

3D MODELIRANJE I 3D TISAK UMJETNOG KOŠTANOG TKIVA

Alan Divjak¹, Ines Kovačić², Damir Modrić¹

¹ Sveučilište u Zagrebu Grafički fakultet

² Sveučilište u Zagrebu Stomatološki fakultet

Sažetak

Testiranje ponašanja implantata u dentalnoj medicini dugotrajan je i zahtjevan postupak. Unatoč sve široj upotrebi analize konačnim elementima, testiranje u stvarnosti i dalje se smatra osnovnim dijelom svakog istraživanja. Materijali i metode korištene u takvim testiranjima objektivno su daleko od stvarne biomehaničke situacije koja nastaje svakodnevnim korištenjem implantata kod pacijenata. U svrhu poboljšanja objektivne kvalitete testiranja implantata provodi se istraživanje primjene naprednih tehnika 3D modeliranja ljudske mandibule na temelju CBCT (Cone Beam Computed Tomography) DICOM datoteka kako bi se stvorili modeli koji oblikom, ponašanjem i mehaničkim karakteristikama bolje odgovaraju stvarnosti. Tako realizirani modeli idealni su za daljnje korištenje u FEA simulacijama i 3D print modela mandibule za mehanička testiranja. Kombiniranjem naprednih tehnika 3D modeliranja i jedinstvenih mogućnosti 3D tiska moguće je brzo i iterativno provoditi stomatološka ispitivanja i istraživanja na modelima mandibularne kosti koji imaju ispravnu distribuciju gustoće tvrdog i mekog koštanog tkiva.

Ključne riječi: 3D modeliranje, 3D tisak, mandibula, segmentacija

3D MODELING AND 3D PRINTING OF ARTIFICIAL BONE TISSUE

Abstract

Testing the behavior of dental implants in dental medicine is a lengthy and demanding procedure. Despite the widespread use of finite element analysis, testing in reality is still considered to be an essential part of any research. The materials and methods used in such tests are objectively far from the real biomechanical situation that arises with the everyday use of implants in patients. In order to improve the objective quality of the implant testing, a research on the use of advanced 3D modeling of human mandibles is carried out on the basis of the CBCT (Cone Beam Computed Tomography) DICOM file to create models that conform to shape, behavior and mechanical characteristics. Such models are ideal for further use in FEA simulations and for 3D printing of mandible models for mechanical testing. Combining advanced 3D modeling techniques and unique 3D printing capabilities; it is possible to quickly and extensively implement dental testing and research on mandibular bone models that have the correct distribution of hard and soft bone tissue density distribution.

Keywords: 3D modeling, 3D print, mandible, segmentation

1. Uvod

Danas se tehnologije poput računalnog modeliranja, aditivne proizvodnje i računalne simulacije naširoko koriste u svim granama industrije i znanosti, a učestalost korištenja tih tehnologija raste iz dana u dan. Ovo nije čudno ako se u obzir uzmu brojne prednosti koje ove tehnologije donose: brži razvoj proizvoda i usluga, testiranje mogućnosti i kvalitete prije same izrade prototipa, brza i jeftina izrada prototipa i nove mogućnosti proizvodnje. Suradnja s kolegama sa Stomatološkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu omogućila nam je pristup problemu na kojem smo htjeli testirati postupke i metode u kompleksnim situacijama, upotrebu računalnog 3D modeliranja, računalne simulacije i aditivne proizvodnje (ili 3D printa kako se popularnije zove) na području dentalne medicine zvano oralna implantologija koje se ponekad svrstava u još jedno malo šire područje zvano restorativna dentalna medicina. Naš cilj je primjenom novih tehnologija i postupaka ubrzati, olakšati i unaprijediti istraživanje i razvoj područja oralne implantologije. Oralna implantologija jedno je od glavnih područja dentalne medicine. Zadatak

ovog područja je vraćanje naših usta u funkcionalno i estetsko stanje uslijed gubitka zubi iz bilo kojeg razloga. Dentalna medicina je ogromno područje, što po pitanju razmjera svjetske populacije kojoj je potrebna, što po pitanju razmjera vrijednosti same industrije, što nije ni čudno obzirom da oko 180 milijuna ljudi diljem svijeta pati od djelomičnog ili potpunog gubitka zubi iz brojnih razloga, te što je gubitak zubi povezan sa brojnim drugim negativnim zdravstvenim posljedicama. Iz ovih razloga medicinska istraživanja i razvoj tehnologije vrlo su aktivni. Jedno od glavnih područja interesa je testiranje ponašanja implantata. Postavljanje implantata zapravo pokriva mnogo pitanja - gdje je idealna pozicija za postavljanje implantata? Koja je veličina idealna? Kakva je kvaliteta kosti? Koliko opterećenje će implantat moći podnijeti? Obzirom na lokaciju i očekivano opterećenje, kolika je trajnost implantata? Da li će oseointegracija biti uspješna? Potrebno je uzeti u obzir kompletnu biomehaničku situaciju i to iznimno komplicira donošenje odluka. Uporaba dentalnih implantata je postala raširen i predvidljiv način liječenja za restauraciju zuba koji manjkaju [1,2]. Tijekom vremena napredak na području materijala i dizajna implantata se i dalje dramatično poboljšava, pacijenti koji koriste implantate zahtijevaju protokole tretmana koji kraće traju, zahtijevaju manje troškove i manji broj intervencija koje za posljedicu daju rezultate izrazito poboljšane estetike i funkcionalnosti. Međutim, još uvijek postoje mnoga područja s obzirom na tretman implantološke protetike koje treba dodatno istražiti. Međutim, u posljednjih nekoliko godina, primjena implantata malog promjera i mini dentalnih implantata (MDI) za podršku prijenosnih i fiksnih proteza dramatično se povećala, uglavnom zbog svoje niske cijene i jednostavnosti ne-invazivnog postupka. Temeljem tog i sličnih istraživanja, 2014. godine su stručnjaci i čelnici vodeće svjetske implantološke grupacije [International Team for Implantology (ITI)] donijeli konsenzus i odobrili upotrebu 4 mini dentalna implantata minimalne dužine 10 mm, u intraforaminalnoj regiji, za retenciju donje totalne proteze [3]. Kod pacijenata sa ekstremno resorbiranim grebenom često je gotovo nemoguće napraviti stabilnu i dobro retiniranu DTP. Takvi pacijenti imaju izrazite poteškoće prilikom žvakanja, čak i govora, zbog čega imaju smanjenu kvalitetu života.

