

# Razvoj ergonomskeg pomagala za učenje sviranja violine primjenom tehnologije povratnog inženjerstva

---

**Knežević, Rebecca**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:593906>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-27**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**RAZVOJ ERGONOMSKOG POMAGALA ZA UČENJE  
SVIRANJA VIOLINE PRIMJENOM TEHNOLOGIJE  
POVRATNOG INŽENJERSTVA**

Rijeka, rujan 2024.

Rebecca Knežević

0035223295

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**RAZVOJ ERGONOMSKOG POMAGALA ZA UČENJE  
SVIRANJA VIOLINE PRIMJENOM TEHNOLOGIJE  
POVRATNOG INŽENJERSTVA**

Mentorica: izv. prof. dr. sc. Tea Marohnić

Komentor: dr. sc. Petar Gljušić

Rijeka, rujan 2024.

Rebecca Knežević

0035223295

Rijeka, 14.03.2024.

Zavod: Zavod za konstruiranje  
Predmet: Konstruiranje i oblikovanje

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Rebecca Knežević (0035223295)**  
Studij: Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva (1010)  
Zadatak: **Razvoj ergonomskog pomagala za učenje sviranja violine primjenom tehnologije povratnog inženjerstva / Design of ergonomic violin learning aid using reverse engineering**

### Opis zadatka:

Na temelju dostupne literature proučiti te opisati stanje tehnike i znanstvena postignuća na području didaktičkih pomagala za učenje sviranja violine. Opisati osnovne principe tehnologije povratnog inženjerstva, posebno 3D skeniranja (digitalizacije) i 3D tiska. Osmisliti i razraditi rješenje pomagala za olakšanje procesa učenja sviranja violine kod violinista početnika. U postupku razvoja rješenja posebnu pažnju je potrebno posvetiti ergonomski ispravnom konstruiranju, odnosno uzeti u obzir položaj tijela, udobnost sviranja, smanjenje naprezanja prilikom sviranja violine i drugo. Prototip razvijenog rješenja izraditi pomoću tehnologije 3D tiska. Za digitalizaciju i 3D tisak koristiti opremu dostupnu u laboratoriju.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanja diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku: 20.03.2024.

Mentor:  
izv. prof. dr. sc. Tea Marohnić

Komentor:  
dr. sc. Petar Gljuščić

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:  
izv. prof. dr. sc. Samir Žic

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija uz navedenu literaturu te stručno strojarsko navođenje mentorice izv. prof. dr. sc. Tee Marohnić i komentora dr. sc. Petra Gljušćića uz glazbeno savjetovanje prof. mr. art. Ines Ane Tomić.

Rebecca Knežević

---

Rijeka, rujan 2024.

## ZAHVALA

Prije svega zahvaljujem svojim mentorima što su prihvatili temu koja obuhvaća i spaja dva meni vrlo draga područja, strojarstvo i sviranje violine, u jednu konstruktivnu cjelinu te što su mi pružili svoje znanje, vrijeme, opremu i dobru volju u procesu izrade završnog rada.

Također, zahvalna sam svojoj nekadašnjoj profesorici violine koja je bila voljna uključiti se svojim glazbenim iskustvom u konceptualno navođenje pri oblikovanju pomagala.

Veliko hvala roditeljima, bakama i stricu što su me strpljivo podržavali tijekom studija te su svojom prisutnošću i bodrenjem doprinijeli mom završetku istog. Posebna pohvala majci i ocu na kreativnim prijedlozima u procesu osmišljanja pomagala.

Zahvaljujem i svim prijateljima, cimerici i dečku na razumijevanju, nezaboravnim trenucima i motivaciji, posebice tijekom pisanja ovog rada.

