

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAFIČKI FAKULTET**

NIKOLINA JEZIDŽIĆ

ANALIZA PARAMETARA 3D TISKA

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2014



Sveučilište u Zagrebu
Grafički fakultet

NIKOLINA JEZIDŽIĆ

ANALIZA PARAMETARA 3D TISKA

DIPLOMSKI RAD

Mentor:
doc.dr.sc. Igor Zjakić

Student:
Nikolina Jezidžić

Zagreb, 2014

Rješenje o odobrenju teme diplomskog rada

ZAHVALA:

Želim se zahvaliti mentoru doc.dr.sc. Igoru Zjakiću na pomoći pri izradi ovog diplomskog rada, te znanju i razumijevanju koje mi je pružio tijekom studiranja.

Mojoj obitelji hvala na strpljenju i moralnoj podršci tijekom studija.

Posebnu zahvalu posvećujem najboljoj kolegici i prijateljici Matiji Jurčević na nesebičnoj pomoći i podršci tijekom studiranja.

Sažetak

Trodimenzionalna tehnologija tiska je jednostavan i brz način izrade prototipova. 3D objekti nastaju stvrđnjavanjem uzastopnih slojeva, presjeka objekta. Tehnologija je vrlo korisna u industrijskom dizajnu ali također i u medicini, arhitekturi, građevini, umjetnosti i gotovo svim granama industrije i istraživanja. Osim brze izrade prototipa olakšava vizualizaciju različitih ideja te omogućuje lakšu i jednostavniju komunikaciju sa klijentima i suradnicima.

Diplomski rad se sastoji se od teorijskog te eksperimentalnog dijela. Teorijski dio je uvod u 3D tehnologiju, objašnjava različite tehnologije brze izrade prototipova te navodi mogućnosti njihove primjene. Eksperimentalni dio posvećen je istraživanju problematike vođenja 3D tiska pri izradi prototipova. Prikazan je uređaj korišten u istraživanju, njegove specifikacije, osnovni dijelovi i princip rada. Navedeni su također korišteni softveri i njihovi alati. U svrhu istraživanja, u Solid Works programu, kreiran je model koji je ispisan pod različitim uvjetima i s različitim postavkama. Analizom ispisanih modela utvrđeni su parametri koji utječu na kvalitetu ispisa 3D objekta na odabranom uređaju.

Ključne riječi: 3D tisak, brza izrada prototipova, 3D model

Abstract

3D printing technology is a simple and quick way of making prototypes. In 3D printing technology, objects are being created by induration of multiple successive layers, cross-object. This technology is very useful not in industrial design only but in medicine, architecture, construction, art and every aspect of industry and researching also. Besides fast prototypes production it helps visualizing all kinds of ideas and facilitates communication with clients and associates.

This thesis consists of theoretic and experimental parts. Theoretic part is basically introduction with 3D technology, explains rapid prototyping technologies and their use. Experimental part covers 3D printing issues which can occur while making prototypes. 3D printer used in this research is presented with its specifications, parts and working principle. Software and their tools used will also be presented. For research purposes, 3D model is created in Solid Works software, and printed under different conditions. Based on a model of printed under various conditions, experiments determined which parameters, have influence in quality of printed 3D objects, considering specific device used for printing.

Key words: 3D printing, rapid prototyping, 3D model

Sadržaj

1. UVOD	1
2. TEORIJSKI DIO	2
2.1. Povijest razvoja trodimenzionalnog tiska.....	2
2.1.1. <i>Tehnologija 3D tiska od nastanka do danas</i>	3
2.1.2. <i>Projekt RepRap</i>	5
2.2. Tehnologija trodimenzionalnog ispisa	7
2.3. Brza izrada prototipova.....	9
2.3.1. <i>Povijest i razvoj tehnologije brze izrade prototipa</i>	11
2.3.2. <i>Ciklus brze izrade prototipa</i>	11
2.3.3. <i>STL datoteka</i>	13
2.4. Tehnike brze izrade prototipova.....	13
2.4.1. <i>Stereolitografija (SL/SLA)</i>	14
2.4.2. <i>Modeliranje topljenim depozitima (FDM)</i>	17
2.4.3. <i>Laminirana objektna proizvodnja (LOM)</i>	20
2.4.4. <i>Selektivno lasersko sinteriranje (SLS)</i>	22
2.4.5. <i>3D tisak</i>	25
2.5. Materijali.....	28
2.5.1. <i>Plastični materijali</i>	29
2.5.2. <i>Prah</i>	31
2.5.3. <i>Ostali materijali</i>	31
2.5.4. <i>Infiltranti (premazi)</i>	32
2.6. Područja primjene brze izrade prototipova	33
2.7. Budućnost brze izrade prototipova	39
3. EKSPERIMENTALNI DIO	41
3.1. Cilj i hipoteze istraživanja	41
3.2. Metodologija i plan istraživanja	42
3.3. Korišteni uređaj i materijali	43
3.3.1. <i>Specifikacije Cubex 3D printera</i>	45
3.4. Korišteni softveri	47
3.4.1. <i>Solid Works 2013</i>	47
3.4.2. <i>Cubex Software</i>	48
3.5. Proces izrade trodimenzionalnog modela na Cubex 3D printeru	49

3.5.1.	<i>Stvaranje CAD datoteke</i>	49
3.5.2.	<i>Stvaranje .STL datoteke, priprema i ispravak</i>	50
3.5.3.	<i>Priprema datoteke za ispis</i>	50
3.5.4.	<i>Konstruiranje modela</i>	51
3.5.5.	<i>Čišćenje i završna dorada</i>	51
3.6.	<i>Analiza parametara koji utječu na kvalitetu 3D ispisa</i>	52
3.6.1.	<i>Modeliranje</i>	52
3.6.2.	<i>Materijal</i>	55
3.6.3.	<i>Priprema datoteke za ispis</i>	61
3.6.4.	<i>Ljudski faktor</i>	69
4.	REZULTATI I RASPRAVA	70
5.	ZAKLJUČAK	72
	LITERATURA	75
	Popis kratica	79
	Popis slika	80
	Popis tablica	82

1. UVOD

Tehnologija iz dana u dan neminovno napreduje, a sve veće i konkurentnije tržište zahtjeva njezino praćenje. Jedna od novijih tehnologija u grafičkoj tehnologiji je tehnologija trodimenzionalnog tiska, koja se rapidno razvija. Do nedavno, ova je tehnologija većini ljudi graničila sa znanstvenom fantastikom. Ova tehnologija je danas još uvijek relativno nova i u stadiju razvoja, no unatoč tome sve se više počinje implementirati u razne grane industrije, proizvodnje, arhitekture, te medicine, ali upotrebljava se i u mnogim drugim područjima. [1]

Trodimenzijski ispis je metoda pretvaranja virtualnog, računalno generiranog 3D modela u fizički objekt. Koristi se u različitim granama industrije, ponajviše za dobivanje prototipova. Postoje različite tehnike trodimenzionalnog ispisivanja, no gotovo sve rade na principu stvaranja objekta sloj po sloj. Tehnologija trodimenzionalnog tiska bazirana je na *ink-jet* tehnologiji, ali se i uvelike razlikuje od nje. Ova tehnologija omogućava brz ekonomičan i kvalitetan proces izrade prototipova, ali i različitih alata, te gotovih proizvoda. Najveća prednost trodimenzionalnog tiska je upravo brzina ispisa te širok spektar materijala za izradu modela. Osim brze izrade prototipa ova tehnologija olakšava vizualizaciju različitih ideja, unapređuje planiranje proizvodnje, te smanjuje troškove proizvodnje. Tehnologija trodimenzionalnog tiska skraćuje cjelokupni ciklus dizajna i projektiranja proizvoda, te omogućava otklanjanje eventualnih pogreške kod finalnog proizvoda. [1][2]

Ova tehnologija sporo se probijala na tržištu zbog velikih troškova investiranja, nedostatka informacija te materijala za izradu trodimenzionalnih objekata. Zahvaljujući rapidnom razvoju ove tehnologije, ona postaje dostupna gotovo svima. Budući da je spremna ispuniti razne zahtjeve u različitim granama industrije ima potencijala promijeniti ne samo industriju nego i društvo. [4]

Tehnologija 3D tiska je relativno nova, te na našim područjima nedovoljno istražena. Visokokvalitetni prototipovi, bez grešaka, ključni su za izvlačenje maksimuma iz ove tehnologije, te za postizanje poslovnog cilja. Upravo istraživanje grešaka, odnosno analiza parametara koji utječu na kvalitetu trodimenzionalnog objekta nastalog tehnikom trodimenzionalnog tiska, je tema ovog rada.

2. TEORIJSKI DIO

2.1. Povijest razvoja trodimenzionalnog tiska

U grafičkoj industriji, tehnike tiska se konstantno razvijaju i napreduju, kako bi bile u korak s tehnologijom i razvojem te potrebama društva. Jedno od najnovijih tehnoloških otkrića je tehnologija trodimenzionalnog ispisa, temeljena na *ink-jet* tehnologiji. *Ink-jet* tehnologija je postavila temelje razvoju trodimenzionalnog ispisa. [2]

Po prvi puta tehnologija 3D tiska predstavljena je od strane tvrtke *3-D Systems* 1987.godine. Tehnologija se temeljila na stereolitografiji. Ovom tehnologijom trodimenzionalni objekt se kreirao sloj po sloj, koristeći virtualne računalo generirane modele. Nedugo nakon predstavljanja nove tehnologije, tvrtka *3-D Systems* je prodala svoj prvi komercijalni sustav temeljen na stereolitografiji. Godine 1993. *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) razvija i patentira tehnologiju trodimenzionalnog tiska baziranu na principu *ink-jet* tehnologije. Korisćenjem ove tehnologije, jedan materijal se mogao mlaznicama nanijeti na drugi materijal, a zatim su se spajali kako bi se omogućila što brža i što točnija izrada trodimenzionalnog objekta. S predstavljanjem ove tehnologije, pojavile su se brojne kompanije kao što su *Stratasys* i *Z Corporation*, koje su uvidjele sve prednosti razvoja ove tehnologije, koja se mogla implementirati u različita područja industrije. [2][37]

2.1.1. Tehnologija 3D tiska od nastanka do danas

- 1982. Izum stereolitografije

Charles Hull, suosnivač tvrtke *3D Systems*, izumio je stereolitografiju, proces koji omogućuje kreiranje trodimenzionalnih objekata iz digitalnih podataka. Ova tehnologija se koristila kao testiranje dizajna proizvoda prije nego se uloži u veći proizvodni program.

- 1984. Rođenje prvog 3D printera

Charles Hull je godine 1984. Kreirao prvi funkcionalni 3D printer. Prvi 3D printeri su radili na sličnom principu kao i *ink-jet* printeri. Umjesto tinte pisači su nanosili željeni materijal u slojevima, kako bi stvorili objekt iz digitalne datoteke.

- 1986. 3D Systems

Charles Hull je patentirao stereolitografiju te osnovao sa nekolicinom poslovnih partnera tvrtku *3D Systems* koja je i danas jedna od vodećih tvrtki u području tehnologije 3D tiska.

- 1987. Selective Laser Sintering (SLS)

Dr. Carl Deckard i Joe Beaman izumili su selektivno lasersko sintetiziranje.

- 1988. Fused Deposition Modeling (FDM)

Scott i Lisa Crump izumili su modeliranje odlaganjem taline.

- 1989. Stratasys

Scott i Lisa Crump patentirali su FDM i osnovali tvrtku *Stratasys*, koja se bavi proizvodnjom 3D pisača, materijala, izradom modela, te svega ostalog što obuhvaća tehnologija trodimenzionalnog tiska. Tvrtka *Stratasys* i danas je jedna od vodećih u ovom području tehnologije.

- 1992. Prvi stereolitografski uređaj

Tvrtka *3D Systems* je proizvela prvi stereolitografski uređaj koji je koristio UV laser za otapanje krutog polimera u tekućinu boje i viskoznosti meda. Ta tekućina zatim je stvarala trodimenzionalni objekt sloj po sloj. Iako je finalni objekt bio daleko od savršenstva, dokazano je da se kompleksni objekti mogu proizvesti preko noći.

- 1995. *ZPrinting*

Istraživači Klaus Lackner i Christopher Wendt sveučilišta MIT, razvili su *ZPrinting*, trodimenzionalni uređaj kreiran pomoću 3D printera.

- 1999. Primjena u medicini

Krajem devedesetih godina prošlog stoljeća u laboratorijima su uzgojeni prvi organi koji su se ugrađivali u pacijente, što je otvorilo vrata i razvoju drugih strategija proizvodnje organa, uključujući i 3D printanje.

- 2000. Funkcionalni bubreg izrađen tehnologijom 3D tiska

Znanstvenici su kreirali minijaturni ali funkcionalni bubreg, koji je mogao filtrirati krv i proizvesti urin kod životinje.

- 2005. Otvorena suradnja 3D tiska

Dr. Adrian Bowyer osnovao je inicijativu *RepRap*, kako bi izradio printer koji može reproducirati većinu svojih komponenti. Vizija ove inicijative je bila da komponente uređaja budu jeftine i dostupne gotovo svima, kako bi se tehnologija trodimenzionalnog tiska približila širokim masama.

- 2006. Masovne prilagodbe u proizvodnji

Uređaji na principu selektivnog laserskog sintetiziranja, otvaraju vrata masovnoj upotrebi tehnologije 3D tiska, pri proizvodnji industrijskih dijelova, a kasnije se šire i na druga područja. Iste godine tvrtka *Object*, kreira uređaj koji je imao sposobnost ispisa u više različitih materijala, uključujući elastomere i polimere, što omogućuje da izradu modela od više različitih materijala.

- 2008. Prvi samoreciplirajući pisač i razvoj protetike

Zahvaljujući inicijativi *RepRap* iz 2005.godine, svjetlo dana je ugledao *Darwin* - prvi samoreciplirajući pisač koji je mogao reproducirati veliku većinu svojih komponenti. Iste godine počinje upotreba trodimenzionalnog tiska u protetici.

- 2009. 3D biopisač

Oslanjajući se na tehnologiju dr. Gabor Forgacs, inovatori iz *Organova* su uspješno isprintali prvu krvnu žilu koristeći se 3D bioprinterom

- 2010. Prva robotska letjelica isprintana 3D printerom

Inženjeri na Sveučilištu *Southampton*, kreirali su prvu robotsku letjelicu sposobnu za let, a nastalu pomoću 3D printera.

- 2011. Prvo vozilo isprintano 3D printerom

Na konferenciji *TEDxWinipeg* u Kanadi, predstavljen je prvi prototip ekološki prihvatljivog automobila čiji je kostur u potpunosti izrađen pomoću 3D pisača. Iste godine po prvi puta kao materijal za 3D pisače se pojavljuju zlato i srebro, namijenjeno dizajnerima nakita.

- 2012. Primjena tehnologije 3D tiska u dentalnoj medicini

Nizozemski doktori i inženjeri su uz pomoć 3D pisača kreirali model čeljusti koji su implementirali u osamdesettrogodišnju pacijenticu koja je patila od infekcije. Primjena 3D tehnologije u dentalnoj medicini se još uvijek istražuje, budući da je njezin potencijal na ovome području enorman.

- 2014. Ističe rok patentiranja

U 2014. Godini ističu mnogi patenti vezani za tehnologiju 3D tiska, što samo nagovještava da se prava revolucija 3D tehnologije tek očekiva. [29][30]

2.1.2. Projekt *RepRap*

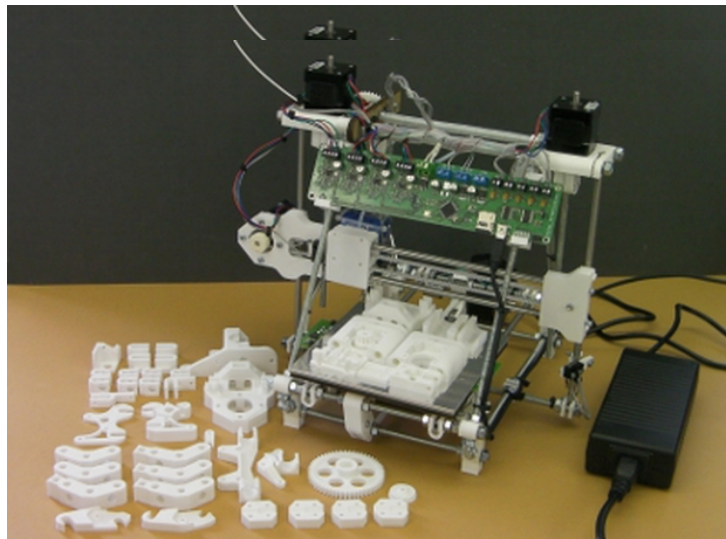
Projekt *RepRap* počeo je 2004. godine kada je Adrian Bowyer, sa Sveučilišta Bath, predložio ideju o uređaju koji se sam replicira, odnosno sam može izraditi većinu komponenti od kojih je sastavljen. Izazov je bio pronaći tehnologiju pogodnu za izradu mehaničkih, strukturnih i elektroničkih komponenti uređaja. U to vrijeme je već postojala tehnologija brze izrade prototipova koja je koristila aditivne procese. Prihvatljivo je bilo iskoristiti tu tehnologiju jedino za kreiranje dijelova za prvi uređaj koji bi sam po sebi ne bi trebao biti skup, a mogao bi sam reproducirati svoje dijelove.

Ideja je ubrzo prepoznata te je okupila mali tim ljudi koji je počeo raditi na projektu. Većina sudionika tima bili su uglavnom sa Sveučilišta Bath. Prvi prototip koji je mogao reproducirati svoje vlastite dijelove nastao je između 2006. I 2008. godine, pod imenom *RepRap Darwin*. 2010. godine okupila se oveća zajednica oko ovog projekta, koja je međusobno razmjenjivala znanja i iskustva. Počelo je eksperimentiranje sa nekim komponentama uređaja kao što su okvir,

elektronika te ostali dijelovi. To je ujedno bio i posljednji službeni uređaj tima koji je započeo projekt.

Značajna promjena dogodila se 2011.godine kada je mladi Josef Prusa predstavio svoj uređaj „Prusa Mendel“. Uređaj je imao pojednostavljene dijelove okvira, te je zahtijevao uglavnom lako dostupne stavke, što ga je u kratkom vremenu učinilo jednim od najpoznatijih pisača u povijesti.

Širenje projekta *RepRap* munjevitom brzinom je imalo utjecaja na kompletnu zajednicu, ne samo na osobe koje su bile uključene u sami projekt. Dostupnost ovakvog uređaja je položila temelje razvoju drugih projekata na području tehnologije trodimenzionalnog tiska. Danas postoje stotine različitih 3D printera, neki od njih su u vlasništvu velikih korporacija, dok su drugi potpuno dostupni i *open-source*, no većina ih je proizašla iz *RepRap* projekta. [2][4]



Slika 2. Rep Rap project
Izvor: <http://reprap.org/>

- *Karakteristike RepRap 3D pisača*

RepRap pisači su bazirani na tehnici odlaganja taline, kreiraju objekt sloj po sloj taljenjem plastičnog materijala. U ekstruderu se tali termoplastika koja prolazi kroz sitne mlaznice i gradi slojeve objekta. Uređaj uglavnom može ispisati objekte volumena 20-30 cm³. Veći objekti se mogu ispisati sa većim uređajem, no tu se mogu javiti problemi, proces ispisa može trajati do nekoliko dana, te može doći do pucanja filameta, što bi značilo da se mora ponoviti cijeli ispis

neovisno u kojoj fazi je došlo do pucanja. Veći objekti se u praksi podijele na više manjih komponenti te se zatim ručno spajaju u cjelinu. *RepRap* printeri kao za izgradnju modela koriste termoplastiku, najčešće PLA i ABS, no dostupni materijali su i nylon, polikarbonat, te u nekim slučajevima čak i drvo.

Projekt je svojevremeno bio vrlo aktivan zahvaljujući zalaganju tisuće ljudi, ali mu je nedostajala centralizacija, smjernice te konkretni zajednički cilj. No unatoč navedenim nedostacima, projekt *RepRap* je zaista uspješno položio temelje za razvoj i napredak 3D pisača. [2]

2.2. Tehnologija trodimenzionalnog ispisa

Termin tehnologija trodimenzionalnog tiska se odnosi na grupu tehnologija koje koriste procese bazirane na principima *ink-jeta*. Koristeći ovu tehnologiju, veliki broj materijala se može iskoristiti za kreiranje trodimenzionalnog modela. Princip izrade 3D objekta je vrlo sličan konvencionalnom *ink-jet* tisku. Uređaji za trodimenzionalni ispis kreiraju 3D model ispisivanjem uzastopnih slojeva materijala. Kako bio se ispisao trodimenzionalno model, računalno generirane CAD (*Computer Aided-Design*) datoteke se procesiraju kroz posebne softvere, te se dijele na nekoliko dvodimenzionalnih slojeva. Printer stvara objekt sloj po sloj od različitih vrsta materijala, ovisno o potrebama industrije i osobnim željama pojedinca. Proces ispisa slojeva se ponavlja sve dok se ne ispiše i zadnji sloj. Materijali koji se koriste u trodimenzionalnom ispisu su različitih fizikalnih i mehaničkih svojstava. [5][8]

Kada se govori o tehnologiji trodimenzionalnog tiska, neizostavno je spomenuti i CAD tehnologiju. CAD tehnologija razvila se 90-tih godina prošlog stoljeća kao metoda kreiranja virtualnih trodimenzionalnih objekata iz osnovnih geometrijskih oblika kao što su cilindar, paralelepiped i slično. Omogućava kreiranje foto-realističnih prikaza objekata olakšavajući vizualizaciju. Također ju odlikuje mogućnost izrade tehničke dokumentacije, te integracija i virtualno sklapanje što omogućava detekciju kolizije u geometriji. CAD je također osnova čitavom nizu procesa analize putem računala. Izrada CAD datoteka se naziva modelira-

nje. 3D modeli se stvaraju skupom točaka povezanih u linije ili trijagulacijske mreže. Osim modeliranja, odnosno ručnim oblikovanjem modela, 3D model se može dobiti i skeniranjem stvarnog modela pomoću 3D skenera. Neovisno koji način izrade modela se izabere, nastavlja se isti način procesiranja CAD datoteke kroz specijalizirane softvere, kako bi se model podijelio u slojeve koji će se uzastopno otiskivati jedan na drugi.[5]

Tehnologija 3D ispisa koristi aditivne procese za kreiranje modela, za razliku od tradicionalnih tehnika koje koriste supstraktivne procese. Kod tradicionalnih tehnika izrada trodimenzionalnog objekta podrazumijeva niz doradnih procesa kao što su rezanje i brušenje kako bi se otklonile nepotrebne komponente objekta. Objekti kreirani aditivnom metodom mogu se koristiti tokom cijelog životnog ciklusa proizvoda, od pred-proizvodnje, proizvodnje širokih razmjera sve do postproduktivnih prilagodbi.[3][7]

Tehnologija trodimenzionalnog ispisa se koristi u raznim područjima od arhitekture, medicine i protetike, tekstilnog dizajna, industrijskog dizajna, te u raznim drugim granama industrije. Najčešće se koristi pri izradi prototipova kao metoda brze izrade prototipova (*Rapid Prototyping*), čiji je razvoj počeo usporedno s razvojem metode stereolitografije, te čitavim nizom srodnih metoda izrade trodimenzionalnih modela. Proces od ideje do realizacije fizičkog trodimenzionalnog modela je poprilično dugačak i kompleksan, te uključuje mnoge faktore koji ovise o kvaliteti trodimenzionalnog objekta. [3]

2.3. Brza izrada prototipova

Tehnologija trodimenzionalnog ispisa je brz te relativno jednostavan način izrade prototipova. Danas je brzina i učinkovitost u svakoj industriji bitna. Budući da zadovoljava takve potrebe tržišta za brzu izradu prototipova koristi se izraz „rapid prototyping“. Upravo iz tog razloga je jedna od trenutno najbrže rastućih tehnologija. Brza izrada prototipova je automatizirana izrada modela koja se temelji na formiranju slobodnih oblika. U današnje vrijeme je toliko napredovala da se koristi i u proizvodnji maloserijskih dijelova proizvoda. Zahvaljujući velikom tehnološkom napretku ova tehnologija je postala dostupna većem spektru proizvodnih subjekata. [11]

Ova tehnika je svojom pojavom promijenila ne samo dizajn nego i same proizvodne procese u industriji i danas jedno od najpogodnijih rješenja za tu svrhu. Ovaj termin označava čitav niz tehnologija koje, direktno iz digitalnog prostornog prikaza modela nekog objekta ili modela napravljenog u CAD (*Computer Aided Design*) alatima stvaraju njegovu fizičku reprezentaciju te funkcionalan i relativno kompleksan radni prototip. Standardnim CAD programima se kreira virtualna geometrija tijela, koja se šalje na perifernu jedinicu koja gradi prototip sloj po sloj. Omogućuje detaljnije analize projekta u ranijoj fazi razvoja proizvoda, više stupnjeva korekcije u istomu vremenskom periodu i zadanom roku te, poboljšava ukupnu kvalitetu gotovoga proizvoda.

