

Digitalizacija i multiplikacija koštanih preparata anatomske zbirke

Zvekić, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, School of Medicine / Sveučilište u Zagrebu, Medicinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:105:385098>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-02**



Repository / Repozitorij:

[Dr Med - University of Zagreb School of Medicine Digital Repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

MEDICINSKI FAKULTET

Luka Zvekić

**DIGITALIZACIJA I MULTIPLIKACIJA KOŠTANIH PREPARATA
ANATOMSKE ZBIRKE**

DIPLOMSKI RAD



ZAGREB, 2024.

Ovaj diplomski rad izrađen je na Katedri za anatomiju i kliničku anatomiju i Zavodu za anatomiju „Drago Perović” Medicinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, pod vodstvom redovitog profesora Vedrana Katavića i predan je na ocjenu u akademskoj godini 2023./2024.

Mentor rada: prof. dr. sc. Vedran Katavić

POPIS KRATICA

3D	–	trodimenzionalno
ABS	–	akrilonitril-butadien-stiren (od engl. <i>acrylonitrile butadiene styrene</i>)
CNC	–	računalno numeričko upravljanje (od engl. <i>computer numerical control</i>)
FDM	–	taložno očvršćivanje (od engl. <i>fused deposition modeling</i>)
MF	–	Medicinski fakultet
MIT	–	Massachusetts Institute of Technology
PETG	–	polietilen-tereftalat glikol (od engl. <i>polyethylene terephthalate glycol</i>)
PLA	–	polilaktična kiselina (od engl. <i>polylactic acid</i>)
PTH	–	paratireoidni hormon
SAD	–	Sjedinjene Američke Države
SLA	–	stereolitografija
SLS	–	selektivno lasersko srašćivanje (od engl. <i>selective laser sintering</i>)
USB	–	univerzalna serijska sabirnica (od engl. <i>universal serial bus</i>)
UV	–	ultraljubičasto (od engl. <i>ultraviolet</i>)

SADRŽAJ

SAŽETAK	
SUMMARY	
1. UVOD	1
1.1. Povijest katedre anatomije i tradicija njenog podučavanja	1
1.1.1. Nastavna djelatnost Zavoda za anatomiju	1
1.2. Povijesni razvoj aditivne proizvodnje i njena primjena u medicini	2
2. ANATOMIJA KOSTI	3
2.1. Kost kao spremnik kalcija	3
2.2. Vrste kostiju	3
3. NAČELA RADA 3D SKENERA	4
4. NAČELA RADA UREĐAJA ZA 3D TISAK	4
4.1. SLA tehnologija	5
4.1.1. Dijelovi SLA uređaja za 3D tisak Anycubic photon mono X	6
4.1.2. Korištenje SLA uređaja za 3D tisak Anycubic photon mono X	6
4.1.3. Završna obrada dobivenog oblika	7
4.2. FDM tehnologija	7
4.2.1. Materijali FDM	10
4.3. Usporedba FDM i SLA tehnologije	11
4.3.1 Usporedba metoda tiska na kvalitetu modela	12
4.4. Priprema digitalnog modela za uređaj za 3D tisak	12
5. PRIMJENA 3D TISKANIH ANATOMSKIH MODELA KOSTI	13
5.1. Izrada plastičnog edukacijskog modela kosti	14
5.2. Primjer očuvanja unikatnih anatomskih primjeraka na modelu klinaste i zatiljne kosti	15
5.3. Koncept digitalne anatomske zbirke modela	17
5.4. Financijska opravdanost izrade plastičnih modela	18
5.5. Koncept fizičke zbirke plastičnih anatomskih modela	18
6. ZAKLJUČAK	20
7. ZAHVALE	21
8. LITERATURA	22
9. ŽIVOTOPIS	24

SAŽETAK

Digitalizacija i multiplikacija koštanih preparata anatomske zbirke

Autor: Luka Zvekić

Poznavanje anatomije ljudskog tijela temelj je obrazovanja svakog liječnika. Medicinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu počeo je svoju nastavnu djelatnost upravo uvodnim predavanjem anatomije dr. Drage Perovića. Zavod za anatomiju od svojih početaka do današnjeg dana redovito priprema biološke anatomske preparate koji studentima omogućavaju lakše savladavanje gradiva. Osiguravanju bioloških anatomske preparata prethodi detaljno razrađena procedura doniranja tijela te njihove stručne obrade kako bi postala didaktička pomagala. Idealni biološki modeli kosti vremenom postaju krhki te rukovanjem dolazi do njihovog oštećivanja. Kako bi očuvali biološke anatomske preparate od oštećenja te idealne modele učinili dostupnim rukovanju što većem broju studenata medicine, studentska Sekcija za inovacije, u dogovoru s Katedrom za anatomiju i kliničku anatomiju, obradila je anatomske modele kosti metodama 3D skeniranja i 3D tiska. Metodom 3D skeniranja, oblici i anatomske detalji kosti u jednakim su proporcijama digitalizirani te pohranjeni na računalu. Ovisno o potrebama Katedre, moguće je umnožiti i veći broj modela. Umnažanje se vrši pomoću metoda 3D tiska. Metode 3D tiska korištene u umnažanju koštanih preparata su SLA i FDM. Plastični modeli otisnuti pomoću obje metoda čvršći su od bioloških koštanih preparata, time su otporniji na habanje i oštećenja. Otisnuti plastični preparati i u slučaju oštećenja lako se mogu nadomjestiti ponovnim tiskom preparata. Replikacija preparata pohranjenog na računalu metodom 3D tiska, brži je, jednostavniji, jeftiniji i sigurniji proces od tradicionalnog pribavljanja bioloških preparata. Digitalizirane modele se prema željama nastavnika može modificirati ovisno o potrebama nastavnog procesa.

Ključne riječi: 3D skeniranje, 3D tisak, anatomija, kosti

SUMMARY

Digitalization and multiplication of bone models in anatomical collection

Author: Luka Zvekić

Knowledge of human anatomy is the foundation of every physician's education. University of Zagreb School of Medicine began its teaching activities with an introductory lecture on anatomy by Dr. Drago Perović. From its inception to the present day, the Department of Anatomy regularly prepares biological anatomical models that allow students to more easily master the course material. The availability of biological anatomical specimens is preceded by a complex procedure of body donation followed by a long and detailed process before becoming didactic tools. Over time, ideal biological bone models become fragile and are prone to damage through their handling. To preserve biological anatomical specimens from damage and make ideal models available for handling by as many medical students as possible, the student Section for Innovations, in agreement with the Department of Anatomy and Clinical Anatomy, processed anatomical bone models using 3D scanning and 3D printing methods. Using the 3D scanning method, the shapes and the anatomical details of the bones were digitized in equal proportions and stored on a computer. Depending on the needs of the Department, it is possible to replicate a larger number of models. Multiplication is carried out using 3D printing methods. The 3D printing methods used in the multiplication of bone specimens are SLA and FDM. Printed plastic models from both methods are stronger than biological bone specimens, making them more resistant to tear and wear. Printed plastic specimens can be easily replaced by reprinting in the event of damage. Replicating a specimen stored on a computer using 3D printing is a faster, simpler, cheaper, and safer process than the traditional acquisition of biological specimens. Digital models can be modified according to the instructor's wishes depending on the pedagogical needs.

Keywords: 3D printing, 3D scanning, anatomy, bones

1. UVOD

1.1. Povijest katedre anatomije i tradicija njenog podučavanja

Anatomija kao predmet Medicinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu počela se predavati 12. siječnja 1918. godine uvodnim predavanjem doktora, kasnije akademika Drage Perovića. Uvodno predavanje je nosilo naslov „O smjeru nastavnog i znanstvenog rada u anatomiji“ kojim je i akademik Perović otvorio djelovanje Medicinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu (1). Prije dolaska u Zagreb, Drago Perović bio je student, a kasnije asistent profesora Ferdinanda Hochstettera, najutjecajnijeg anatoma toga vremena koji je zajedno s Carlom Toldtom izradio prvi moderni anatomski atlas. Drago Perović je 1913. godine u Beču promoviran *sub auspiciis imperatoris* (promocija pod pokroviteljstvom cara). Takva promocija bila je rezervirana samo za najuspješnije studente generacije, a nositelj naslova dobivao je na dar prsten od cara. Upravo zbog znanja stečenih u Beču kao i autoriteta koji je imao, uspio je tradiciju austrougarske i njemačke anatomske škole preslikati u nastavu anatomije na Medicinski fakultet (MF) u Zagrebu. Stoga se mora naglasiti da se od samih početaka kvaliteta nastave nije nimalo razlikovala od nastave na vodećim europskim fakultetima (1).

1.1.1. Nastavna djelatnost Zavoda za anatomiju

Nastavni rad i znanstvena aktivnost temeljne su zadaće Zavoda za anatomiju od njegova osnivanja do danas. Dr. Perović izradio je nastavni plan, program i organizaciju nastave prema programu MF-a u Beču. Koristio se u to vrijeme najmodernijim pedagoškim tehničkim pomagalicama kao što su epidijaskop i kinoprojektor, a posjedovao je i veliku zbirku dijapozitiva kojima se služio u nastavi. Za potrebe nastave započeo je s izradom anatomske zbirke koja se sastojala od velikog broja preparata i modela koji su se izlagali u tadašnjoj učionici Zavoda za anatomiju (2). Crteži te tekstovi predavanja dr. Perovića, njegovih demonstratora i asistenata prikupljeni su i tiskani kao knjiga, koja je ubrzo postala i službeni udžbenik. Naslov knjige koja je zadnje izdanje doživjela 1964. godine bio je „Perovićeva anatomija“, ali akademik Perović nikada nije potpisao tu knjigu, niti su na njoj bili navedeni autori. Prvi cjeloviti udžbenik strukturiran prema navedenoj knjizi uredila je akademikinja Jelena Krmpotić-Nemanić. Sadržaj nastave predmeta Anatomija nije se značajnije strukturno promijenio do danas, no u razdoblju od 1980. – 2010. godine broj kadavera znatno se smanjio pa je u nastavu na tijelima, umjesto aktivne disekcije uveden demonstracijski način rada. Nastava Anatomije morala se modernizirati i mijenjati u skladu sa zahtjevima novih vremena, tako da je i na Katedri za anatomiju i kliničku anatomiju zadnjih desetak godina napravljen veliki iskorak (1).

