

Razvoj obloge natkoljene proteze primjenom 3D tehnologija

Ćavar, Iva

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:320810>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-02**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Iva Čavar

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Dr. sc. Damir Godec, dipl. ing.

Student:

Iva Čavar

Zagreb, 2024.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru, dr. sc. Damiru Godecu, na prijedlogu teme diplomskog rada, savjetima i prenesenom znanju.

Veliko hvala asistentu, mag. ing. Mislavu Tujmeru na susretljivosti i pomoći pri izradi praktičnog dijela rada. Zahvaljujem se i Igoru Čuseku, djelatniku tvrtke Teximp, na suradnji pri skeniranju.

Najveće hvala mojim roditeljima, bratu Luki i sestri Ani. Vaša ogromna podrška i ljubav nije samo bila ključna za izradu ovog rada, već i za cjelokupno moje akademsko obrazovanje.

Također se zahvaljujem ekipi „moje dame“ te ostalim prijateljima i rodbini. Posebno teti Zdravki koja je od početka poticala moju ljubav za strojarstvom.

Iva Čavar



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:

Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment, mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Iva Čavar**

JMBAG: 0035218293

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Razvoj obloge natkoljene proteze primjenom 3D tehnologija**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Development of upper leg prosthesis with 3D technologies**

Opis zadatka:

Očekuje se da će globalno tržište medicinskih proizvoda načinjenih aditivnom proizvodnjom do 2032. godine doseći 15 milijardi EUR. Razlog je u tom što aditivna proizvodnja omogućuje stvaranje značajne dodane vrijednosti u proizvodnji pacijentima prilagođenih medicinskih proizvoda, kompleksnih oblika i struktura, koje je najčešće nepraktično, neekonomično ili čak nemoguće načiniti tradicionalnim proizvodnim tehnologijama. Aditivna proizvodnja danas omogućuje skraćivanje vremena izrade medicinskih proizvoda uz signifikantno snižavanje cijena. Aditivna proizvodnja često se u medicini primjenjuje za pacijentu prilagođene proteze/ortoze, kranijalne implantate, dentalna pomagala i ortodontiju, slušna pomagala, kao i za proteze udova, te njihove obloge.

Obloge proteza udova sve su češći proizvodi u primjeni, jer povišuju razinu samopouzdanja pacijenta i podižu mu kvalitetu života. Osnovni preduvjet za izradu medicinskih proizvoda, kao što su obloge proteze dobivanje je digitalizirane slike proteze, na temelju koje se modelira i u konačnici izrađuje obloga. U okviru diplomskog rada potrebno je:

1. Opisati općenito značaj i ulogu aditivne proizvodnje u medicini.
2. Detaljnije opisati aditivne tehnologije i materijale koji se primjenjuju u medicini.
3. Opisati metode digitalizacije za pripremu modela za aditivnu proizvodnju.
4. U praktičnom dijelu rada, na konkretnom primjeru medicinskog proizvoda – oblozi za protezu natkoljenice, opisati i provesti sve potrebne korake za izradu obloge proteze aditivnom proizvodnjom.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

7. ožujka 2024.

9. svibnja 2024.

13. – 17. svibnja 2024.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. *Godić*
Damir Godić

Predsjednik Povjerenstva:

Garasić
Prof. dr. sc. Evica Garasić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS KRATICA	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. ADITIVNA PROIZVODNJA U MEDICINI.....	2
2.1. Medicinski dijelovi izrađeni aditivnom proizvodnjom.....	3
2.1.1. Kriteriji za medicinske dijelove	4
2.2. Značaj aditivne proizvodnje u medicini.....	4
2.3. Pregled zastupljenosti aditivne tehnologije unutar medicine.....	5
3. RAZVOJ I PROIZVODNJA MEDICINSKIH DIJELOVA	6
3.1. Prikupljanje podataka i generiranje CAD modela	7
3.2. Aditivna proizvodnja.....	8
3.2.1. Načelo izrade aditivnom proizvodnjom.....	8
3.2.2. Vrste procesa aditivne proizvodnje u medicini.....	10
3.2.2.1. Spajanje (sraščivanje) praškastog materijala u slojevima (PBF).....	11
3.2.2.2. Ekstrudiranje materijala (MEX)	14
3.2.2.3. Fotopolimerizacija u komori (VPP).....	18
3.2.2.4. Ispis materijala (MJT).....	21
3.2.2.5. Raspršivanje veziva (BJT)	22
3.2.2.6. Laminiranje (SHL).....	23
3.2.2.7. Taloženje usmjerenim izvorom energije (DED).....	24
3.2.3. Izbor materijala za aditivnu proizvodnju	26
3.2.3.1. Polimeri u medicini.....	27
3.2.3.2. Metali u medicini	28
3.2.3.3. Keramika i kompoziti u medicini	29
4. PRIPREMA MODELA ZA ADITIVNU PROIZVODNJU.....	30
4.1. Postupak digitalizacije (skeniranje)	30
4.1.1. Volumetrijsko prikupljanje podataka.....	31
4.1.1.1. Računalna tomografija	32
4.1.1.2. CBCT, MCT, TACT postupci skeniranja	33
4.1.1.3. Magnetska rezonanca.....	33
4.1.2. Prikupljanje podataka površine.....	33
4.1.2.1. Lasersko skeniranje.....	34
4.1.2.2. Time of flight skeniranje.....	34
4.1.2.3. Fotogrametrija.....	35
4.1.2.4. Skeniranje strukturiranim svjetlom.....	36
5. PRAKTIČNI DIO	37

5.1. Dijagnoza	38
5.2. Skeniranje i transformacija podataka	40
5.3. Oblikovanje obloge	44
5.4. Aditivna proizvodnja.....	50
6. ZAKLJUČAK.....	56
LITERATURA.....	57

POPIS SLIKA

Slika 1. Medicinski dijelovi izrađeni aditivnom proizvodnjom [1]	2
Slika 2. Primjeri proizvoda aditivne tehnologije u raznim područjima medicine [3]	5
Slika 3. Postupak izrade aditivnom tehnologijom u medicini [4]	6
Slika 4. Sken ljudskog tijela [4]	7
Slika 5. Tri koraka aditivne proizvodnje [9]	9
Slika 6. Ispis modela glave sloj po sloj [10]	9
Slika 7. Lasersko srašćivanje [11]	11
Slika 8. Elektronsko srašćivanje [11]	13
Slika 9. Postupak ekstrudiranja materijala – MEX [18]	15
Slika 10. Ekstrudiranje: s klipom (a), filamentom (b) i pužnim vijkom (c) [4]	16
Slika 11. Stereolitografija [23]	18
Slika 12. Očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom [4]	19
Slika 13. Svjetlosno očvršćivanje s LCD zaslonom/maskom [24]	19
Slika 14. Postupak ispisa materijala - MJT [30]	21
Slika 15. Postupak raspršivanja veziva - BJT [33]	22
Slika 16. Postupak laminiranja - SHL [35]	24
Slika 17. Postupak taloženja usmjerenim izvorom energije s prahom (A) i žicom (B) - DED [37]	25
Slika 18. Zastupljenost polimera, metala i keramike u medicini [40]	26
Slika 19. Podjela postupka digitalizacije [47]	30
Slika 20. Računalna tomografija [48]	32
Slika 21. CT skener [50]	32
Slika 22. Triangulacija [52]	34
Slika 23. Time of flight skeniranje [52]	34
Slika 24. Fotogrametrija – generiranje 3D modela [54]	35
Slika 25. Skeniranje sa strukturiranim svjetlom [4]	36
Slika 26. Natkoljena proteza [57]	38
Slika 27. Kalibracijska ploča	40
Slika 28. iReal 2E skener [60]	41
Slika 29. Postupak skeniranja s iReal 2E skenerom	42
Slika 30. Podatci softvera tijekom skeniranja	43
Slika 31. STL datoteka skenirane noge	43
Slika 32. Mesh modeli proteze i desne noge	44
Slika 33. Mirror skena noge	45
Slika 34. Skenovi spremni za konstruiranje obloge	45
Slika 35. Povezivanje krivulja i linija naredbom <i>Loft</i>	46
Slika 36. Izrada provrta	46
Slika 37. Uklanjanje dijela obloge	47
Slika 38. Nakon uklanjanja dijela obloge	47
Slika 39. Podjela obloge	48
Slika 40. Prednji (lijevi) i stražnji (desni) dio obloge	48
Slika 41. Proteza bez obloge (lijevo) i s oblogom (desno)	49
Slika 42. <i>MakerBot METHOD X Carbon Fiber Edition</i> printer	50
Slika 43. Filament PLA polimera u plavoj boji [62]	51
Slika 44. Filament PVA polimera	52
Slika 45. Priprema za ispis	52
Slika 46. Simulacija ispisa 3D modela proteze i dijelova obloge	53
Slika 47. Ispisana proteza i dijelove obloge	54

Slika 48. Rezultat aditivne proizvodnje 55

POPIS TABLICA

Tablica 1. Glavni procesi aditivne tehnologije u medicini [1] 10
Tablica 2. Neki od materijala koji se primjenjuju u različitim AM tehnologijama [1]..... 27
Tablica 3. Glavni parametri ispisa 3D modela proteze i dijelova obloge 53

POPIS KRATICA

Kratika	Značenje
3D	Trodimenzionalno
CAD	Oblikovanje s pomoću računala
ASME	Američko društvo strojarskih inženjera
CT	Računalna tomografija
MRI	Magnetska rezonanca
2D	Dvodimenzionalno
STL	STL datoteka
AM	Aditivna proizvodnja
RP	Brza izrada prototipova
SLA	Stereolitografija
ISO	Međunarodna organizacija za normizaciju
ASTME	Američkog udruženja za ispitivanje i materijale
PBF	Spajanje (srašćivanje) praškastog materijala u slojevima
MEX	Ekstrudiranje materijala
VPP	Foto-polimerizacija u komori
MJT	Ispis materijala
BJT	Raspršivanje veziva
SHL	Laminiranje
DED	Taloženje usmjerenim izvorom energije
L-PBF	Lasersko srašćivanje
E-PBF	Elektronsko srašćivanje
DMLM	Potpuno lasersko srašćivanje
SLS	Selektivno lasersko srašćivanje
SLM	Selektivno lasersko srašćivanje metala
FDM	Taložno očvršćivanje
FFF	Ekstrudiranje materijala filamentom
PEEK	Poli-eter-eter-keton
DLP	Očvršćivanje digitalno obrađenim signalom
LCD	LCD monitor
MSLA	Svjetlosno očvršćivanje s LCD zaslonom/maskom
CLIP	Očvršćivanje projektorom uz sloj kisika
TPP	Očvršćivanje s dva lasera
UV	Ultraljubičasto zračenje
PUA	Kompozitna smola
PLA	Polilaktid
CFRC	Beton s dodatkom ugljičnih vlakana
PA	Poliamid

PP	Polipropilen
PLGA	Polilaktična-ko-glikolna kiselina
ABS+	Akilonitril butadien stiren
PCL	Poliakapolakton
PDLLA	Poli (DL-mliječna kiselina)
HA	Hidroksiapatit
TCP	Trikalcij – fosfat
ATZ	Aluminij kaljeni cirkonij
PMMA	Poli-metil-meta-krilat
CBCT	Računalna tomografija s konusnim snopom
MCT	Mikroračunalna tomografija
TACT	Računalna tomografija s podesivim otvorom blende
PVA	Polivinil alkohol

SAŽETAK

Cilj ovoga rada je ukazati na važnost aditivnih tehnologija za pacijente i liječnike.

S obzirom na primjene i mogućnosti aditivne proizvodnje prikazani su postupci koje se najčešće koriste. Prema tome PBF, MEX to jest FDM i VPP postupci su najzastupljeniji. Osim postupaka prikazani su i materijali za ispis, a među njima prednjači PLA koji je i korišten za razvoj medicinskog proizvoda, obloge za natkoljenu protezu. Međutim, prije toga opisani su postupci digitalizacije odnosno skeniranja uz pomoć kojih se dobiva CAD model.

Na osnovu digitalne slike noge i proteze oblikovana je obloga. Prikazana obloga ima dva dijela (prednji i stražnji dio) koji se povezuju vijcima. Nakon oblikovanja, ispisana je i spojena u 3D model s protezom.

Ključne riječi: obloga, proteza, aditivna proizvodnja, medicina

SUMMARY

The aim of this study is to emphasize the importance of additive technologies for patients and physicians.

Considering the applications and possibilities of additive manufacturing, the procedures most commonly used are presented. Accordingly, PBF, MEX i.e. FDM and VPP procedures are the most prevalent. In addition to the procedures, materials for printing are also presented, with PLA leading the way, which was also used in the development of a medical product, the cover for the above-knee prosthesis. However, before that, the procedures of digitization, i.e., scanning, are described, through which a CAD model is obtained.

Based on the digital image of the leg and the prosthesis, the cover was modeled. The depicted cover consists of two parts (front and back) connected with screws. After modeling, it was printed and assembled into a 3D model with the prosthesis.

Key words: cover, prosthesis, additive manufacturing, medicine

1. UVOD

Tijekom posljednjih godina, aditivna tehnologija poznatija kao 3D printanje omogućila je razvoj raznih inovacija u raznim područjima. Od ispisa prototipova i rezervnih dijelova u industriji do kojekakvih igračaka za djecu.

Paralelno s ostalim područjima aditivna tehnologija je donijela veliku promjenu i u medicini. Zbog velike preciznosti, brze izrade i mogućnosti prilagodbe, sve je više razvijenih medicinskih modela. Primjenom ispisanih modela pacijentu se popravljaju ili vraća pokretljivost, podiže samopouzdanje i na kraju omogućava normalno funkcioniranje u društvu. Za razvoj istih koristi se nekoliko tehnologija aditivne proizvodnje kod kojih je prvi korak podjela CAD modela na slojeve. Printer ispisuje sloj po sloj i slaganjem slojeva nastaje 3D proizvod. Za kvalitetan ispis istog, bitno je imati dobar CAD model i odgovarajući materijal. Uz to, dolazi se do pitanja koju metodu ispisa odabrati, kako napraviti što bolju digitalnu sliku za kreiranje CAD modela te koji je najbolji materijal u odgovarajućoj medicinskoj primjeni.

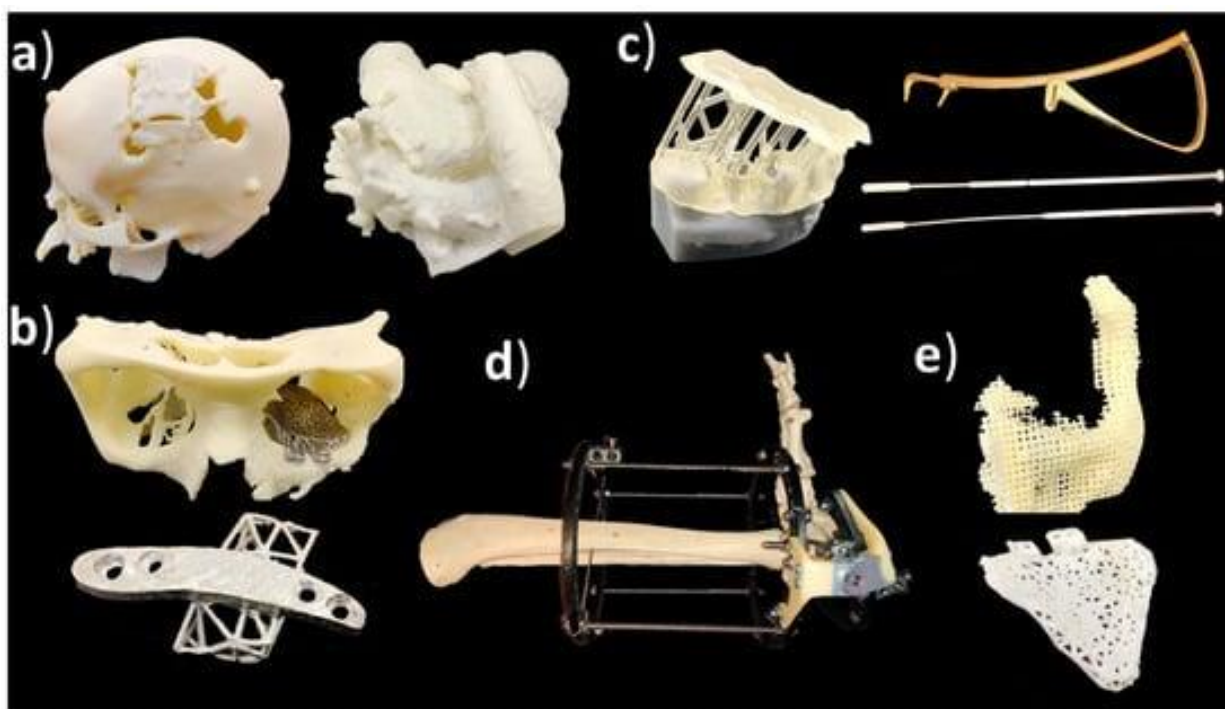
U prvom dijelu rada cilj je odgovoriti na pitanja dok se u drugom dijelu prikazuje postupak izrade na konkretnom primjeru obloge za natkoljenu protezu. Porastom broja korisnika sve se više napora ulaže u razvoj dijelova proteze. Postupci aditivne tehnologije omogućuju izradu obloga koje ispunjavaju sve zahtjeve korisnika. S obzirom na to ispisuju se razni oblici uz vrlo dobra svojstva.

Međutim, da bi se došlo do toga treba se prvo dobro „upoznati“ s aditivnom tehnologijom i mogućnostima njene primjene u medicini.

2. ADITIVNA PROIZVODNJA U MEDICINI

Svaki pacijent je jedinstven, stoga aditivna proizvodnja u području medicine ima sve veću ulogu. Zbog mogućnosti personalizirane i prilagođene izrade, najčešće se primjenjuje za proizvodnju:

- a) medicinskih modela;
- b) implantata;
- c) alata i dijelova za medicinske uređaje;
- d) medicinskih pomagala, potpornih vodilica, obloga i proteza;
- e) bioispisa. [1]



Slika 1. Medicinski dijelovi izrađeni aditivnom proizvodnjom [1]

Na slici 1 su prikazani medicinski dijelovi koji se proizvode ovom tehnologijom, a koja je njihova uloga za pacijente, liječnike i kirurge nešto više u nastavku.

2.1. Medicinski dijelovi izrađeni aditivnom proizvodnjom

Medicinski modeli (slika 1 a), temelje se na anatomiji pacijenta. Uz pomoć aditivne tehnologije znanstvenici imaju mogućnost transformacije geometrije modela i izdvajanje samo zanimljivih dijelova (na primjer uvećan mozak s dijelovima ili umanjeno stopalo). Koriste se za pred- i postoperativno planiranje i obuku, edukaciju studenata medicine, te informiranje pacijenata i obitelji pacijenata.

Implantati (slika 1 b) se aditivno proizvode kako bi nadomjestili neispravno ili nedostajuće tkivo. Materijal mora biti kompatibilan s tkivom, jer svojstva površine mogu utjecati na prijanjanje implantata.

Alati i dijelovi za medicinske uređaje (slika 1 c) uz pomoć aditivne tehnologije mogu koristiti dimenzije i oblike specifične za pacijenta te time omogućuju ili poboljšavaju klinički rad. Koriste se kao na primjer vodilice za bušenje koje se trebaju sterilizirati, budući da mogu biti u kontaktu s tjelesnim tekućinama, membranama, tkivima i organima određeno vrijeme.

Nadalje, medicinska pomagala, potporne vodilice, obloge i proteze (slika 1 d) su dijelovi izvan tijela i mogu se kombinirati sa standardnim dijelovima kako bi se omogućila što bolja prilagodba pacijentu. Koriste se kao postoperativne potpore, vodiči za kretanje, fiksatori, vanjske proteze, ležišta za proteze, personalizirane obloge i ostalo, a glavna uloga im je poboljšati kvalitetu života korisnika.

Za sam kraj, bioispis (slika 1 e) je kombinacija aditivne proizvodnje i inženjerstva tkiva. Oblik ovoga medicinskog dijela se može personalizirati kako bi odgovarao nedostatku. Materijal mora biti biološki kompatibilan zbog aktivnog dodira s tijelom pa se koriste različiti polimerni materijali, keramika i kompoziti.

Svaki od ovih dijelova može se izraditi konvencionalnim postupcima, zbog čega se javljaju brojna pitanja za aditivnu proizvodnju, kao što su koje su prednosti i je li proizvodnja jeftinija. Za odgovore je potrebno istražiti cijeli životni ciklus proizvoda i procesa, a osim toga stvarne proizvodne cijene nisu jedini pokazatelj uspješnosti tehnologije. [1]

Kako bi mogli ocijeniti uspješnost tehnologije znanstvenici prolaze kroz pet kriterija.