Često osobe sa ekstremnom resorpcijom mandibularnog grebena imaju i niz sistemskih bolesti, zbog čega opsežni oralnokirurški zahvati mogu biti kontraindicirani. Ugradnja implantata standardne širine može povećati rizik frakture čeljusti za vrijeme oseointegracije zbog smanjene visine i smanjenog bukolingvalnog promjera, te nakon uspješne oseointegracije u slučaju opsežnog periimplantitisa [4]. Kao moguća opcija rješavanja ovakvih slučajeva, mogla bi biti ugradnja kratkih, a uskih (MDI dužine 6 ili 8 mm) implantata.

MDI su jednodjelni uski implantati promjera < 2.9 mm, prvotno osmišljeni kao nosači privremenih protetskih radova dok implantati standardnih dimenzija ne oseointegriraju. Danas MDI imaju hrapavu obrađenu površinu (pjeskarenu i jetkanu), kao i SDI te potpuno oseointegriraju. Nakon što su MDI bili duže vremena ugrađeni u kosti, osobito u mandibuli, bila je potrebna veća sila za njihovo uklanjanje, (i do 35.4 Ncm), što je često dovodilo do njihovog pucanja prilikom izvlačenje [5]. Mini dentalni implantati (MDI) se preporučuju za one slučajeve s odgovarajućom kvalitetom kostiju i visine, ali s nedostatkom alveolarne širine kostiju [6]. Iako su MDI i drugi uski implantati proizvedeni od Ti90/AL6/Va4 legure koja je superiorna, obzirom mehanička svojstva, čistom titanu, njihova mehanička svojstva još uvijek, posebno za uske MDI, nisu u potpunosti zadovoljavajuća. Sve su ovo pretpostake Cilj ovog rada je dati koncizan uvid u proces koji se koristi u istraživanju i pogled na tehnologije koje razvijamo kako bi olakšali i unaprijedili taj proces.

2. Testiranje modela

U dostupnoj stomatološkoj literaturi do danas ne postoje informacije o testovima s MDI na modelima mandibule. Zbog toga će biti izrađeni fizički modeli koji simuliraju čeljusti različite gustoće kostiju s umjetnim elastičnim tkivom sluznice usne šupljine (2 ili 3 različita stupnja elastičnosti, npr. debljina umjetnog tkiva od 1 mm, 2 mm ili više) te bi se u takav model umjetne čeljusti umetnula 4, 3, 2 ili 1 MDI. Da bi optimizirali izradu modela što realističnijeg čeljusti prvenstveno bilo je potrebno realizirati 3D otiske realnih čeljusti s kondilima bazirane na CBCT DICOM datotekama.

3. Teorija

U radu je opisan proces generiranja 3D modela iz CBCT (7) snimke i izrada stvarnog modela pomoću aditivne proizvodnje (proces najšire poznat pod nazivom "3D print"). Izrada mandibule putem 3D printa predstavlja značajan odmak od klasičnih oblika i materijala korištenih u svrhu testiranja implantanata. Do sada su se, kao jednostavan i prihvaćen način simulacije koštanog tkiva mandibule, koristili drveni blokovi. Pojedine vrste drveta svojim mehaničkim svojstvima slične koštanom tkivu i mogu se koristiti kao grube aproksimacije čiji su glavni nedostatak jednaka mehanička svojstva kroz cijeli volumen materijala, što je u suprotnosti sa anatomskom strukturom mandibule [8]. Slijedeći problem predstavlja korištenje jednostavnih geometrijskih oblika naspram stvarnog oblika mandibule.

Nova metoda izrade modela za testiranje koristi mogućnosti 3D printa kao brzu, jednostavnu, kvalitetnu i cijenom prihvatljivu metodu izrade anatomske korektnog modela mandibule koji je mehaničkim svojstvima vrlo sličan kosti, što će omogućiti preciznije i kvalitetnije pozicioniranje MDI, ali i edukaciju liječnika vezano za sam postupak usađivanja implantanta. Od mnogih dostupnih tehnologija 3D printa Fused Deposition Modeling (FDM) tehnologija posebno je podobna za izradu mandibule iz niza razloga. Osnovni je svakako cijena. Potrošački FDM 3D printeri sposobni su dovoljno kvalitetno izraditi model mandibule koji se može koristiti u svrhu testiranja. Cijene ovih printera danas se kreću od nekoliko tisuća do nekoliko desetaka tisuća kuna, što je vrlo umjereno naspram cijena profesionalnih FDM printera. Cijene termoplastika koje se koriste kao materijal za print je također relativno niska, a izbor materijala za FDM je iznimno širok. Obzirom da je potrebno pronaći termoplastike koje karakteristikama odgovaraju kortikalnoj i mekoj kosti, ovo je iznimno bitan faktor. Posljednja važna stavka je proizvodnja iz dva materijala. FDM nudi mogućnost lakog kombiniranja materijala unutar jednog printa, što se postiže korištenjem većeg broja mlaznica za zasebnim materijalima ili jedne mlaznice sa više ulaznih materijala. Pošto je za anatomske korektnu mandibulu potrebno koristiti dva materijala korištenje FDM tehnologije opet ima prednost. Kombinacija niske cijene uređaja i materijala uz zadovoljavajuća mehanička svojstva izrađenog modela čine FDM 3D printere gotovo idealnom tehnologijom za potrebe izrade testnih modela mandibule.