Prvi uređaji na principu brze izrade prototipova su bili bazirani na izrezivanju kartona prema konturi presjeka u xy ravnini, koji su se slagali u smjeru z ravnine. Taj princip je sličan današnjim uređajima za trodimenzionalni ispis, koji također grade sloj po sloj poprečnih presjeka u smjeru ravnine okomite na xy ravninu. Takvi konvencionalni principi spadaju u supstraktivne metode. [3]

Kreiranje modela kod brze izrade prototipova pomoću tehnike 3D tiska, bazira se na digitalno rezanim slojevima modela koji se u realnom fizičkom prostoru nanose sloj na sloj stvarajući finalni objekt. Ovaj način nam omogućava kreiranje kompleksnih modela sa tankim stjenkama te kompliciranim unutrašnjim strukturama koje je sa tradicionalnim supstraktivnim metodama gotovo nemoguće izraditi. [5]

Rapid Prototyping spada u aditivne metode koje izgrađuju model nano-seći sloj po sloj materijala u obliku poprečnih presjeka modela u x-y ravnini u smjeru osi okomite na ravninu presjeka (z-os). Ovisno o vrsti tehnologije korištene pri brznoj izradi tehnologije, dostupni su različiti materijali, te kombinacija materijala koji povećavaju mehanička svojstva i kvalitetu ispisanog objekta. Danas postoji nekoliko dostupnih vrsta tehnologija brze izrade prototipova, ovisno o potrebama grane industrije koja ih koristi i zahtjevima tržišta. [3]

Neke od dostupnih tehnologija brze izrade prototipova su:

- Stereolithography (SL) – stereolitografija
- Fused Deposition Modeling (FMD) – modeliranje topljenim depozitima
- Laminated Object Manufacturing (LOM) – laminirana objektna proizvodnja
- Selective laser sintering (SLS) – selektivno lasersko sintetiranje
- 3D-print – trodimenzionalni tisak
- Polyjet i Polyjet Matrix

Sve ove tehnologije imaju zajednički princip rada: uzimaju geometriju modela iz CAD datoteka, model se pomoću specijaliziranih softvera dijeli na niz slojeva. Zatim se printeru šalju informacije za ispis. Ovisno o namjeni objekta bira se i vrsta korištene tehnologije. Materijali kojima se gradi model su različiti: tekućina, vlakna, puder, prah ili čak metalni materijal koji se očvrstne kemijskim reakcijama, UV svjetlom ili nekim drugim metodama. [11]

Tabela 1. Usporedba tehnologija 3D tiska

Vrsta RP tehnologije	Rezolucija	Debljina sloja
SL – stereolitografija	±100 µm	50 µm
FMD – modeliranje topljenim depozitima	±127 µm	50-762 µm
LOM – laminirana objektna proizvodnja	±127 µm	76 – 150 µm
SLS – selektivno lasersko sintetiranje	±51 µm	100 - 150 µm
3D-print – trodimenzionalni tisak	±127 µm	250 µm
Polyjet	600-1600dpi	16-32 µm

2.3.1. Povijest i razvoj tehnologije brze izrade prototipa

Aditivne tehnike brze izrade prototipova koriste CAD tehnologiju, koja se zasniva na izradi čvrstog trodimenzionalnog modela - *Solid Model* u digitalnom obliku. Takav model je potpuno zatvoren i ispunjen te vodonepropusan. Osim navedenih svojstava ima svojstva model ima i masu i gustoću, koja su karakteristična za fizički model.

Prije otkrića čvrstog modela za izradu 3D objekta koristili se žičani okvir - *Wire Frame* i površina - *Surfaces*. Žičani oblik daje približni prikaz 3D objekta dok mu se vizualni doživljaj povećava dodavanjem površina. Prva tehnologija brze izrade prototipova je zaživjela tek 1986. nakon pojave spomenutih čvrstih modela. [5]

2.3.2. Ciklus brze izrade prototipa

Prije same izrade prototipa potrebno je definirati njegovu svrhu i namjenu, te u skladu s tim odabrati tehniku brze izrade prototipova. Životni ciklus budućeg prototipa započinje dizajnom, odnosno ponajprije konceptom. Nakon usvojenog koncepta, izrađuju se preliminarne skice, tehnički nacrti, te na poslijetku i CAD datoteka, odnosno digitalni trodimenzionalni model objekta. U procesu stvaranja CAD datoteke mogu se vršiti razna ispitivanja i analize objekta. Nakon verifikacije oblika i dimenzija, izrađuje se prototip. Eventualni nedostaci prototipa se eliminiraju i ispravljaju u CAD datoteci. Životni ciklus izrade prototipa prikazan je na skici (Slika 2.).



Slika 3. Ciklus brze izrade prototipa

Izvor: Vlastiti rad autora

Nakon izrade čvrstog 3D modela, on se eksportira u .STL datoteku kako bi se dalje ta datoteka mogla prilagoditi za različite tehnike brze izrade prototipova, odnosno za različite uređaje. Na tržištu postoje različite aplikacije za tu namjenu, koje također analiziraju i optimiziraju model, režu ga na slojeve, pozicioniraju ga, postavljaju potporne konstrukcije itd. Nakon što su podešeni svi parametri .STL datoteke, podešavaju se parametri uređaja, te ispis može krenuti.

Najveća prednost brze izrade prototipova je smanjenje vremena razvoja proizvoda, što ujedno skraćuje vrijeme dolaska proizvoda na tržište te snižava troškova. Osim proizvodnih prednosti, ova tehnologija olakšava komunikaciju između različitih segmenta kao što su marketing i proizvodnja te prodaja, te precizno definira potrebne alate za izradu samog proizvoda, ubrzava i olakšava testiranje proizvoda, te na posljetku olakšava samu vizualizaciju proizvoda.

S druge strane, prisutni su i neki nedostaci, kao što su ograničen izbor materijala i dimenzija prototipa te kvaliteta površine. Tehnologija također nije isplativa ukoliko se radi velika serija, zbog vremena potrebnog da se otisne jedan model, osobito ukoliko se radi o modelu većih dimenzija. [1][5]

2.3.3. STL datoteka

STL datoteka je standardizirani format za prijenos podataka koje koriste uređaji za brzu izradu prototipova. STL format kreirala je 1989. godine tvrtka *3D Systems*. To je prikaz geometrije trodimenzionalnih površina u obliku trokuta. Površina modela je logički razbijena u seriju malih trokuta, tzv. lica - *faces*. Smjer i orijentacija lica opisani su trima točkama u prostoru. Datoteka u tom obliku koristi se za izrezivanje modela na horizontalne poprečne presjeke, odnosno slojeve. Datoteka se prikazuje u mrežnom obliku - *mesh*, sastavljena od tzv. lica, te za kvalitetan otisak mora biti optimalna. Mreža koja tvore model mora biti gusta kako bi zadovoljila željenu kvalitetu površine, te kako bi se ispravno prikazali sitniji detalji. U suprotnom, kada je mreža male gustoće, dobije se gruba površina. [18][19]

2.4. Tehnike brze izrade prototipova

Razne tehnike brze izrade prototipova se primjenjuju u mnogim granama industrije, pri čemu je najveći udio u proizvodima namijenjenim kupcima, u automobilskoj industriji, arhitekturi, strojogradnji, industriji zrakoplova, vojnoj industriji, no sve više i u medicini. Tehnike se razlikuju ovisno o materijalu koji koriste za kreiranje objekta. Prema toj podjeli razlikujemo one tehnike koje koriste materijal u tekućem stanju, krutom stanju, i u obliku praha. Mogućnosti primjene tehnologije trodimenzionalnog ispisa su gotovo neograničene, te postaju svojevremeno dostupne širokom spektru korisnika. [9]

2.4.1. Stereolitografija (SL/SLA)

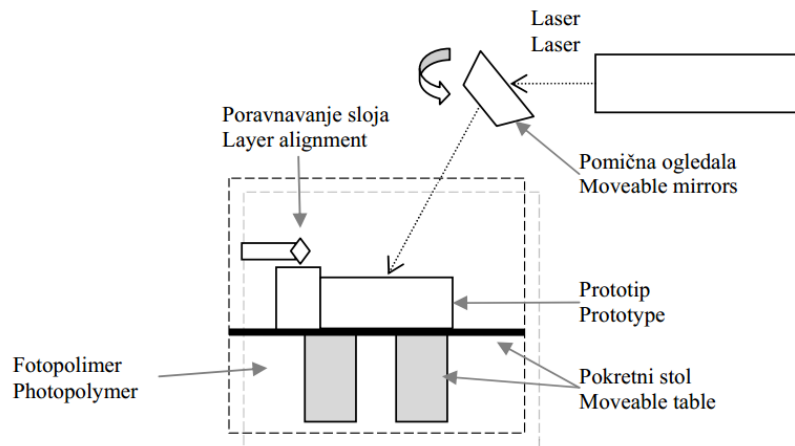
Stereolitografija patentirana 1986. godine, započinje revoluciju brze izrade prototipova. Razvijena je od strane tvrtke *3D Systems*. Vrsta je aditivnih procesa, te jedna od najraširenijih metoda brze izrade prototipova. Ova tehnika je bila i jedna od prvih komercijalno dostupnih metoda u svijetu. Bazira se na kreiranju trodimenzionalnih modela od tekućih fotosenzitivnih polimera, koji pod utjecajem ultraljubičastog zračenja poprimaju kruti oblik. U kupki tekuće fotopolimerne smole, UV laserom se solidificira sloj po sloj tekućeg materijala, koji se pod djelovanjem UV zračenja skrutnjava i tvori čvrsti model. Nakon izrade, čvrsti model se uklanja iz prostora izrade, te se ispiranjem uklanja suvišna tekućina. Kako bi se omogućilo pridržavanje dijelova modela tokom njegove izrade, izrađuju se potporne nožice koje se na kraju procesa otklone. Prateći softver uređaja sam kreira potpore na mjestima na kojima su potrebne. Potpore ujedno služe i sprječavanju adhezije materijala direktno na površinu pisača, te omogućava lakše uklanjanje objekta sa uređaja. Nakon skidanja potpora, model se stavlja u ultraljubičastu komoru kako bi se u potpunosti osušio. [10]

Uređaji koji koriste ovu tehnologiju najčešće se sastoje od četiri osnovna dijela: računala koje obrađuje podatke i kreira slojeve, kontrolnog računala čija je svrha nadziranje procesa, prostorije u kojoj se obavlja modeliranje, te laserske jedinice. Laseri korišteni u stereolitografiji emitiraju valnu duljinu u ultraljubičastom spektru. Najčešće se koriste laseri na bazi kristala, a neki od njih su Nd:YAG, Nd:YVO₄, Nd:YLF. Valne duljine ovih lasera kreću se od 355 nm za YAG i YVO₄, 351 nm i 349 nm za YLF lasere.

Računalom se učitava CAD model te se kreiraju slojevi. Najčešća debljina sloja je oko 0,1 mm, no može varirati od 0,05 mm do 0,15 mm. Kontrolno računalo zatim pomoću laserske jedinice i hardvera pisača kreira potporni sloj. U središtu uređaja je jedinica, odnosno prostorija u kojoj se odvija čitav proces. Polimerna tekućina se ovim postupkom prelijeva na potpornu konstrukciju u tankom sloju. Uslijed ultraljubičastog zračenja, na osvijetljenim mjestima polimerna tekućina prelazi u krutu tvar. Nakon što je dovršen cijeli sloj, praznine se nadopunjuju potpornim materijalom, nastali sloj se po vertikalnoj osi pisača

spušta, te se na njega nanosi idući sloj. Taj se postupak nastavlja sve dok se ne ispiše i posljednji sloj objekta. Uslijed adhezivnih svojstava materijala, slojevi se istog trenutka spajaju, te na posljetku tvore gotovi trodimenzionalni objekt. [1][6][20]

Na slici (Slika 3.) je shematski prikazan jedan od uređaja za stereolitografiju.



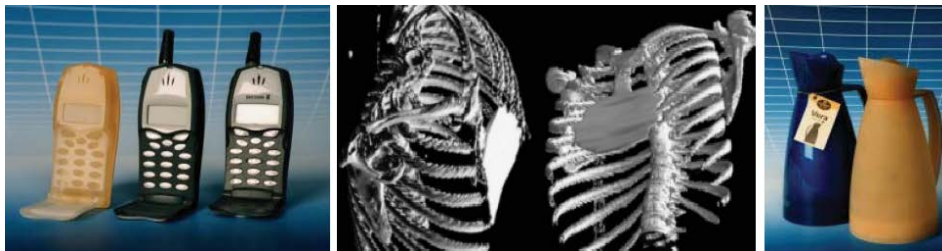
Slika 4. Shematski prikaz stereolitografije [11]

Kako je prikazano na slici, laserska zraka se navodi pomoću sustava zakretnih zrcala u X-Y ravnini. Na osvjetljenim mjestima, događa se fotokemijska reakcija polimerizacije, odnosno površina fotopolimera koja je osvjetljena UV zrakom, polimerizira i prelazi iz tekućeg u kruto stanje. Nakon polimerizacije prvog sloja, pokretni stol vrši pomak po Z-osi kako bi otpočelo kreiranje idućeg sloja. Prije sljedećeg sloja, površina se poravnava pomoću posebno oštrog noža. Ovakav postupak se ponavlja sve dok se ne ispiše i završni sloj objekta [11].

Prednost stereolitografije je u glatkoj površini koju tvori, stabilnom procesu koji je u potpunosti automatiziran, te se ne može prekinuti bez nadzora. Stereolitografija ima dosta veliku rezoluciju te može reproducirati kvalitetne i precizne prototipove sa kompleksnim detaljima. Nedostatak je međutim što fotopolimerna smola s vremenom apsorbira vodu, što može rezultirati izvijanjem modela, osobito na tanjim dijelovima. Materijali pogodni za ovu tehnologiju iako mogu biti različitih boja, moraju biti fotoosjetljivi, što ograničava sam izbor. Između ostalog, fotoosjetljivi materijali nisu pogodni za toplinska ispitivanja, te testove trajnosti. Pojedini dijelovi unutar modela mogu biti nakon ispisa posljednjeg sloja

još uvijek mekani, što zahtjeva završnu obradu u ultraljubičastoj komori. Ovom tehnologijom moguće je kreirati modele velikih dimenzija, no glavni nedostatak ove tehnologije je veliki trošak, budući laseri koji se koriste imaju relativno visoku cijenu.

Stereolitografija je pogodna za korištenje u industrijama gdje su potrebni modeli za testiranje oblika i pozicioniranje, za izradu kalupa, brzu izradu alata, no svoju primjenu je našla i u medicini, točnije u proizvodnji ortopedskih implantata. [1]

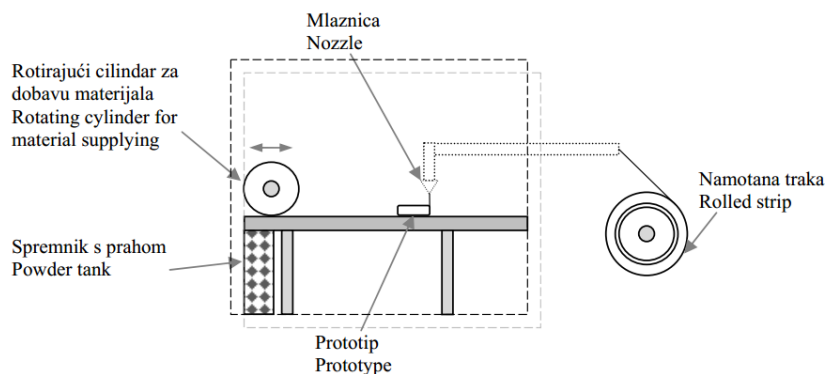


Slika 5. Neke od primjena stereolitografije [1]

2.4.2. Modeliranje topljenim depozitima (FDM)

Tehnologija modeliranja topljenim depozitima, koristi još i naziv modeliranje odlaganjem taline. Razvijena je i patentirana početkom 1990-ih godina. Razvila ju je i patentirala tvrtka *Stratasys*. Početna svrha bila je izrada konceptnog dizajna, no s vremenom se počela koristiti i za izradu ljevačkih jezgri i dijelova za direktnu upotrebu. U zadnjih 20 godina znatno se povećao udio ove tehnologije u tržištu. Tehnologija se zasniva na izradi modela pomoću čvrstih materijala na principu ekstruzije kroz mlaznicu. Iz mlaznice se ekstrudira rastaljeni materijal, dok se podloga kontrolirano giba u smjerovima sve tri osi. [11]

FDM tehnologija počinje softverskim procesom, odnosno konverzijom CAD datoteke u STL datoteku i daljnjim procesiranjem STL datoteke. STL datoteka se matematički izrezuje te orijentira model za proces izrade. Velike površine se najčešće stavljaju u horizontalnu ravninu, što povećava stabilnost, a smanjuje utrošak materijala potporne konstrukcije. Datotekom se manipulira pomoću posebnog programskog paketa specijaliziran za određeni FDM uređaj. Uređaj nudi nekoliko opcija ispune modela: šuplji model, ispunjeni model i mrežnu vezu između stijenci modela. Model se sječe po z-osi i ukoliko je potrebno, radni dodatne stabilnosti, dodaju se potporne konstrukcije. Potporne konstrukcije se na kraju procesa izrade prototipa odstranjuju. Postoje dvije vrste potpornih konstrukcija: lomljive i topive u vodi. Lomljive konstrukcije su najčešće kod većih modela kod kojih je manja vjerojatnost uništavanja trganjem potpore. S druge strane, topive konstrukcije se koriste za potporu sitnijih dijelova koji su teško dostupni, što ujedno olakšava proces čišćenja. Nakon importiranja STL datoteke, podešava se temperatura zagrijavanja depozita, materijala potporne konstrukcije i radnog prostora. Uređaj koristi dvije vrste materijala, jedan za izradu modela, a drugi za izradu potporne konstrukcije. Taljenjem materijal prolazi kroz mlaznicu koja se kreće horizontalno i vertikalno po putanji izlivanja koja je definirana CAD datotekom. Model se izrađuje sloj po sloj, od dna prema vrhu. Kako bi se postigla što kvalitetnija površina, bitno je izbjeći kontakt sitnijih detalja modela i potporne konstrukcije. Na slici predstavljen je shematski prikaz modeliranja topljenim depozitom. [5]



Slika 6. Shematski prikaz FDM uređaja [11]

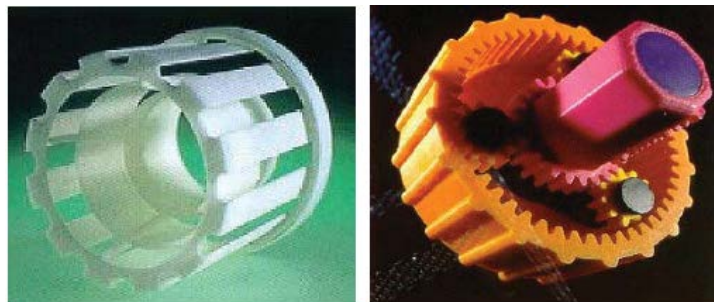
Plastično vlakno konstantno prolazi kroz mlaznicu malog promjera kao što je prikazano na slici. Mlaznica je zagrijana na određenu temperaturu, te tako tali dobavljeni materijal i nanosi ga sloj po sloj tvoreći trodimenzionalni objekt. Materijal za izradu modela mora imati visoku toplinsku vodljivost kako bi se mogao zagrijati na temperaturu iznad tališta. Tijekom procesa nanošenja, mlaznica ravnomjerno istiskuje materijal krećući se u X-Y ravnini. Nakon što je otisnut jedan sloj, radna površina vrši pomak po Z-osi za debljinu sloja, te započinje nanošenje idućeg sloja. Taj postupak se ponavlja dok se ne otisne finalni sloj objekta. Materijal ekstrudiran kroz mlaznicu prati put glave mlaznice i sljepljuje unaprijed zadane slojeve. U jednom ciklusu može se izrađivati više objekata, ukoliko ih se postavi na različite pozicije, no to povećava vrijeme trajanja ispisa. Kako bi se dobile različite širine položenog depozita mogu se mijenjati mlaznice. Najčešće se za polaganje materijala koriste mlaznice otvora 0,3 mm i 0,6 mm. Za polaganje potpornog materijala najčešće se koriste mlaznice otvora od 0,5 do 3,8 mm. Prema tome, širina nanesenog sloja varira u ovisnosti o širini otvora mlaznice.

FDM uređaji koriste kao materijal termoplastiku poboljšanih mehaničkih svojstava, što omogućava izradu funkcionalnih dijelova materijalima istog ili sličnog sastava u svrhu testiranja i daljnjih ispitivanja. Pri tome se može istaknuti ABS plastika koja postiže gotovo identičnu čvrstoću u odnosu na gotovi proizvod istog materijala. ABS (akril-nitril-butadien) je materijal dobre abrazivne i kemijske otpornosti, te dobre čvrstoće, što su svakako poželjne karakteristike kod izrade prototipova. Osim ABS-a u upotrebi je i PC (polikarbonat), kojeg od-

likuju dobre mehaničke i dobra otpornost na kemikalije. Pri izradi modela u automobilske i zrakoplovnoj industriji se koriste ULTEM-9085, te PPSF/PPSU (polifenil sulfon). Modeli izrađeni od termoplastike mogu podnijeti temperature i do 190 °C, te su otporni na neke agresivne kemikalije. Osim materijala u standardnoj ponudi, vrše se istraživanja koja bi trebala uvesti nove materijale poput keramike i metala.

Ovom metodom se postiže točnost koja ne zahtjeva dodatnu obradu, no zbog hrapavosti površine poželjna je dodatna obrada glodanjem, tokarenjem, brušenjem i slično. Prednost ove tehnologije je manja potrošnja energije koja proizlazi iz činjenica da ne koristi laserski snop, nema posebnih zahtjeva za ventilacijom i hlađenjem, a troškovi održavanja su niski, što znači da je kupnja uređaja relativno mala investicija. Oblici su postojani, rasipanje materijala je zanemarivo, a dodatni plus čini mogućnost izrade više modela u jednom ciklusu. Unatoč prednostima, funkcionalnost prototipova je donekle ograničena uslijed ograničenog broja i cijene primjenjivih materijala. Ukoliko je prototip postavljen u smjeru okomitom na smjer izrade, niža mu je čvrstoća. [5]

Najčešća primjena ove tehnologije je kod konceptualnog dizajna, pri čemu olakšava vizualizaciju, ali koristi se još u investicijskom lijevanju, u medicini odnosno kirurškoj rekonstrukciji, te u mnogim drugim granama industrije. [1]



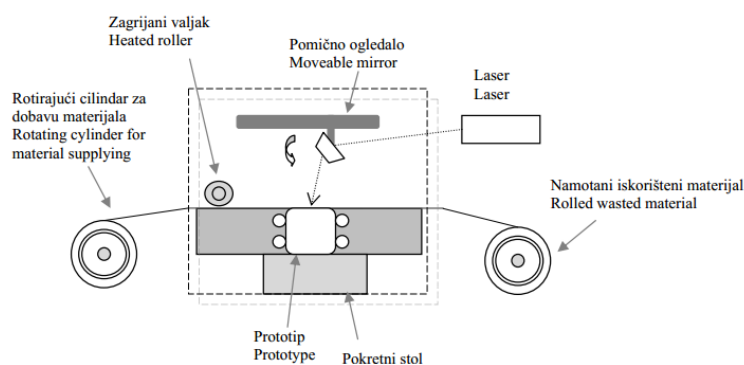
Slika 7. Funkcionalni modeli izrađeni FDM tehnologijom [1]

2.4.3. Laminirana objektna proizvodnja (LOM)

Izrada prototipa laminiranjem (engl. Laminated Object Manufacturing - LOM), razvijena od strane tvrtke *Helisys*, jedna je od najbržih metoda izrade modela srednjih i većih dimenzija. Brzina izrade modela ovom tehnikom je 5-10 puta brža nego kod korištenja drugih metoda. [13]

Hibridni je proces odvajanja i dodavanja materijala građenjem ploha po Z-osi, koje se režu u oblik poprečnih presjeka prema konturama modela u X-Y ravnini. Pogodna je za brzu izradu punih modela.