Studenti, članovi studentske Sekcije za inovacije u medicini pri Medicinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, htjeli su očuvati tradiciju Drage Perovića i učiniti je dostupnijom zahtjevima 21. stoljeća te

otpornom na buduće potencijalne nepogode. Koštane preparate anatomske zbirke su, vođeni tom mišlju, uz suglasnost Katedre za anatomiju i kliničku anatomiju digitalizirali primjenom tehničke metode trodimenzionalnog skeniranja te multiplicirali sada već višedesetljetne koštane preparate anatomske zbirke metodom trodimenzionalnog tiska. Time su anatomske preparate sačuvani u digitalnom obliku, a tiskom postaju dostupniji većem broju studenata.

1.2. Povijesni razvoj aditivne proizvodnje i njena primjena u medicini

„Aditivna proizvodnja (od engl. *additive manufacturing*), dio je proizvodnoga strojarstva koji se bavi izradom predmeta nanošenjem čestica u tankim slojevima.“ (3). Razvoj postupaka aditivne proizvodnje započinje u SAD-u 1987. godine. Navedene je godine tvrtka *3D Systems* razvila postupak stereolitografije (SLA, od engl. *stereolithography*) koji se zasnivao na otvrdnuću ukapljenog fotopolimera djelovanjem ultraljubičastog (UV, od engl. *ultraviolet*) zračenja. Kroz sljedeće dvije godine tržišnoj utakmici priključile su se i druge tvrtke iz SAD-a i Japana, time SLA postaje komercijalna metoda, dok je prvi uređaj za komercijalnu primjenu SLA metode bio SLA-1. Metodu FDM (od engl. *fused deposition modeling*) ili postupak očvršćivanja taloženjem 1991. godine komercijalizirala je američka tvrtka *Stratasys*. Ista tvrtka je 1996. godine plasirala uređaj koji je radio prema načelima ekstrudiranja, najbliži FDM postupku (4). Nove mogućnosti 3D tiska omogućuju izradu mandibularnih implantata, uložaka, personaliziranih proteza, umjetnih organa, krvnih žila i ostalih bioloških tkiva (5). Rutinska klinička primjena 3D tiskanih modela ustalila se od 2015. godine u radu maksilofacijalnih kirurga (6) te drugih kirurških struka. Na Klinici za traumatologiju KBC „Sestre milosrdnice“ u Zagrebu već je 2013. godine ugrađen prvi personalizirani 3D otisnuti implantat zdjelice pacijentici oboljeloj od tumora, a kasnije i čitav niz drugih 3D otisnutih implantata (7).

2. ANATOMIJA KOSTI

Kosti su dio pasivnog sustava za kretanje koji uz njih čine koštane sveze i hrskavični elementi. Kosti imaju potpurnu i zaštitnu ulogu, služe kao spremnik kalcija te koštana srž kao glavno mjesto postnatalne hematopoeze. Lubanja i kralješci pružaju zaštitu središnjem živčanom sustavu, a rebra, prsna kost i zdjelične kosti pružaju zaštitu unutarnjim organima trupa (8).

2.1. Kosti kao spremnik kalcija

Ukupni tjelesni kalcij raspoređen je u izvanstaničnoj tekućini (oko 0,1 %), u stanicama i staničnim organelima (oko 1 %) dok se ostatak (oko 98,9 %) nalazi u kostima (9,10). Normalna koncentracija kalcija u izvanstaničnoj tekućini iznosi približno 2,4 mmol/L. Niže koncentracije kalcija (hipokalcijemija) uzrokuju ekscitaciju živčanog sustava, dok više koncentracije kalcija (hiperkalcijemija) uzrokuju depresiju živčanog sustava. Koncentracija kalcija fino je regulirana složenom povratnom spregom PTH, kalcitonina i vitamina D na razini crijeva, bubrega, krvne plazme, izvanstanične i unutarstanične tekućine te kosti. PTH se luči iz paratireoidne žlijezde pri pojavi hipokalcijemije. Na razini kosti, izlučeni PTH djeluje na osteoklaste posredovanjem RANK-liganda, time potiče aktivnost osteoklasta i resorpciju kosti. Kalcitonin, hormon kojeg luče parafolikularne C-stanice štitne žlijezde, ima antagonističko djelovanje u odnosu na PTH. Kalcitonin djeluje na način da neposredno smanjuje apsorpcijsku djelatnost osteoklasta. Dugoročni učinak kalcitonina jest smanjenje stvaranja novih osteoklasta. Mogućnost kostiju da služe kao spremnik kalcija leži u kristalnim solima koje se odlažu u organski matriks u obliku kalcijeva hidroksiapatita, kemijske formule $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ (10).

2.2. Vrste kostiju

Kosti prema vanjskom obliku dijelimo na: duge ili cjevaste kosti (*ossa longa*), kratke kosti (*ossa brevia*), pločaste ili plosnate kosti (*ossa plana*), kosti ispunjene zrakom (*ossa pneumatica*), sezamske kosti (*ossa sesamoidea*) te nepravilne kosti koje ne pripadaju ni jednoj prethodno navedenoj skupini (*ossa irregularia*) (8). Svaka kost ima specifičan oblik i strukturu. Oblik kosti zadan je genotipom. Struktura je pod utjecajem vrste i veličine mehaničkog opterećenja. Cjevaste kosti dijelimo na duge i kratke cjevaste kosti, a njima pripadaju kosti gornjih i donjih udova. Promatramo li ljudski kostur u kranio-kaudalnom smjeru dugim cjevastim kostima pripadaju: *humerus*, *radius*, *ulna*, *femur*, *tibia* i *fibula*. Kratkim cjevastim kostima pripadaju: *ossa metacarpi*, *ossa digitorum manus*, *ossa metatarsi* i *ossa digitorum pedis*. Pločastim kostima pripadaju *scapula*, *os coxae*, *sternum* i pločaste kosti svoda lubanje. Kratkim kostima pripadaju *ossa carpi* i *ossa tarsi*. Nepravilnim kostima pripadaju kralješci i kosti viscerokranija, a kostima ispunjenima zrakom pripadaju kosti lubanje koje sadržavaju paranazalne sinuse te pneumatizirani dijelovi temporalne kosti točnije *processus mastoideus* i *cavitas tympani*.

Sezamske kosti nalaze se u mišićnim tetivama, a pripadaju im *patella*, *fabella* te male kosti u tetivama na šaci i stopalu (8).

3. NAČELA RADA 3D SKENERA

Studentska Sekcija za inovacije u medicini pri Medicinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu u procesu digitalizacije kostiju anatomske zbirke koristila je Einscan SE (SHINING 3D, Hangzhou, Kina), trodimenzionalni skener visoke rezolucije koji na temelju fizičkog modela stvara digitalni model (4,11). Uređaj se sastoji od rotirajućeg postolja i glave na kojoj se nalazi projektor i dvije kamere koje su pozicionirane sa svake strane projektora zatvarajući pritom određeni kut. Metodom rotirajućeg postolja uređaj je sposoban skenirati objekte čije su najveće mjere 20×20×20 cm. Objekt se postavlja na rotirajuće postolje, projektor obasjava objekt zadanim uzorkom dvodimenzionalnih geometrijskih oblika koji omogućavaju kamerama da detaljno analiziraju konture objekta naizmjenično osvjetljujući neke segmente objekta, a druge segmente ostavljajući u sjeni. Osim uzoraka svjetla i tame projektor obasjava objekt i spektrom boja kako bi detaljnije ocijenio podudarnost i kvalitetu boje. Dvije kamere postavljene pod međusobnim kutom od 15 stupnjeva sagledavanjem objekta iz dvije perspektive računalnim preklapanjem dvodimenzionalnih snimki u kombinaciji s projiciranim svjetlosnim uzorcima izračunavaju i generiraju konture objekta u digitalnim obliku. Rotirajuće postolje na kojem se objekt nalazi omogućava postupno rotiranje predmeta i sagledavanje sa svih strana po jednoj osi. Standardni kut pomaka iznosi deset stupnjeva što po punom krugu rotacije čini 36 zasebnih snimanja. Objekt kojeg želimo kvalitetno pohraniti kao 3D model na računalu potrebno je snimiti sa svih njegovih strana. Objekt prilikom skeniranja stavimo u početni položaj. Rotirajuće postolje 3D skenera svojim pomicanjem radi rotaciju objekta oko svoje osi. Nakon snimljenih 360 stupnjeva predmeta u početnom položaju, potrebno je ručno okrenuti snimani objekt. Ručnim okretanjem snimanog objekta, u drugoj fazi snimanja, želimo prikazati plohe objekta koje su skeneru u prvom snimanju bile nevidljive. Pomicanjem predmeta iz uspravnog/vertikalnog položaja u vodoravni/horizontalni, skener snimkom dobiva dubinske dimenzije predmeta. Navedeni proces se ponavlja više puta, ovisno o obliku skeniranog objekta. Završetkom snimanja svih ploha, program 3D skenera će sve snimke spojiti u jedan cjeloviti 3D model. Ukupno trajanje jednog snimanja do potpuno generiranog digitalnog modela traje i do sat vremena. Kako kvaliteta konačnog modela ovisi o kvaliteti samog skeniranog objekta, kvaliteti i detaljima njegove površine te njegove stabilnosti tijekom procesa skeniranja, potrebno je da objekt bude stacionaran kako bi se izbjegle pogreške tijekom prikupljanja podataka o objektu (11).