3.1 CBCT skeniranje

Ovo je osnova svakog istraživanja i danas je postalo već standardno da se kod realnog planiranja ugradnje implantata stomatolog uvelike oslanja na CBCT snimku. CBCT je specijalna tehnika računalne tomografije koja koristi x-zrake za trodimenzionalno snimanje unutrašnjosti tkiva i organa. Kod ugradnje implantata stomatolog koristi ovaj trodimenzionalni model da utvrdi u kakvom je stanju kost i koja je najbolja pozicija za ugradnju implantata, dok se kod istraživanja ovaj model koristi za izradu CAD modela koji će se koristiti u simulacijama.



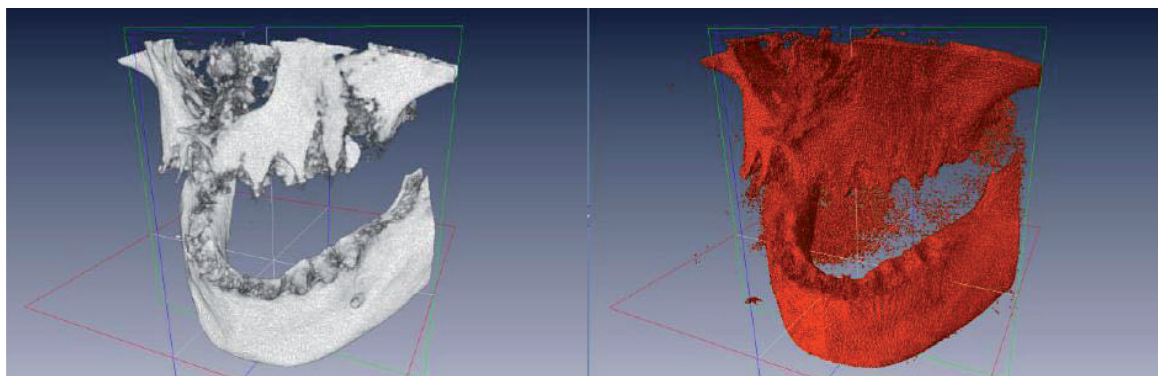
Slika 1. CBCT mandibule

Na ovom primjeru možemo vidjeti da je riječ o pacijentu koji uopće nema zubi i stanje mandibule je vrlo loše. Ono što u ovom slučaju želimo napraviti je pripremiti modele za simulaciju i 3D tisak. Naše kosti sastoje se od dvije vrste tkiva - kortikalna i trabekularna kost. Kortikalna kost je puna, čvrsta kost koja se nalazi na vanjskoj strani kosti, dok je trabekularna kost mekša, spužvaste strukture koja se nalazi u unutrašnjosti. Mi želimo iz ove snimke čeljusti izvući geometrijski model te tvrde i meke kosti. Ovaj model ne možemo direktno upotrijebiti jer on zapravo nema pravu 3D strukturu, riječ je o naslaganim slikama, tako da je potrebno definirati regije koja ova dva tkiva koja zanimaju i od njih napraviti 3D modele. Ovaj proces označavanje koje je koje tkivo u CBCT snimci (i bilo kojoj drugoj tehnici snimanja) naziva se segmentacija, te kao što ime kaže ove slike razdvajamo na segmente gdje je svaki segment drugi tip tkiva. Za ovo postoje brojni alati, što komercijalni, što open source, dok je sam proces točnog prepoznavanja vrste tkiva i granice između različitog tkiva predmet intenzivnog istraživanja u kojem se danas koriste i neuralne mreže, deep-learning i umjetna inteligencija. Kod dentalne medicine ovo nije toliko bitno, ali u primjenama kao što su detekcija tumora ovo je ekstremno važno.

4. Volumna segmentacija CBCT Dicom snimke

proces izrade mandibule sastoji se od nekoliko faza. Prva faza je izrada volumnog modela putem segmentacije tkiva iz CBCT snimke. CBCT, kao i svaki drugi oblik računalne tomografije, subjekt snima kao niz dvodimenzionalnih presjeka. U slučaju mandibule presjeci se snimaju okomito na vertikalnu os. Broj presjeka ovisi o dimenzijama dijela tijela koji se snima i rezoluciji snimanja definiranoj tehničkim mogućnostima CBCT uređaja.

