

Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje u suradnji s Medicinskim
fakultetom

Matej Antonio Bajić, Marko Gregurić, univ. bacc. ing. mech.

Matija Duda, Dinko Ezgeta, Petra Nikšić

Individualizirana 3-D printana endoproteza koljena

Zagreb, 2021.

Ovaj rad izrađen je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje te na Medicinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu pod vodstvom prof.dr.sc. Zdravka Schauperla i prof.dr.sc. Mislava Jelića te je predan na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2020./2021.

POPIS KRATICA KORIŠTENIH U RADU

| | |
|--------------|--|
| 3D | trodimenzionalno |
| ABS | akrilonitrilbutadienstiren (eng. Acrylonitrilebutadienestyrene) |
| CAD | dizajn potpomognut računalom (eng. Computer Aided Design) |
| CT | računalna tomografija (eng. ComputedTomography) |
| DICOM | digitalno snimanje i komunikacije u medicini (eng. Digital Imaging and Communications in Medicine) |
| DLP | digitalna obrada svjetla (eng. Digital light processing) |
| DMLS | direktno lasersko sinteriranje metala (eng. Direct Metal Laser Sintering) |
| FDM | modeliranje topljenim depozitima (eng. Fused Deposition Modeling) |
| FFF | modeliranje topljenim depozitima (eng. Fused Filament Fabrication) |
| LOM | izrada laminiranih predmeta (eng. Laminated object manufacturing) |
| MRI | magnetska rezonanca (eng. Magnetic Resonance Imaging) |
| PA | poliamid (eng. Polyamide) |
| PE | polietilen (eng. Polyethylene) |
| PEP | parcijalna endoproteza koljena |
| PLA | polilaktična kiselina (eng. Polylactide) |
| PMMA | polimetilmetakrilat (eng. Polymethylmethacrylate) |
| PP | polipropilen (eng. Polypropylene) |
| PVC | polivinil klorid (eng. Polyvinylchloride) |
| SLA | stereolitografija (eng. Stereolithography) |
| SLS | selektivno lasersko sinteriranje (eng. Selective Laser Sintering) |
| STL | format stereolitografije |
| TEP | totalna endoproteza koljena |

Sadržaj

| | |
|---|----|
| 1. Uvod | 1 |
| 2. Hipoteza i opći i specifični ciljevi rada | 6 |
| 2.1 Prikaz problema | 6 |
| 2.2 Hipoteza rada | 6 |
| 2.3 Opći cilj | 6 |
| 2.4 Specifični ciljevi | 6 |
| 3. Materijali i metode | 7 |
| 3.1 Kompjutorizirana tomografija(Computed Tomography, CT) | 7 |
| 3.2 DICOM format | 8 |
| 3.3 Računalni programi | 8 |
| 3.4 Izrada modela | 10 |
| 4. Rezultati | 11 |
| 4.1 3D model kosti koljena | 11 |
| 4.2 Izrada dizajna sačaste personalizirane PEP koljena | 14 |
| 5. Rasprava | 20 |
| 6. Zaključak | 23 |
| 7. Zahvale | 24 |
| 8. Literatura | 25 |
| 8. Sažetak | 28 |
| 9. Summary | 29 |
| 10. Životopisi | 30 |

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1 - CT prikaz koljena korišten za 3D printanje kosti..... | 7 |
| Slika 2 - Sučelje programa 3D Slicer..... | 9 |
| Slika 3 - Sučelje programa Blender..... | 9 |
| Slika 4 - Sučelje programa Meshmixer..... | 10 |
| Slika 5 - CT bolesnika otvoren u programu 3D Slicer..... | 11 |
| Slika 6 - Funkcija THRESHOLD s prikazom koštanog tkiva..... | 11 |
| Slika 7 - Uvećani 3D model koštanoga tkiva koljena..... | 12 |
| Slika 8 - Eliminiranje grešaka u programu Blender..... | 12 |
| Slika 9 - Zaglađivanje površine u programu Blender..... | 13 |
| Slika 10 - Prikaz koljena u programu Meshmixer..... | 13 |
| Slika 11 - Prikaz bedrene kosti nakon razdvajanja u zasebnu datoteku..... | 14 |
| Slika 12 - Prikaz goljenične kosti nakon razdvajanja u zasebnu datoteku..... | 14 |
| Slika 13 - Goljenični dio proteze s donje strane..... | 15 |
| Slika 14 - Goljenični dio proteze s gornje strane..... | 15 |
| Slika 15 - Bedreni dio proteze s bočne strane..... | 16 |
| Slika 16 - Bedreni dio proteze sa stražnje strane..... | 16 |
| Slika 17 - Prikaz postavljene proteze na koljeno..... | 17 |
| Slika 18 - Prikaz izrezanog dijela koljena na koje se stavlja proteza..... | 17 |
| Slika 19 - Bočni prikaz unutarnje strukture proteze i koljena..... | 18 |
| Slika 20 - Prikaz s prednje strane unutarnje strukture proteze i koljena..... | 18 |
| Slika 21. Pripremljeni dio proteze za numeričku analizu u programunTopology..... | 19 |
| Slika 22. Isprintana oba dijela koljena te rastavljena PEP..... | 19 |
| Slika 23. Isprintana oba dijela koljena te sklopljena PEP..... | 20 |

1. Uvod

Zglob koljena, articulatio genu, najveći je zglob u ljudskom tijelu. Po mehanici je trochoginglymus, tj. vrsta zgloba sastavljena od nekoliko zglobova, kutnog i obrtnog. Zglob koljena čine distalni dio bedrene kosti, proksimalni dio goljениčne kosti i iver.

Proksimalni dio goljениčne kosti sastoji se od medijalne zglobne površine, koja je blago konkavna i lateralne zglobne površine, koja je prema kranijalno lagano konveksna. Iz tog razloga zglobne površine glave goljениčne kosti nisu kongruentne s kondilima bedrene kosti.

Hrskavica koljena deblja je od hrskavica svih drugih zglobova. Prosječno je debela 3 mm na stražnjoj strani ivera, na kondilima bedrene i goljениčne kosti 2-3mm, a na nekim mjestima je izmjereno čak 7 mm[1]. Iako je debljina hijaline zglobne hrskavice velika, zbog malih kontaktnih površina između kondila bedrene i goljениčne kosti dolazi do velikog tlačnog opterećenja. Taj nesklad zglobnih površina i sile pritiska kompenziraju i usklađuju debela hrskavična tijela, tj. menisci. Oko poprečne osi u koljenskome zglobu ostvaruju se pokreti fleksije i ekstenzije, a u položaju fleksije obavljaju se i pokreti rotacije oko osi potkoljenice[2].

Osteoartritis koljena (poznat i pod nazivom artroza) je degenerativna bolest zglobova koja nastaje propadanjem zglobne hrskavice. U razvoju osteoartritisa sudjeluje nekoliko čimbenika rizika među kojima su životne navike i aktivnosti, traume, nasljeđe ili djelovanje različitih hormona i enzima. Gubljenjem debljine hrskavice zbog starenja ili rizičnih čimbenika kost postaje izložena trenju te dolazi do nastanka upale. Simptomi bolesti su lokalni umor i bol u zglobu te također mogući deformitet zgloba i ograničenost pokreta. Liječenje bolesnika s osteoartritisom uključuje sveobuhvatnu anamnezu, temeljit fizički pregled i odgovarajuće radiološke pretrage. Nekirurško liječenje uključuje edukaciju bolesnika te promjenu životnih navika, dok se kirurškim metodama, poput ugradnje endoproteze, rasterećuje pritisak na zglobove[3].

Endoproteza koljena je implantat kojim se oštećene zglobne površine zamjenjuju umjetnim materijalom. Time se umanjuje bol na oštećenom području, ispravlja se deformacija i poboljšava sama funkcija koljena. Endoproteza se najčešće primjenjuje kod bolesnika s osteoartritisom koljena. Razlikujemo dvije vrste proteza: totalnu i parcijalnu endoprotezu koljena.

Kod većih oštećenja, tj. ako se ošteti više odjeljaka u zglobu koljena ugrađuje se totalna endoproteza. Tada se zamjenjuju kompletne zglobne plohe bedrene i goljениčne kosti, a zglobna ploha ivera prema potrebi. Zahvat je rutinski te bolesnik već nekoliko dana nakon operacije može izvoditi normalne kretnje u koljenu.

Parcijalna endoproteza se ugrađuje kod bolesnika kojima je koljenski zglob samo djelomično oštećen. Prilikom ugradnje parcijalne endoproteze očuva se sav ligamentni sustav koljena. Operacijski zahvat kod ugradnje parcijalne endoproteze je manje invazivan zahvat i oporavak je puno brži te se dozvoljava opterećenje koljena odmah nakon zahvata, uključujući i bavljenje sportom. Parcijalna endoproteza je pogodna za mlađe bolesnike kojima treba očuvati kosti ako u budućnosti dođe do izmjena implantata i kod bolesnika starije životne dobi zbog brzog oporavka.

Endoproteze možemo podijeliti i prema načinu fiksacije implantata na bescementne i cementne. Bescementne endoproteze svojom hrapavom površinom oponašaju površinu kosti, što omogućuje urastanje kosti u endoprotezu. Kod cementnih endoproteza koristi se posebni cement koji stvara čvrsti sloj između kosti i površine endoproteze [4]. Kod ove vrste proteze kost nije u izravnom kontaktu s endoprotezom te cement nakon određenog vremena gubi svoju funkciju i puca čime se skraćuje trajnost endoproteze.

Razvoj dijagnostičkih metoda u medicini, kao i suvremenih postupaka oblikovanja materijala i izrade proizvoda aditivnim tehnologijama otvara mogućnosti izrade personaliziranih implantata. Takvi implantati su po obliku i dimenzijama prilagođeni konkretnom pacijentu i individualnim biomehaničkim karakteristikama. Navedeni pristup zahtjeva izradu trodimenzionalnog modela kostiju pomoću magnetske rezonance (MRI) ili računalne tomografije (CT) koji se dalje koristi za individualizirani dizajn implantata za bolesnika, biomehaničku analizu i definiranje blokova kostiju koje je potrebno rezati [5].

Individualizirana 3D printana parcijalna bescementna endoproteza koljena

Zbog prije navedenih prednosti, koncept parcijalne endoproteze sve više dobiva prostora u svjetskoj ortopediji koljena, no nemogućnost rekonstruiranja prirodne biomehanike koljena i potreba za što bržim oporavkom bolesnika su i dalje dva glavna problema ovog zahvata. Rješenje tih problema zahtjeva endoprotezu koja u potpunosti prati individualnu anatomiju osobe kojoj se proteza ugrađuje, uz istodobno razvijanje novog načina fiksacije endoproteze u kost pacijenta. U ovom radu je prikazan koncept individualizirane parcijalne endoproteze

(PEP) koljena koji rješava oba navedena problema. Predloženi koncept je po svom obliku i dimenzijama prilagođen konkretnom pacijentu i individualnim biomehaničkim karakteristikama. Istovremeno, predloženi dizajn proteze nudi inovativni način ostvarivanja stabilnosti implantata: sačasta struktura materijala na kontaktnoj površini proteze s kosti olakšava urastanje kosti bolesnika u endoprotezu i time ostvaruje bolju sekundarnu stabilnost implantata. Na toj leđnoj strani predloženi koncept sadrži i šiljke koji se ugrađuju u pripremljeno koštano tkivo i osiguravaju primarnu stabilnost (fiksaciju).

