

# Razvoj proteze noge po mjeri pacijenta za aditivnu proizvodnju

---

**Golubić, Tin**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

*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:235:055230>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-12**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Tin Golubić**

**Zagreb, 2022.**

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Dr. sc. Damir Godec, dipl. ing.

Student:

Tin Golubić

**Zagreb, 2022.**

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

Zahvaljujem se svom mentoru, Dr. sc. Damir Godec, dipl. ing., na strpljenju i savjetima tijekom izrade završnog rada.

Također, želio bih se zahvaliti svim kolegama, prijateljima i obitelji na podršci i razumijevanju tijekom cijelog preddiplomskog studija.

Tin Golubić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: <b>602 – 04 / 22 – 6 / 1</b>	
Ur.broj: <b>15 - 1703 - 22 -</b>	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Tin Golubić**

JMBAG: **0035214268**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Razvoj proteze noge po mjeri pacijenta za aditivnu proizvodnju**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Development of patient-tailored leg prosthesis for additive manufacturing**

Opis zadatka:

U usporedbi s klasičnim proizvodnim tehnologijama, aditivna proizvodnja ima konkurentsku prednost posebice kada je riječ o kompleksnim geometrijama proizvoda i/ili maloj seriji potrebnih proizvoda. To su ujedno i ključni razlozi sve češće primjene aditivne proizvodnje u medicinskoj primjeni. Kada je riječ o medicinskim proizvodima, kao što su proteze ili ortoze, do izražaja dolazi sposobnost aditivnih tehnologija pri izradi vrlo kompleksnih oblika tih proizvoda u samo jednom proizvodnom koraku, a pri tome je najčešće riječ proizvodnji jednog primjerka proizvoda.

U teorijskom dijelu završnog rada potrebno je dati pregled primjene aditivnih tehnologija u medicini s naglaskom na izradu proteza i ortoza. Potrebno je opisati proces izrade od dobivanja medicinske dokumentacije pacijenta, do tehnologija i materijala koji se pri tome koriste. U praktičnom dijelu rada potrebno je za izabranu aditivnu tehnologiju razviti odgovarajuću protezu noge po mjeri pacijenta.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Damir Godec

Datum predaje rada:

**1. rok:** 24. 2. 2022.  
**2. rok (izvanredni):** 6. 7. 2022.  
**3. rok:** 22. 9. 2022.

Predviđeni datumi obrane:

**1. rok:** 28. 2. – 4. 3. 2022.  
**2. rok (izvanredni):** 8. 7. 2022.  
**3. rok:** 26. 9. – 30. 9. 2022.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

---

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA .....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK .....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD .....	1
1.1. Razvoj aditivne tehnologije .....	2
1.2. Materijali i tehnike .....	3
1.3. Prednosti i nedostaci aditivne proizvodnje .....	5
1.3.1. Smanjenje rizika .....	5
2. ADITIVNA TEHNOLOGIJA U MEDICINI .....	6
2.1. Izrada tkiva i organa .....	7
2.1.1 Bioispis .....	7
2.1.2 Organovo .....	7
2.1.3. Wake Forest institut .....	8
2.2. Aditivna proizvodnja kirurškog pribora .....	9
2.3. Priprema za operaciju potpomognuta korištenjem 3D printanih modela .....	10
2.3.1. Model arterija .....	10
2.3.2. Model bubrega .....	11
3. KORIŠTENJE ADITIVNE TEHNOLOGIJE ZA IZRADU PROTEZA .....	12
3.1. Prednosti proteza izrađenih aditivnom tehnologijom .....	13
3.1.1. Dostupnost .....	13
3.1.2. Brzina izrade .....	14
3.1.3. Svestranost .....	14
3.1.4. Jeftina i jednostavna izrada .....	15
3.1.5. Udobnost .....	15
3.2. Materijali za proteze izrađene aditivnom tehnologijom .....	16
3.2.1. Filament ojačan ugljičnim vlaknima .....	17
3.2.2. Kompozitni materijal od ugljičnih vlakana .....	18
3.2.3. Poliuretan(TPU) .....	19

---

3.2.4. Vodljivi filament.....	20
4. IZRADA PROTEZE NOGE PO MJERI PACIJENTA.....	22
4.1. Vlastiti model proteze noge.....	23
4.2. Izrada proteza noge u praksi.....	27
4.2.1. 3D skeniranje.....	27
4.2.2. Način izrade nakon skeniranja.....	28
4.2.3. Taika3D.....	29
5. ZAKLJUČAK.....	31
6. LITERATURA.....	32

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Primjer predmeta dobivenog aditivnom proizvodnjom [2].....	1
Slika 2. Jedan od prvih 3D printera iz 1980-ih [3].....	2
Slika 3. Polyjet postupak [4].....	3
Slika 4. Stereolitografija [5].....	4
Slika 5. Neki primjeri aditivne tehnologije u medicini [7].....	6
Slika 6. Jetra proizvedena aditivnom proizvodnjom [9].....	8
Slika 7. Aditivna proizvodnja sa biotintom [10].....	8
Slika 8. Kirurški instrumenti proizvedeni aditivnom tehnologijom [11].....	9
Slika 9. 3D ispisana umjetna arterija izrađena od fleksibilnog kompozita [12].....	10
Slika 10 Model bubrega izrađen aditivnom proizvodnjom [13].....	11
Slika 11. Nožna proteza izrađena aditivnom tehnologijom [15].....	12
Slika 12. Jeftina proteza ruke izrađena na kućnom 3D pisaču [16].....	13
Slika 13. Različiti dizajni proteze noge [17].....	14
Slika 14. Različiti dizajni proteza ruke za djecu [18].....	15
Slika 15. PLA u raznim bojama prije korištenja u aditivnoj proizvodnji [20].....	16
Slika 16. Proteza ruke i predmet dobiveni aditivnom tehnologijom, izrađeni od CFR-a [21].....	17
Slika 17. Utičnica izrađena od kompozita sa ugljičnim vlaknima [22].....	18
Slika 18. Proteza ruke izrađena od TPU-a [23].....	19
Slika 19. Proteza prsta izrađena vodljivim filamentom [24].....	21
Slika 20. Protetičar uzima podatke za izradu proteze [25].....	23
Slika 21. Autorovo desno stopalo.....	24
Slika 22. Desna i lijeva strana vlastitog stopala.....	25
Slika 23. Nacrt i bokocrt vlastitog modela.....	26
Slika 24. Tlocrt i ortogonalna projekcija vlastitog modela.....	26
Slika 25. Skeniranje noge suvremenim 3D skenerom [26].....	28



---

Slika 26. Otisak stopala pacijenta na temelju kojeg se izrađuje proteza .....	29
Slika 27. Prikaz mogućih modifikacija proteze noge u Taiki3D [28].....	30

## **POPIS TABLICA**

Tablica 1. Prednosti i nedostaci aditivne proizvodnje [1] .....	4
---	---

## **POPIS OZNAKA**

CAD – Oblikovanje pomoću računala (*eng. Computer aided design*)

3D – Three-dimensional

ABS – Akrlonitril/butadien/stiren

PA – Poliamid

PC – Polikarbonat

PMMA – Poli(metil-metakrilat)

PVC – Poli(vinil-klorid)

PUR - Poliuretan

PLA – Polilaktična kiselina

CFR – Filament ojačan ugljičnim vlaknima

TPU – Plastomerni polituretan

ETPU – Inženjerski plastomerni poliuretanski elastomer

## **SAŽETAK**

Tema ovog rada primjena je aditivne proizvodnje u medicini. U uvodu se govori općenito o aditivnoj tehnologiji, o njenim prednostima i nedostacima. Zatim je navedeno nekoliko najbitnijih primjera iz korištenja aditivne proizvodnje u medicini. Nakon toga obrađena je tema korištenja aditivne proizvodnje za izradu proteza, u kojoj su navedene glavne prednosti takvih proteza i materijali od kojih one mogu biti izrađene. U praktičnom dijelu biti će dan primjer razvijene proteze noge za odgovarajućeg pacijenta.

Ključne riječi:

Aditivna proizvodnja, medicina, materijali, proteza

## **SUMMARY**

The topic of this paper is applied additive manufacturing in medicine. In the introduction, there will be some basic information about additive technology, its advantages and disadvantages. Then, some of the most important examples of the use of additive production in medicine will be given. After that, the topic of using additive production for prosthesis production will be discussed, which lists the main advantages of such prostheses and the materials from which they can be made. In the practical part, there will be an example of a developed prosthetic leg for a suitable patient.

