

Korištenje aditivnih tehnologija u mehatronici

Sever, Vladimir

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Bjelovar University of Applied Sciences / Veleučilište u Bjelovaru**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:144:414095>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-27**



Repository / Repozitorij:

[Digital Repository of Bjelovar University of Applied Sciences](#)



VELEUČILIŠTE U BJELOVARU
PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ MEHATRONIKE

**KORIŠTENJE ADITIVNIH TEHNOLOGIJA U
MEHATRONICI**

Završni rad br. 16/MEH/2019

Vladimir Sever

Bjelovar, listopad 2019.

VELEUČILIŠTE U BJELOVARU
PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ MEHATRONIKE

**KORIŠTENJE ADITIVNIH TEHNOLOGIJA U
MEHATRONICI**

Završni rad br. 16/MEH/2019

Vladimir Sever

Bjelovar, listopad 2019.



Veleučilište u Bjelovaru
Trg E. Kvaternika 4, Bjelovar

1. DEFINIRANJE TEME ZAVRŠNOG RADA I POVJERENSTVA

Kandidat: **Sever Vladimir** Datum: 30.09.2019. Matični broj: 001901
JMBAG: 0246073390

Kolegij: **ADITIVNE TEHNOLOGIJE**

Naslov rada (tema): **Korištenje aditivnih tehnologija u mehatronici**

Područje: **Tehničke znanosti** Polje: **Strojarstvo**

Grana: **Proizvodno strojarstvo**

Mentor: **Tomislav Pavlic, mag.ing.mech.** zvanje: **viši predavač**

Članovi Povjerenstva za ocjenjivanje i obranu završnog rada:

1. dr.sc. Stjepan Golubić, predsjednik
2. Tomislav Pavlic, mag.ing.mech., mentor
3. Danijel Radočaj, mag.inž.meh., član

2. ZADATAK ZAVRŠNOG RADA BROJ: 16/MEH/2019

U radu je potrebno:

Opisati osnovne karakteristike aditivnih tehnologija (3D printanje i 3D skeniranje).
Objasniti 3D printere (FDM i SLA tehnologije) i 3D optičke skenere.
Na definiranim nacrtima zadanoga primjera je potrebno pokazati proceduru izrade 3D CAD modela, izraditi dobiveni CAD model korištenjem FDM i SLA tehnologije na 3D printerima, skenirati 3D skenerom dobivene primjere na 3D printerima, te usporediti odstupanja u geometriji CAD modela i skeniranih predmeta.

Zadatak uručen: 30.09.2019.

Mentor: **Tomislav Pavlic, mag.ing.mech.**



Zahvala:

Kao prvo zahvaljujem se mentoru Tomislavu Pavlicu, mag.ing.mech. na podršci i razumijevanju tijekom školovanja , a ponajviše prilikom izrade završnog rada.

Zahvaljujem sinu Jakobu i supruzi Jasminki na razumijevanju i podršci bez koje ne bi nastao ovaj završni rad.

Ovaj rad posvećujem svojoj obitelji, a ponajviše svojoj pokojnoj majci Mariji.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. ADITIVNE TEHNOLOGIJE.....	2
2.1 Konstruiranje CAD modela i eksportiranje u STL datoteku.....	4
2.1.1. Konstruiranje 3D CAD modela ZADATKA pomoću računala	5
2.1.2. Popravak STL datoteke (Healing), rezanje (Slicing) i izrada G koda.....	5
2.1.3. FDM (FFF) tehnologija 3D printanja.....	7
2.1.4. SLA (LCD) tehnologija 3D printanja - Stereolitografija	9
3. MATERIJALI	16
4. SKENIRANJE.....	18
4.1. Proces skeniranja.....	20
4.2. Laserski skeneri.....	21
4.3. Optički 3D skeneri	22
5. PRIKAZ ZADATKA	23
5.1. Upute za izradu zadanog modela.....	23
5.2. Konstruiranje i eksportiranje 3D CAD modela u STL datoteku	24
6. IZRADA STROJNIH UPUTA ZA 3D PRINTER ODNOSNO G-COD SA SLICER PROGRAMOM I POSTAVLJANJE PARAMETARA ZA SLA I FDM TEHNOLOGIJE 3D PRINTANJA	35
6.1. 3D print modela.....	37
6.2. Obrada modela	40
6.3. Skeniranje zadanog modela.....	42
6.4. Usporedba skeniranih modela sa CAD modelom	47
6.5. Usporedba CAD modela i FDM modela.....	48
6.6. Usporedba CAD modela i SLA modela.....	50
7. ZAKLJUČAK	52
8. LITERATURA.....	53
9. OZNAKE I KRATICE.....	54

10. SAŽETAK.....	55
11. SUMMARY	56
12 PRILOZI.....	57

POPIS SLIKA

Slika 2.1. STL datoteka [2]	4
Slika 2.2. Tehnički crtež modela	5
Slika 2.3. Detektiranje greške STL datoteke	6
Slika 2.4. Postavke programa za rezanje STL datoteke ” Repetier Host ”	7
Slika 3.1. FDM printer s jednom i dvije glave za printanje	8
Slika 3.2. Osvjetljavanje sloja materijala	10
Slika 3.3. Model u zelenom stanju	11
Slika 3.4. Princip rada SLA LCD 3D printera	12
Slika 3.5. Radna površina SLA 3D printera	12
Slika 3.6. Posuda za materijal	12
Slika 3.7. Ispiranje smole sa modela	13
Slika 3.8. Jedinica za ispiranje	14
Slika 3.9. SLA 3D printer.....	15
Slika 4.1. Materijal fotopolimer – smola.....	17
Slika 4.3. Materijal prah (puder)	17
Slika 5.3. Optički i laserski skener	21
Slika 5.4. Optički prijenosni 3D skener, tronožac i okretni stol	22
Slika 6.1. Skica vanjske konture	24
Slika 6.2. Ekstrudirana početna kontura skice	25
Slika 6.3. Skica nosača	25
Slika 6.4. Ekstrudiranje nosača	26
Slika 6.5. Skiciranje trećeg nosača	26
Slika 6.6. Ekstrudiranje trećeg nosača	27
Slika 6.7. Skica provrta	27
Slika 6.8. Izrada provrta nosača	28
Slika 6.9. Skica kontura.....	29
Slika 6.10. Rezanje kontura.....	29
Slika 6.11. Skica montažne rupe	30
Slika 6.12. Rezanje konture.....	30
Slika 6.13. Skica montažnih rupa.....	31

Slika 6.14. Izrađene rupe.....	31
Slika 6.15. Skica konture središta	32
Slika 6.16. Rezanje konture središta	32
Slika 6.17. Zrcaljenje modela.....	33
Slika 6.18. Zakošenja i zaobljenja na modelu.....	33
Slika 6.19. STL datoteka.....	34
Slika 6.20. Vizualni G-code	36
Slika 6.21. G-code, CWS datoteka.....	37
Slika 6.22. Gustoća ispune	38
Slika 6.23. Niveliranje ploče za printanje FDM 3D printera	40
Slika 6.24. Suportna struktura FDM tehnologije	41
Slika 6.24. Suportna struktura SLA tehnologije	41
Slika 6.25. Optički skener, Einscan PRO+.....	42
Slika 6.26. Skeniranje 360 stupnjeva oko modela	43
Slika 6.27. Manualno poklapanje (registriranje) skenova.....	45
Slika 6.28. Automatsko poklapanje skenova	45
Slika 6.29. Oblak točaka	46
Slika 6.30. Uvoz CAD datoteke i skeniranog FDM modela.....	47
Slika 6.26. Odstupanja FDM modela	48
Slika 6.27. Odstupanja SLA modela	50

POPIS TABLICA

Tablica 1. FDM usporedba.....	49
Tablica 2. SLA usporedba.....	51

1. UVOD

Tema završnog rada je korištenje aditivnih tehnologija u mehatronici. Cilj rada je konstruiranje zadanog CAD modela, izrada pomoću dvije tehnologije 3D printanja sa 3D printerima FDM (FFF) i SLA (LCD) tehnologija i 3D skeniranje istih modela kako bi se usporedila njihova točnost. Zadatak započinje s konstruiranjem 3D CAD modela "Robotskog članka, ruke robota", te daljnje eksportiranje CAD modela u STL datoteku namijenjenu za 3D printanje. Nakon eksportiranja 3D modela CAD datoteke u STL datoteku modela, prelazi se na postavljanje parametara 3D printanja za svaku od tehnologija. Posebno za FDM i posebno za SLA 3D printer. Nakon izrade fizičkog modela iz polimera (plastike) modeli se skeniraju optičkim 3D skenerom sa strukturnim bijelim svjetlom. Proračun i prikaz razlika odnosno devijacija svakog modela, izrađuje se programom za reverzibilni inženjering, dizajn proizvoda i brzu izradu prototipova "Geomagic Studio". Program omogućava importiranje CAD i STL datoteke u isti radni prostor u kojem se analiziraju. Dobiveni rezultati na kraju se uspoređuju. Rezultati smiju odstupati u tolerancijama koje je deklarirao proizvođač svake od korištene opreme. Tolerancija za skeniranje do ± 0.1 mm, za 3D printer FDM tehnologije ± 0.1 mm, te za 3D printer SLA tehnologiju $\pm 3\%$ veličine modela.

2. ADITIVNE TEHNOLOGIJE

Iako spominjanje aditivnih tehnologija započinje još daleke 1980. godine, Dr. Hideo Kodama izumio je tehnologiju koja laserskom zrakom stvrdnjava smolu (SLA), ali je ne uspijeva komercijalizirati. Godine 1986., inovacijom prve komercijalne SLA tehnologije za Rapid Prototyping, te STL " Sterolitography - Standard Tessellation Language " formata datoteke, Chuck Hull osnivač tvrtke 3D Systems, započinje brzi razvoj aditivnih tehnologija [1].

U to vrijeme aditivne tehnologije koristile su većinom samo tvrtke koje su imale velike budžete za razvoj. Vremenom, počele su se razvijati nove vrste aditivnih tehnologija, kao što su SLS, FDM, Bioprinting i druge tehnologije. Godine 2004. Adrian Bowyer osniva projekt RepRap, " Open Source projekt " koji se brzo širi svijetom. Nekoliko godina kasnije, 2007. napravljen je prvi RepRap stolni 3D printer.

STL datoteka najvažniji je i najkorišteniji format datoteke za 3D printanje, ona opisuje geometriju 3 dimenzionalnog oblika (modela) i njegove triangulirane površine mrežom trokutića, a može se digitalno rezati takozvani " digital slicing ", te umetati ispune koje određuju čvrstoću i stabilnost modela prilikom 3D printanja [2]. Aditivne tehnologije podrazumijevaju niz naziva ove tehnologije: 3D printanje, aditivna proizvodnja, direktna proizvodnja, brza izrada prototipova (rapid prototyping), brza proizvodnja (rapid manufacturing). Aditivne tehnologije termin je za moderne tehnologije koje mijenjaju tradicionalni način proizvodnje, dodavanjem materijala " sloja na sloj ", što je suprotno tradicionalnim tehnologijama proizvodnje odvajanja čestica materijala glodanjem, tokarenjem, bušenjem, brušenjem. Za 3D printanje koriste se različiti polimeri i metali.

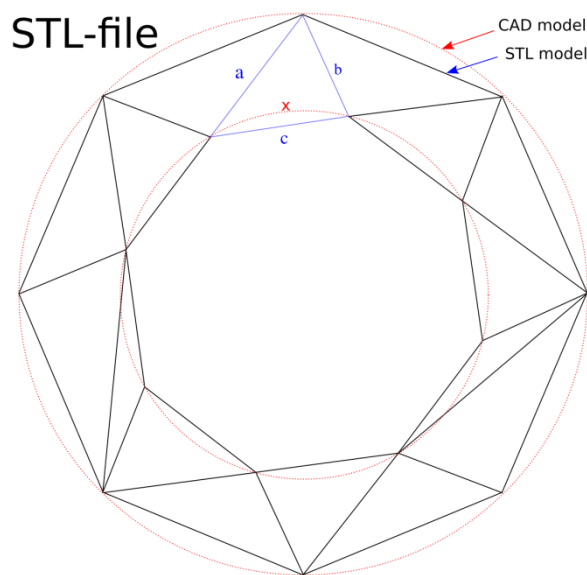
Aditivnim načinom proizvodnje štedi se materijal jer se koristi samo onoliko materijala koliko je potrebno da bi se izradio proizvod. Praktički pri proizvodnji nema otpadnog materijala što ovu tehnologiju čini " ZELENOM ", te se time ujedno čuva i okoliš. Danas postoji više različitih vrsta 3D aditivnih tehnologija različitih imena kao što su: FDM, SLA, DMLS, 3DP-binder jeting, LMS, DLMS, SLS, Bio printing i niz drugih. Sve ove tehnologije koriste takozvane " digitalne materijale " koji su vrlo slični po strukturi i mehaničkim svojstvima današnjim tradicionalnim materijalima. Mogu biti: čvrstom (prah, žica, granule, papir, limovi...), ili kapljevitom (smole) stanju. Aditivne tehnologije omogućuju izradu proizvoda, koji se zbog svoje kompleksnosti ne bi mogli izraditi tradicionalnim tehnologijama. Aditivnim se tehnologijama materijal nanosi (dodaje), a ne odstranjuje se kao kod

tradicionalnog načina izrade. Kod tradicionalnog načina izrade proizvoda koriste se razni alati za obradu, odnosno koriste se svrdla ili brusila kojima se oblikuje budući proizvod. 3D printeri koriste više načina rada, odnosno tehnika proizvodnje: ekstrudiranje materijala kroz grijaču mlaznicu, lasersko taljenje materijala, prskanje kapljica materijala kroz čitav sklop mlaznica, laminiranje slojeva i skrućivanje tekućeg materijala. Svaka na svoj specifičan način spaja materijal u željeni oblik prilikom čega nastaje konačan oblik željenog proizvoda. Aditivne tehnologije koriste se u svim segmentima industrije od auto industrije, avio industrije, medicine, zabavne i filmske industriji, graditeljstvu u obrazovnim institucijama i drugdje. Zbog isteka patentnih prava i velikog broja novih proizvođača pada cijena tehnologije i pojave popularnih ” stolnih 3D printera ”. Sve se više počinju koristiti za hobi i edukaciju. U konačnici, aditivne tehnologije nude jeftiniju, bržu i kvalitetniju proizvodnju u svim segmentima mnogih današnjih poslova te za stvaranje budućih novih poslova. Za izradu fizičkog modela za svaku od aditivnih postupaka neophodne su sljedeće faze:

1. Konstruiranje 3D CAD modela
2. Eksportiranje CAD modela i izrada STL datoteke
3. Popravak (Healing) datoteke
4. Postavljanje parametara 3D printera (Slicing modela) – G-code
5. Prebacivanje G-coda na 3D printer
6. Kalibriranje površine za printanje
7. Proces 3D printanja
8. Odstranjivanje gotovog modela
9. Post proces (odstranjivanje suportnog materijala, ispiranje, brušenje...)
10. Upotreba fizičkog modela

2.1 Konstruiranje CAD modela i eksportiranje u STL datoteku

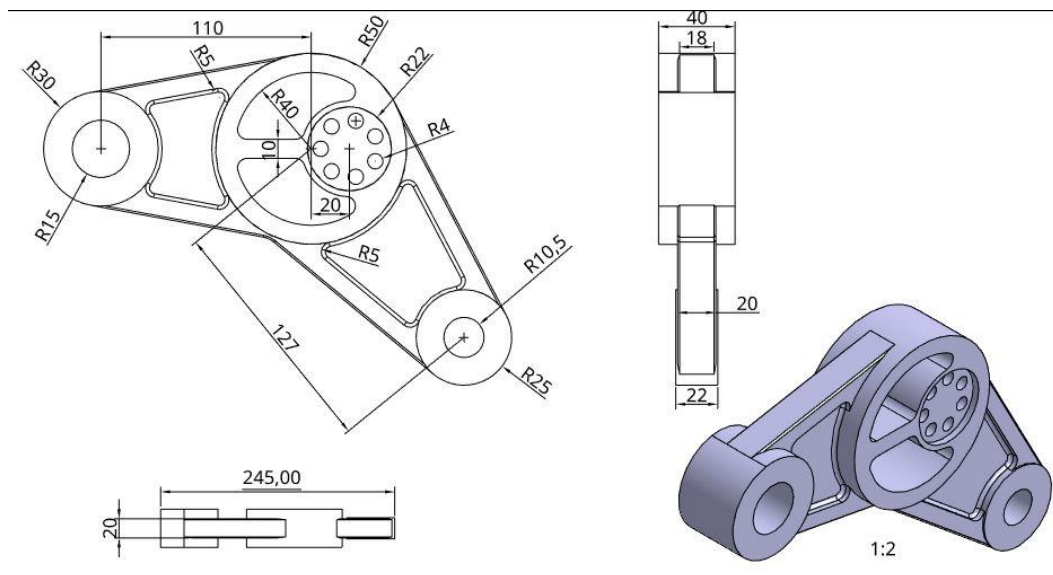
Kako bi se započeo proces 3D printanja, kreće se sa konstruiranjem 3D CAD modela (Solid modela) budućeg proizvoda. Za modeliranje se koriste bilo koji od programa za 3D konstruiranje (Onshape, Solidworks, Catia, ProEnginner, Blener, Sketchup, Tinkercad i drugi). Konstruirani željeni 3D oblik modela kasnije se izrađuje jednom od aditivnih tehnologija. Svako konstruiranje započinje izradom skica "2D kontura" koje se korištenjem programskih alata to jest modeliranjem pretvaraju u solid model odnosno čvrsti model. Nakon završetka 3D konstruiranja isti se 3D CAD model eksportira u STL datoteku. STL datoteka bazna je datoteka koja se koristi za 3D printanje. Ona opisuje samo geometriju površine 3D modela, ali ne i unutrašnjost, odnosno solid model. STL model je prezentiran određenim brojem trokuta (trianglova), a njihov broj ovisi o rezoluciji modela. STL datoteka monokromna je bez boje i ne sadrži teksture. Trokutići se sastoje od linija (normala) i točaka. STL datoteke prikazana je slikom 2.1.



