1382,66	33,28	2,38	1740,75
	Std.Dev.	30,37	0,59	25,98	0,47	0,08	166,00
	Opseg	60,54	1,09	51,95	0,89	0,15	331,91

\* KRIVE SREDNJIH VREDNOSTI NAPON-ISTEZANJE ZA DEVET TESTIRANIH KOMBINACIJA DRUGE ČETIRI ULAZNE PROMENJIVE



*Krive srednjih vrednosti napon-istezanje za devet testiranih kombinacija druge četiri ulazne promenjive*



\* VREDNOSTI POVRŠINSKE HRPAVOSTI UZORAKA IZRAĐENIH FDM TEHNIKOM 3D ŠTAMPE – BLOK 1

*Napomena: Precrtana polja označavaju merenja koja izlaze van mernog opsega uređaja*

UZORAK #1										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	2,88	8,63	2,37	12,12	2,41	15,01	2,43	8,93	3,30	13,05
Rq (µm)	4,05	11,38	3,20	16,75	2,94	20,02	3,05	12,44	4,17	17,42
Rz (µm)	18,37	54,15	11,21	74,25	10,86	85,21	13,04	59,25	18,04	68,44
Rt (µm)	40,40	96,36	30,60	117,00	16,12	116,90	18,28	89,31	22,76	129,00
Rp (µm)	6,54	24,28	3,46	31,55	5,31	40,29	7,15	27,14	9,48	38,92
Rv (µm)	11,84	29,87	7,76	42,70	5,55	44,91	5,90	32,11	8,57	29,51
RS (mm)	0,19	0,25	0,50	0,40	0,17	0,27	0,17	0,24	0,12	0,40
RSm (mm)	0,33	0,50	0,80	0,44	0,40	0,50	0,19	0,44	0,21	0,57
Rsk	-3,04	-1,23	-6,52	0,37	-0,23	0,05	-0,06	-0,10	0,22	0,96

UZORAK #2										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	2,53	2,95	2,27	5,27	1,28	3,26	2,04	3,55	1,41	2,97
Rq (µm)	3,10	3,57	2,88	6,73	1,60	4,37	2,48	4,83	1,69	3,81
Rz (µm)	12,71	14,13	13,23	27,55	7,80	17,22	8,32	22,68	6,61	16,11
Rt (µm)	17,79	18,15	20,07	41,72	10,76	26,00	14,96	54,24	9,56	28,00
Rp (µm)	6,16	7,16	9,48	14,89	4,19	11,37	4,84	10,46	3,45	9,47
Rv (µm)	6,55	6,98	3,75	12,65	3,61	5,85	3,48	12,22	3,16	6,64
RS (mm)	0,05	0,12	0,20	0,21	0,05	0,15	0,08	0,33	0,05	0,12
RSm (mm)	0,15	0,44	0,44	0,50	0,08	0,50	0,17	0,57	0,18	0,25
Rsk	-0,75	0,06	1,25	-0,21	-0,07	1,54	0,65	-2,01	0,15	0,49

UZORAK #3										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	1,69	3,73	1,69	3,12	0,91	3,67	1,49	3,72	2,02	3,08
Rq (µm)	2,00	4,86	2,01	3,73	1,14	4,87	1,87	4,73	2,39	4,00
Rz (µm)	7,96	19,24	5,51	15,72	4,80	19,70	7,43	22,69	7,80	22,46
Rt (µm)	10,52	32,27	9,36	21,20	6,52	32,56	10,27	29,55	10,80	30,07
Rp (µm)	3,94	11,35	2,94	7,34	2,18	10,32	4,06	12,56	3,71	10,82
Rv (µm)	4,02	7,89	2,58	8,38	2,62	9,38	3,38	10,13	4,09	11,64
RS (mm)	0,06	0,24	0,27	0,15	0,08	0,19	0,17	0,13	0,18	0,20
RSm (mm)	0,19	0,57	0,67	0,33	0,18	0,50	0,25	0,33	0,44	0,29
Rsk	0,09	0,93	0,25	-0,41	-0,66	0,57	0,17	0,34	-0,01	-0,26

UZORAK #4										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	1,76	2,94	1,30	2,21	1,44	3,18	2,01	4,50	2,77	4,83
Rq (µm)	2,15	4,38	1,62	2,92	1,77	3,99	2,57	5,45	3,26	5,96
Rz (µm)	8,34	26,85	7,18	12,81	6,79	15,77	8,47	23,44	12,55	23,87
Rt (µm)	16,04	36,95	14,23	18,76	11,11	23,71	15,72	30,36	19,63	30,12
Rp (µm)	4,89	18,63	3,82	5,91	3,71	6,74	4,42	10,73	6,25	10,68
Rv (µm)	3,46	8,22	3,36	6,90	3,08	9,04	4,05	12,70	6,30	13,19
RS (mm)	0,27	0,18	0,14	0,12	0,13	0,15	0,24	0,22	0,13	0,24
RSm (mm)	0,80	0,27	0,25	0,24	0,20	0,40	0,50	0,40	0,29	0,57
Rsk	0,24	1,67	-0,25	0,00	0,61	-0,29	0,68	-0,25	-0,52	-0,13

UZORAK #5										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	2,02	5,44	2,67	4,09	1,29	4,02	1,37	4,02	1,95	3,96
Rq (µm)	2,30	7,23	3,32	5,72	1,50	5,14	1,71	5,27	2,25	4,60
Rz (µm)	5,95	32,30	12,12	26,47	4,90	26,15	4,98	25,28	6,50	19,18
Rt (µm)	9,40	56,04	16,15	38,84	6,56	41,04	8,52	37,79	8,92	28,00
Rp (µm)	2,84	14,33	5,58	10,96	2,02	10,80	2,38	11,37	3,37	10,08
Rv (µm)	3,11	17,96	6,55	15,52	2,89	15,34	2,60	13,90	3,14	9,10
RS (mm)	0,31	0,31	0,12	0,31	0,16	0,29	0,31	0,22	0,27	0,19
RSm (mm)	0,67	0,50	0,25	0,50	0,50	0,57	0,67	0,44	0,67	0,57
Rsk	-0,49	-0,11	-0,33	-0,14	-0,56	-0,16	0,37	0,02	0,12	0,32

UZORAK #6										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	3,68	3,19	1,65	3,97	1,69	4,02	2,12	4,08	3,53	6,14
Rq (µm)	4,42	4,86	2,03	5,88	1,95	5,18	2,44	5,65	4,19	7,90
Rz (µm)	13,00	29,12	6,95	31,87	6,35	26,92	8,11	28,87	12,40	35,21
Rt (µm)	17,36	42,31	9,40	54,20	8,80	43,79	9,52	39,68	19,60	53,27
Rp (µm)	5,40	9,25	3,44	11,30	3,00	11,19	4,09	11,83	6,30	19,63
Rv (µm)	7,60	19,87	3,51	20,56	3,35	15,72	4,02	17,04	6,10	15,57
RS (mm)	0,36	0,27	0,18	0,33	0,27	0,25	0,25	0,22	0,29	0,25
RSm (mm)	0,80	0,50	0,27	0,57	0,57	0,57	0,67	0,33	1,00	0,50
Rsk	-0,09	-1,14	0,08	-1,90	-0,67	-0,18	0,04	-0,95	-0,18	-0,06

UZORAK #7										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	4,32	7,20	1,95	7,78	5,77	7,52	3,98	5,25	1,39	7,15
Rq (µm)	5,20	10,36	2,35	12,00	7,26	10,75	4,56	7,96	1,60	11,10
Rz (µm)	14,92	55,42	7,05	62,80	23,75	52,55	14,19	41,24	4,06	59,39
Rt (µm)	24,68	79,72	10,23	82,83	37,59	93,83	18,36	78,40	6,60	77,59
Rp (µm)	7,81	22,62	3,34	21,57	12,17	15,64	6,83	15,83	2,36	18,19
Rv (µm)	7,11	32,79	3,70	41,23	11,57	36,90	7,36	25,40	1,70	41,20
RS (mm)	0,44	0,40	0,29	0,40	0,57	0,44	0,27	0,44	0,24	0,50
RSm (mm)	0,80	0,44	0,80	0,40	0,80	0,57	0,67	0,57	1,00	0,80
Rsk	0,12	-1,29	-0,59	-1,40	0,72	-4,02	-0,09	-2,52	0,35	-1,55

UZORAK #8										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	0,99	4,13	3,74	4,62	7,89	6,45	5,20	5,49	4,14	4,15
Rq (µm)	1,20	5,79	4,48	6,18	9,02	9,39	6,09	7,89	4,80	5,57
Rz (µm)	4,56	32,17	14,85	31,36	27,04	43,87	17,60	39,39	13,75	30,14
Rt (µm)	5,92	54,79	22,20	37,52	34,24	77,48	25,28	61,31	22,04	46,27
Rp (µm)	2,40	10,47	7,38	14,64	11,97	13,20	7,80	10,68	6,54	11,76
Rv (µm)	2,16	21,69	7,47	16,71	15,06	30,66	9,81	28,71	7,21	18,38
RS (mm)	0,17	0,31	0,27	0,24	0,80	0,31	0,67	0,33	0,36	0,25
RSm (mm)	0,31	0,40	0,57	0,40	0,80	0,40	0,80	0,36	0,67	0,44
Rsk	0,67	-2,42	0,12	-0,25	-0,07	-2,43	-0,25	-2,27	-0,05	-0,79

UZORAK #9										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	1,50	4,67	1,43	3,77	3,04	3,45	1,48	2,16	1,80	2,32
Rq (µm)	1,74	6,01	1,72	5,16	3,58	3,98	1,89	2,97	2,26	3,29
Rz (µm)	4,67	28,15	4,88	23,95	11,86	13,29	8,86	15,58	8,50	20,94
Rt (µm)	8,40	35,75	7,20	33,20	15,23	20,28	14,88	22,39	12,15	30,47
Rp (µm)	2,40	13,98	2,66	15,99	5,55	6,35	4,00	9,30	4,35	8,36
Rv (µm)	2,27	14,16	2,22	7,97	6,31	6,94	4,86	6,28	4,15	12,58
RS (mm)	0,20	0,24	0,22	0,27	0,22	0,12	0,11	0,15	0,12	0,19
RSm (mm)	0,57	0,67	0,67	0,80	0,80	0,40	0,21	0,29	0,24	0,36
Rsk	0,27	0,15	0,27	1,37	-0,62	0,15	-1,48	1,12	0,15	-0,88

UZORAK #10										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	5,43	4,90	8,16	4,98	6,55	6,64	10,48	3,53	5,61	2,28
Rq (µm)	7,01	5,73	10,77	5,69	8,82	7,61	13,62	3,94	8,67	2,79
Rz (µm)	31,79	13,79	47,96	13,82	44,16	26,47	57,51	10,19	47,55	7,52
Rt (µm)	46,63	21,00	59,11	25,63	53,31	60,15	62,79	16,39	52,24	12,23
Rp (µm)	9,34	6,10	16,33	5,38	14,96	10,70	16,73	4,85	11,99	3,61
Rv (µm)	22,45	7,69	31,63	8,45	29,20	15,76	40,77	5,34	35,56	3,91
RS (mm)	0,31	0,40	0,31	0,50	0,29	0,57	0,50	0,40	0,36	0,29
RSm (mm)	0,50	2,00	0,50	1,33	0,57	1,00	0,67	0,80	0,36	0,67
Rsk	-1,35	-0,49	-1,02	-0,53	-0,91	0,27	-1,09	0,24	-1,87	-0,08

UZORAK #11										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	7,17	3,54	6,94	4,16	8,89	4,55	12,74	5,52	5,76	2,13
Rq (µm)	9,86	4,09	9,90	4,91	11,85	5,25	16,82	6,52	8,44	2,41
Rz (µm)	47,27	9,02	48,43	12,64	57,63	15,25	75,48	14,88	43,54	7,56
Rt (µm)	55,08	16,12	63,43	19,63	75,23	23,36	90,87	26,36	54,91	13,60
Rp (µm)	14,45	5,05	14,39	5,04	20,08	6,37	30,20	6,97	18,69	3,78
Rv (µm)	32,82	3,98	34,04	7,60	37,54	8,89	45,28	7,91	24,84	3,78
RS (mm)	0,29	0,33	0,31	0,50	0,33	0,57	0,57	0,57	0,33	0,29
RSm (mm)	0,36	2,00	0,36	1,00	0,50	1,00	0,67	1,33	0,27	1,33
Rsk	-1,28	0,66	-1,54	-0,37	-0,82	-0,29	-0,50	0,35	-0,29	0,48