Key words:

Additive manufacturing, medicine, materials, prosthesis

## 1. UVOD

Dio proizvodnoga strojarstva koji se bavi izradom predmeta nanošenjem čestica u tankim slojevima naziva se aditivna proizvodnja. Najprije se konstruira trodimenzionalni model koristeći jedan od računalnih CAD programa za modeliranje ili digitaliziranjem prostornoga oblika već postojećega predmeta 3D skenerima. Model se nakon toga pretvara u niz horizontalnih poprečnih presjeka, a ti presjeci se zatim, uz pomoć stroja za proizvodnju tvorevina, otiskuju sloj po sloj dok se ne dobije konačni proizvod. Tim se postupcima također mogu izraditi i prototipovi, kalupi i alati velike preciznosti te funkcionalni dijelovi spremni za upotrebu. Trenutačno su ograničeni jedino izbor materijala, brzina izrade i dimenzije modela. [1]



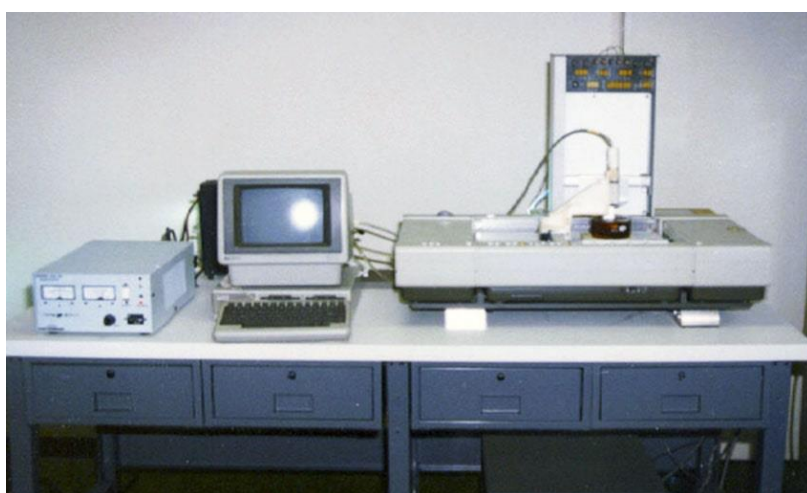
Slika 1. Primjer predmeta (impeler) dobivenog aditivnom proizvodnjom [2]

### 1.1. Razvoj aditivne tehnologije

Razvoj tehnologije aditivne proizvodnje započeo je u SAD-u, 1987. godine kada je tvrtka 3D Systems uspjela razviti postupak stereolitografije, dok je postupak trodimenzionalnoga ispisa razvijen 1989. na Massachusetts Institute of Technology u Cambridgeu. Godine 1991. pojavljuju se postupci taložnoga očvršćivanja i proizvodnje laminarnih objekata, a 1992. pojavljuje se postupak selektivnog laserskog srašćivanja.

Aditivna tehnologija najviše se počinje primjenjivati u proizvodnji elektroničkih proizvoda, u proizvodnji medicinskih umetaka, modela, protetskih pokrivala za udove, u zrakoplovnoj i autoindustriji te u građevinskoj industriji za proizvodnju dijelova konstrukcija čime se postižu značajne uštede. U posljednje vrijeme, zbog pristupačne cijene te jednostavnijih uređaja i materijala, primjena se širi na osobnu upotrebu.

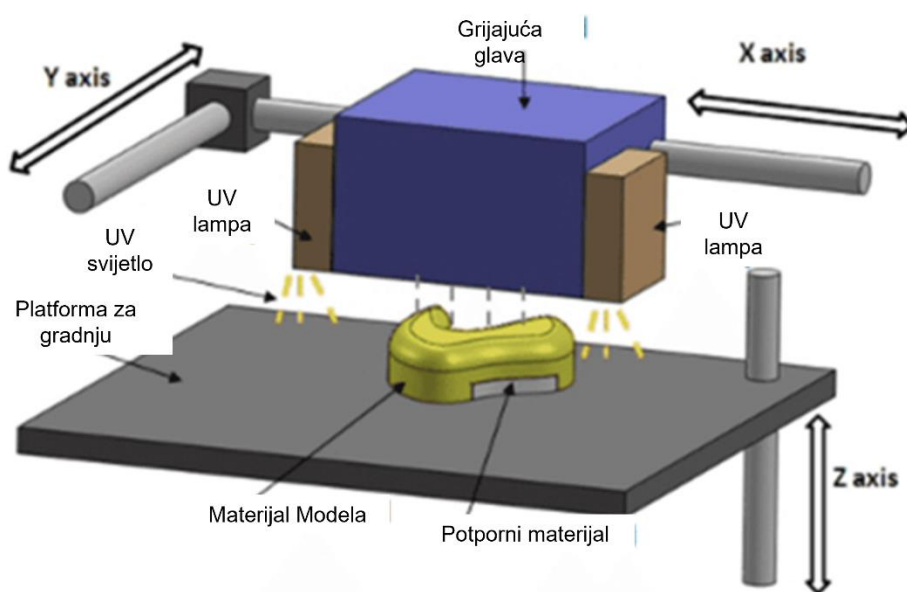
Ta tehnologija, koja se još uvijek razvija, predstavlja budućnost proizvodnje. Razmjerno kratko vrijeme izradbe, velika fleksibilnost i dimenzijska točnost čine proizvode sve isplativijima za upotrebu. Iako neće u potpunosti promijeniti temeljnu strukturu klasične proizvodnje, ta će tehnologija otvoriti široko polje mogućnosti izradbe tvorevina, kalupa, alata i drugih predmeta.  
[3]



Slika 2. Jedan od prvih 3D pisača iz 1980-ih [3]