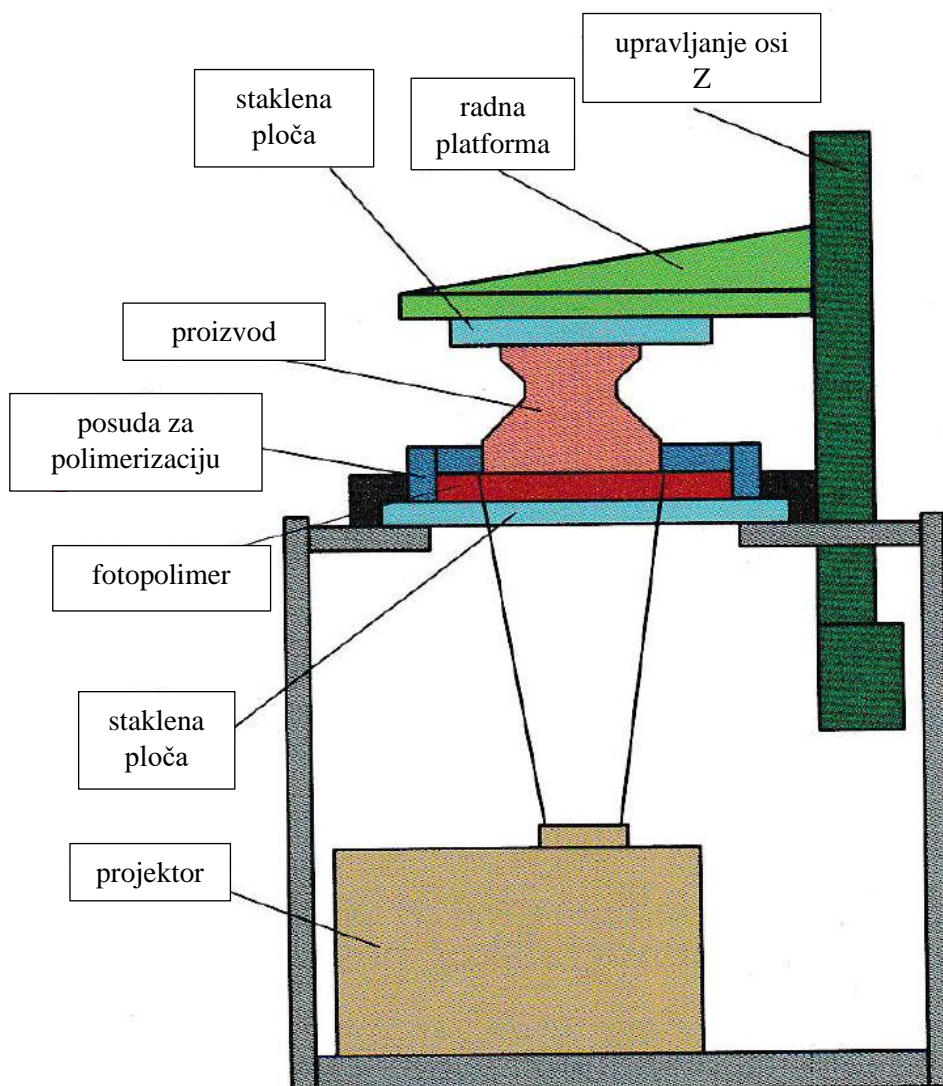
4. NAČELA RADA UREĐAJA ZA 3D TISAK

Uređaji za 3D tisak su radni strojevi koji služe transformaciji digitalnih 3D modela u fizičke objekte. Pretvorbu postižu procesom obrađivanja zadane sirovine vođenim računalno zadanim programom tj.

algoritmom. Tehnologiju tiska, kao i uređaje za 3D tisk, prema sirovini i njezinoj obradi možemo podijeliti na 3 osnovne skupine: SLA (stereolitografija, od engl. *stereolithography*), SLS (selektivno lasersko srašćivanje, od engl. *selective laser sintering*) i FDM (taložno očvršćivanje, od engl. *fused deposition modeling*).

4.1. SLA tehnologija

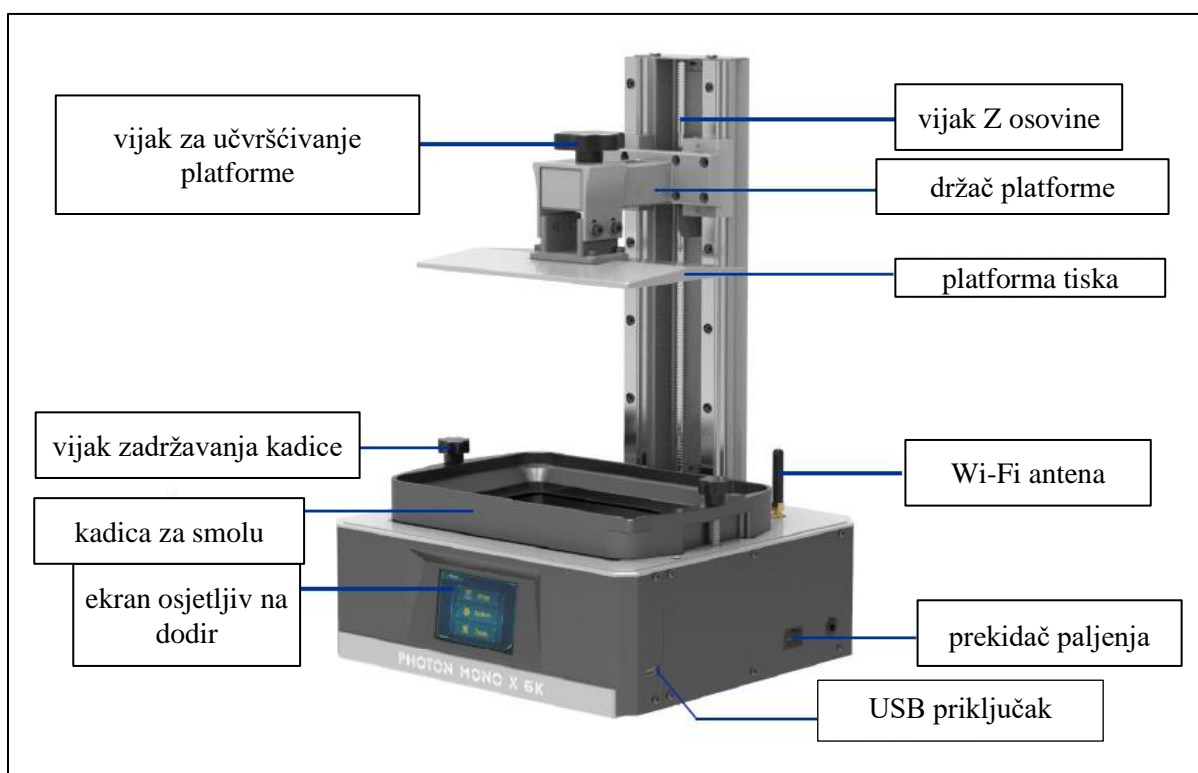
SLA radi na način da tekući fotopolimer obasjava UV laserom kojeg tim procesom pretvara u kruto stanje na platformi uređaja za 3D tisk. SLA uređaj za 3D tisk korišten u izradi koštanih modela anatomske zbirke Medicinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu je Anycubic photon mono X (Anycubic, Shenzhen, Kina) (12).



Slika 1. Prikaz uređaja za 3D tisk, SLA metoda [prilagođeno prema (13)].

4.1.1. Dijelovi SLA uređaja za 3D tisak Anycubic photon mono X

Bazu uređaja čini kućište u kojem se nalazi elektronički dijelovi, upravljačka ploča u obliku ekrana osjetljivog na dodir, Wi-Fi antena, prekidač paljenja i gašenja, USB otvor, dva ventilatora te ploča s UV laserima (12). Iznad ploče s UV laserima nalazi se kadica za smolu s prozirnim dnom. Iznad kadice nalazi se platforma tiska koja je učvršćena za osovinu koja je čini pomičnom u Z ravnini. Rezolucija uređaja za 3D tisak ovisi o gustoći postavljenih lasera u XY osi te o minimalnoj veličini povišenja Z osi. Rezolucija navedenog uređaja za 3D tisak XY osi iznosi 0.050 mm, dok Z osi iznosi 0.01 mm. Maksimalna brzina tiska korištenog uređaja za 3D tiskanje je 60 mm/h (12).



Slika 2. Prikaz Anycubic Photon Mono X, uređaja za 3D tisak [prilagođeno prema (12)].