UZORAK #12										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	5,94	2,90	7,85	3,02	3,52	6,21	5,87	5,38	8,59	2,90
Rq (µm)	8,73	3,52	10,97	3,57	4,82	6,91	8,34	6,17	12,16	3,69
Rz (µm)	40,11	10,35	54,94	9,47	24,83	17,95	42,75	16,79	58,43	11,12
Rt (µm)	49,40	15,31	70,16	15,84	28,84	26,79	57,15	24,52	86,27	18,71
Rp (µm)	12,39	6,22	17,37	4,88	8,13	7,10	13,80	8,89	19,70	5,22
Rv (µm)	27,72	4,14	37,56	4,59	16,70	10,85	28,95	7,90	38,73	5,91
RS (mm)	0,36	0,33	0,33	0,44	0,18	0,57	0,27	0,50	0,40	0,22
RSm (mm)	0,40	0,67	0,36	0,80	0,36	1,33	0,40	1,00	0,36	0,40
Rsk	-1,17	0,59	-1,55	-0,09	-0,89	-0,35	-1,42	-0,04	-1,28	-0,78

UZORAK #13										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	8,81	2,53	7,47	1,13	6,32	4,26	5,43	2,96	3,57	2,36
Rq (µm)	12,00	2,89	10,15	1,38	8,80	4,90	7,02	3,39	4,90	2,81
Rz (µm)	53,52	7,08	46,35	4,28	43,43	10,03	36,04	7,62	23,76	9,08
Rt (µm)	72,19	12,07	71,27	7,88	55,40	21,95	47,40	15,88	32,79	14,03
Rp (µm)	18,84	3,41	15,81	2,29	12,72	4,23	12,71	3,86	5,56	5,39
Rv (µm)	34,67	3,67	30,53	1,99	30,71	5,80	23,32	3,75	18,20	3,69
RS (mm)	0,57	0,36	0,44	0,17	0,40	0,40	0,29	0,44	0,31	0,13
RSm (mm)	0,50	1,33	0,44	0,44	0,80	1,33	0,50	1,33	0,33	0,31
Rsk	-0,83	1,02	-1,13	-0,52	-1,49	-0,84	-0,70	-0,79	-2,23	0,42

UZORAK #14										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	12,6	4,3	7,0	2,1	12,2	2,6	7,9	4,9	4,7	1,8
Rq (µm)	16,6	4,9	9,7	2,7	16,3	3,0	11,2	5,7	7,1	2,2
Rz (µm)	70,0	10,3	45,5	7,2	73,0	6,3	57,2	14,8	36,9	6,1
Rt (µm)	58,8	17,6	57,0	11,7	83,1	12,8	66,1	21,0	50,8	12,3
Rp (µm)	25,8	4,8	16,9	3,3	32,5	3,8	18,7	8,5	12,8	2,6
Rv (µm)	44,2	5,5	28,6	3,9	40,5	2,5	38,6	6,3	24,1	3,5
RS (mm)	0,8	0,4	0,3	0,4	0,3	0,4	0,4	0,5	0,3	0,4
RSm (mm)	0,7	2,0	0,4	0,8	0,4	1,3	0,4	0,8	0,5	1,3
Rsk	-0,6	-0,8	-0,5	0,7	0,0	0,1	-1,0	0,1	-0,9	-0,5

UZORAK #15										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	11,3	2,9	10,8	2,6	8,2	4,3	5,4	3,6	5,6	3,1
Rq (µm)	15,0	3,2	14,3	3,5	11,3	4,8	7,6	4,2	7,4	3,8
Rz (µm)	66,5	8,0	61,1	13,1	55,7	15,1	39,1	10,6	33,8	12,6
Rt (µm)	73,8	13,8	81,6	26,2	64,1	34,5	55,1	19,3	46,4	18,9
Rp (µm)	24,2	3,8	22,2	8,0	25,8	6,9	11,3	4,8	12,0	6,1
Rv (µm)	42,3	4,2	38,9	5,2	30,0	8,2	27,8	5,9	21,8	6,5
RS (mm)	0,8	0,4	0,4	0,4	0,3	0,5	0,3	0,4	0,2	0,1
RSm (mm)	0,8	1,3	0,4	0,7	0,5	1,0	0,4	0,8	0,3	0,3
Rsk	-0,7	-0,6	-0,9	2,7	0,0	0,0	-1,5	-1,2	-0,8	0,0

UZORAK #16										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	8,25	4,72	7,54	3,34	6,71	3,39	7,63	2,52	5,97	2,68
Rq (µm)	10,17	5,48	9,32	3,84	9,72	4,03	11,31	3,02	8,66	3,25
Rz (µm)	41,96	16,76	34,95	9,87	53,52	11,26	54,59	9,96	46,81	8,66
Rt (µm)	50,20	23,68	52,04	14,68	66,51	17,60	65,59	13,96	59,43	14,92
Rp (µm)	19,94	7,92	22,15	4,72	25,69	6,58	13,44	4,72	16,44	3,81
Rv (µm)	21,75	8,84	12,80	5,15	27,83	4,69	41,14	5,24	30,37	4,86
RS (mm)	0,17	0,20	0,29	0,31	0,25	0,57	0,31	0,22	0,33	0,31
RSm (mm)	0,40	0,57	0,67	0,67	0,80	2,00	0,44	0,50	0,50	0,67
Rsk	0,19	-0,62	1,03	-0,28	-0,22	0,84	-1,97	0,28	-1,13	0,01

UZORAK #17										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	5,90	2,24	3,76	3,80	7,13	2,34	9,45	3,58	7,92	3,66
Rq (µm)	8,34	2,81	6,24	4,55	10,58	2,84	11,70	4,20	11,80	4,17
Rz (µm)	42,68	11,05	42,16	15,17	58,90	7,03	47,46	8,90	67,24	12,11
Rt (µm)	50,31	25,15	53,88	24,31	66,00	11,84	63,88	18,31	76,48	19,00
Rp (µm)	12,28	6,59	19,00	6,21	32,68	3,26	22,60	4,45	29,99	6,14
Rv (µm)	30,39	4,46	23,15	8,97	26,22	3,77	24,86	4,45	37,25	5,98
RS (mm)	0,33	0,44	0,31	0,80	0,44	0,33	0,33	1,00	0,40	0,36
RSm (mm)	0,40	0,80	0,40	0,80	0,67	0,80	0,40	1,33	0,67	1,00
Rsk	-1,38	0,78	-0,68	0,32	0,72	-0,23	0,49	0,21	-0,28	0,67

UZORAK #18										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	11,2	4,1	7,1	3,6	8,5	6,0	8,6	4,2	11,5	5,7
Rq (µm)	13,9	4,5	9,1	4,3	10,4	6,5	12,6	5,2	14,0	6,2
Rz (µm)	51,9	9,4	37,8	12,2	45,3	14,5	62,8	15,7	49,8	12,3
Rt (µm)	60,0	18,2	46,4	26,7	54,6	24,2	76,6	33,6	59,3	22,7
Rp (µm)	32,8	4,6	21,7	6,4	17,0	7,8	15,4	7,2	29,5	7,1
Rv (µm)	19,2	4,8	16,1	5,8	28,3	6,7	47,3	8,4	20,2	5,1
RS (mm)	0,3	0,4	0,2	0,4	0,3	0,6	0,4	0,7	0,3	0,6
RSm (mm)	0,8	2,0	0,4	0,6	0,6	2,0	0,4	1,0	0,7	2,0
Rsk	0,7	0,0	0,7	-1,0	-0,1	0,3	-2,1	0,4	0,5	0,0



UZORAK #19										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	1,80	3,35	1,68	2,05	1,52	3,74	1,36	5,69	2,04	5,37
Rq (µm)	2,09	4,29	2,01	2,99	1,88	4,64	1,81	7,01	2,53	6,84
Rz (µm)	5,94	19,19	7,59	16,97	9,03	21,94	9,86	30,77	11,10	30,34
Rt (µm)	9,40	27,95	10,47	26,39	11,47	36,52	13,52	39,91	18,36	40,08
Rp (µm)	2,56	6,75	3,62	4,35	5,47	10,25	4,90	11,09	7,05	10,67
Rv (µm)	3,38	12,43	3,97	12,62	3,56	11,68	4,97	19,68	4,06	19,67
RS (mm)	0,24	0,25	0,05	0,20	0,06	0,24	0,05	0,27	0,20	0,25
RSm (mm)	0,80	0,36	0,12	0,27	0,10	0,36	0,07	0,44	0,40	0,36
Rsk	-0,28	-1,12	0,14	-1,82	0,33	-0,04	-0,29	-0,73	0,76	-0,59

UZORAK #20										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	1,42	2,40	1,86	3,01	1,79	5,57	1,67	4,83	1,80	6,15
Rq (µm)	1,73	3,13	2,22	3,83	2,26	7,88	2,00	5,82	2,17	7,43
Rz (µm)	6,94	15,15	8,79	19,68	10,60	37,09	7,84	25,28	7,30	29,50
Rt (µm)	9,88	22,12	12,23	33,00	14,72	45,84	8,80	41,63	10,60	38,00
Rp (µm)	3,42	5,35	4,11	8,22	5,40	26,55	3,85	11,66	3,11	10,55
Rv (µm)	3,51	9,81	4,68	11,47	5,20	10,53	3,99	13,62	4,18	18,95
RS (mm)	0,04	0,17	0,07	0,19	0,05	0,14	0,08	0,21	0,14	0,21
RSm (mm)	0,10	0,33	0,20	0,40	0,07	0,24	0,17	0,57	0,57	0,67
Rsk	-0,05	-1,16	-0,26	-0,59	-0,01	1,54	0,09	-0,21	-0,51	-0,66

UZORAK #21										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	2,04	3,25	1,85	1,91	1,07	6,07	1,07	6,27	1,23	4,57
Rq (µm)	2,47	4,07	2,12	2,57	1,29	8,47	1,27	8,23	1,41	5,38
Rz (µm)	8,64	16,86	6,66	12,51	5,40	40,37	4,34	34,91	4,81	20,27
Rt (µm)	13,11	22,79	9,68	23,36	7,96	44,40	6,80	56,95	6,36	26,20
Rp (µm)	3,89	8,40	3,55	5,36	2,32	29,04	2,03	12,61	2,64	8,58
Rv (µm)	4,75	8,46	3,11	7,15	3,08	11,33	2,30	22,30	2,17	11,68
RS (mm)	0,12	0,11	0,19	0,15	0,07	0,15	0,06	0,36	0,09	0,13
RSm (mm)	0,40	0,36	0,50	0,25	0,22	0,27	0,22	0,57	0,40	0,50
Rsk	-0,13	0,17	-0,35	0,30	-0,66	1,55	0,07	-1,62	0,08	-0,10

UZORAK #22										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	1,87	4,86	1,62	5,83	1,40	2,90	2,87	6,91	3,41	5,95
Rq (µm)	2,30	6,25	1,94	8,42	1,65	3,60	3,29	8,83	4,09	8,51
Rz (µm)	7,86	31,59	6,03	44,53	5,10	15,14	9,34	42,02	12,75	44,11
Rt (µm)	10,47	44,00	8,68	58,68	7,56	22,12	12,68	62,08	16,15	55,95
Rp (µm)	4,52	14,05	2,70	15,34	2,86	7,17	4,76	15,22	6,08	13,06
Rv (µm)	3,34	17,53	3,33	29,19	2,24	7,98	4,58	26,79	6,67	31,05
RS (mm)	0,17	0,24	0,17	0,33	0,07	0,13	0,31	0,29	0,29	0,31
RSm (mm)	0,67	0,40	0,50	0,44	0,24	0,36	0,67	0,44	0,67	0,40
Rsk	0,09	-0,47	-0,65	-1,44	0,33	0,33	-0,03	-0,66	-0,05	-1,64

UZORAK #23										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	1,91	6,90	1,68	5,11	2,00	4,54	1,45	6,49	1,07	4,63
Rq (µm)	2,15	10,02	2,07	6,78	2,41	5,68	1,77	8,49	1,28	6,40
Rz (µm)	6,81	50,27	7,46	30,74	9,65	21,03	5,90	40,29	4,53	32,62
Rt (µm)	10,23	72,31	9,88	44,36	18,76	34,08	8,80	55,72	7,40	47,00
Rp (µm)	3,87	17,48	3,61	12,68	5,83	9,98	2,86	14,59	2,06	11,68
Rv (µm)	2,94	32,78	3,85	18,05	3,82	11,04	3,04	25,70	2,47	20,94
RS (mm)	0,18	0,36	0,11	0,24	0,18	0,21	0,19	0,33	0,11	0,25
RSm (mm)	0,80	0,50	0,27	0,40	0,67	0,36	0,40	0,40	0,31	0,40
Rsk	0,48	-1,15	-0,34	-0,53	0,88	-0,07	0,19	-1,06	-0,21	-1,09

UZORAK #24										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	1,83	6,51	2,14	5,58	2,73	3,74	3,88	5,37	1,12	5,85
Rq (µm)	2,17	9,29	2,48	7,29	3,15	4,48	4,80	6,58	1,30	8,38
Rz (µm)	6,56	48,87	8,14	35,97	10,95	17,85	16,04	31,35	3,07	43,59
Rt (µm)	9,40	61,79	12,27	47,43	14,39	25,36	22,95	44,40	5,36	55,72
Rp (µm)	3,08	17,82	4,10	12,84	5,27	9,08	9,23	10,96	1,58	12,68
Rv (µm)	3,48	31,04	4,05	23,13	5,68	8,78	6,82	20,38	1,50	30,91
RS (mm)	0,29	0,29	0,31	0,25	0,24	0,15	0,21	0,29	0,13	0,36
RSm (mm)	0,67	0,36	0,67	0,44	0,67	0,36	0,50	0,57	0,80	0,44
Rsk	0,03	-0,98	-0,03	-0,83	-0,23	0,25	0,97	-0,94	-0,34	-1,51