Time se omogućava stvaranje koštanog tkiva oko proteze čime se dobiva trajna fiksacija[6]. Mehanički podražaj, uzrokovan dnevnom uobičajenom aktivnosti operiranog bolesnika, koji djeluje na kost tijekom cijeljenja i postupno povećanje aktivnosti bolesnika nakon ugradnje proteze utječe na remodeliranje kosti koja urasta u strukturu endoproteze. Budući da je pregradnja kosti dinamički i fiziološki proces koji se odvija trajno u kostima, primarno koštano tkivo postupno se resorbira i nadomješta sekundarnim te se unutar endoproteze formira prvobitna struktura kosti [7].

Uz rješavanje navedenih problema, primjenom predloženog koncepta bi se smanjila invazivnost postupka, sačuvalo značajno više kosti nego kod postojećih proteza čime se omogućuje lakši revizijski zahvat. Prema dostupnoj literaturi, ovo je prvi puta da implantat te vrste ima sve navedene karakteristike.

3D printanje

Napretkom tehnologije 3D printanja otvara se mogućnost preciznijoj i jednostavnijoj izradi ortopedskih implantata. 3D printanje je aditivna tehnologija kojom se proizvode trodimenzionalni predmeti. Kako bi se predmet izradio 3D printanjem prvo je potrebno napraviti računalni model istog u nekom od CAD programa (CAD ili oblikovanje pomoću računala je primjena računala za dizajniranje, projektiranje ili modeliranje 3D modela koji se kasnije proizvode) ili 3D skeniranjem realnog predmeta. Slike iz kojih se radi 3D model u programu mogu biti raznih formata, no samo printanje se obično vrši iz datoteke STL formata (zapis datoteke koji omogućuje kasnije 3D printanje) budući da je taj format podržan kod gotovo svih standardnih računala[8,9], što je kratica za “stereolithography file”, čiji je drugi naziv “Standard Triangle Language file”.

Jedna od najvećih prednosti 3D printanja je da se tom tehnologijom mogu dobiti oblici koje je teško ili nemoguće dobiti tradicionalnim metodama poput obrade odvajanjem čestica (rezanje, glodanje, tokarenje i druge), lijevanjem, kovanjem ili slično.

Samo 3D printanje može se provoditi pomoću nekoliko različitih tehnologija: FDM/FFF, stereolitografija, polyjet, LOM, selektivno ili direktno lasersko sinteriranje te aditivna proizvodnja elektronskim snopom[10].

FDM (Fused Deposition Modeling) ili FFF (Fused Filament Fabrication) tehnologija je najraširenija metoda 3D printanja s najnižom cijenom. Materijal koji se koristi se naziva filament te predstavlja namotanu plastičnu nit. Nakon što se polimer dovoljno zagrije, dolazi do mlaznice. Pomicanjem glave printera na kojoj je mlaznica ocrtavamo sloj predmeta i nakon što je sloj iscrtan glava se podiže za visinu jednog sloja čije dimenzije variraju po potrebi[11]. Stereolitografija je jedna od najpreciznijih metoda 3D printanja. Njenim korištenjem moguće je dobiti vrlo sitne i precizne detalje s izrazito glatkom površinom koja ne zahtijeva nikakve dodatne površinske obrade. Materijal koji se koristi je fotopolimer. Fotopolimer ima svojstvo da izlaganjem određenoj razini ultraljubičastog zračenja mijenja svoju strukturu, odnosno prelazi iz tekućeg u kruto stanje. Tim je svojstvom ova metoda ograničena na taj materijal. Princip je sličan kao i u prethodnoj tehnologiji, samo se ovdje prije prelaska na novi sloj čeka da UV zračenje otvrdne prijašnji sloj. Polyjet tehnologija također radi na principu UV zračenja[12].

LOM (*Laminated object manufacturing*) je tehnologija kojom spajamo slojeve plastike ili papira (nekad i metala jer je bitno samo da se materijali mogu zalijepiti sloj po sloj te naknadno oblikovati) pomoću tlaka ili temperature te oblikujemo pomoću kompjuterski kontroliranog lasera ili reznog alata. Iako je ova metoda brza, efikasna i jeftina još uvijek nije izrazito popularna vjerojatno zbog manje preciznosti od drugih metoda[13].

Selektivno lasersko sinteriranje (SLS) je aditivna tehnologija koja laserom topi stakleni, keramički ili plastični prah te ga oblikuje u 3D predmet. Moguće je sinterirati i određene metale. Svakim skeniranim presjekom laser rastapa tu razinu 3D predmeta te se na nju dodaje nova razina praha, odnosno materijala, a laser se spušta za jednu razinu. Sama laserska zraka se usmjerava pomoću pomičnih ogledala i sinterira prah. Sinteriranje praha znači da mu se zagrijavanjem povećavaju adhezijska svojstva pa se prah formira u veću krutinu.

Direktno lasersko sinteriranje metala (DMLS) je metoda taljenja praha gdje se dobiva puna gustoća predmeta. Ova metoda služi za izradu najkompleksnijih modela, moguće je dobiti unutarnje kanale točnih dimenzija s velikom brzinom ispisa.

Taljenje snopom elektrona je metoda kojom se metalni prah tali sloj po sloj elektronskim snopom u vakuumu. Predmeti dobiveni ovom metodom imaju visoku čvrstoću i niski porozitet.

Sve ove metode imaju zajedničko ograničenje, a to je izbor materijala. Najviše se printaju polimeri (PA, PMMA, akrilne i epoksidne smole, PVC, ABS, PLA, PE, PP), metali (legure titanija, kobalt-krom, cink, razne vrste čelika, volfram, aluminij) i keramike. Mogu se koristiti i drugi materijali, a u budućnosti su svakako najzanimljiviji biomaterijali.

2. Hipoteza i opći i specifični ciljevi rada

2.1 Prikaz problema

Dosadašnje se parcijalne endoproteze koljena koriste univerzalnim geometrijskim parametrima koji definiraju njen izgled i dimenzije. Stoga, postojeće tehnologije PEP koljena ne omogućuju potpunu rekonstrukciju svake individualne anatomije koljena.

2.2 Hipoteza rada

Dostupnim računalnim programima i primjenom aditivnih tehnologija moguće je realizirati koncept 3D printane individualizirane bescementne parcijalne endoproteze koljena sa sačastom strukturom. Time će se realizirati koncept personaliziranog dizajna proteze čime se smanjuje potreba za sekundarnim operacijama koljena zbog svoje podudarnosti s prirodnom zakrivljenošću koljena, a to znači i brži oporavak bolesnika. Istovremeno novi dizajn proteze omogućuje bolje urastanje kosti u protezu, bolju trajnu fiksaciju uz znatno manju debljinu implantata.

2.3 Opći cilj

Opći cilj ovog istraživanja je prikazati koncept razvoja 3D printane individualizirane bescementne parcijalne endoproteze koljena (PEP) sa sačastom strukturom koja u potpunosti prati prirodnu anatomiju koljena svake pojedine osobe za koju se radi, te ostvaruje bolju primarnu i sekundarnu fiksaciju.

2.4 Specifični ciljevi

Da bi se ostvario opći cilj, potrebno je postići sljedeće specifične ciljeve:

1. Definirati korake u obradi slike te računalni model koji će omogućiti izradu PEP koljena s individualnim parametrima zakrivljenosti svakog pojedinačnog koljena.
2. Izraditi dizajn personaliziranog implantata prema individualnom obliku i dimenzijama kosti koljena.
3. Primjenom generativnog dizajna napraviti sačastu strukturu dosjedne površine implantata i kosti kako bi se procesom osteokondukcije omogućilo urastanje kosti u endoprotezu.

3. Materijali i metode

Koncept personalizirane PEP koljena razvija se na temelju zapisa CT-a realne osobe za koju je ishodovana dozvola etičkog povjerenstva.

3.1 Kompjutorizirana tomografija(Computed Tomography, CT)

Pri oslikavanju koljenskog zgloba korišten je 128 slojni Siemens CT uređaj. CT (engl. Computerized Tomography) uređaj koristi se u medicini radi oslikavanja raznih tkiva i struktura u tijelu. Uređaj funkcionira tako da pretvara neapsorbirane X-zrake iz tijela u virtualni prikaz željene strukture nizom dvodimenzionalnih (2D) slika. Niz takvih 2D slika računalno se obrađuje i stvara se trodimenzionalan prikaz analizirane strukture tijela. Strukture veće gustoće se oslikavaju bijelom bojom (npr. kosti), dok se strukture manje gustoće oslikavaju sivom ili crnom bojom (npr. masti). Takav 3D prikaz zgloba omogućuje vrlo detaljan i vjeran prikaz kosti bolesnika iz svih mogućih kutova. Nakon oslikavanja koljenskog zgloba bolesnika dobiven je 3D prikaz kosti koji je korišten kao model za izradu personalizirane parcijalne endoproteze (PEP) koja bi pratila točnu anatomiju koljenskog zgloba te osobe, slika 1. CT snimke u medicini imaju svakodnevnu široku primjenu te se koriste u dijagnostici raznih prijeloma kosti, ali i u praćenjima razvoja malignih bolesti te raznim oštećenjima tkiva.



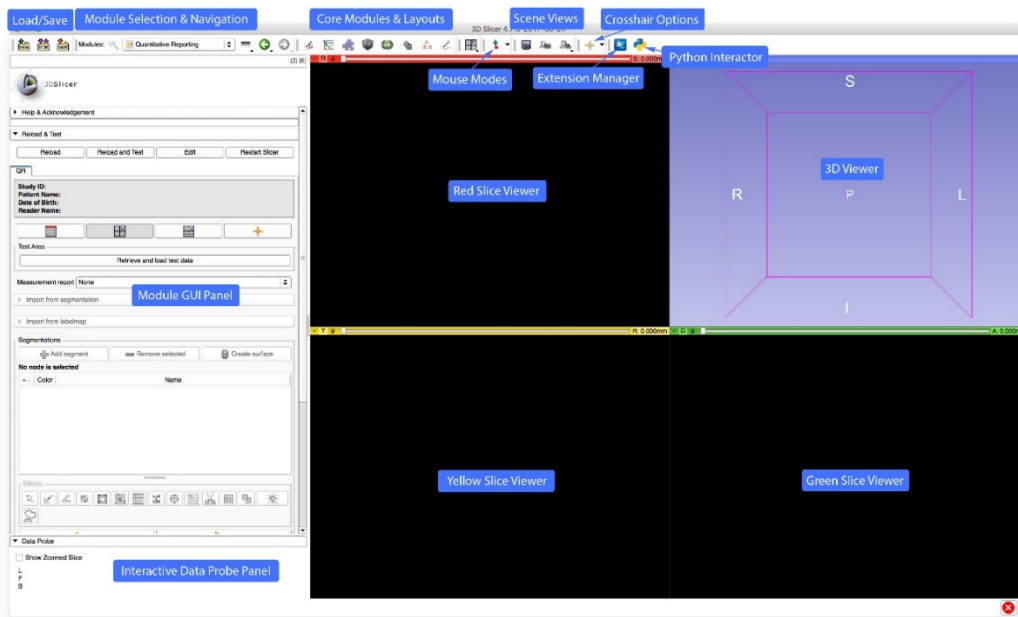
Slika 1 - CT prikaz koljena korišten za 3D printanje kosti.