2.1.1. Kriteriji za medicinske dijelove

Aditivna proizvodnja koristi se za izradu dijelova prema zahtjevima pacijenta, tj. prilagođenih implantata, brzo uz visoku točnost po razumnoj cijeni sa što jednostavnijom upotrebom. Izradom medicinskih modela ovom tehnologijom postiže se pet glavnih kriterija za ove proizvode, a to su:

- 1) brzina – aditivna proizvodnja ima veliku brzinu izrade uz dobru mehaničku čvrstoću;
- 2) cijena – niža cijena u odnosu na ostale postupke;
- 3) točnost – medicinski dijelovi proizvedeni aditivnom tehnologijom imaju visoku točnost;
- 4) materijal – mogućnost promjene materijala, a promjenom svojstava materijala može se povećati i čvrstoća;
- 5) jednostavnost korištenja – cilj je smanjiti broj dodatnih alata i učvršćenja. [2]

Na temelju ovih kriterija koje postižu ovi proizvodi se može zaključiti kolika je važnost aditivne proizvodnje za medicinu.

2.2. Značaj aditivne proizvodnje u medicini

Aditivna proizvodnja u medicini ima za cilj pomoći, održati ili vratiti pokretljivost osobe, a rezultati su brzo izrađeni medicinski dijelovi, po narudžbi s ekonomičnom cijenom. Bitno je za naglasiti nekoliko postignuća ove tehnologije, među kojima su:

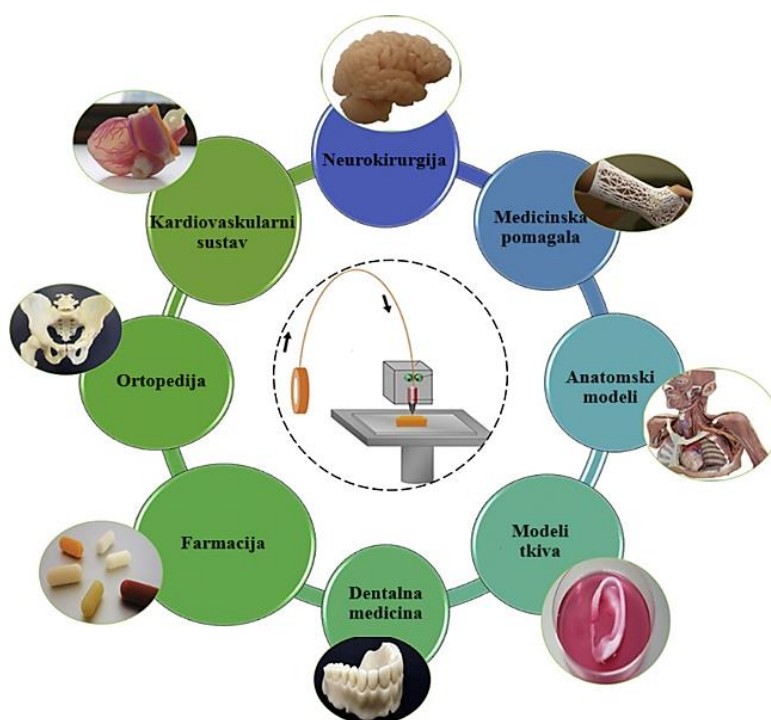
- mogućnost izrade kirurških pomagala i implantata;
- mogućnost izrade dijelova složene geometrije;
- mogućnost individualizacije;
- omogućuje pred- i postoperativno planiranje;
- bolja edukacija studenata medicine;
- kratko vrijeme izrade;
- smanjenje troškova;
- poboljšana njega pacijenata s pomoću prilagođenih modela;
- brži oporavak pacijenata;
- smanjenje težine;
- bioispis organa i tkiva;
- manje otpada;

- visoka razina reproducibilnost.

Uz to, učinkovitost ove tehnologije se može vidjeti po sve većem broju primjena dijelova izrađenih ovim postupkom te broju istraživanja koja su provedena na tom području.[2]

2.3. Pregled zastupljenosti aditivne tehnologije unutar medicine

Američko društvo strojarских inženjera (ASME) je objavilo u svome godišnjem izvješću o aditivnoj proizvodnji da u usporedbi s drugim područjima čini 22 % od ukupne aditivne proizvodnje primjenjuje u domeni medicine. Osim toga članak navodi da razvoj prototipova i anatomskih modela, kao područja unutar medicine, ima najveći doprinos. [3]

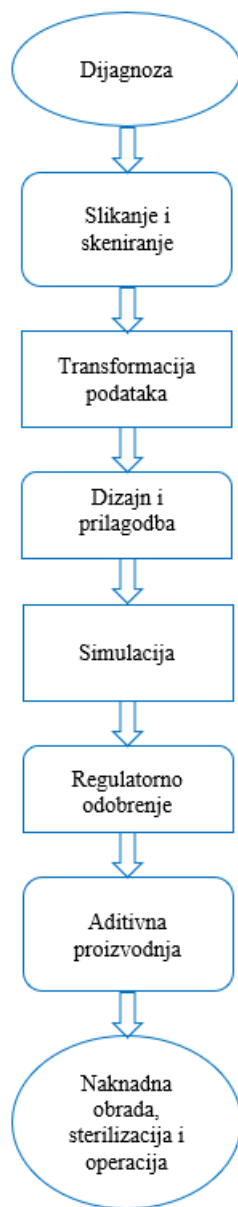


Slika 2. Primjeri proizvoda aditivne tehnologije u raznim područjima medicine [3]

Prema slici 2 vidi se da je aditivna tehnologija zastupljena u raznim područjima medicine od kirurgije do stomatologije, a razvoj i proizvodnja medicinskih proizvoda detaljnije su opisani u poglavlju 3.

3. RAZVOJ I PROIZVODNJA MEDICINSKIH DIJELOVA

Razvoj i proizvodnja medicinskih dijelova se može opisati medicinskim lancem procesa podijeljenih u osam koraka (slika 3). Svaki medicinski dio neovisno je li se koristi za predklinička ispitivanja i planiranja ili kao implantat prolazi kroz navedene korake.



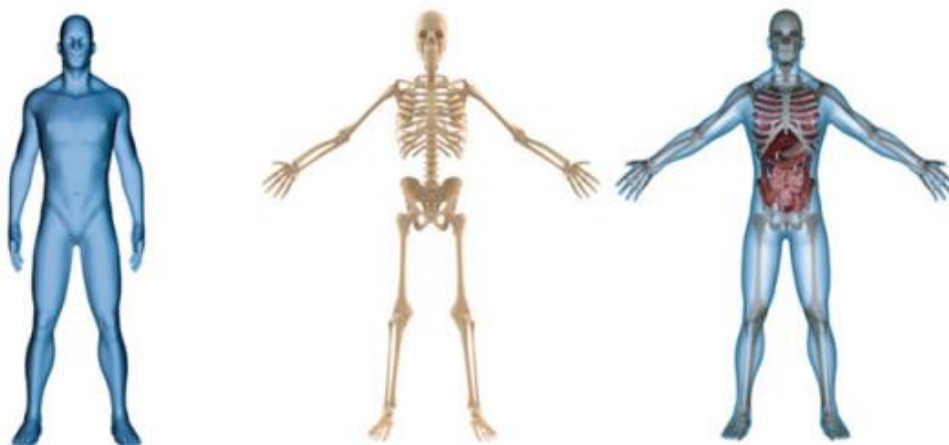
Slika 3. Postupak izrade aditivnom tehnologijom u medicini [4]

Prema slici 3 prvi korak u procesu je dijagnoza koja usmjerava liječenje, olakšava i organizira medicinska istraživanja. Kako bi se uspostavila što bolja dijagnoza i izradio dio s visokom razinom točnosti, potrebne su što kvalitetnije slike odnosno skenovi. Prikupljeni podaci variraju od pacijenta do pacijenta, zbog čega su se razvile razne tehnike skeniranja. Nakon toga, podatci se transformiraju u CAD (eng. *Computer-aided design*) model uz pomoć softvera. Po završetku, potrebno je izraditi simulaciju kako bi se provjerila čvrstoća te dobiti odobrenje prije same proizvodnje. Gotovi dio može se dodatno obraditi te time povećati čvrstoću i kvalitetu površine proizvoda. Završni koraci su sterilizacija i operacija, koji se provode ovisno o mjestu primjene samog medicinskog dijela (medicinski modeli, implantati). [4, 5]

3.1. Prikupljanje podataka i generiranje CAD modela

Za prikupljanje računalnih podataka i generiranje CAD modela ima više postupaka (opisano u poglavlju 4.1.), a u medicini se koriste ova tri načina:

- skeniranjem laserskim ili optičkim skenerima;
- računalna tomografija ili CT snimanje (engl. *Computed Tomography*);
- magnetska rezonanca ili MRI snimanje (engl. *Magnetic Resonance Imaging*).



Slika 4. Sken ljudskog tijela [4]

Na slici 4 su prikazani skenovi ljudskog tijela koji nastaju ovisno koji se postupak koristi i za što sken služi. Lijevo je sken kože (laserski ili optički skener), koji se može koristiti za izradu različitih vrsta obloga i proteza dok je u sredini sken kostura (CT ili MRI postupak), na primjer za proizvodnju medicinski prilagođenih implantata, kirurških vodilica i ostalog.

Desno se nalazi sken mekog tkiva (CT ili MRI postupak) za izradu unutarnjih organa i tkiva, složeno kirurško planiranje, proizvodnju organa aditivnom proizvodnjom iz živih stanica (bioispis) i tako dalje. [4]

Skenovi se obrađuju s pomoću posebnih softvera, koji olakšavaju odvajanje i isticanje tkiva (mekih ili tvrdih) i omogućavaju pretvorbu 2D informacija o slici u 3D prikaz. Većinom se koristi standardni STL prikaz podataka odnosno strukturirana mreža, takozvani poligonalni modeli. Mreža ravnih trokutastih površina definira površinu CAD modela čime se uklanja kvaliteta prikupljenog oblaka točaka, ali dio poprima veću vizualnu jasnoću. Objekt postaje lakše vizualizirati na temelju ovakvog prikaza, a CAD model pacijentovog dijela tijela ili organa u STL formatu je osnova za aditivnu proizvodnju. [6, 7]

3.2. Aditivna proizvodnja

Aditivna proizvodnja (eng. *Additive manufacturing* - AM) je postupak u kojemu se predmeti izrađuju stapanjem ili taloženjem materijala poput plastike, metala, keramike, praha, tekućina ili čak živih stanica u slojevima kako bi se proizveo 3D objekt. [8]

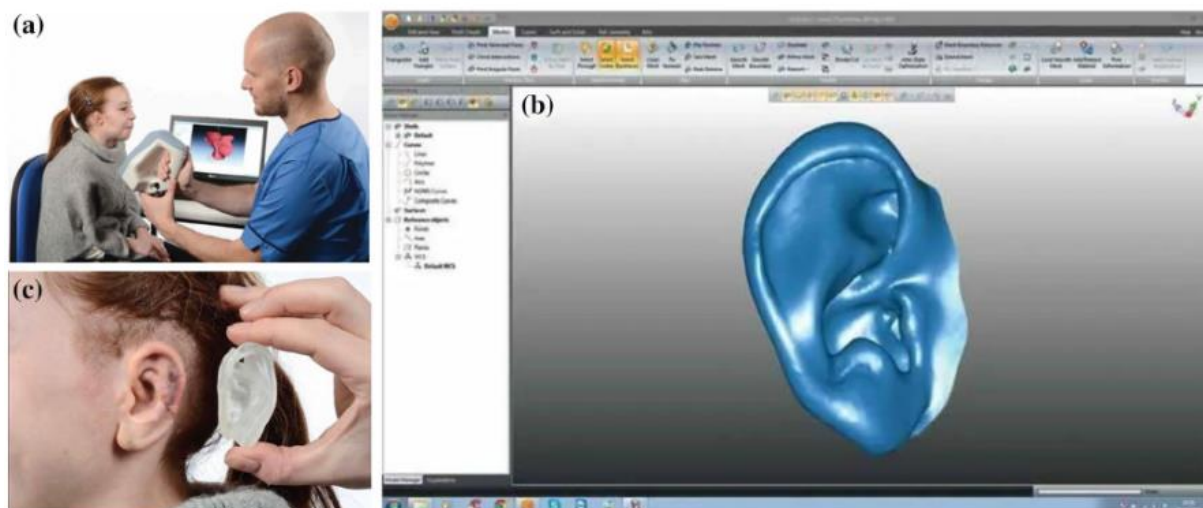
Godine 1980. Dr. Kodama iz Japana prvi je izumio ovu tehnologiju pod nazivom brza izrada prototipova (RP) jer je tehnologija dizajnirana za brzu i štedljivu izradu prototipa za masovnu proizvodnju. Međutim, Chuck Hull je prvi patentirao uređaja za stereolitografiju (SLA), 1986. godine. Od tada do danas, ova tehnologija, odnosno strojevi revolucioniraju proizvodnju, slično tako što je tiskarski stroj transformirao novinarstvo. [2,8]

3.2.1. Načelo izrade aditivnom proizvodnjom

Ova tehnologija može ispisati 3D objekt u gotovo bilo kojem obliku koji se može zamisliti kako je definirano u datoteci računalno potpomognutog dizajna (CAD).

Trodimenzionalni (3D) ispis objekata se sastoji od tri osnovna koraka (slika 5):

1. generiranja računalnog 3D modela i spremanje u standardnu datoteku (STL format);
2. prebacivanje datoteke u stroj za daljnju proizvodnju;
3. ispis objekta sloj po sloj u opremi za aditivnu proizvodnju. [8, 9]



Slika 5. Tri koraka aditivne proizvodnje [9]

Na slici 5 su prikazani koraci izrade ušne proteze. Nakon što se u prvom koraku generira STL datoteka (slika 5 a), prebaci se u program (slika 5 b) koji reže objekt na slojeve i pretvara ga u G-kod koji sadrži upute za 3D printer. Treći korak vezan je uz ispis modela. U osnovi 3D pisac prvo slijedi upute iz CAD datoteke za izgradnju temelja objekta. Pomičući ispisnu glavu duž x–y ravnine, zatim duž z-osi gradi objekt sloj po sloj (slika 6). Postoji niz strojeva i procesa aditivne proizvodnje za izradu istih, a u nastavku nešto detaljnije o svakom. [3, 8, 9]



Slika 6. Ispis modela glave sloj po sloj [10]

3.2.2. Vrste procesa aditivne proizvodnje u medicini

Različiti procesi aditivne proizvodnje se koriste u različitim područjima. Glavni procesi koji se koriste u medicini su prikazani u Tablici 1. s službenim nazivima prema normi ISO/ASTM 52900 te njihova učestalost primjene.

Tablica 1. Glavni procesi aditivne tehnologije u medicini [1]

Vrste aditivne proizvodnje	Učestalost primjene
PBF (eng. <i>Powder Bed Fusion</i>) Spajanje (sraščivanje) praškastog materijala u slojevima	+++
MEX (eng. <i>Material Extrusion</i>) Ekstrudiranje materijala	+++
VPP (eng. <i>Vat Photopolymerization</i>) Foto-polimerizacija u komori	+++
MJT (eng. <i>Material Jetting</i>) Ispis materijala	++
BJT (eng. <i>Binder Jetting</i>) Raspršivanje veziva	++
SHL (eng. <i>Sheet lamination</i>) Laminiranje	+
DED (eng. <i>Directed Energy Deposition</i>) Taloženje usmjerenim izvorom energije	+

S obzirom na tablicu 1, u medicini se najčešće koristi sraščivanje praškastog materijala, ekstrudiranje i foto-polimerizacija u komori.

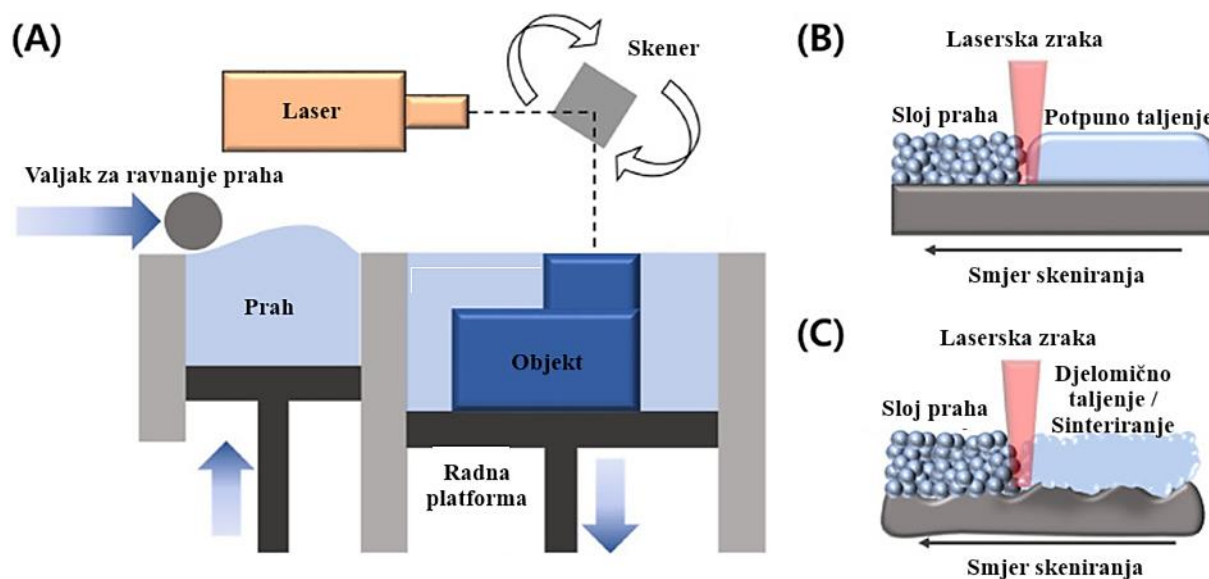
3.2.2.1. Spajanje (srašćivanje) praškastog materijala u slojevima (PBF)

Srašćivanje praškastog materijala u slojevima je postupak koji se dijeli prema izvoru energije pa tako postoji lasersko (eng. *Laser Powder Bed Fusion – L-PBF*) i elektronsko srašćivanje (eng. *Electron Beam Powder Bed Fusion – E-PBF*).

Lasersko srašćivanje

Lasersko srašćivanje (L-PBF) je postupak ispisa 3D objekata taljenjem ili sinteriranjem praškastog materijala. Prolaskom izvora energije kroz prah (metalni, keramički ili polimerni) duž x–y osi čestice se spajaju i nastaje sloj. Nakon dovršetka svakog sloja, uređaj se pomiče duž z-osi i tako nastaje proizvod. [9]

S obzirom na način taljenja praha ovaj postupak se može podijeliti na lasersko srašćivanje s potpunim (eng. *Direct Metal Laser Melting – DMLM*) i djelomičnim taljenjem praha (eng. *Selective Laser Sintering - SLS*).



Slika 7. Lasersko srašćivanje [11]

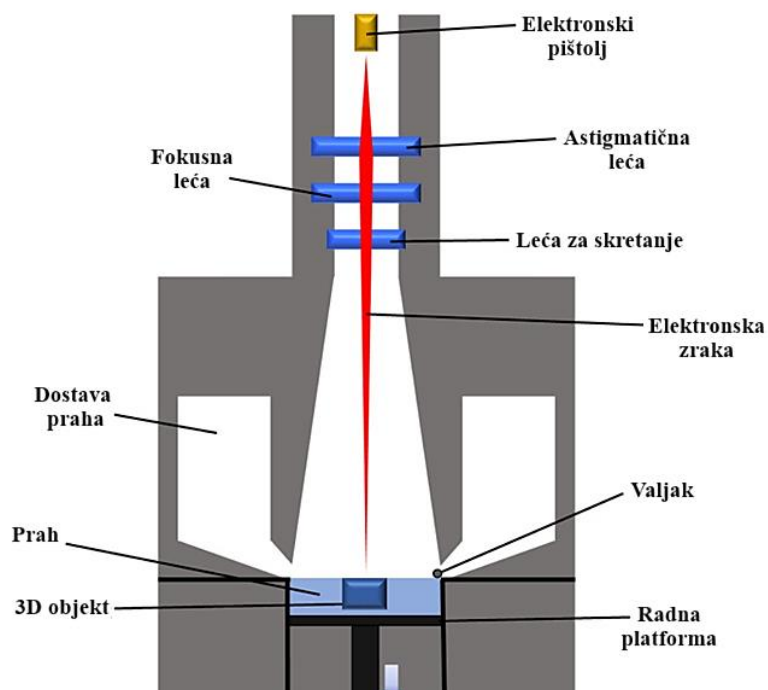
Na slici 7 je prikazano potpuno (A, B) i djelomično (C) taljenje praha laserom, a prvi uređaji (sredinom 1990-ih) za ovaj postupak je bio na načelu djelomičnog taljenja sa zadržavanjem čvrste jezgre.