UZORAK #25										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	1,13	3,82	1,68	5,47	1,18	4,33	1,01	4,08	1,34	3,19
Rq (µm)	1,38	4,68	2,08	8,01	1,42	5,57	1,28	5,63	1,59	3,98
Rz (µm)	4,50	17,04	6,31	46,48	4,65	26,67	5,41	30,20	5,78	18,93
Rt (µm)	7,28	25,07	11,64	58,11	8,00	39,75	8,68	35,95	7,16	26,38
Rp (µm)	2,18	8,63	3,02	17,36	2,22	16,21	2,66	11,02	2,34	9,60
Rv (µm)	2,33	8,41	3,30	29,12	2,43	10,45	2,74	19,17	3,45	9,34
RS (mm)	0,13	0,13	0,18	0,27	0,19	0,20	0,14	0,18	0,08	0,11
RSm (mm)	0,44	0,36	0,40	0,40	0,57	0,36	0,36	0,40	0,25	0,29
Rsk	0,49	-0,09	1,94	-0,95	-0,39	0,20	-0,49	-0,82	-0,59	-0,50

UZORAK #26										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	1,35	6,28	1,74	3,93	1,11	3,33	3,36	3,71	3,28	4,19
Rq (µm)	1,58	7,91	2,04	4,75	1,43	4,16	3,90	5,13	3,87	5,62
Rz (µm)	5,24	35,25	6,62	18,50	7,42	19,15	12,31	26,71	9,28	29,20
Rt (µm)	8,72	49,59	9,28	27,76	8,48	28,28	17,84	35,15	15,35	39,00
Rp (µm)	2,86	17,33	3,22	8,62	4,37	9,00	6,54	9,56	4,22	10,75
Rv (µm)	2,38	17,92	3,40	9,89	3,06	10,15	5,77	17,15	5,06	18,44
RS (mm)	0,11	0,19	0,22	0,17	0,05	0,14	0,27	0,19	0,31	0,22
RSm (mm)	0,57	0,57	0,57	0,40	0,08	0,33	0,80	0,44	1,00	0,33
Rsk	-0,32	0,11	0,29	-0,16	0,55	-0,25	0,09	-0,91	-0,31	-1,08

UZORAK #27										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	1,64	4,89	1,42	4,60	1,74	3,37	1,29	5,11	1,11	/
Rq (µm)	1,91	6,81	1,71	5,81	2,04	4,25	1,54	6,40	1,44	/
Rz (µm)	6,39	31,84	5,62	20,36	5,26	19,87	4,74	29,68	6,06	/
Rt (µm)	9,16	50,27	9,68	32,20	8,04	27,31	6,76	39,95	13,27	/
Rp (µm)	3,30	9,49	2,62	7,78	3,14	7,20	2,76	12,11	3,32	/
Rv (µm)	3,10	22,35	3,00	12,57	2,11	12,67	1,98	17,55	2,74	/
RS (mm)	0,24	0,31	0,13	0,21	0,19	0,22	0,20	0,31	0,10	/
RSm (mm)	0,67	0,57	0,33	0,31	0,67	0,36	0,57	0,40	0,20	/
Rsk	0,09	-1,13	1,08	-0,68	-0,15	-0,69	0,46	-0,35	-0,08	/

\* VREDNOSTI POVRŠINSKE HRPAVOSTI UZORAKA IZRAĐENIH FDM TEHNIKOM 3D ŠTAMPE – BLOK 2

*Napomena: Precrtana polja označavaju merenja koja izlaze van mernog opsega uređaja*

UZORAK #1										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	2,15	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Rq (µm)	2,37	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Rz (µm)	4,77	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Rt (µm)	14,07	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Rp (µm)	1,65	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Rv (µm)	3,12	/	/	/	/	/	/	/	/	/
RS (mm)	0,21	/	/	/	/	/	/	/	/	/
RSm (mm)	0,63	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Rsk	-4,21	/	/	/	/	/	/	/	/	/

UZORAK #2										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	1,52	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Rq (µm)	1,67	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Rz (µm)	3,32	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Rt (µm)	6,20	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Rp (µm)	1,36	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Rv (µm)	1,96	/	/	/	/	/	/	/	/	/
RS (mm)	0,11	/	/	/	/	/	/	/	/	/
RSm (mm)	0,63	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Rsk	-0,76	/	/	/	/	/	/	/	/	/

UZORAK #3										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	1,98	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Rq (µm)	2,14	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Rz (µm)	4,15	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Rt (µm)	8,00	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Rp (µm)	2,01	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Rv (µm)	2,14	/	/	/	/	/	/	/	/	/
RS (mm)	0,21	/	/	/	/	/	/	/	/	/
RSm (mm)	0,63	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Rsk	-0,39	/	/	/	/	/	/	/	/	/

UZORAK #4										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	3,34	/	3,53	/	3,20	/	2,62	/	2,72	/
Rq (µm)	3,94	/	4,44	/	3,89	/	3,30	/	3,29	/
Rz (µm)	10,64	/	12,67	/	11,72	/	10,51	/	9,63	/
Rt (µm)	17,36	/	21,31	/	18,28	/	17,95	/	15,84	/
Rp (µm)	4,48	/	6,46	/	5,06	/	5,19	/	4,84	/
Rv (µm)	6,17	/	6,21	/	6,66	/	5,32	/	4,79	/
RS (mm)	0,40	/	0,50	/	0,50	/	0,33	/	0,50	/
RSm (mm)	1,00	/	0,67	/	0,67	/	0,44	/	0,57	/
Rsk	-1,17	/	-0,27	/	-0,92	/	0,45	/	0,50	/

UZORAK #5										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	3,53	6,36	4,02	/	2,91	/	2,48	/	1,95	/
Rq (µm)	4,41	8,21	4,88	/	3,50	/	2,86	/	2,41	/
Rz (µm)	14,55	38,38	13,47	/	11,59	/	8,07	/	6,83	/
Rt (µm)	22,28	59,79	18,84	/	21,55	/	11,60	/	12,03	/
Rp (µm)	7,22	15,84	6,38	/	5,14	/	4,29	/	3,04	/
Rv (µm)	7,34	22,54	7,09	/	6,45	/	3,78	/	3,79	/
RS (mm)	0,21	0,33	0,50	/	0,44	/	0,44	/	0,17	/
RSm (mm)	0,40	0,44	0,67	/	0,57	/	0,80	/	0,67	/
Rsk	0,41	-0,18	0,05	/	-0,61	/	-0,06	/	-0,87	/

UZORAK #6										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	3,14	8,37	3,73	9,00	2,82	/	4,34	/	2,24	/
Rq (µm)	3,73	11,92	4,58	11,60	3,36	/	4,91	/	2,70	/
Rz (µm)	11,27	59,98	12,39	49,63	9,49	/	15,34	/	7,72	/
Rt (µm)	19,28	88,72	19,47	71,40	16,20	/	23,07	/	13,72	/
Rp (µm)	4,66	20,23	6,92	15,54	4,48	/	7,79	/	3,50	/
Rv (µm)	6,62	39,75	5,47	34,09	5,01	/	7,55	/	4,22	/
RS (mm)	0,40	0,40	0,57	0,33	0,50	/	0,50	/	0,36	/
RSm (mm)	0,67	0,40	0,67	0,44	0,57	/	0,67	/	0,67	/
Rsk	-1,05	-1,43	0,76	-1,08	-0,23	/	0,21	/	-0,73	/

UZORAK #7										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	3,27	10,11	3,98	6,07	2,88	7,94	4,70	/	3,48	/
Rq (µm)	3,73	13,89	4,71	7,89	3,32	9,86	5,36	/	4,29	/
Rz (µm)	9,81	60,34	12,44	41,10	11,25	42,87	12,39	/	12,96	/
Rt (µm)	14,23	79,40	20,07	49,88	16,87	50,56	21,76	/	18,52	/
Rp (µm)	4,98	17,35	6,11	15,34	6,11	17,13	5,28	/	7,78	/
Rv (µm)	4,83	42,99	6,34	25,76	5,14	25,73	7,11	/	5,19	/
RS (mm)	0,36	0,40	0,36	0,29	0,44	0,40	0,57	/	0,57	/
RSm (mm)	0,67	0,40	0,80	0,33	0,50	0,40	1,33	/	0,67	/
Rsk	0,16	-1,19	-0,41	-1,18	0,04	-0,74	0,06	/	0,37	/

UZORAK #8										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	4,10	8,63	4,06	5,91	2,83	/	3,94	/	4,16	/
Rq (µm)	5,18	11,71	4,96	8,41	3,23	/	4,72	/	4,85	/
Rz (µm)	16,81	55,58	13,45	44,17	9,41	/	14,78	/	12,05	/
Rt (µm)	31,31	63,95	24,79	54,47	12,52	/	22,84	/	24,44	/
Rp (µm)	5,30	20,32	6,82	13,07	4,77	/	6,45	/	6,34	/
Rv (µm)	11,52	35,25	6,63	31,10	4,64	/	8,34	/	5,71	/
RS (mm)	0,50	0,33	0,50	0,31	0,44	/	0,40	/	0,50	/
RSm (mm)	0,67	0,40	0,80	0,40	0,67	/	0,80	/	2,00	/
Rsk	-1,74	-0,68	-0,29	-1,70	0,36	/	-0,55	/	0,21	/

UZORAK #9										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	3,93	4,65	3,19	9,54	3,45	8,12	4,91	11,21	3,54	9,44
Rq (µm)	4,66	7,26	3,91	12,50	3,94	10,93	5,89	14,94	4,25	12,48
Rz (µm)	15,70	42,14	9,34	54,89	12,00	50,08	20,10	65,53	12,39	55,91
Rt (µm)	23,07	49,27	16,31	60,00	17,00	62,20	31,95	72,91	17,52	86,08
Rp (µm)	9,32	16,57	5,87	18,68	6,57	18,07	10,17	15,27	5,57	20,07
Rv (µm)	6,38	25,56	3,46	36,21	5,44	32,01	9,93	50,26	6,83	35,83
RS (mm)	0,40	0,31	0,50	0,40	0,40	0,36	0,67	0,40	0,36	0,44
RSm (mm)	0,80	0,44	0,80	0,36	0,67	0,40	1,00	0,40	1,00	0,40
Rsk	0,49	-0,89	1,32	-0,98	0,19	-0,88	-0,08	-1,55	-0,01	-0,61



UZORAK #10										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	1,78	4,15	3,33	5,19	2,56	3,18	2,50	6,91	2,03	4,02
Rq (µm)	2,06	5,34	3,91	6,81	3,00	4,17	3,08	8,79	2,47	5,59
Rz (µm)	6,40	25,12	9,68	35,30	7,62	18,28	9,99	39,89	6,98	25,31
Rt (µm)	7,72	36,56	16,87	43,79	12,43	29,07	15,11	50,43	11,80	38,84
Rp (µm)	2,81	11,13	4,74	12,93	4,60	9,42	4,72	21,14	3,00	13,58
Rv (µm)	3,59	13,98	4,94	22,36	3,02	8,86	5,27	18,75	3,98	11,73
RS (mm)	0,33	0,24	0,67	0,22	0,57	0,20	0,10	0,31	0,50	0,29
RSm (mm)	0,80	0,44	1,00	0,36	1,33	0,33	0,27	0,67	0,80	0,44
Rsk	0,02	0,37	0,78	-0,81	0,46	-0,04	0,16	0,51	-0,06	1,76

UZORAK #11										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	1,09	6,18	2,81	6,29	2,40	4,44	2,53	6,52	2,47	8,53
Rq (µm)	1,25	8,49	3,27	9,00	2,92	5,81	2,81	8,77	2,90	11,50
Rz (µm)	3,94	45,31	8,54	44,34	11,26	23,92	6,93	42,17	7,27	56,24
Rt (µm)	7,00	55,31	14,15	64,91	17,15	37,63	11,60	60,47	11,64	77,87
Rp (µm)	2,24	13,76	4,05	14,84	6,83	13,34	3,33	20,42	4,01	20,00
Rv (µm)	1,70	31,55	4,49	29,49	4,43	10,57	3,60	21,75	3,26	36,24
RS (mm)	0,33	0,31	0,50	0,44	0,10	0,21	0,25	0,36	0,40	0,44
RSm (mm)	0,80	0,40	1,00	0,40	0,24	0,44	2,00	0,36	1,33	0,50
Rsk	1,20	-1,66	-0,05	-1,43	0,07	1,58	-0,10	0,28	0,25	-1,18