---

## SADRŽAJ

1	UVOD .....	1
2	DRŽANJE I KARAKTERISTIKE DESNE RUKE VIOLINISTA .....	2
2.1	Glavne tehnike pravilnog držanja gudala .....	2
2.2	Biomehanika šake .....	4
2.3	Stanje tehnike u području didaktičkih pomagala za violinu .....	5
2.4	Priručni prenamijenjeni pribor .....	7
3	OSNOVNI PRINCIPI I KORIŠTENE TEHNIKE POVRATNOG INŽENJERSTVA.....	9
3.1	Proces konstruiranja .....	9
3.2	Uvod u 3D skeniranje .....	10
3.2.1	Priprema objekta za skeniranje .....	11
3.2.2	Prikupljanje oblaka točaka 3D skeniranjem .....	12
3.2.3	Preliminarna obrada ulaznih podataka .....	13
3.2.4	Površinsko omrežavanje .....	14
3.2.5	Naknadna obrada podataka .....	14
3.3	Spoj povratnog inženjerstva i modeliranja .....	16
3.4	Uvod u 3D tisak .....	17
3.4.1	Najčešće korištene tehnologije 3D tiska.....	17
3.4.2	Proces 3D tiska .....	18
4	PRIJEDLOZI RJEŠENJA .....	21
4.1	Ergonomičan prihvat šake.....	21
4.2	Konceptualizacija idejnih rješenja .....	22
4.2.1	Prvo idejno rješenje .....	22
4.2.2	Drugo idejno rješenje.....	23
4.2.3	Treće idejno rješenje.....	23
4.3	Vrednovanje rješenja .....	24

---

4.4	Oblikovanje modela pomagala na temelju najpovoljnijeg rješenja .....	24
5	SKENIRANJE 3D MODELA.....	26
5.1	Korištena oprema za skeniranje .....	26
5.2	Kalibracija.....	27
5.3	Skeniranje modela.....	28
5.4	Obrada dobivenih podataka .....	29
6	IZBOR MATERIJALA.....	31
6.1	Svojstva i vrste polimera.....	31
6.2	Materijali odabrani za 3D ispis .....	33
7	3D TISAK .....	36
7.1	Opis laboratorijskog 3D pisača.....	36
7.2	Izrada funkcionalnog rješenja tehnologijom FDM 3D tiska.....	37
8	UPUTE ZA POSTAVLJANJE POMAGALA.....	40
9	ZAKLJUČAK .....	43
10	LITERATURA .....	45
11	POPIS SLIKA.....	48
12	POPIS TABLICA.....	50
13	SAŽETAK.....	51
14	SUMMARY.....	52



## 1 UVOD

U počecima učenja novog instrumenta bitno je dovoljno rano uvidjeti potencijalne problematične čimbenike kako bi se osiguralo pravilno usvajanje novih vještina. U većini slučajeva taj se postupak provodi zasebno za svaku ruku i prst, primjerice postavljanje osnova obje ruke, lijeve na violini, a desne na gudalu. Takvim je pristupom vrlo lako previdjeti sitne nepravilnosti unutar procesa spajanja odvojeno stečenih znanja, posebice pri samostalnoj vježbi kod kuće.

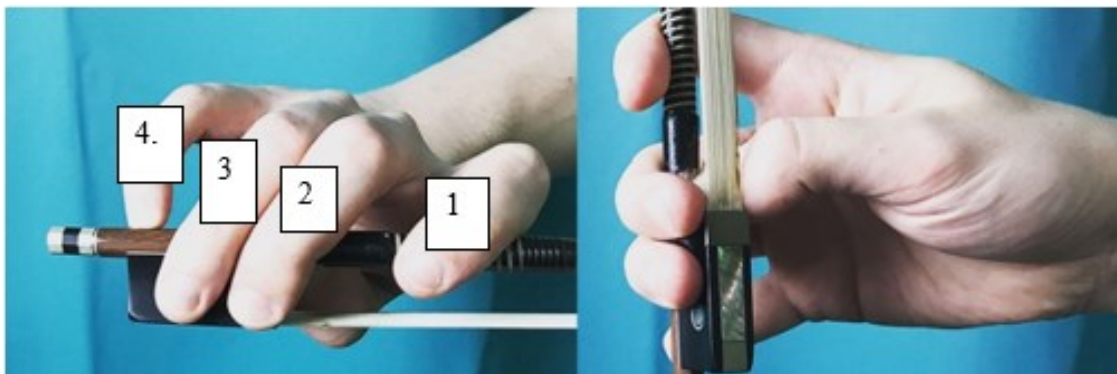
Cilj ovog rada razvoj je idejnog rješenja i ispitivanje ergonomski prilagođenog pomagala za početnike u sviranju violine/viole kako bi im olakšalo prihvat desne ruke pri pravilnom pozicioniranju na gudalo. Na taj način bi se olakšalo vježbanje sviranja uklonivši jednu od glavnih poteškoća u savladavanju upravljanja instrumentom objema rukama. Time bi se početnik mogao više posvetiti vođenju gudala i intonaciji. Takvo pomagalo moglo bi se integrirati i u nastavu kao dodatna smjernica i kada nema stručne osobe koja bi mogla izvršiti nadzor učenja kod pojedinaca. Nakon naučene primjene na školskom satu, kod kuće se početnik se može osloniti na pomagalo za pozicioniranje prstiju i oblikovanja ostatka šake oko gudala. Svakom sljedećom nastavnim cjelinom, nastavnik može procijeniti koje je pomagalo najprikladnije za uviđena problematična područja šake. Nakon određenog perioda evaluacije, moguće je postupno ukloniti pomagalo i nastaviti s održavanjem pravilno naučenog položaja pod nadzorom nastavnika.