Uređaj za lasersko srašćivanje (slika 7 A) se sastoji od platforme za raspršivanje praha s valjkom i radne platforme s potpornim klipovima. Valjak ravnomjerno nanosi slojeve praha, a laserska zraka tali ili djelomično sinterira prah prema CAD modelu. Laser omogućava visoku razlučivost uređaja jer se može fokusirati na male promjere i izraditi vrlo tanke stijenke s malim tolerancijama. Zbog izrade sloja po sloj smanjuje se poroznost proizvoda, a uz naknadnu obradu nastaju medicinski proizvodi pune gustoće. Početni materijal može biti jednokomponentni ili višekomponentni (kombinacija dvije ili više vrsta praha), a postupak se izvodi u vakuumu ili zaštićenom stanju inertnog plina kako bi se spriječila reakcija metalnih prahova s drugim plinovima. Jedan od primjera je titan i njegove legure koje lako oksidiraju, stoga je ključno koristiti inertni plin ili koristiti u vakuumu kako bi se izlaganje kisiku svelo na minimum. [9, 11]

Selektivno lasersko taljenje (eng. *Selective Laser Melting* - SLM) je postupak selektivnog taljenja koji se koristi većinom kod metala i značajna je po tome što koristi veliku količinu laserske energije. Rezultat ovog postupka je veća otpornost na koroziju u usporedbi s lijevanim proizvodima što je bitno kod biomedicinske primjene (npr. zubni implantati). [12]

Elektronsko srašćivanje

Elektronsko srašćivanje (E-PBF) je postupak vrlo sličan prethodnom jer također koristi prah kao početni materijal. Postupak prikazan na slici 8, kreće s pripremanjem praha na radnoj platformi, zatim se snop elektrona usmjeri uz pomoć leća i tali prah onako kako je definirano u CAD modelu. Pomakom platforme prema dolje kreće ispis novog sloja na prethodni i tako sve dok se ne završi izrada komponente. Završni korak je čišćenje preostalog praha koji okružuje proizvedenu komponentu. [11]



Slika 8. Elektronsko srašćivanje [11]

Prednosti PBF postupka

- mogućnost izrade složenih oblika L-PBF postupka;
- dobra mehanička svojstva;
- visoka točnost;
- širok izbor materijala i mogućnost kombiniranja;
- dobra završna obrada površine;
- mogućnost recikliranja materijala.

Nedostatci PBF postupka

- praškasti materijal je opasan za okoliš i zdravlje;
- posebni zahtjevi za skladištenje i transport praha;
- visoka cijena praha;
- pojava zaostalih naprezanja;
- obrada i kvaliteta konačnog proizvoda uvelike ovise o svojstvima praha. [9, 11]

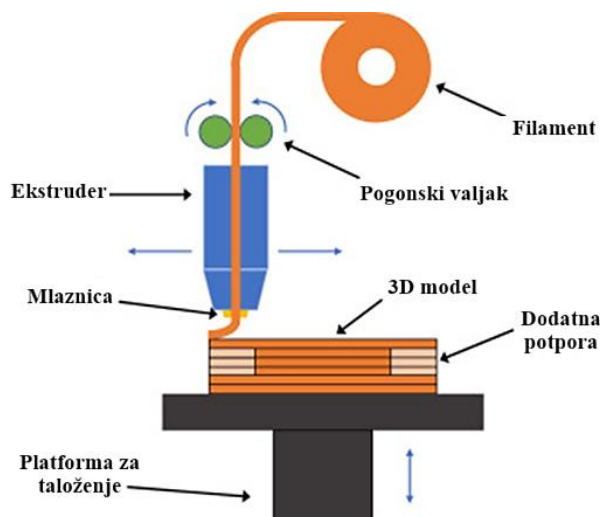
Primjena u medicini

Prema istraživanjima tehnologija PBF ima veliku primjenu kod:

- izrade lijekova raznih oblika - omogućuje izrade složenih oblika, koje je teško ili nemoguće proizvesti korištenjem nekim konvencionalnih procesa ili tehnologijama tiskanja za relativno nisku cijenu. [13]
- izrade metalnih endoproteza (kuk, koljeno) – mogućnost izrade personaliziranih implantata u cilju što manje traume okolnog koštanog tkiva. [14]
- izrade krunica, mostova, zubnih implantata, ortopedskih aparata, kirurških vodilica – zbog visoke razine točnosti, preciznosti i brzine svakodnevno se koristi u dentalnoj medicini. [15]
- izradu 3D modela mozga za planiranje operacija i edukaciju – mogućnost ispisa u različitim bojama olakšava učenje. [16]
- izradu modela kostiju različite čvrstoće – ispisani kompozitni dijelovi ovom metodom imaju veliki otpor na bušenje tijekom operacije. [17]

3.2.2.2. Ekstrudiranje materijala (MEX)

Ekstrudiranje materijala ili taložno očvršćivanje (eng. *Fused Deposition Modeling* - FDM) je postupak aditivne proizvodnje kod koje se glava ekstrudera pomiče duž x i y osi te dodavanjem materijala nastaje sloj (slika 9), koji se sastoji od taložnih niti. Nakon ispisa sloja, platforma za taloženje se pomiče prema dolje u smjeru z osi kako bi se mogao u konačnici ispisati 3D model. [9]



Slika 9. Postupak ekstrudiranja materijala – MEX [18]

Ispis složenih geometrijskih oblika zahtjeva dodatnu potporu jer se svaki sloj ispisuje na početku prethodnog. Pisači s više glava omogućavaju ispis potpore i CAD modela uz minimalne napore čovjeka. Međutim, ova dodatna složenost zahtijeva da materijali budu pažljivo odabrani i pisac kalibriran zbog kompatibilnosti s uvjetima ispisa tako da nema odstupanja u dimenzijama potpore i željenog oblika.

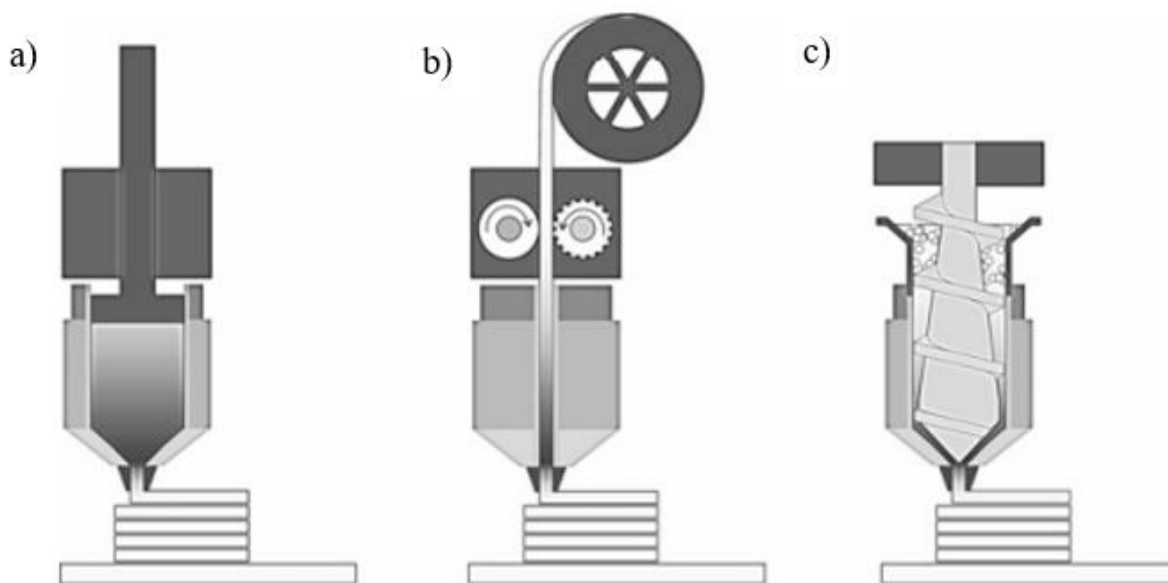
Glavni parametri su:

- temperatura glave ekstrudera i platforme;
- brzina i putanja ekstrudiranja;
- brzina i promjer žice;
- viskoznost materijala.

Smanjenjem promjera žice ili povećanjem brzine glave pisaa, promjer niti se smanjuje uz reguliranje brzine žice kako bi se postiglo ravnomjerno taloženje niti. Pored toga, temperatura i viskoznost materijala su povezani jer materijali s niskom viskoznošću pri porastu temperature će previše teći i proizvodi će imati neravnomjernu strukturu. Stoga je važno pažljivo odabrati ove parametre kako bi se mogli osigurati najbolji uvjeti za ispis i ravnomjernost taloženja. [9, 19]

Aditivna proizvodnja ekstrudiranjem materijala (MEX) se može podijeliti s obzirom na vrstu ekstrudera pa tako postoji:

- a) ekstrudiranje materijala klipom,
- b) ekstrudiranje materijala filamentom (žicom),
- c) ekstrudiranje materijala pužnim vijkom.



Slika 10. Ekstrudiranje: s klipom (a), filamentom (b) i pužnim vijkom (c) [4]

Ekstrudiranje materijala klipom (slika 10 a) se koristi za istiskivanje mekih ili tekućih materijala, a materijali koji nisu tekući i koji se ne mogu pretvoriti u filamente istiskuju se pomoću pužnog vijka (slika 10 c).

Ekstrudiranje materijala filamentom (slika 10 b) ili FFF (eng. *Fused Filament Fabrication*), je najrašireniji postupak, a neki od razloga su: niska cijena opreme, jednostavnost procesa i dostupnost raznih filamenata za ispis. Pogonski kotači vuku filament, a zatim ga isti kotači guraju u tekućinu i na kraju u mlaznicu. Filament se najčešće izrađuje od plastomera jer materijal mora biti fleksibilan da se može namotati. [4]

Prednosti MEX postupka

- brza i ekonomična izrada standardnih komponenti ili prototipova s različitim polimernim materijalima;
- veća čvrstoća od dijelova proizvedenih klasičnim postupcima od istog materijala;
- jednostavan i jeftiniji proces za razliku od drugih postupaka;
- izrada sloj po sloj pomoću cilindričnih vlakana povećava integritet unutar strukture;
- automatiziran ispis bez nadzora;
- proces prilagođen uredu.

Nedostatci MEX postupka

- razlučivost ovisi od debljini žice, trenutačno najmanje 0,127 mm;
- hrapava površina;
- spor proces taloženja u usporedbi s drugim aditivnim tehnologijama;
- većinom se koriste samo za polimere (najčešće plastomeri);
- pojava anizotropije mehaničkih svojstava, uz slabija svojstva u z-osi zbog manje kohezije nanesenih slojeva;
- potreba za dodatnom potporom. [4, 9, 19]

Primjena u medicini

Neke od primjena su:

- za ispis implantata kralježnice, kuka, koljena, hrskavice, dijelova u dentalnoj medicini – zbog primjene poli eter ketona (PEEK), ovaj postupak ima veliku popularnost. Poli-eter-eter-keton osigurava: dugotrajnost implantata, kompatibilnost s drugim materijalima, mali troškove i težinu te lijep (estetski) izgled, što čini pacijenta zdravim i zadovoljnim. [20]
- za ispis biorazgradivih stentova – zbog ekonomičnosti i manjeg utjecaja na svojstva materijala u odnosu na lasersku obradu koja se prije koristila. [21]

3.2.2.3. Fotopolimerizacija u komori (VPP)

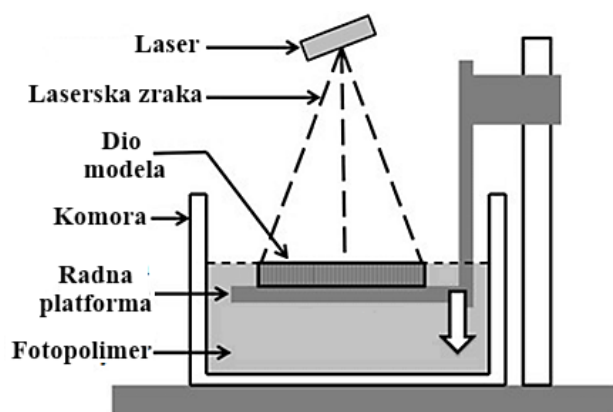
Fotopolimerizacija je aditivna tehnologija kod koje se tekuće smole (monomeri ili oligomeri) stvrdnjavaju odnosno fotopolimeriziraju kada su izložene izvoru svjetlosti određene valne duljine i formiraju duomeri. Zbog mogućnosti brze izrade složene strukture s visokom rezolucijom, ovaj postupak ima veliku ulogu u medicini.

S obzirom na izvor svjetla VPP se može podijeliti na:

- a) očvršćivanje laserom - Stereolitografija (eng. *Stereolithography* – SLA);
- b) očvršćivanje projektorom - Očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (eng. *Digital light processing* – DLP) i svjetlosno očvršćivanje s LCD zaslonom/maskom (eng. *Mask Stereolithography* – MSLA);
- c) očvršćivanje projektorom uz sloj kisika - CLIP (eng. *Continuous Liquid Interphase Printing*);
- d) očvršćivanje s dva lasera – TPP (eng. *Two-photon polymerization*). [4, 22]

Stereolitografija

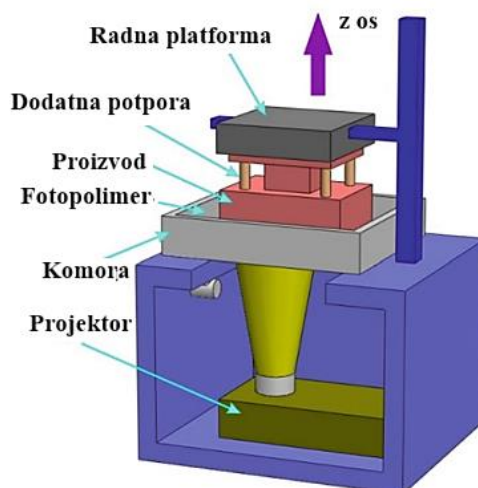
SLA je najstariji postupak fotopolimerizacije u aditivnoj proizvodnji. Izvor svjetla, to jest UV zraka prati putanju CAD modela piksel po piksel i skrućuje tekući fotopolimer dok se platforma za izgradnju nalazi za jedan sloj ispod debljine vrha površine tekućeg polimera (slika 11). Nakon toga, radna platforma se spušta za debljinu sljedećeg sloja i tako sve do konačnog proizvoda. Na kraju, proizvod se uklanja iz tekućeg polimera, a višak polimera se ispire u otapalu. Proces završava izlaganjem dodatnom UV zračenju još minimalno jedan sat, kako bi se proizvod dodatno stvrdnuo. [4, 22]



Slika 11. Stereolitografija [23]

Očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (DLP)

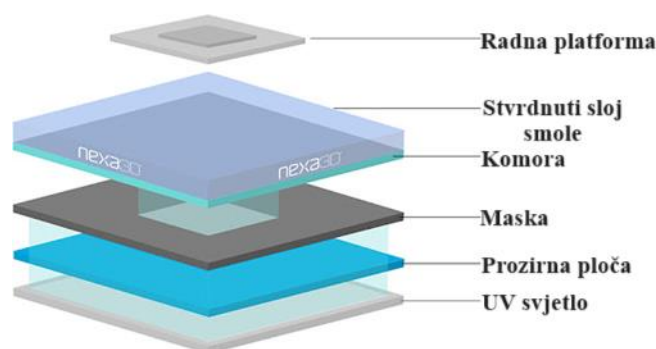
DLP je tehnika kod koje se svjetlosni signal uz pomoć projektora prenosi na fotoosjetljive akrilne smole (slika 12). Vidljiva svjetlost stvrdnjava cijeli presjek proizvoda te time smanjuje ukupno vrijeme ciklusa 10 do 15 sekundi ovisno o polimeru. U ovom postupku izvor svjetla, to jest projektor se nalazi ispod radne platforme i smole koja je zatvorena u komori. Nakon što je prvi sloj izrađen, platforma se podiže prema gore s debljinom novog sloja i proces počinje ispočetka. [4]



Slika 12. Očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom [4]

Svjetlosno očvršćivanje s LCD zaslonom/maskom (MSLA)

MSLA kao i DLP, koristi projektor za izvor svjetla i stvrdnjavanje fotopolimerne smole, sloj po sloj u željeni oblik (slika 13). Međutim, ovaj postupak koristi masku koja oblikuje svjetlost i omogućava istovremeno stvrdnjavanje cijelih slojeva smole. Rezultat toga je brži ispis i veća preciznost jer digitalna maska može kontrolirati izloženost svjetlu s iznimnom točnošću. [24]



Slika 13. Svjetlosno očvršćivanje s LCD zaslonom/maskom [24]

CLIP

CLIP sustav također projicira svjetlost cijelog presjeka objekta na fotopolimere. Međutim, uz to koristi naprednije digitalne projektore i propusni sloj za kisik koji stvara mrtvu zonu iznad dna komore. Reakcijom monomera i kisika u propusnom sloju nastaju peroksi radikali, a oni ne pokreću ponovnu polimerizaciju i zbog toga smola kontinuirano teče. Mrtva zona omogućava kontinuirani ispis što povećava brzinu ispisa 25 do 100 puta u usporedbi sa SLA i DLP sustavima. Međutim, propusni sloj kisika je skup i smola mora biti niske viskoznosti. [25]

TPP

TPP koristi istovremeno dvije laserske (fotonske) zrake kako bi se smola učvrstila i stvorila unaprijed definirana 3D struktura. Zbog toga ima vrlo visoku rezoluciju koja može doseći 100 nm. [25]

Prednosti VPP

- brz ispis;
- izvrsna kvaliteta površine;
- visoka rezolucija i niska cijena izvora energije.

Nedostaci VPP

- kratak vijek trajanja;
- loša mehanička svojstva;
- fotopolimere smole koje sadrže akrilate ili metakrilate kao monomer mogu biti toksične za stanice;
- visoka cijena nekih fotopolimera. [22, 26]

Primjena u medicini

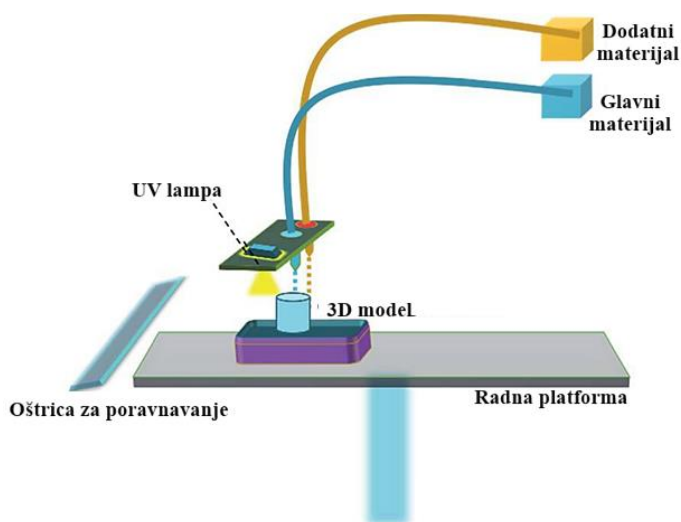
Ovaj postupak se najčešće koristi za:

- za izradu privremenih krunica i mostova u dentalnoj medicini – brza izrada dijelova uz dobra mehanička svojstva; [27]

- za izradu ortopedskih dodataka - prilagođeni ulošci za stopala od PUA kompozitne smole u usporedbi s tradicionalnim postupcima izrade, imaju manje površinsko naprezanja uz male deformacije, što može spriječiti prijevremenu deformaciju uloška i time uspješno ispraviti poremećaj stopala ili gležnja. [28]

3.2.2.4. Ispis materijala (MJT)

MJT je postupak kod kojeg pisac taloži kapljice materijala. Zatim oštrica za poravnavanje izravna tanki sloj te izvor svjetla suši pomoću UV zraka (slično stereolitografiji) (slika 14). Većinom se koriste polimerni materijali s niskom viskoznošću kako bi pisac mogao imati bolju kontrolu tijekom ispisa. Tanki slojevi debljine između 10 do 30 μm mogu brzo očvrnuti zbog čega proces izrade 3D modela traje kratko. [26, 29]



Slika 14. Postupak ispisa materijala - MJT [30]

Prednost MJT

- mogućnost kombiniranja više materijala;
- visoka rezolucija;
- ispis u boji;
- visoka kvaliteta površine.