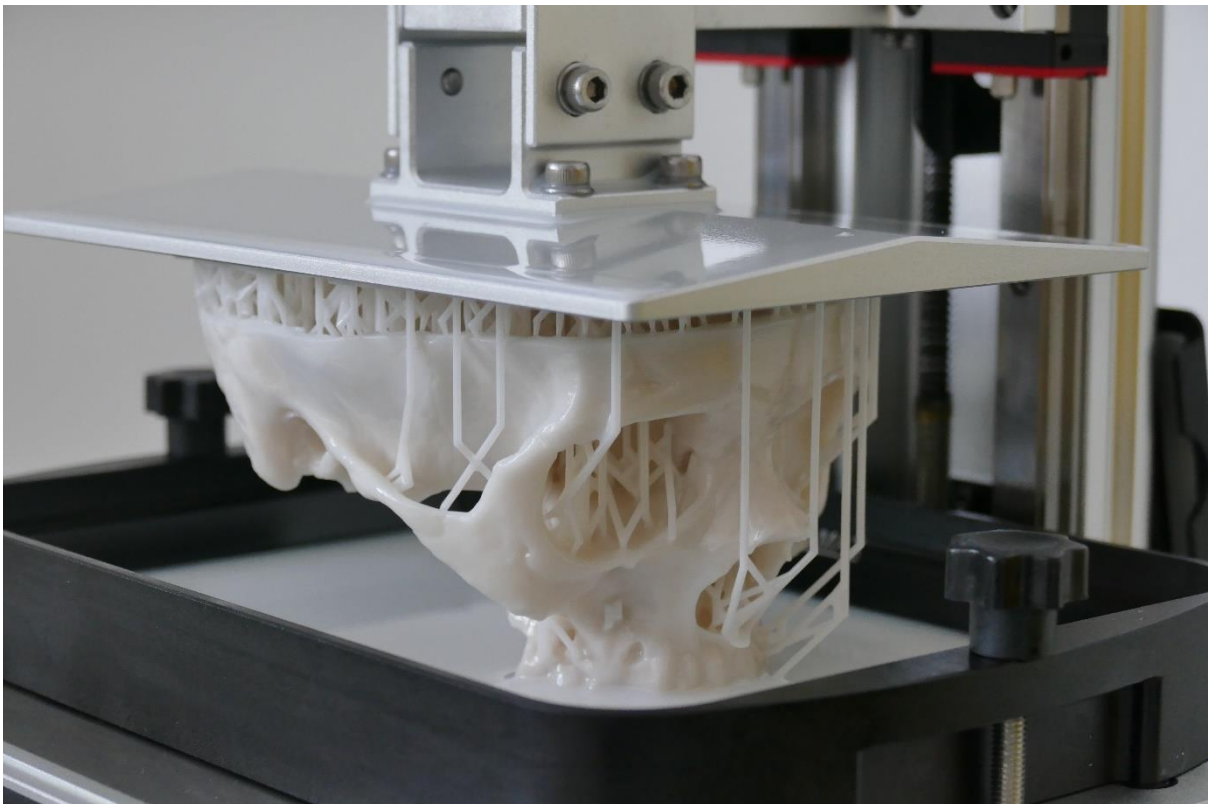
4.1.2. Korištenje SLA uređaja za 3D tisak Anycubic photon mono X

Tekući fotopolimer *Standard white anycubic photopolymer resin* (Anycubic), tj. smola se ulije u kadicu uređaja za 3D tisak. Korisnik odabere digitalni 3D model pohranjen na USB-u uključenom u uređaj za 3D tisak. Dolazi do spuštanja platforme tiska u kadicu sa smolom te se pale UV laseri ovisno o obliku objekta koji treba nastati. UV laseri se zatim upale i zagrijavanjem stvrdnu prvi sloj tekućeg fotopolimera koji se pričvrsti za platformu tiska. UV laseri su postavljeni na taj način da ispunjavaju koordinate u X i Y ravninama modela. Nakon prvog otisnutog sloja, neovisno o tome radi li se o potpornom tisku ili željenom objektu, uključuje se osovina koja platformu tiska podiže u Z ravnini za zadanu visinu. Nakon podizanja platforme, sljedeći sloj objekta nastaje na prethodno otisnutom sloju X

i Y ravnine. Opisani proces nastavlja se sve do formiranja konačnog objekta s pretpostavkom da ne postoji greška u algoritamskom ili tehničkom dijelu procesa (4,12).

4.1.3. Završna obrada dobivenog oblika

Otisnuti objekt po završetku tiskanja ne doseže svoju punu čvrstoću niti ostvaruje maksimalna mehanička svojstva zbog prekratke izloženosti UV zrakama. Otisnuti objekt stoga nakon 3D tiska je potrebno staviti u stanicu stvrdnjavanje (engl. *curing*), gdje se dodatno osvjetljava UV svjetlom. Nakon tog procesa, objekt je potrebno osušiti te je lakše s njega skinuti potporne dijelove procesa tiskanja ili artefakte nastale tijekom tiska (4,12). Na Slici 3 vidljivi su potporni elementi koje je potrebno naknadno ukloniti s otisnutog modela ljudske lubanje.

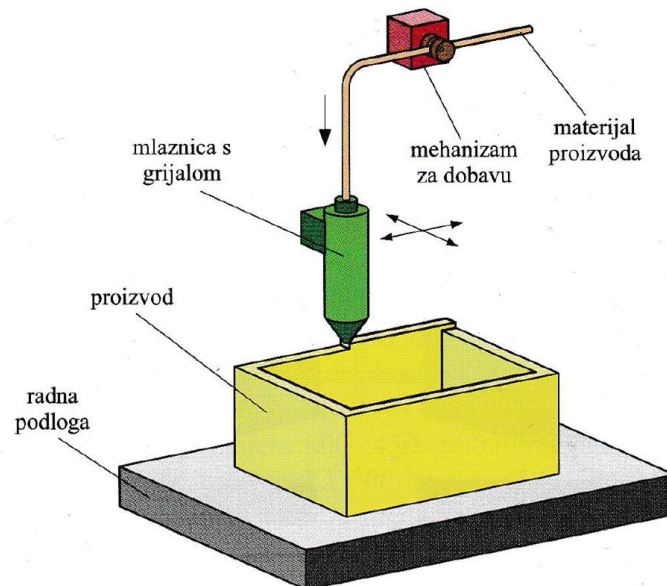


Slika 3. Prikaz otisnute lubanje s potpornim materijalom, odmah po završetku tiska; nalazi se na platformi tiskanja uređaja za 3D tisk Anycubic photon mono X. Model je izradila studentska Sekcija za inovacije pri Medicinskom fakultetu u Zagrebu.

4.2. FDM tehnologija

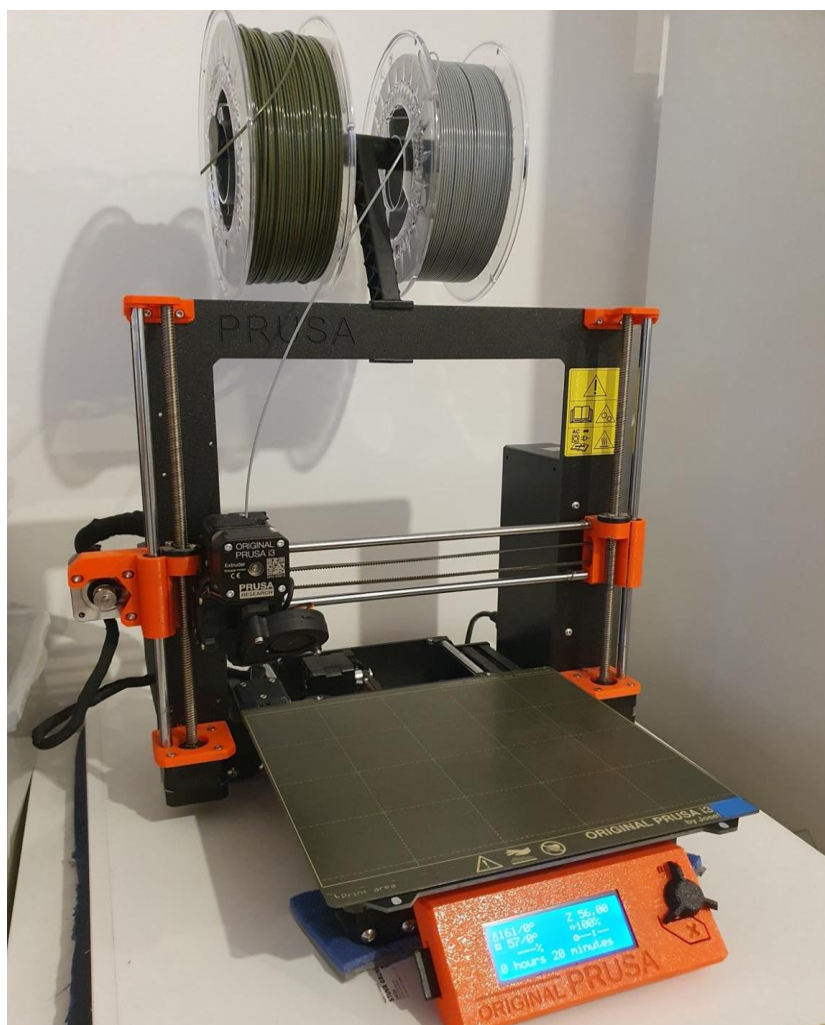
Daleko najpopularnija metoda trodimenzionalnog tiska je FDM metoda. Ona koristi princip pomične glave koja se kreće u tri osi pomoću vrlo preciznih koračnih motora i topeći plastiku (na temperaturi od 220 stupnjeva) tiska materijal sloj po sloj na zagrijanu podlogu. Razlikujemo dvije osnovne

konfiguracije uređaja za 3D tisak ovog tipa, uređaj za 3D tisak s pomičnom zagrijanom podlogom koja se kreće po Y osi i uređaj za 3D tisak s nepomičnom zagrijanom podlogom koja se kreće samo po Z osi što smanjuje količinu kretanja, a time ima svoje prednosti i mane u procesu tiska.



Slika 4. Prikaz rada uređaja za 3D tisak FDM metodom [preuzeto iz (14)].