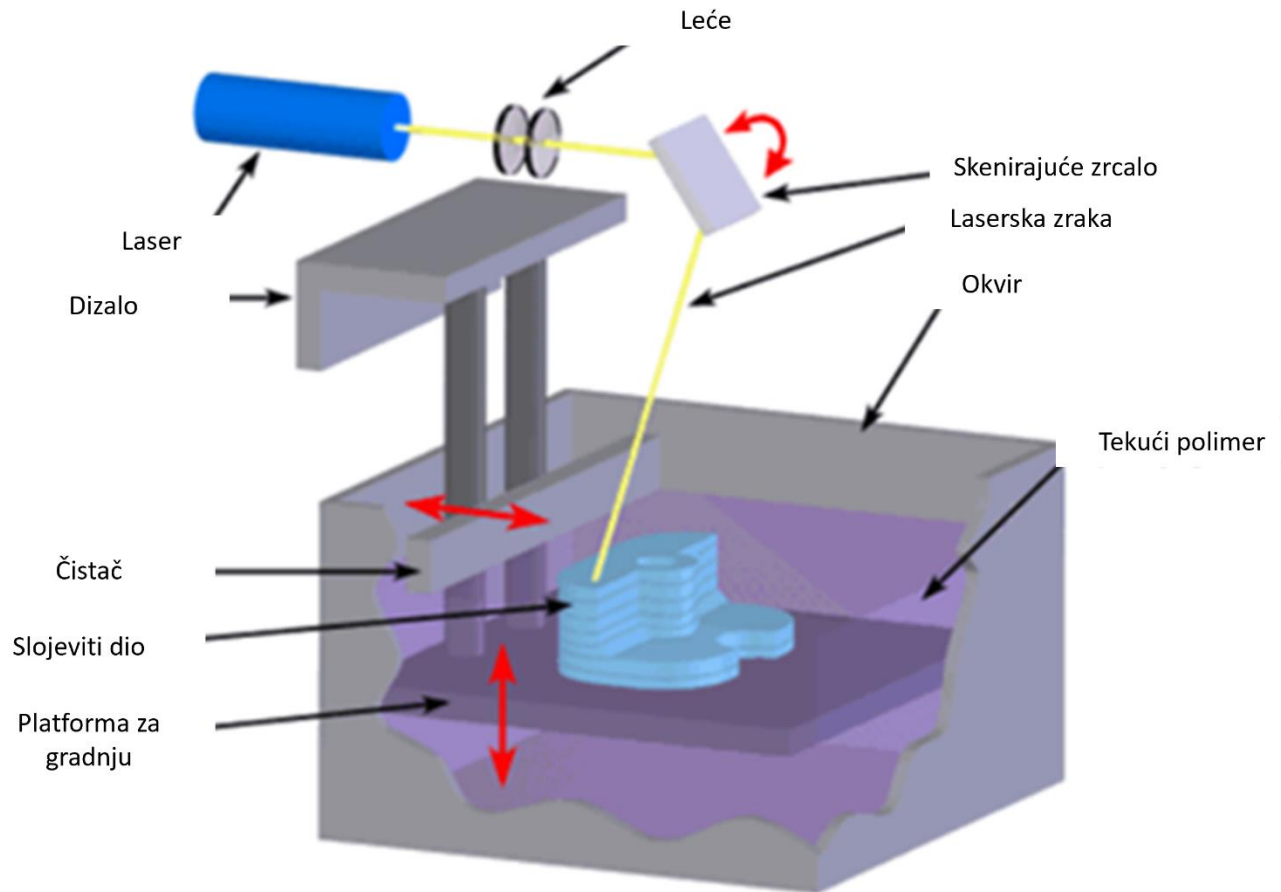
## 1.2. Materijali i tehnike

Materijali koji se koriste za aditivnu proizvodnju mogu biti u krutom, tekućem ili praškastom stanju, a to ovisi o tehnologiji koja se koristi za dobivanje slojeva. Uglavnom se koriste polimerni materijali, poput akrilonitril/butadien/stiren(ABS), poliamidi(PA), polikarbonat (PC), poli(metil-metakrilat)(PMMA), poli(vinil-klorid)(PVC), poliuretan(PUR), epoksidne smole, no mogu se koristiti i kompozitni materijali, keramika, čelik, aluminij, titanij i druge lake slitine. Postupke aditivne proizvodnje možemo razvrstavati i prema primijenjenoj tehnologiji, pa tako imamo fotopolimerizaciju (stereolitografija), raspršivanje veziva (trodimenzionalni ispis), raspršivanje materijala (PolyJet postupak) i ekstrudiranje materijala (taložno srašćivanje), laminiranje (proizvodnja laminiranih objekata), stapanje praša (selektivno lasersko srašćivanje) i izravno taloženje materijala. U posljednjih nekoliko desetljeća osnovne značajke suvremene proizvodnje značajno su se promijenile. [1]



Slika 3. Polyjet postupak [4]





Slika 4. Stereolitografija [5]

### 1.3. Prednosti i nedostaci aditivne proizvodnje

Tablica 1. Prednosti i nedostaci aditivne proizvodnje [1]

Aditivna proizvodnja	
Prednosti	Nedostaci
Ušteda energije	Limitiran izbor materijala
Smanjenje otpadnog materijala	Loša kvaliteta površine proizvoda
Izrada geometrijski zahtijevnih predmeta	Limitirana veličina predmeta
Fleksibilna proizvodnja	Potrebna naknadna obrada proizvoda
Brza izrada prototipova	Netočnosti dizajna

#### 1.3.1. Smanjenje rizika proizvodnje

Uz prednosti spomenute u tablici, jedna od najvažnijih je i smanjenje rizika prilikom proizvodnje. Neispravan prototip može dizajnera koštati i vremena i novca. Čak i manje promjene u kalupu mogu imati velik utjecaj na financijsku osnovu. Ispravna provjera dizajna je važan dio prije ulaganja u skupi alat za oblikovanje. Aditivna tehnologija pomaže u provjeri dizajna ispisom prototipa spremnog za proizvodnju prije ulaganja u skupe proizvodne alate, čime se uklanja rizik tijekom procesa izrade prototipa. [1]

## 2. ADITIVNA TEHNOLOGIJA U MEDICINI

Aditivna tehnologija u području suvremene medicine donijela je značajna poboljšanja u odnosu na tradicionalne metode liječenja. Najveći napredak zabilježen je u kirurgiji i ortopediji, pogotovo u pristupu tretiranja lomova kostiju.

Budući da se aditivna tehnologija ne oslanja na kalupe ili više dijelova specijalizirane opreme, a dizajn se može brzo modificirati, 3D ispis se također može koristiti za stvaranje proizvoda koji su prilagođeni pacijentu na temelju njihove anatomije. Neki od primjera su zamjene zglobova, kranijalni implantati i dentalne nadoknade. Dok neki veliki proizvođači stvaraju i plasiraju te proizvode na tržište, ova razina prilagodbe također se koristi na mjestu njege pacijenata u onome što se naziva proizvodnja na mjestu za njegu (eng. *point of care manufacturing*). Ova izrada 3D tiskanih medicinskih proizvoda na zahtjev temelji se na slikovnim (DICOM) podacima pacijenta. Medicinski uređaji koji se tiskaju na mjestu njege uključuju anatomske modele prilagođene pacijentu, protetiku i alate koji pomažu kirurzima u usmjeravanju gdje rezati tijekom operacije. Broj američkih bolnica sa centraliziranim postrojenjem za 3D ispis brzo je rastao u posljednjem desetljeću, sa samo tri u 2010. na više od 100 do 2019. godine. Postoje četiri osnovne upotrebe aditivne tehnologije u medicinskom području koje su povezane s nedavnim inovacijama, a to su: stvaranje tkiva i organa, izrada kirurških alata, izrada kirurških modela specifičnih za određenog pacijenta i izrada proteza i ortoza po mjeri. [6]



Slika 5. Neki primjeri primjene aditivne tehnologije u medicini [7]

## **2.1. Izrada tkiva i organa**

Jedna od mnogih vrsta 3D ispisa koja se koristi u području medicinskih uređaja je bioispis. Umjesto ispisivanja plastikom ili metalom, bioprinteri koriste računalno vođenu pipetu za nanošenje slojeva živih stanica, koje se nazivaju bio-tintom, jedan na drugi kako bi stvorili umjetno živo tkivo u laboratoriju.

Ovi konstrukti tkiva ili organoidi mogu se koristiti za medicinska istraživanja jer oponašaju organe. Također se testiraju kao jeftinija alternativa u transplantaciji ljudskih organa. [8]

### **2.1.1. Bioispis**

U današnje doba smatra se kako je najbolji pristup osloniti se na samosastavljanje i samoorganizacijska svojstva stanica i tkiva te na urođene regenerativne sposobnosti samog organizma. Kasnije dolazi do samoumnažavanja tih stanica, a dani kalup u kojem se one nalaze se razgradi te tako ostaje prirodno tkivo. Kod bioprintanja koriste se višestanične samosastavljajuće jedinice kao čestice biotinte i upotrebljavaju se razvojni morfo-genetski principi, kao što su fuzija tkiva i sortiranje stanica. Bioprintanje predstavlja rješenje za konstrukciju debelih i kompleksnih tkiva s funkcionalnom vaskulaturom budući da uglavnom nema posljedica na stanice. [8]

### **2.1.2. Organovo**

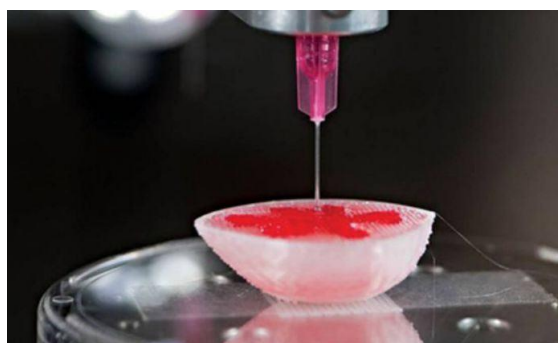
Američki medicinski laboratorij i istraživačka tvrtka, Organovo, eksperimentira s tiskanjem tkiva jetre i crijeva kako bi pomogla u proučavanju organa, kao i u razvoju lijekova za određene bolesti. U svibnju 2018. godine, tvrtka je predstavila pretkliničke podatke o funkcionalnosti svog jetrenog tkiva u programu za tirozinemiju tipa 1, stanja koje sprječava sposobnost tijela da metabolizira aminokiselinu tirozin zbog nedostatka enzima. [8]