Nedostatci MJT

- niska čvrstoća;
- visoka cijena;
- mogućnost začepljenja mlaznice;
- samo za materijale niske viskoznosti. [26, 29]

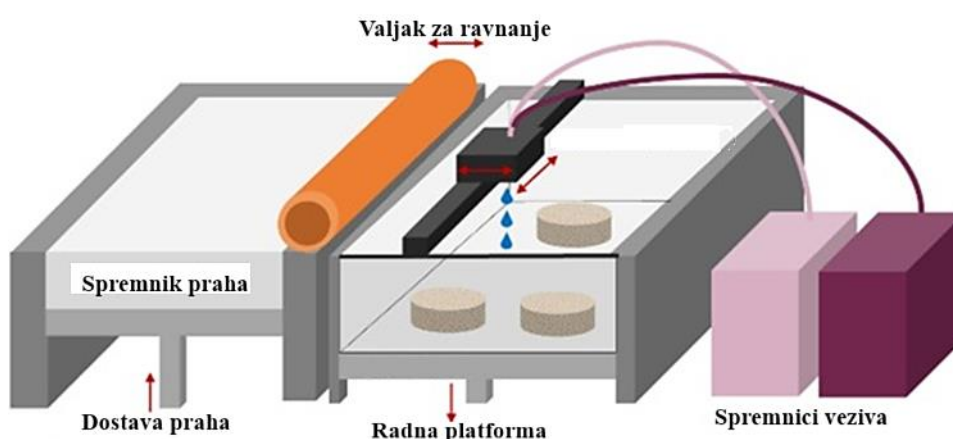
Primjena u medicini

Neke od primjena su:

- za izradu prototipova mozga, bubrega ili jetre - zbog mogućnosti kombiniranja različitih materijala i tekstura koji mogu oponašati različita tkiva ovaj postupak ima veliku ulogu za kirurško planiranje i edukaciju [31]
- za izradu implantata od keramike - zbog visoke rezolucije gotovog dijela česta primjena MJT postupka. [32]

3.2.2.5. Raspršivanje veziva (BJT)

Raspršivanje veziva je postupak aditivne tehnologije kod koje pisac raspršuje tekuće vezivo na praškasti materijal (slika 15). Isparavanjem veziva ili stvrdnjavanjem ovisno o zahtjevima dolazi do spajanja čestica praha. Nakon prvog sloja dostavlja se prah i proces ispisa se ponavlja, sve dok cijeli model nije gotov. [25]



Slika 15. Postupak raspršivanja veziva - BJT [33]

Prednosti BJT

- niski troškovi proizvodnje;
- različite opcije materijala;
- brz ispis;
- precizna kontrola oblika, veličine i količine.

Nedostatci BJT

- robusni uređaji;
- ograničena mehanička svojstva. [26, 33]

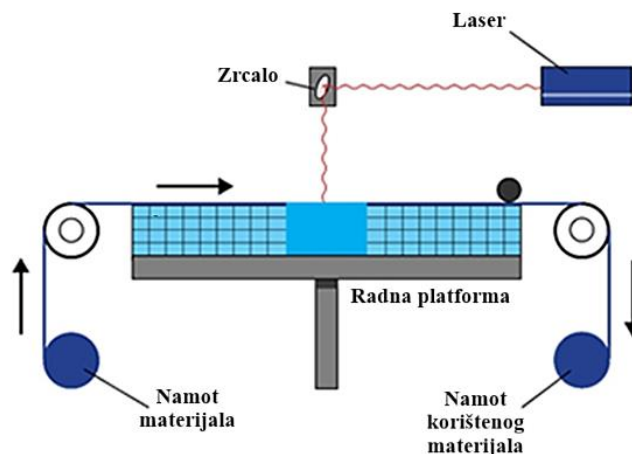
Primjena u medicini

BJT se koristi u farmaciji kod izrade lijekova, a u medicini se koristi kod:

- izrade predložaka zubnih implantata za predkiruršku dijagnozu i kiruršku simulaciju – primjena zbog bolje točnosti ispisa u usporedbi s stvarnim modelom. [34]

3.2.2.6. Laminiranje (SHL)

Laminiranje je postupak aditivne proizvodnje kod koje se list materijala postavlja na radnu platformu (slika 16), laser ili nož reže željeni oblik i tako nastaje prvi sloj CAD modela. Zatim se proces ponavlja, a materijal se lijepi na prethodni sloj pomoću ljepila. Najčešće se koriste listovi od polimera ili metala koji su isplativi i jednostavni za rukovanje. Međutim, treba napomenuti da ovaj postupak tek treba ostvariti značajan napredak (neistražen postupak, mali broj uređaja) kako bi mogao dati što veći doprinos u medicini. [26, 35]



Slika 16. Postupak laminiranja - SHL [35]

Prednosti SHL

- visoka kvaliteta procesa.

Nedostatci SHL

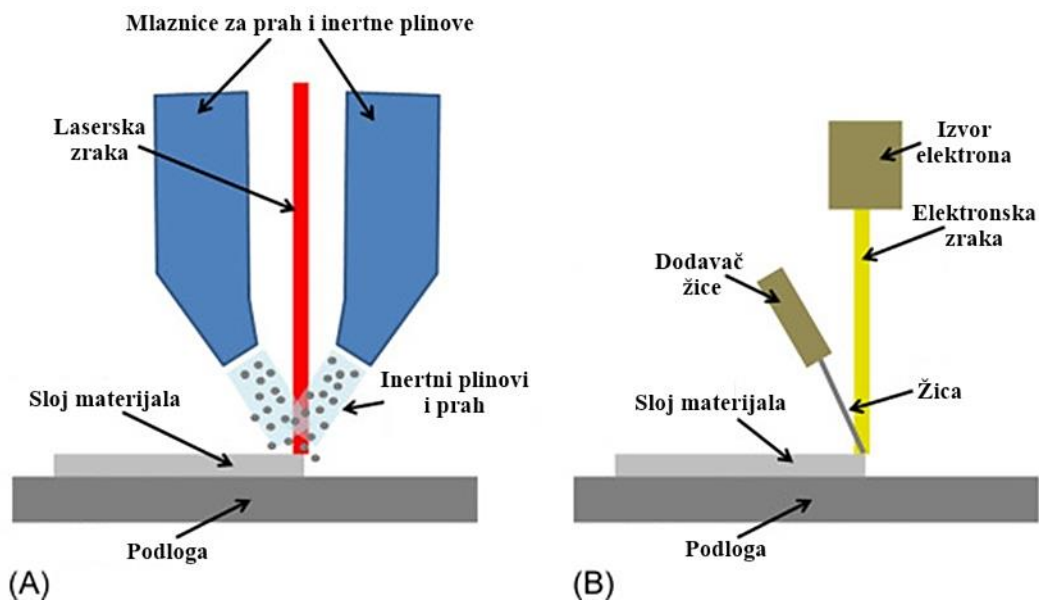
- kvaliteta gotovog proizvoda uglavnom ovisi o korištenom ljepilu;
- može zahtijevati daljnju obradu;
- uređaji na tržištu rijetki. [26]

Primjena u medicini

- za izradu implantata kuka od ugljičnih vlakana (PLA/CFRC) – zbog mogućnosti ispisa implantata mehaničkih svojstava sličnih kostima. [36]

3.2.2.7. Taloženje usmjerenim izvorom energije (DED)

Taloženje usmjerenim izvorom energije kao glavni materijal koristi prah ili žicu (slika 17) koji se pod utjecajem topline elektronskih zraka ili lasera talože u željeni oblik sloj po sloj. Prah ili žica su većinom metali, rijetko keramika, a polimeri se ne mogu obraditi ovim postupkom. [26]



Slika 17. Postupak taloženja usmjerenim izvorom energije s prahom (A) i žicom (B) - DED [37]

Prednosti DED

- visoko kvalitetni 3D dijelovi;

Nedostatci DED

- tehnika ograničena na metalni prah ili izvorne materijale žice;
- ovisnost kvalitete površine o brzini ispisa. [26]

Primjena u medicini

Tipične primjene ovog postupka su:

- za izradu koštanih implantata – Ovaj postupak kao i SHL omogućuje ispis proizvoda sa svojstvima koja oponašaju karakteristike kosti. [38]

3.2.3. Izbor materijala za aditivnu proizvodnju

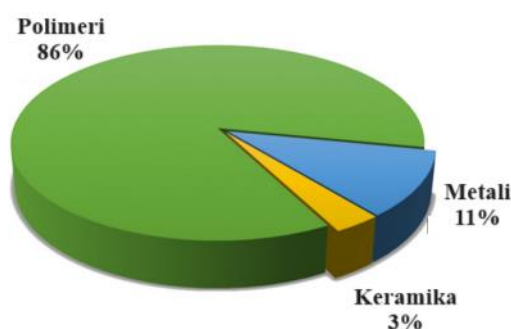
Materijali koji se koriste u medicini se još nazivaju biomaterijali, a mogu biti prirodnog ili sintetskog porijekla. Glavna zadaća im je na siguran i odobren način zamijeniti bilo koji organ ili kompenzirati određeno tkivo uz što bolju biokompatibilnost.

Sintetski materijali koji se koriste mogu se podijeliti na metale, polimere, kompozite i keramičke materijale. Svaki od njih imaju svoja mehanička, fizikalna i kemijska svojstva na osnovi kojih se bira najbolji za određenu tehnologiju i daljnju primjenu. Osim sintetskih materijala često se koriste i prirodni materijali kao što je celuloza (kod izrade kapsule lijeka), kolagen i želatina (estetska kirurgija, stanične strukture, liječenje kožnih rana) te hitin i hijaluronska kiselina. [3, 9]

Osim po vrsti, biomaterijali se mogu podijeliti po trajnosti na trajne i privremene materijale. Trajni su oni koji postaju dio ljudskog tijela kao što su materijali koji se koriste u inženjerstvu tkiva.

Najbitnije svojstvo biomaterijala je biokompatibilnosti odnosno sposobnost materijala da djeluje s odgovarajućom reakcijom u danoj primjeni. Komponente materijala ne smiju dovesti do smrti stanice ili oštetiti tkivo i njegovu funkcionalnost. [39]

Zbog toga se polimeri najčešće koriste u medicini, gotovo 86% u usporedbi s metalima i keramikom (slika 18). [40]



Slika 18. Zastupljenost polimera, metala i keramike u medicini [40]

Izbor materijala izravno je povezan i s tehnologijom koja se koristi, a prikaz nekih od njih koji se koriste u medicini nalazi se u tablici 2.

Tablica 2. Neki od materijala koji se primjenjuju u različitim AM tehnologijama [1]

AM	Polimeri	Metali	Keramika	Kompoziti
PBF	Poliamid (PA), Polipropilen (PP), Polilaktid (PLA), Poli(laktid-ko-glikolid) ili PLLGA	Ti ₆ Al ₄ VTi ₆₄ , CoCrMo, CoCr, Ti	Al ₂ O ₃ , ZrO ₂	
MEX	ABS+, Polilaktid (PLA), Poli eter eter keton (PEEK), Poliamid (PA), Polikaprolakton (PCL), Poli(laktid-ko-glikolid) (PLGA)			Tri-kalcijev fosfat (TCP)
VP	Fotopolimerizirajuća smola, NextDent C&B, Dental SG, Dental LT, Čista smola, Poli(DL-mliječna kiselina) (PDLLA), Somos 6110, Epoksi smola		Hidroksi apatit (HA)	ATZ
MJ	VeroWhite, VeroClear, TangoPlus, HeartPrint Flex, MED610, ABS			
BJ	ZP150, ZP151, Poli(metil metakrilat) (PMMA), VisiJet PXL	Legura nikla 625, Titanij, Nehrđajući čelik	Kalcijev fosfat	Tri-kalcijev fosfat (TCP), Barijev titanat
SL	Papir	Papir		
DED		Ti ₆ Al ₄ VTi ₆₄		

3.2.3.1. Polimeri u medicini

Polimeri u usporedbi s metalima i keramičkim materijalima imaju jaku puno prednosti što se i vidi prema broju primjena (Tablica 2.). Glavne prednosti su: jednostavnost proizvodnje različitih oblika (čestica praha, filmova, žica), razumna cijena te potrebna mehanička i fizikalna svojstva za specifične primjene.

Na mjestima gdje je bitna čvrstoća, trajnost i fleksibilnost često se koristi akrilonitril butadien stiren (ABS) ili poliamid. Međutim, ondje gdje je važno morfološko oponašanje tkiva, netoksičnost i jednostavnost ispisa, koristi se polilaktična kiselina (PLA). [9, 41]

PEEK, PP i PLGA su materijali s visokom gustoćom te se koriste za ispis čvrstih dijelova kao što su zamjenske kosti, zglobovi jastučići i ostale nosive komponente. Osim njih, dobra mehanička svojstva ima i poliamid (PA) zbog sposobnosti stvaranja vodikovih veza između

amidnih skupina, što omogućuje visoko talište i tolerancije na temperaturna odstupanja te time i lakšu obradivost. Polikaprolakton (PCL) je biorazgradivi polimer što je ključno kod izrade lijekova i implantata za privremenu podršku za regeneraciju tkiva. Međutim, problem može biti što se razgrađuje u kiseline koje mogu izazvati upalu tkiva kada su prisutne u velikim količinama. PMMA biorazgradivi polimer se također koristi za izradu lijekova koji je za razliku od PCL-a nešto jeftiniji.

Svaka smola (PCL, PLA, želatina i ostale) u medicini je biokompatibilna. Zbog čega se uvelike koriste u tkivnom inženjerstvu jer stanice moraju prijanjati, normalno funkcionirati i razmnožavati se u doticaju s implantatima. Problem može biti velika količina raznih fotopolimerizirajućih smola koje mogu uzrokovati smrt stanica, zbog toga se razvijaju smole od manje komponenti. [42]

Next Dent C&B, Dental SG, Dental LT su najbolji polimeri za primjenu u dentalnoj medicini zbog svojih svojstava. Zatim i MED 610 koji je biokompatibilan i koristi se za 3D ispis dentalnih i ortopedskih kirurških vodilica. Obitelj Vero materijala se primjenjuje kod precizne izrade detaljnih modela kako bi se prikazali fini detalji u boji s glatkom završnom obradom, dok se Tango materijali koriste za ispis prototipova sličnih gumi zbog fleksibilnosti materijala. [1, 43]

Zaključno, zajedničko svim polimernim materijalima u medicini je biokompatibilnost, biorazgradivost te lako oblikovanje uz veliku dostupnost zbog čega imaju široku primjenu od ortopedskih i zubnih implantata do proteza i potpornih implantata tkivnog inženjerstva. [44]

3.2.3.2. *Metali u medicini*

Metalni biomaterijali su poznati po svojoj visokoj čvrstoći zbog čega se koriste na mjestima izloženim većim opterećenjima. Neki od primjera su žice i vijci za fiksiranje prijeloma, zubni implantati i proteze za zglobove. Osim toga, primjenjuju se za izradu umjetnih srčanih zalistaka i proširivih stentova, te zbog dobre električne vodljivost za ispis srčanih stimulatora.

Još jedna od prednosti ovih materijala je mogućnost sterilizacije pa se koriste za izradu igli, pinceta, škara i ostale opreme koja se koristi u kirurgiji. Nedostatak je mogućnost pojave korozije koja može oslabiti implantat. Stoga je ključno odabrati metale s većom otpornošću na koroziju.

Plemeniti metali, poput zlata i srebra, nisu podložni korozivnim procesima. Međutim, oni imaju veliku gustoću, nedovoljnu čvrstoću i visoku cijenu zbog čega se rijetko koriste.

Svojim svojstvima ističu se CoCr legure. Otpornost na trošenje, toplinu i koroziju samo su neke od značaja ovih legura.

Druga skupina metala koji se često koriste su nehrđajući čelici. Prisutnost nikla u sastavu poboljšava otpornost na koroziju, a od nikla i legura se izrađuje kirurška oprema.

Za kraj, titan i njegove legure koji imaju nizak modul elastičnosti, vrhunsku biokompatibilnosti i otpornosti na koroziju u usporedbi s ostalim metalima. Još jedna prednost je smanjena ili nepostojeća reakcija titana s tkivima koja okružuju implantat za razliku od nikla koji može biti toksičan i izazvati alergije. [9, 44]

3.2.3.3. *Keramika i kompoziti u medicini*

Keramika ima visoku čvrstoću, ali i otpornost na koroziju, visok modul elastičnosti i izvrsnu biokompatibilnost. Neki od primjera su Al_2O_3 , ZrO_2 i soli kalcijevog fosfata (HA).

Aluminijev oksid (Al_2O_3) i cirkon (ZrO_2) imaju visoku otpornosti na trošenje, žilavosti i otpornost na savijanje, a hidroksi apatit (HP) jedna je od glavnih mineralnih komponenti kostiju i cakline zbog čega ima prednost brze adaptacije u dodiru s tkivom. Koriste se izradu bioaktivnih ortopedskih i zubnih implantat te slušnih pomagala.

Kompoziti nastaju kombinacijom materijala u cilju poboljšanja mehaničkih svojstava, biokompatibilnosti, brzine razgradnje i ostalih značajki. Koriste se ispis ispuna za zube, gumenih katetera te rukavica. [9, 44]

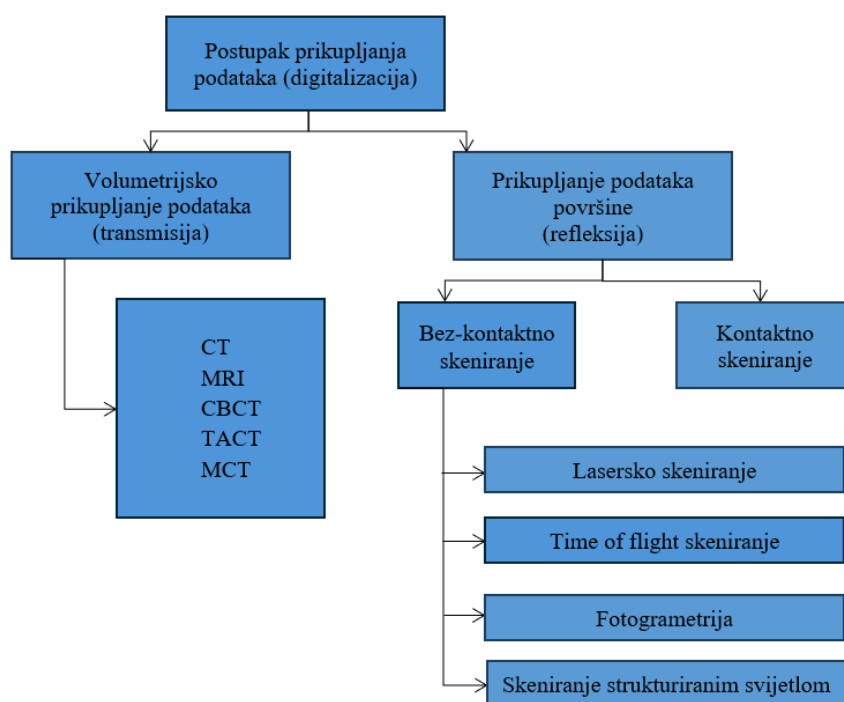
4. PRIPREMA MODELA ZA ADITIVNU PROIZVODNJU

U prvom dijelu rada je naglasak na aditivnoj proizvodnji. Međutim, prije same proizvodnje priprema se CAD model odnosno digitalna slika modela.

Proces pripreme se sastoji od generiranja slike visoke rezolucije uz pomoć različitih tehnologija skeniranja odnosno digitalizacije. Skeniranje je tehnologija koja bilježi digitalni oblik objekta, koji se skenira uz pomoć lasera, svjetla ili sonde. Skener prikuplja "oblake točaka" podataka površine ili cijelog volumena objekta te digitalizacijom generira sken. [45, 46]

4.1. Postupak digitalizacije (skeniranje)

Postupak prikupljanja podataka (digitalizacije) mogu se podijeliti na volumetrijski prikupljene podatke i površinski (slika 19). Pomoću volumetrijskih skenera dobiva se vanjska i unutarnja geometrija cijelog objekta, dok površinski skeneri generiraju samo vanjsku površinu objekta. [47]



Slika 19. Podjela postupka digitalizacije [47]

4.1.1. Volumetrijsko prikupljanje podataka

Volumetrijsko prikupljanje podataka se temelji na transmisiji odnosno na prolasku X zraka kroz objekt. Rezultat toga je unutarnja i vanjska struktura skeniranog dijela.

Postupci koji volumetrijski prikupljaju podatke su:

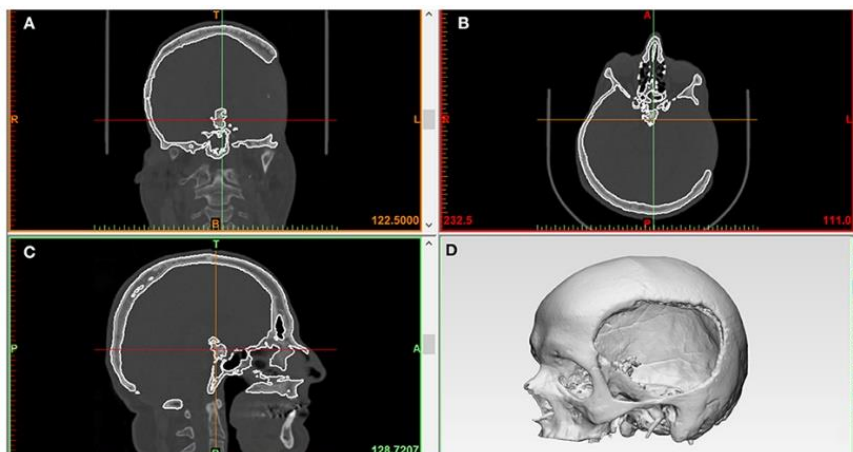
- računalna tomografija (engl. *Computed Tomography* - CT),
- računalna tomografija s konusnim snopom (eng. *Cone Beam Computerized Tomography* - CBCT),
- mikroračunalna tomografija (eng. *Micro Computerized Tomography* - MCT),
- računalna tomografija s podesivim otvorom blende (eng. *Tuned-Aperture Computed Tomography* - TACT),
- magnetska rezonanca (eng. *Magnetic Resonance Imaging* - MRI).