UZORAK #12										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	4,26	5,62	2,28	5,43	1,29	3,93	4,57	6,74	2,09	7,95
Rq (µm)	5,03	7,89	2,54	7,21	1,58	5,00	5,37	8,84	2,41	10,74
Rz (µm)	12,28	40,67	7,32	34,19	4,99	20,28	13,73	43,28	6,10	47,93
Rt (µm)	20,04	55,24	13,80	49,15	7,52	26,63	21,79	52,24	11,88	67,00
Rp (µm)	5,77	16,27	3,79	13,88	2,29	9,90	6,19	20,10	2,80	18,48
Rv (µm)	6,52	24,39	3,53	20,31	2,70	10,37	7,54	23,18	3,30	29,44
RS (mm)	0,57	0,31	0,50	0,31	0,21	0,17	0,80	0,44	0,50	0,36
RSm (mm)	1,33	0,44	0,80	0,40	0,50	0,33	0,80	0,50	1,33	0,57
Rsk	0,68	-0,97	-0,65	-0,53	0,33	-0,08	-0,12	-0,04	-0,12	-0,35

UZORAK #13										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	3,75	8,81	3,53	9,53	4,02	9,80	4,14	9,28	3,02	11,92
Rq (µm)	4,38	11,11	4,22	12,39	4,99	12,22	4,93	11,40	3,65	14,40
Rz (µm)	13,54	45,94	15,56	58,14	21,11	51,40	19,92	46,29	15,79	56,73
Rt (µm)	19,52	61,43	20,63	69,87	28,60	84,72	35,59	66,12	20,39	71,12
Rp (µm)	6,30	19,70	7,67	20,66	11,60	20,20	9,51	19,52	9,06	23,40
Rv (µm)	7,24	26,23	7,89	37,47	9,51	31,20	10,41	26,77	6,74	33,32
RS (mm)	0,09	0,15	0,09	0,13	0,08	0,20	0,11	0,13	0,05	0,13
RSm (mm)	0,29	0,50	0,27	0,33	0,18	0,36	0,22	0,29	0,11	0,36
Rsk	-0,22	-0,28	-0,03	-0,61	0,23	-0,38	-0,01	-0,21	0,60	-0,42

UZORAK #14										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	4,29	5,91	6,41	8,17	5,36	11,42	4,51	11,43	2,69	11,63
Rq (µm)	5,19	7,18	7,64	9,81	6,26	14,76	5,57	14,50	3,27	15,59
Rz (µm)	21,47	31,02	19,55	38,17	20,36	64,43	23,51	64,15	14,16	73,31
Rt (µm)	28,47	40,24	34,47	51,20	27,60	77,68	29,36	82,31	19,20	93,95
Rp (µm)	11,60	13,13	9,98	18,00	10,73	20,36	11,46	19,80	6,87	21,00
Rv (µm)	9,86	17,88	9,58	20,17	9,63	44,07	12,04	44,34	7,30	52,30
RS (mm)	0,08	0,12	0,17	0,14	0,09	0,14	0,07	0,16	0,05	0,19
RSm (mm)	0,19	0,29	0,80	0,40	0,67	0,33	0,17	0,36	0,10	0,40
Rsk	0,54	-0,42	0,10	0,18	0,61	-1,23	-0,09	-1,13	0,30	-1,45

UZORAK #15										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	3,73	10,55	3,92	11,17	4,74	9,86	2,97	12,36	4,01	8,80
Rq (µm)	4,48	13,37	4,63	14,34	5,76	13,05	3,78	15,79	4,89	11,21
Rz (µm)	16,02	57,63	15,38	63,40	22,49	57,91	16,07	67,71	19,86	49,84
Rt (µm)	23,44	64,80	23,92	78,68	28,63	78,12	22,95	82,59	27,95	58,27
Rp (µm)	6,96	19,17	7,38	20,87	13,80	15,60	9,02	21,33	10,47	16,79
Rv (µm)	9,06	38,45	8,00	42,52	8,70	42,30	7,06	46,37	9,39	33,05
RS (mm)	0,06	0,13	0,10	0,13	0,09	0,17	0,08	0,17	0,06	0,12
RSm (mm)	0,19	0,27	0,36	0,36	0,33	0,31	0,14	0,29	0,12	0,29
Rsk	-0,68	-0,87	0,05	-1,05	0,85	-1,45	0,56	-1,08	0,56	-0,80

UZORAK #16										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	2,81	6,80	3,58	5,90	2,42	6,88	1,12	5,97	1,20	4,79
Rq (µm)	3,22	9,45	4,02	8,75	2,77	9,06	1,30	8,95	1,40	7,38
Rz (µm)	10,28	42,84	11,71	43,77	8,52	42,95	3,17	46,54	3,97	42,17
Rt (µm)	17,15	47,52	14,80	55,68	13,84	47,72	6,00	55,59	6,68	46,43
Rp (µm)	4,78	14,12	5,86	11,89	4,58	13,93	1,62	10,98	2,08	11,97
Rv (µm)	5,51	28,71	5,85	31,87	3,94	29,01	1,54	35,56	1,89	30,20
RS (mm)	0,33	0,33	0,50	0,36	0,50	0,27	0,44	0,40	0,33	0,40
RSm (mm)	0,80	0,44	1,00	0,40	1,00	0,44	0,80	0,40	1,00	0,40
Rsk	-0,14	-1,00	0,17	-1,63	-0,33	-0,85	-0,34	-2,33	0,84	-2,09

UZORAK #17										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	1,52	5,49	2,67	3,82	3,78	5,67	1,64	4,47	2,35	4,30
Rq (µm)	1,82	7,79	2,96	5,57	4,35	6,86	1,91	6,09	2,74	5,51
Rz (µm)	5,65	35,63	8,00	28,49	12,63	28,52	5,25	30,35	7,32	23,16
Rt (µm)	9,20	39,47	10,19	36,47	19,63	33,84	8,92	42,47	12,27	27,55
Rp (µm)	2,99	10,96	4,02	7,23	6,51	8,64	2,53	8,69	4,02	6,22
Rv (µm)	2,66	24,67	3,98	21,26	6,12	19,88	2,72	21,66	3,30	16,95
RS (mm)	0,44	0,29	0,50	0,36	0,44	0,27	0,50	0,29	0,57	0,33
RSm (mm)	0,67	0,36	1,00	0,33	1,00	0,40	0,80	0,44	1,00	0,36
Rsk	0,28	-1,16	0,19	-1,66	-0,28	-0,95	-0,35	-1,74	0,45	-1,29

UZORAK #18										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	1,94	4,16	2,33	4,94	2,85	4,30	2,19	4,33	1,40	3,62
Rq (µm)	2,24	5,25	2,73	7,36	3,28	5,81	2,52	6,20	1,65	5,06
Rz (µm)	6,74	25,31	8,45	35,60	9,86	26,89	6,59	30,54	4,54	25,55
Rt (µm)	11,60	28,36	15,07	49,75	16,47	28,31	9,36	37,52	7,24	28,07
Rp (µm)	3,32	7,54	4,82	7,14	5,12	6,94	2,98	6,12	2,01	6,98
Rv (µm)	3,42	17,77	3,62	28,47	4,74	19,95	3,61	24,42	2,53	18,58
RS (mm)	0,31	0,31	0,40	0,33	0,57	0,27	0,40	0,29	0,44	0,44
RSm (mm)	1,33	0,40	0,80	0,36	1,33	0,40	1,00	0,36	0,80	0,40
Rsk	0,41	-1,19	0,64	-2,47	0,36	-1,54	-0,13	-2,10	-0,05	-1,28

UZORAK #19										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	1,61	4,33	2,01	6,22	1,26	9,02	1,45	9,55	1,86	7,39
Rq (µm)	2,16	5,59	2,50	7,52	1,55	11,13	1,73	11,25	2,18	9,07
Rz (µm)	9,49	21,92	11,21	30,41	6,34	50,43	3,90	43,38	6,60	33,99
Rt (µm)	19,28	27,55	13,72	41,08	10,72	61,47	7,80	56,40	11,92	41,75
Rp (µm)	4,29	10,56	7,04	17,34	3,00	29,95	2,42	21,48	3,83	13,95
Rv (µm)	5,20	11,35	4,18	13,07	3,34	20,47	1,47	21,89	2,77	20,04
RS (mm)	0,19	0,13	0,05	0,14	0,07	0,19	0,19	0,17	0,07	0,15
RSm (mm)	0,50	0,27	0,09	0,33	0,15	0,40	1,33	0,80	0,21	0,40
Rsk	-1,27	0,20	0,38	0,43	-1,04	0,09	1,17	-0,52	-0,88	-0,61

UZORAK #20										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	2,45	6,87	1,62	5,81	1,28	8,17	1,97	5,89	2,07	5,78
Rq (µm)	2,83	8,04	1,99	7,29	1,55	10,67	2,33	7,12	2,57	6,86
Rz (µm)	8,06	27,93	8,18	33,11	6,17	47,36	6,85	29,42	9,35	23,01
Rt (µm)	14,72	40,31	10,96	58,68	9,20	71,36	10,11	38,68	15,03	28,79
Rp (µm)	4,07	12,19	4,78	17,65	3,28	29,12	2,81	15,88	4,45	13,69
Rv (µm)	3,98	15,73	3,40	15,46	2,89	18,24	4,04	13,54	4,90	9,32
RS (mm)	0,13	0,18	0,05	0,20	0,07	0,31	0,08	0,13	0,07	0,12
RSm (mm)	0,57	0,40	0,13	0,36	0,19	0,36	0,33	0,33	0,17	0,33
Rsk	-0,32	-0,51	0,17	-0,72	-0,45	0,71	-0,56	-0,09	0,79	0,85

UZORAK #21										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	1,63	6,45	1,64	4,95	1,48	9,10	1,99	6,94	1,37	8,76
Rq (µm)	1,95	7,65	2,10	5,89	1,89	10,87	2,34	8,41	1,62	10,10
Rz (µm)	6,30	26,83	9,17	22,18	8,47	46,23	9,15	34,37	6,70	31,86
Rt (µm)	11,03	31,39	15,11	27,44	12,80	56,59	11,80	42,56	8,84	35,27
Rp (µm)	3,02	13,58	4,90	9,05	5,37	28,13	4,56	16,79	4,16	18,18
Rv (µm)	3,29	13,24	4,27	13,13	3,10	18,09	4,59	17,57	2,54	13,68
RS (mm)	0,10	0,14	0,10	0,12	0,07	0,22	0,07	0,18	0,06	0,20
RSm (mm)	0,29	0,31	0,20	0,36	0,17	0,36	0,19	0,40	0,21	0,44
Rsk	-0,37	0,29	0,36	-0,49	0,07	0,31	0,08	0,14	0,47	0,43

UZORAK #22										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	1,99	4,79	0,92	4,86	2,94	4,59	1,33	4,64	1,15	4,57
Rq (µm)	2,25	6,10	1,18	6,15	3,41	5,86	1,66	6,07	1,40	5,69
Rz (µm)	6,28	25,68	4,75	28,35	7,48	25,56	5,14	25,46	4,06	23,78
Rt (µm)	10,19	34,36	10,35	36,56	18,07	32,52	11,60	36,68	7,68	31,23
Rp (µm)	3,05	8,05	2,66	9,78	3,57	7,10	2,65	6,59	1,91	7,24
Rv (µm)	3,23	17,63	2,09	18,56	3,91	18,47	2,50	18,87	2,14	16,54
RS (mm)	0,36	0,29	0,36	0,33	0,67	0,36	0,40	0,44	0,44	0,31
RSm (mm)	1,33	0,40	0,80	0,44	1,33	0,40	0,67	0,40	0,80	0,33
Rsk	-0,10	-1,00	0,65	-1,15	-1,19	-1,17	-1,73	-1,77	-1,14	-1,16

UZORAK #23										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	1,15	5,80	2,00	4,98	1,98	5,18	1,62	10,36	3,13	5,60
Rq (µm)	1,32	7,40	2,30	6,38	2,26	6,93	1,97	12,47	3,76	6,89
Rz (µm)	3,74	31,48	6,00	28,17	6,43	32,36	5,58	54,97	11,02	30,05
Rt (µm)	5,88	38,08	11,31	41,36	11,84	45,47	9,48	62,68	16,92	42,08
Rp (µm)	1,77	8,50	3,32	7,87	3,51	10,60	2,53	18,92	5,37	11,13
Rv (µm)	1,98	22,99	2,68	20,30	2,92	21,76	3,05	36,05	5,66	18,92
RS (mm)	0,31	0,33	0,44	0,29	0,40	0,36	0,40	0,31	0,67	0,25
RSm (mm)	0,80	0,40	1,00	0,33	1,00	0,40	1,00	0,67	0,80	0,57
Rsk	-0,92	-1,21	1,44	-1,68	-0,16	-1,02	-0,36	-0,47	-1,22	-0,80