### 2.1.3. Wake Forest institut

Institut Wake Forest u Sjevernoj Karolini, SAD, usvojio je sličan pristup razvijajući 3D organoid mozga s potencijalnom primjenom u otkrivanju lijekova i modeliranju bolesti. Sveučilište je u svibnju 2018. godine objavilo da njegovi organoidi imaju funkcionalnu krvno-moždanu barijeru koja se u potpunosti temelji na stanicama i koja oponaša normalnu ljudsku anatomiju. Također radi se na 3D ispisu kožnih transplantata koji se mogu primijeniti izravno na žrtve opekline. [8]



Slika 6. Jetra proizvedena aditivnom proizvodnjom [9]



Slika 7. Aditivna proizvodnja s biotintom [10]

## 2.2. Aditivna proizvodnja kirurškog pribora

Sterilni kirurški instrumenti, kao što su pincete, hemostati, ručke skalpela i stezaljke, također se mogu proizvoditi pomoću 3D pisača. Ne samo da 3D ispis proizvodi sterilne alate, već je izrada vrlo precizna te se mogu proizvoditi i jako maleni instrumenti, koji se mogu koristiti za rad na sitnim područjima bez nanošenja nepotrebne dodatne štete pacijentu. Jedna od glavnih prednosti korištenja 3D ispisa umjesto tradicionalnih metoda proizvodnje za proizvodnju kirurških instrumenata su znatno niži troškovi proizvodnje. [8]



Slika 8. Kirurški instrumenti proizvedeni aditivnom tehnologijom [11]

### 2.3. Priprema za operaciju potpomognuta korištenjem 3D ispisanih modela

Još jedna od primjena aditivne tehnologije u medicinskom području je stvaranje replika organa specifičnih za pacijente na kojima kirurzi mogu vježbati prije izvođenja kompliciranih operacija. Dokazano je da ova tehnika ubrzava postupke i minimizira traumu za pacijente. Ova vrsta zahvata uspješno se izvodi u operacijama u rasponu od transplantacije cijelog lica do zahvata na kralježnici i sve je više rutinska praksa. [8]

#### 2.3.1. Model arterija

U Dubaiju, gdje bolnice slobodno koriste 3D ispis, liječnici su uspješno operirali pacijenticu koja je pretrpjela cerebralnu aneurizmu u četiri vene, koristeći 3D ispisani model njezinih arterija kako bi odredili kako se sigurno kretati krvnim žilama. [8]



Slika 9. 3D ispisana umjetna arterija izrađena od fleksibilnog kompozita [12]

### 2.3.2. Model bubrega

U siječnju 2018. godine kirurzi u Belfastu uspješno su vježbali za transplantaciju bubrega za 22-godišnju ženu koristeći 3D ispisani model bubrega njezina donora. Transplantacija je bila puna komplikacija jer je njezin otac, koji je bio njezin donor, imao nekompatibilnu krvnu grupu, a otkriveno je da njegov bubrež ima potencijalno kancerogenu cistu. Koristeći 3D ispisanu repliku njegovog bubrega, kirurzi su uspjeli procijeniti veličinu i mjesto tumora i ciste. [8]



**Slika 10. Model bubrega izraden aditivnom proizvodnjom [13]**



### 3. KORIŠTENJE ADITIVNE TEHNOLOGIJE ZA IZRADU PROTEZA

Aditivna proizvodnja u medicinskom području može se koristiti i za izradu protetskih udova koji su prilagođeni da odgovaraju i pristaju korisniku. Uobičajeno je da osobe s amputacijom čekaju tjednima ili mjesecima da dobiju protezu tradicionalnim putem; međutim, aditivna proizvodnja značajno ubrzava proces, kao i stvaranje znatno jeftinijih proizvoda koji pacijentima nude istu funkcionalnost kao i tradicionalno proizvedena protetika. Niža cijena ovih proizvoda čini ih posebno primjenjivima za djecu koja brzo prerastu svoje protetske udove. 3D ispis također omogućuje pacijentu da dizajnira protezu koja izravno odgovara njihovim potrebama. Na primjer, Body Labs je stvorio sustav koji omogućuje pacijentima da modeliraju svoju protezu na vlastitim udovima skeniranjem kako bi stvorili prirodnije pristajanje i izgled. [14]



Slika 11. Nožna proteza izrađena aditivnom tehnologijom [15]

### 3.1. Prednosti proteza izrađenih aditivnom tehnologijom

#### 3.1.1. Dostupnost

Aditivna tehnologija u protetici dostupna je gotovo svima. Tradicionalna metoda protetske kirurgije je skupa, a oni koji bi zahtijevali usluge bili bi zabrinuti zbog troškova. Uz aditivnu tehnologiju, postoji pristupačna alternativa. Vrlo je lako mijenjati CAD dizajn, a 3D ispis je jeftinija opcija. Prema izjavi koju je dalo Američko udruženje za ortotiku i protetiku, prosječna proteza košta između 1500 i 8000 dolara. Nasuprot tome, protetika izrađena aditivnom tehnologijom košta samo 50 dolara. [14]



**Slika 12. Jeftina proteza ruke izrađena na kućnom 3D pisaču [16]**

### 3.1.2. Brzina izrade

Brzina je još jedan važan čimbenik koji treba uzeti u obzir dok se raspravlja o primjeni aditivne tehnologije u protetici. Protetika napravljena s pomoću aditivne tehnologije može se izraditi vrlo brzo u usporedbi s tradicionalnim alternativama. Za proizvodnju tradicionalne protetike potrebni su tjedni, pa čak i mjeseci, te bi ljudi kojima je potrebna proteza morali čekati da se ona izradi. To se promijenilo pojavom aditivne proizvodnje. [14]

### 3.1.3. Svestranost

Još jedan važan čimbenik za aditivnu tehnologiju u protetici je svestranost. Aditivna tehnologija omogućuje izradu protetike koja će zadovoljiti individualne zahtjeve i želje. Bez obzira tražite li jednostavnu i prilagođenu boju, ili vam je potrebna 3D ispisana protetika na poseban način, CAD i 3D ispis mogu stvoriti dizajn koji će zadovoljiti specifične zahtjeve. Uz to, 3D pisari svaki dan postaju kompatibilni s velikim brojem materijala, uključujući titan i ojačane polimere (kompozite) za povećanje izdržljivosti. [14]



Slika 13. Različiti dizajni proteze noge [17]

### 3.1.4. Jeftina i jednostavna izrada

Prosječni životni vijek svake tradicionalne proteze je oko 5 godina. S obzirom na brzinu rasta djece, protetika im je mnogo češće potrebna. Uzimajući u obzir trošak, to će staviti ogroman teret obiteljima. Uz jednostavnost proizvodnje i smanjene cijene zbog 3D ispisa, postalo je lako stvoriti više protetskih proizvoda za djecu sa smanjenim troškovima. Uz to, ako se uzme u obzir i svestranost, djeca mogu sama birati boje i stilove prema svojim željama i potrebama.

[14]



Slika 14. Različiti dizajni proteza ruke za djecu [18]

### 3.1.5. Udobnost

Udobnost je još jedan važan čimbenik koji ovdje treba uzeti u obzir. Obična protetika nije najudobnija za nositelje. Gotovo svi ljudi koji su imali tradicionalni protetski ud žalili su se na nelagodu tijekom nošenja. S druge strane, 3D ispis pomaže u pružanju ultimativnog rješenja korištenjem CAD usluga i anatomskih podataka korisnika. Dizajneri mogu izraditi utičnicu posebno za protezu koja će savršeno pristajati. Protetika je također udobnija kada se koriste metode 3D ispisa od više materijala. To pomaže u stvaranju prirodnijih utičnica koje će se bolje stopiti s ljudskim tijelom. [14]

### 3.2. Materijali za proteze izrađene aditivnom tehnologijom

Kod aditivne proizvodnje, jedan od najpopularnijih materijala je polilaktična kiselina (PLA). Snažan je, jeftin i jednostavan za ispis. PLA je izvrstan za širok raspon primjena, ali postoje i druge mogućnosti materijala. Budući da je kod protetike potrebna visoka razina kvalitete, postoje neke situacije u kojima PLA i drugi uobičajeni materijali ne mogu baš to učiniti. Protetičke i bioničke tvrtke gledaju na korištenje egzotičnijih materijala kako bi mogle poboljšati svoje proizvode.