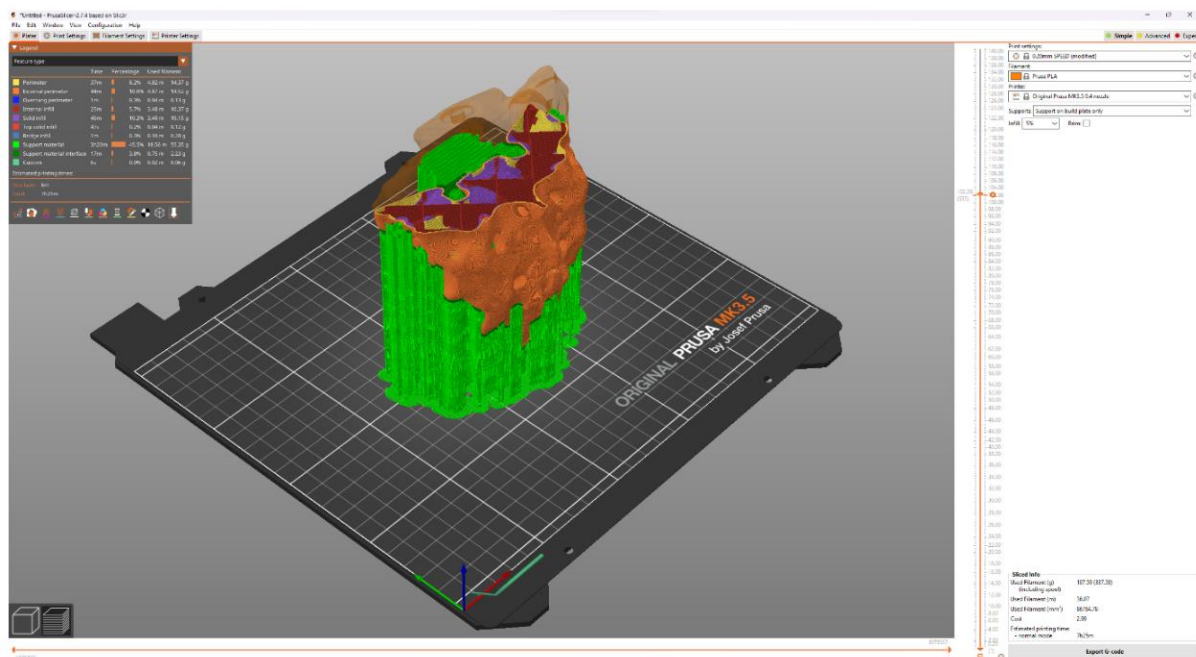
Prilikom izrade modela u ovom radu korišten je uređaj za 3D tisak s pomičnom zagrijanom podlogom po Y osi modela Prusa MK3S+ (Prusa Research, Prag, Češka) (15). Uređaj za 3D tisak izgrađen je od čvrste metalne konstrukcije, glavu uređaja za 3D tisak pomiču precizni koračni elektromotori po X i Z osi dok zagrijanu podlogu pomiču po Y osi. Glava se sastoji od mlaznica uređaja za 3D tisak čiji standardni promjer iznosi 0,4 mm (Slika 5). Temperaturu mlaznice reguliraju grijači element i termistor otpornik, ovisno o vrsti materijala i brzini tiska temperatura mlaznice se održava između 190 i 230 °C (15).



Slika 5. Prikaz uređaja za 3D tiskanje, model Prusa MK3S+; za tisak primjenjuje FDM tehnologiju.

Zadana temperatura održava se principom zatvorene petlje i povratne sprege što je bitno u eliminiranju temperaturnih oscilacija. Iznad mlaznice nalazi se pasivni hladnjak koji sprječava širenje topline konvekcijom na kranijalne komponente sustava što je vrlo bitno za održavanje protočnosti mlaznice. Pasivni hladnjak hlade i električni ventilatori s preciznom regulacijom broja okretaja. Proksimalno od mlaznice nalaze se pogonski zupčanici koji uvode plastičnu nit standardnog promjera 1,75 mm u sustav za topljenje koji čine svi navedeni elementi (15). Zagrijana podloga za tisak sadržava grijače velike površine i termistorski otpornik, osjetljiv na promjene temperature, koji po ranije navedenom principu održavaju temperaturu podloge u rasponu od 50 do 65 °C ovisno o vrsti materijala koji se tiska. Sukladno uputama i o temperaturi pojedinih elemenata i koordinatama iščitanim sa prijenosne memorije, računalo pozicionira glavu uređaja za 3D tisak u trodimenzionalnom koordinatnom sustavu. Uređaj za 3D tisak nanosi precizno reguliranu količinu rastopljenog materijala i slaže ga sloj po sloj, gradeći predviđeni objekt.

Ova metoda tiska zahtijeva primjenu potpornog materijala. Potporni materijal se tiska oko objekta kako bi održao njegovu strukturalnu cjelovitost tijekom procesa izrade preparata. Budući da tisak organskih oblika karakterizira velik broj nepravilnih obliha površina kao što je to u slučaju tiska kosti, na pojedinim dijelovima modela gdje je potrebno otisnuti dio kosti koji u promatranom trenutku još nema kontinuitet s ostatkom modela i s kojim će biti ujedinjen tek u procesu otiska narednih slojeva, potporni materijal je potreban kako bi osigurao kvalitetno prijanjanje za zagrijanu podlogu i kako bi održao dio u fiksiranom položaju sve dok ne uspostavi kontinuitet s objektom u cjelini. Korištenje potpornog materijala konzumira dodatne količine materijala i vremena potrebnog za tisak, ali omogućava tisak neravnih površina i tisak kompleksnih geometrijskih oblika.



Slika 6. Prikaz modela križne kosti u procesu pretvaranja STL datoteke u G kod datoteku u programu PrusaSlicer 2.7.4 (15). Narančastom bojom označeno je tijelo modela, a zelenom bojom označen je potporni materijal.

Nakon što se objekt otisne, potrebno je pričekati da se ohladi do sobne temperature i potom ga je potrebno odvojiti od podloge. Ova metoda ne iziskuje dodatne korake obrade objekta povrh uklanjanja potpornog materijala (4,15).

4.2.1. Materijali FDM

Najzastupljeniji FDM materijali na tržištu su PLA (od engl. *polylactic acid*), PETG (od engl. *polyethylene terephthalate glycol*) i ABS (od engl. *acrylonitrile butadiene styrene*) u obliku plastične niti (filamenta) namotane na kolute. Navedeni materijali se razlikuju po mehaničkim i termoplastičnim svojstvima, otpornosti na kemijske agense i UV/sunčevo zračenje. Dostupni su u širokom spektru boja, a uređaj za 3D tisak ovom metodom može koristiti samo jednu boju bez mogućnosti njihovog miješanja.

Za tisak modela odabran je PLA materijal (Devil Design, Mikolow, Poljska) jer njegova mehanička svojstva zadovoljavaju potrebe modela kostiju, topljenje ove plastike najmanje je štetno za zdravlje i cijena materijala je najpristupačnija (4,15).



Slika 7. Prikaz PLA filameta korištenog u FDM uređaju za 3D tisak Prusa MK3S+.

4.3. Usporedba FDM i SLA tehnologije

FDM i SLA metoda se po mnogočemu razlikuju, a svaka ima svoje prednosti i mane. Tijekom izrade modela, kosti su otisnute pomoću obje metode. SLA metoda tiska iziskuje manje vremena za tiskanje objekta. Sukladno principu rada vrijeme tiska jednog sloja je između pet i deset sekundi. Ovo vrijeme ovisi o vrsti plastike i konstantno je tijekom cijelog tiska, a kako se vrijeme tiska jednog sloja ne mijenja ovisno o veličini objekta, moguće je otisnuti više zasebnih objekata u vremenu trajanja tiska jednog objekta. Za razliku od FDM metode, SLA metoda iziskuje dodatni proces završnog ispiranja i osvijetljavanja UV svjetlosti koji zahtijeva dodatan angažman korisnika i oduzima vrijeme. Obje metode koriste potporni materijal kao metodu strukturalnog podržavanja neravnih površina, no SLA metoda zbog svojeg karaktera zahtijeva znatno manju količinu potpornog materijala. Kako SLA uređaji za 3D tisak nemaju grijaćih dijelova, nema rizika za nastanak opekline prilikom rukovanja, ali je preporučeno dodatan oprez pri rukovanju nepolimeriziranim tekućim smolama zbog potencijalnog rizika interakcije

s biološkim tkivom. Materijal za tisak FDM metodom je jeftiniji i znatno prihvatljiviji za skladištenje i odlaganje otpadnog materijala u pogledu sigurnosti okoliša (4,12,15).