Slojevi razastrtih materijala obloženih ljepljivom se spajaju u oblik prototipa. Materijal koji ova metoda koristi može biti papirnata, polimerna i kompozitna folija namotana na valjak. Uz pomoć valjka se materijal dovodi na radnu površinu. Čvrsto povezivanje slojeva omogućava folija s donje strane koja ima disperzivno vezivno sredstvo. Kod papirnog materijala na valjak se nanosi vezivno sredstvo odnosno ljepljivo. Nakon svakog izrezanog sloja, zagrijani valjak prolazi po površini modela. Tim se procesom aktivira vezivno sredstvo odnosno povezuje se izrezani sloj s modelom. Na slici je shematski prikaz laminirane objektno proizvodnje.



Slika 8. Shematski prikaz laminirane objektno proizvodnje (LOM) [11]

Uređaj koji radi na principu laminirane objektno proizvodnje posjeduje sustav upravljivih pomičnih ogledala, preko kojih laserska zraka izrezuje konturu objekta od posebne vrste folije namotane na valjak. Laser mogu zamijeniti oštri noževi za rezanje. Nakon izrezivanja, poprečno se šrafiraju suvišni odjeljci. Poprečno šrafitiranje lomi suvišne materijale, što ih čini lakšima za odstranjivanje u post-procesiranju. Nakon prelaska zagrijanog valjka preko folije, platforma na

kojoj se tiska model se spušta za debljinu nastalog sloja modela i cjelokupni postupak se ponavlja. Nakon što se otisne i zadnji sloj, kako bi se model zaštitio od vlage i drugih štetnih utjecaja aplicira se impregnacijsko zaštitno sredstvo. Nakon nanošenja impregnacijskog sredstva papir je zaštićen od vlage, te zadovoljava funkciju verifikacije koncepta. [11]

Tehnologija laminirane objektne proizvodnje omogućava izradu modela različite mase, dok debljina ovisi o vrsti korištene folije. O vrsti folije, ovisi i hrpavost površine. Ova tehnologija se primjenjuje pri izradi funkcionalnih modela visoke čvrstoće, koji su otporni na agresivne medije i visoke temperature. Pogodna je kod verifikacije oblika i sukladnosti dijelova u sklopu, kod modela koji ne posjeduju sitne detalje. [1]

Područje primjene laminirane objektne proizvodnje kreće se od izrade kalupa za lijevanje do automobilske industrije. Prednosti ove tehnologije su mnogobrojne, od jednostavne izrade, cijene uređaja i materijala do jednostavnog održavanja. Dodatna prednost je i što nema potrebe za potpornom konstrukcijom. Nedostatom se smatra mali izbor materijala, te velika količina otpada i ograničena primjena. Laminirana objektna proizvodnja sve se češće koristi, osobito zbog niske cijene i velike tolerancije na pogreške unutar STL datoteke, unatoč nižoj točnosti u izradi geometrije u smjeru Z-osi.

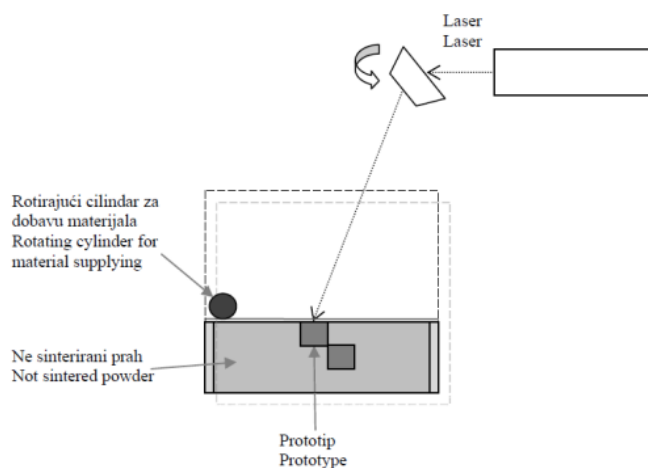


Slika 9. Primjeri primjene LOM tehnologije [1]

2.4.4. Selektivno lasersko sinteriranje (SLS)

Metoda selektivnog laserskog sintetiranja - *Selective Laser Sintering (SLS)* razvijena je 1987. na tekstaškom sveučilištu. Postupak je komercijalizirala tvrtka *DTM*, koju kasnije preuzima tvrtka *3D Systems*. Prva komercijalna verzija sistema selektivnog laserskog sintetiranja tržištu je predstavljena 1992. godine. Trenutno se koristi nekoliko sistema, među kojima su najpoznatiji EOS i 3D Systems. Metoda spada pod aditivne procese izrade trodimenzionalnog modela. [7]

Tehnika je bazirana na selektivnom sjedinjenju praškastih materijala u čvrsti oblik, pod utjecajem laserskog zračenja. Laserska zraka CO2 lasera usmjerava se na materijal, koji uslijed izloženosti visokoj temperaturi sinterira. Pod utjecajem visoke temperature, povećava se adhezija između čestica praha, te se na taj način prah grupira u veću krutinu točno određenog oblika. Suvišni prah u svakom sloju pomaže pridržavanju elementa tijekom procesa izrade. Proces na bazi SLS tehnologije se također odvija u slojevima, koji mogu biti tanki i do nekoliko tisućinki milimetara. [10] [11]



Slika 10. Shematski prikaz SLS tehnologije [11]

SLS metoda započinje konverzijom 3D CAD modela u standardni STL format, što je slučaj i kod ostalih metoda brze izrade prototipova. U STL datoteci se mogu mijenjati dimenzije, te orijentacija 3D modela, o čemu ovise kvaliteta i točnost oblika. Nakon konverzije, STL datoteka se dijeli u slojeve. Prah materijala se doprema pomoću rotirajućeg cilindra u komoru za modeliranje. Prilikom

dovođenja materijala, može se dozirati stupanj rastapanja čestica, te se tako mogu dobiti homogene strukture manje poroznosti. Na temelju konture poprečnog presjeka CAD modela, solidificira se pomoću laserske zrake sloj po sloj, pri čemu se nakon skrutnjavanja jednog sloja nanosi novi sloj mikronskog materijala. Nakon solidifikacije jednog sloja, spremnik materijala se pomiče za debljinu nastalog sloja prema dolje, ili se pak laser za istu tu debljinu podiže prema gore. Pomoću valjka se nanosi novi sloj praška, te se ponavlja tretiranje laserom. Ponavljanjem ovog procesa se sloj po sloj aditivno kreira trodimenzionalni model. U uređaju baziranom na SLS metodi, postoje dva spremnika s prašinom koji se sinkronizirano gibaju. Spremnik s prašinom se podiže za isti iznos za koji se spremnik s modelom spušta. Višak praha koji nastaje tijekom kreiranja modela, se usisava u posebne spremnike, reciklira se i ponovno koristi. Zaostali prah na izgrađenom modelu se odstranjuje u komori za ispuhivanje. Većina modela, ovisno o materijalu su nakon ovih procesa odmah spremni za upotrebu, nakon minimalne obrade i čišćenja. Pojedini materijali, npr. metal, zahtijevaju dodatnu termičku obradu u posebnoj peći za stvrdnjavanje i infiltraciju metalnih čestica. Za razliku od drugih metoda brze izrade prototipova, ova metoda ne zahtijeva izradu potpornih konstrukcija, jer prah koji nije solidificiran čini potporu modelu. [5][11]

SLS tehnologija koristi nekoliko vrsta materijala grupiranih u tri modula:

- Ljevački modul
- Modul funkcionalnih prototipova
- Brza izrada alata

Ljevački modul primjenjuje se u industriji lijevanja i koristi materijale komercijalno nazvane: *TrueForm*, *CastForm* i *SandForm ZR II & Si*, *Croning Sands*. *TrueForm* materijal je u osnovi akril-stiren polimer, pri čijem izgaranju zaostaje 1% pepela, a točnost mu je visoka. Može izrađivati stijenke od 0,12 do 0,5 mm. *CastForm* je zapravo nasljednik *TrueForma* sa poboljšanim svojstvima pogodnim za investicijsko lijevanje. *SandForm ZR II & Si* je cirkon-silicijev ljevački pijesak koji se koristi za izradu jezgri i kalupa do točnosti 0,5 mm. Pogodan je za proizvodnju jezgre kompleksnih oblika, te za lijevanje željeza i aluminija.

Model funkcionalnih prototipova namijenjen je finalnim proizvodima, konceptualnim modelima te sekundarnim uzorcima alata. Najčešće korišteni materijali su pod komercijalnim nazivom *DuraForm*, *Nylon*, *FineNylon*, *415-GF*, *TPE 210-S* i *Somos 201*. *DuraForm* je poliamid kojeg odlikuju dobra mehanička i termička svojstva, te otpornost na kemikalije. Točnost oblika je 0,25 mm. *Nylon*, *FineNylon* i *415-GF* su najloni solidne čvrstoće idealni za izradu funkcionalnih prototipova, točnosti oblika 0,25 mm. *Somos 201* je termoplastični elastomer, sličnih svojstava kao i guma, pogodan za izradu modela kojima su potrebna elastična svojstva. Točnost dimenzija je 0,25 mm, a elongacija je preko 100%. *TPE 210-S* je termoplastični elastomer pogodan za izradu fleksibilnih dijelova, koji se dodatno može učvrstiti tekućom smolom. Može služiti kao imitacija mekane gume ili kože.

Pri brznoj izradi alata najčešće se koriste materijali *LaserForm A6*, *Copper Polyamid*, *DuraForm TiA16V4*, *SteinlessSteel* i *GP1*. *LaserForm A6* je polimer pomiješan prahom ugljičnog čelika, čija se poroznost umanjuje infiltracijom bronce. [5]

Mehanička svojstva modela nastalog SLS metodom su bolja od svojstava modela nastalog stereolitografijom, te se mogu koristiti za razna funkcionalna ispitivanja, a postupak je daleko brži. Moguća je primjena većeg broja materijala. Veliku prednost čini višak praha, koji se može iskoristiti za sljedeći prototip. Ovom metodom se mogu izraditi modeli vrlo tankih stijenki.

Mana ove metode je loša kvaliteta u odnosu na neke druge metode, te pojava otrovnih plinova koji mogu nastati tijekom sraščivanja, što zahtjeva odgovarajuću zaštitnu atmosferu. Dodatni uređaji periferni uređaji za čišćenje zahtijevaju dodatni prostor, što ne ide u prilog ovoj metodi čiji uređaj već zauzima veliku radnu površinu. Uređaji za stvrdnjavanje i infiltraciju metalnih čestica zahtijevaju dodatno sigurnosno skladištenje radnih plinova. Cijena ovakvih uređaja je još uvijek dosta visoka, no očekuje se pad cijene uslijed isticanja patentnih prava izumitelja. [1]

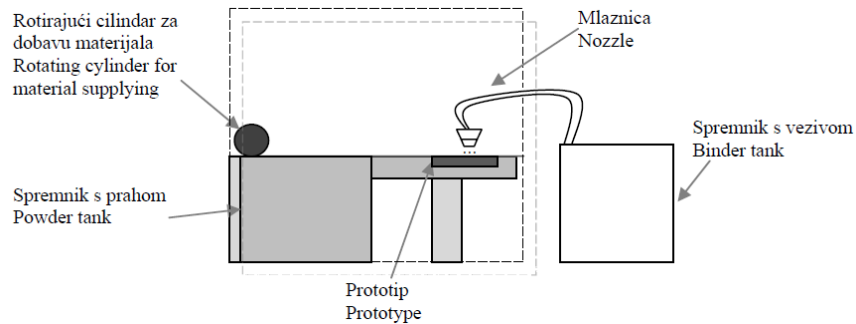


Slika 11. Modeli nastali primjenom SLS tehnologije [1]

2.4.5. 3D tisak

Prvi 3D printer razvijen je i licenciran na MIT-u. Među prvim kompanijama koje su dobile licence su kompanije *Soligen Corporation*, *Extrude Home*, *ZCorporation* i drugi. Metoda 3D-tiskanja, kao i ostale metode brze izrade prototipova, izrađuje trodimenzionalne prototipove na brz i dostupan način, neposredno iz računalnih podataka. Temelji se na tehnologiji *ink-jet* printera. Brža je i znatno jeftinija od ostalih metoda. Budući da je jednostavna, ne zahtjeva posebno obučene operatere. Omogućava bržu komunikaciju te lakšu vizualizaciju različitih dizajnerskih rješenja i koncepata. Rezultati su vidljivi u kraćem vremenu proizvodnog procesa. [8][11]

Postupak 3D-tiska baziran je na *ink-jet* mlaznicama, pomoću kojih se nanosi tekuće vezivo na praškasti polimerni materijal kojeg povezuje. Pomoću CAD programa, STL datoteka se eksportira, te se izrezuje na stotine digitalnih poprečnih presjeka modela debljine od 0,076 do 0,254 mm. Debljina sloja odabire se ovisno o željenoj preciznosti. Ciklus izrade trodimenzionalnog objekta započinje zagrijavanjem komore, nakon čega slijedi ispunjavanje slojem polimernog praha debljine 3,18 mm. Model se izrađuje na tom sloju, što mu na poslijetku omogućava lakše vađenje iz komore u kojoj nastaje model. Pomoću klizača uzduž komore, nanosi se novi sloj debljine oko 0,1 mm. Nakon toga slijedi nanos veziva, i boje ukoliko se radi u pisaču u boji. Klizač se kreće po X-Y ravnini, dok se radna površina spušta za visinu sloja po Z-osi.



Slika 12. Shematski prikaz 3D tiska [11]

Kako je shematski prikazano na slici (Slika 11.), sloj po sloj se postepeno izrađuje trodimenzionalni model. Prvi sloj praha očvrstnut je vezivom po obliku prvog sloja iz STL datoteke modela. Ciklus se ponavlja do završetka izgradnje modela, odnosno dok se ne otisne i posljednji sloj modela. Orijentacija modela bitno utječe na geometriju i kvalitetu otiska. Osjetljivi detalji postavljaju se u vertikalni položaj. Ukoliko se model sastoji od tanjih stijenki, debljina sloja mora se smanjiti na 0,089 mm. Kako bi se stijenke ojačale, podešava se i vrijednost zasićenja praha, što povećava vrijeme sušenja. Višak praha, se nakon izrade objekta, propuhuje komprimiranim zrakom u zasebnoj komori. Nakon čišćenja modela, infiltrira se epoksi ljepilo, najčešće cijanoakrilat ili uretan, što povećava čvrstoću. Modeli se naknadno mogu bojati te obrađivati pjeskarenjem i metaliziranjem. [5][11]

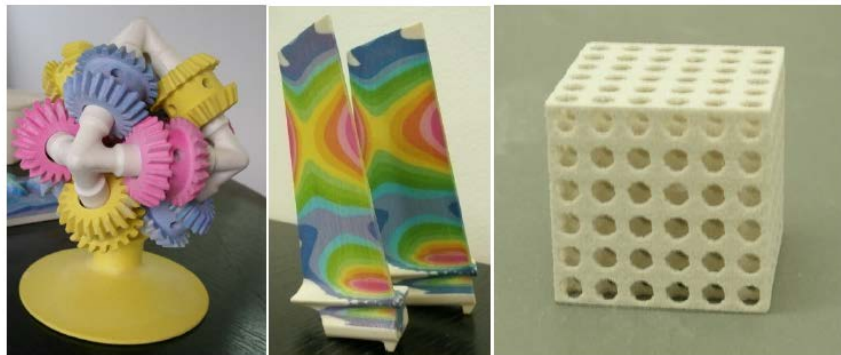
Tehnologiju 3D ispisa možemo razlučiti na dva pristupa:

- Pristup solidifikacije prašine pomoću ljepila
- Pristup vezivanja materijala na bazi smole UV zračenjem

Grupa uređaja koja se temelji na prvom pristupu koristi prašinu iz gipsa, plastike i sličnih materijala. Ljepilo poput tonera prolazi kroz sapnice *ink-jet* glave za pisanje i veže prašinu. Neki uređaju *Z-Corp* kompanije koriste HP-ove *ink-jet* tonere, pri čemu umjesto tinte tonerom teče ljepilo. Kod *Z-Corp* uređaja osnovni materijal je na bazi gipsa. Otisnuti modeli su krhki, te ih je potrebno dodatnom obradom očvrstnuti. *Z-Corp* kompanija je razvila inačicu osnovnog materijala i tehnologiju *Z-Cast*, pri čemu se direktno dobiva kalup za lijevanje metala. Princip nanošenja novog sloja prašine je isti kao kod laserskog sintetiranja. Uz printer postoji i stanica za otprašivanje uzoraka i reciklažu praha koji nije očvrstnuo.

Druga tehnologija pod nazivom *PolyJet*, također je bazirana na ink-jet tehnologiji. Kao toner ne koristi ljepilo, već se osnovni materijal odlaže, a ultraljubičasto svjetlo veže materijal na bazi epoksi smole. Nevezani prah predstavlja potporu modelu. Osim potpore nastale od zaostalog praha, nanosi se i druga komponenta, koja se kasnije stlačenom vodom otapa i ispire. Dodatna potporna komponenta povećava cijenu ovoj tehnologiji. Problem kod ove metode stvaraju tanke stjenke koje se pod mlazom vode mogu oštetiti. Osnovni materijal se izrađuje od nekoliko varijanti, te može biti različite čvrstoće, elastičnosti i boje. [3]

Metoda 3D tiska koristi se najčešće za verifikaciju oblika, izradu kalupa i jezgri za lijevanje, izradu alata i elastičnih dijelova. Odlikuje ju točnost i kvaliteta, a može izraditi modele srednjih do velikih dimenzija, a materijali koje koristi nisu štetni za zdravlje. Nema gubitka materijala kod izrade potporne konstrukcije. Brzina izrade ovisi o traženoj kvaliteti, odnosno, debljini sloja. Većina uređaja radi brzinom od nekoliko slojeva u minuti. Brži odabir ispisa kao rezultat daje lošiju kvalitetu. Ograničen je broj primjenjivih materijala, a objekt ima slabije mehaničke karakteristike.[1][3]



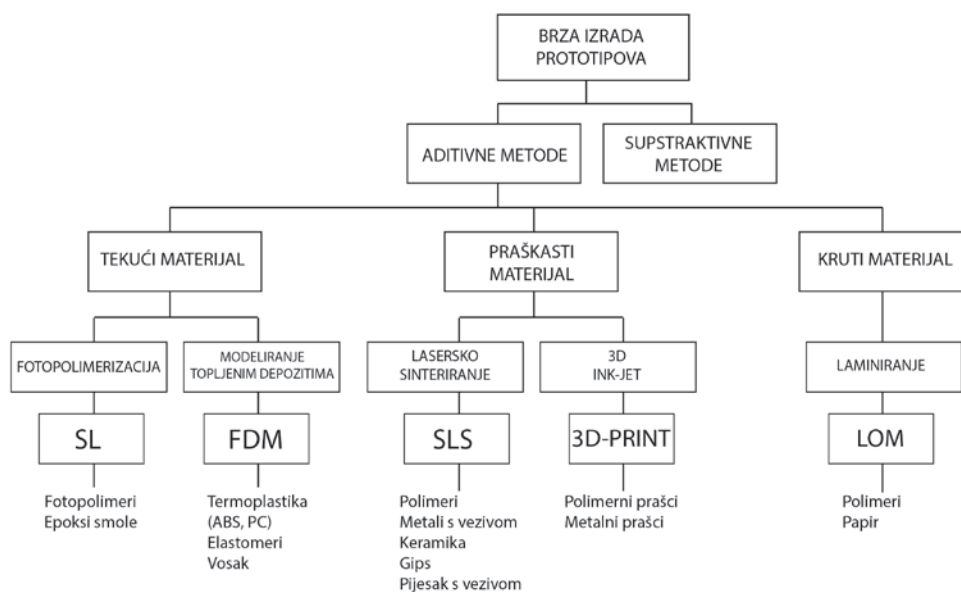
Slika 13. Modeli nastali Z-corp metodom [3]



Slika 14. Modeli nastali Z-cast metodom [3]

2.5. Materijali

Postoji veliki broj dostupnih uređaja za brzu izradu prototipova, sa različitim prednostima, nedostacima i značajkama. Svaki od njih ovisno o principu rada koristi određeni materijal kojim kreira trodimenzionalni model. Ovisno o tehnici, dostupan je veliki broj materijala. Izbor materijala ovisi o namjeni budućeg modela, odnosno o željenim kemijskim, fizikalnim i drugim osobinama. Razlikujemo krute, tekuće i praškaste materijale. Trenutno najpoznatiji i najkorišteniji materijali u brznoj izradi prototipova su plastični materijali.



Slika 15. Podjela materijala korištenih u tehnologiji 3D tiska

Izvor: Vlastiti rad autora

SLS tehnologija koristi plastične materijale, koji zbog procesa nastanka trodimenzionalnog modela mogu biti na nekim dijelovima porozni. Budući da se laserom sintetiraju slojevi praha, često ostaje praznog prostora između čestica praha. FDM tehnologija koristi termoplastične materijale kao što je ABS i njemu slični. Takvi materijali tvore zrnastu strukturu zbog ekstrudiranja slojeva kroz mlaznice. Fizikalna svojstva poput vlačne sile i istezanja nešto su slabija nego kod objekata proizvedenih drugim postupcima. Stereolitografija koristi materijale na bazi fotopolimera, no dostupni su također i drugi plastični materijali. Tekući

fotopolimeri u principu ne spadaju pod termoplastične materijale. Kemijska svojstva tekućih fotopolimera se poboljšavaju brzim tempom. Danas su dostupni fotopolimeri koji imitiraju svojstva polipropilena, ABS-a, polietilena i drugih sličnih materijala, a koriste se specijalizirano u medicinske svrhe. Ink-jet 3D tehnologija tiska također koristi plastične materijale. *MultiJet Modeling* (MJM) nudi mekane termoplastične materijale, dok druge ink-jet tehnologije nude poliestere ili materijale bazirane na vosku. [1]

2.5.1. Plastični materijali

Najčešće korišteni plastični materijali su: ABS, PLA, Nylon, PC, PVA itd. Plastični filamenti najčešće dolaze u standardnim veličinama, promjera 1,75 mm i 3 mm.

- PLA

Najpoznatiji plastični materijal u brzom izradi prototipova je *Polylactic Acid* – PLA. To je biorazgradivi plastični derivat. Temperatura taljenja je u rasponu od 180°C do 230°C. Tokom taljenja ne otpušta mirise niti toksične plinove štetne za zdravlje. Iz tog razloga ne zahtjeva poseban sustav ventilacije i posebne sigurnosne mjere. Dobro prianja za površinu platforme 3D printera, pa ne zahtjeva dodatno ulaganje u platformu koja se zagrijava. Prianjanje za podlogu omogućava posebni premaz.