Slika 2.1. STL datoteka [2]

2.1.1. Konstruiranje 3D CAD modela ZADATKA pomoću računala

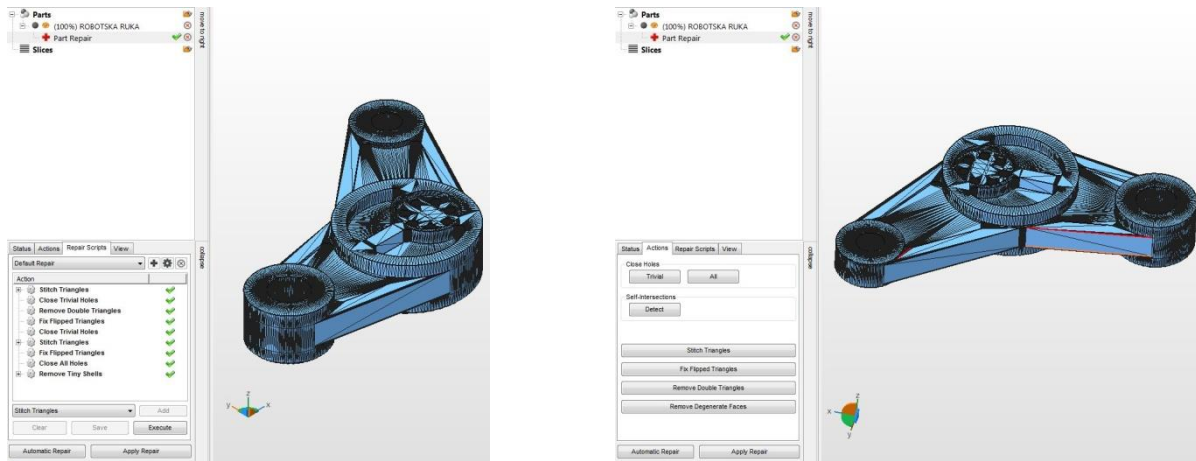
Modeliranje je odrađeno u Onshape 3D CAD programu. Izradom skica modela zadanih dimenzija te tehnikama ekstrudiranja i bušenjima nastaje 3D model robotske ruke. Skiciranjem kontura modela, nizom tangentno povezanih linija i krugova zadanih dimenzija, konstruira se model sa alatima za ekstrudiranje, rezanje, zaobljivanje i zakošavanje [3].



Slika 2.2. Tehnički crtež modela

2.1.2. Popravak STL datoteke (Healing), rezanje (Slicing) i izrada G koda

Prilikom eksportiranja CAD modela u STL datoteku mogu nastati oštećenja STL datoteke. Ta oštećenja mogu se provjeriti i popraviti programom NetFabb. NetFabb je program za aditivnu proizvodnju, dizajn i simulacije. Njime se pronalaze i popravljaju nastale greške prilikom konverzije između CAD modela u STL datoteku. Greške kao što su presijecanja površina, rupe, invertirani trokutići odnosno normale, duplicirani trokutići, degenerativna lica i ljuske. Program vizualno prikazuje deformacije modela tako što mjesto deformacije prikazuje bojom (crvenom) [12]. Proces detektiranja greške u STL datoteci, prikazan je slikom 2.3

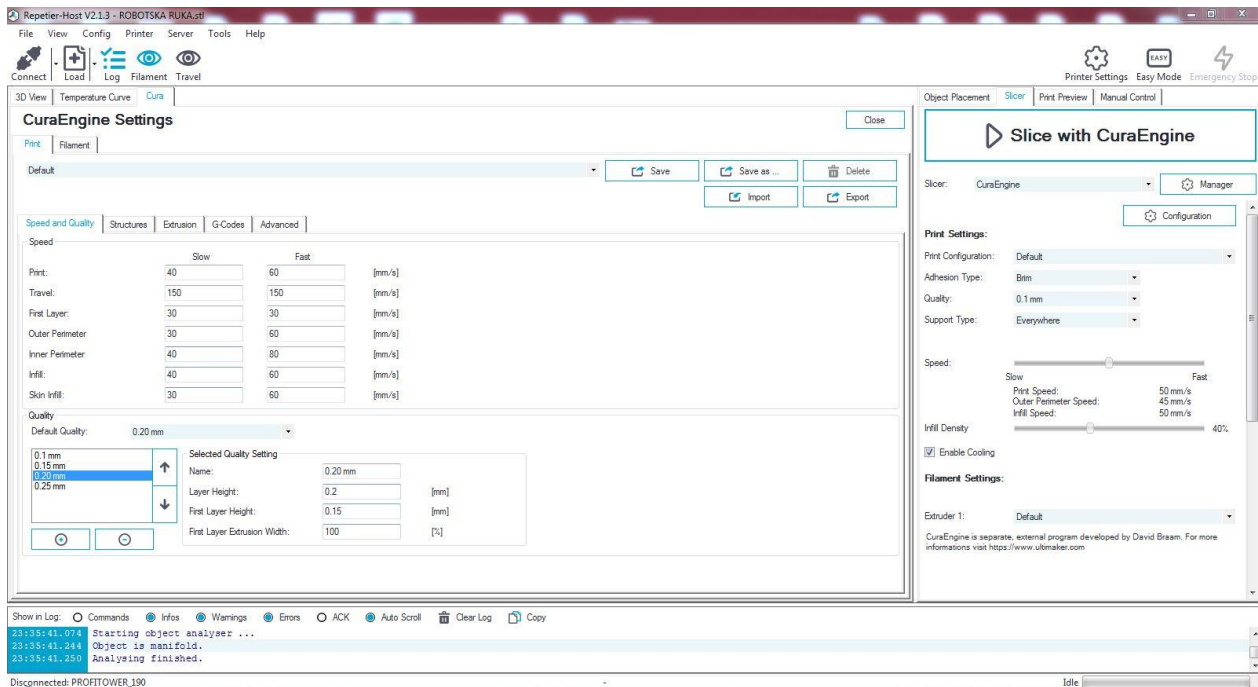


Analiza STL datoteke

Detektirana degenerativna lica

Slika 2.3. Detektiranje greške STL datoteke

Eksportiranje CAD modela u STL datoteku omogućuje sam program u kojem se i konstruira 3D model. Stvorena STL datoteka importira se u Slicer program “Repetier Host” u kojem se određuju postavke 3D printanja kao što je određivanje visine slojeva (rezolucija modela), izrada potporne strukture (ako je potrebno) jer se model ne bi pravilno mogao izraditi zbog utjecaja gravitacije, odnosno kako se za vrijeme izrade ne bi srušio na samoj podlozi za printanje. Potporne strukture se postavljaju na mjestima kao što su šupljine i ispusti (overhangs) i gdje su kosine na modelu obično manje od 45 stupnjeva. U Slicer programu određuju se brzine rada stroja (3D printera), oblici ispune (linije, pčelinje saće, oktagon, trokutast, zig zag), gustoća ispune (od 0 – 100%), debljina vanjske ljuske modela parametar koji direktno utječe na čvrstoću modela, temperatura zagrijavanja mlaznice ekstrudera, a koja ovisi o vrsti materijala koji se printa, temperatura grijaće ploče te ostale postavke. Nakon određivanja postavka 3D printanja izrađuju se strojne upute za sam 3D printer, takozvani G-code (3D printer Profimaker) odnosno putanja kretanja glave 3D printera koja nanosi otopljeni materijal na radnu ploču 3D printera. Slika podešavanja postavka 3D printera u Slicer programu Repetier Host 2.4.



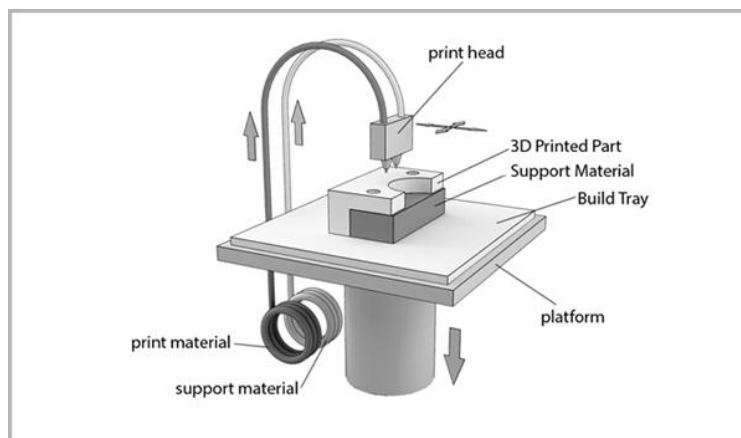
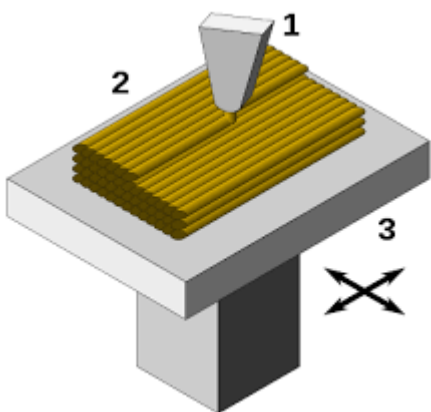
Slika 2.4. Postavke programa za rezanje STL datoteke " Repetier Host "

2.1.3. FDM (FFF) tehnologija 3D printanja

Tehnologijom ekstrudiranja polimernog materijala kroz vruću mlaznicu na grijanu površinu 3D printera, izrađuje se fizički model dodavanjem (ekstrudiranjem) materijala sloj na sloj do konačnog izgleda modela. Ova vrsta 3D printera koristi termopolimerne materijale koji mogu biti u obliku žice ili granula. FDM 3D [4] printeri također mogu koristiti i metalni materijal u obliku prahe, smještenog u opnu vezivnog materijala koja ujedno pri taljenju, služi kao vezivo za spajanje slojeva, a koje se kasnije termičkim procesom zagrijavanjem na visoke temperature odvaja iz nastalog metalnog modela. 3D printeri FDM tehnologije mogu sadržavati više glava za 3D printanje. Svaka može ekstrudirati različiti materijal. Takvi 3D printeri mogu izrađivati višebojne modele, mogu koristiti vodo topive (PVA) materijale koji služe kao potporna struktura za podršku na kosinama modela manjim od 45 stupnjeva.

Korištenjem više glava za printanje mogu se izrađivati modeli od kompozitnih materijala pri čemu jedna glava nanosi jednu vrstu materijala (kao primjer: ugljična vlakna), a druga glava nanosi različiti materijal (kao primjer onix). Zbog odličnih svojstava ovih materijala mogu se izrađivati funkcionalni modeli. [14]. Veličina modela ograničena je veličinom radne površine 3D printera na

kojoj nastaje model. Za materijale koji se tope na višim temperaturama ($>220^{\circ}\text{C}$, ABS), a pri hlađenju se skupljaju treba obratiti pozornost na mogućnost odvajanja od radne ploče 3D printera ili delaminacije slojeva odnosno odvajanja slojeva. Za 3D printanje takvih materijala poželjno je da je 3D printer konstrukcijski potpuno zatvoren kako bi se održavala stalna temperatura komore u kojoj nastaje model. Temperatura komore direktno utječe na stabiliziranje materijala pri hlađenju (ABS, Nylon, PA). Za precizno 3D printanje vrlo je važna pravilno nivelirana površine za printanje, te kalibrirane X,Y,Z osi printera i ekstruder, kako bi se izradio precizan, vizualno prihvatljiv i svrsishodan izradak.



Slika 3.1. FDM printer s jednom i dvije glave za printanje

2.1.3.1. Princip rada FDM 3D printera

Materijal (filament, granule, prah u opni) se dovodi do glave za printanje. Termistor ugrađen na glavi 3D printera zagrijava mlaznicu u kojoj se topi materijal i izlazi na površinu za printanje. Materijal se odmah hladi i stabilizira pomoću ventilatora smještenog na samoj glavi printera. Sloj materijala ostaje pričvršćeni na površini za printanje. Nakon izrade sloja, površina na kojoj se odvija proces printanja, spušta se za visinu podešene visine sloja i nastavlja se nanošenje slijedećeg sloja materijala. Postupak se ponavlja sve dok se ne završi izrada kompletnog modela. Po završetku procesa izrađeni model skida se s površine i pristupa obradi modela. Ako se koristila potporna struktura potrebno je odvojiti je, odnosno napraviti "Post proces".

2.1.3.2 Prednosti FDM tehnologije

Cijena, pristupačan materijal – pristupačan proizvod

Velik izbor termoplastika za izradu prototipova

Mogućnost izrade više modela odjednom

Jednostavan i siguran proces

2.1.3.3 Nedostaci FDM tehnologije

Niska rezolucija i dimenzijska točnost u odnosu na druge tehnologije

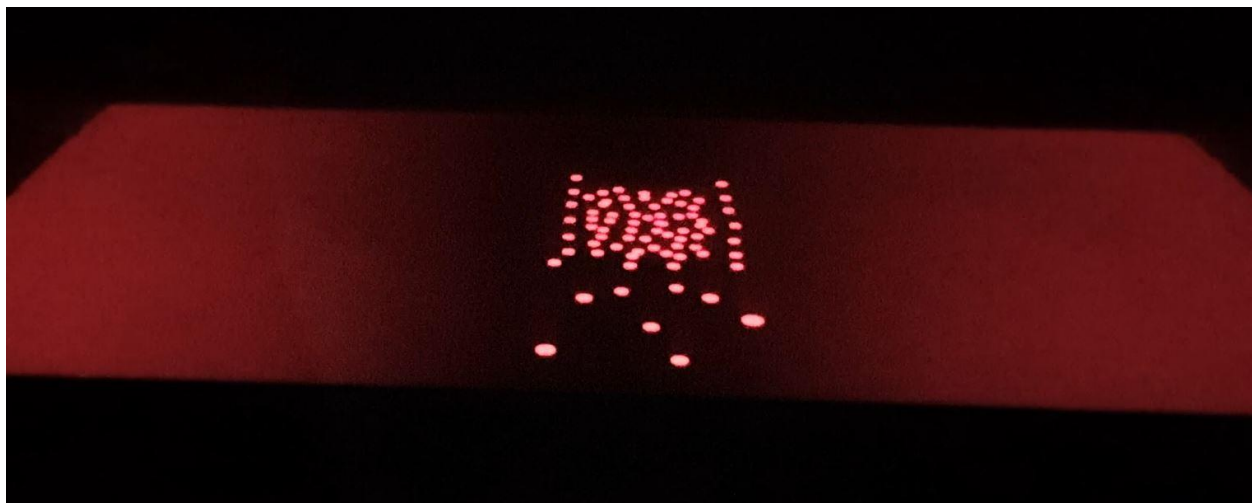
Vidljive linije slojeva odnosno rezolucija modela

Potrebna naknadna obrada (Post proces) modela kako bi se maknula potporna struktura ili brušenje kako bi se izradila glatka površina.

Mogućnost odvajanja modela od ploče za printanje i delaminacije slojeva

2.1.4. SLA (LCD) tehnologija 3D printanja - Stereolitografija

U zadatku se koristi Liquid Cristal Daylight (LCD) tehnologija 3D printanja koja je jedna od podgrupa SLA tehnologije. U procesu SLA 3D printanja odvija se fotopolimerizacija. Fotopolimerizacija je postupak pri kojem fotopolimerni materijal apsorbira energiju svjetla te se skrućuje. Proces 3D printanja započinje izborom materijala i željene debljine sloja modela. Materijal koji koristi SLA tehnologija u tekućem je stanju - smola. Materijal može biti UV ili Daylight smola. Osnovna razlika između ta dva materijala je u vrsti svjetla potrebnog za skrućivanje. Skrućivanje UV smole vrši UV svjetlo, dok kod printera koji koriste Daylight materijal, skrućivanje vrši bijelo ili plavo LED svjetlo. Slika 3.2 prikazuje osvjetljavanje sloja materijala.



Slika 3.2. Osvjetljavanje sloja materijala

LCD Monitor 3D printera projicira svjetlosnu sliku 2D presjeka modela. Svjetlo se probija kroz tanku plastičnu foliju (FEP) transparentnog filma dna posude (VAT) u kojoj se nalazi radni materijal. Osvjetljivanjem materijal kruti, odnosno polimerizira. Model koji se izrađuje pričvršćen je za radnu površinu 3D printera. Završetkom osvjetljivanja radnog materijala, radna se površina podiže za jedan sloj (Bottom up). Veličina modela izrađenog SLA LCD 3D printerom "ograničena" je veličinom LCD monitora. SLA 3D printeri koji sadrže UV laser, isti projicira UV zraku (određene valne duljine) po površini materijala koja stvrdnjava sloj 2D presjeka modela. Za model koji se izrađuje SLA tehnologijom obavezno se izrađuje potporna struktura (support) koja drži model na radnoj površini 3D printera. Ako bi se model odvojio od iste, ostao bi plivati u posudi s materijalom što bi rezultiralo da se slojevi ne bi mogli vezati jedan na drugi i proces printanja bio bi neuspješan. Po završetku 3D printanja model je u takozvanom zelenom stanju (Green State), što znači da je model koji se izradio na radnoj površini još prilično mekan odnosno proces polimerizacije nije u potpunosti završen i izrađeni model još nije dovoljno krut kako bi bio upotrebljiv. Za potpuno stvrdnjavanje materijala, model se izlaže UV svjetlu, (bijelom svjetlu ili danjem svjetlu), što ovisi o vrsti materijala i tehnologiji. Pritom se proces polimerizacije završava i model postaje krut i upotrebljiv. SLA 3D printer zatvoren je zaštitnim poklopcem tamne boje (narančasti, crveni, žuta) koji štiti materijal od direktnog svjetla kako ne bi došlo do ne kontrolirane fotopolimerizacije. Fotopolimerni materijali su vrlo osjetljivi na svjetlo. Prije samog početka 3D printanja, obavlja se nivelacija

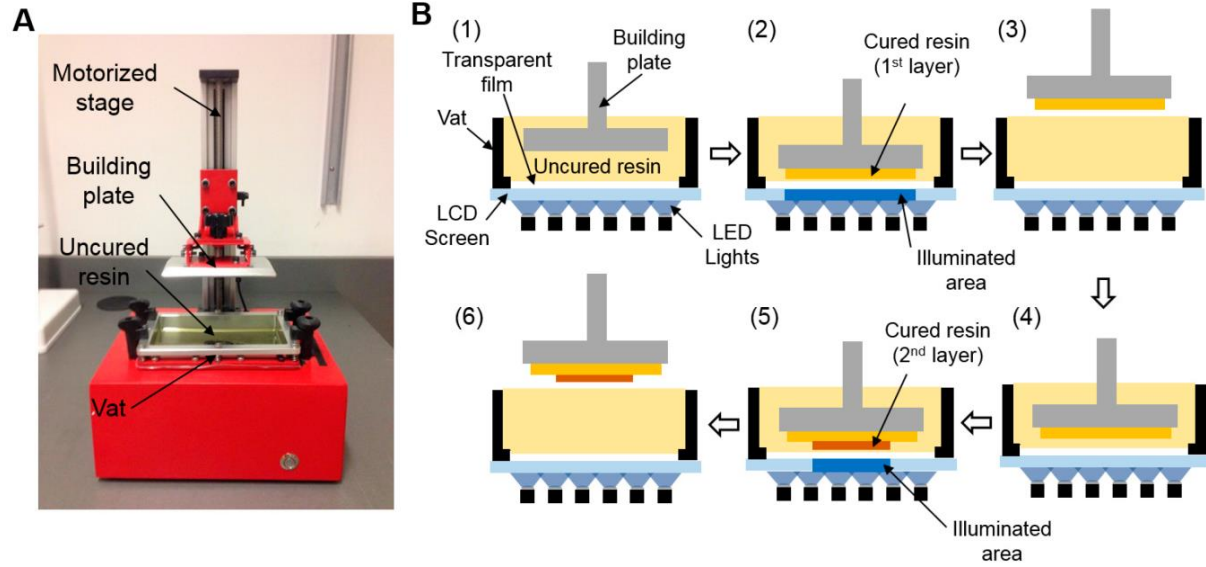
platforme za printanje kao i kod ostalih tehnologija 3D printanja. Slika 3.3. prikazuje model u zelenom stanju.