UZORAK #24										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	1,77	4,70	1,51	4,86	2,31	5,58	1,72	4,78	2,30	3,66
Rq (µm)	2,18	5,98	1,87	6,29	2,68	7,34	2,00	6,10	2,66	4,56
Rz (µm)	7,41	24,23	6,13	26,60	7,36	28,64	6,37	25,74	8,70	18,56
Rt (µm)	14,96	32,11	11,07	32,00	9,72	39,40	8,16	30,71	15,15	23,15
Rp (µm)	4,23	6,34	3,60	7,55	3,30	8,38	3,58	7,44	4,38	6,50
Rv (µm)	3,18	17,89	2,53	19,04	4,06	20,26	2,79	18,30	4,31	12,06
RS (mm)	0,50	0,29	0,33	0,33	0,59	0,31	0,50	0,29	0,44	0,25
RSm (mm)	0,80	0,40	0,67	0,50	0,80	0,40	0,80	0,36	0,80	0,40
Rsk	1,72	-1,43	0,64	-1,31	-0,14	-1,62	0,53	-1,36	-0,51	-0,77

UZORAK #25										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	2,64	6,79	2,64	8,52	4,10	9,71	3,13	9,32	1,63	6,53
Rq (µm)	3,29	8,57	3,21	11,49	4,80	12,13	3,92	13,70	1,98	8,43
Rz (µm)	14,29	37,84	11,37	57,68	13,99	50,46	16,63	67,95	8,75	45,40
Rt (µm)	17,92	48,08	16,84	72,08	21,76	55,72	21,52	78,68	11,27	59,84
Rp (µm)	8,10	15,69	5,73	22,25	6,87	17,13	8,72	19,88	4,43	11,54
Rv (µm)	6,19	22,15	5,65	35,43	7,12	33,32	7,91	48,06	4,32	33,86
RS (mm)	0,06	0,15	0,07	0,20	0,14	0,13	0,09	0,19	0,06	0,19
RSm (mm)	0,17	0,31	0,21	0,40	0,50	0,40	0,18	0,44	0,11	0,44
Rsk	0,25	-0,43	-0,65	-0,33	0,14	-0,80	0,18	-1,62	-0,44	-1,66

UZORAK #26										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	2,03	9,83	3,82	8,56	5,06	5,90	3,67	3,78	2,75	8,01
Rq (µm)	2,46	12,69	4,35	11,60	6,15	7,49	4,10	4,60	3,34	10,78
Rz (µm)	8,74	54,06	9,82	54,49	15,99	33,16	11,12	17,25	13,14	50,59
Rt (µm)	11,96	63,15	19,63	75,08	26,39	44,20	17,44	24,15	19,04	74,16
Rp (µm)	4,57	16,78	3,76	20,17	7,38	9,74	4,69	6,71	6,95	18,90
Rv (µm)	4,18	37,27	6,06	34,31	8,62	23,42	6,44	10,54	6,19	31,68
RS (mm)	0,16	0,22	0,50	0,29	0,36	0,36	0,14	0,15	0,06	0,31
RSm (mm)	0,25	0,33	1,33	0,40	0,80	0,50	0,80	0,40	0,15	0,40
Rsk	0,05	-1,18	-1,34	-0,75	0,42	-1,03	0,21	-0,59	0,24	-0,80

UZORAK #27										
# merenja	1		2		3		4		5	
Pravac merenja	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO	UZ	PO
Ra (µm)	3,02	4,61	3,24	7,46	3,86	5,63	2,90	5,01	3,65	5,33
Rq (µm)	3,73	5,70	3,76	10,58	4,62	7,66	3,58	6,96	4,53	7,01
Rz (µm)	13,42	24,56	12,74	53,74	15,11	37,27	13,01	35,56	20,17	34,84
Rt (µm)	18,63	33,11	19,60	56,79	25,68	46,00	20,15	44,72	25,28	43,24
Rp (µm)	6,68	11,14	5,90	15,72	6,90	10,07	6,94	12,21	11,58	10,37
Rv (µm)	6,74	13,42	6,85	38,01	8,22	27,20	6,07	23,35	8,59	24,47
RS (mm)	0,12	0,09	0,14	0,17	0,17	0,14	0,12	0,18	0,07	0,17
RSm (mm)	0,21	0,29	0,33	0,33	0,50	0,29	0,21	0,36	0,17	0,36
Rsk	-0,13	-0,44	-0,56	-1,28	0,38	-1,49	0,10	-0,87	0,08	-1,37

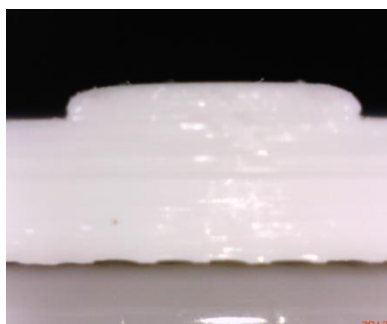
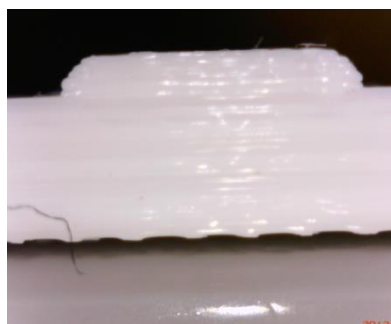
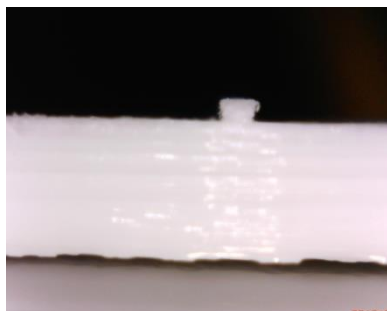
Prilog P3 - Istraživanje uticaja završne obrade uzoraka proizvedenih FDM tehnikom 3D štampe na površinsku hrapavost, zateznu čvrstoću i promenu dimenzija finih detalja za utiskivanje

\* PROMENE NA IZDIGNUTIM ELEMENTIMA ZA UTISKIVANJE SA OBLIM IVICAMA

Izdignuti elementi bez dodatne obrade

Izdignuti elementi nakon mehaničke obrade

Izdignuti elementi nakon hemijske obrade



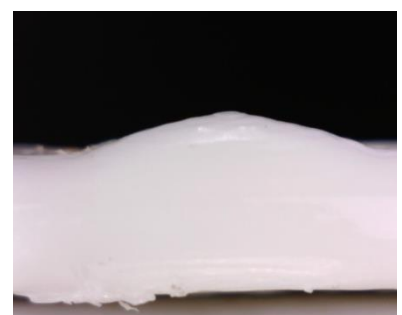
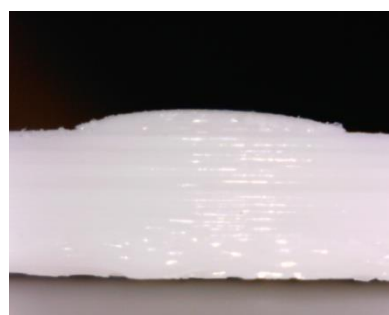
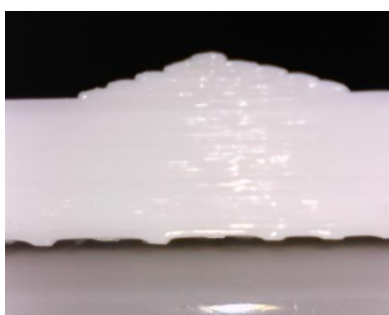
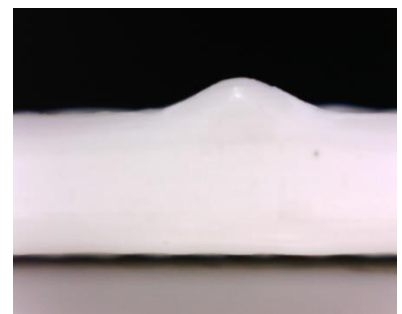
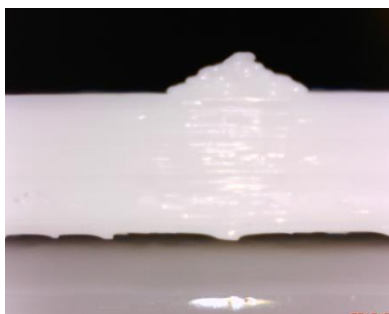
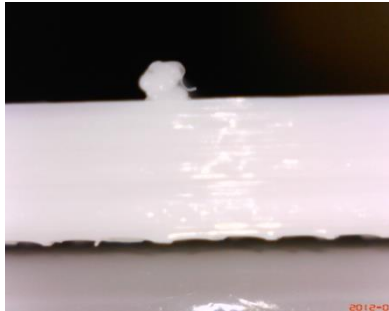


**\*PROMENE NA IZDIGNUTIM ELEMENTIMA ZA UTISKIVANJE SA KOSIM IVICAMA**

Izdignuti elementi bez dodatne obrade

Izdignuti elementi nakon mehaničke obrade

Izdignuti elementi nakon hemijske obrade

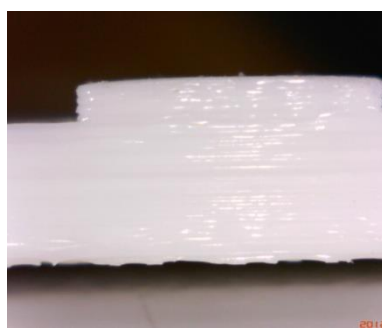
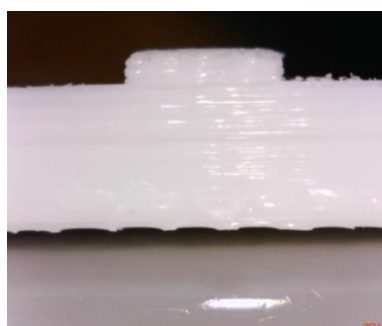
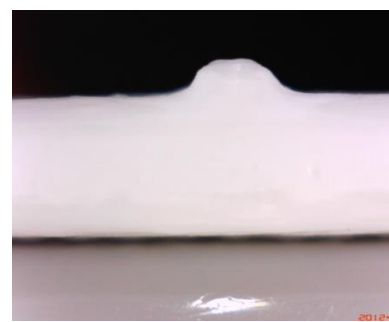
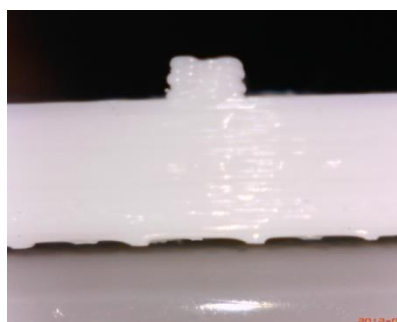


**\*PROMENE NA IZDIGNUTIM ELEMENTIMA ZA UTISKIVANJE SA RAVNIM IVICAMA**

Izdignuti elementi bez  
dodatne obrade

Izdignuti elementi nakon  
mehaničke obrade

Izdignuti elementi nakon  
hemijske obrade



## Prilog P4 - Metoda analize slika digitalizovanih uzoraka utisnutih elemenata

### \*MATLAB KOD ZA AUTOMATIZACIJU SEGMENTACIJE SLIKA

```
function automatizacija
input_files =
dirrec('I:\Bojan\!Posao\01_Fakultet\02_Doktorske_studije\Doktorat\bojan_sken\Za_Matlab');
output_dir =
'I:\Bojan\!Posao\01_Fakultet\02_Doktorske_studije\Doktorat\bojan_sken\Segmentirane_slike';
results = [];
for index = 1:size(input_files, 2)
    input_file = char(input_files(index));
    [filepath, name, ext] = fileparts(input_file);
    output_file = strcat(output_dir, name, '.jpg');
    [paper_gray_level, shadow_gray_level, contrast] =
visibility(input_file, output_file);
    results = [results; input_files(index), paper_gray_level,
shadow_gray_level, contrast];
end
xlswrite
('I:\Bojan\!Posao\01_Fakultet\02_Doktorske_studije\Doktorat\bojan_sken\Segmentirane_slike\ispis_rezultata.xlsx', results);
end
```

### \* MATLAB KOD ZA UČITAVANJE FUNKCIJE ZA RAČUNANJE MAXENTROPY METODE I RAČUNANJE VREDNOSTI INTENZITETA NIJANSE SIVE

```
function [paper_gray_level, shadow_gray_level, contrast] =
visibility(input_file, output_file)
    original_image = imread(input_file);
    threshold2 = th_entropy(original_image, 255);
    threshold = threshold2 / 255.0;
    positive_mask = im2bw(original_image, threshold);
    negative_mask = imcomplement(positive_mask);
    positive_image = immultiply(original_image, positive_mask);
    imwrite(positive_image, output_file, 'jpg');
    negative_image = immultiply(original_image, negative_mask);
    paper_gray_level = mean(positive_image(positive_image~=0));
    shadow_gray_level = mean(negative_image(negative_image~=0));
    contrast=paper_gray_level-shadow_gray_level;
end
```