Ovi postupci imaju veliku ulogu u medicini jer omogućuju vizualizaciju unutarnjih značajki ljudskog tijela. Slike koje nastaju u takozvanom DICOM formatu (eng. *Digital Imaging and Communications in Medicine*), rekonstruiraju se uz pomoć računalnih algoritama u 3D model. Računalni algoritmi obrađuju geometriju niza slika kroz transformaciju, stvaranje perspektive, izrezivanje i osvjetljavanje. Međutim, zbog složenosti DICOM podataka osim računala potrebna je i suradnja medicinskih stručnjaka za što bolje tumačenje slike.

Konačni skenovi se spremaju kao STL datoteke i model je spreman za aditivnu proizvodnju ili dodatno oblikovanje. [4, 47]

4.1.1.1. Računalna tomografija

Računalna tomografija ili CT snimanje je bez-kontaktno skeniranje kod kojea se uz pomoć rendgenskih zraka snima niz 2D slika (slika 20 gore lijevo i desno, dolje lijevo).



Slika 20. Računalna tomografija [48]

Postupak kreće sa smještanjem pacijenta na stol CT skenera (slika 21). Zatim operater pokreće CT sustav za snimanje i uređaj generira uski snop X zraka u obliku lepeze te skenira dio tijela pacijenta. Nasuprot izvora X zraka se nalaze detektori koji snimaju sliku. Uz pomoć algoritma, 2D slike svakog okreta skenera se preklapaju i generiraju 3D model (slika 20 dolje desno). [49]



Slika 21. CT skener [50]

Aditivna proizvodnja i računalna tomografija veliku primjenu pronalaze u medicini kod izrade implantata kao što su zakrpe za glavu, raznih kostiju te krvnih žila. [49]

4.1.1.2. CBCT, MCT, TACT postupci skeniranja

Postupci CBCT, MCT, TACT su se razvile iz računalne tomografije u cilju poboljšavanja iste.

CBCT uređaji imaju 15 puta manju razinu zračenja i nižu cijenu snimanja u odnosu na CT uređaje. Međutim, imaju manju razlučivost i osjetljivost senzora na pokrete.

Mikroračunalna tomografija je računalna tomografija ograničena na manje područje zbog čega ima 10 000 puta veću rezoluciju. Koristi se za skeniranje malih kostiju.

Računalna tomografija s podešenim otvorom blende je postupak kod kojega objekt i senzor slike moraju ostati fiksirani dok položaj izvora X-zraka može biti izbornan. Koristi se za određivanje dijagnoze prije implantacije u dentalnoj medicini. [49]

4.1.1.3. Magnetska rezonanca

MRI je vrsta skeniranja gdje uređaj šalje radio valove na određeno mjesto u magnetskom polju, a stanice tijela šalju povratne valove koji se bilježe kao brojevi. Zatim računalo obrađuje i pretvara brojeve u sliku. Ovo je medicinski postupak skeniranja s najvećom kontrastnom rezolucijom. Za razliku od CT postupka ne zrači, što je velika prednost. Nedostatak je skupa oprema.

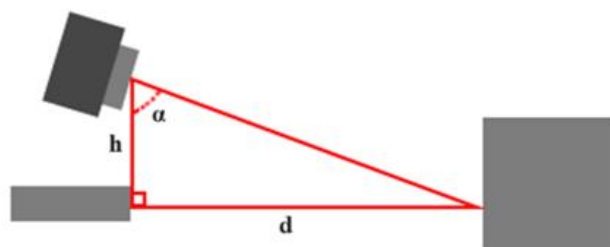
Koristi se za skeniranje organa ili mekog tkiva jer bolje razlikuje vrste mekih tkiva od računalne tomografije. [49]

4.1.2. Prikupljanje podataka površine

Ovisno o načinu skeniranja površine tehnologiju možemo podijeliti na kontaktnu i bez-kontaktnu (slika 19). Kontaktni skeneri snimaju samo jednu točku za razliku od bez-kontaktnih koji prikupljaju više podataka odnosno točaka te se skeniranje završava brzo u roku od nekoliko sati ili dana, ovisno o veličini objekta. Kod kontaktnog skeniranja koriste se koordinatni mjerni uređaji sa sondom, ručni instrumenti ili konvencionalna oprema za praćenje, dok se za bez-kontaktno skeniranje primjenjuju laserski skeneri, skeneri sa strukturiranim svjetlom, laseri bazirani na fotogrametriji te time of flight kamere. Zbog brzine digitalizacije i veće primjene u nastavku su opisani postupci bez-kkontaktnog skeniranja . [47, 51]

4.1.2.1. Lasersko skeniranje

Lasersko skeniranje se temelji na triangulaciji odnosno na postupku određivanja površine koji se definira uz pomoć tri točke: točke izvora svjetla (lasera), točke na površini predmeta i točke senzora svjetla (kamere). Ovisno o udaljenosti kamere i lasera te kutu između točke lasera i točke predmeta mjeri se deformacija zrake ili svjetla (slika 22). [52, 53]



h = udaljenost između kamere i lasera (poznato)

α = kut između lasera i skenera (poznato)

d = udaljenost između skenera i objekta

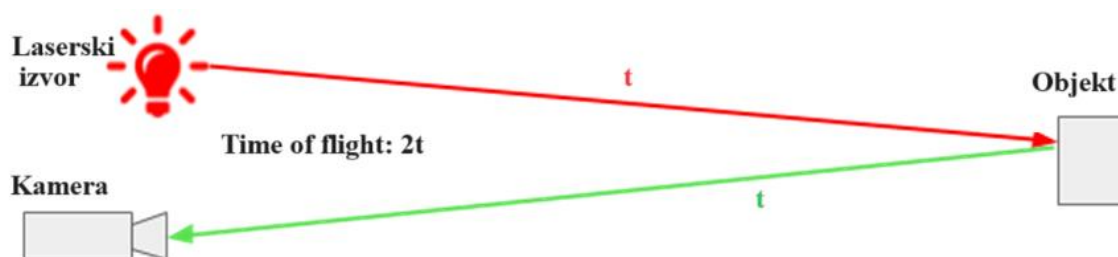
$$d = h \cdot \tan \alpha$$

Slika 22. Triangulacija [52]

3D lasersko skeniranje može prikupljati točkaste ili linijske podatke. Prikupljanjem točaka svaki sken generira točku određene veličine odnosno liniju određene širine o čemu ovisi točnost postupka. Međutim, iako je linijsko skeniranje nešto brže od točkastog, još uvijek nije dovoljno brzo jer se dobiva samo linija po linija podataka. [53]

4.1.2.2. Time of flight skeniranje

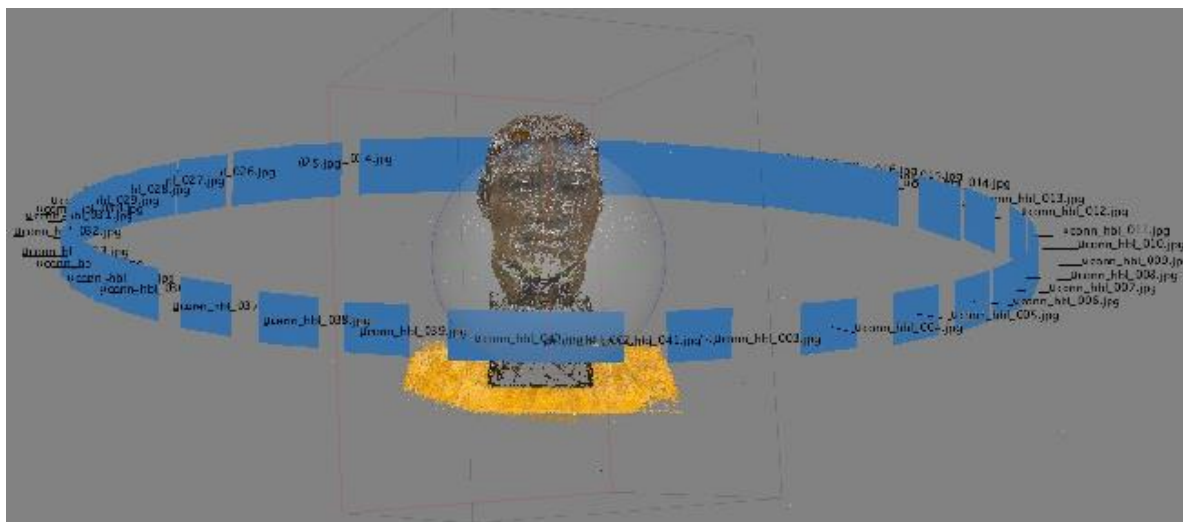
Time of flight skeniranje prikuplja podatke o geometriji predmeta procjenom vremena koje je potrebno laserskoj zruci da putuje od laserskog izvora do kamere (slika 23). Nedostatak ovog postupka je niska točnost (u mm) zbog čega je idealna za mjerenje i stvaranje CAD modela velikih objekata. [52, 53]



Slika 23. Time of flight skeniranje [52]

4.1.2.3. Fotogrametrija

Fotogrametrija je vrsta bez-kontaktnog skeniranja koja stvara 3D modele iz 2D fotografija. Postupak se sastoji od fotografiranja objekta iz različitih kutova te preklapanjem slika softver generira 3D model (slika 24). [52, 55]



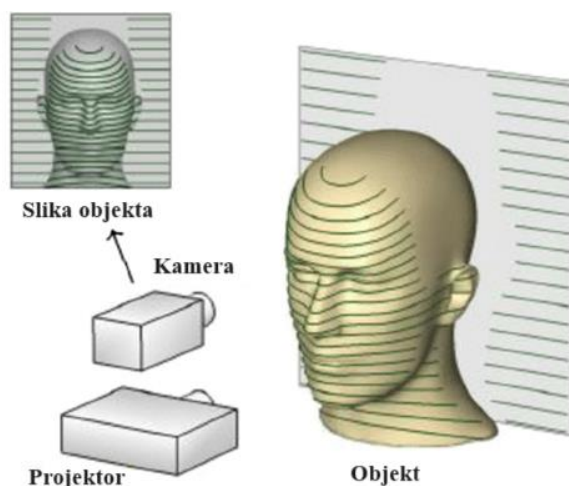
Slika 24. Fotogrametrija – generiranje 3D modela [54]

Prednost ovog postupka je to što su 3D skeneri ovog tipa cjenovno prihvatljiviji za razliku od skenera s laserom ili strukturiranim svjetlom. Osim toga, fotogrametrija nije ograničena u veličini objekata koji se može skenirati i ne zahtijeva napredno podešavanje ili kalibraciju za proizvodnju visoke kvalitete, čime se omogućuje prilagodba i automatizacija procesa. Međutim, veliki značaj fotogrametrije je u tome što većina ljudi imaju pristup hardveru i softveru. Potrebni su samo digitalni fotoaparat i računalo ili neki od mobilnih uređaja uz nekoliko implementacija otvorenog koda za generiranje 3D skena. [52, 55]

Nedostatak je to što ima nisku razinu točnosti (u mm) i sporo se rekonstruira sken (nekoliko sati) u odnosu na ostale postupke. Nadalje, ovaj postupak se ne koristi u procesima aditivne proizvodnje koji zahtijevaju skenove visoke kvalitete, a za što treba više od stotinu slika iz različitih kutova. Međutim, svoju primjenu pronalazi kod samog skeniranja velikih objekata kao što su zgrade, stadioni i krajolici za što nije potrebna pretjerana točnost. [52, 53]

4.1.2.4. Skeniranje strukturiranim svjetlom

Osim laserskog skeniranja u bez-kontaktno skeniranje se ubrajaju 3D skeneri sa strukturiranim svjetlom. Za određivanje površina koriste postupak triangulacije, ali umjesto lasera koriste svjetlo te uz pomoć kamere detektiraju oblik površine mjerenjem deformacija svjetla (slika 25). [52, 53]



Slika 25. Skeniranje sa strukturiranim svjetlom [4]

Projektor šalje niz svjetlosnih uzoraka koji mogu biti bijele ili druge boje spektra, ovisno o dizajnu skenera. Crno-bijeli (monokromatski) uzorci imaju ograničenu prostornu razlučivost jer su ograničeni razlučivošću projektora, dok su uzorci u tri boje pri skeniranju objekata sličnih boja osjetljivi jer gube signal. Zbog toga se većinom koriste prugasti crno-bijeli uzorci. Detektori odnosno kamere ugrađene u skener osjećaju pomake i promjene svjetla uzorka dok prelaze preko objekta te bilježe oblak točaka.

Softver izračunava udaljenost do različitih snimljenih točaka dok se pomiče preko objekta te stvara 3D digitalnu sliku objekta. Generiranjem STL datoteke proces 3D skeniranja je gotov i dalje se može modelirati, analizirati ili ispisati objekt s obzirom na postojeću CAD datoteku. [7, 56]

5. PRAKTIČNI DIO

U praktičnom dijelu rada se prolazi kroz osam koraka medicinskog lanca razvoja proizvoda (poglavlje 3.) na konkretnom primjeru. Za primjer je uzeta obloga natkoljene protezu.

Prvi korak je bio odrediti dijagnozu, točnije dobiti uvid u problem ljudi koji nose natkoljenu protezu. Zatim je slijedilo slikanje odnosno skeniranje suprotne noge te transformacija podataka u STL datoteku. Korišten je skener s strukturiranim svjetlom. Usporedbom skena proteze i noge oblikovana je i prilagođena obloga. Obloga je oblikovana u dva dijela (prednji i stražnji) koji se spajaju na protezu uz pomoć 4 vijka.

Nakon toga, CAD modeli su bili spremni za aditivnu proizvodnju. Međutim, prije toga prema osam korak medicinskog lanca, ide simulacija i regulatorno odobrenje. Kako je ovaj model razvijan u svrhu pokaznog ispisa preskočeni su ti koraci. Stoga je izabran materijal i slijedila je proizvodnja. Za glavni materijal je izabran PLA polimer, a za potporni tijekom ispisa vodotopivi polivinil alkohol (PVA). Dijelovi su ispisani na printeru *MakerBot METHOD X Carbon Fiber Edition* metodom taložnog očvršćivanja (FDM).

Zadnji korak medicinskog lanca je naknadna obrada i spajanje dijelova na protezu. S obzirom na kvalitetu ovog procesa jako rijetko je potrebna naknadna obrada zbog čega se sve više ulaže u razvoj ispisa aditivnim tehnologijama.

Razvoj svake obloge je različit zbog zahtjeva korisnika i same primjene, a koje zahtjeve imaju korisnici natkoljene proteze nešto više u nastavku.

5.1. Dijagnoza

U svijetu ima sve više ljudi s amputiranim dijelovima tijela, što je utjecalo na razvoj raznih proteza. Jedna od njih je i natkoljena proteza koja pomaže takvim pacijentima da vrate svoju pokretljivost kao što je bila prije operacije. Ona se sastoji od ležišta, koljena, cijevi i stopala (slika 26).



Slika 26. Natkoljena proteza [57]

Međutim, osobe koje nose ovakvu protezu nemaju pravilan oblik noge i prilikom nošenja odjeće to dolazi do izražaja što može utjecati na njihovo samopouzdanje te u konačnici na samu aktivnost.

Tradicionalno obloge imaju za glavni cilj poboljšati estetski izgled pacijenta odnosno odraziti sliku zdrave noge. Prve obloge su bile od pjenastog bloka koji je lagan i pristupačan cijenom, ali se brzo troši i teško ga je uskladiti s oblikom pacijentove zdrave noge. Zatim su krenule izrade silikonskih obloga injekcijskim prešanjem, koje su izdržljivije, više personalizirane i vodootporne za razliku od pjenastih obloga.

Međutim, razvojem raznih načina proizvodnje i materijala, tvrtke su krenule s konstruiranjem novih kreativnijih proizvoda. Danas postoji mnogo načina za izradu obloga za donje udove, a od nedavno je uvedena i tehnologija 3D ispisa.

Kako bi se oblikovao i izradio što bolji proizvod bitno je uzeti u obzir zahtjeve pacijenata, a to su:

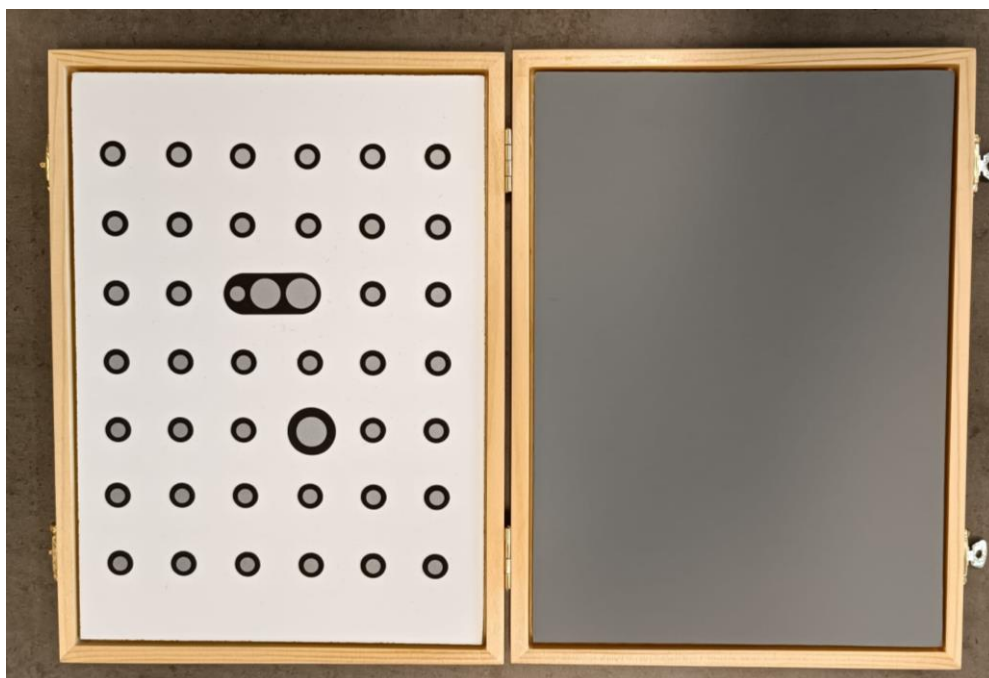
- estetski izgled – Pristajanje i izgled obloge u odnosu na ostatak tijela je prvi i najvažniji kriterij pacijenata;
- niska cijena – Korisnici proteza imaju visoke troškove za dijelove proteze, kao što su posebna koljena koja omogućuju trčanje i razne vrste kretanja, zatim stopala i ostalo. Zbog čega je niska cijena bitan faktor kako bi obloga bila svakome dostupna;
- lagani materijal – Težina navlake može biti presudan čimbenik za neke pacijente, budući da dodatna težina povećava naprezanje između zglobnih površina i kože;
- trajnost – Ovo je još jedan od važnih zahtjeva, posebno za aktivne pacijente. Trajnost uvelike ovisi o izboru materijala i njegovoj čvrstoći pri malim ili srednjim udarcima;
- održavanje ili popravak – Mogućnost održavanja ili popravka obloge ako se ošteti je od velike koristi za korisnike proteza jer ne trebaju kupovati novu i čekati izradu iste;
- lako pričvršćivanje – Lakoća pričvršćivanja obloge odnosno jednostavno pričvršćivanja, lako navlačenje i skidanje je jako bitno za korisnika kako ne bi morao upotrebljavati veliku snagu i dodatne alate;
- praktičnost – Ovaj čimbenik se odnosi na to kada se postavi obloga na protezu, je li ometa na primjer savijanje koljena i ostalo te je li odgovara korisniku;
- individualnost – Mogućnosti individualnog modela omogućuje korisnicima odabir izgleda obloge koja odražava njihovu osobnost;
- lako čišćenje obloge;
- zaštita – Obloga štiti ostale komponente proteze od oštećenja što je još jedna od bitnih značajja ove komponente.

Nakon dijagnoze zahtjeva za oblogu, pacijent ide na skeniranje suprotne noge na osnovu koje se dalje oblikuje obloga. Prednost korištenja aditivnih tehnologija je što na izgled modela može utjecati pacijent i mogu se izraditi obloge raznih boja u cilju što većeg zadovoljstva korisnika. [58]

5.2. Skeniranje i transformacija podataka

Proces 3D skeniranja se sastoji od kalibracije skenera, pripremanja skeniranog dijela, skeniranja i obrade podataka te pretvaranja u STL datoteku. Ovisno o vrsti skenera razlikuje se postupak kalibracije.

Kalibracija skenera s strukturiranim svjetlom uključuje kalibraciju projektora i kamere. Za kalibraciju kamere se koristi kalibracijska ploča (slika 27) uz pomoć koje se određuju unutarnji parametri kamere (npr. žarišna duljina) te vanjski parametri (kako transformirati koordinate iz stvarnog koordinatnog sustava neke točke u koordinati sustav kamere). Osim toga, određuje se kut i udaljenosti koje su potrebne za postupak triangulacije.