3.2 DICOM format

Nakon što se učini CT koljena, dobivene slike se pohranjuju u DICOM formatu. DICOM je komunikacijski protokol i format datoteke, što znači da može pohraniti medicinske podatke kao što su ultrazvuk, MRI i CT slike, zajedno s bolesnikovim informacijama, sve u jednoj datoteci. Format osigurava da svi podaci ostanu zajedno, kao i mogućnost prijenosa navedenih informacija između uređaja koji podržavaju DICOM format. DICOM format ne može se koristiti pri izradi implantata u CAD programskim paketima te je stoga potrebno prevesti dobivene slike u pogodan format pomoću dodatnih programskih paketa. Za tu svrhu korišteni su besplatni programski paketi 3D Slicer, Blender i Meshmixer.

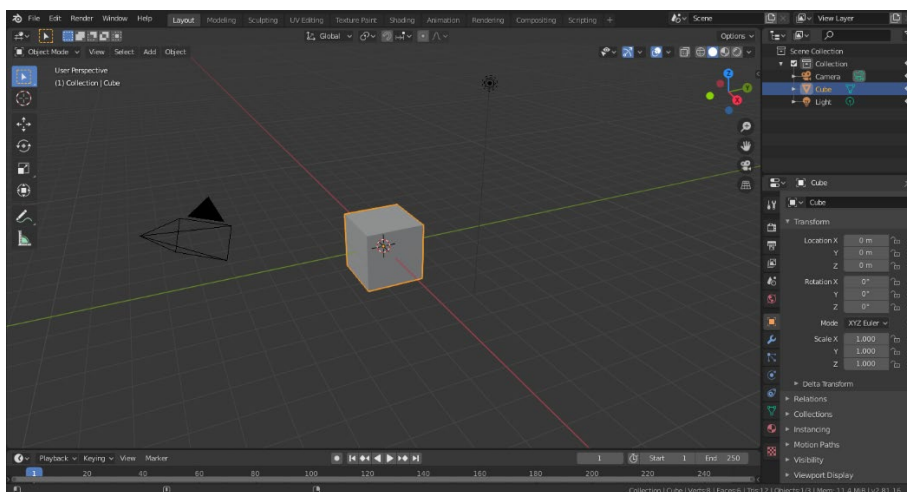
3.3 Računalni programi

3D Slicer je program koji se koristi u medicini za pregled 2D slika dobivenih iz CT-a te formiranje 3D prikaza, slika 2. Program ima niz funkcija koje omogućuju oblikovanje zapisa. Jedna od najvažnijih funkcija je *THRESHOLD* kojom je moguće selektirati i ukloniti tkivo ovisno o njegovoj gustoći, tj. intenzitetu sivila prikazanog na slici. Primjena te funkcije omogućuje razdvajanje mekog od koštanog tkiva čime se omogućuje dobivanje 3D modela kosti koljena. 3D slicer također služi za pretvorbu 3D modela u .stl format koji se kasnije koristi za 3D printanje[14]. Ta datoteka koristi trokute pomoću kojih opisuje površinu nekog objekta. Tako se pojednostavljuje CAD model koji je zatim spreman za 3D printanje. Veliki broj programa za 3D modeliranje ima mogućnost spremanja datoteka u tom formatu kako bi se izostavila potreba korištenja drugih programa. Svaki se 3D isprintani model neovisno kojom je tehnologijom izrađen sastoji od nekoliko slojeva koji određuju kvalitetu modela odnosno rezoluciju 3D printa. Veći broj slojeva po mm visine modela znači bolja rezolucija 3D printa [17].



Slika 2 - Sučelje programa 3D Slicer.

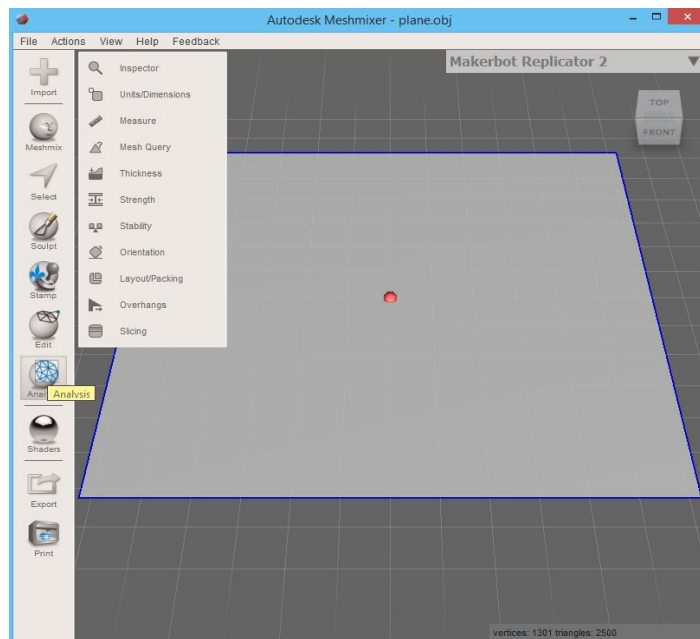
Nakon 3D Slicera u ovom istraživanju je korišten programski alat Blender. To je besplatni program koji se koristi za 3D računalnu grafiku i koristi se za razne vizualne efekte te obradu modela za 3D printanje, slika 3.



Slika 3 - Sučelje programa Blender.

Program je nastao 1994. godine, ali tijekom godina razvijeno je puno novih verzija. Primjena ovog programa u istraživanju bila je usmjerena na uklanjanje pogrešaka nastalih prilikom pretvaranja modela iz CT-a u 3D Slicer-u. Program posjeduje i funkciju *SMOOTH* koja omogućuje izradu glatkih površina što je neophodno u daljnjoj obradi zapisa i realnijeg prikaza površina kosti koljena[15].

Za izradu konačnog modela kosti koljena korišten je Meshmixer, slika 4.



Slika 4 - Sučelje programa Meshmixer.

Meshmixer je dio programa Autodesk koji se koristi za izradu, modifikaciju te popravljjanje .stl datoteka. Pomoću Meshmixer-a 3D model kosti koljena je razdvojen na bedrenu i goljeničnu kost te je uklonjen iver kako bi se smanjila veličina datoteke [16].

Nakon izrada modela kostiju korišten je CAD softver Creo Parametric za izradu 3D modela proteze prema obliku i dimenzijama kosti koljena. Definirana je površina kosti na kojoj će se nalaziti proteza te je ta površina izrezana iz cijelog volumena. Nakon izrezivanja, modelirana je površina implantata zadebljana za debljinu hrskavice, kako bi kontaktna, klizna površina bila na točnom mjestu. Potom je određena razina resekcije kosti na kojoj će biti fiksiran implantat. Nakon definiranja praznog prostora između klizne površine i odrezane kosti, ispunjen je prostor sačastom strukturom koja je spajanjem s kliznom površinom kreirala 3D model personaliziranog implantata.

3.4 Izrada modela

Nakon računalne izrade, 3D modeli se printaju nekom od aditivnih tehnologija. Tehnologija 3D ispisa također omogućuje stvaranje predmeta direktno iz računalnog 3D modela napravljenog u jednom od CAD programa[17]. Baza 3D printanja je .stl datoteka.

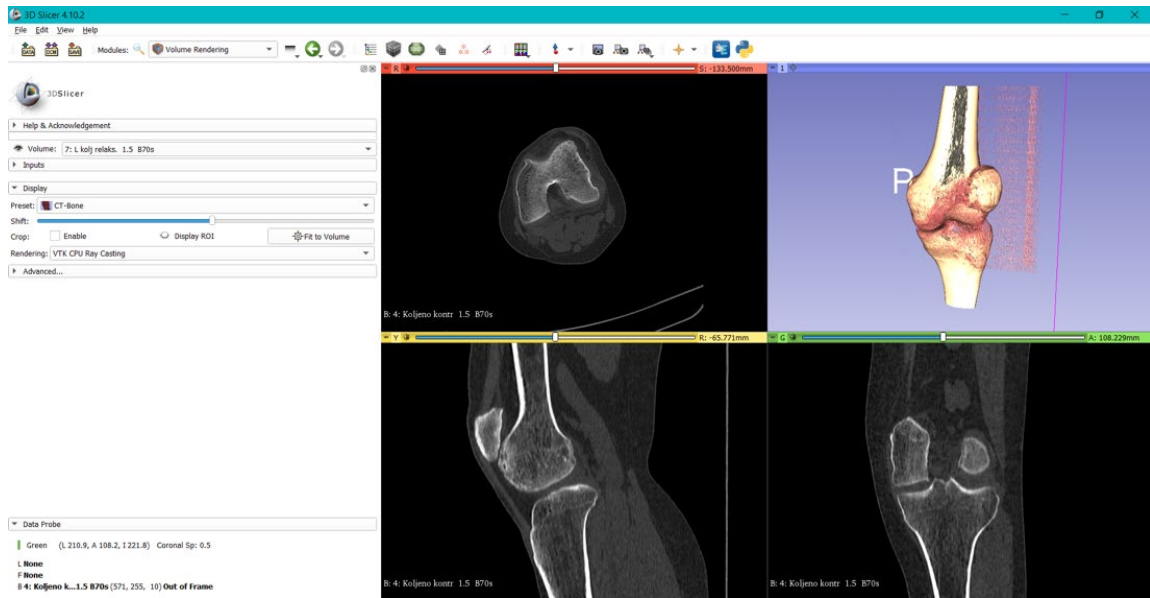
Kako bi se isprintao neki 3D model putem 3D printera bilo da je odabrana FDM/FFF tehnologija 3D printanja, DLP, SLA, SLS ili neki drugi način printanja potrebno je formirati 3D model koji se nalazi u .stl formatu.

Programi poput 3D Slicera, Blendera i Meshmixera omogućavaju 3D printeru da definira glavne parametre poput visine sloja, orijentacije i slično.

4. Rezultati

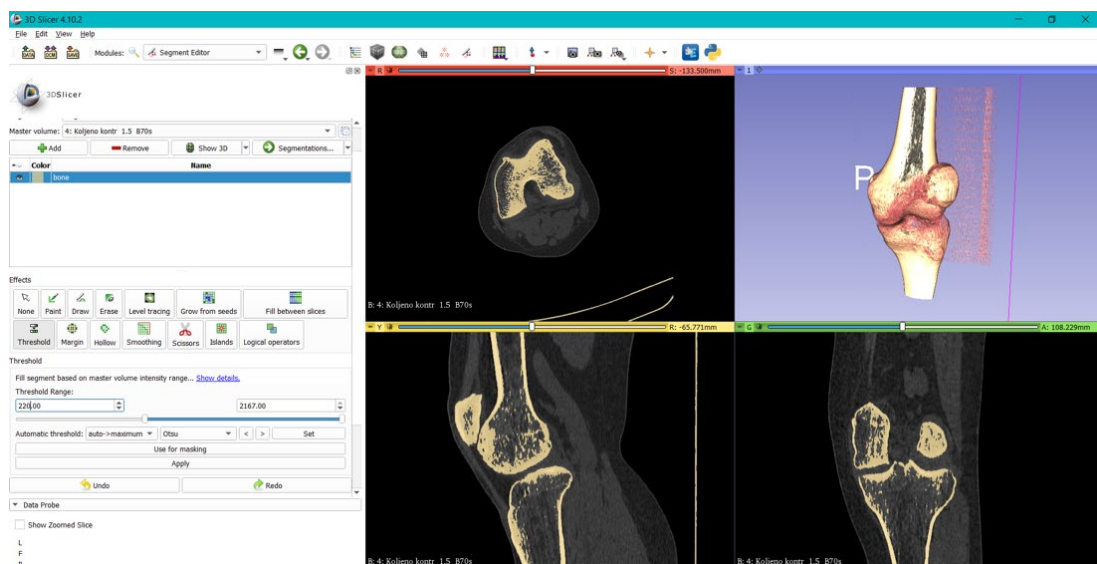
4.1 3D model kosti koljena

Prvi korak u razvoju proteze bila je izrada virtualnog 3D modela kosti koljena iz DICOM zapisa CT-a. Za to je korišten program 3D Slicer pomoću kojeg je otvoren CT bolesnika, slika 5.