Jedna od često korištenih tehnologija povratnog inženjerstva je 3D skeniranje kojim je olakšan postupak digitalizacije te kasnije izrade pomagala za gudalo 3D tiskom opisan u sklopu ovog rada. Prije skeniranja prototipa pomagala, postupak povratnog inženjerstva potrebno je provesti na donjoj trećini gudala, tj. okolnog područja žabice. Time će se uz 3D skeniranu obuhvaćenu površinu za postavljanje pomagala moći izraditi 3D tiskani zamjenski model dijela gudala na kojem je potom moguće raditi s različitim vrstama materijala koje je lako oblikovati, čime će se izbjeći njihov izravni kontakt s gudalom. Pomagalo će zatim biti konstruirano te i pomoću tehnologije povratnog inženjerstva tako da se ručno oblikuje dostupnim podatljivim materijalom. Nakon toga će se dobiveni oblik skeniranjem prevesti u 3D model iz kojeg će se dodatnim uređivanjem omreženog oblika konačno moći tehnologijom 3D tiska proizvesti krajnji proizvod od odabranog materijala koji će omogućiti dovoljnu ergonomiju uz istovremeno poticanje željenih biomehaničkih restrikcija.

## 2 DRŽANJE I KARAKTERISTIKE DESNE RUKE VIOLINISTA

### 2.1 Glavne tehnike pravilnog držanja gudala

Od početaka izrade kako gudačkih, tako i ostalih vrsta instrumenata korištene su razne tehnike učenja pozicioniranja i sviranja instrumenata. Nastavnici violine oduvijek su se oslanjali prvenstveno na izravnu prilagodbu tijela na držanje prvo violine, a zatim i gudala bez dodatnih pomagala. Mađarski violinist i pedagog, Carl (mađ. Károly) Flesch, poznat je po svojoj teorijskoj literaturi i priručnicima za violinu poput Ljestvičnog sustava (njem. Das Skalensystem) kojim je postavio odlične temelje za zagrijavanje lijeve i desne ruke violinista [1]. On ističe dovođenje žice u stanje kontinuirane vibracije uz pomnije definiranje karakteristika tona kao glavni zadatak desne ruke. U usporedbi s lijevom rukom, desna nema izravan dodir s violinom te je pri sviranju potrebno koristiti cijelu ruku od prstiju do nadlaktice. Stoga navodi vođenje gudala kao složenije mehaničko gibanje za razmatranje. Postoje tri glavna načina prihvata gudala prema C. Fleschu: njemačka, francusko-belgijska i ruska škola. Iako uz tu podjelu navodi rusku školu kao najjednostavniju za usvajanje, zbog ustaljenosti korištenja najčešće korišteno je i dalje francusko-belgijsko držanje (*Pogreška! Izvor reference nije pronađen.*) te se na njega odnose daljnja razmatranja u osmišljanju pomagala [2].



Slika 2.1 Francusko-belgijsko držanje gudala s referentnim oznakama prstiju [3]

Spomenuto držanje postiže se tako da se, pridržavajući vrh gudala lijevom rukom, desna ruka primarno postavlja na gudalo polažući sve prste osim palca na štap u opuštenom položaju između prvog i drugog zgloba gledajući od vrha prstiju te puštajući da se ruka iz zapešća blago osloni svojom težinom na gudalo. Kako bi se postiglo osnovno pozicioniranje, potrebno je blago

zaokrenuti strune prema sebi te zaobliti šaku tako da se palac podvuče između struna i štap (Slika 2.2) [4].