Presjeci nastali snimanjem zapisuju se u DICOM datoteku, univerzalnu oblik spremanja podataka različitih metoda tomografskog snimanja. Većina DICOM datoteke predstavljaju upravo spremljeni presjeci, ostatak su razne informacije o modelu uređaja kojim su presjeci snimani, postavke snimanja i podaci pacijenta. Svaki presjek sadrži slikovne podatke koji su grafička reprezentacija gustoće tkiva. CBCT generira presjeke koji sadrže sive tonove, tamniji predstavljaju manje gusta tkiva, svjetliji više gusta tkiva. Do volumne reprezentacije tkiva dolazi se korištenjem programa za pregled ili rad sa snimkama i podataka iz presjeka. Kada se svi presjeci redom učitaju u neki od takvih programa dobiva se 3D struktura čiji je broj volumnih elemenata jednak rezoluciji presjeka i broju presjeka. Ovi elementi nazivaju se vokseli (eng. voxel - volume element, slično kao što je pixel - picture element) Jasno je kako je za rad sa ovakvim kompleksnim strukturama potrebno jako računalo kako bi se daljnji proces rada odvijao bez zastajkivanja i čekanja.



Slika 2. Selektirani raspored gustoće i vokseli dodijeljeni segmentaciji

U radu je korišten popularan program za rad sa medicinskim snimkama - Amira [9], verzija 5.3. Za razliku od preglednika koji samo dopuštaju volumni prikaz tkiva, Amira nudi čitav spektar alata za

rad sa volumnim podacima. Za izradu volumnog modela potrebno je iz CBCT snimke izolirati pojedine gustoće tkiva i dodijeliti im oznake. Ovaj proces naziva se segmentacija. Selektirani volumen i vokseli dodijeljeni segmentaciji prikazani su na slici 1. Pošto je cilj rada izrada anatomskog modela mandibule iz dva materijala od kojih svaki predstavlja različitu vrstu simulacija kosti, izolirat će se dva raspona gustoća i spremite kao dvije segmentacije. Mandibula se generalno sastoji od dvije vrste kosti. Kortikalna kost je tvrda, čvrsta i puna struktura koja se nalazi sa vanjske strane mandibule. Trabekularna kost je mekša, spužvasta i prokrvljena struktura koja se nalazi unutar mandibule. Razlike u gustoći ovih kostiju vidljive su na CBCT snimci kao različite vrijednosti sivih tonova. Kod klasičnog CTa sivi tonovi presjeka predstavljaju gustoću tkiva u Hounsfieldovim jedinicama (HU - Hounsfield units) koje se kreću u rasponu od -1000 do 3000. Crna i bijela boja na presjeku predstavljaju maksimume, crna je -1000, bijela 3000. Same jedinice predstavljaju raspon od gustoće zraka (-1000), preko gustoće vode (0), do najveće moguće gustoće kosti (3000). Kod CBCT-a sivi tonovi ne odgovaraju HU kao što je slučaj kod CT-a. Tonovi se relativni i variraju među proizvođačima uređaja, što utječe na upotrebljivost ove metode snimanja kod procjene kvalitete kosti. Kako bi se sivi tonovi CBCT-a prebacili u HU potrebno je napraviti transformaciju tonova linearnim regresijom prema izrazu (1).

$$HU = [(Utkiva - Uvode) / (Uvode)] \times 1000 \quad (1)$$

Jednom kada je transformacija obavljena potrebno je selektirati željeni raspon gustoća i stvoriti segmentaciju. Kortikalna kost ima raspon gustoće od 1250-3000 HU, dok trabekularna kost ima raspon gustoće od 320-1250 HU. Pojedine raspone gustoće moguće je odabrati putem alata u programu. Odabrani raspon pridružuje se segmentaciji i ona sadrži voksele koji predstavljaju kost određene gustoće.

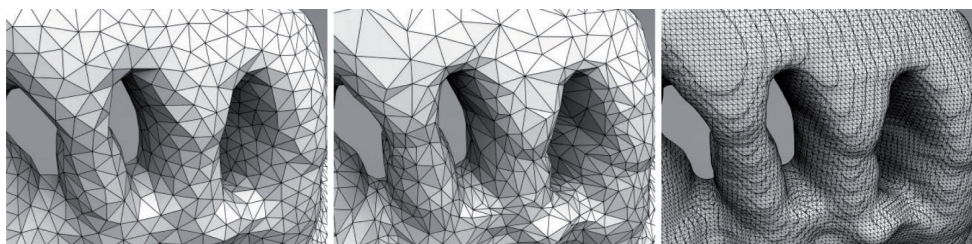


Slika 2. Modeli kortikalne i trabekularne kosti, odvojeni i spojeni

Na slici 2. lako je primijetiti kako su segmentacije topološki iznimno kompleksne. Razlozi variraju od same kompleksne strukture tkiva, preko grešaka i šuma pri snimanju, do prisutnosti malih količina tkiva izvan željenog raspona gustoća. Primjena ovako kompleksnih modela u FDM 3D printu predstavlja izazov iz dva razloga; softver za pripremu modela za 3D print ponekad se ne može nositi sa kompleksnim geometrijskim konfiguracijama, dok relativno niska rezolucija FDM tehnologije nije sposobna rekreirati sitne detalje. Pojednostavljenje modela rješava te probleme. Zaključeno je kako uklanjanje manjih nepravilnosti i zaglađivanje sučelja između dvije gustoće kosti neće negativno utjecati na rezultate rada, te su iskorišteni alati za volumnu obradu i filtriranje segmentacija.