Objekti izrađeni od PLA su robusni i relativno lomljivi, te nisu otporni na visoke temperature. Uobičajena cijena PLA materijala je oko 30\$ po kilogramu, te najčešće dolazi u rolama od 0,5 kg, 1 kg i 2,3 kg. Dostupan je u svojoj prirodnoj transparentno bijeloj boji, te u mnogim drugim bojama veće ili manje transparentnosti, te potpuno netransparentni. Postoji i posebna verzija PLA materijala, mekani odnosno fleksibilni PLA, koji se ekstrudira na nižim temperaturama, pri jako malim brzinama, a koristi se pri izradi fleksibilnih objekata. [2]

- ABS

Drugi najpoznatiji plastični materijal je Acrylonitrile Butadiene Styrene, poznatiji kao ABS. To je zapravo plastični materijal na bazi nafte, korišten u mnoge svrhe. Najpoznatija primjena ABS materijala je pri izradi LEGO kocki. Tokom taljenja ispušta neugodne mirise koji mogu biti štetni za zdravlje, te se preporuča primjena posebnih ventilacijskih sustava uslijed ispisa ovim materijalom. Temperatura taljenja ABS materijala je od 210°C do 260°C. Kako bi materijal prionuo na podlogu, potreban je sustav koji ju zagrijava. Kao premaz podloge koristi se „Kapton“ premaz. Premaz i sustav za zagrijavanje povećavaju troškove korištenja ovog materijala. Moguće je kreirati 3D model i bez zagrijavanja podloge, no u tom slučaju potrebno je nanijeti sloj posebnog ljepila na bazi vode.

Objekti od ABS materijala su manje robusni i manje osjetljivi i lomljivi, te otporni na visoke temperature. Materijali su dostupni u različitim bojama uključujući razne efekte, fluorescentne i termo boje. [2]

- NYLON

Nylon ima veoma zanimljive karakteristike kao što su savitljivost, mala težina, te otpornost na kemikalije. Ekstrudira se na višim temperaturama, najčešće na temperaturi oko 245°C. Unatoč visokoj temperaturi, nema štetnih isparavanja, te dobro prijanja na podlogu. Koristi se pri izradi modela kojima je potrebna visoka otpornosti na lomljenje, te mala površinska napetost. Cijena nylona je puno veća od cijene ostalih navedenih plastičnih materijala. Dostupan je jedino u prirodnoj bijeloj boji, a pogodan je za primjenu u medicini i protetici. [2]

- PC

Polikarbonat – PC je veoma čvrst i dugotrajan materijal, visoke optičke čistoće. Temperatura taljenja je u rasponu od 270°C do 300°C. Testiranje polikarbonata kao materijala pogodnog za upotrebu u tehnologiji 3D tiska započelo je tek 2012. godine, te postoji tek nekoliko proizvođača koji ga nude, po cijeni od oko 90\$ po kilogramu. [2]

- PVA

Polivinil Alkohol – PVA je plastični polimer topiv u vodi, te se najčešće koristi za izradu potpornih konstrukcija za modele od PLA i ABS materijala. Lako se otplanja u vrućoj vodi, ostavljajući savršenu površinu. Temperatura taljenja je najčešće oko 170°C. Cijena mu je također visoka, oko 90\$ po kilogramu. [2]

2.5.2. Prah

Prah je osnovni materijal pri ispisu 3D objekata na *ink-jet* pisačima. Kemijska reakcija praha i veziva omogućava stvrdnjavanje i ispis trodimenzionalnog objekta. Praškasti materijali koji se koriste u tehnologiji trodimenzionalnog tiska su netoksični i sigurni, te ne zahtijevaju specijaliziranu radnu okolinu.

Kompozitni materijal visokih performansi gradi visokokvalitetne čvrste dijelove. Dobra rezolucija na sitnim detaljima i izuzetna snaga čine praškaste materijale prikladnim za mnoge primjene od modeliranja koncepata do uzoraka lijevanja pijeska. Najčešće se praškasti materijal sastoji od gipsa sa brojnim dodacima koji poboljšavaju vizualne i mehaničke osobine modela.

Postoji i praškasti metalni materijal koji kreira modele lijevane pijeskom za ne-željezne metale. Materijal čini mješavina ljevarkarskog pijeska, gipsa i drugih dodataka. Ovaj materijal gradi dijelove koji se uranjaju u vosak te tako dobivaju uzorci bez kalupa i geometrijskih ograničenja. [9]

2.5.3. Ostali materijali

Iako je izbor plastičnih materijala u tehnologiji brze izrade prototipova vrlo čest, osobito zbog dostupnosti materijala, postoje razna ograničenja. Najčešće su ograničenja povezana sa fizikalnim i kemijskim svojstvima, izdržljivosti modela itd. Od ostalih materijala u brzom izradi prototipova koristi se i metal. Komercijalno dostupni metalni materijali nisu pogodni za izravnu proizvodnju me-

talnih prototipova. Metal se u tehnologiji brze izrade prototipova najčešće koristi kod izrade različitih alata i kalupa.

Dostupni materijal za brzu izradu prototipova je također i keramika, no dostupna je za korištenje tek kod nekoliko komercijalnih dobavljača u sveučilišnim laboratorijima.

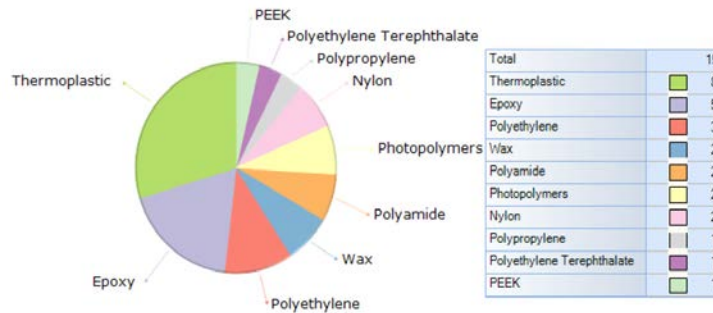
Papir je materijal koji povezujemo sa metodom kreiranja trodimenzionalnog objekta laminiranjem. Nekoliko tvrtki razvilo je sisteme koji proizvode modele od papira. Prednost ovog materijala je cijena i dostupnost, no veliku prepreku pri korištenju ovog materijala predstavlja njegova stabilnost. Od ostalih materijala dostupan je i gips, koji je također veoma jeftin, no zahtjeva dodatne procese infiltriranja kako bi mu se povećala otpornost. [1]

2.5.4. Infiltranti (premazi)

Nakon ispisa trodimenzionalnog objekta, pojedini modeli, ovisno o materijalu, mogu imati ograničene mehaničke osobine. Krhki su i porozni, te ih je potrebno premazati određenim materijalom kako bi im se poboljšala svojstva. Nakon infiltracije, mehanička svojstva modela u manjoj mjeri ovise o svojstvima materijala, te uglavnom ovise o svojstvima premaza.

Premazi se mogu nanositi nalijevanjem, četkanjem, uranjanjem ili prskanjem. Neki od premaza koji se koriste su: cijanoakrilatna ljepila, epoksi smole, poliuretani, vosak itd. [9]

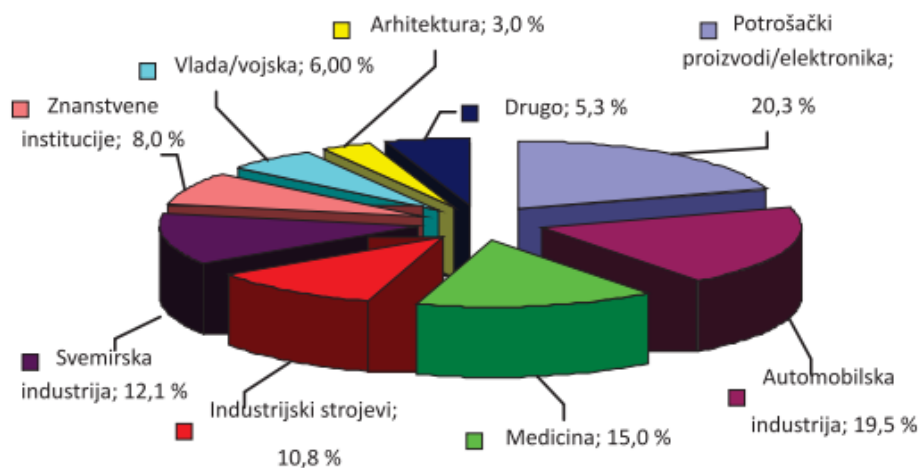
Materijali i tehnologije se razvijaju na takav način da omogućavaju i razvoj malih serija gotovih proizvoda. Proizvodnja malih serija idealno je rješenje za veći broj specifičnih potreba kod proizvoda namijenjenih manjem broju korisnika, pri čemu se dostiže visoka kvaliteta i unaprjeđuju proizvodi iako nisu namijenjeni velikim serijama. [1]



Slika 16. Najčešće korišteni materijali dostupni na tržištu [14]

2.6. Područja primjene brze izrade prototipova

Tehnologija trodimenzionalnog tiska uspješno se koristi u proizvodnji mnogih materijala i predmeta, te se primjenjuje u raznim granama industrije i istraživanja. Široku primjenu ima u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji, u industriji široke proizvodnje, vojnoj industriji, tekstilnoj industriji, arhitekturi, građevini, umjetnosti pa čak i u medicini. [4]



Slika 17. Područja primjene brze izrade prototipova [27]

- Medicina

Veoma važna primjena 3D tiska je na području medicine. Implementacija ove tehnologije u medicini je još u fazi razvoja i testiranja, no uspješno su proizvedeni dijelovi kosti, tkiva, te razna protetička pomagala. Prva primjer upotrebe

3D tiska u medicini je izrada modela čeljusti koji je implementiran u pacijenta. Korišteni materijal bio je titanij prekriven bio-keramikom. Već neko vrijeme tehnologija 3D tiska koristi se za izradu kostiju i njihovih dijelova. Također se proizvode implantati uha i drugih dijelova tijela. Znanstvenici rade na istraživanju tehnologije 3D tiska koja će moći proizvesti funkcionalne organe, no još uvijek je ova metoda daleko od primjene u praksi. Očekuje se veliki napredak i razvoj ove tehnologije u medicini, koja uslijed svoje brzine i točnosti predstavlja pravu revoluciju. [12][31]



Slika 18. Primjena 3D tiska u medicini i prostetici [4]

- Stomatologija

Tehnologija 3D tiska se koristi u stomatologiji. Uz pomoć oralnog skeniranja i izradom modela pomoću CAD softvera, mogu se brzo i točno proizvesti mostovi, krunice i ostala ortodonska pomagala. Standardizirani tijek rada omogućava bolju kvalitetu modela izbjegavanjem ljudskih pogrešaka, bilo da se radi samo o vizualizaciji modela, ili o potpuno funkcionalnom modelu. Materijali koji se koriste su prikladni za strojnu obradu [28]



Slika 19. Primjena 3D tiska u stomatologiji

Izvor: <http://www.javelin-tech.com/3d-printer/industry/dental/>

- Automobilska industrija

Već duže vrijeme vodeće automobilske kompanije koriste tehnologiju 3D tiska za izradu prototipova. Fokusirani su korištenju ove tehnologije u proizvodnji, ne samo u izradi prototipova, nego čak i nekih manjih dijelova. Tvrtka *KOR EcoLogic* predstavila je prvi automobil nastao pomoću tehnologije 3D ispisa. Nisu sve njegove komponente dobivene ovom tehnologijom, nego samo kostur hibridnog prototipa nazvanog *The Urbee (urban electric.)* Ovaj automobil je ekološki prihvatljiv i koristi obnovljive izvore energije. [4][14]



Slika 20. The Urbee - prototip automobila sa komponentama isprintanim 3D tehnologijom tiska [4]

Inženjeri tvrtke BMW korištenjem ove tehnologije, namjeravaju stvoriti ergonomske i jednostavnije verzije alata u svrhu povećanja produktivnosti radnika i olakšanja rada. Tehnologija 3D tiska buduću da olakšava vizualizaciju, može donijeti i velike promjene u marketingu. Tržištu bi se mogli predstaviti fizički modeli u prirodnoj veličini umjesto virtualnih modela. Slika govori tisuću riječi ali dodir čini neki objekt stvarnim. [4]

- Zrakoplovna industrija

Tehnologija 3D tiska nalazi svoju primjenu i u zrakoplovnoj industriji, zahvaljujući razvoju tehnologije i mogućnošću manipuliranja materijalima. Materijali kao što su metali, *nylon* te razni plastični materijali se mogu ojačati na molekularnoj razini što im omogućuje sigurno korištenje u ovoj industriji. U usporedbi sa klasičnim metodama, aditivnim metodama, u čiju skupinu spada i 3D tisak, dobivaju se do 65% lakši modeli koji su jednako izdržljivi i čvrsti kao modeli nas-

tali klasičnim metodama. Prednost ove tehnologije je također i u puno bržem proizvodnom ciklusu nego kod korištenja drugih metoda.

Osim u zrakoplovnoj, ova tehnologija se koristi i u ekstremnim okruženjima za razna istraživanja u svemiru. Razvijaju se sustavi koji bi direktno u svemirskim stanicama mogli proizvesti potrebne dijelove za zamjenu i različite popravke, što bi ovelike ubrzalo i olakšalo posao astronautima. [4]



Slika 21. Model zrakoplovnog krila proizveden metodom 3D tiska [4]

- Vojna industrija

Oprema koja se koristi u vojnoj industriji, kao i njezine komponente, mora biti čvrsta, otporna, dugotrajna te zamjenjiva kako bi se izbjegli veliki rizici. U budućnosti biti će moguće proizvesti potrebne zamjenske dijelove na licu mjesta, umjesto da se čeka isporuka istih. Osim u izradi zamjenskih dijelova, 3D tehnologija će omogućavati i brzi izradu topografskih modela, kako bi se vojnicima olakšala orijentacija i vizualizacija terena. [4]



Slika 22. Testiranje 3D tehnologije za upotrebu u svemiru [4]

- Ostala područja primjene

Osim u navedenim industrijama, 3D tehnologija tiska ima široku primjenu na raznolikim područjima, od arhitekture, građevine, arheologije, tekstilne industrije, izrade nakita, pa sve do osobne upotrebe. Kao i svaka tehnologija, tako i tehnologija 3D tiska nailazi na zloupotrebu. Prvobitna namjena ove tehnologije je da olakša i ubrza proizvodne procese, ali i da omogući kreiranje objekata za svakodnevnu upotrebu. Sa potrebnim znanjima, ova tehnologija se lako može zloupotrijebiti. Mogu se kreirati funkcionalna oružja, a zahvaljujući internetu, takve informacije se gotovo preko noći prošire cijelim svijetom, što ima jako negativan utjecaj na društvo. Kada se 2013. godine pojavio besplatni 3D CAD model pištolja, u suradnji sa državnim tijelima, ubrzo je uklonjen prije nego je dobio priliku postati jednim od modela sa najviše preuzimanja. Kako bi se spriječile ovakve

zlouporabe ove, a i drugih tehnologija, vrlo je bitno kontrolirati tko i u koje svrhe kupuje i koristi ove uređaje i materijale koji su sposobni proizvesti opasne prototipove. [16][22]



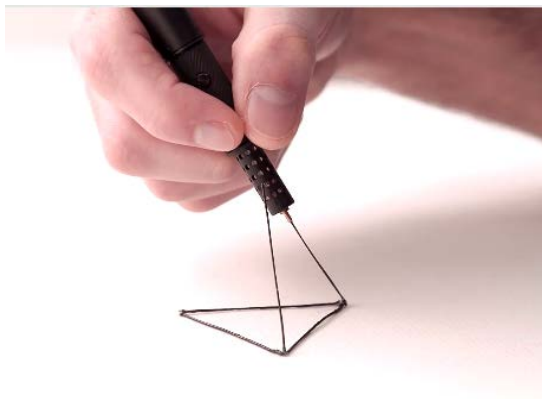
Slika 23. Primjeri primjene 3D tiska u ostalim područjima [27]

2.7. Budućnost brze izrade prototipova

Brza izrada prototipova u potpunosti mijenja način na koji tvrtke dizajniraju i proizvode svoje proizvode. Koristeći ovu tehnologiju drastično se smanjuje vrijeme izgradnje trodimenzionalnih modela i funkcionalnih prototipova. Uvođenje ne-polimernih materijala, uključujući metale, keramiku i kompozite, pogoduje očekivanom razvoju ove tehnologije. Ti materijali mogu imati svojstva koja mogu zadovoljiti potrebe gotove svake grane industrije. [31]

3D tehnologija tiska jako se brzo razvija, a stalno se pojavljuju nove tehnike i metode. U travnju 2014. godine jedna kineska tvrtka uspjela je pomoću 3D printera kreirati 10 kuća u 24 sata. Kuće koje gradi takav printer osim što im je kratko vrijeme građenja, imaju i relativno niske cijene oko 5000\$. Ekološki su prihvatljive, odnosno izgrađene većinom od recikliranih materijala. Zbog veličine uređaja za ispis (6,6 x 10 x 32 m), dijelovi kuće se izrađuju u tvornici, te transportiraju na gradilište i sastavljaju na brz i jednostavan način.

Jedan od tehnoloških noviteta je i *Lix* - prvi 3D printer u obliku olovke. Za ispis 3D modela nije potrebno unaprijed dizajnirati 3D model na računalu, niti poznavati CAD i ostale softvere. Kako bi se stvorio funkcionalan predmet, treba imati znanja o statici predmeta kao i znanja o crtanju. Namijenjen je dizajnerima, arhitektima, stilistima i srodnim zanimanjima. [17][26]



Slika 24. Lix - 3D printer olovka

Izvor:<http://lixpen.com/>



Slika 25. Modeli nastali pomoću Lix 3D printer olovke
Izvor: <http://lixpen.com/>

Konstantno se radi na razvoju i unapređenju ove tehnologije kako za komercijalnu, tako i za osobnu upotrebu. Trenutno SAD dominira na ovome polju, no Njemačka, Japan i Izrael su također dostojni konkurenti. Budućnost brze izrade prototipova je „Distance Manufacturing on Demand“ , što bi u slobodnom prijevodu značilo „proizvodnja na zahtjev na udaljenosti“, odnosno integracija brze izrade prototipova i interneta. Razvoj aditivne tehnike brze izrade prototipova usporedno otežava i usporava razvoj tradicionalnih subtraktivnih metoda. Velika računalna dostignuća na području tehnologije trodimenzionalnog tiska, implementirana u planiranje proizvodnje, numeričke kontrole i dinamiku strojeva, rezultiraju povećanjem brzine i točnosti same proizvodnje.

Tržište uređaja za brzu izradu prototipova i usluga vezanih uz 3D tisk u stalnom je porastu. Očekuje se porast potražnje za ovim uređajima, sve veća konkurencija u proizvodnji i poboljšanje same tehnologije, što će dovesti do pada cijena i povećanja dostupnosti ove tehnologije prosječnim potrošačima. Može se sa sigurnošću reći kako se pojavom tehnologije trodimenzionalnog tiska pojavila treća industrijska revolucija. S obzirom na rapidni razvoj ove tehnologije, pretpostavlja se da će u budućnosti upotreba 3D pisača postati sastavni dio gotovo svakog kućanstva.[15]

3. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada, ispitati će se i analizirati parametri koji utječu na kvalitetu prototipa nastalog tehnikom trodimenzionalnog tiska. Predstaviti će se korišteni uređaj, njegove karakteristike, princip rada i materijali, te softveri korišteni u svrhu eksperimentalnog rada. Namjera je bila, u istraživanju koristiti testne modele dostupne na službenim stranicama tvrtke koja je izradila uređaj korišten u istraživanju, no budući da format te datoteke nije pogodan za sve vrste testova koji namjeravaju biti provedeni, kreiran je novi model koji može u potpunosti ispuniti zahtjeve istraživanja. Testne datoteke korištene su isključivo za kalibraciju i instalaciju uređaja, te probni ispis, te neće biti korištene niti prikazane u daljnjem istraživanju.

3.1. Cilj i hipoteze istraživanja

Osnovni cilj ovoga diplomskog rada je istražiti tehnologiju 3D tiska i proučiti greške koje se javljaju pri korištenju iste. Istraživanje se temelji na pretpostavci da je potrebno zadovoljiti određene faktore da bi se mogućnost pogreške svela na minimum i postigla što bolja kvaliteta ispisa. Pretpostavke će biti izvedene na osnovu informacija iz korištene literature, te iz osobnog iskustva autora pri radu sa tehnologijom 3D tiska.

Ciljevi istraživanja:

- Istražiti tehnologiju 3D tiska i pojavu grešaka koje utječu na kvalitetu ispisa.
- Definirati parametre koji utječu na kvalitetu trodimenzionalnog ispisa.
- Spriječiti greške kako bi se dobila željena kvaliteta ispisa.

Hipoteze:

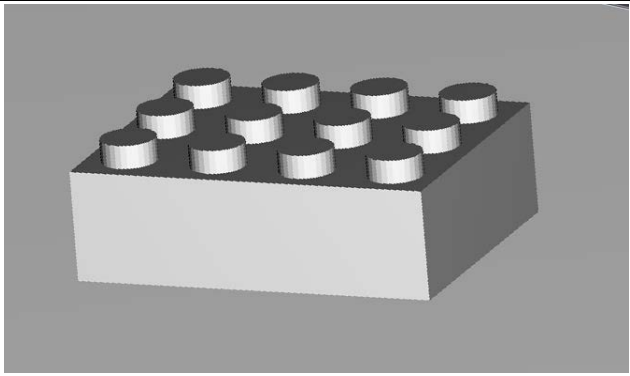
- Proces izrade .CAD datoteke 3D objekta utječe na ispis i kvalitetu ispisa.
- Materijal i rukovanje materijalom utječu na kvalitetu ispisa prototipa.
- Priprema datoteke te ljudski faktor utječu na kvalitetu ispisa prototipa.

3.2. Metodologija i plan istraživanja

Prilikom izrade diplomskog rada korištene su dvije vrste izvora podataka, primarni i sekundarni. Sekundarni podaci su prikupljeni iz stručne literature, stručnih časopisa te relevantnih članka vezanih na postavljenu temu. Pri odabiru literature velika pažnja usmjerava se prema prikupljenim podacima i literaturi kako bi se zadržala objektivnost i uspjele doći do željenih rezultata i dokaza postavljenih hipoteza. Primarni podaci u ovome radu su podaci dobiveni analizom ispisanih modela u određenim uvjetima.

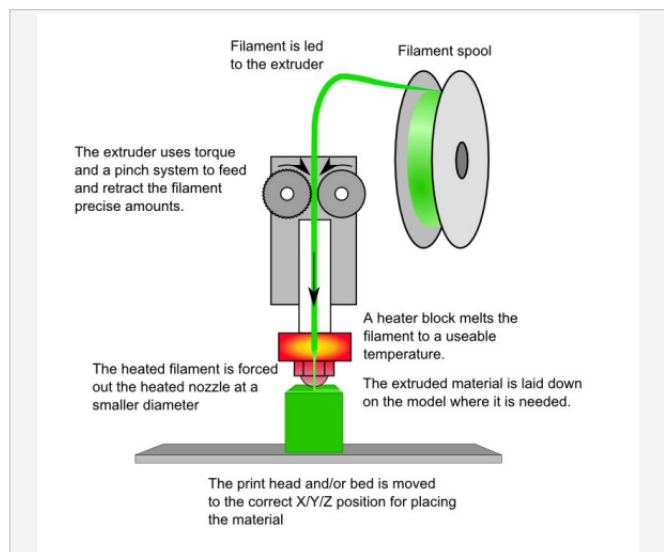
Na temelju pretpostavki manipulirati će se modelom kreiranim u svrhu istraživanja, te različitim parametrima i postavkama ispisa kako bi se potvrdile navedene hipoteze i postigao definirani cilj. Rezultati će se prikazati usporedbom fotografija kreiranog modela ispisanog pod zadanim uvjetima, te tabelom parametara i utjecaja koji imaju na kvalitetu ispisa.