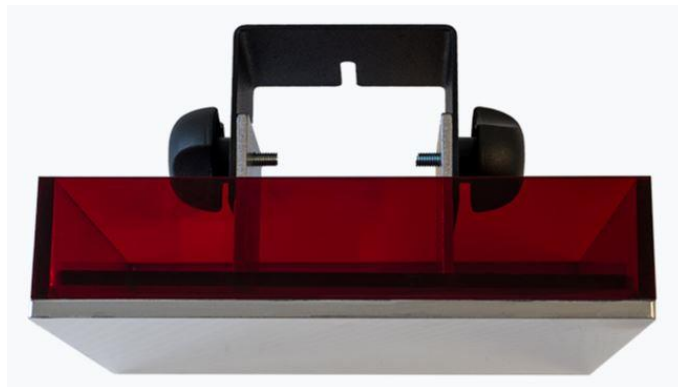
Slika 3.3. Model u zelenom stanju

2.1.4.1 Princip rada SLA LCD 3D printera

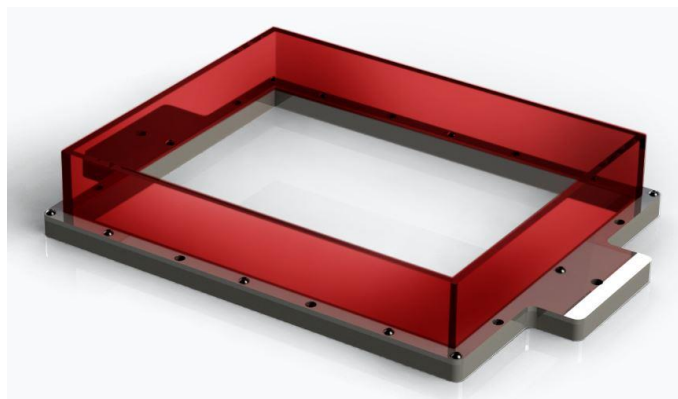
Preko USB priključka ili bežično (Wireless) uvodi se CWS datoteka modela koja sadrži slike 2D kontura modela “PNG formata”, odnosno slike koje sadrže pozicije osvjetljenja kroz koje se svjetlo probija do materijala koji se pri tome stvrdnjava. Nakon određenog vremena osvjetljavanja materijala i završetka izrade sloja, radna površina s modelom se podiže kako bi ispod nje ušao svjež materijal koji će biti osvijetljen. Nakon toga se platforma ponovno spušta do visine na kojoj nastaje novi sloj. Proces se ponavlja sve dok se ne model ne kompletira. Nakon procesa 3D printanja pristupa se skidanju modela sa radne površine na kojoj je nastao isti. Nakon skidanja model se ispiru kemikalijama ili sa sapunicom. Ispiranje može biti ručno ili automatsko u jedinici za pranje. Kako je model još u mekom takozvanom zelenom stanju mora se izložiti dodatnom osvjetljavanju kako bi se u potpunosti završio proces polimerizacije. Model se stavlja u komoru s UV svjetlom ili direktno na dnevno svjetlo na određeno vrijeme do potpunog stvrdnjavanja. Po završetku stvrdnjavanja s modela se odstranjuje suportni materijal, a njegovi se ostaci pobruse kako bi površina istog bila bez kozmetičkih anomalija. SLA tehnologija najviše se koristi u zlatarskoj industriji, stomatologiji, ljevarstvu, auto industriji, avio industriji, marketingu, medicini, modelarstvu za izradu preciznih i kompleksnih prototipova.



Slika 3.4. Princip rada SLA LCD 3D printera



Slika 3.5. Radna površina SLA 3D printera



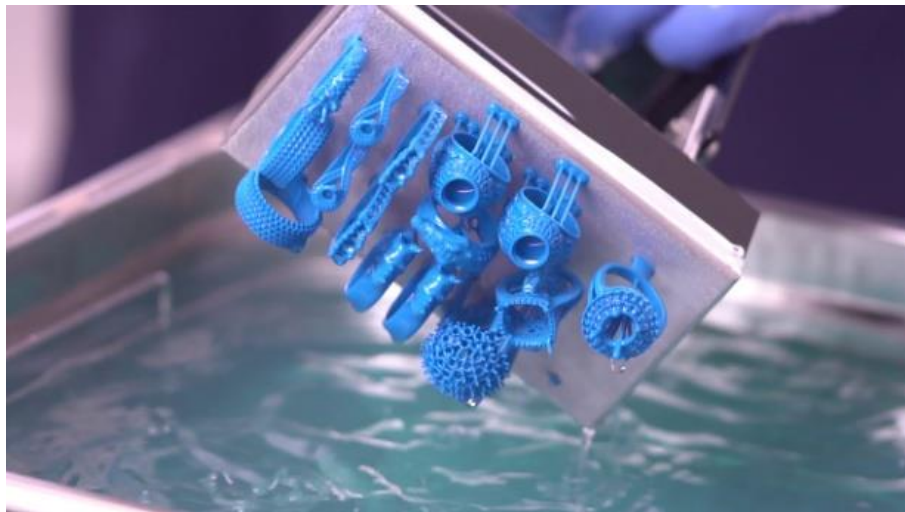
Slika 3.6. Posuda za materijal

2.1.4.2 Prednosti SLA tehnologije 3D printera

1. Idealna glatka površina
2. Modeli za vizualizaciju (marketing)
3. Velika preciznost
4. Mogućnost printanja zamršenih struktura

2.1.4.3. Nedostaci SLA tehnologije 3D printera

1. Mali radni volumen (osim industrijskih SLA printera)
2. Visoka cijena 3D printera i materijala
3. Modeli nisu pogodni za opterećenja, nisu za proizvodnju funkcionalnih modela
4. Uvijek potrebna izrada potporne strukture (suporta)
5. Velika naprezanja po Z osi (mogućnost odvajanja sa platforme, pucanja površine modela, kozmetička oštećenja površine modela)



Slika 3.7. Ispiranje smole sa modela



Slika 3.8. Jedinica za ispiranje



Slika 3.9. SLA 3D printer LC PRO [10]



Slika 3.9. SLA 3D printer LC HR2 [15]

3. MATERIJALI

Materijali koji se koriste kod tehnologije FDM 3D printanja mogu biti raznih boja i mehaničkih svojstava. Krutog su stanja u obliku žice, granula ili praha. Mogu se koristiti termopolimeri kao što je PLA (Polilaktična kiselina) biokompatibilan materijal koji se može reciklirati te ponovo koristiti, ABS, PP, materijali poput drva, karbonska vlakna, PA, PVC, PC, ASA, ULTEM, NAJLON i ostali specijalizirani materijali. Posebnu pažnju potrebno je posvetiti skladištenju odnosno čuvanju materijala. Vlažan materijal može prouzročiti začepljenje mlaznice, kozmetička oštećenja na modelu odnosno neuspjeh printanja. Materijal je potrebno čuvati na suhom i tamnom mjestu. Materijali koji se koriste kod SLA tehnologije 3D printanja kemijski su materijali u tekućem stanju - smole. To su razne vrste fotopolimernih smola koje se razlikuju po valnoj dužini prodiranja svjetla odnosno snazi svjetla te potrebnom vremenskom periodu trajanja izlaganja svjetlu kako bi došlo do skrućivanja. Ove materijale većinom izrađuju sami proizvođači 3D printera za svoje SLA 3D printere koji imaju kemijski odjel (Photocentric). Ovi materijali sličnih su mehaničkih svojstava kao i tradicionalni materijali, a te vrste materijala su: Firm, Hard, Flexibile, High Tensile, Dental i ostali. 3D printeri SLA tehnologije imaju mogućnost printanja i materijala kao što je vosak i keramika za korištenju u elektronici, ljevarstvu, zlatarstvu, stomatologiji kao i za druge potrebe lijevanja. Za FDM printanje modela iz zadatka koristi se PLA materijal. Za 3D printanje istog sa SLA LCD tehnologijom koristi se tekuća Daylight fotopolimerna smola, naziva "Firm low shrinkage".



Slika 4.1. Materijal fotopolimer – smola



Slika 4.2. FDM materijali



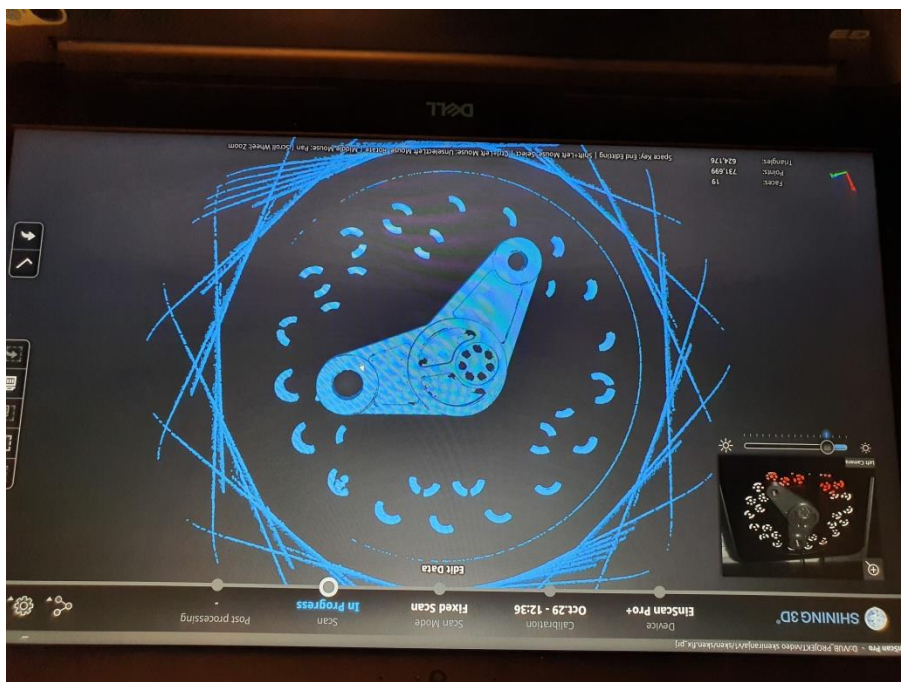
Slika 4.3. Materijal prah (puder)

4. SKENIRANJE

Skeniranje je bez kontaktni proces digitalnog prikupljanja odnosno mjerenja geometrijskih podataka s nekog fizičkog oblika, pomoću laserske zrake ili svjetlosnih uzoraka koji se projiciraju na objekt skeniranja. Pri tome se prikupljaju podaci o površini objekta takozvani " Oblak točaka ". 3D skeniranjem se snima fizički objekt kako bi se dobio njegov točan oblik ili dimenzije odnosno trodimenzionalna kompjuterska prezentacija.

Oblak točaka možemo zamisliti kao sirov (Raw) sken, odnosno snimku koja se naknadno filtrira i procesuirana. Oblak točaka je skup točaka unutar koordinatnog sustava. Svaki sken se sastoji od milijuna točaka koje su snimljene tijekom procesa skeniranja. Svaka točka sadrži nekoliko mjerenja. Ima svoju X, Y i Z vrijednost i vektor koji je spojen sa svakom od tih točaka i određuje orijentaciju. 3D skeneri također snimaju boje koje spremaju u RGB vrijednosti (red, green, blue) i njihov intenzitet, odnosno jasnoću boje. Za pregled oblaka točaka koristi se više programa kao što su MeshLab, GOM Inspect i drugi. Oblak točaka može se spremati u više formata kao što su XYZ format koji je tekstualni format, a sadrži XYZ vrijednosti, zatim PLY, PTS, LAS i mnoge druge formate. Nakon skeniranja oblak točaka konvertira se u poligonalnu mrežu. Ovaj proces odrađuje algoritam na način da povezuje točke u trokutiće koji tvore poligonalnu mrežu. Poligonalna mreža se kasnije koristi u programima za obradu poligonalnih mreža. Slika 6.29. prikazuje oblak točaka.

3D Skeneri se mogu koristiti za kontrolu kvalitete, reverzibilni inženjering ili dizajn. Postoje laserski skeneri i optički 3D skeneri. Laserski 3D skeneri rade na principu izračunavanja proteklog vremena između slanja laserske zrake sa senzora do povratka laserske zrake, odnosno reflektiranja laserske zrake od objekta skeniranja natrag do senzora. Optički 3D skener sastoji se od projektora koji projiciraju neki od svjetlosnih oblika (strukturu) na objekt koji se skenira i kamere koje snimaju mjesta gdje se i kako se iskrivljuje projicirani uzorak na predmetu koji se skenira. Slika 5.1. prikazuje proces 3D skeniranja modela.



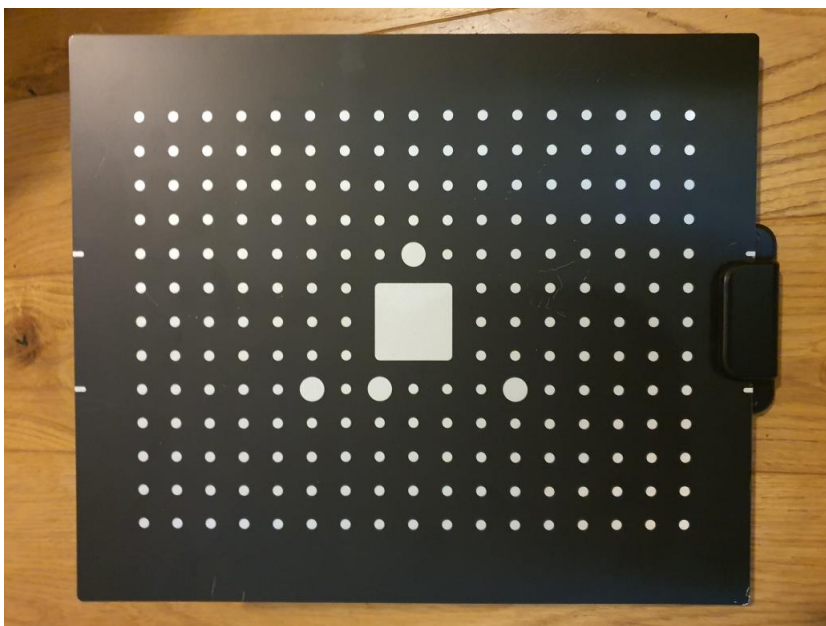
Slika 5.1. Proces 3D skeniranja

Pri tom se obavlja triangulacija površine, izračunavaju se udaljenosti i lokacije tisuća točaka na mjestima na koje je udarila svjetlost [6].

Ovi skeneri mogu koristiti plavu ili bijelu svjetlost. Referentne točke ovih skenera su kamere i projektor. Nakon završetka skeniranja kao rezultat se dobiva oblak točaka koji prezentira digitalni trodimenzionalni oblik skeniranog objekta. Nakon svakog skena (slanja uzorka svjetla) objekt koji se skenira te zaokreće za određeni broj stupnjeva, te se proces ponavlja dok se objekt ne odskenira čitav sa svih strana, odnosno objekt koji se skenira rotira se 360 stupnjeva, kako bi se prikupili podaci cijelog objekta. Osnovna razlika između optičkih skenera je u boji svjetla koje projiciraju, odnosno plavo ili bijelo svjetlo. Plavo svjetlo stvara veću rezoluciju zbog svoje kraće valne dužine prodornosti što omogućuje veću točnost nego bijelo svjetlo koje se lakše iskrivljuje i rasipa što rezultira manjom točnosti skeniranja [7].

4.1. Proces skeniranja

Prije samog početka skeniranja potrebno je napraviti kalibraciju skenera, zbog preciznosti skeniranja odnosno mjerenja. Ovisno o vrsti skenera i objekta koji se skenira potrebno je napraviti pripremu površine objekta. Površine od kojih se reflektira svjetlo, transparentna ili tamna površina teško su vidljive senzoru skenera pa je takve površine potrebno pripremiti za skeniranje premazom materijala koji će prekriti takva mjesta. Materijalima kao što je puder ili drugi antirefleksni materijal. Ako se radi sa skenerom koji ima rotacijsku tablu, objekt se postavlja na sredinu te table i započinje se sa skeniranjem. Nakon svakog završetka sekvence skeniranja rotacijska tabla zaokreće se za određeni broj stupnjeva i ponavlja se sekvenca ili slanje svjetlosnog uzorka na objekt skeniranja. Proces se ponavlja dok se objekt koji se skenira ne okrene svih 360 stupnjeva oko svoje osi ili dok se ne prikupi dovoljna količina podataka. Po završetku skeniranja pristupa se obradi prikupljenih podataka takozvanog oblaka točaka. Zatim se pristupa registriranju odnosno poklapanju skenova, čišćenju neželjenih podataka, zatvaranju rupa, izoštravanju ili zaglađivanju površine. Na kraju se izrađuje mreža malih trokuta koji prezentiraju površinu skeniranog objekta. Dobivenu mrežu moguće je eksportirati u više formata kao što su: STL, OBJ, AMF, 3MF i dr. kao vodonepropusnu čvrstu (watertight) ili vodopropusnu (šuplju) datoteku. Slika 5.2. prikazuje kalibracijsku ploču.