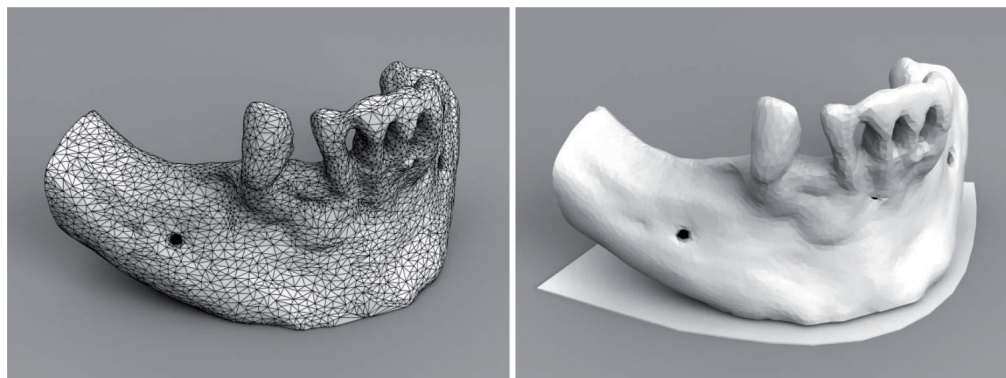
Druga faza izrade mandibule je generiranje poligonalnog 3D modela iz volumnih segmentacija. Nakon postupka segmentacije generiramo 3D modele tako da na sučelju dva materijala generiramo poligonalnu geometriju. Ovako nastali modeli iznimno su kompleksni (slika kortikalne i trabekularne kosti) i u pravilu ih moramo pojednostaviti. Ovo radimo pomoću retopologizacije, postupka generiranja nove geometrije

zadovoljavajućih karakteristika preko starog modela. Rezultat su detaljni modeli sa smanjenom razinom kompleksnosti koji su adekvatni za korištenje u daljnjim koracima. U ovom procesu vokseli se omataju poligonima. Osnovni model generira se u Amiri uz korištenje zagađivanja modela kako bi se izbjegli visokofrekventni detalji. Generirani modeli sadrže veliki broj poligona, što s jedne strane stvara probleme u procesu pripreme modela za 3D print, a s druge jednostavno predstavlja nepotrebno detaljan model. Model se pojednostavljuje uklanjanjem i rekonstrukcijom poligona uz zadržavanje topološke kvalitete modela. Na slici 3. moguće je vidjeti rezultate optimizacije i rekonstrukcije modela.



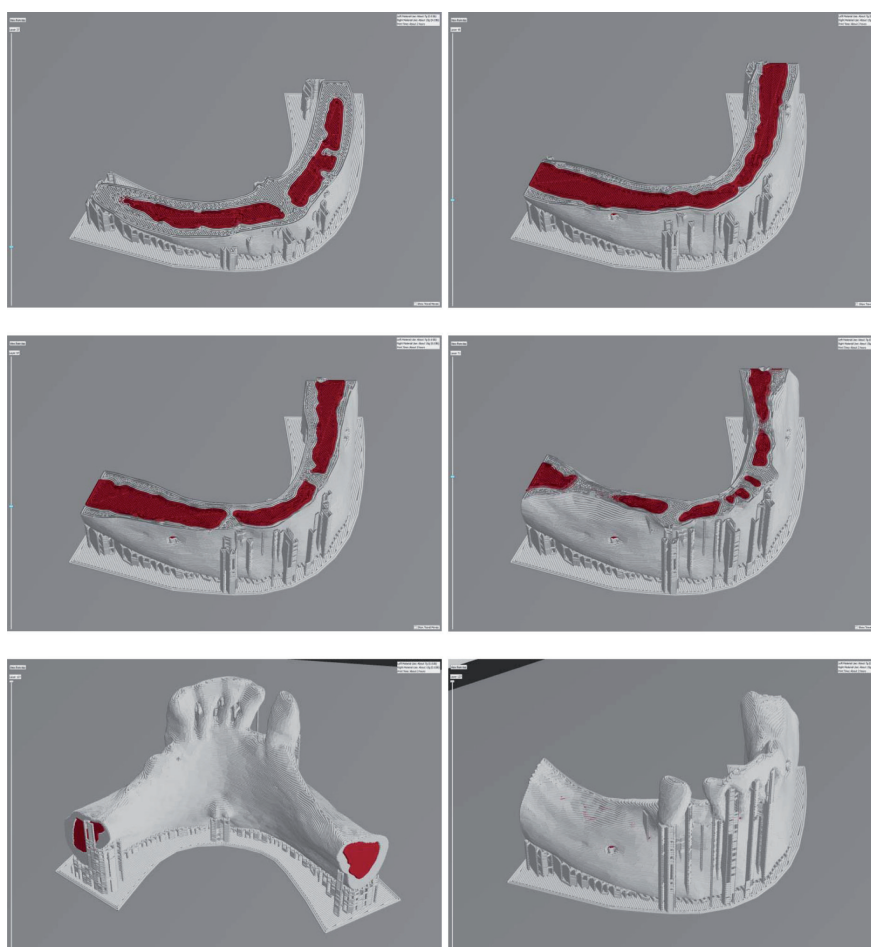
Slika 3. Model trabekularne kosti prije i poslije optimizacije

Treća faza u izradi mandibule je priprema modela za 3D print. Kod aditivne proizvodnje postoji međukorak između modeliranja objekta i 3D printa objekta. U tom međukoraku specijalizirani softver pretvara poligonalni model u opis koji je razumljiv 3D printeru.