Tabela 2. Testni model

Dužina (mm)	31,70	
Širina (mm)	23,70	
Visina (mm)	11,50	
Masa (g)	12,45	
Broj slojeva	23-115	
Vrijeme ispisa (hh:mm)	0:28 – 1:40	

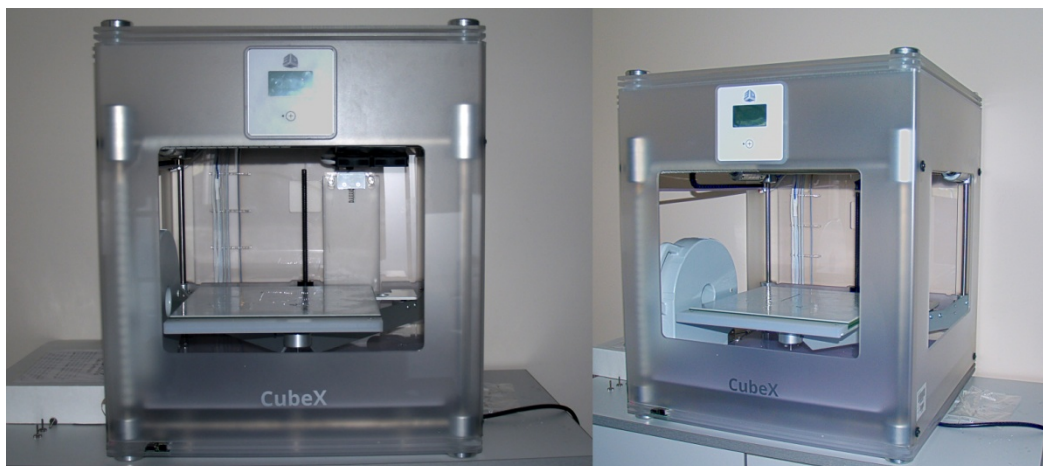
3.3. Korišteni uređaj i materijali

U eksperimentalnom dijelu korišten je uređaj *CubeX 3D printer*, tvrtke *3D Systems*. Uređaj radi na principu *Plastic Jet Printing* tehnologije. Model nastaje provlačenjem plastičnih niti filamenta kroz mlaznice na pisačkoj glavi pisača. Dok se iz mlaznice ekstrudira rastaljeni materijal sloj po sloj, podloga se kontrolirano giba u smjerovima sve tri osi, te na taj način nastaje trodimenzionalni model. *Plastic Jet Printing* (PJP) tehnologija naziva se i *Fused Filament Fabrication* (FFF), koja je zapravo ekvivalent *Fused Deposition Modeling* tehnologiji. FFF tehnologija radi na istom principu kao i FDM tehnologija. Razlika je u tome što je FDM tehnologiju razvila i patentirala tvrtka *Stratasys Inc*, dok je FFF tehnologija razvijena u sklopu projekta *RepRap*, te slobodna za korištenje – *open source*. Detaljni princip rada uređaja na bazi modeliranja topljenim depozitima opisan je u poglavlju 2.4.2., te prikazan na skici (Slika 26.). [32][33]



Slika 26. Princip rada FFF/PJP tehnologije [34]

CubeX 3D printer radi sa dva materijala, ABS i PLA, koji imaju mogućnost recikliranja. Materijali su dostupni u 18 različitih boja. Uređaj koristi ekološki prihvatljive materijale koji se mogu reciklirati ili kompostirati. Kompletni istrošeni spremnik materijala i sam materijal, iskorišteni i neiskorišteni se mogu reciklirati. Tvrtka *3D Systems* sama radi recikliranje, te potiče svoje potrošače da šalju iskorišteni materijal i spremnike u njihove poslovne kako bi se reciklirali i dobili mogućnost ponovne upotrebe. Uređaj može kreirati modele do maksimalnih dimenzija 275 x 265 x 240 mm, te je pogodan kako za kućnu tako i za profesionalnu upotrebu. U paketu s uređajem također dolaze i popratni softveri potrebni za ispis 3D modela. Uz uređaj dolazi i spremnik materijala, te poseban premaz *Cube Stick glue* koji služi boljem prianjanju modela na površinu, kovčeg sa osnovnim alatom za upravljanje i instalaciju, te sitne popravke uređaja. Za prijenos datoteka sa računala na uređaj koristi se poseban *USB stick* koji također dolazi u paketu s uređajem. Preporuča se koristiti *USB stick*, koji dolazi s uređajem, no može se koristiti i bilo koji drugi. [32]

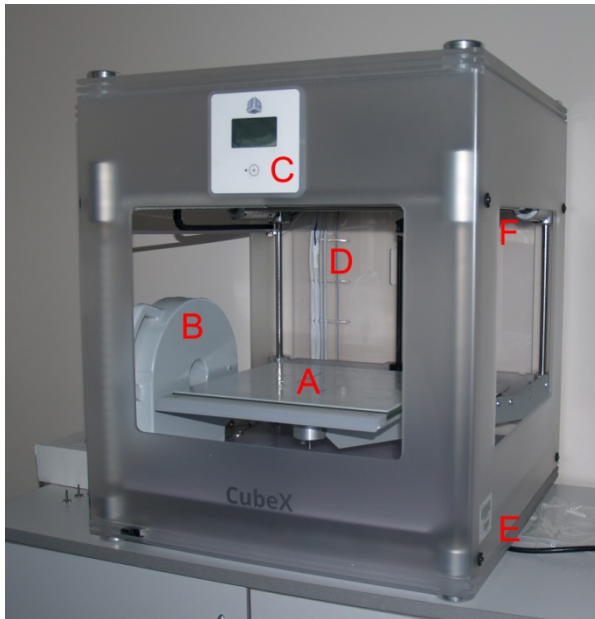


Slika 27. Cubex 3D printer
Izvor: Vlastiti rad autora

3.3.1. Specifikacije Cubex 3D printera

Tabela 3. Specifikacije Cubex 3D printera[32]

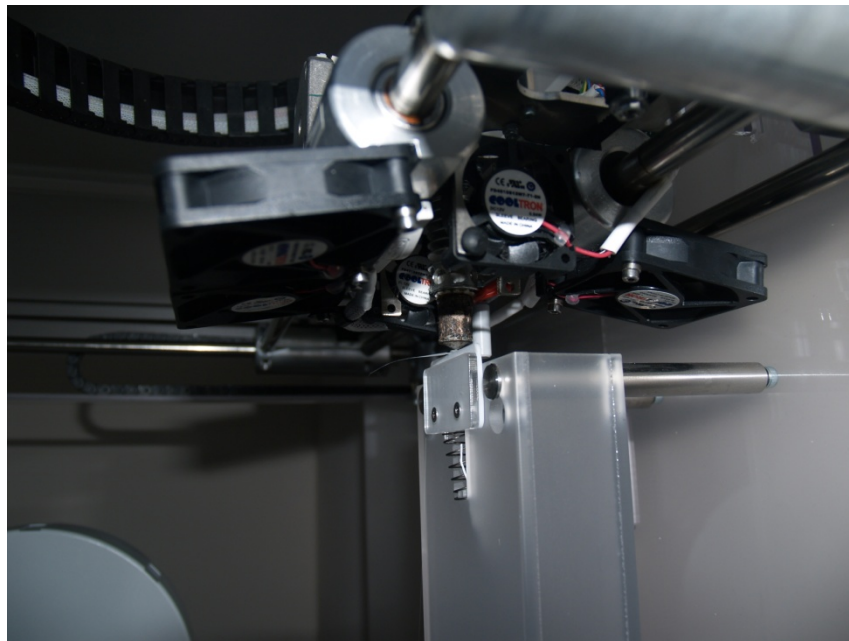
DIMENZIJE (MM)	515 x 515 x 598
TEŽINA (kg)	36 kg
BR. TISKOVIH GLAVA	1
DEBLJINA SLOJA	0,1 mm, 0,25 mm, 0,5 mm
NAPAJANJE	110 – 240 v
MAX. TEMPERATURA EXTRUZIJE	280°C
REZOLUCIJA PO Z-OSI	0,100 mm
TOLERANCIJA	X i Y os: od +/- 1% do +/- 0,2 mm di- menzija objekta Z-os: +/- polovine rezolucije po Z-osi
MAX. BRZINA ISPISA	15 mm ³ /s
MAX. DIMENZIJE OBJEKTA	275 x 265 x 240 mm
MINIMALNA POTREBNA HARDVERSKA OPREMA	Processor: Multi-core 2Ghz RAM: 2 GB Screen Resolution: 1024 x 768
SOFTVERSKA OPREMA	Microsoft Windows XP, 7, 8
DODATNI SOFTVERI	CubeX Client Software
MATERIJAL	ABS, PLA



- A - Radna površina
- B - Spremnik s materijalom
- C - Zaslou na dodir
- D - Cijevi za protok materijala
- E - Napajanje
- F - Pisaća glava (u unutrašnjosti)

Slika 28. Dijelovi Cubex 3D printera

Izvor: Vlastiti rad autora



Slika 29. Pisaća glava Cubex 3D printera

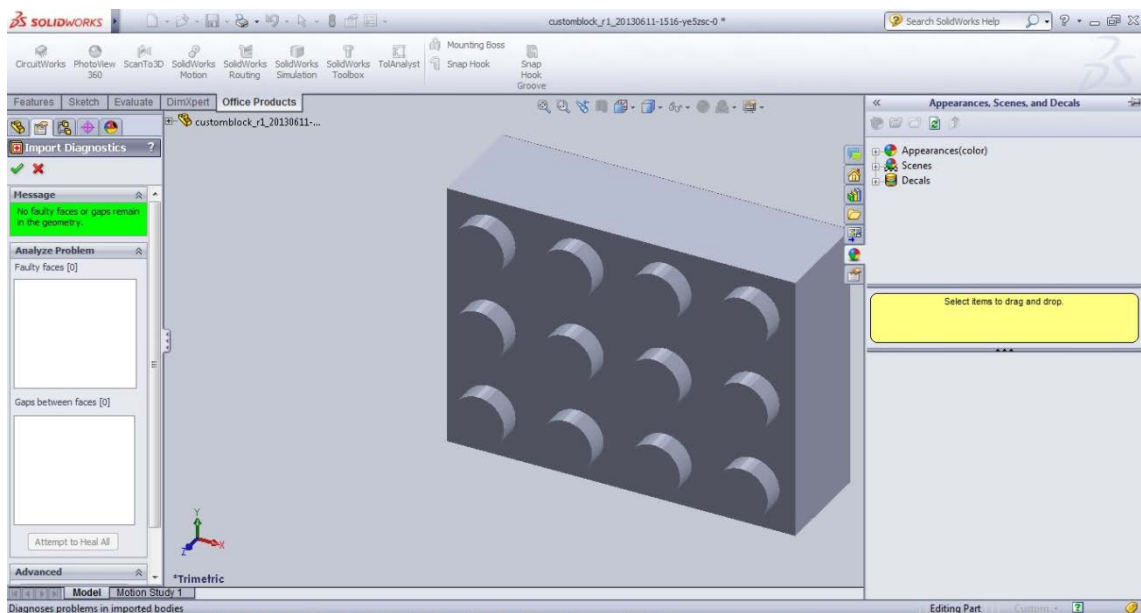
Izvor: Vlastiti rad autora

3.4. Korišteni softveri

U eksperimentalnom dijelu rada korišteni softveri su i *Solid Works 2013* i *Cubex Software 1.08*. *Solid Works* je korišten za kreiranje i doradu modela, odnosno kreiranje .STL datoteke, dok je *Cubex Software* korišten za pripremu .STL datoteke za trodimenzionalni ispis.

3.4.1. Solid Works 2013

Sa *Solid Works* programskim paketom na jednostavan način može se napraviti iskorak u svijet 3D modeliranja. Program služi za strojno projektiranje i automatizaciju procesa koji su zasnovani na parametarskom modeliranju punih tijela. Omogućava da osnovnu 2D skicu pretvorimo u model punog tijela pomoću jednostavnih ali efikasnih alata za modeliranje. Spada u CAD programe, odnosno programe koji rade na principu CAD tehnologije. Program *Solid Works* korišten je za izradu i doradu trodimenzionalnih modela, odnosno za kreiranje .STL datoteke. [36]

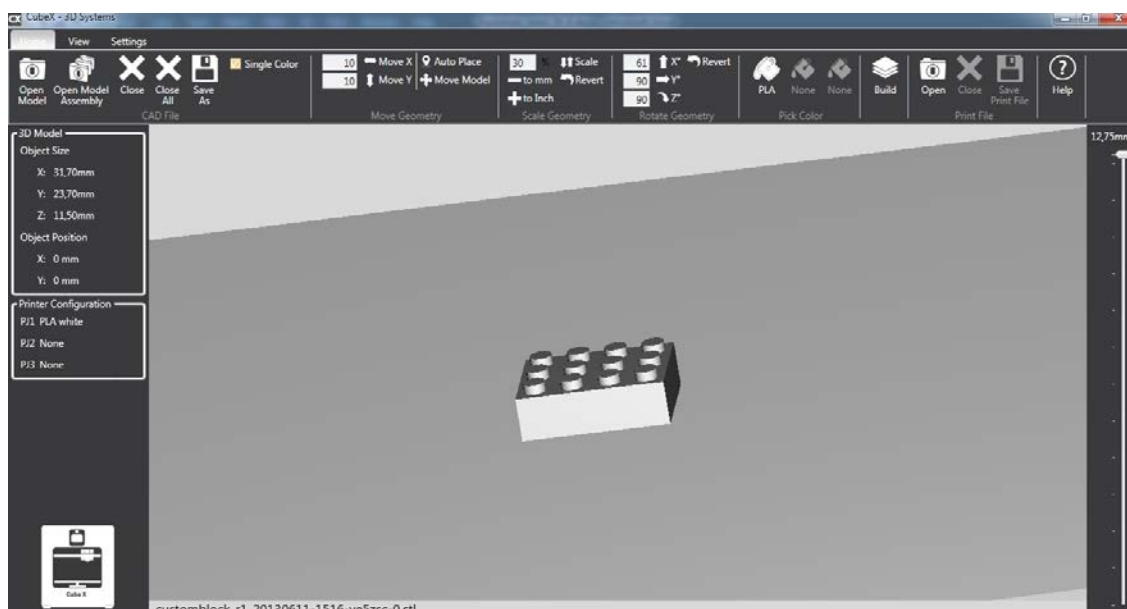


Slika 30. Prikaz grafičkog sučelja SolidWorks programa

Izvor: Vlastiti rad autora

3.4.2. Cubex Software

Cubex Software je program koji se koristi za kreiranje .CUBEX datoteke, koju registrira Cubex pisač te iz nje čita podatke potrebne za ispis trodimenzionalnog modela. Softver učitava .STL datoteku, koja se zatim može skalirati, rotirati, mijenjati smjer i položaj i slično. Podešavati se može debljina sloja, debljina ispune, materijal potpore, tip potpore, materijal podloge koja povećava prijanjanje. Osim postavki ispisa, podešavaju se i postavke uređaja, odabire se materijal, tip uređaja, te broj sapnica. Nakon dorade modela, konfiguriranja uređaja, i postavki ispisa, slijedi konverzija u .CUBEX datoteku, potrebnu za ispis modela, odnosno „build-anje“ modela. Kreirana datoteka se prenosi pomoću *USB sticka* na uređaj, te ispis može započeti.



Slika 31. Prikaz Cubex Software grafičkog sučelja

Izvor: Vlastiti rad autora

3.5. Proces izrade trodimenzionalnog modela na Cubex 3D printeru

Proces izrade modela od osnovne ideje pa do fizičkog prototipa je kompleksan, i sastoji se od nekoliko dijelova, koji se međusobno isprepliću i nadopunjuju. Osnovni proces izrade trodimenzionalnog modela kod Cubex 3D printera je isti kao i kod ostalih tehnologija brze izrade prototipova, a sastoji se od 5 koraka:

- 1) 3D modeliranje
- 2) Stvaranje .STL datoteke, provjera i ispravak
- 3) Priprema datoteke za ispis
- 4) Konstruiranje modela
- 5) Čišćenje i završna dorada

3.5.1. Stvaranje CAD datoteke

Stvaranje CAD datoteke je zapravo 3D modeliranje. Objekt koji treba izraditi modelira se projektiranjem pomoću računala i mora biti prikazan kao skup zatvorenih površina koje jasno definiraju i zaokružuju volumen. 3D modeliranje oduzima dosta vremena u procesu izrade prototipa. Na tržištu postoje različiti programi za 3D modeliranje (SolidWorks, Maya, Catia, 3D Studio Max...), a odabiru se ovisno o potrebama izrade modela. 3D modele moguće je stvoriti i pomoću 3D skenera. [2]

Prilikom izrade eksperimentalnog dijela rada, za izradu 3D modela korišten je program Solid Works. Sam proces izrade trodimenzionalnog prototipa započinje upravo modeliranjem u nekom od CAD programa. Za potrebe istraživanja u programu Solid Workskreirana je .CAD datoteka u obliku *Lego* kocke, dimenzija 31,70 x 23,70 x 11,50 mm.

3.5.2. Stvaranje .STL datoteke, priprema i ispravak

Nakon izrade željenog modela, pomoću Solid Worksa kreirana je .STL datoteka koja je spremna za daljnje rukovanje. Različiti CAD sustavi koriste različite algoritme kako bi predstavili čvrste objekte. .STL format predstavlja trodimenzionalnu površinu kao sklop planarnih trokuta, pa iz tog razloga ne mogu točno prikazivati zakrivljene oblike. Datoteka sadrži koordinate vertikalna i smjer vanjske okomice svakog trokuta. Model prototipa bi trebao biti čvrst i zatvoren, bez šupljina. [2]

Kako bi se otkrile eventualne greške i nedostaci poželjno je koristiti softvere koji detektiraju nepravilnosti na .STL datoteci. *Solid Works* program koristi alat *Import Diagnostics* za dijagnosticiranje eventualnih nepravilnosti na .STL datoteci. Budući da je datoteka kreirana posebno za istraživanje, alat nije pronašao niti jednu nepravilnost. Model je jednostavan i kreiran u skladu sa pravilima i preporukama iz stručne literature, pa je *Solid Works* – ov *Import Diagnostics* alat bio sasvim dovoljan za provjeru. Ukoliko se radi o nekim kompliciranijim modelima preporuča se korištenje raznih drugih alata u Solid Worksu, kao što su *Boolean Tool* i slično, za popravak datoteke. Također postoje i razni drugi softvereri namijenjeni provjeri .STL datoteke.

3.5.3. Priprema datoteke za ispis

Priprema .STL datoteke za ispis sastoji se od nekoliko koraka. Ovaj proces traje u prosjeku od nekoliko minuta do sat vremena. U ovom dijelu podešava se veličina, orijentacija i lokacija modela. Podešavanje orijentacije je jedan od ključnih aspekata u izradi 3D modela, te ona određuje količinu vremena potrebnu za izradu modela. Datoteku postavljamo u najkraću dimenziju u smjeru Z-osi, kako bismo smanjili broj slojeva i samim time vrijeme ispisa. Idući korak je rezanje .STL modela u određeni broj slojeva, čija debljina ovisi o tehnici izrade. Podešava se debljina sloja, koja kod korištenog uređaja može iznositi 0,1 mm, 0,25 mm i 0,5 mm. O debljini sloja ovisiti će vrijeme potrebno za ispis modela.

Izabire se materijal i željena gustoća modela. U ovoj fazi se dodaju i potporne strukture ukoliko je potrebno kod osjetljivijih elemenata, izbočina, tankih stijenki, te na površinama koje zatvaraju kut sa Z-osi uređaja veći od 45° , i slično. Kod Cubex 3D printera, potporni materijal može biti kreiran linijski ili pomoću točaka. Linijski tip potpore preporuča se kod ravnih ploha, a točkasti kod zakrivljenih ploha. [2]

3.5.4. *Konstuiranje modela*

Nakon što je datoteka izrezana na slojeve, dobivenu .CUBEX datoteku pohranjujemo na *USB*, te podešavamo uređaj za ispis. Prije početka ispisa potrebno je na radnu površinu nanijeti posebnu tekućinu za premaz, tzv. ljepljivo *CubeX Stick Glue*. Premaz se nanosi na radnu površinu u nekoliko slojeva kružnim pokretima. Bitno je nanijeti dovoljnu količinu premaza ovisno o površini koju model zauzima. Premaz poboljšava prijanjanje modela na površinu platforme za ispis. Nakon što se premaz osuši pokreće se uređaj, podešava se položaj i visina radne površine, temperatura taljenja ovisno o materijalu, te ispis modela može započeti. Materijal se nanosi sloj po sloj na radnoj površini, dok se radna površina spušta po Z-osi za debljinu sloja. [2]

3.5.5. *Čišćenje i završna dorada*

Nakon što je i zadnji sloj modela izašao kroz mlaznice uređaja, ispis modela je završio. Kako bi se odstranio model sa radne površine, ukloni se radna površina iz uređaja, zajedno sa modelom. Ploča s modelom se uranja u toplu vodu na otprilike 5 minuta, te se onda lako pomoću posebne lopatice koja dolazi sa uređajem može ukloniti sa radne površine. Ukoliko postoje potporni materijali potrebno ih je ukloniti pomoću posebnih kliješta, te po želji model izbrusiti ili polirati kako bi dobili željenu glatkoću površine, obojiti ili premazati određenim premazima kako bi povećali kemijska i mehanička svojstva modela. [2]

3.6. Analiza parametara koji utječu na kvalitetu 3D ispisa

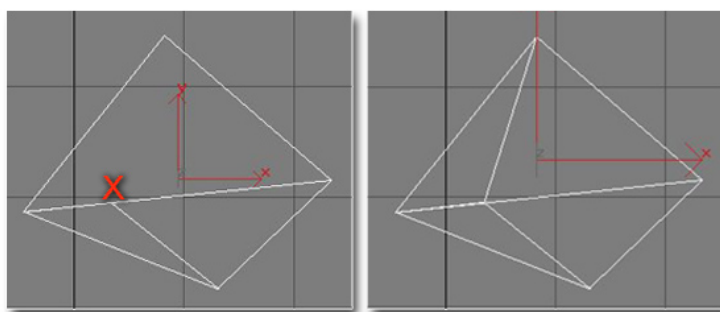
Pri ispisu trodimenzionalnog modela potrebno je obratiti pozornost na niz faktora koji utječu na kvalitetu ispisa. Iz stručne literature izvedene su pretpostavke o faktorima koji utječu na kvalitetu ispisa. Testovima će se dokazati točnost navedenih pretpostavki. Osobno iskustvo autora i rad sa 3D printerom također će doprinijeti donošenju konačnog zaključka.

3.6.1. Modeliranje

Budući da izrada 3D objekta započinje upravo modeliranjem u nekom od .CAD programa, potrebno je pri kreiranju datoteke modela poštivati određena pravila kako bi se objekt pravilno oblikovao i na posljetku ispisao. Ovaj paragraf obraditi će najčešće pogreške koje se događaju pri modeliranju. [35]

a) Pravilo *Vertex-to-Vertex*

Najčešća pogreška koja se može dogoditi u .STL datoteci je nepoštivanje pravila *Vertex-to-Vertex*. Po navedenom pravilu, za kreiranje ispravne .STL datoteke, potrebno je da svi susjedni trokuti dijele dva zajednička vrha. Ukoliko ne dijele, stvaraju se šupljine na modelu koje utječu na kvalitetu ispisa. Na slici će se prikazati pravilno i nepravilno korištenje navedenog pravila. [38]

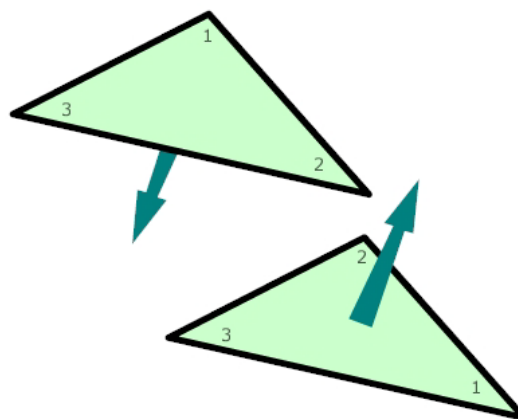


Slika 32. Pravilo *Vertex-to-Vertex* [38]

Pri kreiranju modela, poštivalo se navedeno pravilo, kako bi se spriječile pojave šupljina, i dobio potpuno ispravan, vodonepropusan model. Ukoliko se kojim slučajem pri kreiranju modela ne poštuje ovo pravilo, mnogi programi mogu dijagnosticirati ovaj problem, te ga u većini slučajeva riješiti automatski. Kod većih i kompleksnih modela, može biti potreban i manualni ispravak grešaka budući da automatski softveri nisu u stanju riješiti kompleksniji problem. Manualno se problem rješava brisanjem pojedinih lica, i vrhova ovisno o kontekstu pogreške.[35]

b) Pravilan smjer normala vektora

Česta pogreška pri modeliranju je pogrešan smjer normale usmjerene na površinu (*polygon*). Često se ova pogreška može rezultirati pojavom šupljina. Uzroci pogrešnog smjera normala mogu biti neispravno manualno konstruiranje lica (*faces*) modela, ili nepravilno korištenje automatskog popravka datoteke.