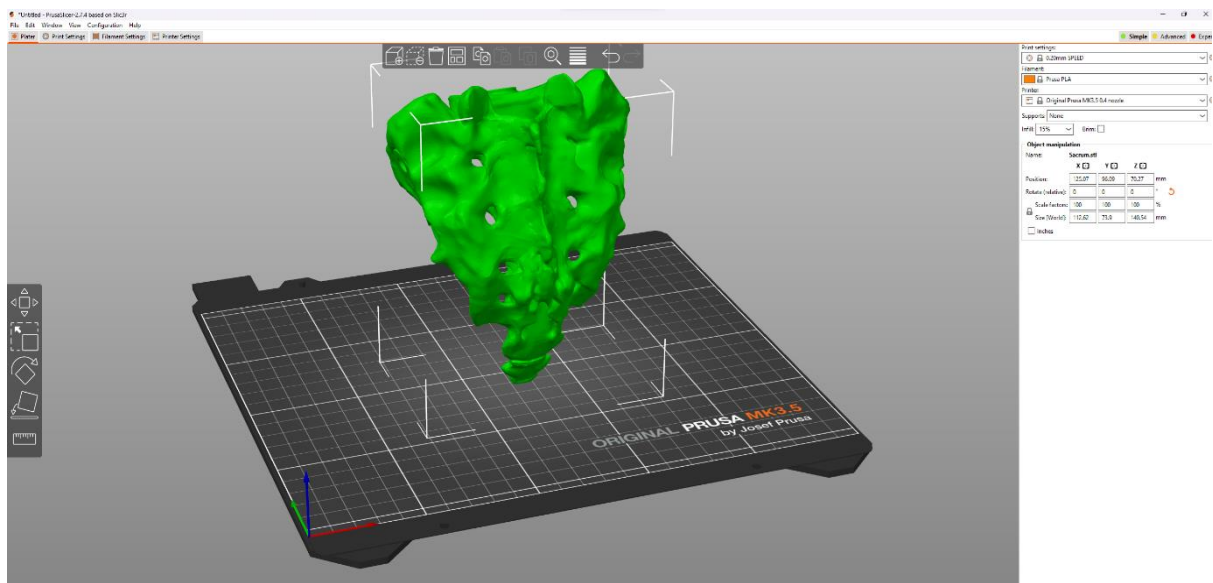
4.3.1 Usporedba metoda tiska na kvalitetu modela

Osim različitih načela rada samih strojeva za 3D tisak i kvaliteta tiska znatno se razlikuje među promatranim tehnikama tiska. Prilikom tiska FDM metodom, na površini modela golim su okom vidljive linije slojeva, plastika je manje gustoće i ispunjenost modela je svedena na minimum stoga su objekti vrlo lagani. Objekti načinjeni SLA metodom vidljivo su sličniji pravim kostima jer golim okom linije slojeva nisu vidljive, a površina objekta je zbog intrinzičnih svojstava samog materijala sličnija pravoj kosti. Također, SLA metoda omogućuje tisak objekata kompleksnije geometrijske strukture i manjih detalja što je idealno za prikaz specifičnih podjedinica struktura pravih preparata kostiju. Oba materijala su iznimno čvrsta i zadovoljavaju mehaničke karakteristike plastičnog edukacijskog modela (4,12,15).

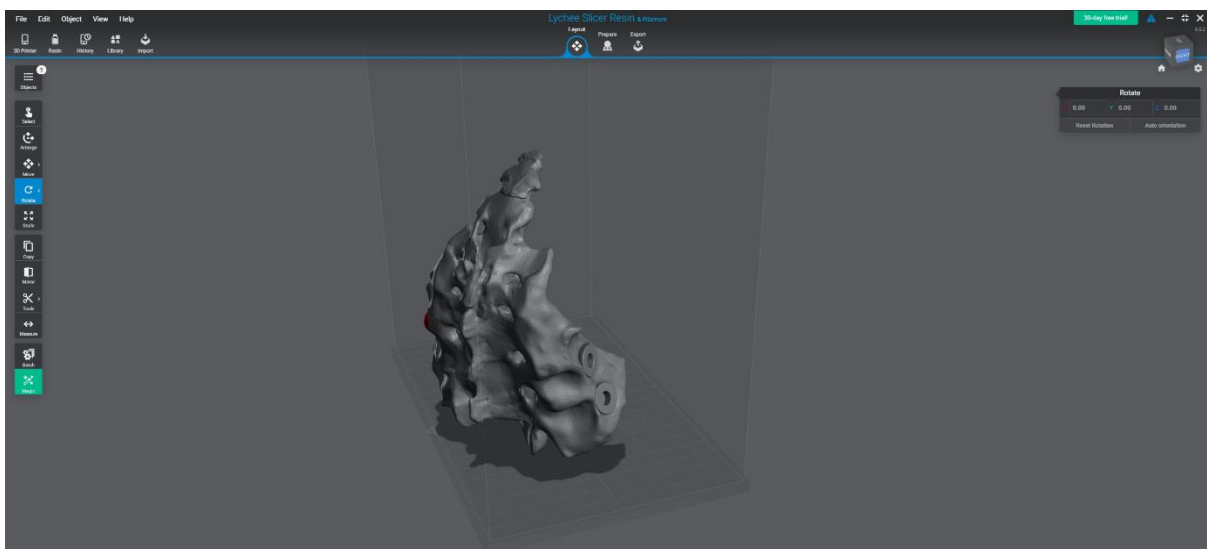
4.4. Priprema digitalnog modela za uređaj za 3D tisak

Digitalni model pohranjen je na računalu u obliku STL datoteke. STL datoteka je format datoteke koji se koristi u 3D oblikovanju i 3D tisku. STL datoteka sadrži informacije o površinama trodimenzionalnog objekta. Informacije o površinama trodimenzionalnog objekta ostvaruju se uz pomoć trokutastih poligona. STL datoteka ne sadrži informacije o boji, materijalu ili teksturi objekta. Stoga je nakon generiranja digitalnog modela, tj. STL datoteke kosti ili nekog drugog željenog objekta, model potrebno pripremiti za tisak u posebnom računalnom programu. Za pripremu modela FDM metode korišten je program PrusaSlicer (Prusa Research, Prag, Češka), a za SLA program Lychee Slicer (Mango 3D, Lyon, Francuska) (16). Navedeni računalni programi prevode digitalni model u skup uputa po kojima strojevi izrađuju objekte. Korisnik unutar programa može podesiti veličinu objekta, debljinu stijenke objekta, postotak unutarnje ispunjenosti i uzorak trodimenzionalne matrice korištene za ispunu unutarnjeg prostora modela unutar vanjske stijenke. Prednost metode unutarnje ispune malim postotkom jest ušteda materijala za izradu uz očuvanje strukturalnog integriteta i mehaničkih svojstava modela. Za potrebe FDM metode na temelju digitalnog modela i zadanih postavki korisnik generira tzv. G kod (skup koordinata i parametara koje je računalo stroja spremno pročitati). Za potrebe SLA metode generiraju se digitalne dvodimenzionalne slike slojeva koje monokromatski ekran oblikuje u snopove svjetla. Glavna razlika u pripremi i izvođenju ovih metoda je razlika u visini pojedinog sloja što diktira brzinu tiska i kvalitetu završnog objekta. Najtanji mogući sloj primijenjen u FDM metodi iznosi 0,1 mm, a najtanji sloj načinjen SLA metodom iznosi 0,01 mm što SLA metodu čini 10× preciznijom i

omogućava tisak manjih i preciznijih detalja. Zaključno, SLA metoda je zahtjevnija i iziskuje određenu razinu obučenosti operatera ali omogućava izradu modela veće kvalitete (4,12,15).



Slika 8. Prikaz modela križne kosti u procesu pretvaranja STL datoteke u G kod datoteku u programu PrusaSlicer 2.7.4 (15).



Slika 9. Prikaz modela križne kosti u procesu modifikacije datoteke za ispis u programu Lychee Slicer (16).

5. PRIMJENA 3D TISKANIH ANATOMSKIH MODELA KOSTI

Održavanje nastave i usvajanje gradiva kolegija anatomije gotovo je nemoguće bez odgovarajućih preparata ili anatomskih modela. Standard anatomskog modela zadan je sadržavanjem svih strukturnih podjedinica koje taj nastavni model prikazuje. Podjedinice nastavnog modela moraju biti dovoljno visoke kvalitete kako bi ih student ulažući proporcionalan trud morao moći prepoznati i usvojiti. Samim

time, otisnuta replika mora biti identična biološkom preparatu kojeg imitira, približna njegovoj veličini, ali zadržavajući jednake omjere dimenzija struktura.

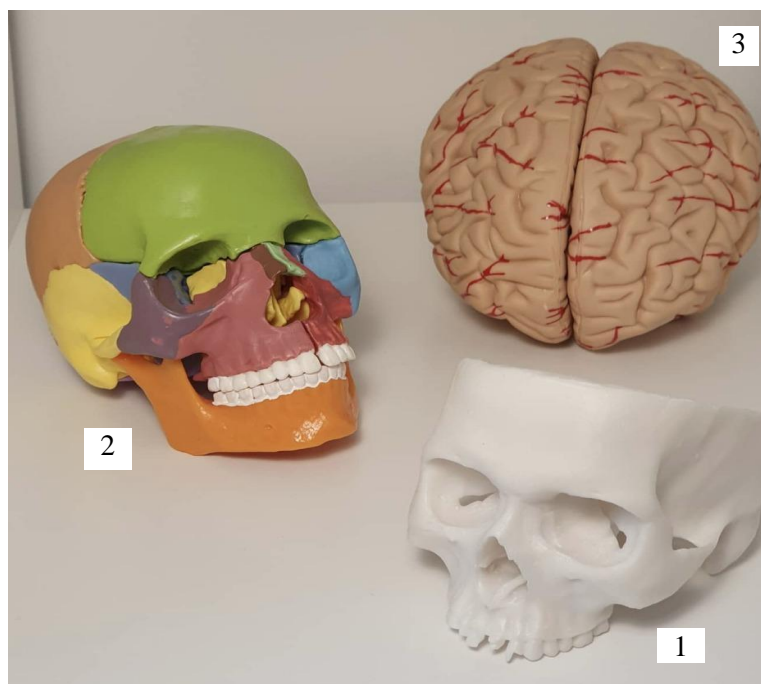
5.1. Izrada plastičnog edukacijskog modela kosti

Proces izrade započinje pregledavanjem zbirke bioloških anatomskih preparata u cijelosti i odabirom idealnog preparata, koji je adekvatno očuvan i sadrži potrebne morfološke detalje. Nakon odabiranja zadovoljavajućeg biološkog preparata iz postojeće zbirke, preparat se trodimenzionalno skenira i tiska. Računalnom obradom skeniranog modela, uređaju se zadaju dimenzije za 3D tisk, dok su omjeri veličina anatomskih struktura očuvani. Navedenim procesom dobivamo strukturno identičan preparat. Prema vlastitoj želji, veličina preparata se može mijenjati, ali su omjeri anatomskih struktura konstantni. Usporedbom biološkog i otisnutog preparata možemo uočiti razliku u masi te u boji modela. Ovisno o metodi tiska i odabranom materijalu replicirani plastični model može biti manje, veće ili jednake mase originalnom prirodnom preparatu. Budući se radi o edukativnom modelu namijenjenom prepoznavanju različitih struktura, masa ne bi trebala imati značajnu ulogu.