Slika 4. Pretvorba poligonalnog modela u opis koji je razumljiv 3D printeru

U slučaju FDM-a model se razlaže na horizontalne slojeve, dok se svaki sloj razlaže na linije i krivulje koje opisuju kretanje glave 3D printera koja ekstrudira plastiku. Način kako će se model raslojiti i kako će se glava printera kretati definiraju parametri definirani od strane korisnika. Slike prikazuju strukture podrške koje su odgovorne za podupiranje dijelova modela koji imaju veliku prednju stranu. U slučaju mandibule modeli su potpuno ispunjeni plastikom. Jedna od nedostataka FDM tehnologije je što izrađeni modeli nisu jednako čvrsti u svim osima, lateralno opterećenje na vertikalnu os predstavlja najveći problem pošto se slojevi plastike ne vežu jednako dobro kao u horizontalnim osima. Ovaj nedostatak može se djelomično ispraviti nižom brzinom printa, manjom visinom sloja i većom temperaturom ekstruzije.



Slika 5. Različite faze ispisa

Kortikalna kost izrađuje se od PLA (polilaktična kiselina) plastike, dok se trabekularna kost izrađuje od ABS (akrilonitril butadien stiren) plastika. Eksperimentalno je utvrđeno kako su optimalni parametri za izradu mandibule brzina printa 40 mm/s, visina sloja 0.2 mm i temperatura ekstruzije 230 0C za ABS i 220 0C za PLA.

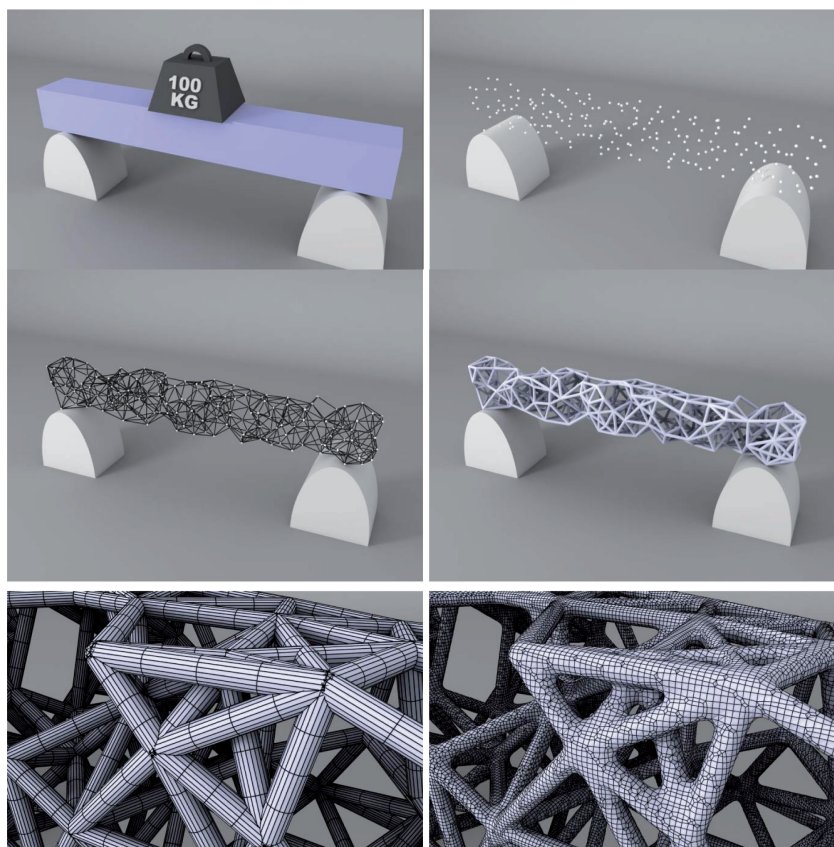
Posljednja faza u izradi modela je 3D print. Modeli se izrađuju na Makerbot Replicator 2X 3D printeru. Modeli su napravljeni od pune plastike.

U sljedećem koraku u dogovoru sa stomatolozima pozicionirani su implantati na optimalnu lokaciju, što nas je dovelo do faze definiranja simulacijskog modela. Za definiranje simulacijskog modela korišten je industrijski standard za simulaciju, ANSYS, softver za multifizikalnu simulaciju. Pri tome su mehanička svojstva meke i tvrde kosti parametri koje je potrebno definirati prilikom realizacije simulacija. Stoga smo odlučili koristiti dvije najjeftinije tehnologije 3D printa kako bi realizirali mehanički realistične kopije ljudske kosti korištenjem dva materijala, jednog koji odgovara tvrdoj kosti, jednog koji odgovara mekoj kosti.