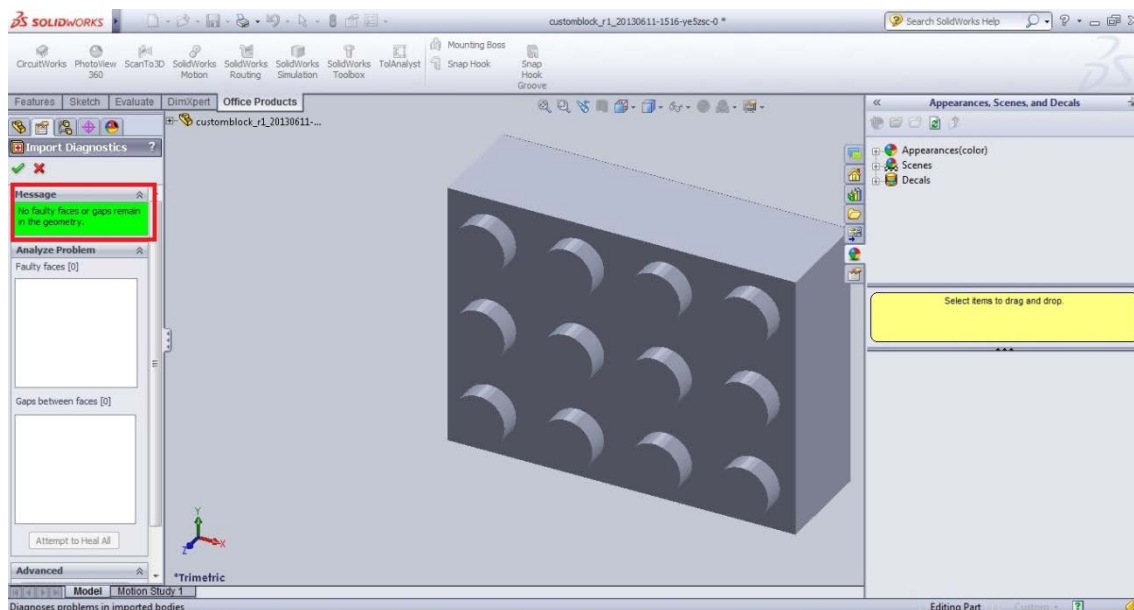
Slika 33. Prikaz invertiranih normala [35]

Većina paketa programa za 3D modeliranje nude alate za ispravljanje normala ručno, te automatski poput „unify normals“ naredbe. Za većinu objekata ispravak normala je uspješan, no objekti koji imaju šupljine mogu stvarati probleme. Kako bi se izbjegao ovaj problem, pri kreiranju modela poštivalo se „pravilo desne ruke“, odnosno vrhovi su postavljali u suprotnom smjeru od smjera kretanja kazaljke. Poštivanje tog pravila rezultiralo je kreiranjem modela sa ispravnim smjerom normala.

c) Pojava duplih lica i višestrukih rubova

Dupla lica i višestruki rubovi su vrlo česta greška u .STL datoteci. Problem se jednostavno rješava automatski u softveru, dok se ručno jako teško može detektirati i popraviti ovaj problem. Jednostavniji način je kreirati datoteku ispočetka (ukoliko nije kompleksna), nego ručno pokušati popraviti ovu grešku. Pri kreiranju datoteke korištene u eksperimentalnom dijelu rada, ova greška se nije pojavila budući da je kreirani model jednostavan, no potrebno ju je navesti jer može utjecati na kvalitetu ispisa.

Datoteka koja je kreirana u svrhu eksperimentalnog dijela diplomskog rada, kreirana je u skladu sa navedenim pravilima. Kako bi se provjerila ispravnost .STL datoteke, u programu *Solid Works*, pokrenut je alat *Import Diagnostics*. Alat se koristi za detekciju eventualnih pogreški .STL datoteke. U mogućnosti je detektirati i ispraviti neispravnu geometriju površine, topologiju površine vezanu za krivulje, te detektirati praznine između susjednih površina. *Import Diagnostic* alat nije detektirao niti jednu pogrešku u kreiranom testnom modelu, što znači da je model u potpunosti ispravan i datoteka se može dalje procesirati (Slika 32.). [35]



Slika 34. Import Diagnostics - provjera greški .STL datoteke

Izvor: Vlastiti rad autora

3.6.2. *Materijal*

Kvaliteta ispisa ovisi i o materijalu, njegovim svojstvima, skladištenju, temperaturi uređaja, pravilan protok materijala. Materijali korišteni u istraživanju su ABS i PLA materijal.

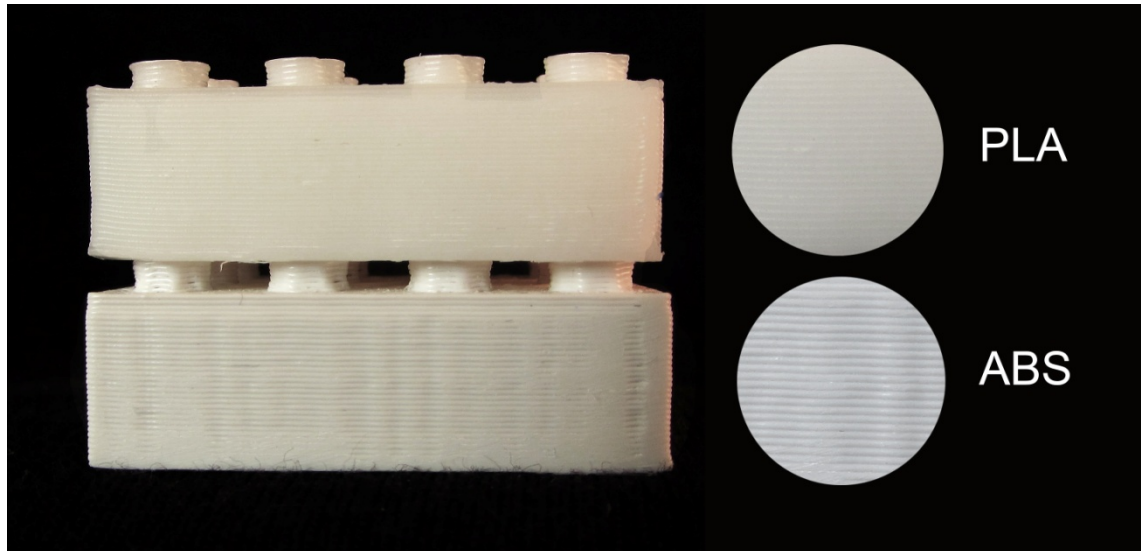
a) Pravilno skladištenje

Kako bi materijal koji se koristi pri ispisu modela bio pogodan za ispis i dao zadovoljavajuću kvalitetu, potrebno ga je pravilno skladištiti. Preporuča se da se materijal raspakira samo ukoliko se namjerava odmah koristiti. Temperatura skladištenja materijala bi trebala biti od 10° do 30°C. Materijal nakon kupovine bi trebalo iskoristiti unutar 12 mjeseci. Pri izradi eksperimentalnog dijela korišteni su novi materijali, ispravno skladišteni, kako bi se izbjegle posljedice koje mogu nastati u suprotnom. [32]

b) Vrsta materijala

U istraživanju su korištene dvije vrste materijala, ABS i PLA. Svojstva materijala detaljno su opisana u poglavlju 2.5. Temperatura taljenja PLA materijala je u rasponu od 180°C do 230°C. Stvara dobru adheziju na površinu platforme 3D printera, pa ne zahtjeva dodatno ulaganje u platformu koja se zagrijava. Prijanjanje za podlogu omogućava posebni premaz. Temperatura taljenja ABS materijala je od 210°C do 260°C. Kako bi materijal bolje prionuo na podlogu, potreban je sustav koji ju zagrijava. U istraživanju nije korištena ploča koja se zagrijava. Prema preporuci proizvođača PLA se koristi kod izrade modela jako velikih dimenzija, dok se ABS preporuča za ispis manjih i srednjih modela. [25] [32]

Za potrebe eksperimentalnog dijela diplomskog rada, izrađen je testni model od ABS i PLA materijala. Na fotografijama će biti prikazani modeli izrađeni od dva različita materijala, te njihova razlika.

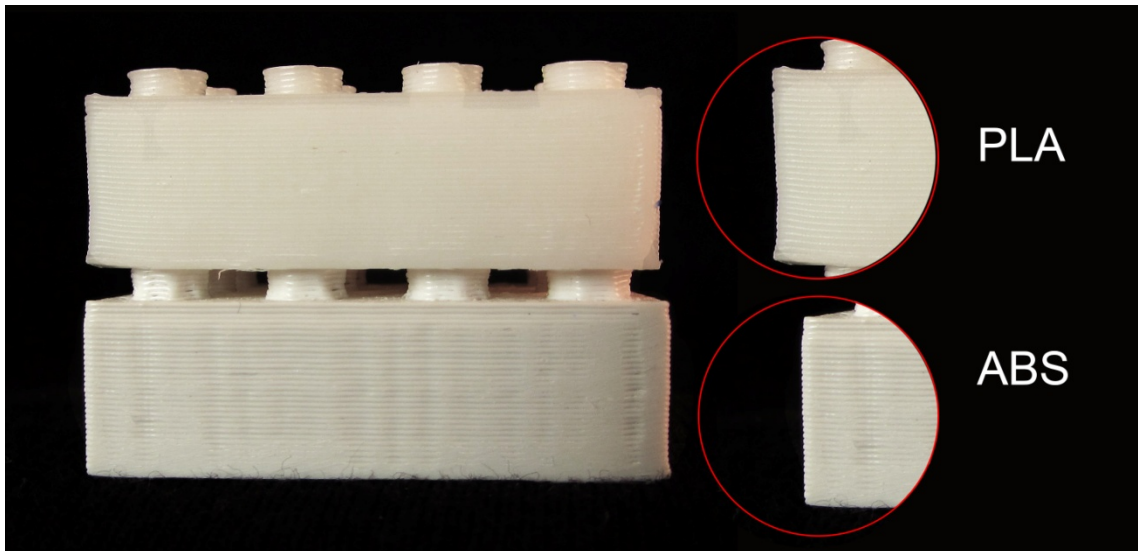


Slika 35. Razlika kvalitete površine PLA i ABS materijala

Izvor: Vlastiti rad autora

Na Slici 33. Prikazani su modeli ispisani od dvije različite vrste materijala. Kao što je vidljivo iz priložene slike, PLA materijal daje glađu i sjajniju površinu u odnosu na ABS materijal. ABS materijal ima nešto grublju površinu i vidljivije slojeve materijala.

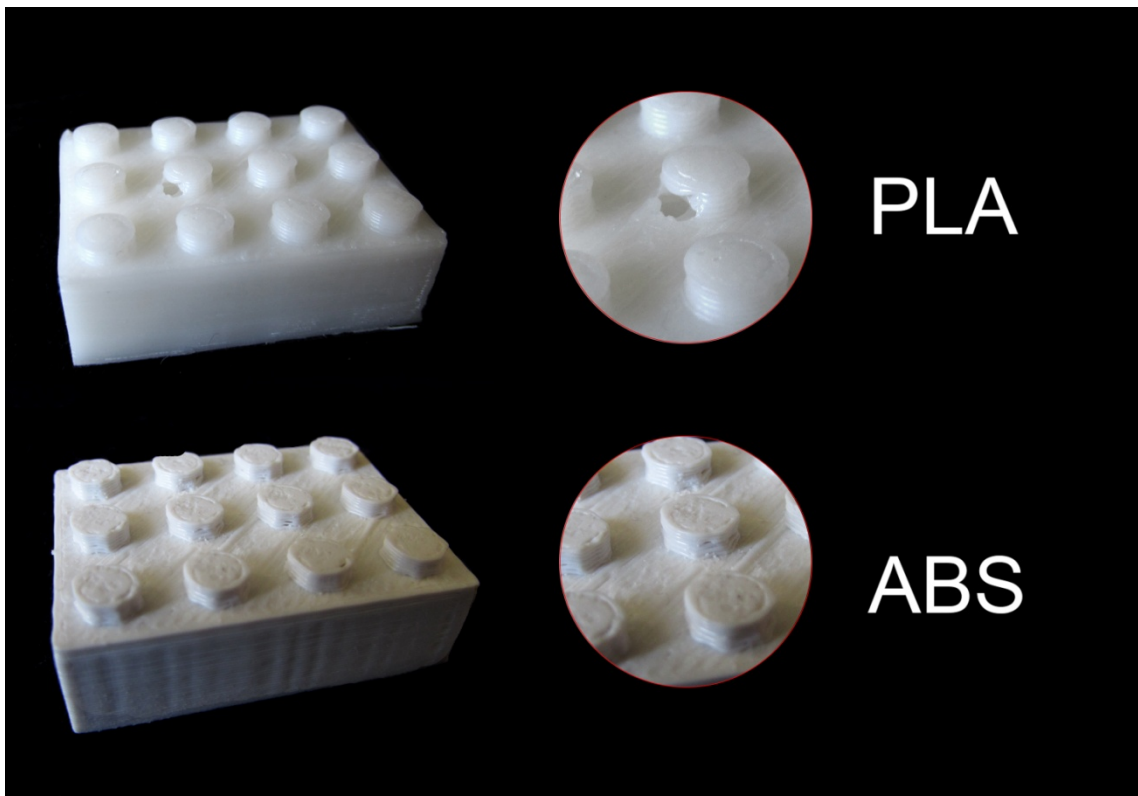
PLA materijal daje puno bolju kvalitetu površine, no ne zadovoljava neke druge parametre. Na Slici 34. Prikazati će se greške na modelu izrađenom od PLA materijala.



Slika 36. Razlika kvalitete ispisa PLA i ABS materijala

Izvor: Vlastiti rad autora

Na Slici 34. Vidljivo je da je došlo do deformacije ruba kod modela izrađenog od PLA materijala.



Slika 37. Deformacije PLA i ABS materijala

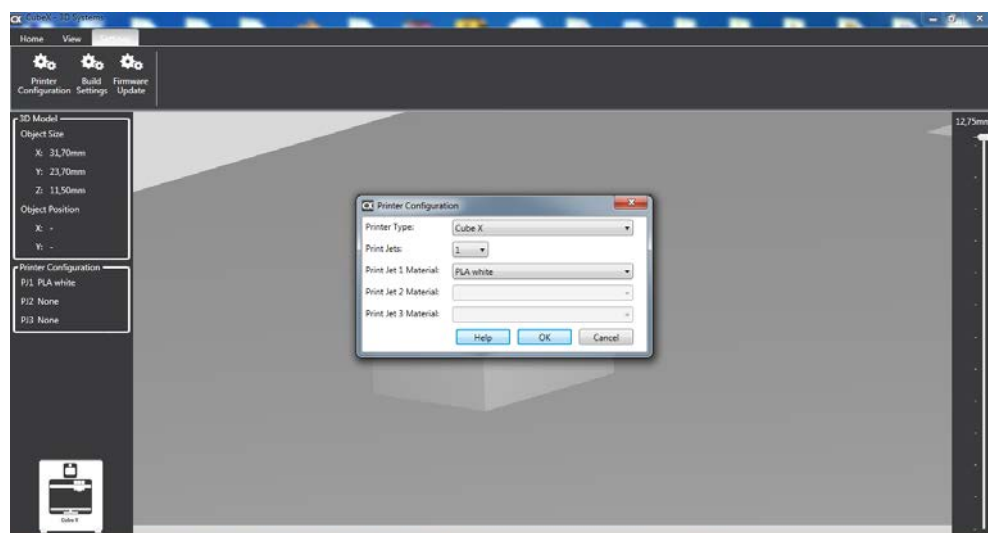
Izvor: Vlastiti rad autora

Na Slici 35. vidljiva je pojava deformacije kod modela izrađenog od PLA materijala. Pojavila se šupljina na dijelu modela koja narušava kvalitetu.

Iako PLA materijal daje bolju i sjajniju površinu, ABS materijal kod ovog eksperimenta dao je bolje rezultate, budući da su se kod modela izrađenog od PLA materijala pojavile deformacije rubova, te šupljine kod sitnijih detalja modela. Eksperiment potvrđuje preporuku proizvođača uređaja da ABS materijal daje bolje rezultate na manjim modelima. Daljnji eksperimenti su rađeni sa ABS materijalom.

c) Temperatura

Temperatura uređaja ovisi o temperaturi taljenja korištenog materijala. Uređaj automatski podešava temperaturu ovisno o uvodnim postavkama modela i korištenom materijalu. Temperatura se također može podesiti ručno. Potrebno je obratiti pozornost pri pripremi modela za ispis u korištenom softveru za pripremu datoteke, da se u konfiguraciji printera odabere materijal korišten na uređaju (Slika 36.). [23]



Slika 38. Konfiguracija uređaja

Izvor: Vlastiti rad autora

Kod automatskih postavki temperature u uređaju, ukoliko se u softveru izabere različit materijal, od korištenog na stroju, doći će do greške uslijed različite temperature taljenja. Ukoliko je automatski podešena temperatura taljena manja od one potrebne za taljenje materijala, materijal se neće dovoljno rastaliti i doći će do začepjenja u sapnici glave pisača. Kako bi se taj problem riješio, potrebno je posebnim alatom pročistiti sapnicu, te ponoviti ispis sa ispravno podešenim postavkama materijala.

d) Pravilan protok materijala

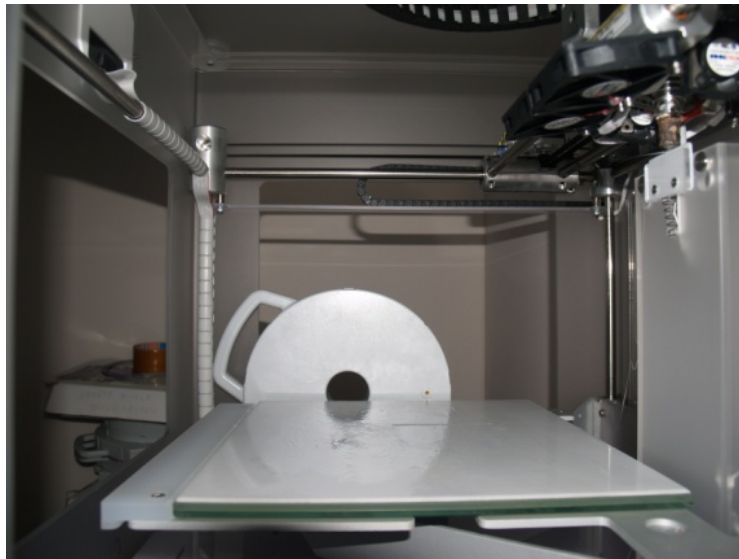
Pravilan protok materijala je ključan pri ispisu modela. Kako bi protok bio ispravan, potrebno je obratiti pažnju na nekoliko faktora. Jedan od njih je i temperatura. Utjecaj temperature na protok materijala opisan je u prethodnom poglavlju. Ukoliko je protok materijala nepravilan ili iz nekog razloga prekinut, uređaj javlja grešku „Filament Flow Fail“. Uzroci ove greške su razni, te kako bi se omogućio ispis potrebno ih je dijagnosticirati.



Slika 39. Filament Flow Fail

Izvor: Vlastiti rad autora

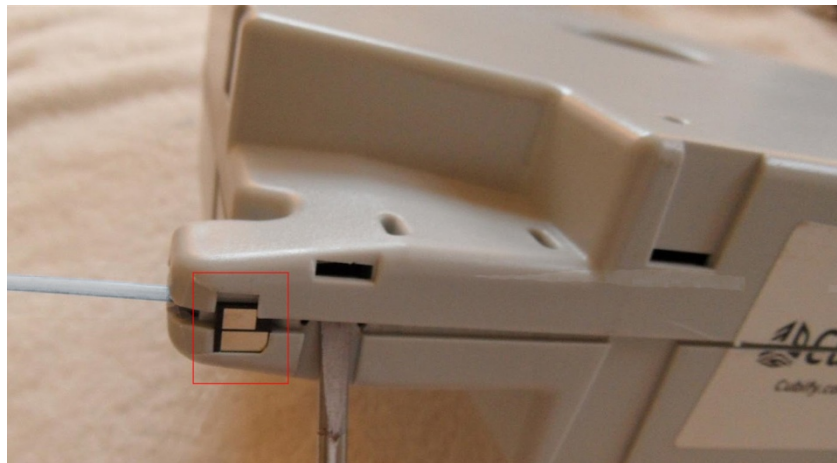
Pri izradi testnih modela, javila se greška „Filament Flow Fail“ na korištenom uređaju. Zbog te greške nije bilo moguće započeti ispis uopće. Uzrok ove greške bio je u nepravilno postavljenom spremniku materijala (Slika 40.).



Slika 40. Prikaz spremnika materijala Cubex

Izvor: Vlastiti rad autora

Na spremniku materijala postoji čip koji detektira materijal (Slika 39.). Prilikom postavljanja spremnika materijala čip se odvojio od kućišta, te budući da uređaj nije mogao detektirati materijal, ponašao se kao da materijala uopće nema. Nakon što je uočena greška, čip je ispravno postavljen, te je uređaj bez problema učitao materijal i započeo ispis.



Slika 41. Čip za detekciju materijala

Izvor: Vlastiti rad autora

Osim navedenog, uzroci „Filament Flow Fail“ greške mogu biti: opuštanje materijala sa koture unutar spremnika, prekidanje niti materijala, deformacije materijala uslijed nepravilnog skladištenja i slično.

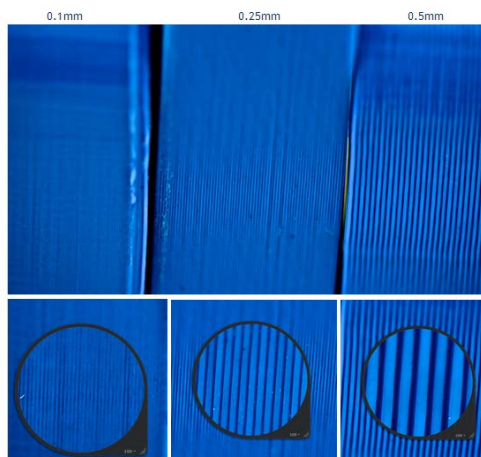
3.6.3. Priprema datoteke za ispis

Priprema datoteke u specijaliziranom programu *Cubex Software*, utječe na finalnu kvalitetu modela. Softver se koristi za rezanje datoteke na slojeve, podešavanje parametara ispisa, te konverziju u .CUBEX format koji čita uređaj. Datoteka se u *Cubex Softwareu* može skalirati, rotirati po sve tri osi, dijeliti na slojeve željene debljine, mijenjati ispuna modela, itd. Postavke datoteke za ispis utječu na kvalitetu ispisa, što će dokazati slijedeći eksperimenti.

a) Debljina sloja

Debljina sloja utječe na kvalitetu modela. Što je sloj tanji, to će kvaliteta površine modela biti bolja, odnosno model će imati glađu strukturu. No što je sloj tanji, model će imati više slojeva, te će brzina ispisa biti manja, a vrijeme potrebno za ispis modela duže. [23][24]

Cubex Software dozvoljava debljinu sloja od 0,1 mm, 0,25 mm i 0,5 mm. Uređaj iz nekoliko pokušaja nije uspio ispisati testni model debljinom sloja 0,1 mm i 0,5 mm. U oba slučaja došlo je do začepjenja sapnice pisača iz nepoznatih razloga. Nije bilo moguće prikazati razliku debljine sloja na testnom modelu, pa je fotografija na kojoj su prikazane različite debljine sloja preuzeta iz drugog izvora.