Slika 5.2. Kalibracijska ploča

4.2. Laserski skeneri

3D laserski skeneri namijenjeni su za mjerenje finih detalja i zahvaćaju free-form oblike. Brzo generiraju točne oblake točaka. Laserski skeneri koriste se za mjerenja i kontrolu kontura površina kompleksnih geometrija za koje je potrebna velika količina te tamo gdje bi bilo nepraktično korištenje tradicionalnih mjerenja (pomičnim mjerilima, mikrometrima). Postoji više vrsta laserskih skenera. Jedni su praktičniji za mjerenja kratkog dometa, a drugi za srednji ili daleki domet mjerenja. Mogu se skenirati vrlo mali objekti kao što je prsten ili zub, ili vrlo veliki objekti kao što je cijeli avion ili zgrada. Postoji više vrsta laserskih 3D skenera: prijenosni ručni skeneri, skenerske ruke, CMM, tragači (Tracker). Prikaz 3D laserskog i optičkog skenera na slici 5.3.

Prednosti laserskih skenera:

- mogu skenirati objekte sjajnih i tamnih površina
- manja osjetljivost na ambijentalno svjetlo i promjene svjetlosnih uvjeta
- prenosivost
- jeftiniji su i jednostavniji za korištenje



Slika 5.3. Optički i laserski skener

4.3. Optički 3D skeneri

Optički 3D skeneri projiciraju struktorno svjetlo odnosno uzorke, bijelog ili plavog svjetla. Takvi skeneri projiciraju svjetlosni uzorak u obliku širokih linija, blokova ili nekih drugih oblika na objekt koji se mjeri. Optički 3D skener opremljen je s dvije ili više kamera, odnosno senzora za snimanje oblika. Koriste istu metodu triangulacije kao i laserski skeneri, a mjere udaljenosti i promjene, odnosno devijacije uzorka svjetla na objektu koji se skenira. Ovi skeneri mogu biti prenosivi ili se mogu montirati na tronožac. Prikaz na slici 5.4.

Prednosti optičkih 3D skenera sa strukturnim svjetlom:

- velika brzina skeniranja
- visoka rezolucija
- velika točnost
- sigurni su za skeniranje ljudi –Eye Safe



Slika 5.4. Optički prijenosni 3D skener, tronožac i okretni stol

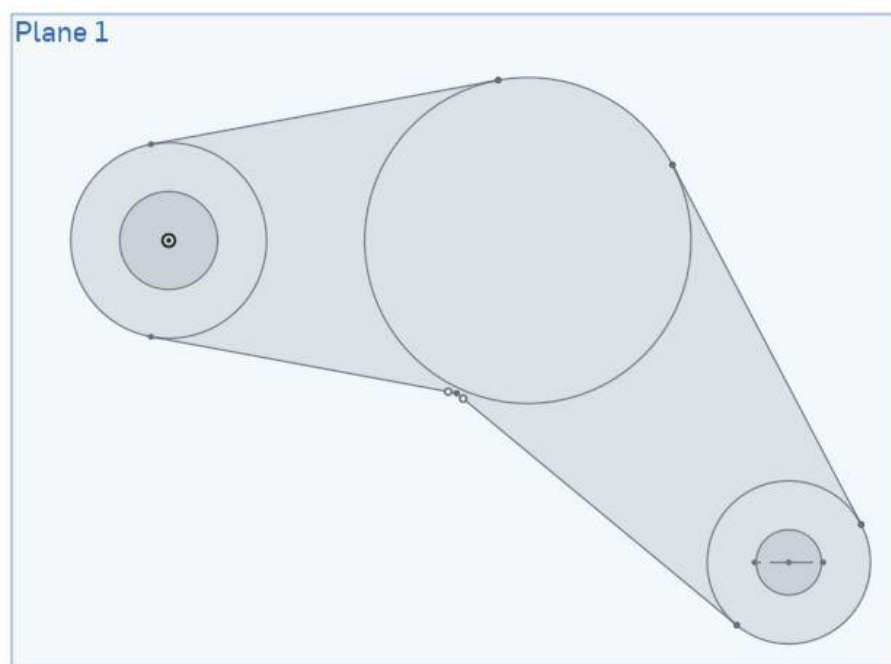
5. PRIKAZ ZADATKA

5.1. Upute za izradu zadanog modela

Kako bi se izradio zadani model treba učiniti nekoliko koraka, a ti koraci su: 3D CAD konstruiranje, eksportiranje 3D CAD modela u STL datoteku sa 3D CAD programom Onshape. Izrada strojnih uputa za 3D printer odnosno G-code sa Slicer programom i postavljanje parametara za SLA i FDM tehnologiju 3D printanja. 3D printanje oba modela, njihova obrada, skeniranje modela i na kraju usporedba skeniranih modela sa CAD modelom. [3]

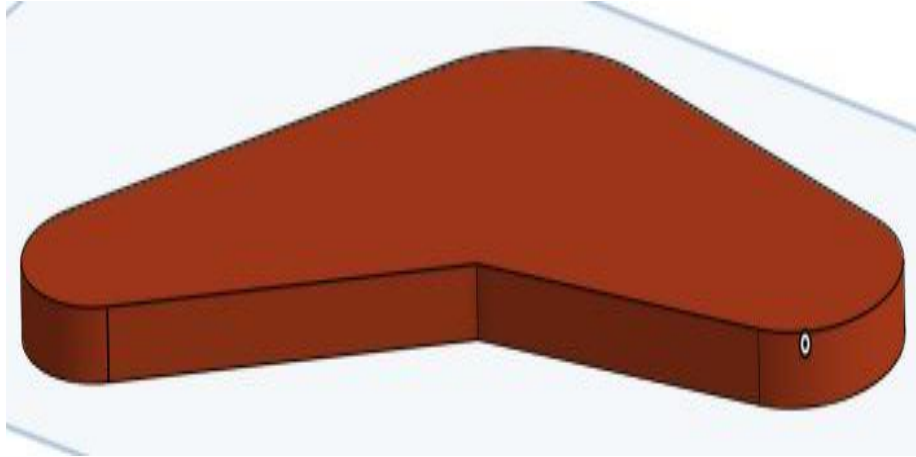
5.2. Konstruiranje i eksportiranje 3D CAD modela u STL datoteku

Prilikom konstruiranja koristio se 3D program čiji je naziv Onshape. Prije korištenja navedenog programa važno je poznavati osnove 3D CAD modeliranja kao i osnove poznavanja tehničkih nacrtā. Modeliranje se odvija tako što se kombinira upotreba alata za skiciranje i alata za modeliranje, odnosno ekstrudiranje, rezanje, zakošenje, zaobljenje i zrcaljenje. Ponajprije je potrebno odrediti ravninu na kojoj će nastati budući model. Izabrana je ravnina nacrtā. Na ravnini se konstruira 2D skica konture modela. Slika 6.1. prikazuje skicu vanjske konture modela.



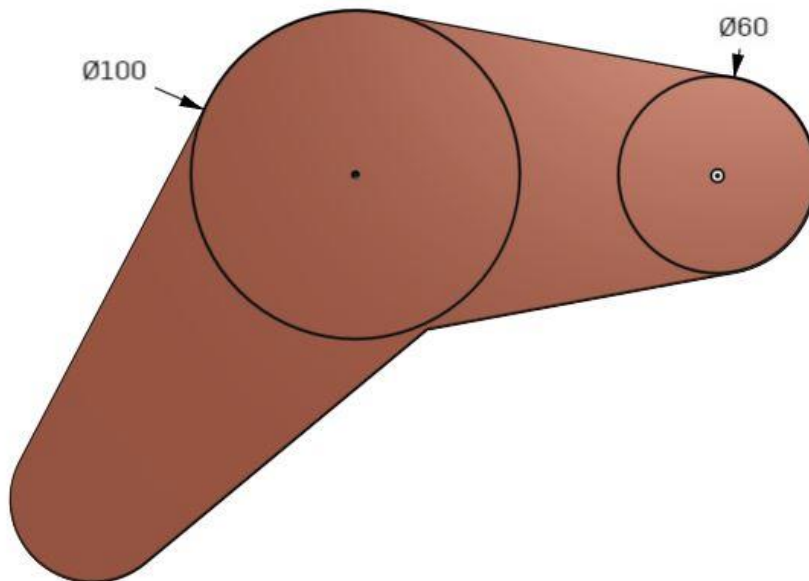
Slika 6.1. Skica vanjske konture

Nakon što je 2D skica skicirana pristupa se ekstrudiranju konture zadanog modela pomoću alata Extrude / ekstrudiranje, kojom se izrađuje debljina konture. Slika 6.2. prikazuje ekstrudiranje modela.



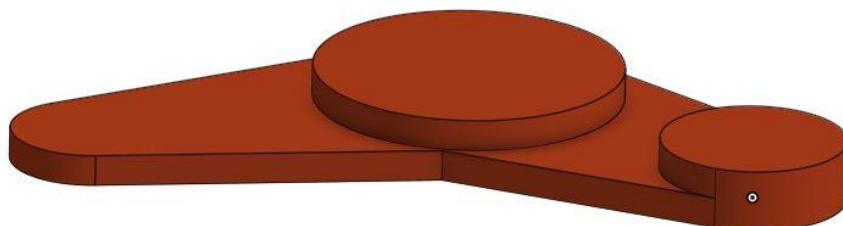
Slika 6.2. Ekstrudirana početna kontura skice

Kada se izradila kontura modela, slijedi nastavak skiciranja nosača na modelu. Izrađuje se skica nosača. Prikaz skice nosača na slici 6.3.



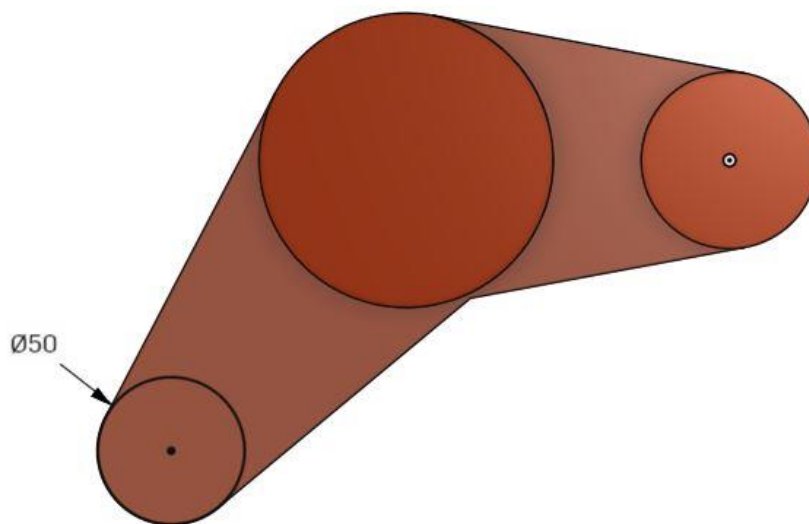
Slika 6.3. Skica nosača

Nakon izrade skice nosača, ekstrudiraju se nosači na modelu. Slika 6.4. prikazuje ekstrudiranje nosača.



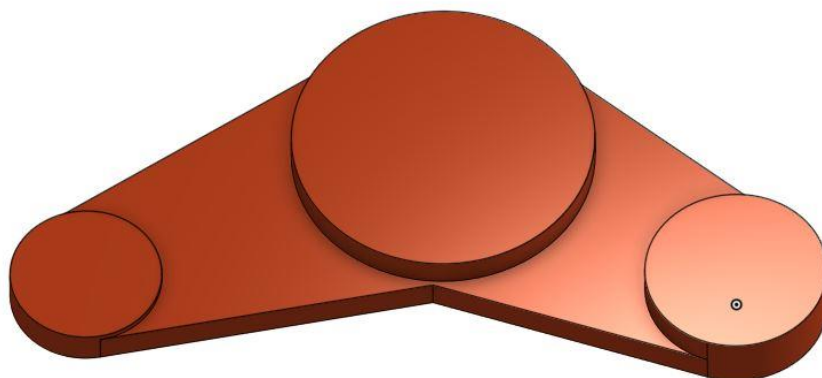
Slika 6.4. Ekstrudiranje nosača

Kako bi se završila ekstrudiranja, dodaje se nova skica za treći nosač. Prikaz skice trećeg nosač na slici 6.5.



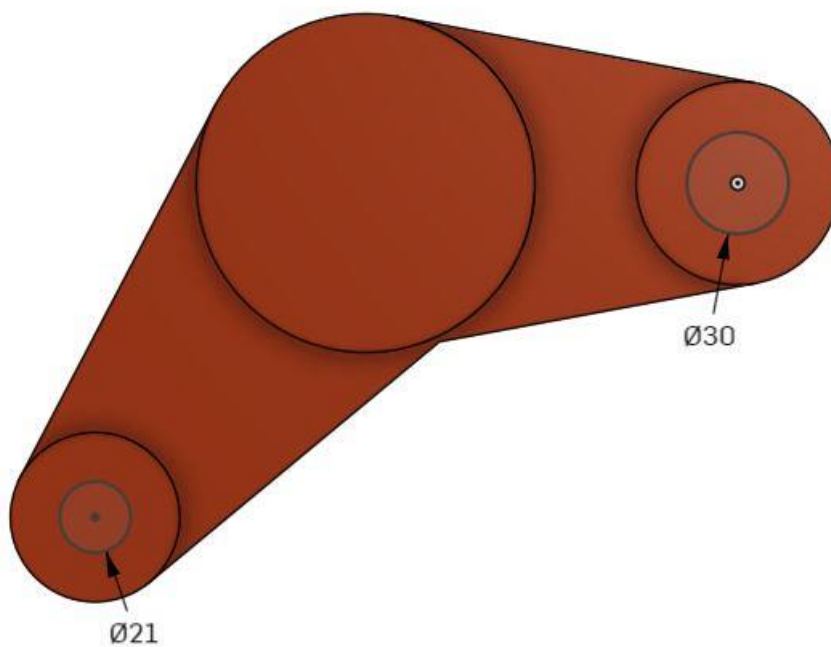
Slika 6.5. Skiciranje trećeg nosača

Slijedi ekstrudiranje skice trećeg nosača. Slika 6.6. pokazuje treći ekstrudirani nosač.



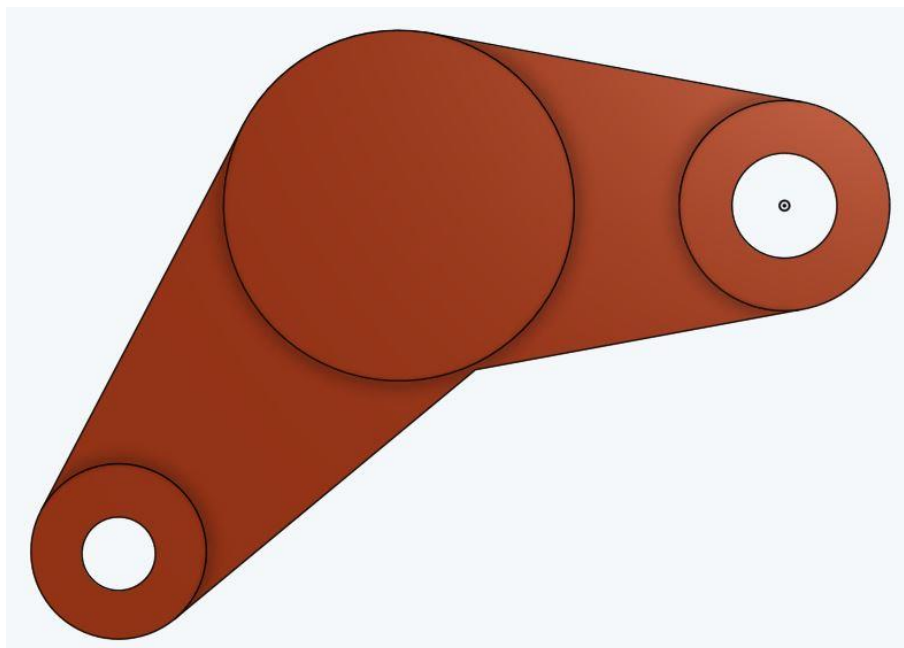
Slika 6.6. Ekstrudiranje trećeg nosača

Slijedi izrada skice za provrte na nosačima modela. Prikaz skice provrta na nosaču na slici 6.7.



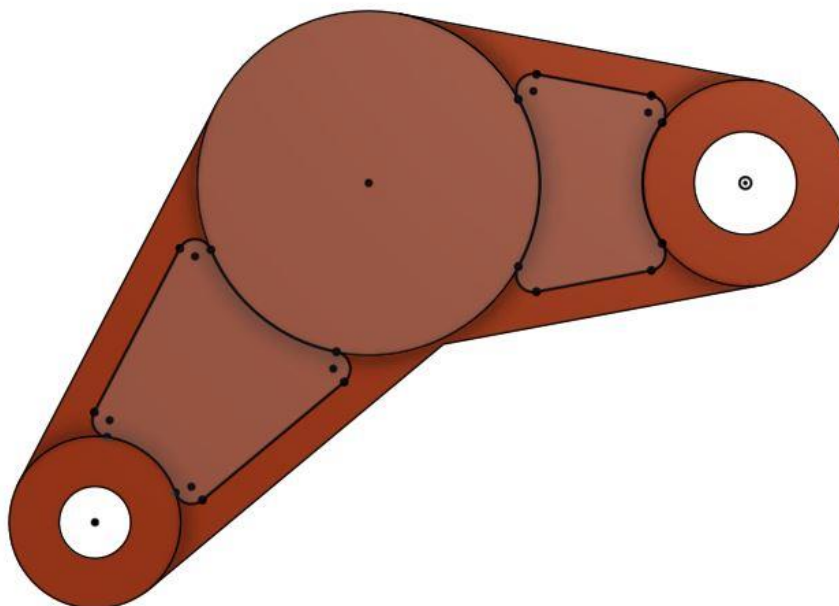
Slika 6.7. Skica provrta

Nakon skiciranja skica provrta slijedi njihovo uklanjanje funkcijom Ekstrude / move (ekstrudiranje / makni). Slika 6.8. prikazuje provrte na nosačima.



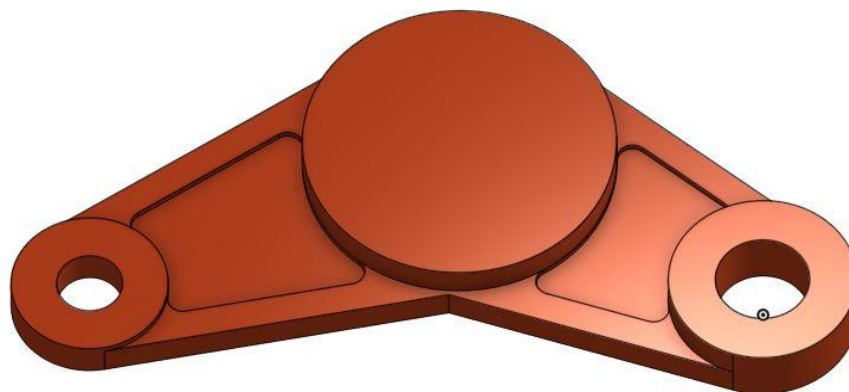
Slika 6.8. Izrada provrta nosača

Slijedeći korak je izrada skice kojom se odstranjuje materijal za izradu lijeve i desne konture profila. Prikaz izrade skice kontura na nosaču na slici 6.9.