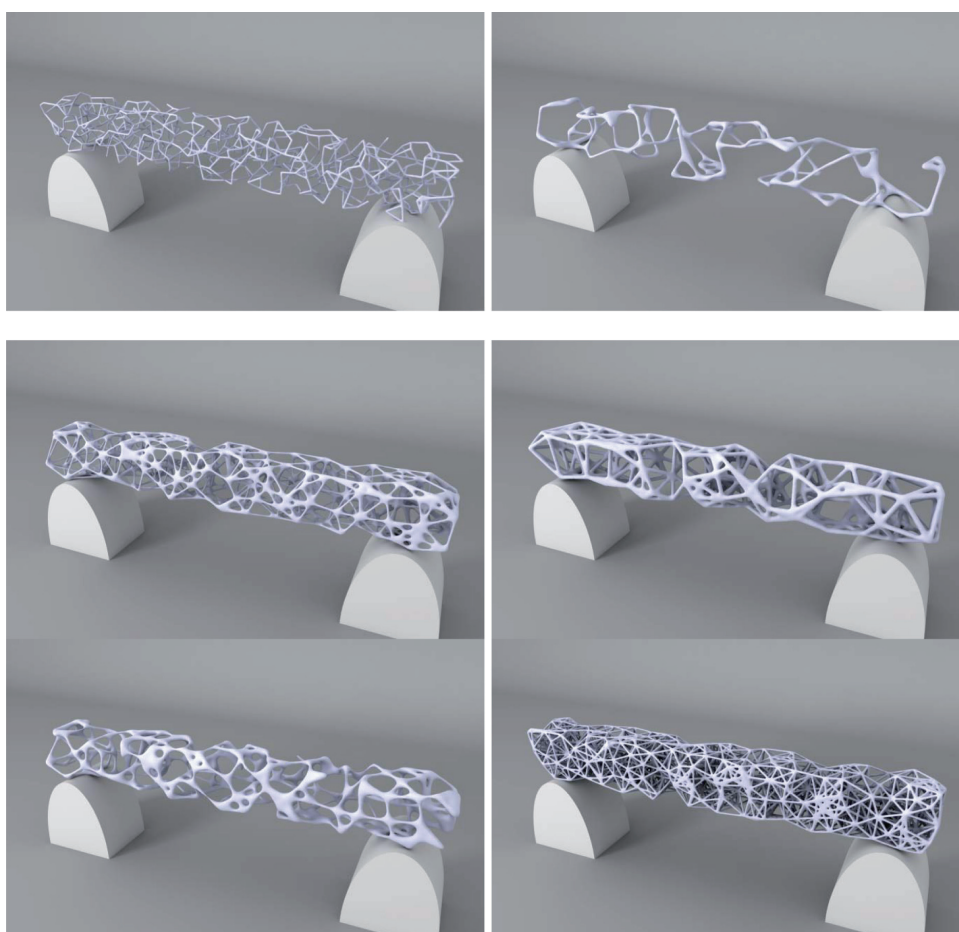
Ovako definiranu i realiziranu mandibulu potrebno je testirati u realnim uvjetima kako bi se potvrdili rezultati FEA simulacije. Velika prednost je što već imamo definirane modele, što znači da ih samo treba prilagoditi za print i isprintati. No to zahtijeva definiranje odgovarajućih materijala, provesti karakterizaciju materijala i istražiti optimalne postavke printa. Sve ovo predstavlja jedan dugotrajan postupak na kojem još uvijek radimo. Izradili smo brojne modele na kojima su stomatolozi proveli svoja istraživanja koja u ovoj fazi pokazuju dobre rezultate, što nas upućuje da idemo u dobrom smjeru.

4.1 Proceduralno modeliranje

Ovdje dolazimo do vjerojatno najzanimljivijeg dijela našeg istraživanja, a to je primjena proceduralnog modeliranja (11) za stvaranje modela mandibule. Naime, spomenuta izrada modela putem 3D printa ima jedan osnovni problem, a to je da se sastoji od dva materijala. Iako je ovaj pristup daleko bolji od onog koji se klasično koristi (zabijanje implantata u blok drveta), nije u potpunosti realan jer gustoća kosti, a time i mehanička svojstva, variraju po cijelom volumenu mandibule, kako se može vidjeti iz CBCT datoteke. Potreban nam je način kako to rekreirati putem 3D printa, bez da koristimo iznimno skupu tehnologiju aditivne proizvodnje. Ovo je nešto što se može postići putem PolyJet i MultiJet tehnologija 3D printa, ali početna cijena ovih uređaja je 200 tisuća kuna, dok je kilogram materijala oko 5 tisuća kuna. Mi smo ovo željeli realizirati na jeftinijem printeru koji koristi materijal s cijenom od 500 kuna po kilogramu, što je vrlo bitno jer se na ovaj način bitno povećava krug korisnika. Postupak koji smo osmislili zapravo oponaša prirodu. Naše kosti su šupljikave. Gustoća tih šupljina definira gustoću kosti, a time i mehaničke karakteristike. Naš softver učitava CBCT datoteke i direktno iz njih proceduralno generira šupljikavu strukturu kosti čija gustoća odgovara onoj iz CBCT-a. Na ovaj način možemo rekonstruirati mehanički korektnu mandibulu ili bilo koju drugu kost putem 3D printa. Ovo je moguće napraviti pomoću proceduralnog modeliranja, postupka koji upošljava algoritme za samostalnu izgradnju kompleksnih 3D modela koje čovjek nikada ne bi mogao sam ručno napraviti. Ovakvo modeliranje proračunski je iznimno zahtjevan postupak, ali rezultati koje možemo postići njegovom primjenom omogućuju mehanički vjerne reprodukcije kompleksnih bioloških struktura po prihvatljivoj cijeni.



Slika 6. Faze proceduralnog modeliranja za stvaranje modela mandibule



Slika 7. Različita rješenja proceduralnog modeliranja istog problema

5. Rezultati i rasprava

Pri generiranju poligonalnog modela veličina pojedinog poligona je fiksna, što znači da će fizički veće mandibule biti opisane sa većim brojem poligona, što je vidljivo iz rezultata. Količina vremena potrebnog za pripremu modela također ovisi o broju poligona, te o topološkoj kompleksnosti modela. Bitno je spomenuti kako generiranje poligonalnog modela i kasnija optimizacija nije dala modele bez grešaka. Rupe i problematične geometrijske konfiguracije poligona pojavile su se u svih osam 3D modela, te je bilo potrebno izvršiti popravak putem NetFabb softvera [12]. NetFabb nudi potpuno automatiziran postupak detekcije grešaka i popravka geometrije, što uvelike olakšava popravak ovako kompleksnih modela - manualno traženje i popravak nedostataka kod organskih modela konzumira mnogo vremena i računalnih resursa. Korištenje ABS i PLA plastika nije idealno za točnu simulaciju mehaničkih karakteristika kortikalne i trabekularne kosti. Navedene plastike korištene su kako bi se ponajprije testirale mogućnosti rada sa dva različita materijala. Određivanje mehanički podobnih materijala dostupnih u FDM 3D tisku predmet je daljnjeg istraživanja.