Slika 27. Kalibracijska ploča

Nakon kalibracije kamere slijedi kalibracija projektora. Projektor šalje svjetlost na kalibracijski uzorak dok kamera snima isti. Kada je sustav ispravno kalibriran točke na kameri se mogu uskladiti sa točkama na projektoru te kamera može očitavati niz podataka o nekom predmetu. Skeniranje se većinom provodi s 3D skenerom koji ima minimalno dvije kamere zbog veće točnosti u odnosu na skenere s jednom kamerom. [59]

Za skener je izabran iReal 2E skener (slika 28), koji služi za skeniranje ljudskog tijela i objekata srednje do velike veličine. iReal 2E koristi tehnologiju infracrvenog VCSEL strukturiranog svjetla koje je nevidljivo. Uz to tu je i LED svjetlo, kao dodatno svjetlo oko leće koje se može i isključiti ako nije potrebno.

Skener sa strukturiranim svjetlom uz veći broj piksela te razlučivost kamere, omogućuju razlikovanje finih detalja i veću točnost. Ovisno o leći kamere te udaljenosti od senzora (žarišna duljina), skeneri mijenjaju efektivnu veličinu mjernog volumena i mogu utjecati na točnost skeniranja. Ovaj ručni skener sastoji se od tri kamere koje daju točnost do 0,100 mm.

Jedna od značajki je to što se ne trebaju koristiti markeri bilo da predmet ima kontinuiranu ili raznoliku geometriju površine, a maksimalna veličina jednog skeniranja je do 4 m. Sukladno tome, ako je neki predmet veći može se obaviti skeniranje dijelova pa nakon toga povezivanje skenova.

Brzina skeniranja je do 1 000 000 točaka u sekundi u standardnom načinu rada, ali može doseći i brzinu od 1 500 000 točaka u sekundi kada je veličina memorije grafičke kartice jednaka ili veća od 6G. [60]



Slika 28. iReal 2E skener [60]

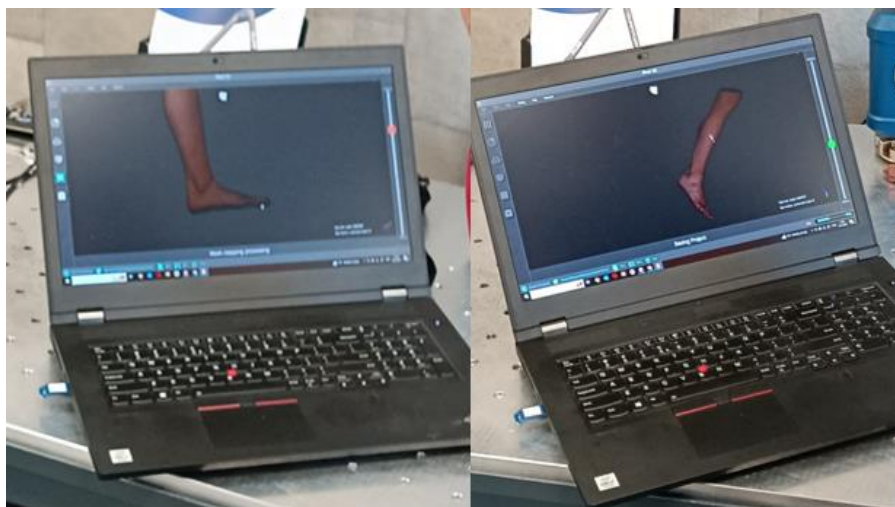
Postupak skeniranja (slika 29) je vrlo jednostavan zbog mogućnosti prilagodbe raznim kutovima i situacijama. Zbog čega nije potrebno neko posebno namještanje dijela koji se skenira. U ovom slučaju, desna noga se nalazi u vertikalnom položaju kako bi se s skenerom snimila cijela površina bez doticaja s ostalim predmetima.

Problem je bilo skenirati unutarnji dio lista zbog blizine lijeve noge. Zbog toga su odrađena tri skeniranja. Međutim, svaki od skenova je bio velike kvalitete i s svim dijelovima bez obzira na blizinu druge noge. Osim toga, još jedan od problema može biti pomak ljudskog tijela jer su ovi skeneri osjetljivi na pomak što u konačnici rezultira nekvalitetnim skenom. Zbog čega noga mora biti jako mirna kako ne bi došlo do prekida i ponovnog skeniranja.



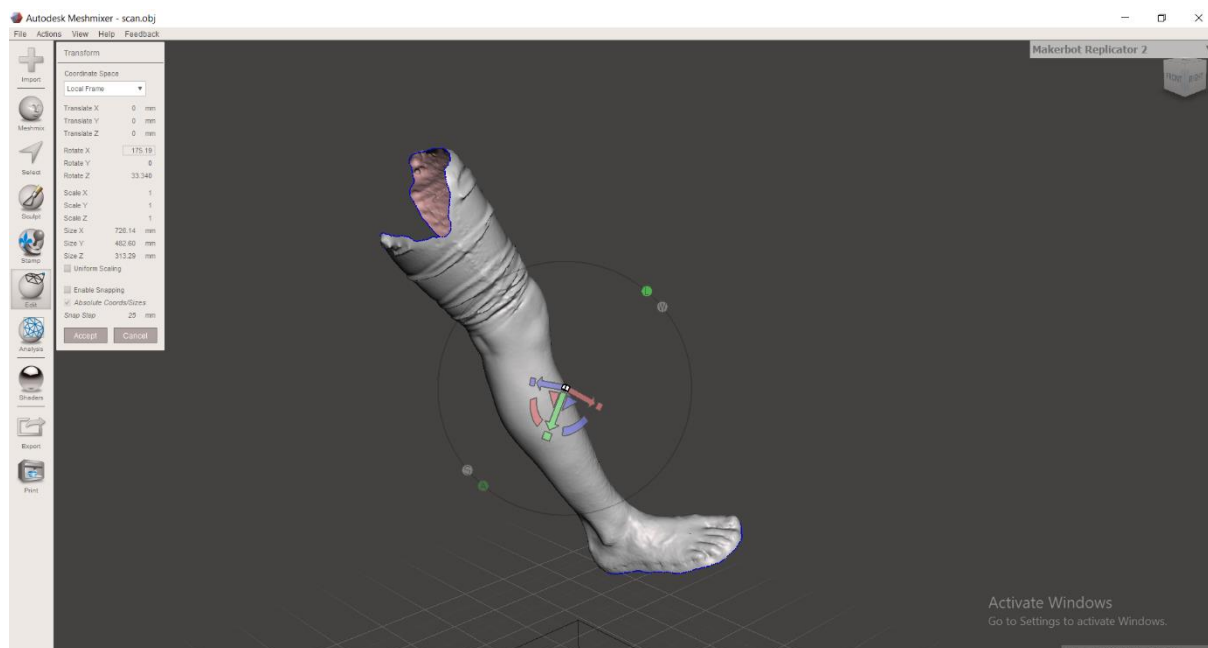
Slika 29. Postupak skeniranja s iReal 2E skenerom

Tijekom skeniranja skener se pomiče oko noge sve dok se ne prikupe podatci o cijeloj površini. Softver izračunava udaljenost do različitih snimljenih točaka dok se pomiče preko objekta te metodom triangulacije stvara 3D digitalnu sliku objekta. Stoga, iReal 2E skener s softverom koji ima mogućnost generiranja detalja i reprodukcijom raznih tekstura površine realizira sken s visokom kvalitetom.



Slika 30. Podatci softvera tijekom skeniranja

Rezultat skeniranja s ovim softverom može biti u OBJ, STL, PLY, ASC te SK formatu. Na slici 31 prikazan je konačni sken noge u STL datoteci koji je osnova za konstruiranje individualne obloge.

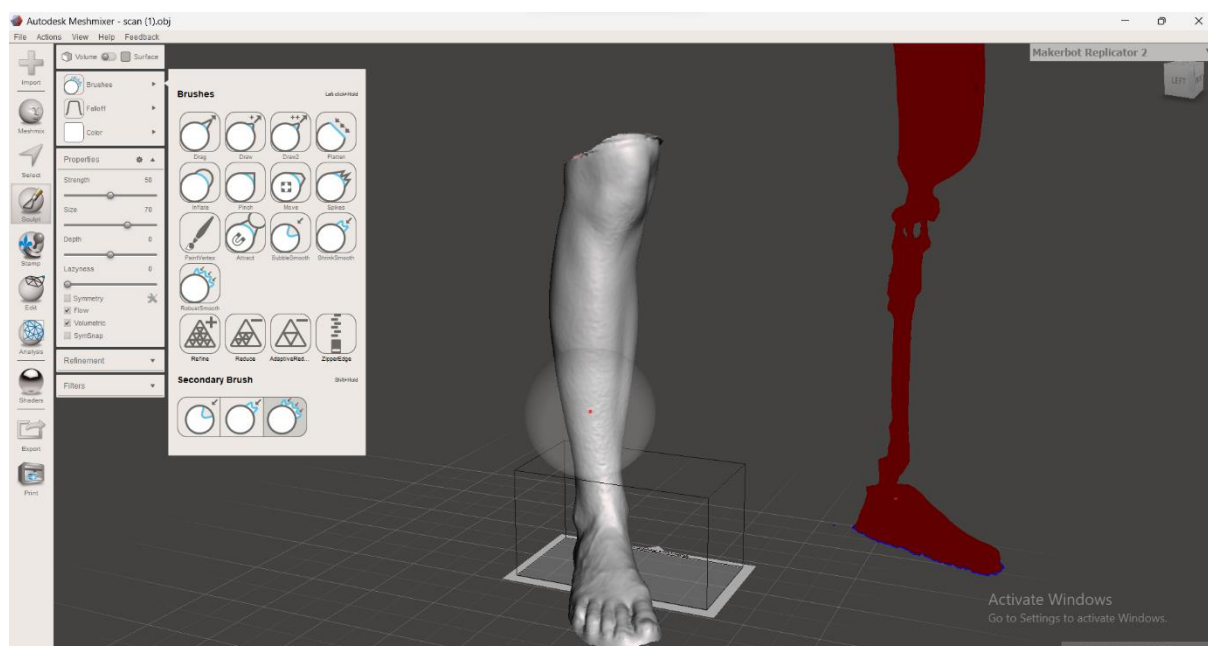


Slika 31. STL datoteka skenirane noge

5.3. Oblikovanje obloge

S obzirom na zahtjeve pacijenata (poglavlje 5.1.) modelira se obloga.

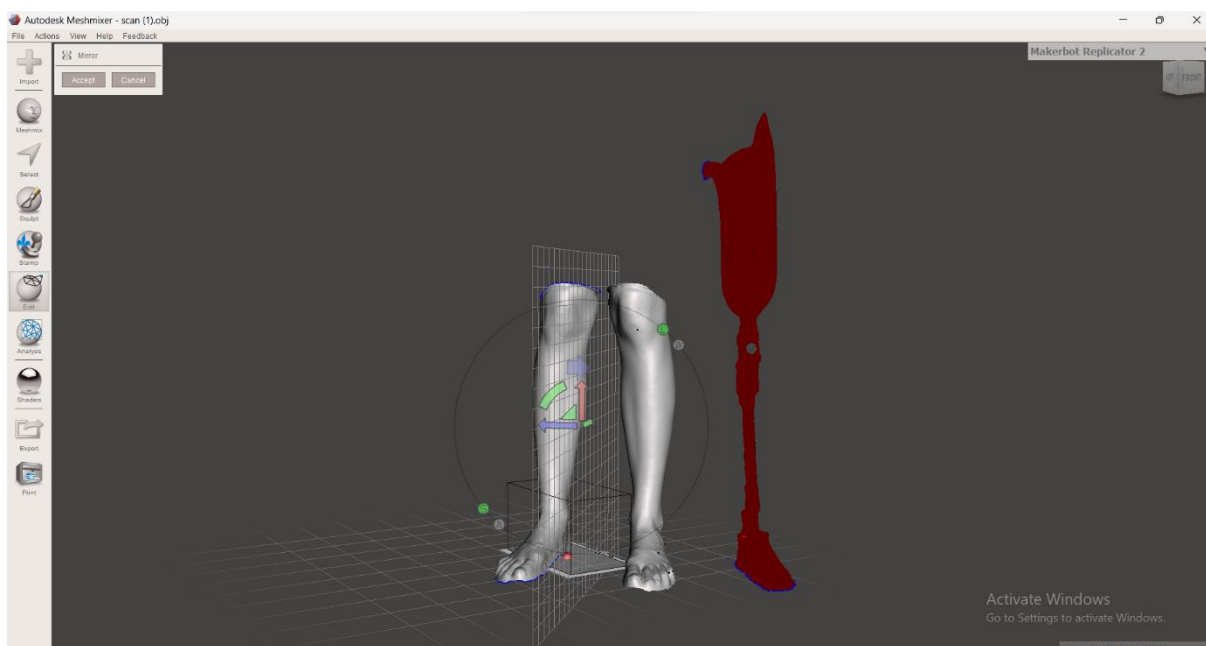
Prvi korak je prilagoditi sken noge skenu proteze kako bi se mogla konstruirati obloga. U programu *Autodesk Meshmixer* učitaju se skenovi to jest mesh modeli proteze i desne noge. Za početak se makne gornji dio noge koji se ne koriste uz opciju *Select + Del*, a naredbom *Brushes* zagladi se površina noge (slika 32).



Slika 32. Mesh modeli proteze i desne noge

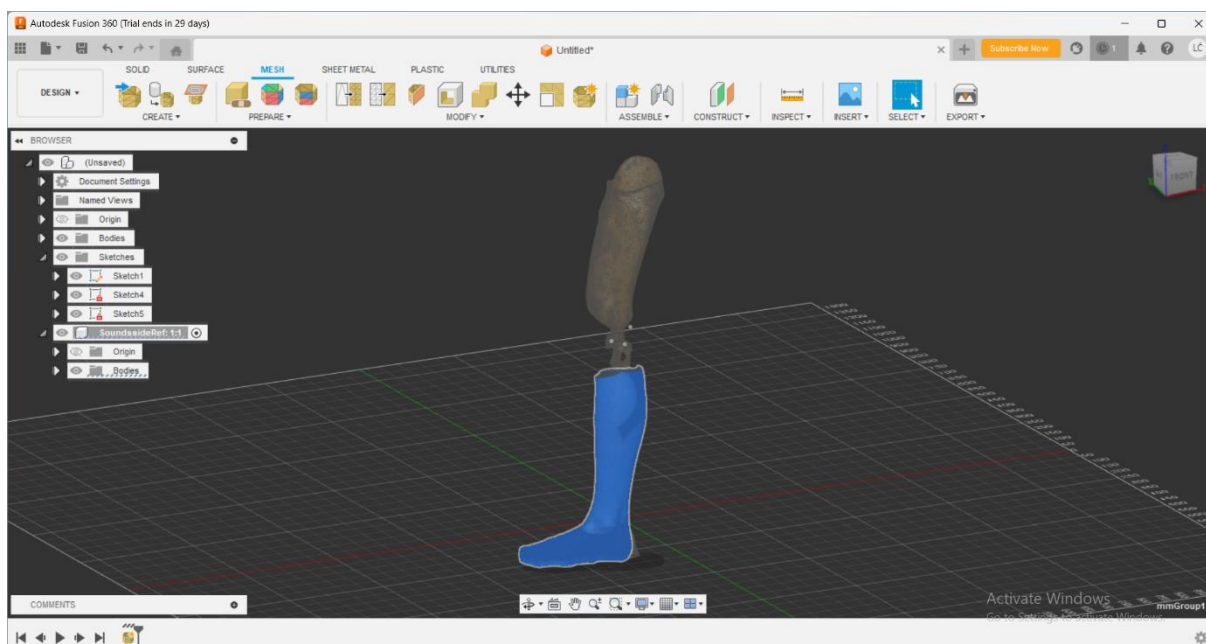
Kako se može vidjeti na slici 32 obje komponente idu u različitom smjeru zbog čega se mesh noge malo zarotira da odgovara smjeru proteze. Još jedan od problema je to što je mesh desne noge, a proteza lijeva. Zbog toga je potrebno koristiti naredbu *Mirror* kako bi se dobio sken lijeve noge (slika 33). Zatim se obriše mesh desne noge, a dodatnim poravnavanjem i preklapanjem komponenti spremne su za konstruiranje obloge (slika 34).

Spremanjem novih STL dokumenata, skena lijeve noge i proteze prvi korak je gotov.



Slika 33. Mirror skena noge

U drugom koraku za razvoj obloge korišten je program *Autodesk Fusion 360* (slika 34).

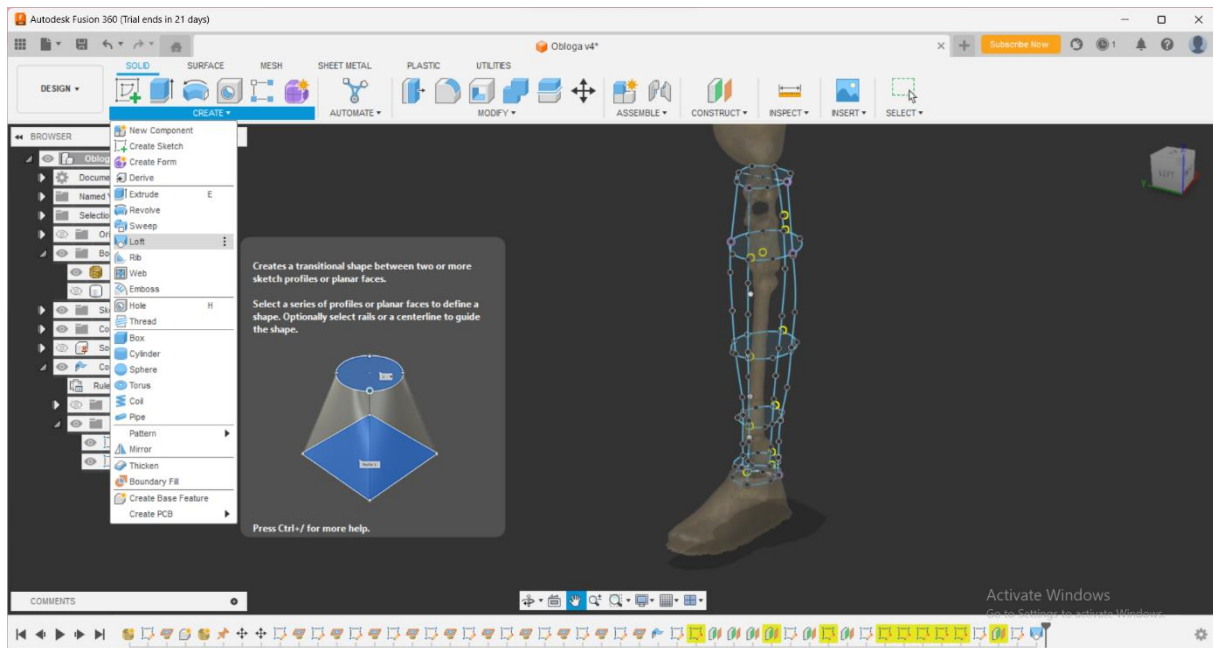


Slika 34. Skenovi spremni za konstruiranje obloge

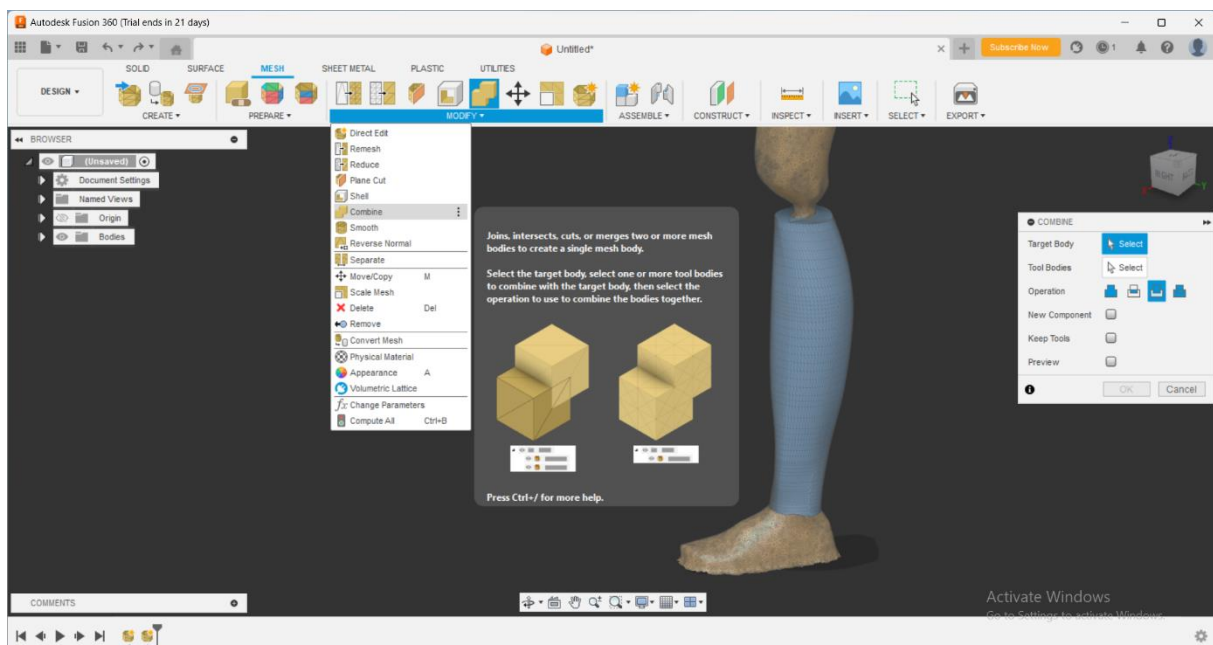
Kako bi se dobila obloga na osnovu ovih skenova prvo se naprave referentne linije u vertikalnom smjeru koje prate oblik noge i proteze. Zatim kružne horizontalne krivulje koje

također prate oblik. Nakon toga, uz pomoć naredbe *Loft* (slika 35) povezuju se kružne krivulje u smjeru referentnih linija i tako nastaje 3D obloga.