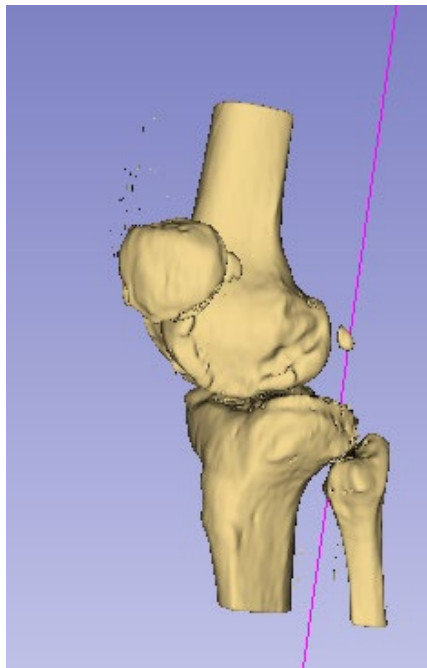
Slika 5 - CT bolesnika otvoren u programu 3D Slicer.

Primjenom funkcije THRESHOLD odvojeno je tvrdo koštano tkivo od mekog, slika 6.



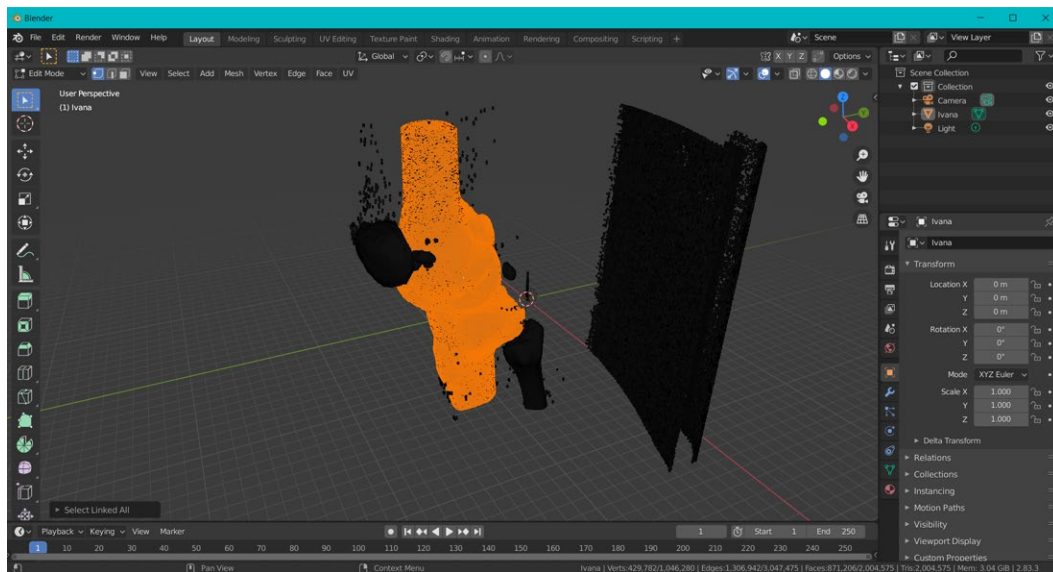
Slika 6 - Funkcija THRESHOLD s prikazom koštanog tkiva.

Na slici 7 prikazan je konačni 3D model kosti koljena dobiven pomoću 3D Slicer programa.

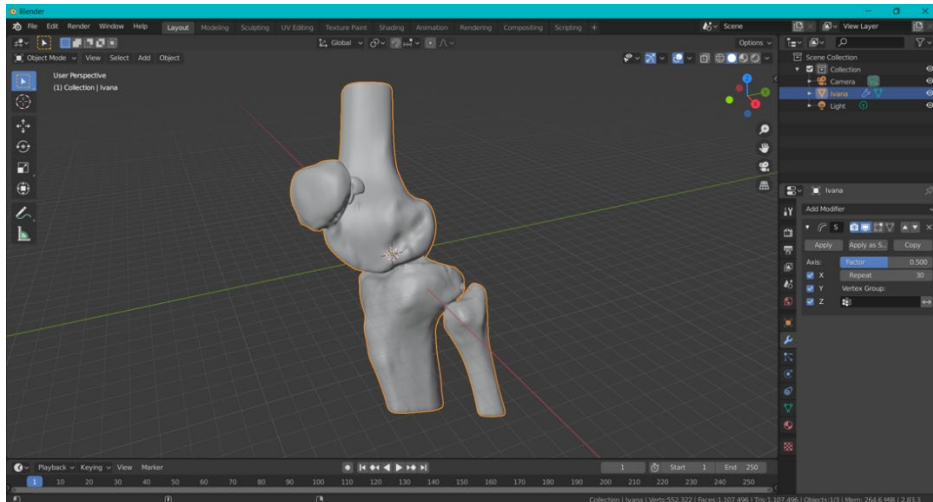


Slika 7 - Uvećani 3D model koštanoga tkiva koljena.

Na uvećanom modelu vidljive su greške kao posljedica razlike u razini osvjetljenja zapisa CT-a, a koje se ne mogu ukloniti 3D Slicer programom. Stoga je taj 3D model spremljen u .stl formatu i zatim je ta datoteka obrađena u programu Blender. Taj se program koristio za eliminaciju grašaka na površini, a ujedno i zaglađenje same površine kostiju. Na slici 8 prikazana je funkcija uklanjanja grešaka na površini, a na slici 9 funkcija zaglađivanja površine kostiju.



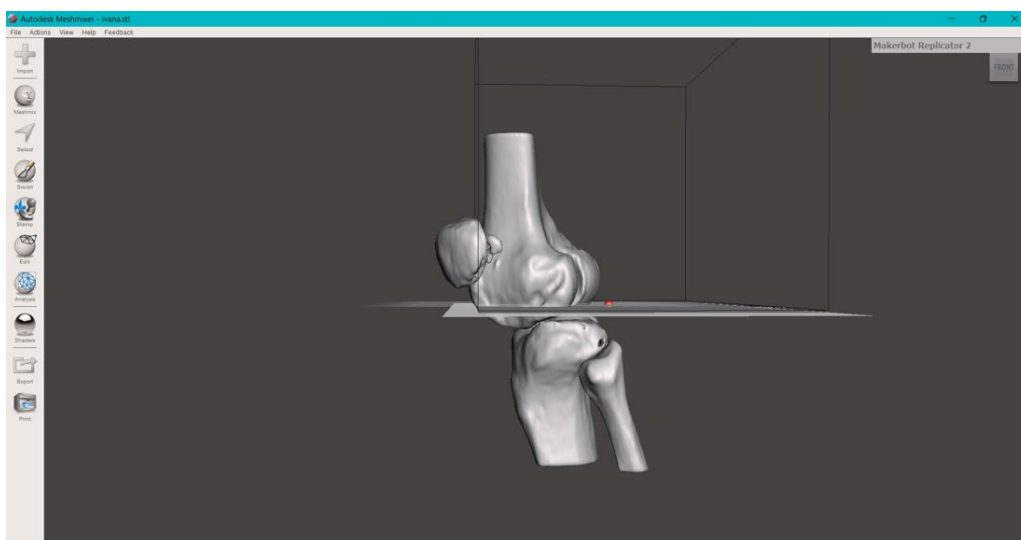
Slika 8 - Eliminiranje grešaka u programu Blender.



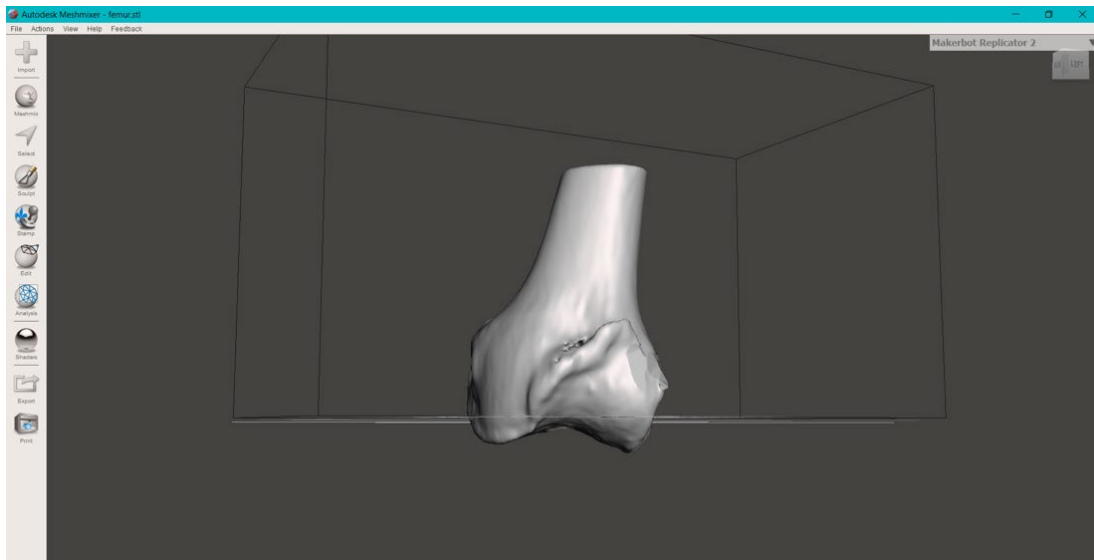
Slika 9 - Zaglađivanje površine u programu Blender.

Kao konačni rezultat obrade informacija u programu Blender dobiven je virtualni 3D model kosti koljena konkretnoga bolesnika. Za dizajniranje personalizirane PEP koljena taj model ima niz informacija koje nisu relevantne i koje je potrebno ukloniti. U prvom redu to se odnosi na iver koji nema ulogu u razvoju ovog koncepta i potrebno je izbrisati ga. Isto tako, radi lakšega postupka dizajniranja potrebno je razdvojiti bedrenu i goljeničnu kost i staviti ih u dvije zasebne .stl datoteke. To je sve napravljeno pomoću programa Meshmixer. Dodatno, ovim pristupom se značajno smanjuju veličine datoteka a time smanjuje opterećenje računala i ubrzava rad u CAD programima[19].

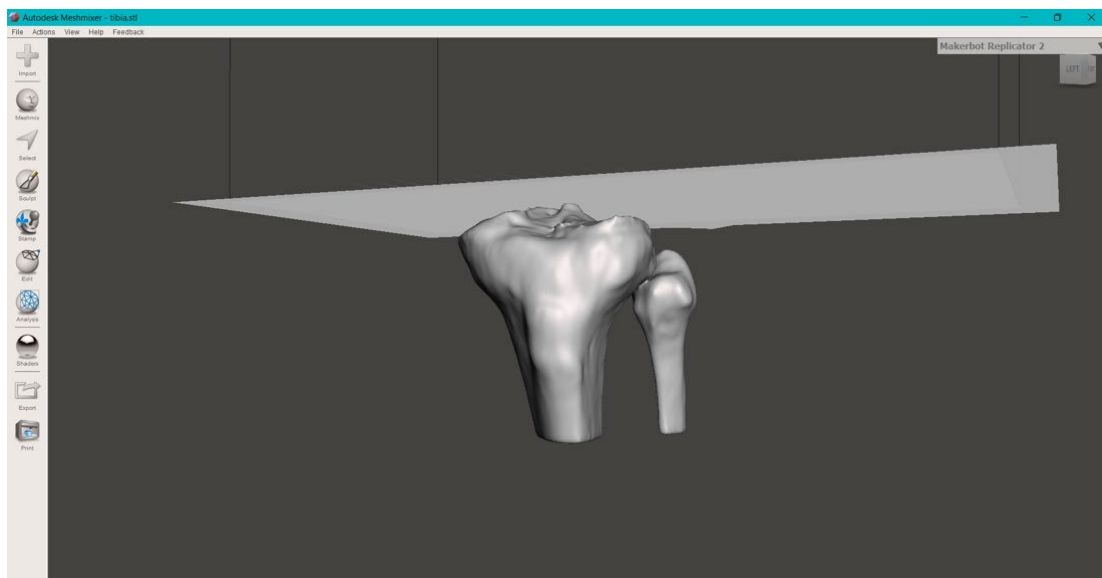
Na slikama 10-12 prikazane su kosti koljena te razdvojene bedrena i goljenična kost.