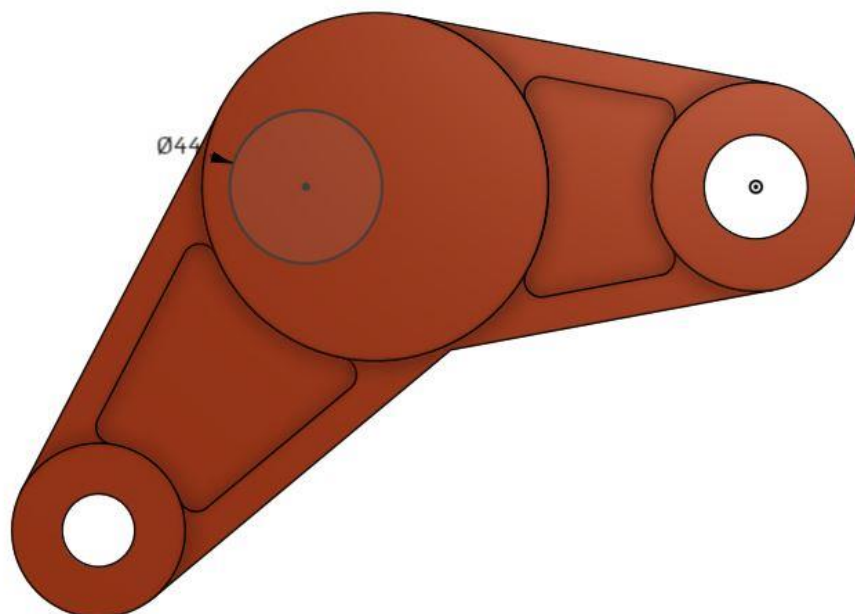
Slika 6.9. Skica kontura

Upotrebom funkcije Extrude remove (ekstrudiranje / makni) izrađuju se konture modela. Prikaz izrađenih kontura na nosaču na slici 6.10.



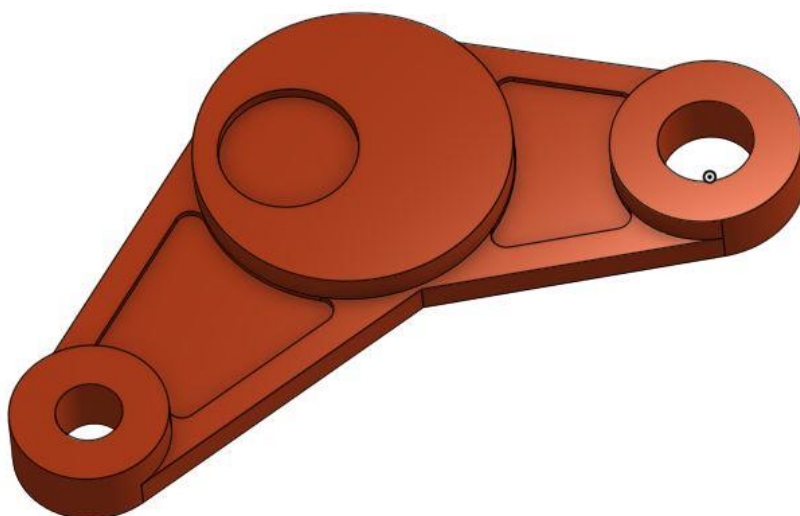
Slika 6.10. Rezanje kontura

Slijedeći korak je izrada skice ležišta za montažu na središnjem djelu nosača. Slika 6.11. prikazuje izrađenu skicu montažnog ležišta nosača.



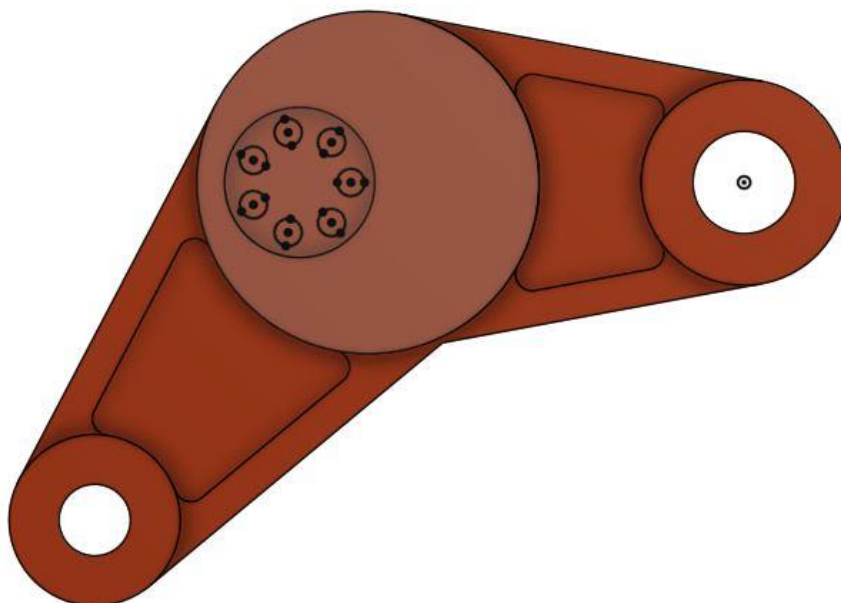
Slika 6.11. Skica montažne rupe

Slijedi izrada konture ležišta za montažu na središnjem djelu nosača. Prikaz izrađene konture na nosaču na slici 6.12.



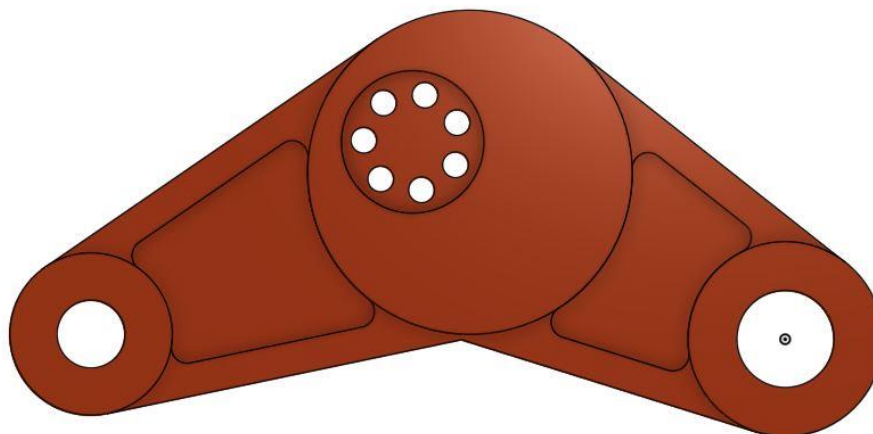
Slika 6.12. Rezanje konture

Nakon izrade konture izrađuje se skica montažnih rupa. Slika 6.13. prikazuje izrađenu skicu montažnih rupa.



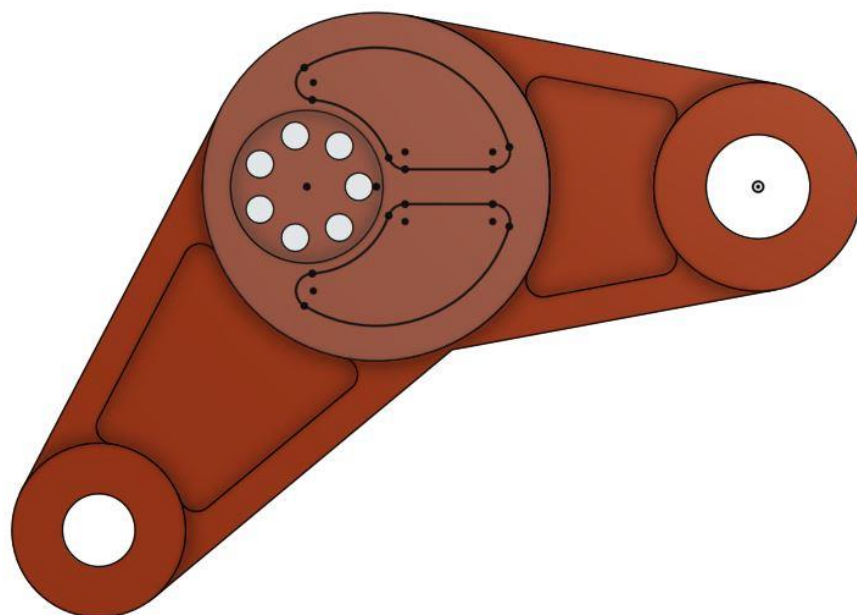
Slika 6.13. Skica montažnih rupa

Nakon izrađene skice rupa slijedi bušenje. Slika 6.14. prikazuje izrađene rupe za montažu.



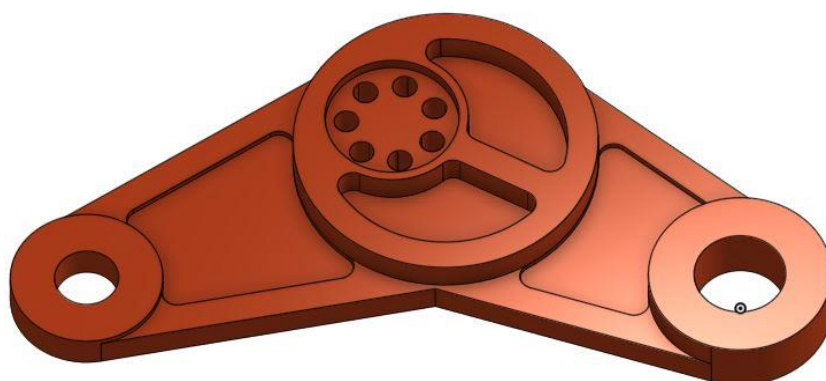
Slika 6.14. Izrađene rupe

Slijedi skiciranje preostalih kontura na sredini nosača. Slika 6.15. prikazuje skicu preostalih kontura.



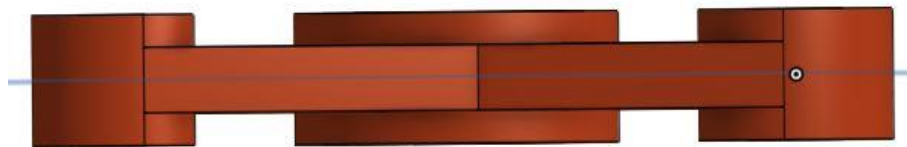
Slika 6.15. Skica konture središta

Po izradi skice kontura slijedi otklanjanje materijala. Slika 6.16. prikazuje izrađene konture na sredini nosača.



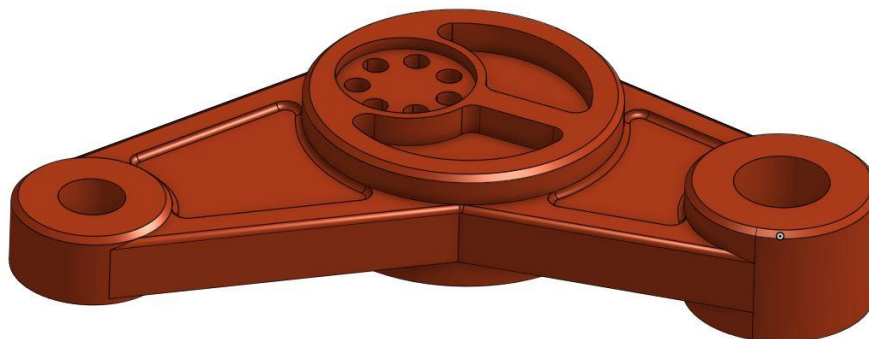
Slika 6.16. Rezanje konture središta

Kako bi model bio u potpunosti gotov, korištenjem alata Mirror / zrcaljenje, model se zrcali oko nacrtne ravnine. Prikaz zrcaljenja na slici 6.17.



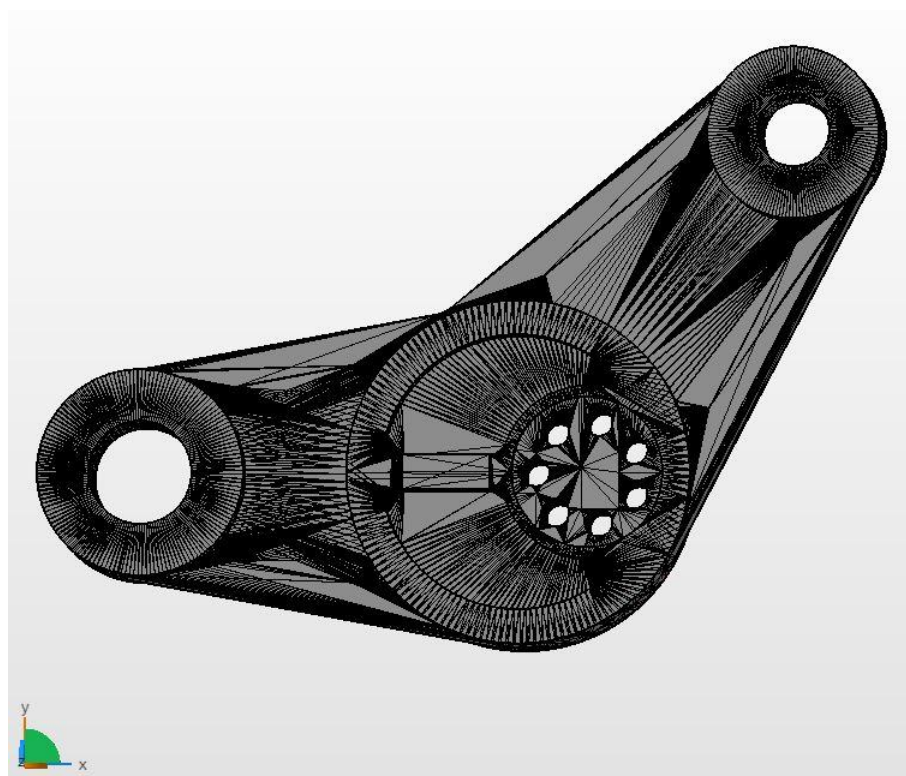
Slika 6.17. Zrcaljenje modela

Slijedi izrada zakošenja i zaobljenja na gornjem djelu modela. Slika 6.18. prikazuje dodana zaobljenja i zakošenja.



Slika 6.18. Zakošenja i zaobljenja na modelu [16]

Po završetku modeliranja modela iz zadatka, izvršava se eksportiranje CAD modela u binarnu STL datoteku koja služi za izradu strojnih uputa za 3D printer. Prikaz STL datoteke modela na slici 6.19.

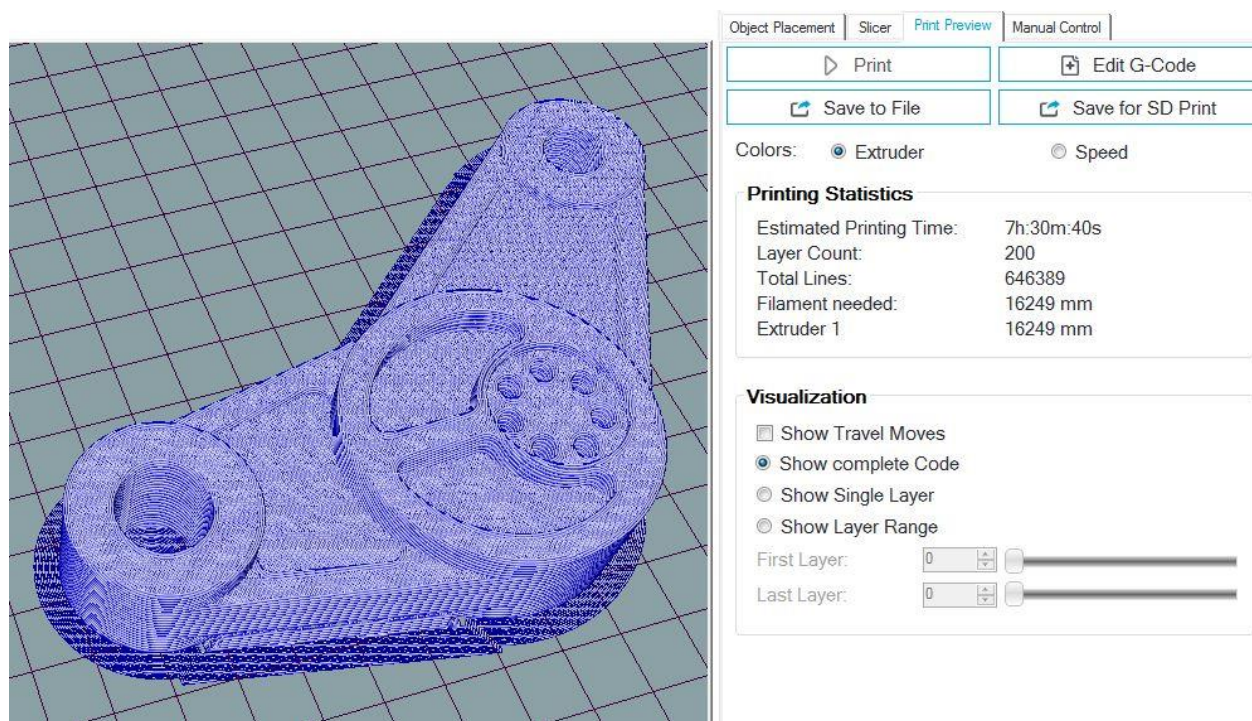


Slika 6.19. STL datoteka

6. IZRADA STROJNIH UPUTA ZA 3D PRINTER ODNOSNO G-COD SA SLICER PROGRAMOM I POSTAVLJANJE PARAMETARA ZA SLA I FDM TEHNOLOGIJE 3D PRINTANJA