Prije svega, protetski udovi moraju biti lagani i udobni. Ako se protetika napaja bilo električno ili mehanički, smatra se bioničkom protetikom. Korisno je da bionički proizvodi budu što jednostavniji, pa su poželjni fleksibilni dijelovi kako bi se smanjila složenost. Bionička protetika također može sadržavati senzorne sposobnosti za povratnu informaciju korisnika, tako da može biti potrebna elektronika. Svi ovi kriteriji dizajna mogu se postići korištenjem posebnih materijala koji čine nešto više od običnog PLA. [19]



Slika 15. PLA u raznim bojama prije korištenja u aditivnoj proizvodnji [20]

### 3.2.1. Filament ojačan ugljičnim vlaknima

Filament ojačan ugljičnim vlaknima (CFR) je materijal za 3D ispis koji sadrži kratke niti ugljika. Tvrdi je od većine filamenata i odličan je izbor materijala ako je potrebno optimizirati težinu i krutost. Jedna takva primjena je u utičnici za protetske noge. Utičnica je dio koji povezuje nogu osobe s protezom. Osobe s amputacijom noge trebaju laganu i krutu protezu, a CFR udovoljava obama kriterijima.

Ovaj materijal se sastoji od kratkih ugljičnih niti ugrađenih u plastiku kao što je PLA ili najlon. Sve ove plastike su klasificirane kao termoplasti, što znači da se mogu pretopiti. Ovo svojstvo materijala može biti vrlo korisno. Tipično, rezidualni ud amputiranog malo će promijeniti oblik tijekom mjeseci ili godina. To može dovesti do nelagode ako njihova utičnica ne promijeni oblik. Ako je potrebno izvršiti preinake na utičnici, CFR filament se može jednostavno zagrijati da omekša i zatim preoblikovati. [19]



**Slika 16. Proteza ruke i predmet dobiveni aditivnom tehnologijom, izrađeni od CFR-a [21]**

### 3.2.2. Kompozitni materijal od ugljičnih vlakana

Kompozitni materijal od ugljičnih vlakana razlikuje se od CFR filameta. Sastoji se od tkanih ugljičnih listova zalijepljenih epoksidom te on ne omekšava sa porastom temperature. To je zato što je epoksid klasificiran kao termoreaktivni polimer, što znači da tijekom stvrdnjavanja prolazi kemijsku reakciju koja uzrokuje da se trajno stvrdne.

Protetske utičnice izrađene od kompozita od ugljičnih vlakana zapravo su jače od 3D tiskanog materijala od ugljičnih vlakana, ali su skupe, teške za proizvodnju i teško ih je preoblikovati. Zbog toga se neke proteze sada izrađuju 3D ispisom s CFR filamentom. Uz 3D skeniranje preostalog uda amputiranog, utičnica se može 3D ispisati što vrlo precizno bilježi svaki detalj. To omogućuje udobnije pristajanje. 3D ispis utičnice je mnogo brži i jeftiniji od tradicionalne metode izrade protetske utičnice. [19]



**Slika 17. Utičnica izrađena od kompozita sa ugljičnim vlaknima [22]**

### 3.2.3. Poliuretan (TPU)

Za razliku od većine materijala za 3D ispis, termoplastični poliuretan (TPU) je mekan i fleksibilan. Ovaj materijal je savršen za stvaranje fleksibilnih zglobova, a koristi se u aplikacijama poput protetskih prstiju ili mekane obloge za protetske utičnice.

Protetske utičnice koje su izrađene od krutih materijala (kao što je CFR filament) mogu postati neugodne ako pritisak nije ravnomjerno raspoređen. Uvođenje meke unutarnje obloge može pružiti amortizaciju i potporu, poboljšavajući udobnost za korisnika. Budući da 3D ispis može stvoriti složene oblike, može se ispisati mrežasta struktura koja omogućuje protok zraka kroz utičnicu. Ova ventilacija potrebna jer nakupljanje vlage može uzrokovati nelagodu.

TPU se također koristi u bioničkim rukama kao materijal za fleksibilne prste. Umjesto korištenja krutog mehanizma, korištenje fleksibilnih i usklađenih mehanizama za prijenos sila može rezultirati prirodnijim gibanjem. Korištenje fleksibilnih materijala u usklađenim mehanizmima smanjuje broj dijelova, uklanja potrebu za podmazivanjem i uvelike ubrzava proces montaže i proizvodnje. [19]



**Slika 18. Proteza ruke izrađena od TPU-a [23]**



---

### 3.2.4. Vodljivi filament

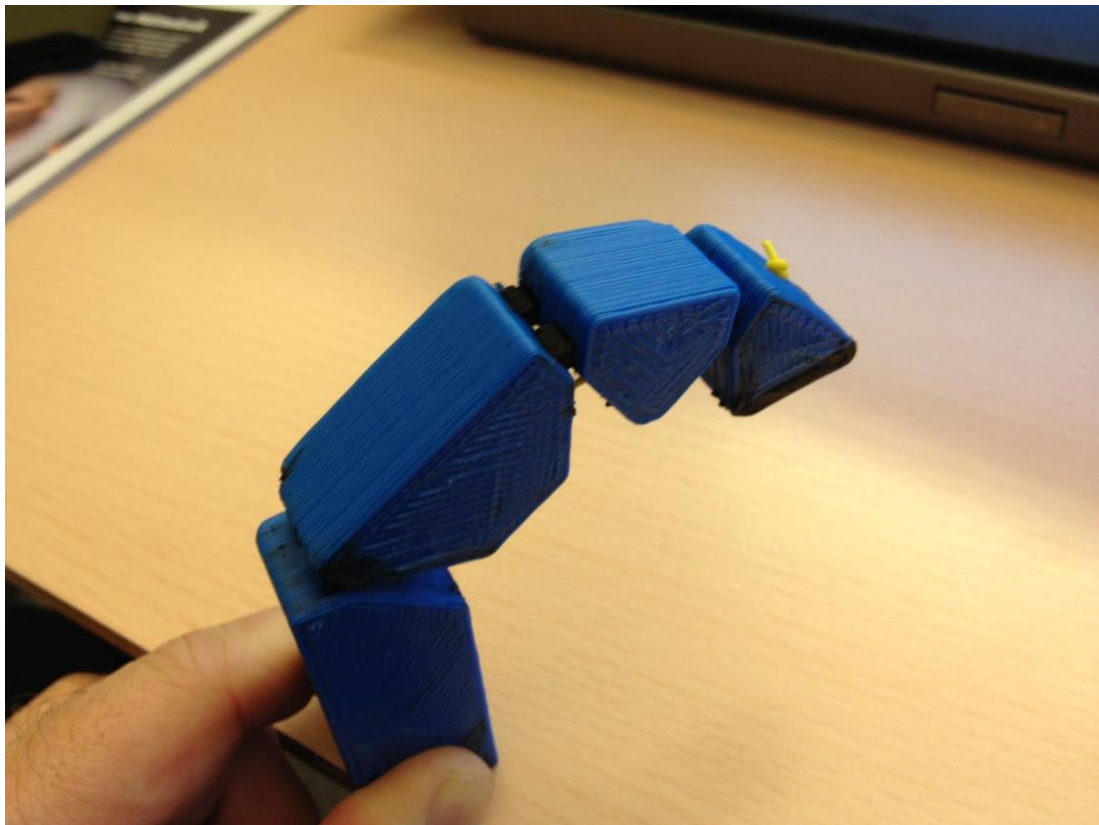
3D ispis se obično koristi za proizvodnju mehaničkih komponenti, ali određeni filamenti su električno vodljivi i mogu se koristiti u raznim zanimljivim elektroničkim aplikacijama. Jedan od takvih je materijal poznat kao ETPU.

ETPU kombinira ugljični prah i TPU za razvoj fleksibilnog i električno vodljivog polimera koji se može 3D ispisati. Iako ETPU sadrži ugljik, razlikuje se od CFR filamenta. To je zato što koristi grafen prah umjesto kratkih ugljičnih vlakana. Grafen lako provodi elektricitet, ali ne dodaje veliku mehaničku čvrstoću. Postoje i druge vrste vodljivih niti, ali su krute i ponekad krhke. U drugim aplikacijama to može biti poželjno, ali za bioniku, fleksibilnost koja dolazi s ETPU-om omogućuje ugradnju fleksibilnih senzora koji se uklapaju u oblik.