Slika 10. Prikaz 3D tiskanih kralježaka koje je izradila studentska Sekcija za inovacije pri Medicinskom fakultetu u Zagrebu. Brojevima 1 i 2 označeni su modeli kralježaka otisnuti FDM metodom, a brojevima 3 i 4 označeni su modeli kralježaka otisnuti SLA metodom.

Ovisno o materijalu, boja otisnutog modela može biti što sličnija biološkom preparatu ili potpuno različita, ovisno o pouci koju se želi prenijeti modelom.



Slika 11. Prikaz 3D otisnutih anatomskih modela lubanja i mozga koje je izradila studentska Sekcija za inovacije pri Medicinskom fakultetu u Zagrebu. Brojem 1 označen je model lubanje otisnut SLA metodom, brojem 2 označen je model lubanje otisnut različito obojanim filamentima FDM metodom, a brojem 3 označen je model mozga otisnut FDM metodom.

Ovisno o načinu i potrebama podučavanja, modeli mogu biti većeg ili manjeg volumena od biološkog originala.

5.2. Primjer očuvanja unikatnih anatomskih primjeraka na modelu klinaste i zatiljne kosti

Pojedini anatomske modeli u zbirci Zavoda za Anatomiju i kliničku anatomiju dr. Drago Perović Medicinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu su neprocjenjive materijalne, nematerijalne, znanstvene i sentimentalne vrijednosti. Zbirka sadrži iznimno rijetke i unikatne anatomske preparate čije bi prikupljanje u današnjim uvjetima bilo gotovo nemoguće. Suvremeni protokoli doniranja tijela za izradu suhih anatomskih nastavnih preparata kostiju lubanje i kompleksni administrativni i etički postupci doniranja bioloških materijala osiguravaju visoke etičke standarde. Međutim, ti protokoli također značajno otežavaju proces izrade nastavnih anatomskih bioloških preparata. Zbog navedenih razloga, unikatni i vrijedni primjerci anatomske zbirke Medicinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu (2) moraju biti zaštićeni za buduće naraštaje. Vrijedne primjerke često nije moguće koristiti u nastavi uslijed rizika od oštećenja. Korištenjem tehnologije 3D skeniranja i tiska, sadašnji i budući naraštaji mogu stjecati svoje znanje na vješto izrađenim anatomskim prikazima. Kako bih oprimjerio ovaj koncept izabrao sam opisati proces očuvanja unikatnog primjerka *os sphenoidale* (klinaste kosti) u spoju s *os occipitale* (zatiljnom kosti). Navedeni prirodni anatomske preparat pažljivo je podvrgnut procesu trodimenzionalnog skeniranja. Skeniran je na postavkama maksimalne kvalitete snimanja kako

bi se snimio svaki detalj preparata. Model je tijekom ranije opisanog procesa skeniranja nekoliko puta manualno rotiran i snimljen iz nekoliko kutova kako bi digitalni model mogao biti generiran u cijelosti. Cijeli proces trodimenzionalnog skeniranja trajao je osamdeset minuta i rezultirao je preciznim digitalnom modelom spremnim za daljnju obradu. Za potrebe trodimenzionalnog tiska odabran je Anycubic photon Mono X uređaj za 3D tisak (Anycubic) i *Standard white anycubic photopolymer resin* (Anycubic) za materijal. Odabir ove metode tiska opravdava potreba za visokom rezolucijom detalja i vjernom replikom teksture što ova metoda izvrsno zadovoljava. Plastična replika otisnuta je za 38 sati uz trošak materijala od 9 eura. Inspekcijom replike utvrđeno je da dimenzijama odgovara originalu i da prikazuje sve edukacijski bitne strukture. Navedeni plastični anatomski model može biti repliciran dvadeset i više puta jednim punjenjem prethodno navedene smole (*Standard white anycubic photopolymer resin*) s ukupnim troškom manjim od jednog tržišno dostupnog plastičnog preparata kosti lubanje. Umnožavanjem ove unikatne replike, čuvamo izvorni biološki preparat, a svakom studentu omogućeno je uzeti repliku u vlastite ruke i savladavati gradivo anatomije bez bojazni za oštećenjem neprocjenjivog preparata. Temeljem navedenog, tehnologija trodimenzionalnog skeniranja i tiska postiže učinak očuvanja anatomske zbirke, edukacije mladih liječnika na optimalnim preparatima u adekvatnim količinama i uz zanemariv trošak u odnosu na biološki preparat. Time moderne tehnologije daju tradicionalnim metodama novi život. Otisnuti modeli anatomskih preparata prikazani su na slikama 12 i 13 iz različitih kutova.



Slika 12. Prikaz modela anatomskeg preparata spojene klinaste i zatiljne kosti, u pogledu odozgor. Model je izradila studentska Sekcija za inovacije pri Medicinskom fakultetu u Zagrebu SLA metodom 3D tiska.



Slika 13. Prikaz anatomskog preparata spojene klinaste i zatiljne kosti, u pogledu od lateralno. Model je izradila studentska Sekcija za inovacije pri Medicinskom fakultetu u Zagrebu SLA metodom 3D tiska.

5.3. Koncept digitalne atomske zbirke modela

Digitalni trodimenzionalni modeli, poput drugih digitalnih datoteka, kao što su fotografija i tekstualna datoteka, mogu biti dijeljeni između računala, tablet uređaja i pametnih telefona. Kako bi digitalna trodimenzionalna datoteka anatomskog modela bila pročitana, nisu potrebni specijalni računalni alati već svako moderno računalo i pametni telefon sadrži računalne alate sposobne za otvaranje navedenih digitalnih datoteka. Poseban naglasak je na pametnim telefonima koji imaju zaslon osjetljiv na dodir koji omogućava izravnu interakciju s trodimenzionalnim modelom. Digitalne datoteke trodimenzionalnih anatomskih modela stoga se mogu lako dijeliti putem interneta. Time se otvaraju dvije inovativne mogućnosti pomoći pri savladavanju gradiva koje su do sada bile nepoznate. Prva mogućnost je stvaranje digitalne zbirke modela koja poput fizičke knjižnice omogućuje pristup i interakciju s anatomskim preparatima. Nakon što se generira digitalni model, on se lako može dijeliti između anatomskih zavoda i medicinskih fakulteta diljem svijeta. Svaka atomska zbirka pojedinog zavoda i fakulteta je vrijedna sama za sebe no mogućnost udruživanja u cjelovitu zbirku kvalitetnih modela omogućuje zajednički napredak cjelokupne svjetske zajednice anatoma i studenata medicine bez materijalnog troška, jer za dijeljenje digitalnih datoteka nema novčane naknade. Druga prednost je laka dostupnost anatomskih modela studentima. Pretpostavljamo da svaki student posjeduje barem jedan uređaj s ekranom osjetljivim na dodir i time ima pristup digitalnoj zbirci modela. Također, dijeljenjem digitalnih modela isti mogu biti i replicirani na uređaju za 3D tisk, a time i fizička zbirka

pojednog fakulteta može biti obogaćena primjercima iz zbirke drugih fakulteta što pridonosi unaprjeđenju edukacijskog procesa.

5.4. Financijska opravdanost izrade plastičnih modela

Tradicionalni plastični modeli se izrađuju tehnikom izlivanja pri kojoj se rastopljena plastika pod tlakom utiskuje u metalni kalup (engl. *injection molding*). Upravo izrada ovih metalnih kalupa diktira visoku cijenu produkcije modela ovom metodom. Trošak izrade jednog modela metalnog kalupa ovisi o vrsti metala te veličini i kompleksnosti anatomskog modela. Priprema samog kalupa i cijeli precizno kontrolirani proces punjenja kalupa pod tlakom je izuzetno kompleksan proces, stoga je izrada svakog kalupa pod pitanjem financijske isplativosti. Izrada jedne replike kosti „*injection molding*“ metodom predstavlja veliki financijski i vremenski utrošak, a zahtijeva specijalizirano postrojenje i stručne operatere te, zbog postizanja financijske isplativosti, zahtijeva izradu jako velikog broja identičnih replika.

Metoda trodimenzionalnog tiska znatno je fleksibilnija. Trodimenzionalnim tiskom nije potrebno izrađivati kalupe već je svaki proces tiska moguće provesti bez dodatnih financijskih troškova povrha materijala modela. Osim toga, moguće je svakim sljedećim procesom tiska izrađivati drugi model po potrebi ili mijenjati oblik i dimenzije preparata što je kod tradicionalne metode nemoguće. Iz svega navedenog jasno je vidljiva financijska isplativost trodimenzionalnog tiska, jer je s istim budžetom moguće producirati visokokvalitetne modele provjerene kvalitete, dimenzija po mjeri i to u dovoljnom broju primjerka. Time bi svaki student imao priliku provesti adekvatnu količinu vremena koncentriran na jedan preparat.