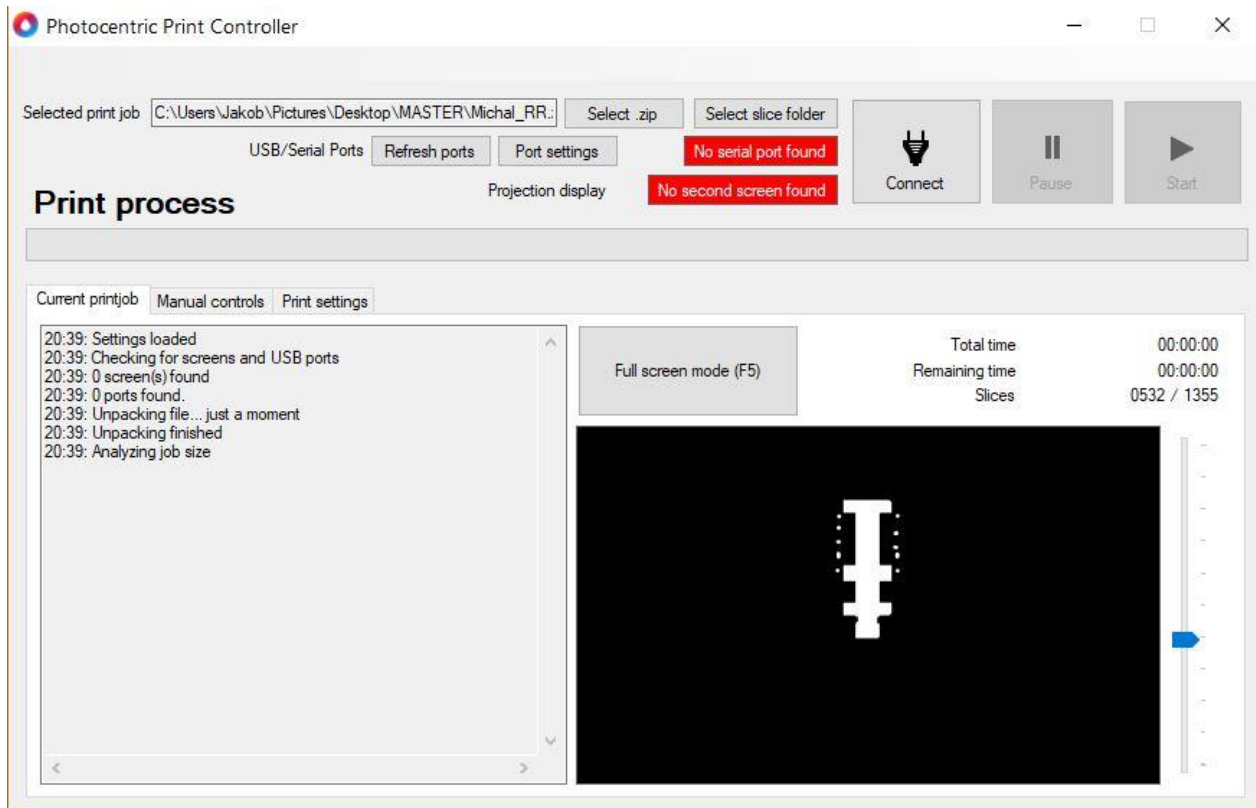
Kako bi 3D printer znao kako da nešto napravi potreban mu je G-code program. Za izradu G-koda za 3D printere služi Slicer program. U zadatku se za 3D printanje FDM 3D printerom koristi Slicer program "Repetier Host" [8]. U Slicer programu podešavaju se svi parametri za povezivanje i upravljanje 3D printerom. Odabire se komunikacijski port (COM) za razmjenu podataka između programa i 3D printera, odabire se tip firmware, odnosno tip hardverskog programa. Firmware se odabire ovisno o čipu kojim je opremljena elektronička pločica 3D printera. Nakon toga odabire se brzina razmjene podataka (Baud rate). 3D printer koji se koristio za izradu zadatka komunicira brzinom 115200 impulsa u sekundi. Postavlja se podatak o promjeru izlaza mlaznice ekstrudera, oblik (kartesian ili delta) i veličina površine za printanje. Podešava se temperatura taljenja materijala i temperatura površine za printanje odabranog materijala. Nakon postavljenih potrebnih postavka 3D printera, podešavaju se postavke kojima se određuje brzina i visina printanja prvog i svih ostalih slojeva modela. Zatim slijedi određivanje vrste i gustoće ispune kojom se određuje čvrstoća modela, broj prvih slojeva ne hlađenja kako bi se materijal adekvatno temperaturno stabilizirao. Sporije stabiliziranje materijala daje veću čvrstoću prvim slojevima i bolje držanje modela na površini za printanje. Izrada oboda oko modela još je jedan način kako osigurati držanje modela za površinu printanje. Osim izrade oboda oko modela moguće je izraditi raft podlogu ispod modela koja služi kao temelj na kojem se printa model. Raft se koristi kao prevencija vitoperenja slojeva i za pričvršćenje modela na ploču za printanje. Ponajviše se koristi prilikom printanja materijala sklonih vitoperenju (ABS) ili modela malih površina dna. Stabilno postavljeni prvi slojevi materijala na površinu za printanje utječu na sigurnost i kvalitetu, a samim time i mogućnost korištenje većih brzina prilikom 3D printanja modela. Ako je potrebno postavlja se potporna konstrukcija na mjestima gdje je kut printanja manji od 45 stupnjeva. Potporna struktura postavlja se automatski. Neki programi odnosno Sliceri imaju mogućnost ručnog postavljanja suportne strukture na željena mjesta pa se time još kvalitetnije može planirati 3D printanje modela. Po izvršenju naredbe Slice, izrađuju se strojne upute za rad 3D printera. Izrađene upute (G-kod) su vizualizirane i prikazuju linije kretanja putanje glave 3D printera. Moguće je pregledati svaki pojedini sloja koda te je moguće uređivati izrađeni G-kod.

Sličan se postupak obavlja za printanje sa SLA 3D printerom (Liquid Cristal PRO). Odabire se COM port i model 3D printera. Kao i FDM 3D printer, SLA 3D printer se spaja USB i dodatnim HDMI kabelom . HDMI kabel služi za grafičku komunikaciju između računala (grafičke kartice) i 3D printera. Strojne postavke za SLA 3D printer izrađuju se Slicer programom Photocentric Studio [9]. Nakon otvaranja STL datoteke, pristupa se orijentaciji i postavljanju modela na površinu za 3D printanje. Izrađuje se obavezna suportna struktura bez koje se proces 3D printanja ne bi mogao odvijati. Prilikom izrade strukture potpore podešava se tip strategije izrade potpore kao što je scaffolding, single suport ili lattice suport. Određuje se dijametar vrha i podnožja stupića suporta te dijametar samog stupića suporta. Također je moguće izraditi i bazu za (raft struktura kod FDM printera) printanje modela kojom se osigurava držanje modela na ploči za printanje. Slijedi izrada CWS datoteke koja sadrži snop PNG sličica 2D kontura modela. One propuštaju projicirano LED svjetlo na materijal koji se stvrdnjava. Vrijeme stvrdnjavanje materijala ovisi o vrsti materijala koji se koristi za 3D printanje. Slika 6.20. prikazuje vizualni G-cod za FDM 3D printera. Nakon obrade STL datoteke Slicer program prikazuje (Repetier Host): brim, suportnu strukturu, trajanje 3D printanja, broj slojeva i duljinu materijala potrebnog za izradu modela.



Slika 6.20. Vizualni G-code

Vrlo je sličan postupak pripreme G-koda modela za 3D printanje sa SLA tehnologijom. Nakon obrade STL datoteke Slicer program (Photocentric Studio), prikazuje se 2D kontura sloja osvijetljavanja u procesu 3D printanja. Slika 6.21. prikazuje vizualni prikaz osvijetljenja sloja za SLA 3D printer.

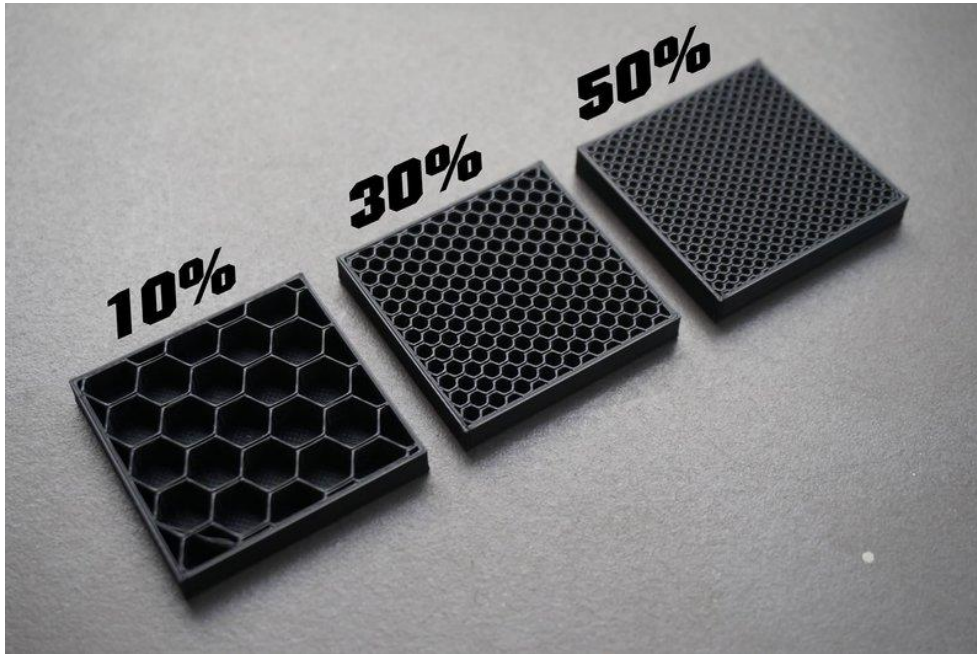


Slika 6.21. G-code, CWS datoteka

6.1. 3D print modela

Kako bi se neki model mogao uspješno isprintati vrlo je bitna njegova orijentacija na ploči za 3D printanje. Orijehtacija utječe na kvalitetu površine te čvrstoću modela koji će se izraditi. Pravilnom orijentacijom može se utjecati na stabilnost 3D printanja modela, smanjenje potrošnje materijala te brzinu printanja. Pri orijentaciji modela direktno se i utječe na željenu čvrstoću modela, odnosno uzeti u obzir iz kojeg će smjera sile djelovati na model kako se pritom ne bi slomio. Biranje vrste i gustoće ispune još je jedan od vrlo važnih faktora koji utječu na čvrstoću modela. Slicer koji se koristio za izradu parametara modela za 3D printanje omogućuje korištenje više vrsta ispuna kao što su mreža,

linije i koncentrične linije. Gustoća modela bira se između 0 i 100 posto čime se određuje čvrstoća modela, ali i količina materijala koji će se potrošiti. Slika 6.22. prikazuje gustoću ispune.



Slika 6.22. Gustoća ispune

Niveliranje ploče za printanje prije samog procesa 3D printanja, svakako je vrlo važan korak koji treba napraviti. Nivelira se razmak između vrha mlaznice i površine za printanje u svim kutevima i na sredini ploče za printanje. Najčešće je to razmak od 0,1mm (arak papira). Ona se obavlja ručno ili automatski ako je printer opremljen senzorom za mjerenje udaljenosti. Ako površina nije pravilno nivelirana postoji velika mogućnost izrade nepreciznog modela pa čak i neuspješno printanje. Ako mlaznica nije jednako na svim mjestima nivelirana, materijal se ne postavlja pravilno na površinu za printanje, odnosno nastaju različite debljine prvog sloja kao i različita prijanjanja materijala na istoj. Mlaznica predaleko udaljena od površine ne može pravilno polagati materijal. Ona ispušta materijal, ali se taj materijal ne prima na površinu za printanje. Željeni model ne može se izraditi. Ako pak je mlaznica preblizu površini za printanje, postoji mogućnost njezinog začepljenja jer se materijal kroz glavu printera doprema u mlaznicu, ali ne izlazi iz nje na površinu za printanje ili se ne nanosi pravilna debljina sloja na svim mjestima na ploči za printanje. Začepljenje može biti uzrokovano i korištenjem neadekvatnog materijala koji je pre vlažan ili je na njemu prašina. Zbog vlažnosti zraka nastaju

mjehurići na površini modela, pukotine i ostali kozmetički ili mehanički nedostaci površine modela. Nakon vrlo važnog postupka niveliranja nanosi se tanki sloj ljepila za 3D printanje koje služi za prijanjanje prvog sloja materijala na površinu za 3D printanje. Izvršenjem G-kod datoteke, pokreće se proces 3D printanja.

I kod procesa 3D printanja SLA tehnologijom, također se ponajprije pristupa niveliranju površine za printanje. Niveliranje se vrši između monitora 3D printera i dna na njemu postavljene posude za materijal (VAT). Otpuštaju se vijci koji fiksiraju površinu za printanje, ona se ravnomjerno spušta po z osi do dna posude za materijal. Nakon što površina za printanje pritisne dno posude za materijal isti vijci se stežu te tako ploča za printanje ostaje paralelna sa samim dnom posude za printanje. Debljina FEP filma posude ujedno je i potreban razmak između ploče za printanje i monitora 3D printera koji projicira svjetlosne sličice 2D presjeka na materijal kroz taj isti FEP film. Završetkom niveliranja posuda je spremna za prihvatanje materijala koji će se koristiti za 3D printanje. Najprije se ploča za printanje na određeno odstojanje podigne od dna posude i puni sa dovoljnom količinom materijala. Nakon punjenja posude ploča za printanje spušta se do dna posude s materijalom, odnosno na poziciju spremnu za početak procesa 3D printanja. Završetkom potrebnih priprema, učitava se CSW datoteka koja sadrži sve informacije potrebne za proces 3D printanja. Svjetlost određene valne duljine koja se određenu duljinu vremena projicira iz LCD monitora preko FEP filma na dno posude s materijalom stvrdnjava sloj materijala koji se taloži na ploči za printanje. Nakon završetka ciklusa obasjavanja materijala, podloga za printanje se podiže i novi materijal ulazi između dna posude i prethodno završenog sloja. Proces se nastavlja do završetka izrade posljednjeg sloja modela koji se printa. Slika 6.23. prikazuje niveliranje FDM 3D printera.

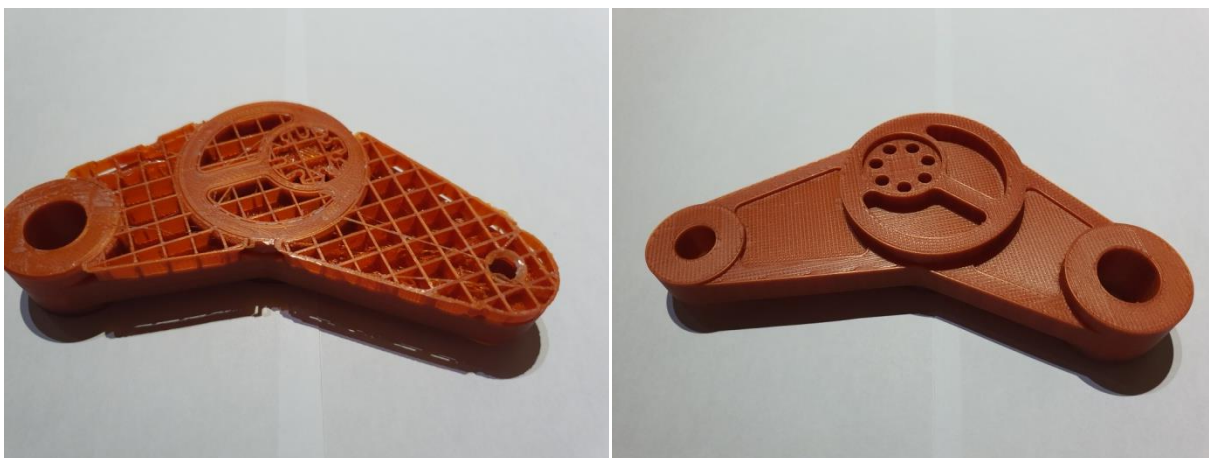


Slika 6.23. Niveliranje ploče za printanje FDM 3D printera

6.2. Obrada modela

Nakon završetka procesa 3D printanja praktički je jednak proces obrade (post proces) izrađenog modela za FDM ili SLA tehnologiju 3D printanja. Model se sa FDM 3D printera skida s površine za 3D printanje, odvaja se suportna struktura koja je služila kao pripomoć za pravilan print modela (ako je bilo potrebe za postavljanjem suportne strukture) te se model po potrebi brusi kako bi se odstranila kozmetička oštećenja. Gotov model kasnije je moguće bojati. Na slici 6.20. prikazan je

gotov model sa suprotnom strukturom prije i poslije odstranjivanja suprotne strukture. Obrada modela izrađenog sa SLA 3D printerom razlikuje se samo u jednom detalju. Model se nakon skidanja s površine za printanje najprije ispiru tekućinom za čišćenje smole (Cleaner) ručno ili u jedinici za čišćenje, a nakon čišćenja model se izlaže UV, bijelom ili danjem svjetlu kako bi se završila potpuna polimerizacija materijala koja rezultirala stvrdnjavanjem modela, spremnog za upotrebu. Suportna struktura može se odstraniti prije ili poslije završetka procesa polimerizacije. Prikaz gotovog modela prije i poslije odstranjivanja suportne strukture na slici 6.24.