## \* MATLAB KOD ZA PRIMENU MAXENTROPY METODE

```
function T = th_entropy(I,n)
% T = th_intermeans(I,n)
%
% Find a global threshold for a grayscale image using the method based on
% the entropy of the image histogram.
%
% In:
% I    grayscale image
% n    maximum graylevel (defaults to 255)
%
% Out:
% T    threshold
%
% References:
%
% J. N. Kapur, P. K. Sahoo, and A. K. C. Wong, "A new method for gray-level
% picture thresholding using the entropy of the histogram," Computer
% Vision,
% Graphics, and Image Processing, vol. 29, pp. 273-285, 1985.
%
% C. A. Glasbey, "An analysis of histogram-based thresholding algorithms,"
% CVGIP: Graphical Models and Image Processing, vol. 55, pp. 532-537, 1993.
%
% Copyright (C) 2004 Antti Niemistö
% See README for more copyright information.

if nargin == 1
    n = 255;
end
I = double(I);
y = hist(I(:),0:n);
warning off
for j = 0:n
    vec(j+1) = E(y,j)/A(y,j) - log10(A(y,j)) + ...
        (E(y,n)-E(y,j))/(A(y,n)-A(y,j)) - log10(A(y,n)-A(y,j));
end
warning on
[minimum,ind] = min(vec);
T = ind-1;
function x = E(y,j)
y = y(1:j+1);
y = y(y~=0);
x = sum(y.*log10(y));
```

\* REZULTATI METODA ANALIZE SLIKE ZA SVE UTISNUTE PAPIRE I ALATE ZA UTISKIVANJE

**Imenovanje uzorka:**

*Br. seta alata\_tehnika izrade alata\_vrsta papira\_sila utiskivanja*

**Legenda:**

*(mg) – alat izrađen konvencionalnom tehnikom nagrizanja, (pla) – alat izrađen FDM tehnikom (kd) – premazni, (of) - nepremazni, (vol) - voluminozni*

Uzorci utisnuti konvencionalnim alatom	Intenzitet nijanse sive svetlih površina slike	Intenzitet nijanse sive tamnih površina slike	Razlika vrednosti inteziteta nijanse sive svetlih i tamnih delova slike
1_mg_kd130_600.tif	236	211	24
1_mg_kd130_700.tif	236	209	27
1_mg_kd130_750.tif	235	203	32
1_mg_kd130_800.tif	235	204	32
1_mg_kd130_1000.tif	234	184	50
1_mg_kd150_600.tif	238	216	21
1_mg_kd150_700.tif	239	214	25
1_mg_kd150_800.tif	238	209	29
1_mg_kd150_900.tif	237	204	33
1_mg_kd150_1000.tif	237	182	54
1_mg_kd170_800.tif	239	213	27
1_mg_kd170_900.tif	240	212	28
1_mg_kd170_1000.tif	238	140	98
1_mg_kd170_1100.tif	238	201	38
1_mg_kd170_1200.tif	239	180	59
1_mg_kd200_900.tif	242	219	23
1_mg_kd200_1000.tif	242	215	27
1_mg_kd200_1100.tif	241	210	31
1_mg_kd200_1200.tif	240	207	33
1_mg_kd200_1300.tif	240	199	42
1_mg_of100_500.tif	234	209	25
1_mg_of100_600.tif	235	207	28
1_mg_of100_700.tif	234	202	33
1_mg_of100_750.tif	233	197	37
1_mg_of100_800.tif	233	185	49
1_mg_of120_600.tif	237	212	26
1_mg_of120_750.tif	237	206	31
1_mg_of120_800.tif	238	205	33
1_mg_of120_850.tif	237	202	35
1_mg_of120_950.tif	236	185	51
1_mg_of140_600.tif	239	218	21
1_mg_of140_700.tif	240	216	24
1_mg_of140_800.tif	239	211	28
1_mg_of140_900.tif	238	207	31

Uzorci utisnuti FDM alatom	Intenzitet nijanse sive svetlih površina slike	Intenzitet nijanse sive tamnih površina slike	Razlika vrednosti inteziteta nijanse sive svetlih i tamnih delova slike
1_pla_kd130_800.tif	233	205	29
1_pla_kd130_850.tif	236	205	31
1_pla_kd130_900.tif	234	201	33
1_pla_kd130_950.tif	235	202	33
1_pla_kd130_1000.tif	235	198	37
1_pla_kd150_700.tif	237	210	27
1_pla_kd150_800.tif	237	209	29
1_pla_kd150_900.tif	238	208	31
1_pla_kd150_950.tif	239	207	32
1_pla_kd150_1000.tif	239	209	30
1_pla_kd170_800.tif	241	214	28
1_pla_kd170_900.tif	240	213	27
1_pla_kd170_1000.tif	240	211	29
1_pla_kd170_1100.tif	242	212	30
1_pla_kd170_1250.tif	241	208	33
1_pla_kd200_750.tif	241	220	22
1_pla_kd200_1000.tif	240	212	28
1_pla_kd200_1000b.tif	241	210	31
1_pla_kd200_1250.tif	239	209	30
1_pla_kd200_1500.tif	240	208	31
1_pla_of100_800.tif	236	204	31
1_pla_of100_900.tif	236	204	33
1_pla_of100_1000.tif	237	202	34
1_pla_of100_1100.tif	238	202	36
1_pla_of100_1200.tif	238	201	37
1_pla_of120_800.tif	236	208	28
1_pla_of120_900.tif	237	207	29
1_pla_of120_1000.tif	237	207	30
1_pla_of120_1100.tif	238	207	31
1_pla_of120_1200.tif	239	206	32
1_pla_of140_800.tif	238	210	28
1_pla_of140_900.tif	238	209	29
1_pla_of140_1000.tif	239	209	30
1_pla_of140_1100.tif	240	210	30

1_mg_of140_1000.tif	238	205	33
1_mg_of170_700.tif	241	220	20
1_mg_of170_800.tif	241	218	23
1_mg_of170_900.tif	240	214	26
1_mg_of170_1000.tif	239	211	28
1_mg_of170_1200.tif	239	205	34
1_mg_of80_400.tif	233	207	26
1_mg_of80_500.tif	234	201	34
1_mg_of80_600.tif	233	184	49
1_mg_of80_650.tif	233	191	42
1_mg_of80_2000.tif	232	184	47
1_mg_vol60_275.tif	228	195	33
1_mg_vol60_275b.tif	229	197	32
1_mg_vol60_275c.tif	230	195	35
1_mg_vol60_280.tif	229	181	48
1_mg_vol60_300.tif	228	177	51
1_mg_vol70_275.tif	232	207	25
1_mg_vol70_300.tif	231	199	32
1_mg_vol70_330.tif	232	180	52
1_mg_vol70_350.tif	230	181	49
1_mg_vol70_400.tif	230	178	52
1_mg_vol80_300.tif	233	207	26
1_mg_vol80_325.tif	234	207	27
1_mg_vol80_350.tif	233	205	29
1_mg_vol80_380.tif	232	180	52
1_mg_vol80_400.tif	232	177	55
2_mg_kd130_500.tif	237	217	19
2_mg_kd130_550.tif	236	215	22
2_mg_kd130_600.tif	235	211	24
2_mg_kd130_700.tif	235	203	33
2_mg_kd130_800.tif	235	187	48
2_mg_kd150_600.tif	238	217	21
2_mg_kd150_700.tif	239	214	25
2_mg_kd150_750.tif	238	210	28
2_mg_kd150_800.tif	237	205	32
2_mg_kd150_900.tif	237	188	49
2_mg_kd170_600.tif	240	220	19
2_mg_kd170_700.tif	240	218	22
2_mg_kd170_800.tif	240	213	27
2_mg_kd170_900.tif	239	210	29
2_mg_kd170_1200.tif	239	202	37
2_mg_kd200_900.tif	241	219	23
2_mg_kd200_1000.tif	242	215	27
2_mg_kd200_1100.tif	241	210	31
2_mg_kd200_1200.tif	240	204	36
2_mg_kd200_1300.tif	241	191	50
2_mg_of100_500.tif	235	212	24

1_pla_of140_1250.tif	240	209	31
1_pla_of170_800.tif	240	215	25
1_pla_of170_900.tif	241	214	27
1_pla_of170_1000.tif	241	212	29
1_pla_of170_1250.tif	242	213	29
1_pla_of170_1500.tif	242	211	31
1_pla_of80_600.tif	233	198	35
1_pla_of80_650.tif	236	201	35
1_pla_of80_700.tif	233	196	37
1_pla_of80_800.tif	234	196	38
1_pla_of80_900.tif	235	198	38
1_pla_vol60_400.tif	226	181	45
1_pla_vol60_475.tif	228	174	54
1_pla_vol60_500.tif	228	165	63
1_pla_vol60_550.tif	227	182	46
1_pla_vol60_600.tif	227	175	51
1_pla_vol70_500.tif	233	193	40
1_pla_vol70_550.tif	234	195	39
1_pla_vol70_600.tif	234	195	40
1_pla_vol70_650.tif	235	195	41
1_pla_vol70_700.tif	235	192	43
1_pla_vol80_400.tif	235	186	49
1_pla_vol80_500.tif	233	180	53
1_pla_vol80_600.tif	235	205	30
1_pla_vol80_700.tif	233	203	30
1_pla_vol80_800.tif	232	169	64
2_pla_kd130_400.tif	235	177	58
2_pla_kd130_450.tif	236	169	39
2_pla_kd130_500.tif	234	169	65
2_pla_kd130_550.tif	235	208	27
2_pla_kd130_600.tif	236	159	77
2_pla_kd150_500.tif	236	180	56
2_pla_kd150_550.tif	237	215	21
2_pla_kd150_600.tif	237	170	67
2_pla_kd150_650.tif	238	164	40
2_pla_kd150_700.tif	238	212	26
2_pla_kd170_550.tif	239	220	19
2_pla_kd170_600.tif	239	218	21
2_pla_kd170_650.tif	240	219	22
2_pla_kd170_700.tif	241	218	23
2_pla_kd170_750.tif	240	215	25
2_pla_kd200_600.tif	240	195	45
2_pla_kd200_700.tif	241	222	19
2_pla_kd200_750.tif	241	179	62
2_pla_kd200_800.tif	242	178	64
2_pla_kd200_850.tif	242	219	22
2_pla_of100_400.tif	236	196	40

2_mg_of100_550.tif	235	208	27
2_mg_of100_600.tif	233	203	30
2_mg_of100_650.tif	234	202	32
2_mg_of100_700.tif	233	192	41
2_mg_of120_700.tif	238	209	28
2_mg_of120_800.tif	237	205	32
2_mg_of120_900.tif	235	197	38
2_mg_of120_1000.tif	237	189	47
2_mg_of120_1100.tif	236	187	49
2_mg_of140_700.tif	239	217	23
2_mg_of140_800.tif	239	213	26
2_mg_of140_900.tif	239	210	29
2_mg_of140_1000.tif	238	203	34
2_mg_of140_1200.tif	237	190	47
2_mg_of170_900.tif	240	213	26
2_mg_of170_1000.tif	240	211	28
2_mg_of170_1100.tif	239	208	31
2_mg_of170_1200.tif	238	203	35
2_mg_of170_1400.tif	238	189	49
2_mg_of80_300.tif	234	211	23
2_mg_of80_400.tif	235	207	28
2_mg_of80_500.tif	233	198	35
2_mg_of80_700.tif	233	182	50
2_mg_of80_800.tif	232	184	48
2_mg_vol60_300.tif	229	201	27
2_mg_vol60_325.tif	230	177	52
2_mg_vol60_350.tif	230	182	48
2_mg_vol60_350a.tif	227	180	47
2_mg_vol60_400.tif	227	179	48
2_mg_vol70_325.tif	232	204	27
2_mg_vol70_330.tif	232	207	26
2_mg_vol70_340.tif	233	205	27
2_mg_vol70_350.tif	231	185	46
2_mg_vol70_400.tif	231	182	49
2_mg_vol80_325.tif	235	172	62
2_mg_vol80_350.tif	235	213	21
2_mg_vol80_355.tif	234	209	25
2_mg_vol80_375.tif	233	207	26
2_mg_vol80_400.tif	232	188	45
3_mg_kd130_300.tif	235	214	22
3_mg_kd130_325.tif	236	213	23
3_mg_kd130_350.tif	236	177	59
3_mg_kd130_400.tif	235	176	59
3_mg_kd130_800.tif	235	184	51
3_mg_kd150_375.tif	239	215	24
3_mg_kd150_400.tif	239	209	30
3_mg_kd150_425.tif	238	182	56