Slika 10 - Prikaz koljena u programu Meshmixer.



Slika 11 - Prikaz bedrene kosti nakon razdvajanja u zasebnu datoteku.



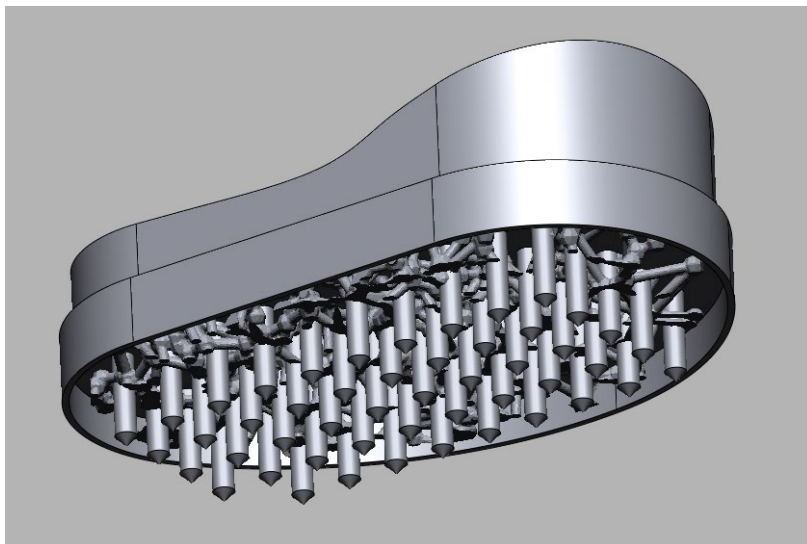
Slika 12 - Prikaz goljenične kosti nakon razdvajanja u zasebnu datoteku.

4.2 Izrada dizajna sačaste personalizirane PEP koljena

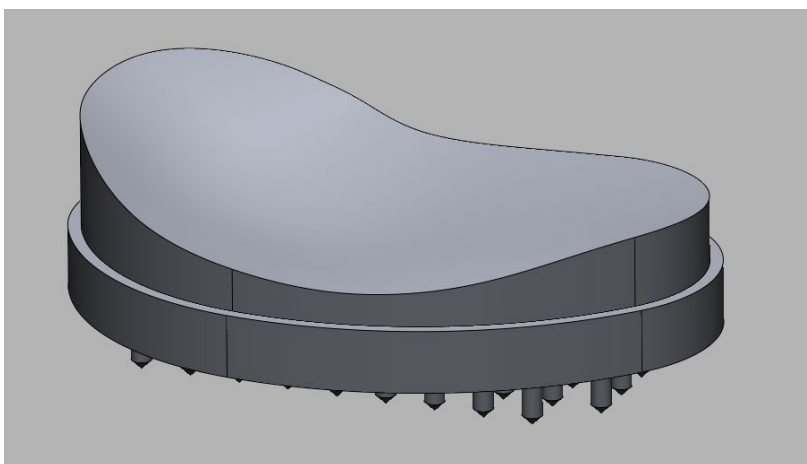
Prilikom dizajna personalizirane PEP koljena zadržan je koncept pri kojemu proteza ima dva dijela: bedreni i goljenični. Klizni dio bedrenog i goljeničnog dijela je gladak kako bi imao što manji faktor trenja i lakše klizio po suprotnoj površini. Površine implantata koje naliježu na kosti imaju sačastu strukturu u kojoj su umetnuti šiljci koji omogućuju navođenje proteze na točno definirano mjesto, a istovremeno ostvaruju njenu primarnu fiksaciju, dok je sačasta struktura konstruirana radi osteokondukcije, odnosno u svrhu urastanja kosti u materijal kao sekundarna fiksacija.

Koristeći CAD program Creo Parametric dizajnirani su glavni dijelovi personalizirane PEP koljena: goljenični i bedreni dio.

Na slici 13 i 14 prikazan je prijedlog dizajna goljeničnoga dijela. Jasno je vidljiva glatka klizna površina s gornje strane proteze te sačasta struktura sa šiljcima za primarnu fiksaciju s donje strane.

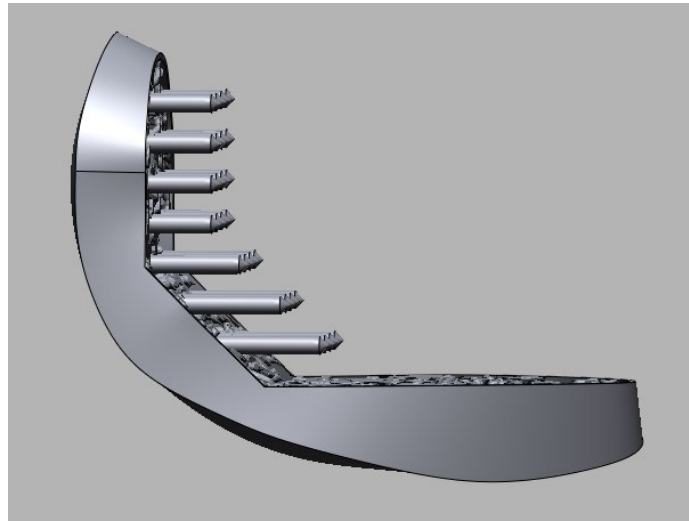


Slika 13 - Goljenični dio proteze s donje strane.

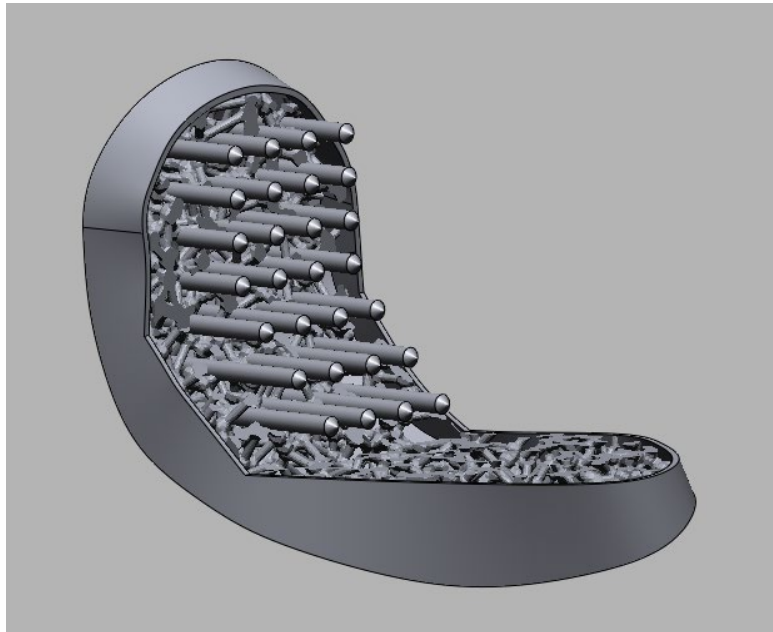


Slika 14 - Goljenični dio proteze s gornje strane.

Koncept bedrenog dijela PEP koljena prikazan je na slikama 15 i 16.

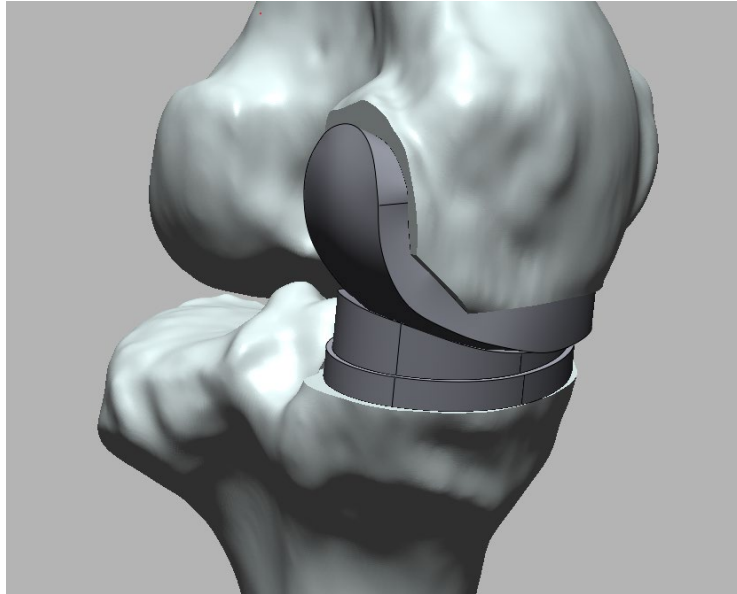


Slika 15 - Bedreni dio proteze s bočne strane.



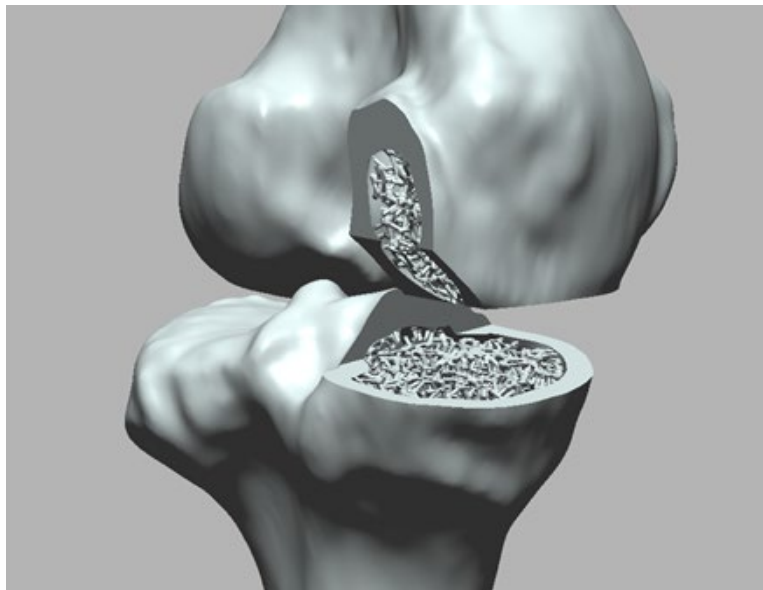
Slika 16 - Bedreni dio proteze sa stražnje strane.

Oblik i dimenzije vanjske, klizne površine bedrenog dijela PEP koljena napravljeni su prema izvornom obliku kosti bolesnika dobivenom obradom slike s CT-a. Taj oblik prati i rekonstruira izvornu anatomiju koljena i vjerno zamjenjuje njegov oštećeni dio, slika 17. Pretpostavlja se da će oporavak bolesnika, odnosno njegovo privikavanje na protezu biti znatno kraće, a funkcionalnost potpunija.