6. Zaključak

Printani modeli zadovoljavaju potrebe testiranja implantanata temeljem kvalitete segmentacije tkiva, generiranja 3D modela i konačne izrade putem 3D tiska. Korištenje utvrđenih optimalnih parametara rezultiralo je relativno sporom izradom modela, ali prednosti ostvarene upotrebom 3D printanih mandibula su iznimne. Sam proces generiranja modela predstavlja zahtjevan posao, ali sa daljnjim razvojem postupka izrade moguće je ubrzati i pojednostaviti izradu modela. Korištenje tehnologije 3D

printa uvelike može olakšati i ubrzati testiranje implantanata. Niska cijena izrade modela i veliki izbor materijala čine FDM tehnologiju vrlo pogodnom za korištenje u području izrade prototipa za testiranje MDI-a.

Uveli smo novi pristup deklarativnog modeliranja koji omogućuje dizajnerima da se usredotoče na formulaciju onoga što žele kreirati umjesto na opisu kako bi trebali modelirati. Cilj ovog pristupa je smanjiti složenost virtualnog modela kombinirajući snagu modela temeljenog na semantici s proceduralnim pristupima. Ovaj članak opisuje glavne doprinose proceduralnom modeliranju virtualnih svjetova: interaktivno proceduralno skiciranje i održavanje konzistentnosti virtualnog svijeta. Ove tehnike, integrirane u problem generiranja mandibule, omogućuju kreiranje kompletnog 3D virtualnog svijeta u nekoliko minuta. Proceduralno modeliranje omogućuje brz i intuitivan način modeliranja virtualnih svjetova, omogućujući dizajnerima interaktivno modeliranje njihovog virtualnog svijeta korištenjem značajki problema, koji se proceduralno proširuju pomoću različitih integriranih proceduralnih metoda. Održavanje dosljednosti jamči da se semantika svih značajki problema sačuva tijekom procesa modeliranja. Konkretno, ona automatski rješava sukobe koji mogu nastati iz interakcija između karakteristika problema. Vjerujemo da ti doprinosi predstavljaju značajan korak ka pružanju veće kontrole korisnika i fleksibilnosti u postupnom modeliranju virtualnih svjetova. Stoga se može očekivati da će, uz daljnje smanjenje njegove kompleksnosti, virtualno modeliranje postati dostupno sve većoj skupini korisnika.

Zahvala

Autori zahvaljuju Hrvatskoj zakladi za znanost na financiranju projekta ("Definiranje mogućnosti uporabe mini dentalnih implantata (MDI) i njihovi rezultati u in vitro i u kliničkim prospektivnim istraživanjima" br.1218).

Reference

- [1] Zembic A, Philipp AO, Hämmerle CH, Wohlwend A, Sailer I. Eleven-Year Follow-Up of a Prospective Study of Zirconia Implant Abutments Supporting Single All-Ceramic Crowns in Anterior and Premolar Regions. *Clin Implant Dent Relat Res*. 2014 Sep 2. doi: 10.1111/cid.12263
- [2] Schropp L, Wenzel A, Stavropoulos A. Early, delayed, or late single implant placement: 79 10-year results from a randomized controlled clinical trial. *Clin Oral Implants Res*. 2013 Oct 8. doi: 10.1111/clr.12273.
- [3] Bornstein MM, Al-Nawas B, Kuchler U, Tahmaseb A (2014) Consensus statements and recommended clinical procedures regarding contemporary surgical and radiographic techniques in implant dentistry. *Int J Oral Maxillofac Implants* 29 Suppl:78–82
- [4] Bidra AS, Almas K. Mini implants for definitive prosthodontic treatment: a systematic review. *J Prosthet Dent* 2013;109(3):156-64.
- [5] Naval-Gías L, Rodríguez-Campo F, Naval-Parra B, Sastre-Pérez J (2015) Pathological mandibular fracture: A severe complication of periimplantitis. *J Clin Exp Dent* 7:e328–e332
- [6] Simon H, Caputo AA (2002) Removal torque of immediately loaded transitional endosseous implants in human subjects. *Int J Oral Maxillofac Implants* 17:839–845
- [7] [http://www.dental.theclinics.com/article/S0011-8532\(14\)00026-3/pdf](http://www.dental.theclinics.com/article/S0011-8532(14)00026-3/pdf)
- [8] Keaveny TM, Hayes WC, Mechanical properties of cortical and trabecular bone, *Bone*, Volume 7: Bone growth-B, 1993, CRC Press, pp 285-344
- [9] <http://www.fei.com/software/amira-3d-for-life-sciences/>
- [10] Mah P, reeves TE, McDavid WD, Deriving Hounsfield units using grey levels in cone beam computed tomography, *Dentomaxillofacial radiology* 39, 2010, pp 323-335
- [11] Mueller, Pascal, Peter Wonka, Simon Haegler, Andreas Ulmer, and Luc Van Gool. "Procedural Modeling of Buildings." *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2006/ ACM Transactions on Graphics.*; <http://www.procedural.com/company/publications/procedural-buildings.html>
- [12] <https://www.autodesk.com/products/netfabb/overview>