Trenutačno se 3D printani senzori nalaze samo u bioničkim prototipovima, ali ETPU se pokazao učinkovitim u aplikacijama kao što su senzori dodira u bioničkim vrhovima prstiju. Za izradu senzora dodira, ispisane su dvije ETPU površine s malim zračnim razmakom između njih. Ove površine će se približiti jedna drugoj kada se pritisne vrh prsta. Kada te površine dođu u kontakt, zatvara se strujni krug, a ovaj se signal može upotrijebiti kako bi korisnik znao kada je čvrsto uhvatio predmet.

Ovaj binarni (on/off) senzor dodira jedan je od najosnovnijih 3D ispisanih senzora i može se modificirati kako bi se napravili složeniji senzori kao što su senzori deformacije, senzori vibracija i senzori sile.

Jedna od glavnih prednosti senzora za 3D ispis je da pojednostavljuje i ubrzava proizvodnju. Uz 3D ispisane senzore, unaprijed izgrađene komponente ne moraju biti ručno pričvršćene na objekt. Umjesto toga, senzori mogu biti dio samog procesa ispisa. [19]



**Slika 19. Proteza prsta izrađena vodljivim filamentom [24]**

#### 4. IZRADA PROTEZE NOGE PO MJERI PACIJENTA

Budući da se protetski udovi ne proizvode masovno i ne nalaze se na policama u trgovinama, mnogi su izrađeni po narudžbi od početka do kraja. Slično naočalama, proteze udova propisuje liječnik nakon što se zakažu konzultacije. To se obično događa nakon posjete fizioterapeutu i protetičaru. Ako je moguće, ovaj sastanak se događa prije amputacije uda i uključuje kirurga kako bi protetičar imao što više detalja.

Na ovom sastanku može se razgovarati o tome koje ciljeve se nada postići s protezom. Na taj način može se biti siguran da tim zna što je pacijentu važno tijekom oporavka. Moguće je postaviti ova pitanja:

- Koliko se planira biti aktivan?
- Koje aktivnosti se planiraju raditi sa protezom?
- Brine li pacijenta kako izgleda proteza?
- Nakon operacije, kirurg i protetičar odlučuju o najboljoj prevlaci za ud. To se obično sastoji od kompresijske odjeće koja potiče evakuaciju tekućine i zacjeljivanje.
- Mjerenje segmenta tijela

Jedan od najvažnijih aspekata protetskog uda je koliko točno pristaje, jer je cilj da on stoji što prirodnije i udobnije. Prije početka rada na protetici protetičar uzima otisak i digitalno očitavanje preostalog uda. Ovaj korak mora pričekati dok preostali ud više ne nateče i rana potpuno zacijeli, a to je obično nekoliko tjedana nakon operacije. Odatle protetičar mjeri druge relevantne segmente tijela i locira kosti i tetive u ovom zaostalom ekstremitetu. [25]



**Slika 20. Protetičar uzima podatke za izradu proteze [25]**

#### **4.1. Vlastiti model proteze noge**

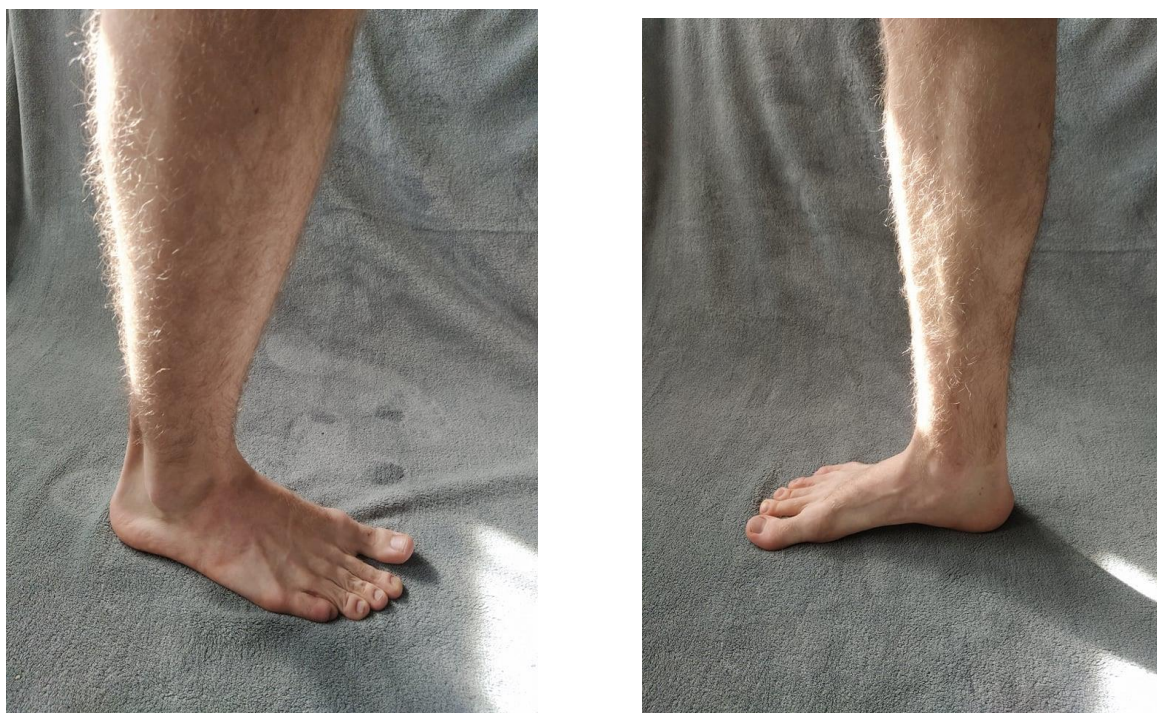
Pri izradi proteze noge, potrebno je imati dokumentaciju pacijenta. Pošto autor rada nije uspio pribaviti dokumentaciju, odlučio je sam napraviti model vlastite proteze noge.

Prije svega izmjerene su sve najvažnije veličine desnog stopala. To uključuje duljinu, najveću i najmanju visinu, širinu, te duljinu svakog prsta. Konkretno stopalo ima veću prazninu između palca i prsta do njega od prosječnog stopala što se vidi na slici 20. Ta praznina biti će istaknuta i u modelu kasnije.



**Slika 21. Desno stopalo autora**

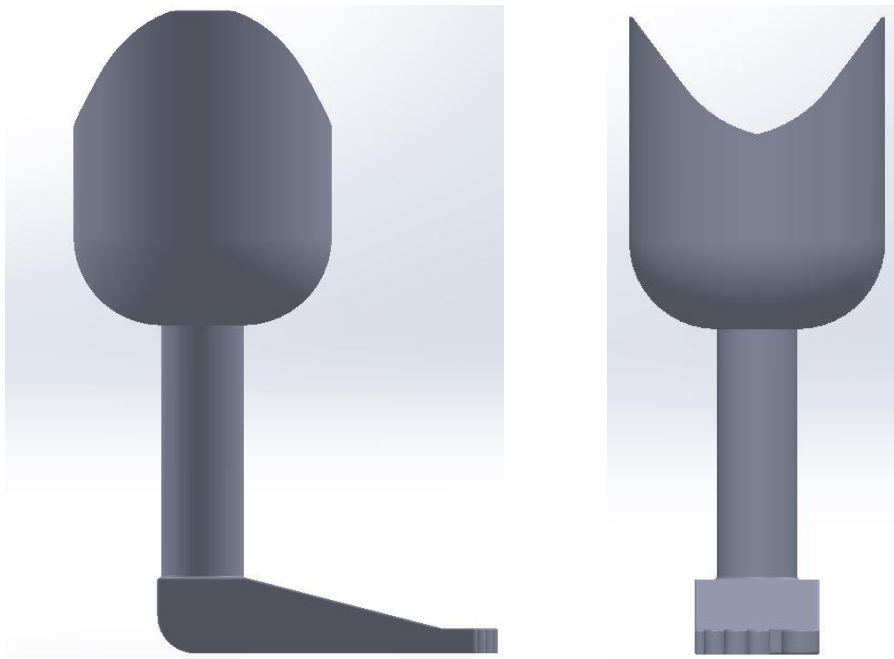
Donji dio stopala dosta je nepravilan i teško je izmjeriti sve bitne veličine. U praksi se za to mjerenje koristi 3D skener s kojim se skenira cijelo stopalo te se dobije identičan oblik stopala na računaru od kojeg se onda dalje razvija proteza, no o tome će biti više riječi u idućem poglavlju. Pošto se nije raspolagalo 3D skenerom, odlučeno je pojednostaviti taj dio na način da se donji dio stopala ostavio ravnim. Također, dio od prstiju do gležnja dosta je nepravilan, te je u modelu izrađen kao kosina. Slike 21 i 22 prikazuju stopalo autora slikano s dvije različite strane i na njima je moguće vidjeti navedene nepravilnosti.