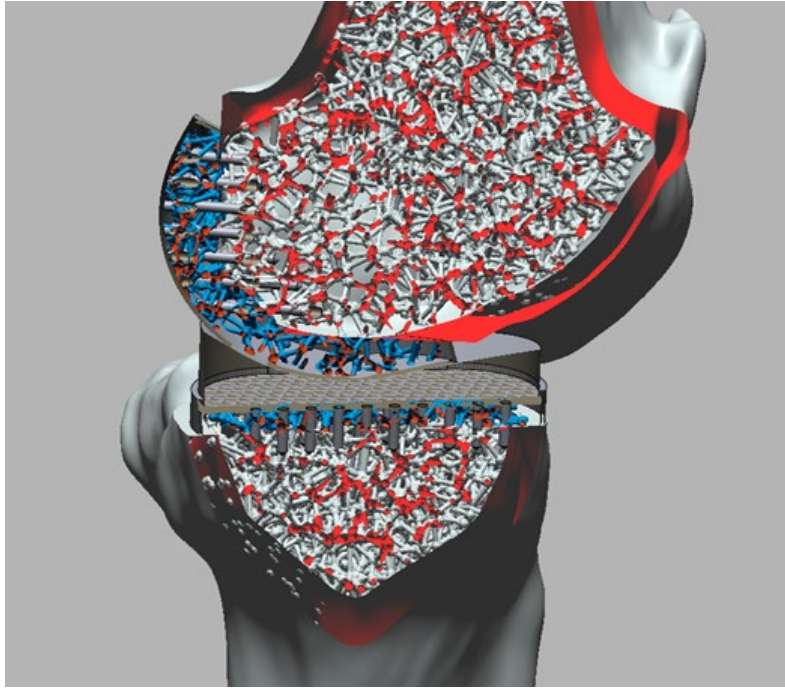
Slika 17 - Prikaz postavljene proteze na koljeno.

Kako bi se to ilustriralo, dobiveni 3D model kosti je softverski ispunjen trabekularnom strukturom, što je prikazano na izrezanom modelu koljena na slici 18.



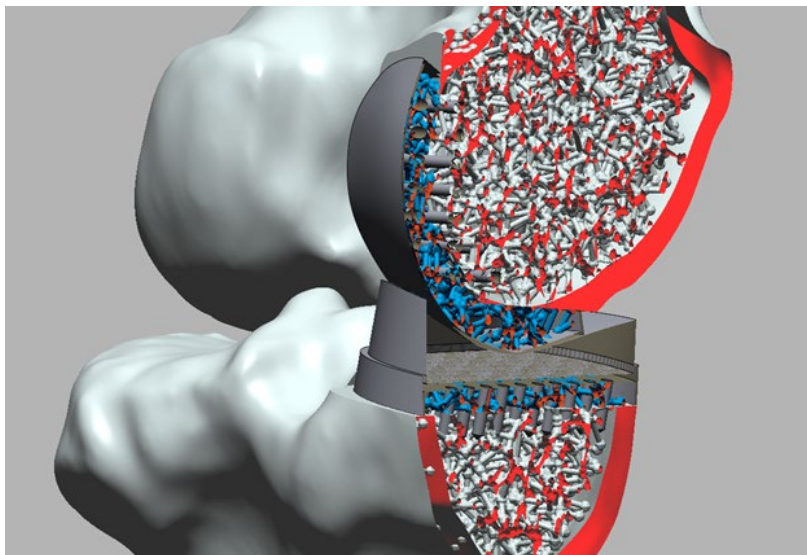
Slika 18 - Prikaz izrezanog dijela koljena na koje se stavlja proteza.

Kao što je navedeno, primjenom ovog koncepta postiže se sekundarna fiksacija proteze kroz urastanje kosti u saće proteze. Taj proces je prikazana na slikama 19 i 20 gdje je vidljiva trabekularna struktura kosti, sačasta struktura PEP-e i njihova interakcija. Strukture su dobivene korištenjem Voronoi dijagrama, njime se određen broj točaka u prostoru spaja nasumičnim vezama.



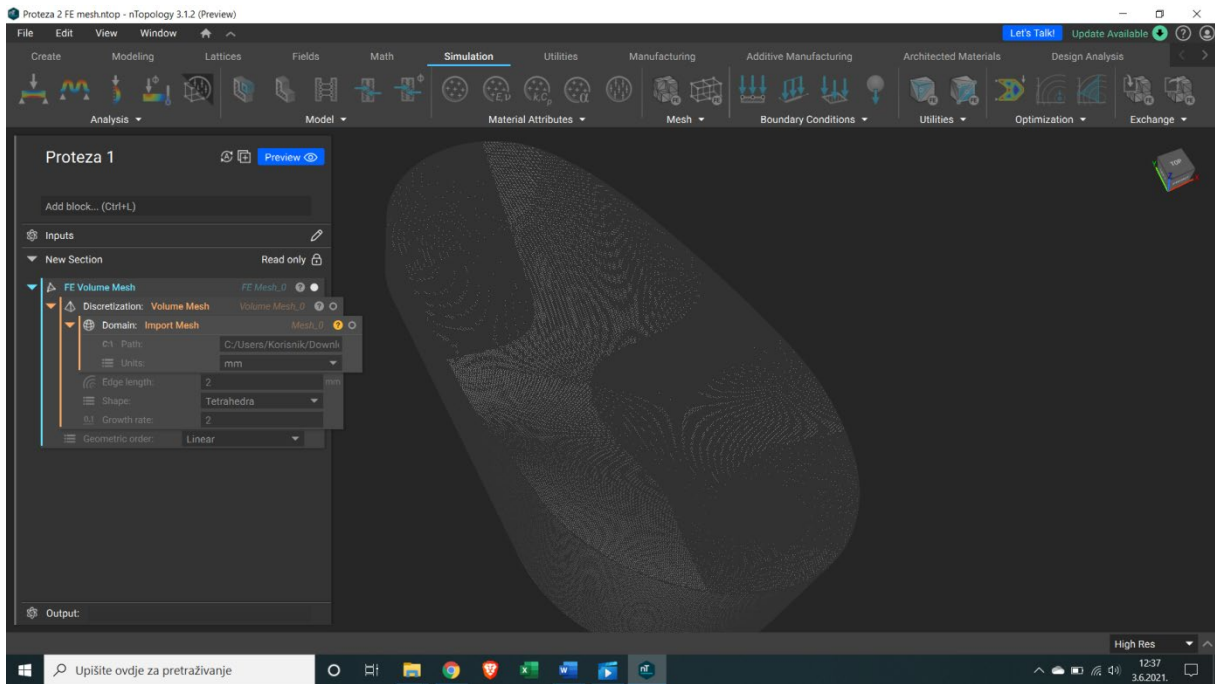
Slika 19 - Bočni prikaz unutarnje strukture proteze i koljena.

Crvena boja označava nativnu trabekularnu kost, dok plava boja označava kost koja urasta u saćastu strukturu endoproteze u smislu sekundarne stabilnosti implantata.



Slika 20 - Prikaz s prednje strane unutarnje strukture proteze i koljena.

Na slici 21 je napravljen „volume mesh“ model dijela proteze u svrhu kasnije numeričke analize, bilo to preko konačnih volumena ili elemenata.



Slika 21. Pripremljeni dio proteze za numeričku analizu u programu nTopology

Naposljetku, 3D model koljena te PEP su isprintani od polimera što je vidljivo na slikama 22 i 23. Sami isprintani modeli služe samo kao vizualni pokazatelj veličine i oblika zahvaćenog dijela koljena te same proteze i njene strukture koja ide na taj dio. Sam implantat bi u stvarnosti trebao biti izrađen od nekog biokompatibilnog materijala koji se danas koriste u operacijama.



Slika 22. Isprintana oba dijela koljena te rastavljena PEP.



Slika 23. Isprintana oba dijela koljena te sklopljena PEP.

5. Rasprava

Ugradnja totalne endoproteze koljena (TEP) je zahvat kod kojeg je uspješnost u vidu preživljenja komponenata i zadovoljstva bolesnika znatno manja nego nakon ugradnje totalne endoproteze kuka. Svega 80 % bolesnika s ugrađenom TEP koljena ima dobre ili odlične rezultate, dok je 20 % bolesnika nezadovoljno zahvatom. Razlog tome je vjerojatno taj što se kod ugradnje TEP koljena mijenjaju odnosi ugrađenih komponenti u usporedbi s anatomskim zglobnim plohama prije zahvata, čime se mijenja anatomija i prirodna biomehanika koljena. Iz tog se razloga prije 40 godina počeo razvijati koncept parcijalne endoproteze koljena (PEP), s ciljem da se ne zamjenjuje cijelo koljeno nego samo onaj dio koji je oštećen i to tako da se zamjenom oštećenih ploha umjetnim materijalima rekonstruira normalna anatomija koljena. To je svakako manji zahvat za bolesnika, a zahvatom se postiže veća podudarnost prirodnoj anatomiji koljena te je oporavak nakon takve operacije brži i uspješniji. No, koljeno je nekongruentan zglob, a zakrivljenost bedrene i goljenične komponente od PEP dodatno naglašava tu nekongruenciju zbog izraženog nepodudaranja zakrivljenosti bedrene i goljenične plohe[20]. Loša podudarnost dovodi do jakih sila koje utječu na bedrenu i goljeničnu komponentu te tako sudjeluju u razvoju nestabilnosti zgloba i labavljenja endoproteze što uzrokuje bol te u konačnici ranije revizije i manju uspješnost same

operacije[21]. Dizajniranje personalizirane PEP koljena u ovom radu je kao cilj imalo otkloniti probleme komercijalnih parcijalnih proteza uvođenjem novih metoda obrade informacija CT nalaza bolesnika i konstrukcijom endoproteze koja bi u potpunosti pratila svu individualnu anatomiju osobe kojoj se PEP koljena ugrađuje. U tu svrhu su korišteni dostupni računalni programi. U ovom radu modelirana je proteza za medijalni kondil bedrene kosti i odgovarajući dio proksimalnoga dijela goljenične kosti, no princip koji je korišten može se primijeniti i na lateralni dio koljena što ga čini univerzalno individualno primjenjivim.

Složenost zglobnih tijela koljena predstavlja problem pri određivanju adekvatne endoproteze, a nepostojanje suvremenih metoda modeliranja rezultiralo je pronalaženjem načina na koji bi se koljena sličnih dimenzija grupirala pod jednom protezom. Mjerenjem i matematičkim analizama rendgenskih snimaka koljena sedamdesetih godina prošlog stoljeća određene su četiri grupe prema kojima su proizvođene proteze[22]. Iako je dizajn endoproteza napredovao do današnjeg dana, zadržana je podjela na četiri veličine. Jasan problem ovako grube diobe ilustrira činjenica o nepodudarnosti između bolesnika npr. azijskog porijekla, koji prosječno imaju manja zglobna tijela od populacije “zapadnog svijeta” i dostupnih komercijalnih proteza koje su modelirane prema zapadnoeuropskim koljenima[23]. Iz tog razloga konceptom kojeg smo razvili u ovom radu izbjegli bi se svi navedeni problemi. Medijalni kondil sastoji se od ekstenzijske (veće i prednje) i fleksijske (manje i stražnje) fasete, dok je izgled lateralnog kondila drugačiji uz uvijek prisutnu fleksijsku i varijabilnu manju ekstenzijsku fasetu[24]. Plato goljenične kosti medijalno je definiran dvjema plohama pod kutom koje dolaze u doticaj s dvjema fasetama kondila, dok je lateralno sačinjen od jedne uniformne plohe[24]. Sukladno ovakvom definiranju zglobnih tijela razvijena su dva danas najrasprostranjenija modela endoproteze: one sačinjene od jednog i one od dva radijusa [5]. Neka istraživanja pokazuju kako su implantati s jednim radijusom stabilniji i omogućavaju veći opseg kretanja (range of motion)[25], dok druga tvrde kako ni jedan model nema prednosti u odnosu na drugi[26]. No, niti jedan od navedenih modela ne prati u potpunosti anatomiju koljena osobe kojoj se PEP ugrađuje, čime je prirodna biomehanika koljena kompromitirana.