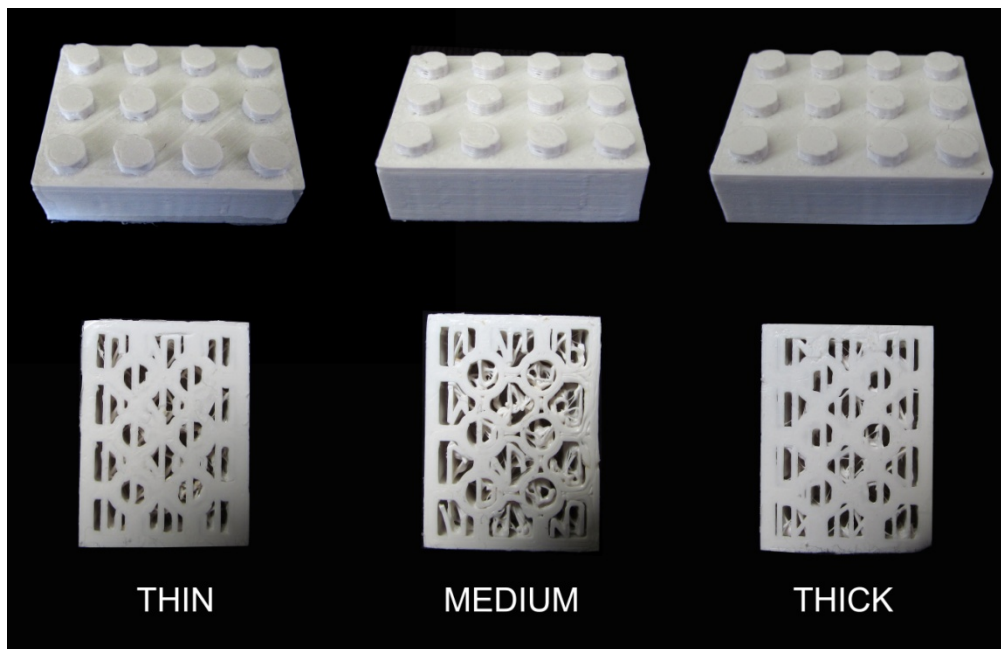


Slika 42. Prikaz različite debljine slojeva [39]

Na slici je vidljivo da je kvaliteta ispisa veća, odnosno površina modela ima veću glatkoću što je debljina sloja tanja.

b) Ispuna modela

Ispuna modela određuje razmak materijala unutarnje strukture modela. Softver dozvoljava četiri različite ispune: *hollow*, *thin*, *medium* i *thick*. Po defaultu ispunjena modela je postavljena na *medium*. Na Slici 41. prikazati će se model sa različitim ispunama.



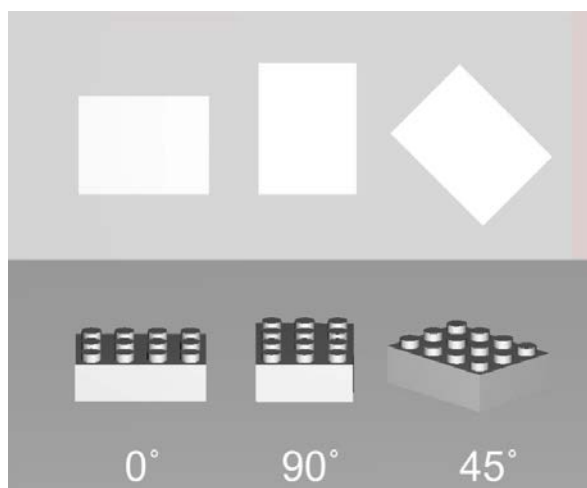
Slika 43. Prikaz različite ispune modela

Izvor: Vlastiti rad autora

Stjenke testnog modela su pretanke, da bi se ispunjena uopće mogla primijetiti, te ukoliko govorimo o vizualnoj kvaliteti razina ispunjena ne igra nikakvu ulogu jer se nalazi u unutrašnjosti objekta i nije vidljiva.

c) Orijentacija sloja – kut rastera

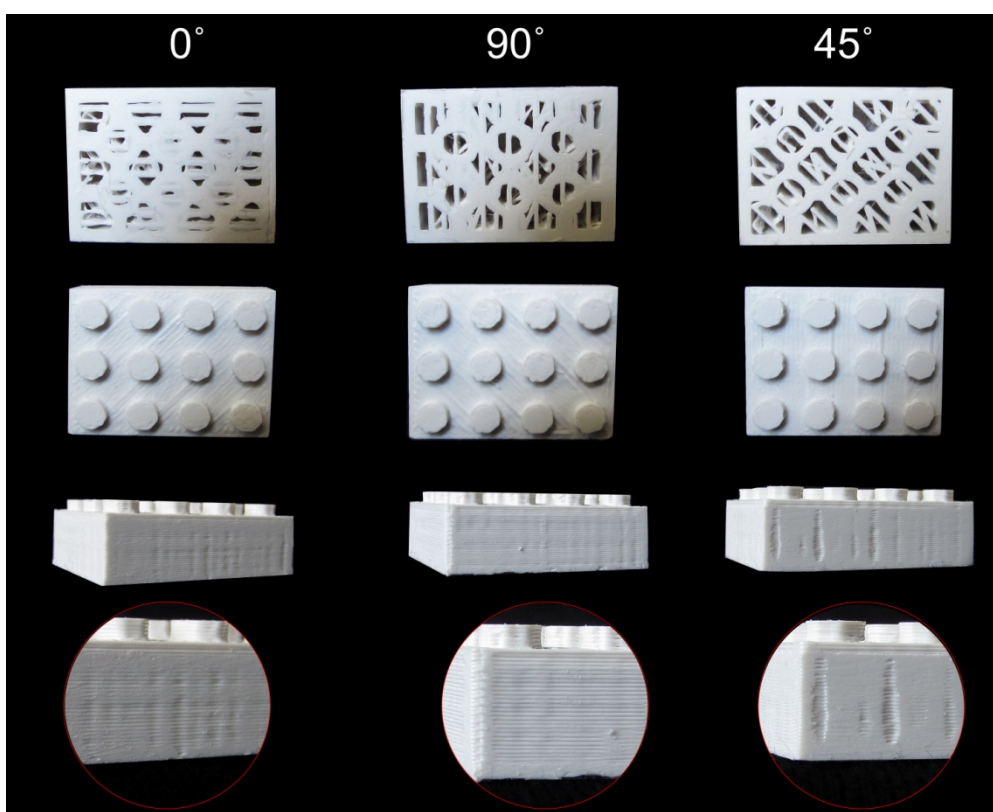
Na kvalitetu ispisa utječe orijentacija sloja, odnosno kut rastera. Kod Cubex printera, pisaća glava nema mogućnost zakretanja pod određenim kutom, no kako bi se dokazala ova tvrdnja, model će se zakrenuti pod željenim kutom u odnosu na Z-os. Model je u softveru za pripremu datoteke rotiran za 0°, 90° i 45°, te ispisan (Slika 42.).



Slika 44. Orijentacija rastera (gornja slika-pogled odozgor, donja slika - 3d pogled)

Izvor: Vlastiti rad autora

Nakon ispisa modeli su analizirani te je utvrđeno da ispis pod kutom od 90° daje najbolju kvalitetu, odnosno površina modela ispisanog pod kutom od 90° daje površinu s najmanje nepravilnosti i neravnina. Rezultat testa prikazan je na Slici 43.

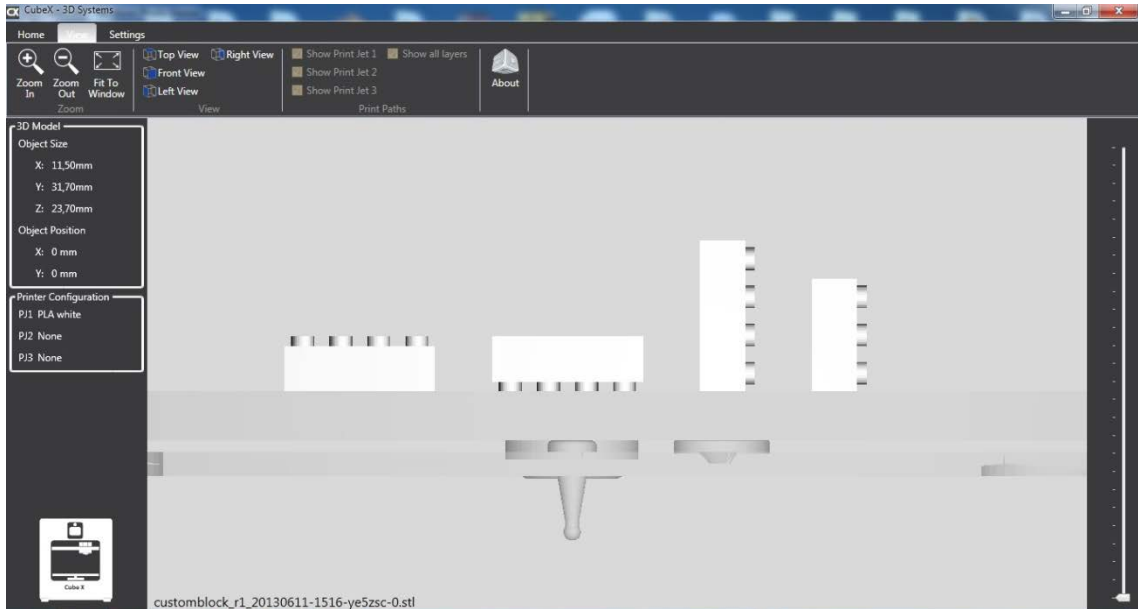


Slika 45. Prikaz utjecaja kuta rastera na kvalitetu modela

Izvor: Vlastiti rad autora

d) Orijentacija modela

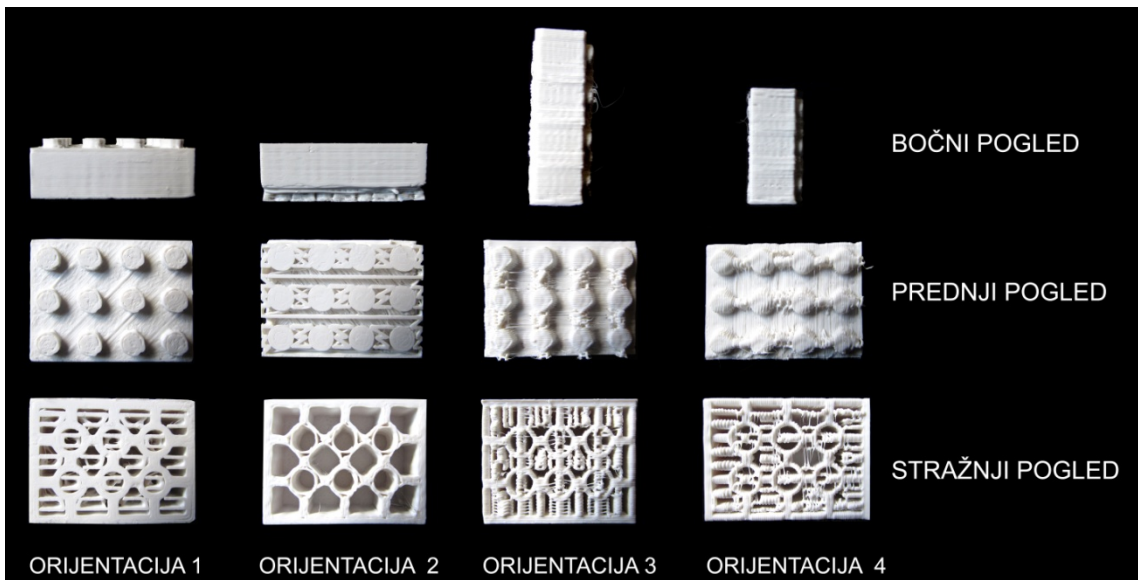
Orijentacija modela također utječe na kvalitetu ispisa. Kako bi se dokazala ova tvrdnja, model je u softveru za pripremu datoteke položen u četiri različita položaja (Slika 44.).



Slika 46. Prikaz različite orijentacije modela

Izvor: Vlastiti rad autora

Nakon ispisa modela različite orijentacije, analizirane su greške, te utjecaj orijentacije na kvalitetu ispisa (Slika 45.).



Slika 47. Usporedba kvalitete ispisa modela različite orijentacije

Izvor: Vlastiti rad autora

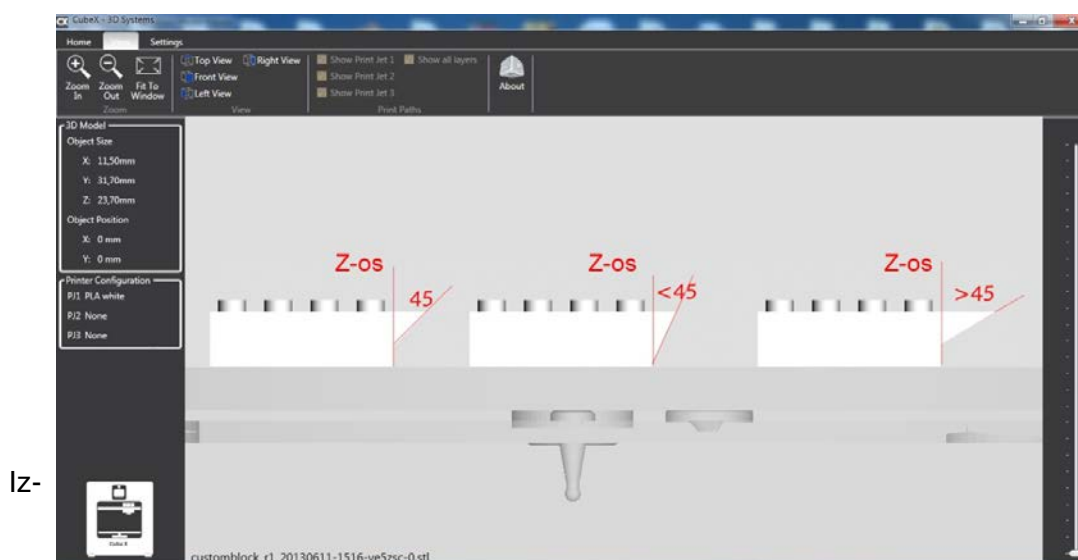
Na Slici 45. prikazana su četiri modela ispisana sa različitom orijentacijom. Budući da je izgled model sa svih strana različit, analizirani su modeli sa prednje, bočne i stražnje strane. Orijehtacija 4 i orijentacija 5 zadanog modela u daju nezadovoljavajuću kvalitetu ispisa, sa sve tri promatrane strane, te je potrebno takav položaj modela izbjegavati. Uzrok loše kvalitete primjera orijentacije 4 i 5 je veliki broj slojeva, te usmjerenost sitnih detalja okomito na Z-os. Orijehtacija 1 daje zadovoljavajuću kvalitetu ispisa sa bočne i prednje strane, dok je stražnja strana nešto manje kvalitete zbog dodane podloge koja omogućava bolje prijanjanje za platformu uređaja. Orijehtacija 2 daje zadovoljavajuću kvalitetu sa bočne i stražnje strane, dok sa prednje strane kvalitetu narušava dodana podloga, kao u prethodnom slučaju.

Idealnu kvalitetu dobili bismo ispisom modela iz dva dijela, kombinacijom orijentacije 1 i orijentacije 2. Tako da model po sredini presiječemo na dva dijela (paralelno sa X-osi), te gornji dio modela ispišemo položen kao model orijentacije 1, a donji dio modela ispišemo položen kao model orijentacije 2. Nakon ispisa bilo bi potrebno ta dva modela slijepiti zajedno, što spada pod doradne procese. Ovaj test nije proveden budući da je cilj rada definirati parametre koji utječu na kvalitetu ispisa bez doradnih procesa.

Zaključak provedenog testa orijentacije modela je da model treba orijentirati na način da ima što manje slojeva, odnosno da je najduža strana modela položena u X-Y ravnini. Drugi uvjet koji treba poštovati da bi se postigla zadovoljavajuća kvaliteta je usmjerenost detalja u smjeru Y-osi, a izbjegavati usmjerenost sitnijih detalja okomito na Y-os. Poželjno je također da su sitniji detalji modela što dalje od potpornih konstrukcije i podloge koja povećava prijanjanje modela na površinu.

e) Potporne konstrukcije

Kod nekih modela, koji imaju plohe koje strše pod određenim kutovima koje ploha zatvara sa Z-osi, potrebno je dodavati potporne konstrukcije. Ukoliko model ima potporne konstrukcije, potrebna mu je dodatna obrada, odnosno uklanjanje istih te zaglađivanje mjesta na kojem su se nalazile. Upravo iz toga razloga zaključujemo kako potporne konstrukcije utječu na kvalitetu ispisa modela. *Cubex Software* pri podešavanju postavki ispisa modela, ima opciju automatskog generiranja odgovarajućeg uzorka potpore na određenom sloju. Budući da početni model nema plohe nagnute pod određenim kutom, kako bi se tvrdnja dokazala, modelu su dodane plohe pod tri različita kuta: $=45^\circ$, $<45^\circ$, $>45^\circ$.

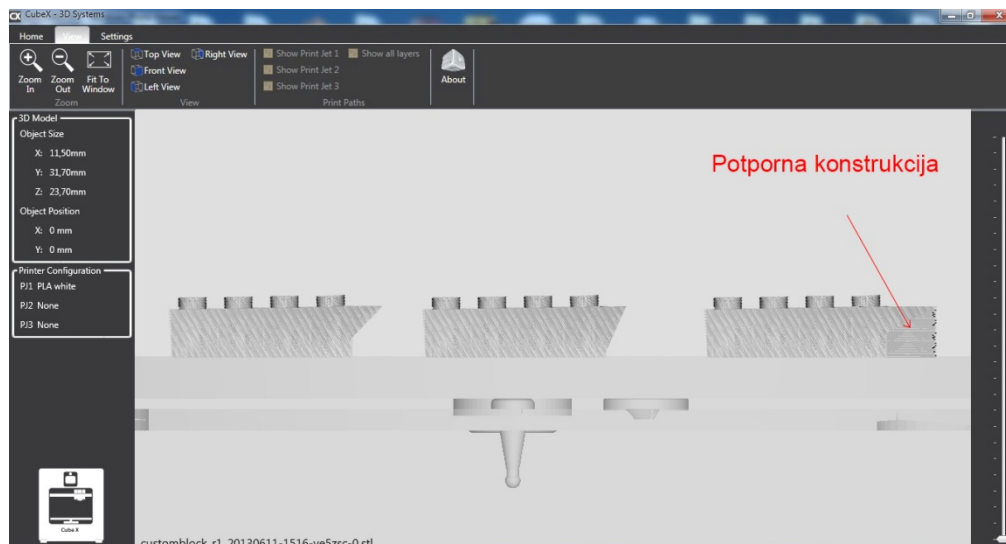


IZ-

VOR: **Slika 48. Prikaz modela sa dodanim plohama**

Vlastiti rad autora

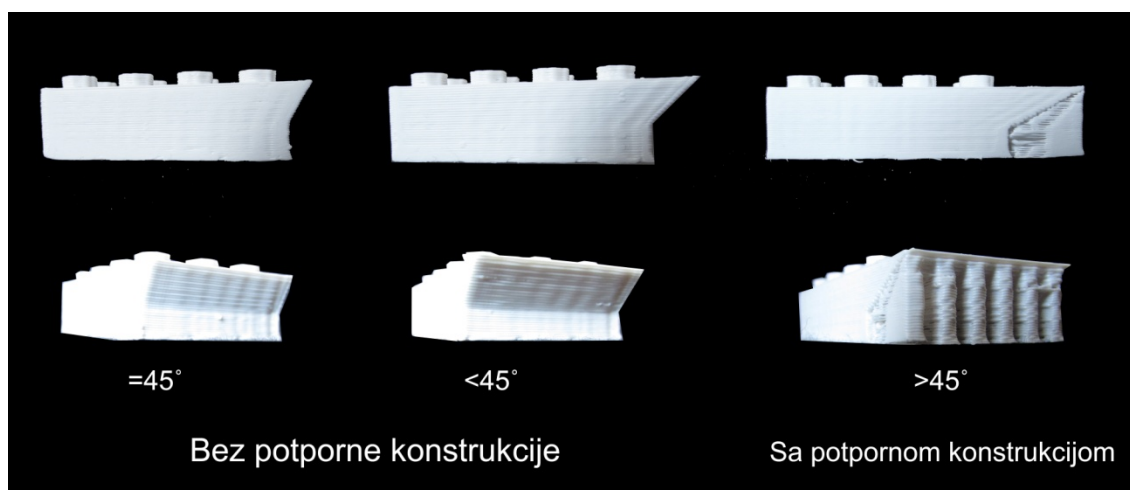
Pri podešavanju postavki ispisa omogućimo automatsko generiranje potpornih konstrukcija, te im izaberemo željeni tip. *Cubex* uređaj radi sa dva tipa potpornih konstrukcija, linijski i točkasti. Točkasti se najčešće koristi kod zakrivljenih površina, dok se linijski koristi kod ravnih površina. Budući da je u ovom slučaju ploha ravne površine, koristit će se linijski tip potporne konstrukcije. Nakon podešavanja uvodnih parametara za ispis, softver kreira .CUBEX datoteku podijeljenu u slojeve po zadanim uvjetima, te automatski generira potporne konstrukcije na trećem modelu sa plohom pod kutom većim od 45° u odnosu na Z-os (Slika 47.).



Slika 49. Prikaz dodanih potpornih konstrukcija

Izvor: Vlastiti rad autora

Nakon ispisa sva tri modela, uspoređeni su modeli sa potporama i bez. Na Slici 48. su prikazani ispisani modeli. Modeli bez potpore imaju glatku površinu i nema potrebe za dodatnom obradom, dok model sa potporom zahtjeva dodatnu obradu, odnosno uklanjanje potpornih konstrukcija i brušenje kako bi se površina zagladila. Iz navedenih činjenica proizlazi da dodavanje kompleksnijih detalja i potpornih konstrukcija utječe na kvalitetu ispisa.



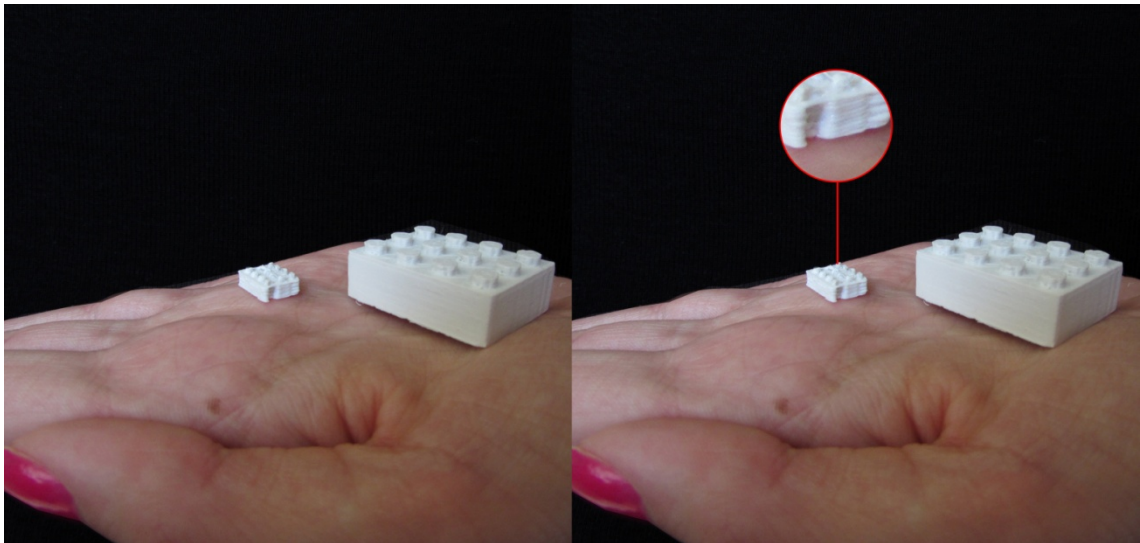
Slika 50. Prikaz modela sa i bez potpornih konstrukcija

Izvor: Vlastiti rad autora

f) Skaliranje modela

Softver za pripremu datoteke za ispis ima mogućnost skaliranja modela. Prije same pripreme potrebno je obratiti pozornost na dimenzije modela. Kako je bitno da dimenzije modela ne izlaze iznad maksimalnih definiranih dimenzija koje uređaj može ispisati, tako je važno i da se model ne umanjuje previše. Mogućnost ispisa stjenke modela ovisi o rezoluciji printera, odnosno o minimalnoj debljini sloja koju uređaj može proizvesti. Ukoliko se model smanji na način da su mu najmanje stjenke tanje od minimalne debljine sloja koju uređaj može kreirati, ispis te stjenke neće biti moguć. Rezolucija *Cubex* printera je 0,1 mm, odnosno uređaj može proizvesti sloj minimalne debljine od 0,1 mm.