5.5. Koncept fizičke zbirke plastičnih anatomskih modela

Tradicionalnim metodama učenje anatomije se temelji na proučavanju anatomskih atlasa u dvodimenzionalnom obliku. Svjetski poznati atlas anatomije zaslužuju hvalu jer nastoje na pristupačan način prikazati kompleksne anatomske strukture i odnose. Nažalost, zbog razlike u sposobnosti percepcije trodimenzionalnog prostora među pojedincima, fizički opipljivi prikaz kompleksnih anatomskih struktura i odnosa ostaje nezamjenjiv. U sklopu tradicionalnog učenja anatomije, studenti nakon proučavanja anatomskih dvodimenzionalnih atlasa imaju priliku izučavati biološke preparate iz anatomske zbirke. Međutim, ti preparati su često oštećeni zubom vremena i prolaskom kroz mnoge ruke, ili ih je ostalo premalo da bi svakom studentu bilo omogućeno posvetiti dovoljno vremena i pažnje u savladavanju struktura preparata. Primjenom tehnologije trodimenzionalnog skeniranja i tiska otvara se mogućnost osnivanja knjižnice plastičnih replika, gdje bi odabrani anatomske preparati visoke kvalitete mogli biti replicirani u dovoljnom broju primjeraka za sve studente. Također zbog malog troška izrade koji proizlazi samo iz cijene utrošenog materijala, plastične replike anatomskih modela ne

bi morale biti pod jednakom razinom zaštite kao i prirodni preparati. Stoga bi studenti bili u mogućnosti plastične replike posuđivati i iznositi izvan zavoda za anatomiju i time znatno proširili prostornu i vremensku dostupnost vrijednih nastavnih materijala.

6. ZAKLJUČAK

Razvojem i komercijalizacijom metoda aditivne proizvodnje omogućena je njihova široka primjena. Metode 3D skeniranja i 3D tiskanja time su pronašle svoje mjesto i u medicini. Primjena u medicini postoji u obliku edukacije, planiranja i vizualizacije operacija te rekonstrukcije struktura tijela. Plastični anatomske modeli, ovisno o odabiru korisnika, imaju mogućnost identične replikacije izvornog biološkog modela, ali i modificirani prikaz modela. Oba navedena pristupa služe olakšavanju usvajanja gradiva anatomije. Multiplikacija plastičnih preparata ovisi o potrebama katedre, budući su troškovi izrade zanemarivi. Postojanje digitalne anatomske zbirke omogućava navedenu multiplikaciju po potrebi te osiguravaju studentima pristup idealnim anatomske preparatima. Plastični anatomske preparati otporniji su na oštećenja od bioloških, a time jednom izrađeni model može biti u upotrebi dulji niz godina. Digitalizirani i plastični anatomske preparati još su jedan od pomoćnih alata u usvajanju gradiva anatomije. Unatoč navedenom, važno je istaknuti da su biološki anatomske preparati i anatomske sekcija i dalje nezamjenjivi u edukaciji budućih liječnika. Međutim, modeli proizvedeni metodama aditivne proizvodnje imat će sve značajniju ulogu u podučavanju anatomije.

7. ZAHVALE

Zahvaljujem svojem mentoru, prof. dr. sc. Vedranu Kataviću, na njegovoj pristupačnosti, ljubaznosti, strpljenju, stručnom vodstvu i svojoj pomoći kako u izradi ovog diplomskog rada tako i kao mentoru Studentske sekcije za inovacije od njenih početaka do današnjeg dana.

Zahvaljujem dragim prijateljima; Filipu P, Frani F, Filipu Đ, Jakovu D, Svenu H, Frani B koji su i prije položenog prijemnog i kroz cijeli studij bili podrška.

Zahvaljujem dragim kolegama koji su kroz studij postali pravi prijatelji; Robertu M, Mateju M, Petru M, Franu M i Luki T na svim savjetima, razgovorima, pomoći i podršci.

Posebna zahvala dragim kolegama i prijateljima koji su uz studijske obaveze gradili i zajednički projekt Sekcije za inovacije Medicinskog fakulteta: Lovri J, Konradu AK i Luki G.

Posebno zahvaljujem voljenoj Heleni na svom razumijevanju, ljubavi i potpori kroz godine studija.

Najveća i najposebnija zahvala svojim roditeljima, mami Jasnici i tati Vladi, koji su mi pružili sve u životu. Neizmjerne sam im zahvalan na svojem odgoju, strpljenju, razumijevanju i potpori kroz moje odrastanje i studiranje. Najljepša im hvala na toplom domu, svojoj zaštiti, najčvršćem osloncu i svojoj pruženoj ljubavi.

8. LITERATURA

1. Medicinski fakultet. Medicinski fakultet – Sveučilište u Zagrebu 1917-2017: Pećina M, Klarica M, ur. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu – Medicinski fakultet; 2017.
2. Štoković N, Ivanjko N, Bičanić I, Jalšovec D, Katavić V, Petanjek Z. The Zagreb Skull Collection - The unique identified collection of human skulls from fetuses to centenarians. *American Journal of Physical Anthropology*. 2023;182(4):664-85. doi: 10.1002/ajpa.24816
3. Hrvatska enciklopedija [internet]. Zagreb: Leksikografski zavod „Miroslav Krleža“; 2013. – 2024. Aditivna proizvodnja. [pristupljeno 23.5.2024.]. Dostupno na: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/aditivna-proizvodnja>
4. Godec D, Šercer M. Aditivna proizvodnja. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb; 2015.
5. Peng Q, Tang Z, Liu O, Peng Z. Rapid prototyping-assisted maxillofacial reconstruction. *Annals of Medicine*. 2015;47(3):186–208. doi: 10.3109/07853890.2015.1007520
6. Louvrier A, Marty P, Barrabé A, Euvrard E, Chatelain B, Weber E, Meyer C. How useful is 3D printing in maxillofacial surgery? *Journal of Stomatology, Oral and Maxillofacial Surgery*. 2017;118(4):206–12. doi: 10.1016/j.jormas.2017.07.002
7. Šimić Jovičić M, Vuletić F, Ribičić T, Šimunić S, Petrović T, Kolundžić R. Implementation of the three-dimensional printing technology in treatment of bone tumours: a case series. *International Orthopaedics*. 2021;45(5):1233-41. doi: 10.1007/s00264-020-04787-4
8. Schmidt W. Sustav za kretanje - osnove. U: Katavić V, Petanjek Z, Vinter I, ur. Anatomija. Zagreb: Medicinska naklada; 2018. Str 221 – 247.
9. Weaver CM, Peacock M. Calcium. *Advances in Nutrition*. 2019;10(3): 465-85. doi: 10.1093/advances/nmy086
10. Grčević D. Paratireoidni hormon, kalcitonin, metabolizam kalcija i fosfata, vitamin D, kosti i zubi. U: Kukolja Taradi S, Andreis I, ur. Medicinska fiziologija – udžbenik. Zagreb: Medicinska naklada; 2012. Str 955 – 972.
11. Shining 3D. Shining 3D [internet]. Hangzhou: Shining 3D; c2020 [pristupljeno 23.5.2024.]. Dostupno na: https://encdn.shining3d.com/2020/09/EXScan-S_v3.0.0.1manual.pdf
12. Anycubic. Printer 3D [internet]. Rijeka: Printer 3D; c2022 [pristupljeno 23.5. 2024.]. Dostupno na: <https://www.printer3d.hr/wp-content/uploads/2022/03/ANYCUBIC-Photon-mono-X-6K-English-V0.0.1.pdf>
13. Godec D., Šercer M. Aditivna proizvodnja. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb; 2015. Slika 5.6., Postupak Digital Light Processing; str. 66.
14. Godec D., Šercer M. Aditivna proizvodnja. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb; 2015. Slika 5.51., Načela postupka taložnog srašćivanja; str. 102.

15. Prusa J. Prusa 3D [internet]. Prague: PRUSA RESEARCH; c2023 [ažurirano 23.1.2023; pristupljeno 23.5.2024.]. Dostupno na: https://cdn.prusa3d.com/downloads/manual/prusa3d_manual_mk3s_en.pdf
16. Mango 3D. Lychee Slicer [internet]. Mérignac (Francuska): Mango 3D; c2021 [pristupljeno 24.6.2024.]. Dostupno na: mango3d.io

9. ŽIVOTOPIS

OSOBNI PODACI

Ime i prezime: Luka Zvekić

Datum i mjesto rođenja: 6. kolovoza 1997., Zagreb

Adresa: Martina Pušteda 10, 10000 Zagreb, Republika Hrvatska

OBRAZOVANJE

2016. – 2024. Medicinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu

2012. – 2016. XIII. gimnazija Zagreb, prirodoslovno – matematički smjer

2004. – 2012. Osnovna škola Alojzija Stepinca, Zagreb

OSTALE AKTIVNOSTI I NAGRADE

- Dobitnik Rektorove nagrade za društveno koristan doprinos Sveučilištu u sklopu humanitarne akcije „Medicinari velikog srca“
- Dobitnik brončane medalje na 21. međunarodnoj izložbi inovacija 2023. u sklopu studentske Sekcije za inovacije za projekt „Knjižnica anatomskih modela 3D printanih organa“
- Dobitnik brončane medalje na 21. međunarodnoj izložbi inovacija 2023. za projekt „Naočale za slijepce i slabovidne osobe“
- Član vodstva studentske Sekcije za inovacije od osnutka u akademskoj godini 2017/2018 do danas
- Član vodstva studentske Sekcije za anesteziologiju, reanimatologiju i intenzivnu medicinu od akademske godine 2022/2023 do danas
- Aktivni sudionik CROSSa 2024 kao voditelj radionica „To shock or not to shock?“ i „CorTechs: Thinking outside the brain“
- Aktivni sudionik Škole hitne medicine 2023. godine
- Aktivni sudionik ZIMSa kao voditelj „Advanced life support“ radionice
- Završen tečaj „Bronhoskopija u JIM-u“, 30.11.2023., Hrvatskog društva za anesteziologiju, reanimatologiju i intenzivnu medicinu i Hrvatskog društva za zbrinjavanje otežanog dišnog puta Hrvatskoga liječničkog zbora