Aseptičko olabavljenje i kontralateralni osteoartritis glavni su razlozi neuspjeha parcijalnih endoproteza unutar deset godina nakon operacije. Istraživanje koje su proveli Citaketal. ukazuje na kontralateralni osteoartritis kao glavni razlog neuspjeha s udjelom od 44% od ukupnog broja neuspjeha[27], dok istraživanje Epinetteetal. zaključuje kako je glavni razlog olabavljenje s 45% od ukupnog broja neuspjeha[28].

Personalizirana endoproteza koljena modelirana na način koji predlaže ovo istraživanje bi otklonila brojne od navedenih problema. Podudarnost dobivene proteze s koljenom bolesnika je maksimalna jer se ona modelira direktno s 3D zapisa dobivenog iz CT-a. Drugim riječima, prostor za grešku sveden je na minimum jer se mjerenje, definiranje zakrivljenosti zglobnih ploha i dodirne površine otklonilo iz procesa stvaranja proteze. U literaturi dostupna ranija istraživanja pokazuju kako personalizirani implantati, uz uklanjanje kritičnih dizajnerskih problema komercijalnih proteza, omogućavaju očuvanje većeg dijela distalne bedrene kosti, maksimalnu pokrivenost platoa goljenične kosti, obnavljanje normalne osi donjeg uda i sprječavanje neadekvatnog pozicioniranja proteze u koljenu[20, 29]. Način fiksacije proteze (press and fit bez cementa) omogućava adekvatnu primarnu fiksaciju i sekundarno urastanje kosti u protezu (osteokondukcija) [30]. Također se minimizira količina metalnih komponenti potrebnih za fiksaciju, čije je pucanje odgovorno za gotovo 5 % neuspjelih parcijalnih endoproteza[31]. Jedna od glavnih stavki ovog projekta je bila konstruirati sačastu strukturu na dijelu proteze koji se fiksira u kost, ali i na dijelu proteze koji leži iznad reseciranog ležišta kosti za endoprotezu. Time se dobila manja debljina umjetne zglobne površine, a u cijelu strukturu endoproteze bi urasla kost i time bi se dobila veća koštana masa u usporedbi s današnjim konceptima. Tako bi se postigla manja invazivnost ovog zahvata, no i dodatno lakša potencijalna revizija kojom bi se izbjegla ugradnja tzv. revizijskih implantata, i omogućila ugradnja manje invazivnih implantata u takvom revizijskom postupku. Naime očekuje se da takva sačasta struktura imitira trabekularnu strukturu kosti i omogućuje osteokondukciju, tj. brzo i jednostavno urastanje kosti u protezu čime se ostvaruje bolja sekundarna stabilnost. Algoritmi za generiranje mrežaste strukture implantata i trabekularnu ispunu kosti su isti. Prioritet je bio u što točnijoj simulaciji organske strukture kosti (a parametri koji su smatrani važnim su omjer punog i praznog prostora, sama geometrija tj. oblik strukture, odsustvo kliznih ravnina) te postizanje strukture s izomorfijom mehaničkih svojstava. Uzevši te parametre u obzir, zaključak je da bi optimalno rješenje bilo korištenje stohastičkog Voronoi dijagrama koji zadovoljava sve uvjete. Tim algoritmom je dobiven 3D model kosti i dio implantata s rupičastom strukturom. Time je po prvi puta učinjena 3D konstrukcija koja bi omogućila novourasloj kosti trabekularnu strukturu sposobnu da podnese sva opterećenja dnevne aktivnosti osobe kojoj je ovakav implantat ugrađen. No, najbitnija stavka u razvoju ovog koncepta, koji ima potencijal promjene paradigme ugradnje PEP koljena, je da tim načinom kost urasta iznad razine gdje je ona resecirana te tako omogućuje obnavljanje koštane mase i posljedično lakšu potencijalnu ugradnju nove proteze nakon određenog broja godina.

Kliničko značenje ovog istraživanja je veliko, jer otvara brojne mogućnosti za daljnji napredak u ovom polju. Stvaranje 3D modela koljena iz CT zapisa omogućava izradu jednokratnih operacijskih instrumenata i vodiča što smanjuje broj potrebnih instrumenata, mogućnost infekcije i invazivnost operacije[32]. Također, kompjutersko se vizualiziranje zgloba i postupak modeliranja implantata mogu primijeniti na druge zglobove ljudskoga tijela poput kuka i gležnja. Nadalje, sačasta struktura proteze omogućava urastanje kosti u tu strukturu postupkom osteokondukcije te iz tog razloga zglobna površina implantata može biti znatno tanja nego što je trenutni standard, što čini postupak ugradnje revizijske endoproteze jednostavnijim i smanjuje invazivnost zahvata. Nedostatak ovog istraživanja je da je ova studija potvrdila samo virtualni koncept te se učinkovitost ovog koncepta tek treba dokazati na kliničkoj studiji.

6. Zaključak

Današnji standardi dizajna endoproteza koljena ne prate individualnu anatomiju niti biomehaniku koljena, iako je dizajn PEP koljena znatno bliži tom konceptu nego TEP koljena. Ovo istraživanje je pokazalo da je korištenjem komercijalnih računalnih programa i dostupnih aditivnih tehnologija moguće dizajnirati individualiziranu PEP koljena za svaku osobu. Također, prikazani koncept 3D modeliranja i korištenja suvremenih računalnih programa i aditivnih tehnologija omogućuje potpuno novu strukturu dijela PEP u koju urasta kost čime se u odnosu na postojeće proteze, ostvaruje bolja primarna i sekundarna fiksacija, a istovremeno je zglobna površina implantata znatno tanja i čuva postojeću koštanu masu. Time se omogućuje da operativni zahvat bude puno precizniji, manje invazivan i kraćeg trajanja, što ovom originalnom konceptu otvara mogućnost duljeg vijeka trajanja implantata i lakši revizijski zahvat ako do njega dođe.

7. Zahvale

Posebnu zahvalu dugujemo mentorima prof.dr.sc. Zdravku Schauperlu te prof.dr.sc. Mislavu Jeliću na savjetima, motivaciji i entuzijazmu.

Također veliko hvala kolegama iz tvrtke IZIT d.o.o: direktoru dipl.ing. Amiru Šećerkadiću, te Marku Periću, mag.ing.mech. i Frani Bari, studentu RITEH-a. Bez njihove pomoći i truda izrada ovog rada ne bi bila moguća.

8. Literatura

- [1] Aumüller G, Aust G, Engele J i sur. Anatomie. 3. izd. Stuttgart: Thieme; 2014, str. 364.
- [2] Platzer W. Locomotor system. 10. izd. Stuttgart: Thieme; 2015, str. 212.
- [3] Hussain S, Neilly D, Baliga S, Patil S, Meek R. Kneeosteoarthritis: a review of management options. *Scottish Medical Journal*. 2016;61(1):7-16.
- [4] Vrste endoproteza - Specijalna bolnica za ortopediju Dr. Nemec (Internet). *Bolnica-nemec.hr*. 2020 (pristupljeno 2020 Aug 24). Dostupno na: http://www.bolnica-nemec.hr/hr/vrste_endoproteza/41/11
- [5] Li X, Wang C, Guo Y, Chen W. An Approach to Developing Customized Total Knee Replacement Implants. *Journal of Healthcare Engineering*. 2017;2017:1-8.
- [6] Dosezi u zamjeni zgloba kuka - Specijalna bolnica Akromion (Internet). *Akromion*. 2020 (pristupljeno 2020 Aug 24). Dostupno na: <https://www.akromion.hr/usluge/ortopedija/kuk/dosezi-u-zamjeni-zgloba-kuka/>
- [7] Junqueira L, Carneiro J. *Osnove histologije*. 10 izd. Zagreb: Školska knjiga; 2005, str. 152.
- [8] HotkoCernić K. 3D printanje (Internet). Karlovac; Veleučilište u Karlovcu, Strojarski odjel; 2018. (pristupljeno 2020 Aug 14) Dostupno na: <https://zir.nsk.hr/islandora/object/vuka%3A1134/datastream/PDF/view>
- [9] Budimir I. 3D printeri (Internet). Rijeka; Sveučilište u Rijeci, Filozofski fakultet u Rijeci; 2015. (pristupljeno 2020 Aug 14) Dostupno na: <https://repository.ffri.uniri.hr/en/islandora/object/ffri%3A785/datastream/PDF/view>
- [10] Leko H. 3D pisaiči (Internet). Zagreb; Sveučilište u Zagrebu, Grafičkifakultet; 2015. (pristupljeno 2020 Aug 24) Dostupno na: https://eprints.grf.unizg.hr/2239/1/Z576_Leko_Helena.pdf
- [11] Što je FDM/FFF? — 3DGlobe (Internet). 3DGlobe. 2020 (pristupljeno 2020 Aug 24). Dostupno na: <https://www.3dglobe.net/fdmfff>
- [12] Šta je stereolitografija - 3D REPUBLIKA (Internet). 3D Republika. 2020 (pristupljeno 2020 Aug 24). Dostupno na: <https://www.3drepublika.com/sta-je-stereolitografija/>
- [13] LOM (Laminated Object Manufacturing): 3D PrintingwithLayersofPaper (Internet). *Sculpteo*. 2020 (pristupljeno 2020 Aug 24). Dostupno na: <https://www.sculpteo.com/en/glossary/lom-definition/>
- [14] 3DSlicer (Internet). *En.wikipedia.org*. 2020 (pristupljeno 2020 Aug 24). Dostupno na: <https://en.wikipedia.org/wiki/3DSlicer>

- [15] Blender (softver) (Internet). Bs.wikipedia.org. 2020 (pristupljeno 2020 Aug 24). Dostupno na: [https://bs.wikipedia.org/wiki/Blender_\(softver\)](https://bs.wikipedia.org/wiki/Blender_(softver))
- [16] Meshmixer: 3D Modeling Software 3D Printing(Internet). Sculpteo. 2020 (pristupljeno 2020 Aug 24). Dostupno na: <https://www.sculpteo.com/en/glossary/meshmixer-definition/>
- [17] Kunc P. 3D model u .stl formatu je preduvjet 3D printanja - 3DPrintaj (Internet). 3DPrintaj. 2020 (pristupljeno 2020 Aug 24). Dostupno na: <https://www.3dprintaj.com/3d-model-u-stl-formatu-je-preduvjet-3d-printanja/>
- [18] Moser N, Santander P, Quast A. From 3D imaging to 3D printing indentistry - a practical guide. *International Journal of Computerized Dentistry*.2018;21(4):345-356.
- [19] Babić B, Jovanovac T, Jurec Z, Kerec M, Leko H, Radas P. Individualizirana biorazgradiva mrežica za agumentaciju alveolarnog koštanog nastavka (Internet). Zagreb; Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Stomatološki fakultet; 2016. (pristupljeno 2020 Aug 24)Dostupno na: <https://zir.nsk.hr/islandora/object/ffri:785>
- [20] Johal S, Nakano N, Baxter M, Hujazi I, Pandit H, Khanduja V. Unicompartmental Knee Arthroplasty: The Past, Current Controversies, and Future Perspectives. *The Journal of Knee Surgery*. 2018;31(10):992-998.
- [21] Bergeson A, Berend K, Lombardi A, Hurst J, Morris M, Sneller M. Medial Mobile Bearing Unicompartmental Knee Arthroplasty. *The Journal of Arthroplasty*. 2013;28(9):172-175.
- [22] Seedhom B, Longton E, Wright V, Dowson D. Dimensions of the knee. Radiographic and autopsy study of sizes required by a knee prosthesis. *Annals of the Rheumatic Diseases*. 1972;31(1):54-58.
- [23] Shah D, Ghyan R, Ravi B, Hegde C, Shetty V. Morphological Measurements of Knee Joints in Indian Population: Comparison to Current Knee Prostheses. *Open Journal of Rheumatology and Autoimmune Diseases*. 2014;04(02):75-85.
- [24] Iwaki H, Pinskerova V, Freeman M. Tibio femoral movement 1: the shapes and relative movements of the femur and tibia in the unloaded cadaver knee. *The Journal of Bone and Joint Surgery British volume*. 2000;82-B(8):1189-1195.
- [25] Li M, Deng Z, Jiang H, Ma Y, Liao J, Zheng Q. Single radius versus multiple radius femoral prostheses in total knee arthroplasty: a meta-analysis. *International journal of clinical and experimental medicine*. 2019;12(8):9508-9521.