Slika 6.24. Suportna struktura FDM tehnologije



Slika 6.24. Suportna struktura SLA tehnologije

6.3. Skeniranje zadanog modela

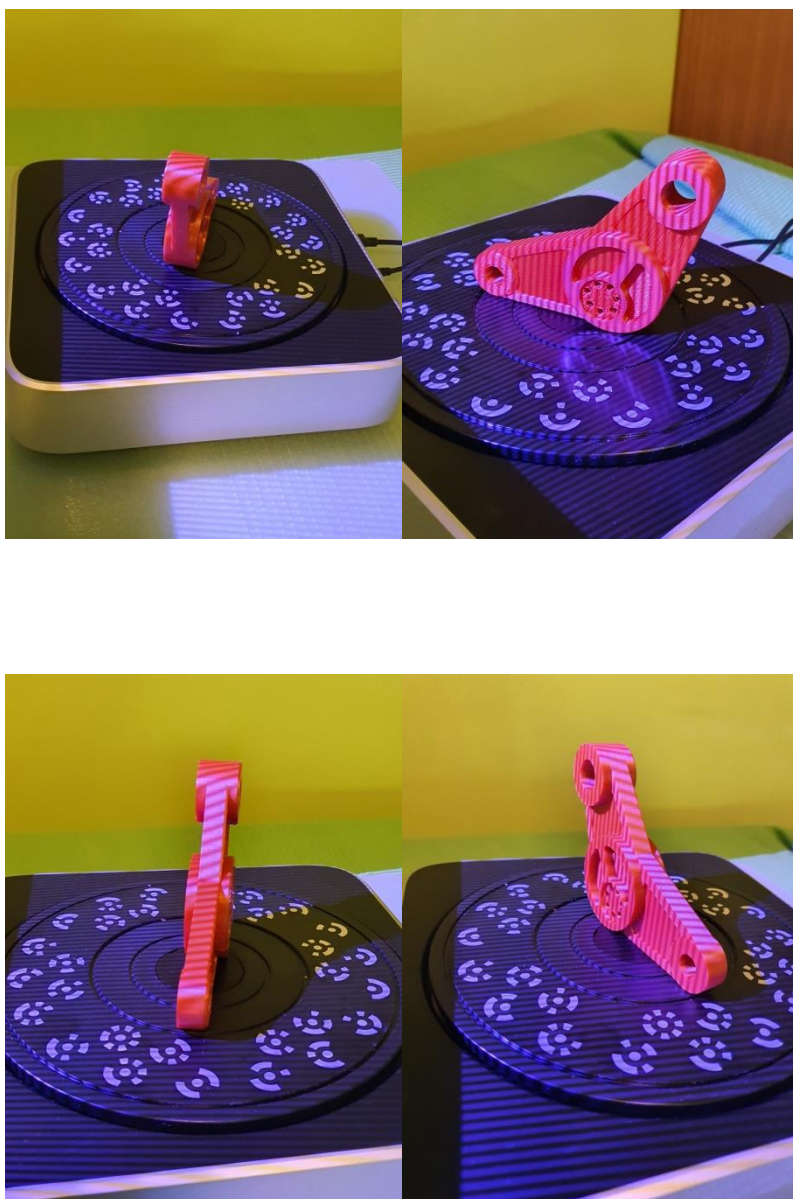
Za skeniranje modela iz zadatka koristi se optički skener sa bijelim svjetlom Einscan PRO+ industrijski paket. Njegova deklarirana točnost skeniranja je 0.05 mm. Kako bi komparirali skenirani modeli s modelima printanim na 3D printerima, ovaj podatak mora se uzeti u obzir. Ovaj paket sadrži i okretni stol na koji se postavlja objekt za skeniranje, te tronožac na koji se postavlja 3D skener. 3D skener i okretni stol povezani su sa računalom pomoću USB kabela. Slika 6.25. prikazuje korištenje 3D skenera Einscan Pro+ [13].



Slika 6.25. Optički skener, Einscan PRO+

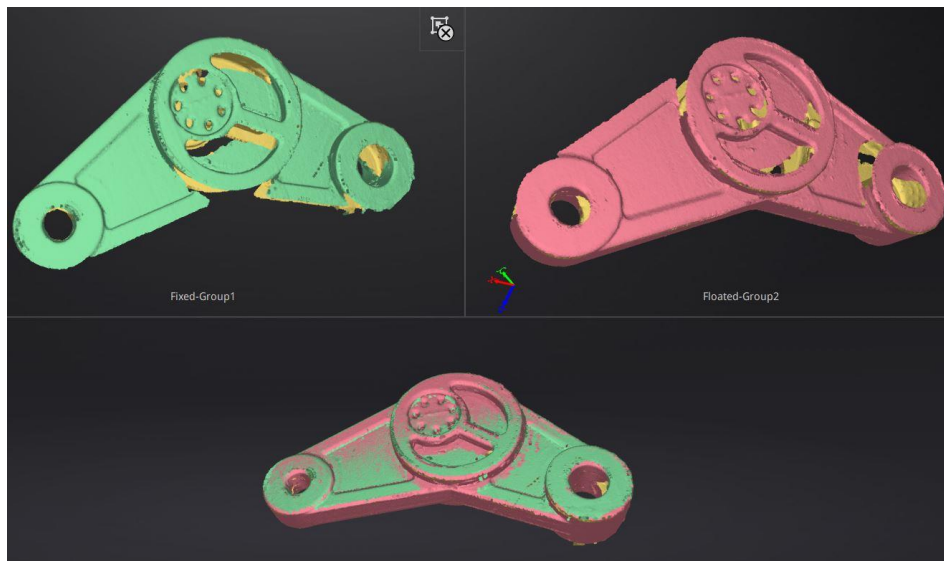
Procesom skeniranja odnosno mjerenja upravlja se programom Einscan Pro Series. Prije samog početka skeniranja vrši se kalibriranje skenera. Kalibriranje se provodi kako bi se uskladili projektor i dvije kamere skenera kako bi rezultat skeniranja odnosno mjerenja bio točan. Nakon kalibriranja 3D skener je spreman za rad, odnosno skeniranje. Pokreće se program 3D skenera. Najprije se bira način skeniranja. U zadatku je odabran fiksni automatski način skeniranja sa okretnim stolom. Podešava se adekvatna jačina svjetla odnosno ambijent skeniranja. Preslabo ili prejako svjetlo uzrokuje problem prilikom skeniranja. Kamere ne prepoznaju površinu objekta kojeg snimaju.

Preslabom jačinom svjetla kamere ne bi vidjele objekt skeniranja, dok bi se prejaka svjetlost reflektirala s objekta skeniranja i kamere ne bi davale očekivani rezultat. Automatskim načinom skeniranja, okretni stol za skeniranje zakreće se za određeni broj stupnjeva svaki put kad projektor projicira uzorak bijelog svjetla na objekt koji skenira. Model iz zadatka sastoji se od 30 skenova, skeniranih sa svih strana objekta u kutu od 360 stupnjeva. Slika 6.26. prikazuje skeniranje 360 stupnjeva oko modela. Einscan PRO+ 3D skener može skenirati i teksture u boji ili monokromno.

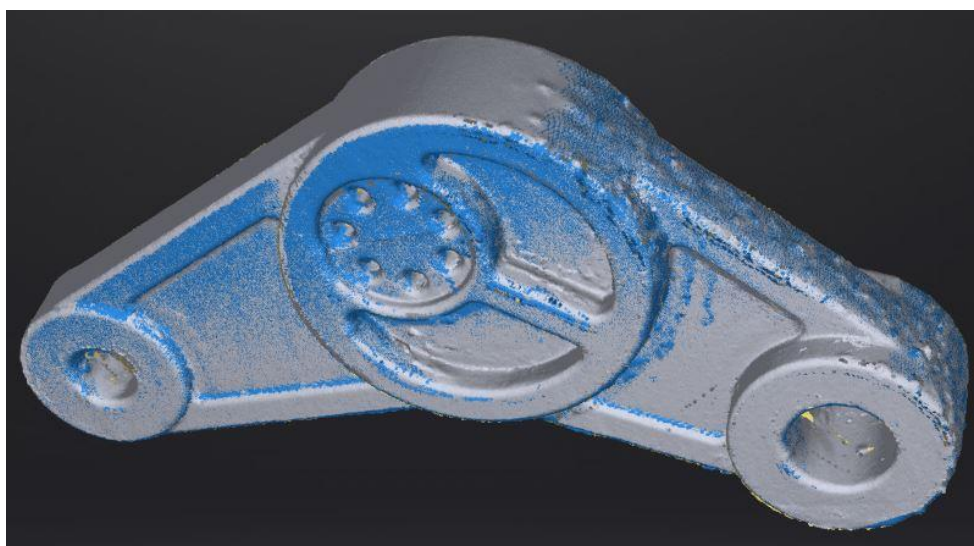


Slika 6.26. Skeniranje 360 stupnjeva oko modela

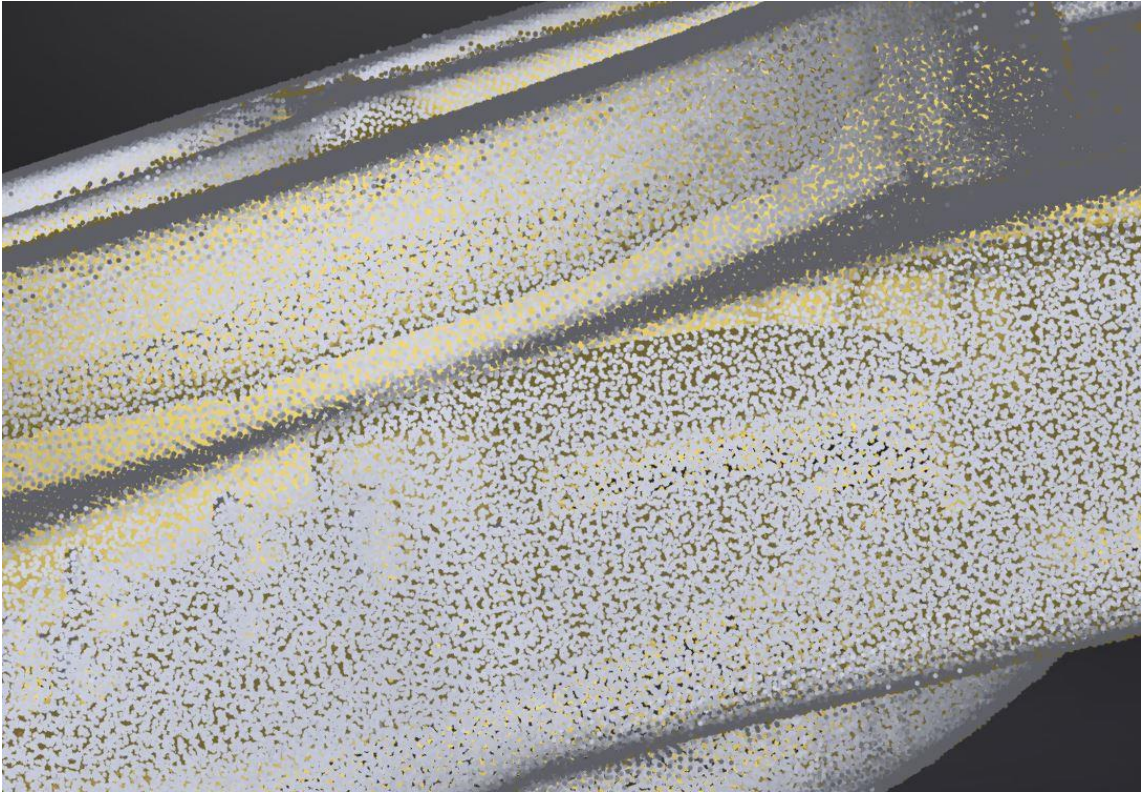
Svaki se model iz zadatka skenira zasebno, monokromno. Projiciranjem uzoraka bijelog svijetla, zahvaća se oblik modela, odnosno mjeri se njegova površina. Zahvaćena odnosno skenirana površina opisana je oblakom točaka. Program vizualno prikazuje svaki nastali sken odnosno svaku nastalu površinu. Nakon kompletnog zahvaćanja površine modela, pristupa se obradi skeniranih podataka. Skeniranjem sa okretnim stolom automatski se izvršava proces registriranja skenova, odnosno preklapanja pojedinih skenova modela. Svaki sken može biti i manualno registriran u cjelinu, odnosno prezentaciju zadanog modela. Po završetku jednog ciklusa odnosno snimanja modela sa svih strana odnosno 360 stupnjeva oko modela odstranjuju se neželjeno zahvaćeni podaci, odnosno šumovi koje skener može po skenirati prilikom procesa skeniranja. Nakon toga slijedi zatvaranje prisutnih rupa koje nastaju zbog neadekvatnog osvjetljavanja modela, odnosno ambijenta u kojem se vrši skeniranje (premalo ili previše svijetla). Kamere skenera ne vide površinu, odnosno uzorak svijetla s projektora nije dopro do tih mjesta. Nakon skeniranja jedne strane modela postupak skeniranja je identičan, odnosno na jednak način skenira se i suprotna strana modela. Spajanjem skenova obiju strana uratka dobiva se 3D opis površine uratka. I ovaj proces program skenera može odraditi automatski, ali može se odraditi i manualno registriranje odabirom najmanje po tri približne točke na površini svakog skena koji se registrira odnosno preklapa. Slika 6.27. prikazuje proces manualnog registriranja skenova. Registriranjem svih skenova dobiva se model kojem je površina opisana oblakom točaka. Slika 6.29. prikazuje oblak točaka. Dobiveni oblak točaka pretvara se u mrežu sačinjenu od velikog broja trokuta koji sačinjavaju trianguliranu mrežu površine skeniranog modela. Mreža poligona može se uređivati po potrebi izoštravati ili zaglađivati. Program također nudi mogućnost reduciranja mreže. Broj poligona određuje veličinu odnosno rezoluciju datoteke. Triangulirana mreža može se eksportirati u STL, OBJ ili PLY format datoteke. Programima za reverzibilni inženjering iste se mogu pretvoriti u CAD površine. Program nudi mogućnosti izrade vodo nepropusne mreže, odnosno solidne čvrste mreže ili izradu vodo propusne mreže koja se može obraditi nekim od programa za reverzibilni inženjering. Dobivene podatke, odnosno mrežni model sastavljen je od trokuta. Mreža objekta spremna je za naknadnu obradu ili kao STL datoteka namijenjena za 3D printanje. Slika 6.28. prikazuje automatsko poklapanje skenova.



Slika 6.27. Manualno poklapanje (registriranje) skenova



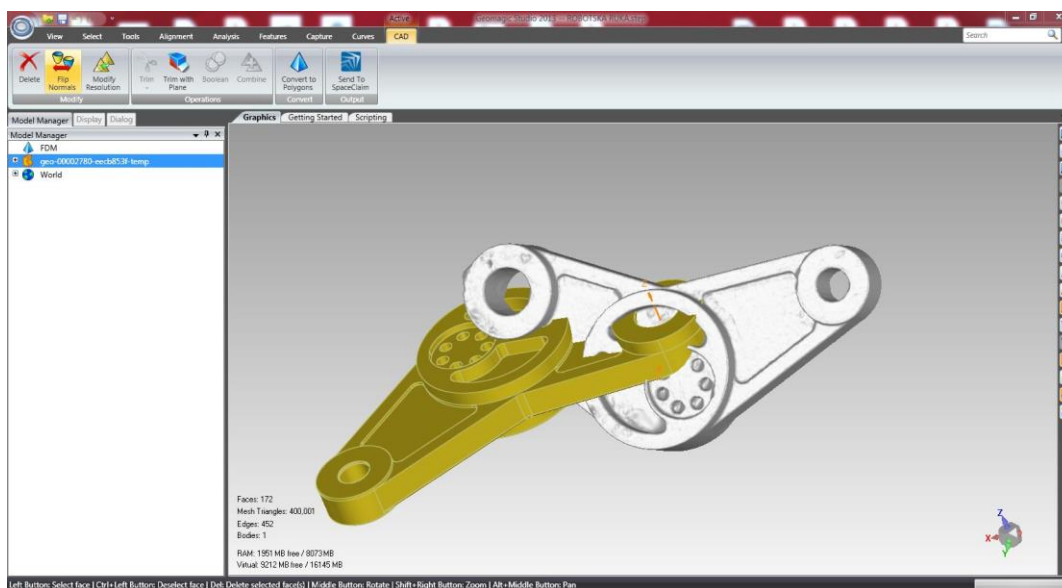
Slika 6.28. Automatsko poklapanje skenova



Slika 6.29. Oblak točkaka

6.4. Usporedba skeniranih modela sa CAD modelom

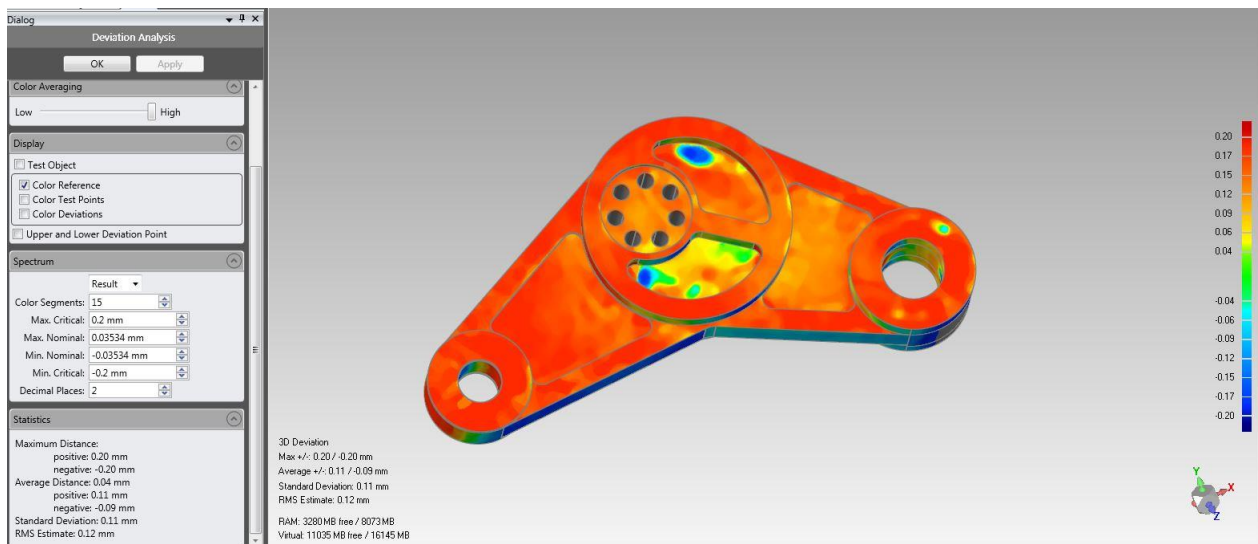
U programu za reverzibilni inženjering i kontrolu, uvode se 3D CAD i STL datoteka modela načinjenih na 3D printerima FDM i SLA tehnologije. Odabirom kartice s alatima za usklađivanje, metodom Best fit registriraju (poklapaju) se CAD model i STL model. Program zatim izračunava devijacije STL modela u odnosu na bazni CAD model vizualno spektrom boja i brojčano prikazuje vrijednosti. Usporedbom konstruiranog 3D CAD modela i modela izrađenog na 3D printeru, dobiva se podatak o njegovoj kvaliteti (skeniranog modela), odnosno podatak o razlici u njihovim odstupanjima koja su se desila na modelu izrađenom na 3D printeru. Slika 6.30. prikazuje uvoz CAD modela i skeniranog modela isprintanog sa FDM 3D printerom.