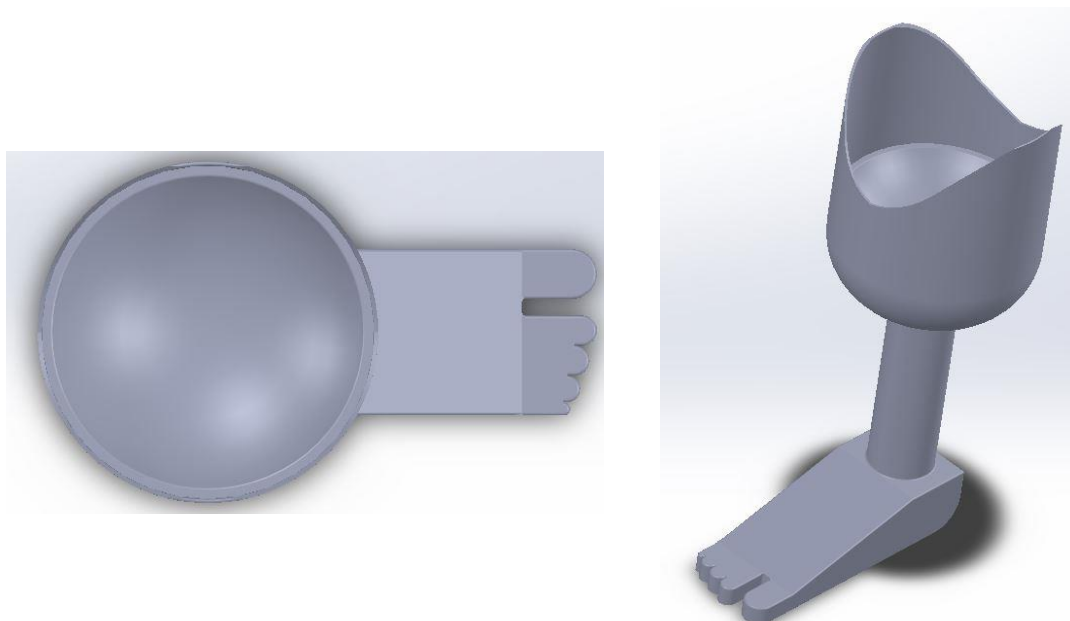
**Slika 22. Desna i lijeva strana vlastitog stopala**

Ravna ploha sa donje strane stopala ima svoje prednosti i nedostatke. Glavna prednost je bolji balans zbog pravilne, ravne površine koja ima dodir sa tлом. Najbitniji nedostatak je taj što će se morati potrošiti više materijala prilikom izrade takvog stopala uz pomoć aditive tehnologije.

Nakon stopala trebalo je još izmjeriti duljinu potkoljenice. To je veoma važno kako bi, nakon što se postavi proteza, obje noge bile iste duljine. Također, bilo je bitno izmjeriti opseg neposredno prije koljena budući da je to mjesto na koje dolazi proteza. Kada su uzete sve te mjere, moglo se početi s modeliranjem proteze. Pri modeliranju trebalo je posebno paziti na dimenzije kako se ne bi dogodilo da su pravo stopalo i potkoljenica drugačije veličine od proteze. Model je prikazan na slikama 22 i 23.



Slika 23. Nacrt i bokocrt vlastitog modela



Slika 24. Tlocrt i ortogonalna projekcija vlastitog modela

Model je izrađen u programu Solidworks. Iako nije jasno vidljivo, šuplji dio u koji dolazi utičnica ovalnog je oblika kako bi proteza bolje pristajala. Još je samo preostalo izabrati pogodan materijal za izradu modela. Uzevši u obzir sve prednosti i nedostatke materijala navedenih u trećem dijelu rada, za izradu proteze odabrana je polilaktična kiselina (PLA) zbog toga što bi ona zadovoljila svojstva koja proteza treba imati (krutost, mala masa, udobnost) i jeftin je materijal te jednostavan za ispis.

## **4.2. Izrada proteza noge u praksi**

### **4.2.1. 3D Skeniranje**

U svijetu 3D skeniranja i 3D ispisa obrnuto inženjerstvo je najčešće korištena aplikacija u više industrija. 3D skeneri omogućuju hvatanje organskih i anorganskih oblika, što ih čini idealnim alatom za industrije koje bi se borile s tradicionalnim metodama CAD dizajna. Jedna takva industrija je protetika. Dok je funkcionalnost protetskog uda njegova najvažnija značajka, pristajanje i oblik protetike mogu biti jednako važni za pacijenta. Udobnost koju pruža dobro prijanjuća protetika može napraviti veliku razliku, kao i samopouzdanje koje pruža protetski ud koji odgovara izgledu korisnika. 3D skeneri otvorili su ulaz u prilagodbu, a prilagođena protetska rješenja sada su stvarnost za mnoge amputirane osobe.

Pri izradi proteze, prvo započinjemo 3D skeniranjem pacijentove prave noge koja služi kao referenca. Suvremeni 3D skeneri taj dio posla obave za nekoliko sekundi. Prikupljeni podaci skeniranja zatim se koriste za obrnuti inženjering i omogućuju izradu prilagođene protetske noge. To daje točan prikaz ukupne veličine i oblika pacijentove noge. Cilj je napraviti protetičku nogu što bliže pravoj nozi. [27]

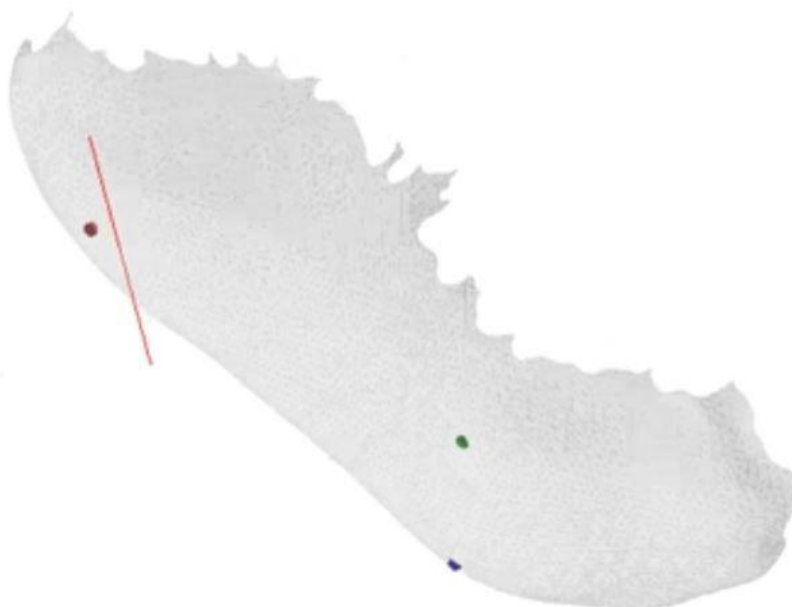




Slika 25. Skeniranje noge suvremenim 3D skenerom [26]

#### **4.2.2. Način izrade nakon skeniranja**

Nakon što je noga pacijenta skenirana, počinje se sa izradom proteze. To se radi na način da se uzme otisak stopala prave noge pacijenta koji se zatim zrcali da se dobije otisak noge za koju se izrađuje proteza. Iz tog otiska crta se vanjski rub koji se poklapa sa 3D skenom noge. Nakon što se taj rub nacрта, dodaje se materijal kako bi se proteza popunila. Zatim se proteza još može uređivati po želji pacijenta te se može proizvesti uz pomoć aditivne tehnologije. [27]



**Slika 26. Otisak stopala pacijenta na temelju kojeg se izrađuje proteza**

#### **4.2.3. Taika3D**

Taika3D Finska je tvrtka koja se bavi proizvodnjom proteza i ortoza uz pomoć aditivne tehnologije. Tvrtka je osnovana kako bi se lakše stvarali složeni i prilagođeni dizajni na brz i dosljedan način. Cilj im je omogućiti ortotičkim i protetičkim laboratorijima korištenje slobode dizajna 3D ispisa za masovnu proizvodnju. Trenutačno su svjetski lideri u proizvodnji 3D ispisanih proteza i ortoza.