Sken proteze se iskoristi za izradu provrta u oblozi tako što se koristi opcija *Combine + Cut* (slika 36), a svrha toga je mjesto za nalijeganje proteze.

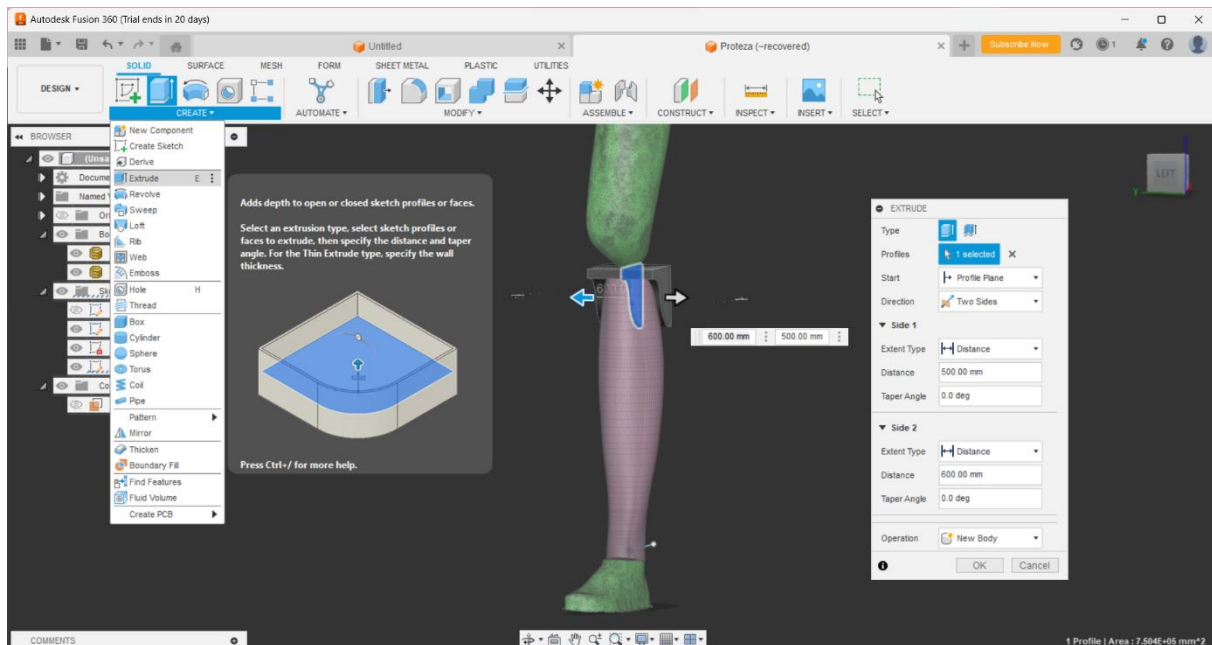


Slika 35. Povezivanje krivulja i linija naredbom *Loft*

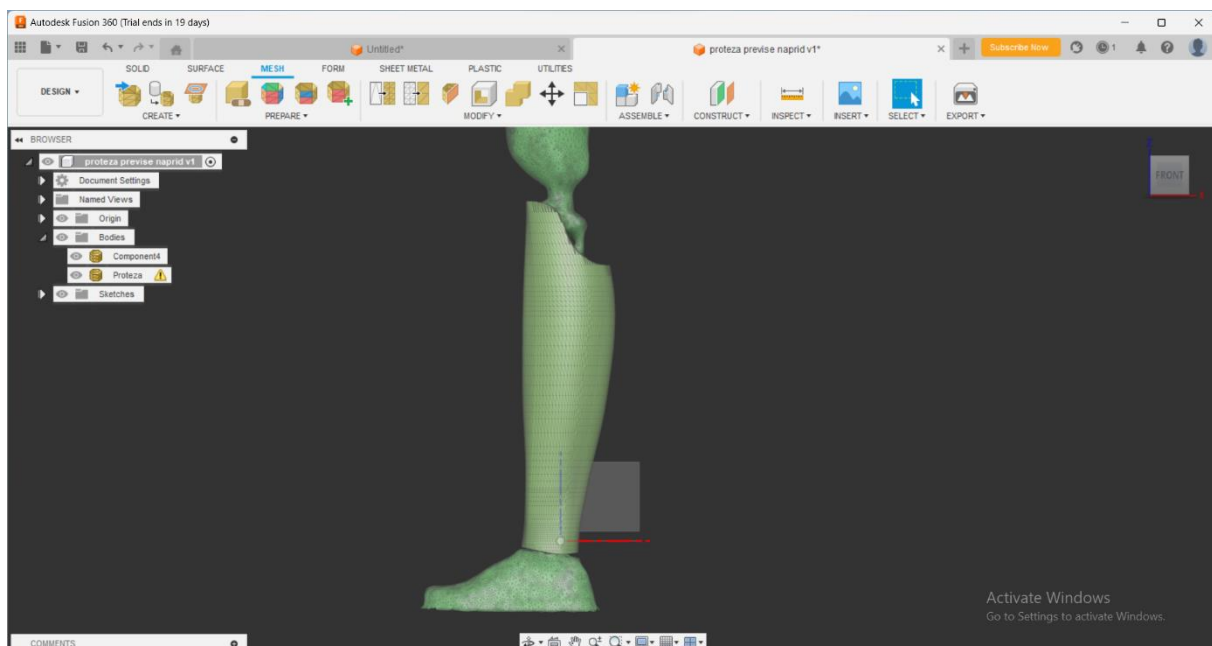


Slika 36. Izrada provrta

Jedan od zahtjeva za oblogu je da ne ometa kretanje odnosno savijanje koljena. Zbog toga se kreira volumen s naredbom *Extrude* koji uklanja dio obloge na tome mjestu i korisnik će neometano moći saviti nogu (slika 37). S ovim korakom ostvarena je praktičnost obloge. Osim toga, ovim se postiže i estetski izgled jer obloga prekriva koljeno s prednje strane te tako ne narušava sliku noge (slika 38).

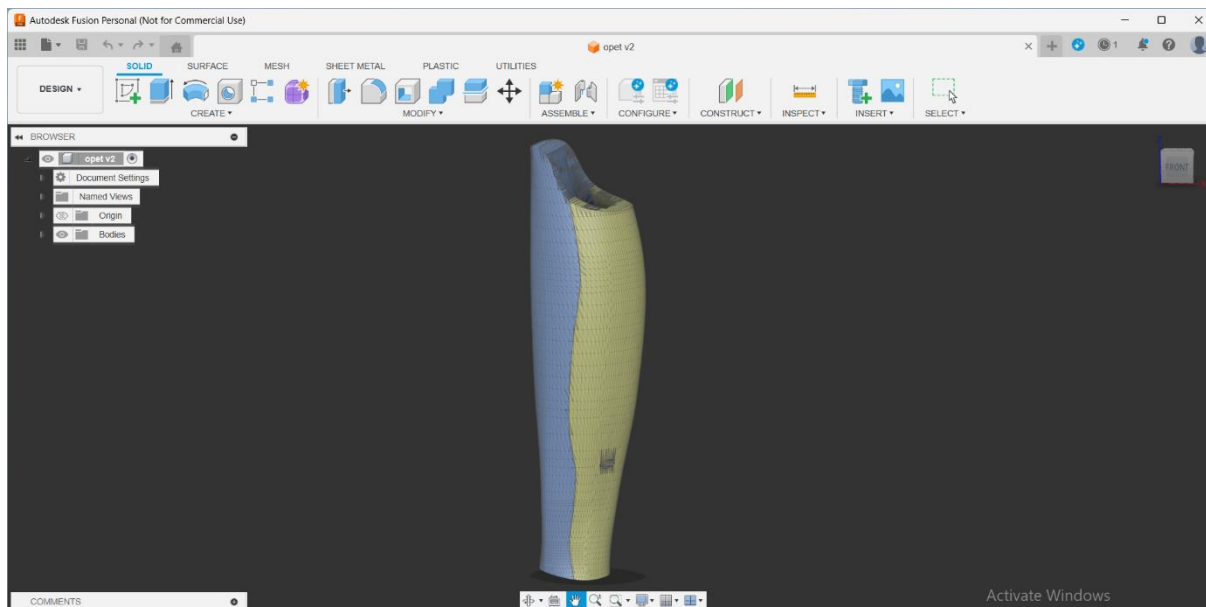


Slika 37. Uklanjanje dijela obloge

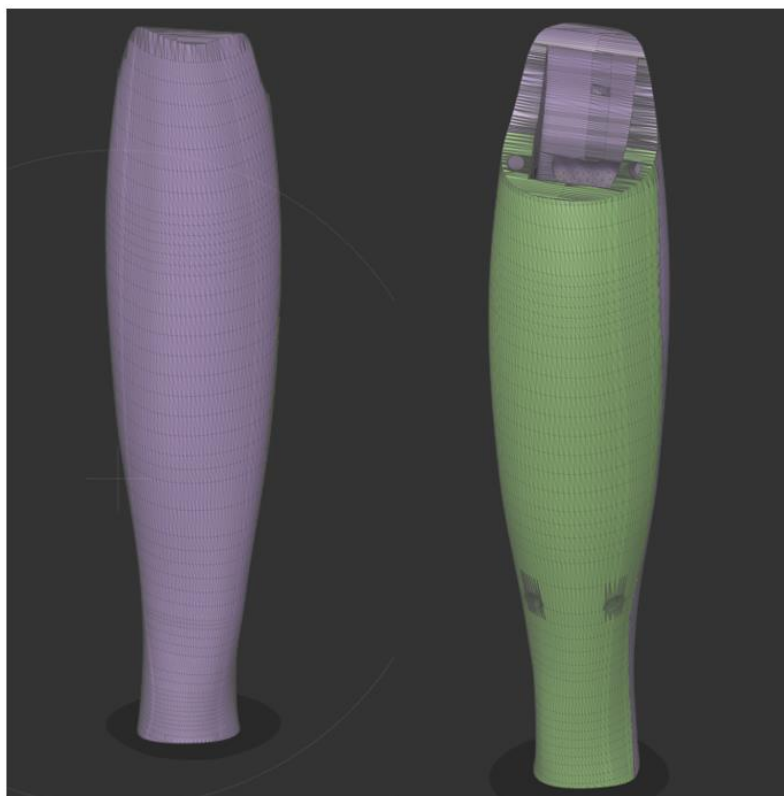


Slika 38. Nakon uklanjanja dijela obloge

Sljedeći problem je pričvršćivanje na protežu. Kada bi se obloga ispisala prema slici 38 korisnik ne bi mogao zamijeniti lako oblogu. Zbog toga je obloga podijeljena na dva dijela prednji i stražnji dio (slika 39). Spajanje dijelova omogućuju četiri vijka M100x6, a izrađeni utori se mogu vidjeti na slici 40 desno.



Slika 39. Podjela obloge



Slika 40. Prednji (lijevi) i stražnji (desni) dio obloge

Obloga se može još dodatno dorađivati, ovisno o individualnim zahtjevima korisnika. Međutim, ovo su neki od osnovnih koraka konstruiranja obloge. Na slici 40 se može vidjeti razlika između proteze bez obloge i s oblogom.



Slika 41. Proteza bez obloge (lijevo) i s oblogom (desno)

Na estetski izgled obloge može uvelike utjecati izbor materijala i vrsta aditivne tehnologije, a to su sljedeći koraci razvoja obloge.

5.4. Aditivna proizvodnja

Aditivna proizvodnja obloga je danas u središtu brojnih istraživanja. Ispituju se razne tehnologije ispisa. Međutim, zasad se najčešće koriste PBF postupci kao što su selektivno lasersko srašćivanje (SLS) i Multi Jet Fusion (MJF). Multi jet fusion je nova tehnologija koja se pojavila 2014. godine, a glavna razlika je u izvoru topline. SLS postupak koristi CO₂ laser dok MJF koristi infracrveno svjetlo. Osim toga, MJF koristi sredstvo na bazi vode kako bi spriječilo spajanje praha u blizini rubova, što poboljšava ukupnu kvalitetu dijelova. Nadalje, modeli ispisani SLS postupkom imaju manju vlačnu čvrstoću i slabije povezivanje među slojevima, ali se još uvijek više primjenjuje od MJF tehnologije koja se uvelike ispituje. [58]

Za ispis 3D modela sa slike 41. korišten je postupak taložnog očvršćivanja (FDM) to jest ekstrudiranje materijala (MEX). FDM je aditivna tehnologija koja se također često koristi pri izradi obloga, a u odnosu na PBF postupke ne koristi praškasti materijal. Prednost ove tehnologije je širok spektar materijala uz ispis cjenovno pristupačnih proizvoda, a sami postupak ove tehnologije objašnjen je u poglavlju 3.2.2.2.

S obzirom na to, u izradi dijelova korišten je *MakerBot METHOD X Carbon Fiber Edition* printer (slika 42.).



Slika 42. MakerBot METHOD X Carbon Fiber Edition printer

MakerBot METHOD X Carbon Fiber Edition printer je koji služi za izradu dijelova taložnim očvršćivanjem. Materijal se ispisuje uz pomoć dva ekstrudera 1XA i 2XA unutar grijane komore koja može doseći temperaturu do 110 °C. Debljina slojeva koje ispisuju su od 0,2 mm do 0.4 mm, a maksimalna brzina do 500 mm/s. Koristi se za ispis polimera: PLA, ABS, PVA, PA, PC-ABS, PC-ABS-FR i PA ojačan ugljičnim vlaknima. [61]

Za materijal dijelova obloge izabran je polimer PLA (polilaktična kiselina) koji je poznat po jednostavnosti ispisa. Osim toga, prihvatljiv je za okoliš, može se reciklirati i kompostirati što je od velike važnosti za ekologiju. Polimer PLA dolazi u obliku filameta spreman za ekstrudiranje (slika 43).



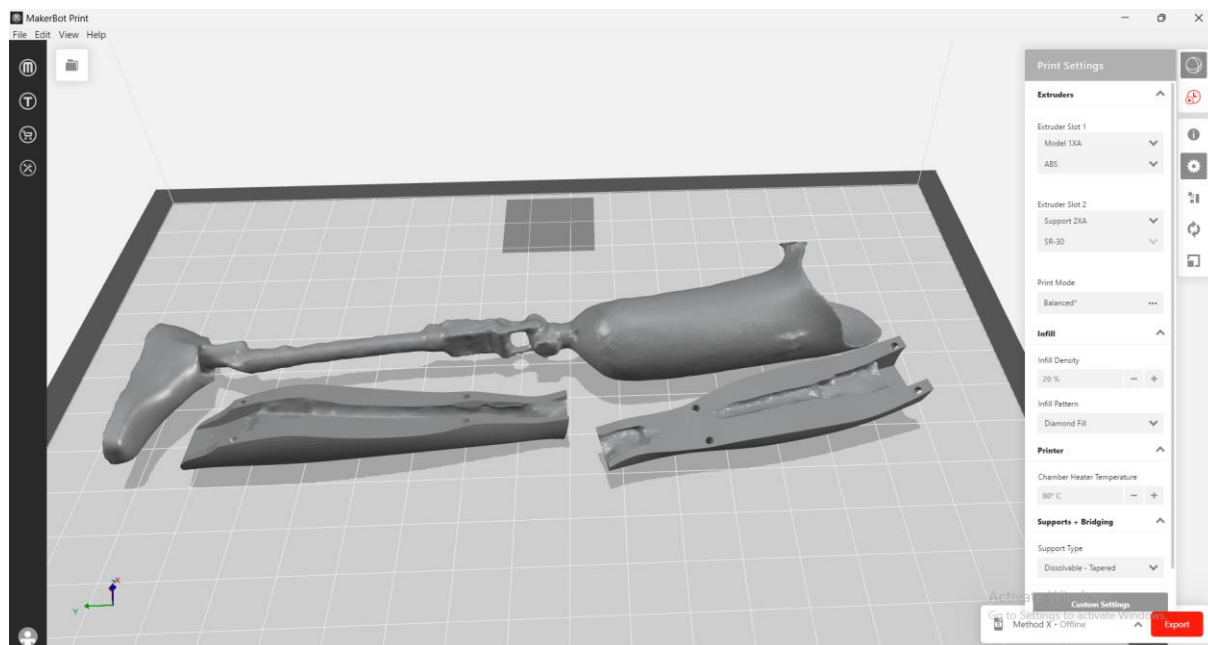
Slika 43. Filament PLA polimera u plavoj boji [62]

Potporni materijal kod ispisa služi kao potpora CAD modelu koji se ispisuju. U ovom slučaju korišten je vodotopivi PVA polimer koji je smješten ispod komore printera (slika 44). Zbog osjetljivosti na vlagu bitno je kako se skladišti kako ne bi upio vlagu što može rezultirati smanjenom kvalitetom ispisa i oštećenjem ekstrudera.



Slika 44. Filament PVA polimera

Radni volumen unutar komore je 190 x 190 x 196 mm zbog čega su dijelovi obloge i proteza umanjeni na 1,5 % od originalnih dimenzija. Konačna visina modela proteze je cca 150 mm, a prednji i stražnji dio obloge svaki cca 70 mm. Jedini problem su bili vijci koji kada se skaliraju postanu jako mali zbog čega se nisu mogli izraditi.



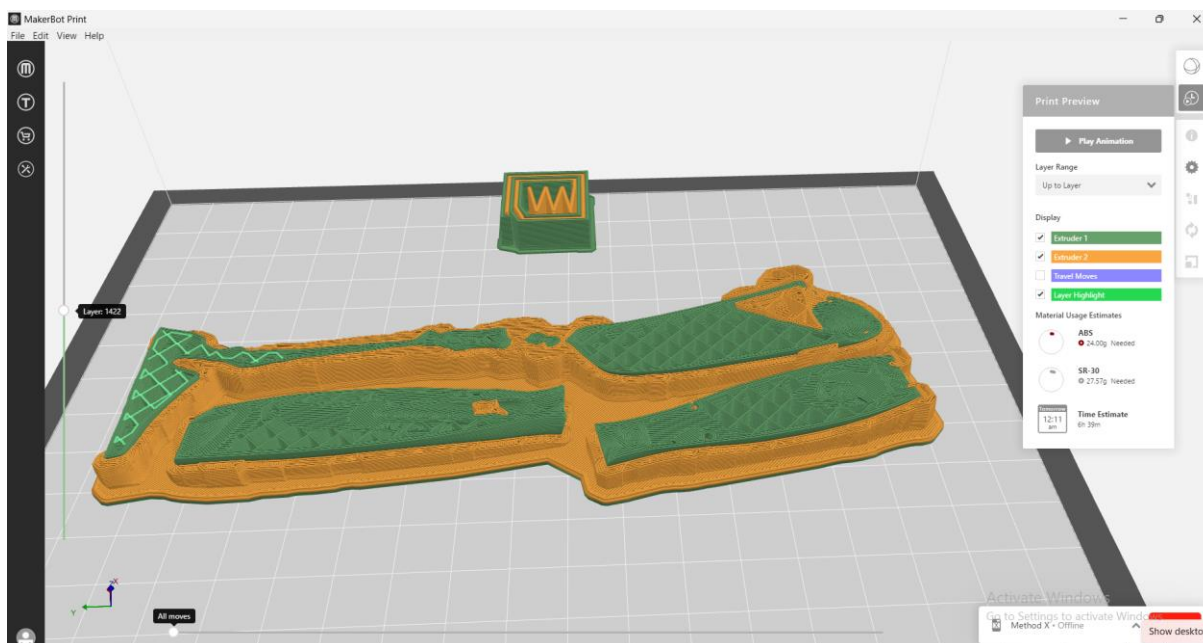
Slika 45. Priprema za ispis

Sama priprema za ispis je napravljena u programu *MakerBot Print* (slika 45) koji je povezan s printerom. Nakon što su modeli učitani i skalirani potrebno je namjestiti glavne parametre ispisa (tablica 3) kao što su: visina sloja, temperatura komore i mlaznice te uzorak i gustoća ispune.