Debljina stjenke modela, kada je u zadanim dimenzijama 31,70mm x 23,70 mm x 11,50 mm, iznosi približno 0,2 mm. Ukoliko umanjimo model 3x, debljina njegove stjenke će biti približno 0,0667 mm, što je manje od minimalne debljine sloja koju uređaj može ispisati. Takav model neće biti u mogućnosti ispisati se, što je dokazano povedenim testom. Rezultat je prikazan na Slici 49.



Slika 51. Prikaz utjecaja skaliranja na model
(lijevo: usporedba modela u stvarnoj veličini i umanjenog modela; slika desno: prikaz greške na umanjenom modelu)

Izvor: Vlastiti rad autora

3.6.4. Ljudski faktor

Na kvalitetu ispisa može utjecati i ljudski faktor. Taj se faktor odnosi na ispravnu instalaciju i korištenje uređaja, ispravno skladištenje i rukovanje materijala, znanje o modeliranju te poznavanje softvera i tehnologije korištenih u cijelom procesu izrade 3D objekta. Utjecaj ljudskog faktora može imati različite posljedice. Neispravna instalacije i korištenja uređaja može rezultirati kvarom uređaja, dok neispravno skladištenje i rukovanje materijalom može rezultirati deformacijama materijala, te neprepoznavanju materijala u uređaju. Potrebno je koristiti propisane operacijske sustave i softvere, te posjedovati minimalnu softverski i hardversku opremu definiranu u specifikacijama uređaja.

Kako bi se izbjegle greške uvjetovane ljudskim faktorom, potrebna je edukacija osoblja, pravilno skladištenje i rukovanje uređajem i materijalima, te redovan servis uređaja. Izbjegavanju utjecaja ljudskog faktora na kvalitetu ispisa uvelike pomaže korisnička podrška koju nudi proizvođač uređaja, te velika *online* zajednica zaljubljenika u tehnologiju 3D tiska.

4. REZULTATI I RASPRAVA

Provedeni eksperimenti potvrdili su postavljene hipoteze te su utvrđeni parametri koji utječu na kvalitetu ispisa. Iz rezultata istraživanja proizlazi niz pravila koje treba poštivati kako bi se osigurala što bolja kvaliteta 3D ispisa. Rezultati istraživanja predstaviti će se tablicom.

Tabela 4. Analiza parametara 3D tiska

	PARAMETAR	POSljedICA	RJEŠENJE
MODELIRANJE	VERTEX-TO-VERTEX PRAVILO	Pojava šupljina i nepravilnosti modela	Ručno ili automatsko brisanje pojedinih lica i vrhova u skladu sa Vertex-to-vertex pravilom
	PRAVILAN SMJER NORMALA VEKTORA	Pojava šupljina	Ispravljanje normala ručno korištenjem, te automatski: „unify normals“ naredba
	PRAVILAN SMJER NORMALA VEKTORA	Neispravna .STL datoteka, nemogućnost ispisa datoteke	Automatsko brisanje duplih lica i višestrukih rubova u softveru, kreiranje datoteke ispočetka
MATERIJAL	NEPRAVILNO SKLADIŠTENJE	Deformacija materijala	Raspakirati materijal netom prije korištenja, temperatura skladištenja 10° do 30 °C, iskoristiti unutar 12 mjeseci
	VRSTA MATERIJALA (ABS/PLA)	ABS: grublja površina, vidljiviji slojevi, nema dedormacija PLA: glađa i sjanjnija površina, manje vidljivi slojevi, pojave šupljina i deformacija	ABS: koristiti kod manjih objekata PLA: Koristiti kod većih objekata
	NEODGOVARAJUĆA TEMPERATURA	Začepljenje sapnice	Temperaturu uređaja podesiti u odnosu na temperaturu taljenja izabranog materijala
	PROTOK MATERIJALA	Pojava greške "Filament Flow Fail", pucanje niti materijala, uređaj ne prepoznaje materijal	Pravilno rukovanje spremnikom materijala te samim materijalom
POSTAVKE DATOTEKE ZA ISPIS	DEBLJINA SLOJA	Različita kvaliteta sloja, struktura površine, brzina ispisa, začepljenje sapnica uslijed neodgovarajuće debljine sloja	Odabrati srednju debljinu sloja (0,25 mm)
	ISPUNA MODELA	Nema posljedice na kvalitetu jer ispuna u unutrašnjosti, nije vidljiva	-
	ORIJENTACIJA SLOJA – KUT RAS-TERA	0°: pojava nepravilnosti, neravna površina 90°: nema nepravilnosti 45°: pojava nepravilnosti, neravna površina	Model zarotirati za 90 u odnosu na Z-os.
	POTPORNE KONSTRUKCIJE	Nepravilnosti i neravna površina na mjestima sa potpornom konstrukcijom, potrebna dodatna obrada	Izbjegavati plohe pod nagibom veći od 45°(u odnosu na Z-os) u suprotnom ukloniti potporne konstrukcije i dodatno obraditi površinu
	SKALIRANJE MODELA	Veliko uvećanje: nemogućnost ispisa modela koji je veći od zadanih max. dimenzija Veliko umanjenje: / nemogućnost ispisa stijenki tanjih od rezolucije uređaja	Skalirati model unutar dimenzija (275 x 265 x 240mm) Izbjegavati debljine stjenke tanje od rezolucije uređaja (<0,1 mm)
LJUDSKI FAKTOR	INSTALACIJA I KORIŠTENJE UREĐAJA	kvar na uređaju	Instalacija i rukovanje uređajem u skladu sa priručnikom
	SKLADIŠTENJE I RUKOVANJE MATERIJALA	deformacija materijala	Pravilno skladištenje
	ZNANJE O MODELIRANJU, KORIŠTENJE ISPRAVNE SOFTVERSKE I HARDVERSKE OPREME	Kreiranje neispravne datoteke, pojava grešaka pri pripremi datoteke za ispis	Edukacija i informiranje

Istraživanje je potvrdilo da na kvalitetu ispisa utječu: modeliranje, materijal, postavke ispisa te ljudski faktor. Kako je prikazano u Tabeli 3., svaki od navedenih parametara ima određenu posljedicu na kvalitetu ispisa i sam ispis. Poštivanjem određenih pravila svaka od posljedica se može u potpunosti ili bar djelomično spriječiti, te utjecaj određenog parametra umanjiti. Parametri definirani u tablici su definirani za uređaj *Cubex 3D* printer, koji radi na principu PJP tehnologije, te koristi ABS i PLA materijale. Budući da sve tehnologije 3D ispisa rade na sličnom principu, ovi parametri se mogu primijeniti i pri korištenju neke druge tehnologije, odnosno nekog drugog uređaja.

5. ZAKLJUČAK

Tehnologija trodimenzionalnog ispisa je metoda izrade trodimenzionalnog objekta iz .STL datoteke kreirane nekim od CAD programa. Spada u procese brze izrade prototipova. Pod procese brze izrade prototipova spadaju različite tehnologije, no sve rade na sličnom principu. Model se kreira sloj po sloj nanošenjem određenog materijala ovisno o tehnici ispisa. Tehnologija se rapidno razvija i nalazi primjenu u gotovo svim granama industrije, umjetnosti, arhitekturi, medicini. Kako bi se izvukao maksimum iz ove tehnologije potrebno je postići određenu kvalitetu ispisa modela, poštivanjem određenih pravila.

Cilj eksperimentalnog dijela rada je definirati faktore koji utječu na kvalitetu ispisa, te potvrditi postavljene hipoteze proizašle iz informacija prikupljenih iz stručne literature, te osobnim iskustvom autora. Provedeni eksperimenti dokazali su ovisnost kvalitete ispisa o određenim parametrima. Eksperimenti su potvrdili postavljene hipoteze te postigli definirani cilj. Faktori koji utječu na kvalitetu ispisa su modeliranje, materijal, priprema datoteke za ispis, te ljudski faktor.

Na temelju provedenih testova, definirani su slijedeći parametri koji utječu na kvalitetu ispisa:

- I. **Vertex-to-vertex pravilo:** Kako bi se spriječile pojave šupljina i nepravilnosti, pri izradi modela potrebno je da svi susjedni trokuti dijele dva zajednička vrha.
- II. **Pravilan smjer normala vektora:** Pri izradi modela potrebno je automatski ili ručno ispraviti normale vektora usmjerene na površinu kako bi se spriječile pojave šupljina na modelu.
- III. **Brisanje duplih lica i višestrukih rubova:** Posebnim alatom u softveru za 3D modeliranje datoteke potrebno je izbrisati sva dupla lica i višestruke rubove na modelu koji uzrokuju greške na .STL datoteci.
- IV. **Pravilno skladištenje materijala:** Kako bi se spriječile deformacije materijala i očuvala kvaliteta, potrebno ga je skladištiti u određenim uvjetima (na temperaturi 10°C - 30°C, raspakirati netom prije korištenja, te iskoristiti u roku od 12 mjeseci od kupovine).

- V. **Pravilan izbor materijala:** Ukoliko se želi dobiti sjajnija površina preporuča se koristiti PLA materijal, no ukoliko se radi o ispisu manjeg modela, sa sitnijim detaljima, poželjno je koristiti ABS materijal.
- VI. **Pravilna temperatura:** Temperaturu u uređaju potrebno je podesiti u skladu sa temperaturom taljena korištenog materijala, kako bi se spriječilo začepljenje sapnice.
- VII. **Pravilan protok materijala:** Kako bi protok materijala bio pravilan, te kako bi uređaj mogao detektirati materijal, potrebno je pažljivo rukovati materijalom i spremnikom materijala.
- VIII. **Debljina sloja:** O debljini sloja ovisi struktura površine, te brzina ispisa. Što je sloj tanji kvaliteta ispisa je veća, struktura površine glađa, no vrijeme ispisa je veće. Uslijed dugog vremena ispisa češće se mogu javiti greške i zapetljanja materijala. Kod *Cubex* uređaja se preporuča koristiti debljinu sloja od 0,25 mm, budući da uređaj nije bio u mogućnosti kreirati model manje i veće debljine od navedene.
- IX. **Ispuna modela:** Ispuna modela se nalazi u unutrašnjosti modela, te nije vidljiva i kod zadanog modela ne utječe na vizualnu kvalitetu.
- X. **Orijentacija sloja – kut rastera:** Najbolju kvalitetu ispisa bez nepravilnosti daje orijentacija sloja pod 90° , odnosno zakretanje modela za 90° po Z-osi u odnosu na početnu poziciju modela u softveru za pripremu datoteke za ispis.
- XI. **Orijentacija modela:** Kod orijentacije modela potrebno je najdužu stranu modela položiti u X-Y ravninu kako bi model imao što manje slojeva, te izbjegavati usmjerenost sitnijih detalja okomito na Y-os. Sitniji detalji modela također bi trebali biti udaljeni od potpornih konstrukcije i podloge koja povećava prijanjanje modela na površinu.
- XII. **Potporne konstrukcije:** potporne konstrukcije softver za pripremu datoteke za ispis automatski postavlja na mjesta koja su pod nagibom većim od 45° u odnosu na Z-os. Prisutnost potpornih konstrukcija zahtjeva uklanjanje istih, te dodatnu obradu površine, što utječe na kvalitetu.

- XIII. **Skaliranje modela:** Model se ne smije povećati iznad definiranih maksimalnih dimenzija ispisa, te se ne smije smanjiti tako da debljina stjenke bude tanja od rezolucije uređaja.
- XIV. **Ljudski faktori:** Ljudski faktor može također utjecati na kvalitetu ispisa. Eliminirati se može edukacijom osoblja, pravilnom instalacijom i rukovanjem uređajem te pravilnim skladištenjem i rukovanjem materijalom.

Navedena parametri definirani su za *Cubex 3D* printer koji radi na principu *Plastic Jet Printing* tehnologije, no primjenjivi su također i na drugim uređajima i tehnologijama.

LITERATURA

1. Militiadis A. B. (2010). *CAD-CAM & Rapid prototyping application evaluation*, Ventus Publishing Aps
ISBN 978-87-7681-676-6
2. E. Canessa, Fonda C., Zennaro M. (2013). *Low-cost 3D printing for science, education & sustainable development*, ICTP—The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Trieste
ISBN 92-95003-48-9
3. Domazet Ž., Krstulović-Opara L. (2009.) *Dizajn Industrijskih proizvoda*, skripta, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Splitu, Split
4. CSC- Leading Edge Program (2012). *3D printing and the future of manufacturing*, dostupno na: http://www.csc.com/innovation/insights/92142-3d_printing_and_the_future_of_manufacturing (20.05.2014.)
5. Vrbanec D. (2011). *Analiza dostupnih postupaka brze izrade prototipova*, Diplomski rad, Strojarski fakultet u Slavonskom brodu Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
6. Božić K. (2008). *Tisak 3D objekata*, Diplomski rad, Grafički fakultet Sveučilišta u Zagrebu
7. Miočić L., (2013). *Konstruktivske karakteristike strojeva za 3D tisak*, Završni rad, Grafički fakultet Sveučilišta u Zagrebu
8. Kekić A. (2012). *Osnove modeliranja za 3D tisak*, Završni rad, Grafički fakultet Sveučilišta u Zagrebu
9. Lukić B. (2009). *Inetrakcija materijala u 3D ink jet tisku*, Diplomski rad, Grafički fakultet Sveučilišta u Zagrebu
10. Baučić T. (2008). *Karakterizacija ink jet 3D otisaka slikovnom analizom*, Diplomski rad, Grafički fakultet Sveučilišta u Zagrebu
11. Krunić S., Perinić M, Maričić S. (2010). *Engineering review*, Vol.30, No.2, (siječanj 2010), 91-100 str.

12. Peek D., Stark E. (2010). *Three Dimensional Printing: Modern Medical Applications*, Research study, College of Liberal Arts California Polytechnic State University
13. Pandey M. *Rapid prototyping technologies, applications and part deposition planning*, dostupno na:
http://web.iitd.ac.in/~pmpandey/MEL120_html/RP_document.pdf
 (25.05.2014.)
14. Gridlogics Technologies (2014). *3D Printing Technology Insight Report - An analysis of patenting activity around 3D-Printing from 1990*, dostupno na:
<http://www.patentinsightpro.com/techreports/0214/Tech%20Insight%20Report%20-%203D%20Printing.pdf> (27.05.2014.)
15. Mahindru D.V., Mahendru P. (2013), *Review of Rapid Prototyping-Technology for the Future*, dostupno na:
https://globaljournals.org/GJCST_Volume13/5-Review-of-Rapid-Prototyping.pdf (27.05.2014.)
16. D'Anna J., (2013). Abuse of 3D printing technology requires makerbot to make an ethical, well-informed decision, dostupno na:
<http://www.pitt.edu/~jld162/wa3.pdf> (28.07.2014.)
17. Prlić O. S., Lacković A., *Polytechnic & Design*, Vol.2, No.1, (2014), 101-106 str.
18. Cooper G. K., (2001). *Rapid Prototyping Technology*, Marcel Dekker Inc., New York
19. The STL Library, URL:
http://www.eng.nus.edu.sg/LCEL/RP/u21/wwwroot/stl_library.htm
 (28.05.2014.)
20. Matilainen V. (2012). *Benchmarking of laser additive manufacturing process*, Bachelor's thesis and seminar, Faculty of Technology - Lappeenranta University of Technology
21. Darbar R., Patel D. M., Pate J. (2013). *International Journal of Engineering Research and Applications – IJERA*, Vol. 3, Issue 1, (Siječanj-veljača 2013.), 743-746 str.
22. Sharma M., Ziemian C., Ziemian S., (2012). Anisotropic Mechanical Properties of ABS Parts Fabricated by Fused Deposition Modelling, dos-

tupno na: <http://www.intechopen.com/books/mechanical-engineering/anisotropicmechanical-properties-of-abs-parts-fabricated-by-fused-deposition-modeling> (28.05.2014.)

23. Brock J. M., Montero M., Odell D., Roundy S. (2000). *Fused Deposition Modeling (FDM) Material Properties Characterization*, dostupno na: <http://ode11.com/projects/me222FinProj.pdf> (21.06.2014.)
24. Bansal R. (2011). *Improving dimensional accuracy of fused deposition modelling (FDM) parts using response surface methodology*, Završni rad, Department of Mechanical Engineering National Institute of Technology
25. Novakova-Marcincinova L., Novak-Marcincin J. (2012). *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol:6 (listopad 2012.), 396-399 str.
26. Stahl H. (2013). *3D Printing – Risks and Opportunities*, dostupno na: <http://www.oeko.de/oekodoc/1888/2013-532-en.pdf> (21.06.2014.)
27. Šerčer M., Godec D., Pilipović A., Aditivne tehnologije za mala i srednje velika poduzeća, dostupno na: http://cateh.eu/en/content/uploads/2013/09/Letak_AdTec_Final.pdf (21.06.2014.)
28. Baltzer A., Kaufmann-Jinoian V., Kurbad A., Reichel K. (2009). *CAD/CAM i potpuna keramika - Estetski nadomjesci u stomatološkoj praksi*, Media ogleđ d.o.o., Zagreb
29. A brief history of 3d printing, URL: http://individual.troweprice.com/staticFiles/Retail/Shared/PDFs/3D-Printing-Infographic_FINAL.pdf (18.04.2014.)
30. The timeline of 3d printing, URL: <https://www.whiteclouds.com/sites/default/files/basic-pages/images/3D-Printing-Timeline.jpg> (18.04.2014.)
31. LIX - 3D printing pen, URL: <http://lixpen.com/> (17.07.2014.)
32. CUBEX MANUAL, URL: http://cubify.s3.amazonaws.com/public/cubex/cubex_user_guide.pdf (15.04.2014.)

33. Plastic Jet Printing Technology, URL: <http://www.3dsystems.com/quickparts/prototyping-pre-production/plastic-jet-printing-pjp> (19.06.2014.)
34. 3D print for beginners, URL: <http://3dprintingforbeginners.com/3d-printing-technology/> (15.07.2014.)
35. Zig Zag – designguide, URL: WWW.ZIGGZAGG.BE (15.07.2014.)
36. Solid Works - skripta, URL: <http://www.cadlab.fsb.hr/download/skripte/33.pdf> (18.04.2014.)
37. RepRap project, URL: <http://reprap.org/> (18.04.2014.)
38. InstaTuts, URL: <http://instatuts.com/featured/a-rapid-prototyping-and-stl-informative-guide/> (20.07.2014.)
39. Rapid 3D- Print Exaples, URL: <http://www.rapid3d.com.au/pages/print-examples> (20.07.2014.)

Popis kratica

3D - Three-dimensional

RP – Rapid Prototyping

MIT- Massachusetts Institute of Technology

SL/SLA -Stereolitography

SLS - Selective Laser Sintering

FDM - Fused Deposition Modeling

LOM - Laminated Object Manufacturing

SLS - Selective laser sintering

MJM - MultiJet Modeling

FFF - Fused Filament Fabrication

PJP - Plastic Jet Printing

PLA - Polylactic Acid

ABS - Acrylonitrile Butadiene Styrene

PC - Polycarbonat

PVA – Polyvinyl Alcohol

CAD - Computer Aided Design

UV – Ultra Violet

STL - STereoLithography

Nd:YAG - Neodymium-Doped Yttrium Aluminium Garnet

Nd:YVO4 - Neodymium-Doped Yttrium Orthovanadate

ND:YLF - Neodymium-Doped Yttrium Lithium Fluoride

PPSF/PPSU - Polyphenylsulfone

Popis slika

Slika 1. Rep Rap project.....	6
Slika 1. Rep Rap project.....	6
Slika 2. Ciklus brze izrade prototipa	12
Slika 3. Shematski prikaz stereolitografije [11]	15
Slika 4. Neke od primjena stereolitografije [1]	16
Slika 5. Shematski prikaz FDM uređaja [11]	18
Slika 6. Funkcionalni modeli izrađeni FDM tehnologijom [1]	19
Slika 7. Shematski prikaz laminirane objektne proizvodnje (LOM) [11].....	20
Slika 8. Primjeri primjene LOM tehnologije [1].....	21
Slika 9. Shematski prikaz SLS tehnologije [11]	22
Slika 10. Modeli nastali primjenom SLS tehnologije [1].....	25
Slika 11. Shematski prikaz 3D tiska [11].....	26
Slika 13. Modeli nastali Z-cast metodom [3]	27
Slika 12. Modeli nastali Z-corp metodom [3].....	27
Slika 14. Podjela materijala korištenih u tehnologiji 3D tiska	28
Slika 15. Najčešće korišteni materijali dostupni na tržištu [14].....	33
Slika 16. Područja primjene brze izrade prototipova [27].....	33
Slika 17. Primjena 3D tiska u medicini i prostetici [4].....	34
Slika 18. Primjena 3D tiska u stomatologiji	34
Slika 19. The Urbee - prototip automobila sa komponentama isprintanim 3D tehnologijom tiska [4]	35
Slika 20. Model zrakoplovnog krila proizveden metodom 3D tiska [4].....	36
Slika 21. Testiranje 3D tehnologije za upotrebu u svemiru [4]	37
Slika 22. Primjeri primjene 3D tiska u ostalim područjima [27]	38
Slika 23. Lix - 3D printer olovka	39
Slika 24. Modeli nastali pomoću Lix 3D printer olovke	40
Slika 25. Princip rada FFF/PJP tehnologije [34].....	43
Slika 26. Cubex 3D printer	44
Slika 27. Dijelovi Cubex 3D printera.....	46
Slika 28. Pisaća glava Cubex 3D printera	46
Slika 29. Prikaz grafičkog sučelja SolidWorks programa.....	47
Slika 30. Prikaz Cubex Software grafičkog sučelja.....	48
Slika 31. Pravilo Vertex-to-Vertex [38].....	52
Slika 32. Prikaz invertiranih normala [35]	53
Slika 33. Import Diagnostics - provjera greški .STL datoteke	54
Slika 34. Razlika kvalitete površine PLA i ABS materijala	56
Slika 35. Razlika kvalitete ispisa PLA i ABS materijala	57
Slika 36. Deformacije PLA i ABS materijala.....	57
Slika 37. Konfiguracija uređaja.....	58
Slika 38. Filament Flow Fail	59
Slika 39. Prikaz spreminika materijala Cubex printera	60
Slika 40. Čip za detekciju materijala.....	60

Slika 41. Prikaz različite debljine slojeva [39]	61
Slika 42. Prikaz različite ispune modela	62
Slika 43. Orijentacija rastera (gornja slika-pogled odozgor, donja slika - 3d pogled)	63
Slika 44. Prikaz utjecaja kuta rastera na kvalitetu modela Izvor: Vlastiti rad autora.....	63
Slika 45. Prikaz različite orijentacije modela	64
Slika 46. Usporedba kvalitete ispisa modela različite orijentacije.....	64
Slika 47. Prikaz modela sa dodanim ploham.....	66
Slika 48. Prikaz dodanih potpornih konstrukcija.....	67
Slika 49. Prikaz modela sa i bez potpornih konstrukcija	67
Slika 50. Prikaz utjecaja slaliranja na model (lijevo: usporedba modela u stvarnoj veličini i umanjenog modela; slika desno: prikaz greške na umanjenom modelu).....	68

Popis tablica

Tabela 1. Usporedba tehnologija 3D tiska	10
Tabela 2. Testni model.....	42
Tabela 3. Specifikacije Cubex 3D printera[32].....	45
Tabela 4. Analiza parametara 3D tiska.....	70