2_pla_of100_450.tif	235	191	44
2_pla_of100_500.tif	234	169	65
2_pla_of100_550.tif	235	209	27
2_pla_of100_600.tif	234	205	29
2_pla_of120_600.tif	237	183	55
2_pla_of120_650.tif	238	212	26
2_pla_of120_700.tif	237	209	28
2_pla_of120_750.tif	237	207	30
2_pla_of120_800.tif	236	156	80
2_pla_of140_700.tif	238	179	59
2_pla_of140_750.tif	239	176	63
2_pla_of140_800.tif	238	211	27
2_pla_of140_850.tif	239	210	28
2_pla_of140_900.tif	237	206	31
2_pla_of170_800.tif	239	215	24
2_pla_of170_900.tif	239	213	26
2_pla_of170_950.tif	240	213	26
2_pla_of170_1050.tif	241	212	29
2_pla_of170_1100.tif	240	210	30
2_pla_of80_300.tif	233	195	39
2_pla_of80_325.tif	234	176	58
2_pla_of80_350.tif	232	183	49
2_pla_of80_375.tif	232	175	57
2_pla_of80_400.tif	231	204	27
2_pla_vol60_250.tif	227	185	42
2_pla_vol60_275.tif	227	167	45
2_pla_vol60_300.tif	228	179	49
2_pla_vol60_325.tif	228	166	62
2_pla_vol60_350.tif	228	165	63
2_pla_vol70_250.tif	233	205	28
2_pla_vol70_275.tif	233	201	32
2_pla_vol70_300.tif	230	180	37
2_pla_vol70_325.tif	231	176	54
2_pla_vol70_350.tif	232	171	61
2_pla_vol80_300.tif	231	200	32
2_pla_vol80_350.tif	231	201	31
2_pla_vol80_400.tif	232	188	44
2_pla_vol80_400b.tif	233	165	68
2_pla_vol80_450.tif	233	155	78
3_pla_kd130_400.tif	235	215	20
3_pla_kd130_500.tif	236	213	22
3_pla_kd130_600.tif	236	208	28
3_pla_kd130_700.tif	237	206	31
3_pla_kd130_800.tif	236	202	34
3_pla_kd150_400.tif	238	219	19
3_pla_kd150_500.tif	239	218	21
3_pla_kd150_600.tif	238	216	22



3_mg_kd150_450.tif	237	177	60
3_mg_kd150_500.tif	237	182	55
3_mg_kd170_400.tif	240	218	22
3_mg_kd170_425.tif	240	215	24
3_mg_kd170_450.tif	239	212	27
3_mg_kd170_475.tif	239	209	30
3_mg_kd170_500.tif	239	182	57
3_mg_kd200_475.tif	242	219	22
3_mg_kd200_500.tif	242	216	26
3_mg_kd200_525.tif	241	212	29
3_mg_kd200_550.tif	240	179	61
3_mg_kd200_600.tif	240	182	58
3_mg_of100_200.tif	236	215	21
3_mg_of100_250.tif	236	214	22
3_mg_of100_300.tif	236	211	24
3_mg_of100_350.tif	235	205	30
3_mg_of100_400.tif	235	185	50
3_mg_of120_300.tif	239	218	20
3_mg_of120_350.tif	238	214	24
3_mg_of120_400.tif	237	209	28
3_mg_of120_450.tif	236	183	54
3_mg_of120_500.tif	236	184	52
3_mg_of140_400.tif	239	216	23
3_mg_of140_450.tif	240	214	26
3_mg_of140_500.tif	239	206	33
3_mg_of140_550.tif	239	185	54
3_mg_of140_600.tif	238	186	52
3_mg_of170_450.tif	241	221	20
3_mg_of170_500.tif	242	221	21
3_mg_of170_550.tif	240	216	24
3_mg_of170_600.tif	239	211	29
3_mg_of170_700.tif	240	190	50
3_mg_of80_100_200_250.tif	235	206	29
3_mg_of80_400.tif	233	183	50
3_mg_of80_400b.tif	234	186	49
3_mg_of80_600.tif	233	180	53
3_mg_of80_800.tif	233	186	47
3_mg_vol60_150.tif	229	198	31
3_mg_vol60_160.tif	230	199	31
3_mg_vol60_160b.tif	231	200	31
3_mg_vol60_170.tif	231	179	52
3_mg_vol60_200.tif	228	179	49
3_mg_vol70_150.tif	233	204	29
3_mg_vol70_160.tif	233	204	29
3_mg_vol70_170.tif	232	179	53
3_mg_vol70_180.tif	232	178	54

3_pla_kd150_700.tif	237	210	27
3_pla_kd150_800.tif	237	205	31
3_pla_kd170_1.tif	239	216	23
3_pla_kd170_2.tif	239	216	24
3_pla_kd170_750.tif	240	209	32
3_pla_kd170_4.tif	241	218	24
3_pla_kd170_5.tif	240	217	23
3_pla_kd200_450.tif	240	223	17
3_pla_kd200_550.tif	241	221	20
3_pla_kd200_550b.tif	241	223	18
3_pla_kd200_650.tif	242	222	20
3_pla_kd200_750.tif	241	219	22
3_pla_of100_1.tif	235	207	28
3_pla_of100_550.tif	235	207	28
3_pla_of100_3.tif	236	210	25
3_pla_of100_4.tif	237	212	24
3_pla_of100_5.tif	236	212	24
3_pla_of120_450.tif	239	214	24
3_pla_of120_500.tif	239	214	25
3_pla_of120_550.tif	238	213	26
3_pla_of120_600.tif	238	211	27
3_pla_of120_700.tif	237	211	26
3_pla_of140_500.tif	239	216	23
3_pla_of140_600.tif	240	216	24
3_pla_of140_700.tif	239	214	25
3_pla_of140_750.tif	238	212	26
3_pla_of140_800.tif	237	210	28
3_pla_of170_750.tif	239	216	24
3_pla_of170_800.tif	241	216	25
3_pla_of170_850.tif	239	214	25
3_pla_of170_1000.tif	240	213	28
3_pla_of170_1100.tif	241	212	29
3_pla_of80_350.tif	235	210	24
3_pla_of80_400.tif	234	208	26
3_pla_of80_400b.tif	235	207	28
3_pla_of80_500.tif	232	203	29
3_pla_of80_550.tif	232	203	29
3_pla_vol60_150.tif	226	170	56
3_pla_vol60_200.tif	226	178	49
3_pla_vol60_250.tif	227	168	60
3_pla_vol60_300.tif	227	162	65
3_pla_vol60_400.tif	227	192	35
3_pla_vol70_150.tif	232	185	48
3_pla_vol70_250.tif	233	170	63
3_pla_vol70_300.tif	233	205	28
3_pla_vol70_350.tif	235	202	33

3_mg_vol70_200.tif	232	182	50
3_mg_vol80_180.tif	236	209	27
3_mg_vol80_190.tif	235	204	30
3_mg_vol80_200.tif	233	202	31
3_mg_vol80_200b.tif	234	204	30
3_mg_vol80_210.tif	234	179	54
4_mg_kd130_700.tif	237	206	31
4_mg_kd130_750.tif	237	201	35
4_mg_kd130_800.tif	235	198	37
4_mg_kd130_850.tif	236	191	45
4_mg_kd130_1000.tif	235	175	60
4_mg_kd150_850.tif	239	204	34
4_mg_kd150_900.tif	238	199	38
4_mg_kd150_950.tif	237	192	45
4_mg_kd150_1000.tif	236	189	47
4_mg_kd150_1100.tif	238	185	54
4_mg_kd170_800.tif	240	212	28
4_mg_kd170_900.tif	240	206	34
4_mg_kd170_1000.tif	239	201	38
4_mg_kd170_1100.tif	239	194	45
4_mg_kd170_1200.tif	238	184	54
4_mg_kd200_1100.tif	241	207	35
4_mg_kd200_1200.tif	242	203	39
4_mg_kd200_1300.tif	241	196	44
4_mg_kd200_1400.tif	240	188	52
4_mg_kd200_1500.tif	241	182	59
4_mg_of100_700.tif	235	201	34
4_mg_of100_750.tif	235	201	35
4_mg_of100_800.tif	235	198	36
4_mg_of100_815.tif	234	184	50
4_mg_of100_850.tif	234	183	51
4_mg_of120_800.tif	238	206	31
4_mg_of120_900.tif	238	203	35
4_mg_of120_1000.tif	237	199	38
4_mg_of120_1100.tif	237	188	49
4_mg_of120_1200.tif	237	186	50
4_mg_of140_1000.tif	239	207	32
4_mg_of140_1100.tif	239	205	34
4_mg_of140_1200.tif	238	201	37
4_mg_of140_1300.tif	237	187	51
4_mg_of140_1400.tif	237	187	50
4_mg_of170_1300.tif	239	205	35
4_mg_of170_1350.tif	240	203	36
4_mg_of170_1400.tif	238	200	38
4_mg_of170_1500.tif	239	197	42
4_mg_of170_1550.tif	239	182	56
4_mg_of80_500.tif	232	200	33

3_pla_vol70_400.tif	235	200	35
3_pla_vol80_150.tif	232	193	38
3_pla_vol80_300.tif	234	209	24
3_pla_vol80_350.tif	234	173	32
3_pla_vol80_400.tif	233	206	27
3_pla_vol80_500.tif	232	198	33
4_pla_kd130_800.tif	237	209	28
4_pla_kd130_950.tif	236	207	30
4_pla_kd130_1000.tif	236	208	29
4_pla_kd130_1050.tif	236	199	36
4_pla_kd130_1150.tif	235	181	54
4_pla_kd150_850.tif	238	216	22
4_pla_kd150_1000.tif	237	212	25
4_pla_kd150_1100.tif	238	213	25
4_pla_kd150_1150.tif	236	209	27
4_pla_kd150_1250.tif	236	204	32
4_pla_kd170_850.tif	240	219	21
4_pla_kd170_1000.tif	239	218	22
4_pla_kd170_1150.tif	239	214	25
4_pla_kd170_1250.tif	241	215	25
4_pla_kd170_1300.tif	238	211	28
4_pla_kd200_700.tif	240	223	17
4_pla_kd200_850.tif	240	222	19
4_pla_kd200_1000.tif	241	220	20
4_pla_kd200_1200.tif	242	220	21
4_pla_kd200_1500.tif	242	217	25
4_pla_of100_1000.tif	236	208	29
4_pla_of100_1000b.tif	235	206	29
4_pla_of100_1100.tif	235	205	30
4_pla_of100_1200.tif	234	202	32
4_pla_of100_1300.tif	234	200	34
4_pla_of120_1000.tif	238	212	26
4_pla_of120_1200.tif	239	211	29
4_pla_of120_1300.tif	238	208	30
4_pla_of120_1400.tif	238	207	30
4_pla_of120_1500.tif	237	206	31
4_pla_of140_1200.tif	240	215	25
4_pla_of140_1300.tif	239	212	27
4_pla_of140_1400.tif	238	211	27
4_pla_of140_1500.tif	238	209	29
4_pla_of140_1600.tif	240	211	29
4_pla_of170_1000.tif	238	214	24
4_pla_of170_1100.tif	239	215	23
4_pla_of170_1200.tif	240	215	25
4_pla_of170_1300.tif	240	216	24
4_pla_of170_1500.tif	241	214	27
4_pla_of80_600.tif	234	205	29

4_mg_of80_600.tif	234	196	38
4_mg_of80_650.tif	232	179	53
4_mg_of80_670.tif	234	184	50
4_mg_of80_700.tif	234	190	44
4_mg_vol60_300.tif	229	200	29
4_mg_vol60_325.tif	230	197	33
4_mg_vol60_350.tif	230	177	54
4_mg_vol60_380.tif	230	177	53
4_mg_vol60_400.tif	228	174	55
4_mg_vol70_375.tif	231	202	29
4_mg_vol70_380.tif	232	201	31
4_mg_vol70_385.tif	233	204	30
4_mg_vol70_390.tif	233	201	32
4_mg_vol70_400.tif	231	180	51
4_mg_vol80_400.tif	232	202	30
4_mg_vol80_425.tif	235	205	29
4_mg_vol80_430.tif	233	199	34
4_mg_vol80_435.tif	234	199	35
4_mg_vol80_450.tif	234	178	56

4_pla_of80_700.tif	235	204	31
4_pla_of80_800.tif	233	201	32
4_pla_of80_900.tif	233	199	34
4_pla_of80_1000.tif	232	196	36
4_pla_vol60_375.tif	229	198	31
4_pla_vol60_400.tif	228	194	35
4_pla_vol60_400b.tif	230	197	33
4_pla_vol60_425.tif	229	193	35
4_pla_vol60_425b.tif	229	195	34
4_pla_vol70_400.tif	231	198	33
4_pla_vol70_450.tif	232	199	34
4_pla_vol70_475.tif	231	203	28
4_pla_vol70_500.tif	230	197	33
4_pla_vol70_525.tif	229	196	34
4_pla_vol80_500.tif	232	200	32
4_pla_vol80_550.tif	234	203	31
4_pla_vol80_600.tif	234	198	36
4_pla_vol80_650.tif	233	197	36
4_pla_vol80_750.tif	233	188	45