Prilikom narudžbe proteze ili ortoze od njih, naručitelj može birati mnogo detalja vezanih za svoj proizvod, što je prikazano na slici 26. Na taj način proteza se izrađuje točno kako naručitelj to želi i ne može doći do pogreške u dizajnu pošto ga naručitelj sam bira. [28]

## Features:

Shell thickness	34	34
Add Logo	No ▾	No ▾
Add Arch Reinforcement (ribs)	No ▾	No ▾
Add Surface Pattern to Surroundings	Off ▾	Off ▾
Apply Medial Arch Thinning	Off ▾	Off ▾
Apply Lateral Arch Thinning	Off ▾	Off ▾
Add Line Pattern to Middle	Off ▾	Off ▾
Extrinsic Heel Posting Left/Right	Yes ▾	Yes ▾
First Ray Cutout Left/Right	No ▾	No ▾
Fifth Ray Cutout Left/Right	No ▾	No ▾
Arch Height Left/Right	Standard ▾	Standard ▾
Heel Cup Left/Right (mm)	16 ▾	16 ▾
Pitch Left/Right (mm)	0 ▾	0 ▾
Heel Lift Left/Right	0 ▾	0 ▾
Rearfoot Posting Side Left/Right	Varus ▾	Varus ▾
Rearfoot Posting Degrees Left/Right	0 ▾	0 ▾
Metatarsal Pads Left/Right	No ▾	No ▾

Slika 27. Prikaz mogućih modifikacija proteze noge u Taiki3D [28]

## 5. ZAKLJUČAK

Aditivna tehnologija otvorila je razne nove mogućnosti u proizvodnji. Prije svega, proizvodi komplicirane geometrije postali su lakši za proizvesti te je brzina proizvodnje postala veća. Zbog toga, aditivna tehnologija ubrzo je našla svoje mjesto i u području medicine. Četiri osnovne primjene aditivne proizvodnje u medicini su: izrada tkiva i organa, aditivna proizvodnja kirurškog pribora, priprema za operaciju potpomognuta korištenjem 3D ispisanih modela te izrada proteza i ortoza. Glavne prednosti aditivne tehnologije u proizvodnji proteza su dostupnost, brzina izrade, svestranost, jeftina i jednostavna izrada te udobnost. Posebnu prednost imaju proteze za djecu zbog toga što djeca brzo rastu te često trebaju mijenjati proteze, a zbog brzine izrade i niže cijene najbolja opcija su upravo proteze izrađene aditivnom tehnologijom. U ovom radu prikazano je kako je autor izradio model proteze za sebe, no i kako se to radi u praksi, te je jasno vidljivo da u praksi treba uzeti mnogo faktora prije same izrade, no zbog toga se dobije kvalitetniji i precizniji proizvod. Općenito, smatra se da se aditivna tehnologija još razvija te da će imati sve veću ulogu u budućnosti, pogotovo u medicini gdje će upravo ona vjerojatno biti ključ rješenja mnogih trenutačno nerješivih problema.

## 6. LITERATURA

- [1] Aditivna proizvodnja, <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=69979>, pristupljeno 28.1.2022.
- [2] Custom Replacement Parts from RapidMade, <https://www.rapidmade.com/replacement-parts>, pristupljeno 28.1.2022.
- [3] Povijest 3d printanja, <https://www.3dlobe.net/povijest-3d-printanja>, pristupljeno 28.1.2022.
- [4] Polyjet 3D Printing, <https://xometry.eu/en/polyjet-3d-printing-technology-overview/>, pristupljeno 28.01.2022.
- [5] Stereolitografija, <https://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>, pristupljeno 28.01.2022.
- [6] 3D printanje u medicini, <http://web.studenti.math.pmf.unizg.hr/~sakarme/3d.html>, pristupljeno 29.01.2022.
- [7] How 3D Printing changing the medical field, <https://www.oemupdate.com/innovation/how-3d-printing-changing-the-medical-field/>, pristupljeno 29.01.2022.
- [8] 3D printing in the medical field, <https://www.medicaldevice-network.com/features/3d-printing-in-the-medical-field-applications/>, pristupljeno 30.1.2022.
- [9] 3D printed liver, <https://www.asme.org/topics-resources/content/3d-printing-new-ally-liver>, pristupljeno 30.1.2022.
- [10] Bioink, <https://3dprint.com/236067/bioprinting-101-part-5-bioink/>, pristupljeno 30.1.2022.
- [11] 3D printed surgical tools, <https://3dprint.com/8937/3d-printing-space-missions/>, pristupljeno 1.2.2022.
- [12] 3D printed artery, <https://news.wisc.edu/new-3d-printed-artery-can-monitor-blockages-from-the-inside/>, pristupljeno 1.2.2022.

- 
- [13] 3D printing in kidney cancer treatment, <https://www.u-bordeaux.com/News/3D-printing-in-kidney-cancer-treatment>, pristupljeno 1.2.2022.
- [14] 3D printing in Prosthetics – The advantages and its success, <https://global3d.com.au/news-item/3d-printing-in-prosthetics-the-advantages-and-its-success/77d9f3ae-32b5-8b81-51e5-5ce367ba8b54>, pristupljeno 5.2.2022.
- [15] 3D printed Exo prosthetic leg, <https://newatlas.com/exo-prosthetic-leg-3d-printing/35297/>, pristupljeno 5.2.2022.
- [16] Los 15 proyectos top de prótesis hechas con impresión 3D , <https://bitfab.io/es/blog/protesis-impresion-3d/>, pristupljeno 5.2.2022.
- [17] Top 12 3D printed prostheses, <https://www.3dnatives.com/en/3d-prostheses-100420184/>, pristupljeno 5.2.2022.
- [18] Dad 3D Prints Prosthetic Superhero Limbs for Kids, <https://www.thedad.com/dad-3d-prints-prosthetic-superhero-limbs-for-kids/>, pristupljeno 6.2.2022.
- [19] Exploring Exotic 3D Printing Materials Used in Prosthetics, <https://www.shapeways.com/blog/archives/40103-exploring-exotic-3d-printing-materials-used-prosthetics.html>, pristupljeno 9.2.2022.
- [20] Scale PLA plant in Europe ,<https://www.agro-chemistry.com/news/corbion-and-total-to-build-first-world-scale-pla-plant-in-europe/>, pristupljeno 9.2.2022.
- [21] ZIRO Carbon Fiber PLA Filament, <https://www.amazon.com/ZIRO-Filament-1-75mm-Printer-2-2lbs/dp/B0915JQBCJ>, pristupljeno 9.2.2022.
- [22] Thermoplastic Carbon Fiber 3D Printed Prosthetic Sockets May Be Strongest Yet, <https://all3dp.com/thermoplastic-carbon-fiber-3d-printed-prosthetic-sockets-may-strongest-yet/>, pristupljeno 10.2.2022.

- 
- [23] 3D printing with TPU, <https://ninjatek.com/learn/3d-printing-materials/tpu/>, pristupljeno 10.2.2022.
- [24] Rubber3DPrinting's Conductive TPU Filament, <https://3dprint.com/28808/conductive-tpu-filament/>, pristupljeno 10.2.2022.
- [25] How to make prosthetics, <https://www.scheckandsiress.com/blog/how-to-make-prosthetics/>, pristupljeno 11.2.2022.
- [26] Easy-to-Use Affordable Portable 3D Scanner for Body Scan, <https://zg-tech.en.made-in-china.com/product/UszQqfMOXSWE/China-Easy-to-Use-Affordable-Portable-3D-Scanner-for-Body-Scan.html>, pristupljeno 12.2.2022.
- [27] 3D scanning technologies for prosthetic limb design, <https://www.southampton.ac.uk/news/2021/03/3d-scan-prosthetics.page>, pristupljeno 13.2.2022.
- [28] Taika3D, <https://www.taika3d.com/>, pristupljeno 13.2.2022.