Tablica 3. Glavni parametri ispisa 3D modela proteze i dijelova obloge

Visina sloja	0,2 mm
Temperatura komore	80 °C
Temperatura mlaznice	190 °C
Uzorak ispune	Diamond
Gustoća ispune	20 %

Sljedeći korak je puštanje simulacije ispisa prema kojoj je vrijeme ispisa 6 sati i 39 minuta, a količina glavnog materijala PLA 24 g i potpunog PVA polimera 27,57 g. Na slici 46. potporni materijal je prikazan žutom bojom, dok je glavni materijal zelene boje. Brzina ispisa ispune je 35 mm/s, a brzina ispisa vanjskih kontura 25 mm/s.



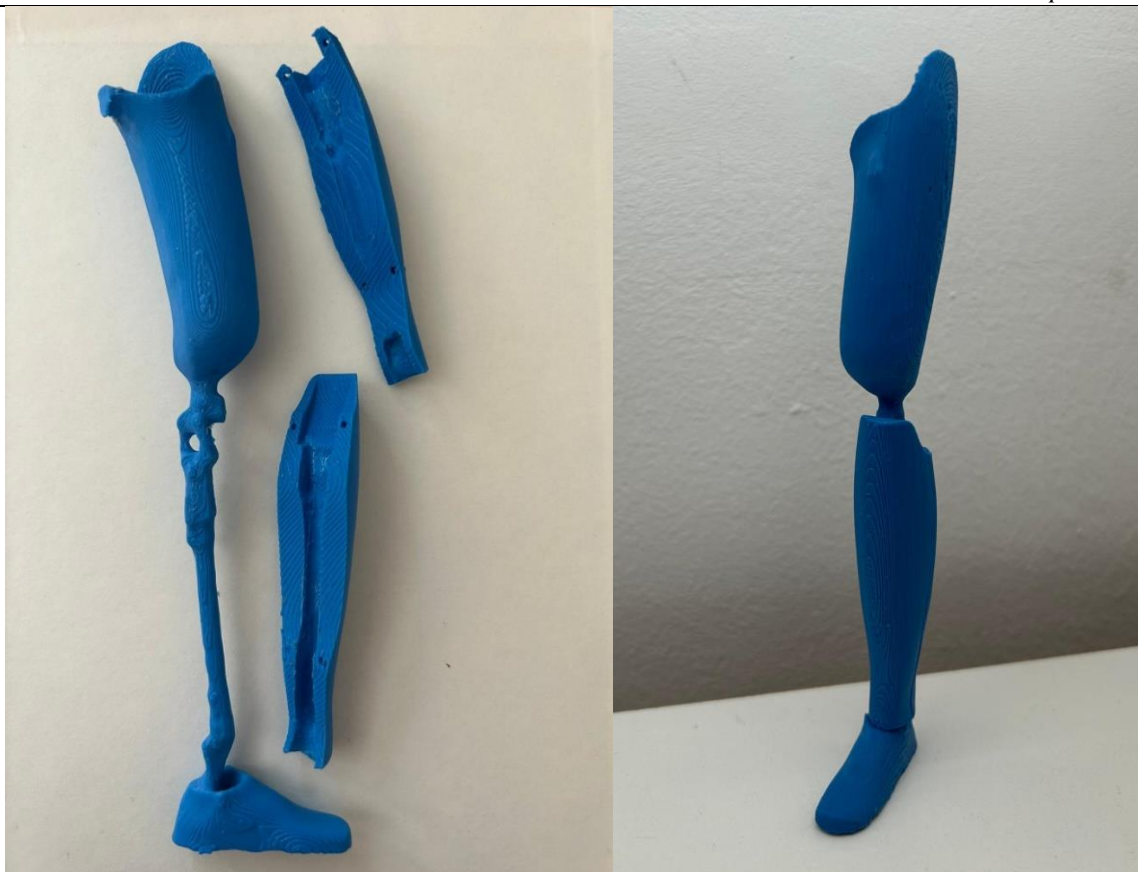
Slika 46. Simulacija ispisa 3D modela proteze i dijelova obloge

Nakon izrade simulacije, postupak se šalje na printer koji kreće s ispisom. Prvo se ispisuje podloga pa zatim modeli s unutarnjom ispunom i konturama uz potporni materijal. Rezultat ispisa prikazan je na slici 47.



Slika 47. Ispisana proteza i dijelove obloge

Na kraju se ispisani dijelovi uranjaju u vodu što uzrokuje razgradnju PVA potpornog materijala (bijeli materijal na slici 47) i ostaje samo PLA. Tim postupkom aditivna proizvodnje je gotova. Dijelovi obloge se spajaju i spremni su za upotrebu. Ovisno o kvaliteti CAD modela, materijalu i postavkama ispisa neki dijelovi mogu zahtijevati dodatnu obradu kao što je brušenje ili poliranje. U ovom slučaju vijci nisu ispisani zbog čega postoji procjep između prednje i stražnje obloge. Međutim, na slici 48. vidi se estetska razlika između same proteze (lijevo) i proteze s oblogom (desno) što je i bio cilj pokazati.



Slika 48. Rezultat aditivne proizvodnje

6. ZAKLJUČAK

Sve većim ulaganjima u razvoj medicinskih proizvoda izrađenih aditivnim tehnologijama, raste broj i primjena. U uurbanom svijetu ova tehnologija donosi baš ono što zahtijevaju pacijenti i liječnici. Operacije u što kraćem roku, kvalitetne edukacije, jeftiniji proizvodi samo su neka od postignuća.

U ovom radu cilj je bilo razviti još jedan medicinski proizvod, točnije oblogu za natkoljenu protezu. S obzirom na razne vrste ispisa i materijale koji su predstavljeni u prvom dijelu rada razvijena je obloga od polilaktične kiseline (PLA). Materijal ispisane obloge je jako lagan s pristupačnom cijenom, a što se tiče trajnosti u odnosu na silikon ili pjenu, materijale koji su se do sada koristili, uvelike je kvalitetniji. Za postupak ispisa korišten je postupak taložnog očvršćivanja. Međutim, zbog ograničenja radnog volumena pisača *MakerBot METHOD X Carbon Fiber Edition*, modelirani dijelovi obloge su umanjeni na 1,5 % od originalnih dimenzija. Stoga, ova obloga služi kao pokazni model na osnovu kojega se mogu vidjeti problemi korisnika s natkoljenom protezom. Jedan od njih je estetske prirode jer proteza bez obloge nema oblik noge što može utjecati na psihološko stanje korisnika i u konačnici na smanjenje kretanja.

Zbog toga je ispisana obloga koja se sastoji od dva dijela, a povezuju se vijcima. Glavni razlog podjele obloge je osiguravanje praktičnosti kako bi se mogla lako montirati ili zamijeniti, prednji ili stražnji dio. Uz to, dijelovi se mogu ispisati u različitim bojama uz različite ispune i time još više povećati zadovoljstvo korisnika.

Zaključno, korisnici natkoljene proteze su osjetljiva skupina društva koja uz mogućnosti aditivne tehnologije mogu ostvariti svoje osobnosti i poboljšati svakodnevicu. Obloga je samo jedan od dijelova proteze, ali uvelike pridonosi tome.

LITERATURA

- [1] Salmi, M.: *Additive Manufacturing Processes in Medical Applications*, Materials, 2021., <https://doi.org/10.3390/ma14010191>
- [2] Javaid, M., Haleem, A.: *Additive manufacturing applications in medical cases: A literature based review*, <https://doi.org/10.1016/j.ajme.2017.09.003>
- [3] Dai, Y., Eshkalal, S. K.: *The role of three-dimensional printing in healthcare and medicine*, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108940>
- [4] Godec., D., Gonzalez-Gutierrez, J., Nordin, A., Pei, E., Alcazar, J.U.: *A guide to additive manufacturing*, STAM, 2022.
- [5] McGann, P. J.: *Troubling diagnoses*, Advances in Medical Sociology, Volume 12, 2011.
- [6] Haleem, A., Khan, A., Javaid, M.: *Design and Development of Smart Landline Using 3D Printing Technique*, Volume 4, Issue 2 (2016) 438-447
- [7] Confalone, G., Smits, J., Kinnare, T.: *3D Scanning for Advanced Manufacturing, Design, and Construction*, 2023.
- [8] Ventola, C., L.: *Medical Applications for 3D Printing: Current and Projected Uses*, 2014. PMID: 25336867
- [9] da Silva, L.R.R., Sales, W.F., Campos, F.d.R. et al.: *A comprehensive review on additive manufacturing of medical devices*. Prog Addit Manuf 6, 517–553 (2021.). <https://doi.org/10.1007/s40964-021-00188-0>
- [10] Pacheco, J.: *Simulation of the laser cladding process using discrete particles*, Senai Innovation Institute in Laser Processing, 2021.
- [11] Jang, T.-S., Kim, D. E., Han, G.Yoon, C.-B., Jung, H.-D.: *Powder based additive manufacturing for biomedical application of titanium and its alloys: a review*, Biomed Eng Lett., 2020.; 10(4): 505–516.
- [12] Shirazi, S. F. S., Gharehkhani, S., Mehrali, M., Yarmand, H., Metselaar, H. S. C., Adib Kadri, N., & Osman, N. A. A. (2015.). *A review on powder-based additive manufacturing for tissue engineering: selective laser sintering and inkjet 3D printing*. Science and Technology of Advanced Materials, 16(3). <https://doi.org/10.1088/1468-6996/16/3/033502>
- [13] Awad, A., Fina, F., Goyanes, A., Gaisford, S.,Basit, A.: *Advances in powder bed fusion 3D printing in drug delivery and healthcare*, Advanced Drug Delivery Reviews, Volume 174, 2021., <https://doi.org/10.1016/j.addr.2021.04.025>

- [14] Lowther, M., Louth, S., Davey, A., Hussain, A., Ginestra, P., Carter, L., Eisenstein, N., Grover, L., Cox, S.: *Clinical, industrial, and research perspectives on powder bed fusion additively manufactured metal implants*, Additive Manufacturing, Volume 28, 2019., Pages 565-584, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.033>.
- [15] *Powder Bed Fusion 3D Printing in Dental Applications*, <https://2onelab.com/en/learn/blog/powder-bed-fusion-3d-printing-in-dental-applications/>, 10.04.2024.
- [16] Kondo, K., Harada, N., Masuda, H., Sugo, N., Terazono, S., Okonogi, S., Sakaeyama, Y., Fuchinoue, Y., Ando, S., Fukushima, D., Nomoto, J., Nemoto, M.: *A neurosurgical simulation of skull base tumors using a 3D printed rapid prototyping model containing mesh structures*. Acta Neurochir (Wien). 2016. Jun;158(6):1213-9. doi: 10.1007/s00701-016-2781-9
- [17] Tai, B. L., Kao, Y.-T., Payne, N., Zheng, Y., Chen, L., Shih, A. J.: *3D Printed composite for simulating thermal and mechanical responses of the cortical bone in orthopaedic surgery*, Medical Engineering & Physics, Volume 61, 2018., <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2018.08.004>
- [18] <https://ars.els-cdn.com/content/image/3-s2.0-B9780323999908000102-f10-06-9780323999908.jpg>, 11.04.2024.
- [19] Placone, J. K.: *Recent Advances in Extrusion-Based 3D Printing for Biomedical Applications*, Advanced Healthcare Materials, Volume 7, 2017., <https://doi.org/10.1002/adhm.201701161>
- [20] Verma, S., Sharma, N., Kango, S., Sharma, S.: *Developments of PEEK (Polyetheretherketone) as a biomedical material: A focused review*, European Polymer Journal, Volume 147, 2021., <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2021.110295>
- [21] Guerra, A. J., Clurana, J.: *3D-printed bioabsorbable polycaprolactone stent: The effect of process parameters on its physical features*, Materials & Design, Volume 137, 2018.
- [22] Timofticiuc, I.-A., Călinescu, O., Iftime, A., Dragosloveanu, S., Caruntu, A., Scheau, A.-E., Badarau, I.A., Didilescu, A.C., Caruntu, C., Scheau, C.: *Biomaterials Adapted to Vat Photopolymerization in 3D Printing: Characteristics and Medical Applications*, J. Funct. Biomater., 2024., <https://doi.org/10.3390/jfb15010007>
- [23] Suresh, G. R., Narendra, G., Kumar, G.: *Summarization of 3D-Printing Technology in Processing & Development of Medical Implants*. Journal of mechanics of continua and mathematical sciences, 2019.

- [24] Hogan, M.: *What is mSLA? The Ultimate mSLA 3D Printing Guide*, <https://nexa3d.com/blog/msla-3d-printing/>, 25.04.2024.
- [25] Lakkala, P., Munnangi, S. R., Bandari, S., Repka, M.: *Additive manufacturing technologies with emphasis on stereolithography 3D printing in pharmaceutical and medical applications: A review*, International Journal of Pharmaceutics: X, Volume 5, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijpx.2023.100159>.
- [26] Amaya-Rivas, J. L., Perero, B. S., Helguero, C. G., Hurel, J. L., Peralta, J. M., Flores, F. A., Alvarado, J. D.: *Future trends of additive manufacturing in medical applications: An overview*, Volume 10, Issue 5, 2024., <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26641>.
- [27] Tahayeri, A., Morgan, M. C., Fugolin, A. P., Bompolaki, D., Athirasala, A., Pfeifer, C. S., Ferracane, J. L., Bertassoni, L. E.: *3D printed versus conventionally cured provisional crown and bridge dental materials*, Dental Materials, Volume 34, Issue 2, 2018., <https://doi.org/10.1016/j.dental.2017.10.003>.
- [28] Zhao, Y., Zhong, J.: *Photocurable and elastic polyurethane based on polyether glycol with adjustable hardness for 3D printing customized flatfoot orthosis*, 2023.
- [29] Higgins, M., Leung, S., Radacsi, N.: *3D printing surgical phantoms and their role in the visualization of medical procedures*, Annals of 3D Printed Medicine, Volume 6, 2022., <https://doi.org/10.1016/j.stlm.2022.100057>.
- [30] Gülcan, O., Günaydın, K., Tamer, A.: *The State of the Art of Material Jetting—A Critical Review*, Polymers 2021., <https://doi.org/10.3390/polym13162829>
- [31] Tejo-Otero, A., Buj-Corral, I. & Fenollosa-Artés, F.: *3D Printing in Medicine for Preoperative Surgical Planning: A Review*, Ann Biomed Eng 48, 2020., <https://doi.org/10.1007/s10439-019-02411-0>
- [32] Schwarzer, E., Holtzhausen, S., Scheithauer, U., Ortmann, C., Oberbach, T., Moritz, T., Michaeli, A.: *Process development for additive manufacturing of functionally graded alumina toughened zirconia components intended for medical implant application*, Journal of the European Ceramic Society, Volume 39, Issues 2–3, 2019., <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.09.003>.
- [33] Kozakiewicz-Latała, M., Nartowski, K. P., Dominik, A., Malec, K., Gołkowska, A. M., Złocińska, A., Rusińska, M., Szymczyk-Ziółkowska, P., Ziółkowski, G., Górniak, A., Karolewicz, B.: *Binder jetting 3D printing of challenging medicines: From low dose tablets to hydrophobic molecules*, European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, Volume 170, 2022., <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2021.11.001>.

- [34] Naitoh, M., Kubota, Y., Katsumata, A., Ohsaki, C., Ariji, E.: *Dimensional Accuracy of a Binder Jet Model Produced From Computerized Tomography Data for Dental Implants*, J Oral Implantol, 2006.
- [35] *About Additive Manufacturing*, <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/sh eetlamination/>, 04.05.2024.
- [36] Paz-González, J. A., Velasco-Santos, C., Villarreal-Gómez, L. J., Alcudia-Zacarias, E., Olivas-Sarabia, A., Cota-Leal, M. A., Flores-López, L. Z., Gochi-Ponce, Y.: *Structural composite based on 3D printing polylactic acid/carbon fiber laminates (PLA/CFRC) as an alternative material for femoral stem prosthesis*, Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, Volume 138, 2023., <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2022.105632>.
- [37] <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/directed-energy-deposition>, 15.05.2024.
- [38] Ryu, D.J., Ban, H.Y., Jung, E.Y., Sonn, C.-H., Hong, D.H., Ahmad, S., Gweon, B., Lim, D., Wang, J.H.: *Osteo-Compatibility of 3D Titanium Porous Coating Applied by Direct Energy Deposition (DED) for a Cementless Total Knee Arthroplasty Implant: In Vitro and In Vivo Study*. J. Clin. Med. 2020., <https://doi.org/10.3390/jcm9020478>
- [39] Moghadasi, K., Syahid Mohd Isa, M., Ashraf Ariffin, M.: *A review on biomedical implant materials and the effect of friction stir based techniques on their mechanical and tribological properties*, Journal of Materials Research and Technology, Volume 17, 2022., <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.01.050>.
- [40] Culmone, C., Smit, G., Breedveld, P.: *Additive manufacturing of medical instruments: A state-of-the-art review*, Additive manufacturing, 2019.
- [41] Kumar, R., Kumar, M., Singh Chohan, J.: *The role of additive manufacturing for biomedical applications: A critical review*, Journal of Manufacturing Processes, 2021.
- [42] Jiaying Tan, L., Zhu, W., Zhou, K.: *Recent Progress on Polymer Materials for Additive Manufacturing*, Advanced Functional Materials, Volume 30, Issue 43, 2020., <https://doi.org/10.1002/adfm.202003062>
- [43] Hanebuth, E.: <https://prototypingolutions.com/choosing-3dprint-materials-polyjet/>, 17.05.2024
- [44] Tappa, K., Jammalamadaka, U.: *Novel Biomaterials Used in Medical 3D Printing Techniques*: J. Funct. Biomater., 2018., <https://doi.org/10.3390/jfb9010017>

- [45] Haleem, A., Javaid, M., Pratap Singh, R., Rab, S., Suman, R., Kumar, L., Haleem Khan, I.: *Exploring the potential of 3D scanning in Industry 4.0: An overview*, International Journal of Cognitive Computing in Engineering, Volume 3, 2022., <https://doi.org/10.1016/j.ijcce.2022.08.003>.
- [46] Haleem, A., Javaid, M.: *3D scanning applications in medical field: A literature-based review*, Clinical Epidemiology and Global Health, Volume 7, Issue 2, 2019.
- [47] Jani, Gargi & Lavin, Wenona & Ludhwani, Suresh & Johnson, Abraham: *An Overview of Three Dimensional (3D) Technologies in Forensic Odontology*, 2021.
- [48] Sharma, N., Ostas, D., Rotar, H., Brantner, P., Thieringer, F. M.: *Design and Additive Manufacturing of a Biomimetic Customized Cranial Implant Based on Voronoi Diagram*, 2021.
- [49] Karatas, O. H., Toy, E.: *Three-dimensional imaging techniques: A literature review*, Eur J Dent., 2014.
- [50] <https://ssl.adam.com/graphics/images/en/23269.jpg>, 18.05.2024.
- [51] Javaid, M., Haleem, A., Pratap Singh, R., Suman, R.: *Industrial perspectives of 3D scanning: Features, roles and it's analytical applications*, Sensors International, Volume 2, 2021., <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100114>.
- [52] *Types & Benefits of 3D Scanners and 3D Scanning Technologies*, <https://www.pre-scient.com/knowledge-center/product-development-by-reverse-engineering/scanners-scanning/>, 26.05.2024.
- [53] Wang, R., Law, A. C., Garcia, D., Yang, S., Kong, Z.: *Development of Structured Light 3D-Scanner with High Spatial Resolution and its Applications for Additive Manufacturing Quality Assurance*, 2021.
- [54] Bennett, M. J.: *Evaluating the Creation and Preservation Challenges of Photogrammetry-based 3D Models*, Archiving Conference, 2015.
- [55] Kohtala, S., Erichsen, J. F., Wullum, O. P., Steinert, M.: *Photogrammetry-based 3D scanning for supporting design activities and testing in early stage product development*, Volume 100, 2021., <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.047>.
- [56] Bell, T., Li, B., Zhang, S.: *Structured Light Techniques and Applications*, In Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, 2016.
- [57] *Mechanical Prosthetic Knees*, <https://accessprosthetics.com/products/prosthetics/above-knee-prosthetics/mechanical-prosthetic-knees/>, 27.05.2024.
- [58] Efstathiou, Kyriakos & McGarry, Anthony. (2024). *3D PRINTED COSMETIC COVERS FOR LOWER LIMB PROSTHETICS*, Canadian Prosthetics & Orthotics Journal, 2024.

- [59] Wang, R., Law, A.C., Garcia, D. et al.: *Development of structured light 3D-scanner with high spatial resolution and its applications for additive manufacturing quality assurance*, Int J Adv Manuf Technol 117, 845–862, 2021., <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07780-2>
- [60] <https://www.ireal3dscan.com/products/ireal-2e-3d-scanner/>, 27.05.2024.
- [61] <https://store.makerbot.com/3d-printers/methods/method-x>, 28.05.2024.
- [62] <https://www.inkstation.com.au/2102/pla-3d-filament-175mm-blue-1kg-roll-p-18257.html#12223>, 28.05.2024.