- [26] Liu S, Long H, Zhang Y, Ma B, Li Z. Meta-Analysis of Outcomes of a Single-Radius Versus Multi-Radius Femoral Design in Total Knee Arthroplasty. *The Journal of Arthroplasty*. 2016;31(3):646-654.
- [27] Citak M, Dersch K, Kamath A, Haasper C, Gehrke T, Kendoff D. Common causes of failed unicompartmental knee arthroplasty: a single-centre analysis of four hundred and seventy one cases. *International Orthopaedics*. 2014;38(5):961-965.
- [28] Epinette J, Brunschweiler B, Mertl P, Mole D, Cazenave A. Unicompartmental knee arthroplasty modes off ailure: Wear is not the main reason for failure: A multi centre study of 418 failed knees. *Orthopaedics&Traumatology: Surgery& Research*. 2012;98(6):S124-S130.
- [29] Carpenter D, Holmberg R, Quartulli M, Barnes C. Tibial Plateau Coveragein UKA: A Comparison of Patient Specific and Off-The-Shelf Implants. *The Journal of Arthroplasty*. 2014;29(9):1694-1698.
- [30] Ihekweazu U, Weitzler L, Wright T, Padgett D. Distribution of Bone Ongrowth in Metaphyseal Sleeves for Revision Total Knee Arthroplasty: A Retrieval Analysis. *The Journal of Arthroplasty*. 2019;34(4):760-765.
- [31] Manzotti A, Chemello C, Pullen C, Cerveri P, Confalonieri N. An uncommon cause of cemented unicompartmental knee arthroplasty failure: fractureofmetalliccomponents. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 2012;21(11):2518-2522.
- [32] Johnson A, Issa K, Pivec R i sur. Single-Use Instrumentation, Cutting Blocks, and Trials DecreaseContamination during Total Knee Arthroplasty: A Prospective Comparison of Navigated and Nonnavigated Cases. *Journal of Knee Surgery*. 2013;26(04):285-290.

8. Sažetak

Individualizirana 3-D printana endoproteza koljena

Matej Antonio Bajić, Marko Gregurić, univ. bacc. ing. mech,
Matija Duda, Dinko Ezgeta, Petra Nikšić

Osteoartritis koljena je degenerativna bolest koja rezultira gubitkom funkcije zgloba uz izražene bolove i smanjenu pokretljivost. Parcijalna endoproteza koljena (PEP) jedan je od terapijskih pristupa u liječenju ove bolesti kojom se uspješno rekonstituiraju anatomija koljena i bolje je rješenje od ugradnje totalne endoproteze koljena. Bolesnici imaju veći opseg pokreta, manje tegoba, prirodniji osjećaj u koljenu i bolju kvalitetu života.

U ovom je radu prikazan koncept razvoja personalizirane PEP koljena koja je svojim oblikom, dimenzijama i konstrukcijom prilagođena prirodnoj anatomiji bolesnika. U tu su svrhu korišteni programski alati pomoću kojih je iz CT zapisa osobe, koju se testira, izrađen 3D model koljena kao osnova za razvoj proteze. U predloženom je konceptu primijenjen inovativan način fiksacije endoproteze za kost, pri čemu je korištena sačasta struktura s otvorenim ćelijama. Osim boljeg urastanja i povezanosti kosti i proteze procesom osteokondukcije, ovaj koncept omogućuje i znatno manju resekciju koštanog ležišta endoproteze prilikom revizije.

Tijekom razvoja predložene PEP koljena posebna je pažnja bila usmjerena tome da model bude prilagođen i da ga je moguće izraditi nekim od postupaka aditivnih tehnologija (3D printanja). Time se otvaraju nove mogućnosti na području personalizirane medicine u ortopediji s ciljem smanjenja invazivnosti zahvata, produljenja vijeka trajanja implantata te povećanog zadovoljstva bolesnika.

Ključne riječi: 3D printanje, individualizirana endoproteza, osteoartritis koljena, parcijalna endoproteza koljena, sačasta struktura

9. Summary

3D printed personalized partial knee Endoprosthesis

Matej Antonio Bajić, Marko Gregurić, univ. bacc. ing. mech,
Matija Duda, Dinko Ezgeta, Petra Nikšić

Knee osteoarthritis is a degenerative disease which results in loss of joint mobility and function. Partial knee Endoprosthesis (PEP) is a type of treatment which more efficiently reconstructs the knee than total knee replacement. It also shows better healing results in patients with less pain and higher range of motion.

In this research, we have presented a new concept toward making a personalized PEP that follows the exact shape, dimensions and anatomy of every specific patient. With available software we translated the existing CT images of the specific patient and developed a 3D model of the knee, which was used as a base for the PEP construction. Furthermore, this is an innovative concept of Endoprosthesis fixation that uses the honeycomb structure with open cells. Beside sites' benefits of osteoconduction which results in stabilization of the bone and Endoprosthesis this concept also reduces the resection of the bone bearing during Endoprosthesis revision.

During the development of PEP we have focused on customizing the model for the 3D printing. This opens new possibilities in the field of personalized orthopedic sin medicine with the goal of making the operation less invasive, prolonging the expiration date of prosthesis and overall improving the quality of the patients life.

Keywords: 3D printing, individualized Endoprosthesis, knee osteoarthritis, partial knee replacement, honeycomb structure,

10. Životopisi

Matej Antonio Bajić rođen je u Zagrebu 13. lipnja 1998. godine. Redovan je student 3. godine Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Upisuje Osnovnu školu Stenjevec 2005. godine te Gimnaziju Lucijana Vranjanina 2013. godine te završava s odličnim uspjehom. Predsjednik je Udruge studenata inženjerstva materijala (SOME) od 2019.-te godine. Također je član Studentskog zbora, Povjerenstva za studijski program te Etičkog povjerenstva Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

Marko Gregurić redovni je student 4. godine diplomskog studija na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu te je rođen 09. veljače 1998. u Zagrebu. Nakon osnovne škole upisuje XV. Gimnaziju (poznatiju kao MIOC). Najmlađi je nositelj 4. Dana crnog pojasa u taekwondo-u od 2017. godine te je bio član hrvatske reprezentacije s kojom je nastupio na raznim međunarodnim natjecanjima diljem Europe te na svjetskom prvenstvu u Taipei-u 2014. godine. Također je osvojio nekoliko državnih prvenstava u juniorskoj i seniorskoj selekciji. Uz to je bio službeni trener u taekwondo klubu Jastreb za tehniku. Srednjoškolsko obrazovanje završava s odličnim uspjehom nakon kojeg upisuje Fakultet Strojarstva i Brodogradnje u Zagrebu. Završio je osnovnu glazbenu školu Vatroslav Lisinski u Zagrebu, instrument klavir. Na fakultetu se aktivno bavi studentskim zborom čiji je ujedno i tajnik od 2019. godine, a također je član studentskog vijeća. Uz to je član i odbora za kontrolu kvalitete. Također je potpredsjednik Udruge studenata inženjerstva materijala (SOME) od 2019. godine koja se bavi organizacijom raznih projekata na razini FSB-a i na sveučilišnoj razini.

Matija Duda rođen je u Zagrebu 10. travnja 2000. godine. Redovni je student 2. godine medicine na Medicinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Pohađao je Osnovnu školu Cvjetno naselje i Drugu gimnaziju u Zagrebu. Redovito je predstavljao srednju školu na županijskim natjecanjima iz biologije i kemije, a srednjoškolsko obrazovanje završio je s odličnim uspjehom. Završio je Glazbenu školu Pavla Markovca u Zagrebu na odjelu za gitaru. Aktivno se služi engleskim i njemačkim jezikom. Osvojio je treće mjesto na natjecanju English in action 2014. godine koje je organizirala Association for promotion of multimedia education (UMNA) na državnoj razini te je dobitnik Stipendije Grada Zagreba za izvrsnost 2018. godine i STEM stipendije Ministarstva znanosti i obrazovanja 2019. godine.

Dinko Ezgeta rođen je 10. travnja 1997. godine u Bjelovaru. Redovni je student 5. godine medicine. Osnovnoškolsko obrazovanje završio je u II. Osnovnoj školi Bjelovar, a srednjoškolsko u Matematičkoj gimnaziji u Bjelovaru. Tijekom pohađanja osnovne i srednje škole aktivno se bavio raznim sportovima gdje je 2015./2016. godine zastupao srednju školu na poludržavnoj završnici iz košarke. Isto tako tijekom osnovnog i srednjoškolskog obrazovanja redovito je nastupao na gradskim i županijskim natjecanjima iz fizike gdje je ostvarivao zapažene rezultate. Srednjoškolsko obrazovanje završava s odličnim uspjehom nakon čega upisuje Medicinski fakultet u Zagrebu u školskoj godini 2016./2017. godine. Na fakultetu sudjeluje u raznim izvannastavnim aktivnostima; službeni je član kirurške i patofiziološke sekcije, demonstrator na katedrama iz Imunologije i Fiziologije te Patofiziologije. Također je sudjelovao kao član organizacijskog odbora 15. i 16. kongresa studenata medicine CROSS-a (Croatian Student Summit), a 2019. sudjelovao kao predstavnik MEF Zagreb na međunarodnom kongresu studenata u Crnoj Gori MIMSu (Montenegro International Medical Summit).

Petra Nikšić, rođena je u Zagrebu 28. srpnja 1999. godine i redovna je studentica 3. godine Medicinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Pohađala je Osnovnu školu Petra Preradovića u Zagrebu i nagrađena je kao najbolja učenica generacije te je završila Osnovnu glazbenu školu Zlatka Balokovića na odjelu za klavir gdje je sudjelovala na mnogim natjecanjima. Nakon osnovne škole upisuje XV. Gimnaziju u Zagrebu. Tijekom svog osnovnoškolskog i srednjoškolskog obrazovanja aktivno se bavila različitim plesnim stilovima te osvojila brojne nagrade na državnim i međunarodnim plesnim natjecanjima, a nastupala je i na mnogim koncertima. Srednju školu završava s odličnim uspjehom te upisuje Medicinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu 2018./2019. godine. Dobitnica je STEM stipendije na 1. godini studija medicine zbog izvrsno napisanih državnih matura iz fizike i matematike.