Slika 2.2 Dijelovi violine i gudala [5]

Palac se pozicionira tako da dodiruje i štap i žabicu te svojim vrhom i drugi (srednji) prst. Treći prst se potom postavlja uz drugi izbjegavajući pritom grčevito držanje. Time se postiže imitacija zečjih ili psećih ušiju kada se prvi i četvrti prst podignu uz zrak (Slika 2.3) što je obično početna vježba još prije uvođenja gudala.



Slika 2.3 Postavljanje prstiju na gudalo u obliku "zeca" [6]

Uz takav položaj triju prihvatnih prstiju, potrebno je postaviti i ostala dva prsta koji imaju zasebne uloge. Važno je spomenuti da je za početnike, pogotovo one najmlađe koji još nisu razvili precizniji stisak, moguće predložiti pojednostavljenu inačicu postavljanja palca na dno žabice za vrijeme inicijalnog upoznavanja s gudalom za pospješivanje kontrole. Kažiprst se zatim pozicionira na gudalo srednjim zglobovima odvajajući se pritom od već postavljenog drugog prsta. On je zadužen za ravnotežu u navođenju gudala te kao oslonac za poteze u smjeru od vrha prema žabici gudala. Mali prst je posljednji te se postavlja zaobljeno na pregibu osmerokutnog štapa i žabice. Njegova je uloga stvoriti protutežu težini samog gudala te stvara protumoment kažiprstu [4, 6].

## 2.2 Biomehanika šake

Biomehanika je interdisciplinarna znanost koja proučava žive organizme primjenjujući na njih zakone mehanike. Promatra djelovanje sila na tijelo te njima izazvane promjene, kao i međudjelovanje pojedinih dijelova tijela. Ova znanost omogućava detaljnije razumijevanje pokreta te koji su rasponi mogućnosti zdravih dijelova tijela. Često se koristi u medicini i rehabilitaciji tijekom fizioterapije, ali i u drugim znanstvenim područjima poput kineziologije ili strojarstva. Anatomski razmatrano, lokomotorni sustav sastoji se primarno od skeleta koji daje tijelu strukturnu bazu, a uz kosti skeleta su mišići koji svojom aktivnošću osiguravaju pokretljivost zglobova [7].

Kao i kod ostalih aktivnosti, prilikom sviranja aktivno je više skupina mišića. Kontinuiranim ponavljanjem istih pokreta, tijelo se umara te je potrebno osvijestiti koji položaji će umanjiti sveukupan zamor pokreta. Zato je također bitno postaviti šaku u što je moguće prirodniji i ugodniji, a istovremeno pravilan položaj od samih početaka učenja kako zglobovi ne bi nepotrebno bili preopterećeni. Kao dodatna prevencija potencijalnih ozljeda i preopterećenja, dobro je uzeti u obzir da osim vježbi zagrijavanja koje se izvode na violini postoji niz tjelovježbi koje mogu znatno poboljšati iskustvo sviranja. Tijelo se kroz vježbe istezanja i rotacije u svim prostornim ravninama te u ključnim područjima gornjeg dijela trupa te gornjim ekstremitetima može mnogo bolje prilagoditi nizu izazova koji slijede prilikom izvođenja violinskih vježbi i skladbi. U ovom slučaju dobra je priprema ponekad ključna za usvajanje temeljnih znanja, a i u konačnici ostvarivanje potencijala vlastitog umjetničkog izražavanja [8].

Unatoč preporukama nije uvijek moguće uvesti cijeli niz priprema u svakodnevicu sviranja te je zato sigurnija opcija osigurati što povoljniji položaj od trenutka primanja gudala u ruku pa

nadalje. Općenito, optimalan položaj poznat je kao funkcionalna pozicija zgloba (Slika 2.4) u kojoj je fleksorima prstiju omogućen najmanji utrošak energije i minimalno uloženi napor pri zatvaranju šake. Sličnom se položaju teži i u držanju gudala uz nužne preinake zbog lakšeg izvođenja kasnijih tehnika gudala. Stisak šake može se podijeliti u dvije glavne kategorije: snažni i precizni. U snažnom sudjeluje cijela šaka, dok u preciznome palac i ostatak prstiju [9].