Slika 6.30. Uvoz CAD datoteke i skeniranog FDM modela

6.5. Usporedba CAD modela i FDM modela

Importiranjem zadanih modela u program Geomagic, pristupilo se analizi sličnosti, odnosno devijacija između CAD modela konstruiranog na računalu i skeniranog modela izrađenog s 3D printerom FDM tehnologije. Analiza pokazuje da je FDM model za koji se željela utvrditi kvaliteta izrade u granicama deklarirane tolerancije [11]. U obzir se uzela tolerancija kojom 3D skener skenira objekt a iznosi 0,05 mm. Model izrađen FDM 3D printerom deklarirane je tolerancije 0,1 mm. Rezultat analize pokazuje da je tehnologija 3D printanja vrlo precizna i da može proizvesti precizne modele u zadanim tolerancijama. Standardno odstupanje testiranog modela od konstruiranog 3D CAD modela, iznosi 0.11 mm. Slika 6.26. prikaz odstupanja konstruiranog CAD modela i modela izrađenog na 3D printeru FDM tehnologije.



Slika 6.26. Odstupanja FDM modela

STATISTIKA:

Tablica 1. FDM usporedba

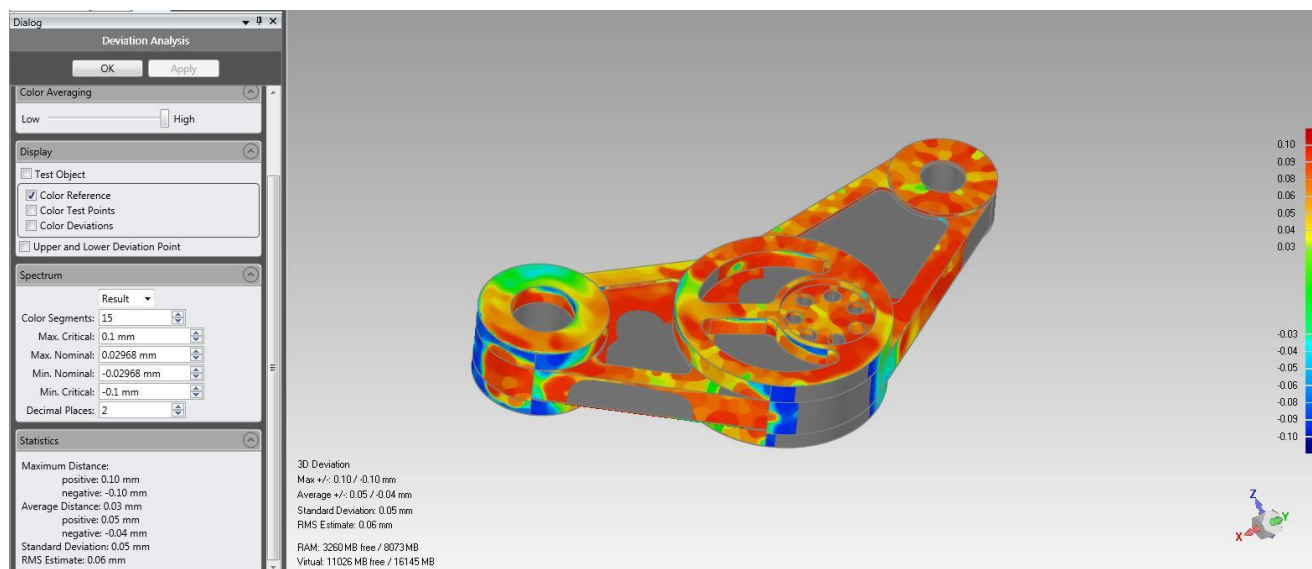
MAKSIMALNA UDALJENOST POVRŠINA	0.20 mm
PROSJEČNA UDALJENOST POVRŠINA	-0.20 mm
POZITIVNA	0.04 mm
NEGATIVNA	0.11 mm
STANDARDNA DEVIJACIJA	-0.9 mm
	0.11 mm

Objašnjenje tablice:

Maksimalna udaljenost površine označuje zadane granice mjerenja (0.2 mm) maksimalne i minimalne udaljenosti površina skeniranog FDM modela od površina referentnog CAD modela. Prosječna udaljenost površina označava odstupanje površina skeniranog modela u odnosu na površine referentnog CAD modela (0.04 mm), u pozitivnom smjeru koordinatnog sustava 0.11 mm i -0.9 mm u negativnom smjeru koordinatnog sustava (gornja i donja strana modela). Standardna devijacija odnosno standardno odstupanje površina uzorka skeniranog modela u odnosu prema površinama referentnog CAD modela iznosi 0.11 mm. Spektar boja vizualno prikazuje veličine, odnosno vrijednosti površina u odnosu sa površinama referentnog CAD modela.

6.6. Usporedba CAD modela i SLA modela

Analiza sličnosti odnosno devijacija između CAD modela konstruiranog na računalu i skeniranog modela izrađenog sa 3D printerom SLA tehnologije, pokazala je da je model za koji se željela utvrditi kvaliteta u deklariranoj toleranciji. U obzir se uzela tolerancija kojom 3D skener skenira object a iznosi 0,1 mm. 3D printer SLA tehnologije deklarirane je tolerancije 0,3% ,odnosno 0,12 mm. Rezultat analize pokazuje da je tehnologija 3D printanja vrlo precizna i da može izraditi precizni proizvod u zadanim tolerancijama. Standardno odstupanje testiranog modela od CAD uzorka iznosi 0.05 mm. Slika 6.27. prikaz odstupanja konstruiranog CAD modela i modela izrađenog na 3D printeru SLA tehnologije.



Slika 6.27. Odstupanja SLA modela

STATISTIKA :

Tablica 2. SLA usporedba

MAKSIMALNA UDALJENOST	0.10 mm -0.10 mm
PROSJEČNA UDALJENOST POVRŠINA	0.03 mm
POZITIVNA	0.05 mm
NEGATIVNA	-0.04 mm
STANDARDNA DEVIJACIJA	0.05 mm

Objašnjenje tablice:

Maksimalna udaljenost površine označuje zadane granice mjerenja (0.10 mm) maksimalne i minimalne udaljenosti površina skeniranog SLA modela od površina referentnog CAD modela. Prosječna udaljenost površina označava odstupanje površina skeniranog modela u odnosu na površine referentnog CAD modela (0.03 mm), u pozitivnom smjeru koordinatnog sustava 0.05 mm i -0.04 mm u negativnom smjeru koordinatnog sustava (gornja i donja strana modela). Standardna devijacija odnosno standardno odstupanje površina uzorka skeniranog modela u odnosu prema površinama referentnog CAD modela iznosi 0.05 mm. Spektar boja vizualno prikazuje veličine, odnosno vrijednosti površina u odnosu sa površinama referentnog CAD modela.

7. ZAKLJUČAK

Za izradu ovog završnog rada korišteno je stečeno iskustvo i znanja iz područja 3D aditivnih tehnologija, 3D skeniranja, i 3D CAD modeliranja. Konstruiranjem 3D CAD modela započela se faza procesa kojom se željelo doći do spoznaje o mogućnostima i preciznosti FDM i SLA aditivne tehnologije 3D printanja. Konstruirani CAD model se izradio (3D printanjem), zatim obradio i pripremio za završnu fazu 3D skeniranja, odnosno za analizu dimenzionalnih razlika (devijacija). Analizom se utvrdilo da obje tehnologije zadovoljavaju kvalitetu odnosno preciznost izrađenog modela prema deklariranim tolerancijama svakog proizvođača korištene opreme. Komparacijom preciznosti obje tehnologije možemo zaključiti da su precizne. Najvažniji zaključak je da korištenje aditivnih tehnologija je ekonomski isplativo u odnosu na današnje tradicionalne tehnologije. Aditivne tehnologije mijenjaju trendove proizvodnje jer se prelazi s masovne serijske proizvodnje na proizvodnju malih serija ili personaliziranih proizvoda.

8. LITERATURA

- [1] <https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented> (01.10.2019.)
- [2] [https://en.wikipedia.org/wiki/STL_\(file_format\)](https://en.wikipedia.org/wiki/STL_(file_format)) (01.10.2019.)
- [3] <https://www.onshape.com/>. (14.10.2019.)
- [4] <https://markforged.com/metal-x/> (05.10.2019.)
- [5] <https://www.3dfactories.com/3d-printers/profi3dmaker/> (09.10.2019.)
- [6] <https://3space.com/blog/3d-scanning-technology-comparison/> (01.10.2019.)
- [7] <https://3space.com/blog/white-light-vs-blue-light-3d-scanning/> (05.10.2019.)
- [8] <https://www.repetier.com/> (06.10.2019.)
- [9] <https://photocentricgroup.com/studio/> (08.10.2019.)
- [10] <https://photocentricgroup.com/lcpro-support/> (30.09.2019.)
- [11] <https://www.3dsystems.com/software?> (12.10.2019.)
- [12] <https://www.autodesk.com/products/netfabb/overview> (18.10.2019.)
- [13] <https://www.einscan.com/handheld-3d-scanner/einscan-pro-plus/> (19.10.2019.)
- [14] <https://markforged.com/products/composite/> (20.10.2019.)
- [15] <https://photocentricgroup.com/lchr2-support/> (20.10.2019.)
- [16] <https://cad.onshape.com/Robotic Arm> (25.10.2019.)

9. OZNAKE I KRATICE

RP - Rapid Prototyping

RM – Rapid Manufacturing

PLA – Polilactic Acid

ABS - Acrylonitrile butadiene styrene

FDM – Fused Deposition Modeling

FFF – Fused Filament Fabrication

SLA – Sterolitography

STL- Sterolitography file

SLS – Selective Laser Sintering

PA – Polimide

PC – Polycarbonat

DMLS – Direct Metal Laser Sintering

CAD – Computer aided design

3DP binder jeting – 3D printing

LMS – Laser Metal Sintering

CWS - Claris Works Template

PNG - Portable Network Graphics

LCD – Liquid Cristal Display

CMM - Coordinate Measuring Machine

Free form – slobodni oblik površine

10. SAŽETAK

Tema završnog rada je korištenje aditivnih tehnologija u mehatronici. Cilj rada je konstruiranje zadanog CAD modela, izrada modela s pomoću dvije tehnologije 3D printanja, odnosno 3D printerima FDM (FFF) i SLA (LCD) tehnologije i 3D skeniranje istih modela kako bi se usporedila njihova dimenzijska točnost. Zadatak započinje s konstruiranjem 3D CAD modela "Robotskog članka, ruke robota" te daljnje eksportiranje CAD modela u STL datoteku namijenjenu za 3D printanje. Nakon eksportiranja 3D modela CAD datoteke u STL datoteku, prelazi se na postavljanje parametara 3D printanja za svaku od tehnologija. Posebno za FDM i posebno za SLA 3D printer. Nakon izrade fizičkog modela iz polimera (plastike), modeli se skeniraju "Optičkim 3D skenerom strukturom bijelog svijetla". Proračun i prikaz razlika odnosno devijacija svakog modela, provodi se programom za reverzibilni inženjering, dizajn proizvoda i brzu izradu prototipova "Geomagic Studio". Za modeliranje se koristi bilo koji od programa za 3D konstruiranje. U zadatku je korišten 3D CAD program Onshape. Prilikom komparacije preciznosti obje tehnologije možemo zaključiti da su precizne, odnosno izrađuju u svojim granicama tolerancije. Najvažniji zaključak je da korištenje aditivnih tehnologija ekonomski isplativije u odnosu s današnjim tradicionalnim tehnologijama.

Ključne riječi: FDM, SLA, 3D skeniranje, 3D printanje, 3D CAD, aditivne tehnologije, Geomagic Studio

11. SUMMARY

The theme of the final work is the use of additive technologies in mechatronics. The aim of the work is to construct the default CAD model, to create a model using two 3D printing technologies, i.e. 3D printers FDM (FFF) and SLA (LCD) technology and 3D scanning of the same models to compare their dimensional accuracy. The task begins with the design of 3D CAD models "robotic article, Robot hands" and further export of CAD models to STL file designed for 3D printing. After exporting the 3D model of the CAD file to the STL file, it switches to setting the 3D printing parameters for each of the technologies. Especially for FDM and especially for SLA 3D printer. After the production of the physical model from the polymer (plastic), the models are scanned "optical 3D scanner with white light structure". The calculation and presentation of differences or deviations of each model is carried out by a program for the reversible engineering, product design and rapid prototyping "Geomagic Studio". For modeling, any of the 3D construction programs are used. The Onshape 3D CAD program was used in the task. When we compare the precision of both technologies, we can conclude that they are precise, or are produced within their limits of tolerance. The most important conclusion is that the use of additive technologies is economically profitable compared with today's traditional technologies..

Key words: FDM, SLA, 3D scanning, 3D printing, 3D CAD, aditivn technologies, Geomagic Studio

12 PRILOZI

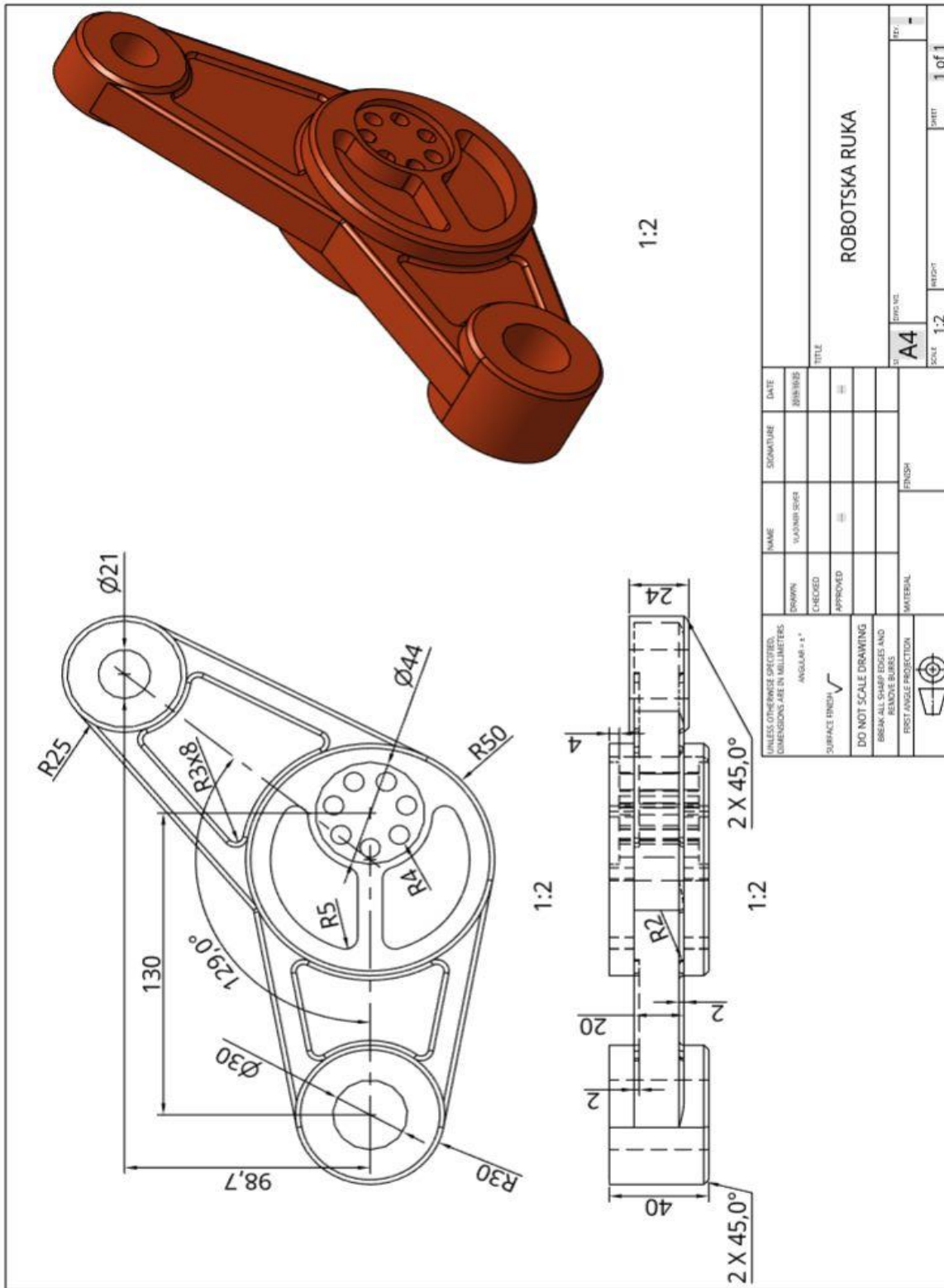
Upravitku se nalazi radionički crtež modela robotske ruke sa svim dimenzijama potrebnim za 3D CAD konstruiranje.

Izrađeni video koji prikazuje namještanje, procese i rad sa SLA, FDM 3D printerom i 3D skeniranje.

Video uradak:

<https://www.facebook.com/watch/?v=639172139952283>

2D radionička dokumentacija



NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN	UJAKIPIR EVER	2018/10/25
CHECKED		
APPROVED		
MATERIAL		
FINISH		

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
ANGULAR ± 1°
SURFACE FINISH $\sqrt{\quad}$
DO NOT SCALE DRAWING
BREAK ALL SHARP EDGES AND REMOVE BURRS
FIRST ANGLE PROJECTION

TITLE
ROBOTSKA RUKA

FIG. NO.
A4

SCALE
1:2

SHEET
1 of 1

Prema Odluci Veleučilišta u Bjelovaru, a u skladu sa Zakonom o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju, elektroničke inačice završnih radova studenata Veleučilišta u Bjelovaru bit će pohranjene i javno dostupne u internetskoj bazi Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu. Ukoliko ste suglasni da tekst Vašeg završnog rada u cijelosti bude javno objavljen, molimo Vas da to potvrdite potpisom.

Suglasnost za objavljivanje elektroničke inačice završnog rada u javno dostupnom nacionalnom repozitoriju


VLADIMIR SEVER

ime i prezime studenta/ice

Dajem suglasnost da se radi promicanja otvorenog i slobodnog pristupa znanju i informacijama cjeloviti tekst mojeg završnog rada pohrani u repozitorij Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu i time učini javno dostupnim.

Svojim potpisom potvrđujem istovjetnost tiskane i elektroničke inačice završnog rada.

U Bjelovaru, 15.10.2019.


potpis studenta/ice

IZJAVA O AUTORSTVU ZAVRŠNOG RADA

Pod punom odgovornošću izjavljujem da sam ovaj rad izradio/la samostalno, poštujući načela akademske čestitosti, pravila struke te pravila i norme standardnog hrvatskog jezika. Rad je moje autorsko djelo i svi su preuzeti citati i parafraze u njemu primjereno označeni.

Mjesto i datum	Ime i prezime studenta/ice	Potpis studenta/ice
U Bjelovaru, <u>15.10.2019.</u>	VLADIMIR SEVER	