Uzorci utisnuti SLA alatom	Svetli pikseli	Tammi pikseli	Razlika vrednosti
sla_kd130_400.tif	234	216	18
sla_kd130_500.tif	233	209	23
sla_kd130_550.tif	233	210	24
sla_kd130_600.tif	234	206	28
sla_kd130_1000.tif	234	191	43
sla_kd150_400.tif	234	217	18
sla_kd150_500.tif	235	214	21
sla_kd150_550.tif	235	213	22
sla_kd150_600.tif	236	212	24
sla_kd150_700.tif	236	207	29
sla_kd170_500.tif	236	219	18
sla_kd170_600.tif	237	217	20
sla_kd170_700.tif	238	215	23
sla_kd170_750.tif	238	214	24
sla_kd170_800.tif	239	212	26
sla_kd200_600.tif	239	221	18
sla_kd200_700.tif	239	219	20
sla_kd200_800.tif	240	218	22
sla_kd200_900.tif	240	216	24
sla_kd200_950.tif	240	214	26

sla_of100_400.tif	231	208	23
sla_of100_450.tif	232	209	23
sla_of100_500.tif	233	210	23
sla_of100_550.tif	234	209	25
sla_of100_600.tif	233	207	27
sla_of120_500.tif	235	215	20
sla_of120_500b.tif	236	213	23
sla_of120_550.tif	236	213	24
sla_of120_600.tif	237	213	24
sla_of120_650.tif	237	211	26
sla_of140_600.tif	236	212	24
sla_of140_700.tif	237	211	25
sla_of140_800.tif	237	210	27
sla_of140_900.tif	238	208	30
sla_of140_950.tif	238	206	32
sla_of170_700.tif	237	214	22
sla_of170_800.tif	237	213	24
sla_of170_900.tif	238	212	26
sla_of170_1000.tif	239	212	27
sla_of170_1100.tif	238	210	29
sla_of80_400.tif	232	206	26
sla_of80_450.tif	231	202	29
sla_of80_500.tif	231	201	31
sla_of80_550.tif	233	201	32
sla_of80_600.tif	233	198	35
sla_vol60_200.tif	225	194	31
sla_vol60_250.tif	225	171	54
sla_vol60_275.tif	226	200	26
sla_vol60_300.tif	226	198	28
sla_vol60_325.tif	227	197	30
sla_vol70_250.tif	228	205	24
sla_vol70_275.tif	229	206	23
sla_vol70_300.tif	229	183	47
sla_vol70_350.tif	230	205	25
sla_vol70_375.tif	231	204	27
sla_vol80_325.tif	231	207	24
sla_vol80_350.tif	231	207	24
sla_vol80_375.tif	232	182	50
sla_vol80_400.tif	233	209	24
sla_vol80_425.tif	233	205	28

## 14. BIOGRAFIJA SA BIBLIOGRAFIJOM

**Ime i prezime:** Bojan Banjanin

**Datum i mesto rođenja:** 12.10.1986., Novi Sad

**Obrazovanje:**

2005 – 2010 Osnovne akademske – bečelor studije i diplomske akademske – master studije, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Departman za grafičko inženjerstvo i dizajn

2010 - 2018 Doktorske akademske studije, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Departman za grafičko inženjerstvo i dizajn

**Kretanje u poslu:**

2011 – 2013 Saradnik u nastavi, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Departman za grafičko inženjerstvo i dizajn

2013 – Asistent – master, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Departman za grafičko inženjerstvo i dizajn

**Mesto i trajanje studijskih boravaka u inostranstvu:**

17.03.2015 - 17.06.2015. CEEPUS CIII-SI-0719-03-1415-M-84083 - A.L.I.C.E., University of Ljubljana, Faculty of Natural Sciences and Engineering, Department of textiles, Ljubljana, Slovenia

28.03.2016 - 25.04.2016. CEEPUS CIII-RS-0704-04-1516-M-92663 - Research and education in the field of Graphic engineering and design, University of Ljubljana, Faculty of Natural Sciences and Engineering, Department of textiles, Ljubljana, Slovenia

31.08.2016 - 29.09.2016. PrintPromotion, Post gradual training seminar, Specialist teacher training course in Germany for specialist teacher in the field of printing and paper converting, Chemnitz, Germany

## Spisak rezultata M23 - Rad u međunarodnom časopisu (2)

1. **Banjanin B.**, Vladić G., Pál M., Baloš S., Dramićanin M., Rackov, M, Knežević I.: Consistency analysis of mechanical properties of elements produced by FDM additive manufacturing technology, *Revista Materia*, 2018, v.23, No.04 (*prihvaćen za objavljivanje 24.01.2018*).
2. Boeva R., Spiridonov I., Bozhkova T., Novaković D., **Banjanin B.**: Evaluation of changes in the optical properties of high yield fibrous materials under thermal treatment, *Bulgarian Chemical Communications*, 2017, Vol. 49, No L, pp. 115-120, ISSN 0324-1130

## Spisak rezultata M33 - Saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u celini (10)

1. Nedeljković U., **Banjanin B.**, Pinčjer I.: Designing GridSans Regular with Titling Alternates, 5. International Symposium on Graphic Engineering and Design, GRID, Novi Sad: Fakultet tehničkih Nauka, 11-12, Novembar, 2010, pp. 155-162, ISBN 978-86-7892-294-7
2. Prica M., Dalmacija B., Pešić V., Milošević R., **Banjanin B.**, Zorić V., Adamović (Majkić) S.: Possibility of using cardboard mill sludge in immobilization of copper from contaminated sediment, 6. International Symposium on Graphic Engineering and Design, GRID, Novi Sad: Faculty of Technical Sciences, Department of Graphic Engineering and Design, Novi Sad, 15-16 Novembar, 2012, pp. 317-320, ISBN 978-86-7892-457-6
3. Nedeljković U., **Banjanin B.**, Puškarević I., Pinčjer I.: Empirical findings on feature distinctiveness: legibility based on differentiation of characters, 6. International Symposium on Graphic Engineering and Design, GRID, Novi Sad, 15-16 Novembar, 2012, pp. 261-270, ISBN 9788678924576
4. **Banjanin B.**, Nedeljković U.: Differences in screen printed letter shapes and stem widths on various textile materials , 11. Seminar in Graphic Arts, Pardubice, 17-18 Jun, 2013, pp. 86-93, ISBN 978-80-7395-660-8
5. **Banjanin B.**, Zorić V.: Influence of display contrast on text readability on different handheld devices, 8. Sigt - 7th Symposium of Information and Graphic Arts Technology, Ljubljana, 5-6 Jun, 2014, pp. 115-119, ISBN 978-961-6900-09-6
6. **Banjanin B.**, Nedeljković U.: Comparing different letter spacing methods in sans-serif typeface design, 7. INTERNATIONAL Symposium on Graphic Engineering and Design GRID, Novi Sad: Department of graphic engineering and design, 13-14 Novembar, 2014, pp. 441-448, ISBN 978-86-7892-647-1
7. Sadžakov M., **Banjanin B.**, Ružičić B., Adamović B.: The surface coverage analysis of metal substrate printed with UV inkjet ink, 7. INTERNATIONAL Symposium on Graphic Engineering and Design GRID, Novi Sad, 13-14 Novembar, 2014, pp. 273-278, ISBN 978-86-7892-647-1
8. **Banjanin B.**, Vreća N., Vasić J.: Readability of text set up with uniwidth typeface of different font weights , 8. International Symposium on Graphic Engineering and Design, GRID, Novi Sad: University of Novi Sad, Faculty of technical sciences, Department of graphic engineering and design, 3-4 Novembar, 2016, pp. 369-373, ISBN 978-86-78928-67-3
9. Vasić J., Jovičić D., **Banjanin B.**: The development of the knowledge base of contemporary graphic laboratory, 8. INTERNATIONAL Symposium on Graphic Engineering and Design GRID, Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka, 3-4 Novembar, 2016, pp. 439-448, ISBN 978-86-78928-67-3
10. **Banjanin B.**, Vladić G., Delić G., Adamović (Majkić) S., Kašiković N.: Influence of post-treatment methods on mechanical properties of PLA parts fabricated by fused deposition modeling, 5. International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering – ISCAME, Debrecen: Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Debrecen, 12-14 Oktobar, 2017, pp. 41-47, ISBN 978-963-473-304-1

#### Spisak rezultata M34 - Saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u izvodu (1)

1. Delić G., Vladić G., Pál (Apro) M., **Banjanin B.**, Petrović S.: Ergonomics of handles for packaging products , 1. IJCELIT 2017 - International Joint Conference on Enviromental and Light Industry Technologies, Budimpešta: Óbuda University - Sándor Rejtő Faculty of Light Industry and Environmental Engineering, 23-24 Novembar, 2017, pp. 22-22, ISBN 978-963-449-061-6

#### Spisak rezultata M52 - Rad u casopisu nacionalnog znacaja (1)

1. **Banjanin B.**, Novaković D., Nedeljković U.: Changes in letter stem widths after being screen printed on bleached cotton fabric, Tekstilna industrija, 2014, Vol. 60, No 4, pp. 24-29, ISSN 0040-2389, UDK: 677+687

#### Spisak rezultata M53 - Rad u naucnom casopisu (9)

1. **Banjanin B.**, Nedeljković U.: GRID SANS FONT U OPEN TYPE FONT FAJL FORMATU I NJEGOVE KARAKTERISTIKE, Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka, 2010, Vol. 25, No 20, pp. 4237-4240, ISSN 0350-428X
2. **Banjanin B.**, Nedeljković U.: Font hinting techniques and the importance of applying these techniques for high-quality display of fonts on the output device screen , Journal of Graphic Engineering and Design, 2012, Vol. 3, No 1, pp. 23-30, ISSN 2217-379X, UDK: 777.27:777.3
3. Davidović Ž., Nedeljković U., **Banjanin B.**: GROUPING FONT CHARACTERS INTO THE KERNING CLASSES, Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka, 2012, No 18, pp. 3926-3929, ISSN 0350-428X
4. Nedeljković U., Puškarević I., **Banjanin B.**, Pinčjer I.: Legibility based on differentiation of characters: A review of empirical findings fundamental for the type design practice, Journal of Graphic Engineering and Design, 2013, Vol. 4, No 1, pp. 17-27, ISSN 2217-379X, UDK: 655.261 655.262
5. Aparac S., Nedeljković U., **Banjanin B.**: DESIGNING AND GENERATING TYPEFACE JUDY AND USE OF CONTEXTUAL ALTERNATES IN OPENTYPE FONT FORMAT, Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka, 2014, No 7, pp. 1315-1318, ISSN 0350-428X
6. **Banjanin B.**, Nedeljković U.: Sidebearings analysis of alphabet letters with complex shape, Journal of Graphic Engineering and Design, 2014, Vol. 5, No 2, pp. 17-22, ISSN 2217-379X, UDK: 655.26
7. Petrović M., **Banjanin B.**: Digitization of typeface Amarna with analysis and application of methods for determining spacing between letters, Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka, 2015, Vol. 30, No 8, pp. 1375-1378, ISSN 0350-428X, UDK: 655
8. Milošević R., Nedeljković U., **Banjanin B.**, Novaković D., Kašiković N.: The analysis of ink jet printed ecofont efficiency, Journal of Graphic Engineering and Design, 2016, Vol. 7, No 1, pp. 13-18, ISSN 2217-379X
9. Delić G., Vladić G., Pál (Apro) M., **Banjanin B.**, Dedijer S.: Performance evaluation of paper embossing tools produced by fused deposition modelling additive manufacturing technology, Journal of Graphic Engineering and Design, 2017, Vol. 8, No 2, pp. 47-54, ISSN 2217-379X

#### Spisak rezultata M63 - Saopštenje sa skupa nacionalnog znacaja štampano u celini (4)

1. **Banjanin B.**, Nedeljković U.: The issues in displaying font on the e-book reader, PC tablet, and mobile phone, 16. "Blaž Baromić" International Conference on printing, design and graphic communications, Senj: Hrvatsko društvo grafičara, Hrvatska, 26-29 Septembar, 2012, pp. 123-134, ISBN 978-953-56838-2-7
2. Milošević R., Stančić M., **Banjanin B.**: Analiza svojstava sita kao najuticajnijeg elementa u tehnici sito štampe, 10. Conference of Chemists, Technologists and Environmentalists of Republic of Srpska, Banja Luka: Univerzitet u Banjoj Luci, Tehnološki fakultet, 15-16 Novembar, 2013, pp. 491-500, ISBN 978-99938-54-50-0



3. Puškarević I., **Banjanin B.**, Milošević R.: Principi održivog razvoja u primeni grafičkog oblikovanja, 10. Conference of Chemists, Technologists and Environmentalists of Republic of Srpska, Banja Luka: Univerzitet u Banjoj Luci, Tehnološki fakultet, 15-16 Novembar, 2013, pp. 513-522, ISBN 978-99938-54-50-0
4. Adamović (Majkić) S., Prica M., Szilágyi A., Kašiković N., Milošević R., **Banjanin B.**: FIZIČKO-MEHANIČKA I OPTIČKA KARAKTERIZACIJA TETRA PAK AMBALAŽE, 11. ETIKUM, Novi Sad, 6-8 Decembar, 2017, pp. 189-192, ISBN 978-86-6022-00-68

Spisak rezultata M64 - Saopštenje sa skupa nacionalnog znacaja štampano u izvodu (1)

1. Nedeljković U., **Banjanin B.**, Dudaš N.: Defining “skeletal” lines as aid in designing various styles of monolinear typeface, 15. International Conference on Printing, Design and Graphic Communications – Blaž Baromić, Senj: Croatian Society of Graphic Artists, Croatia, 16-19 Septembar, 2015, pp. 32-33