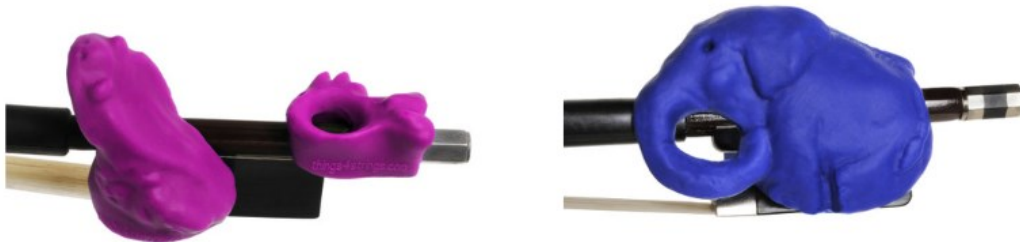
Slika 2.4 Funkcionalna pozicija ručnog zgloba [9]

U početcima učenja držanja gudala česta je pojava pojednostavljenije stiska tako da se precizni približi snažnom hvatu. Međutim, uzimajući to u obzir, cilj je stisak prilagoditi tako da se dodirna površina poveća, ali i istovremeno osigura točan položaj prstiju i dlana. Usto je poželjno šaku oblikovati tako da je što opuštenija jer se tijekom održavanja novog položaja često prisilno pokušava održati stečena pozicija u kojoj učenici ubrzo počnu osjećati trnce i grčeve u mišićima, što je apsolutna suprotnost ciljanoj svrsi učenja prihvata specifične namjene. Uloga prihvata žabice gudala je prvenstveno omogućavanje maksimalne pokretljivosti u izvođenju postojećih tehnika.

### 2.3 Stanje tehnike u području didaktičkih pomagala za violinu

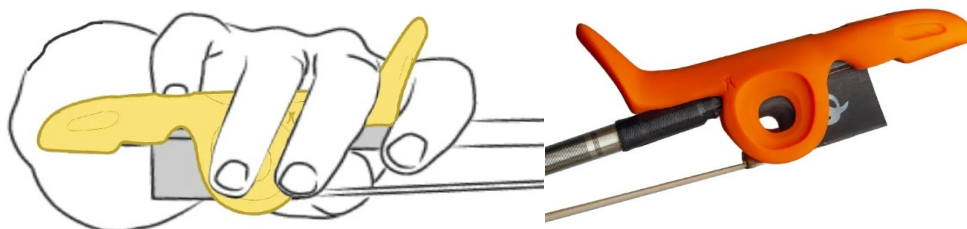
Uz tradicionalne pristupe podučavanja prema potrebi, na nastavnom je satu prilikom prepoznate poteškoće u držanju česta pojava primijeniti priručno pomagalo izrađeno najčešće kao spoj uredskog ili nekog drugog pribora van svoje namjene. Makar su i takve inačice učinkovita privremena rješenja, najčešće su teško samostalno primjenjiva van nastave.

Sličnom mišlju bile su vođene i Ruth i Martha Brons, kći i majka izumiteljice najraširenijih didaktičkih pomagala za gudala violine i violine zvane Bow Hold Buddies [10] te za violončelo zvano CelloPhant (Slika 2.5). Kao i mnogi drugi nastavnici, Ruth je, primijetivši da je mali prst često učenicima odignut u zrak, počela sastavljati improvizirane „kućice zamali prst“ na svojim satovima violine te je nakon nekog vremena počela dodatno koristiti ljepljivu traku za povezivanje palca i kažiprsta. Unatoč njihovoj učinkovitosti, ti su potpornji bili vrlo kratkotrajni te bi se ubrzo počeli raspadati. Stoga je odlučila poraditi na dugotrajnom patentiranom obliku koji će sličiti djeci privlačnim i poznatim figurama kao što su žaba i riba. Kasnije se u suradnji s njenom majkom na sličan način razradila ideja za potporanj u jednom komadu za mlade violončeliste što je također ubrzo popularizirano te u konačnici uvedeno kao sastavni dio njihova nastavnog prostora [11].



Slika 2.5 Bow Hold Buddies (lijevo) i Cellophant (desno) nastavna pomagala [10]

Još jedan kreativan primjer moguće je pronaći kod tvrtke Bowpet. Prema slici vidljivo je da su odlučili privući ljubitelje zrakoplova. Pomagalo je izrađeno od silikona koji je moguće nabaviti u raznim bojama te je prepoznatljiv po svojoj elastičnosti što omogućava jednostavno postavljanje na gudalo svih veličina. Osim toga, pristupačno je svojim oblikom te lakom montažom bez potrebe rastavljanja gudala [12].



Slika 2.6 Bowpet pomagalo u obliku zrakoplova [12]

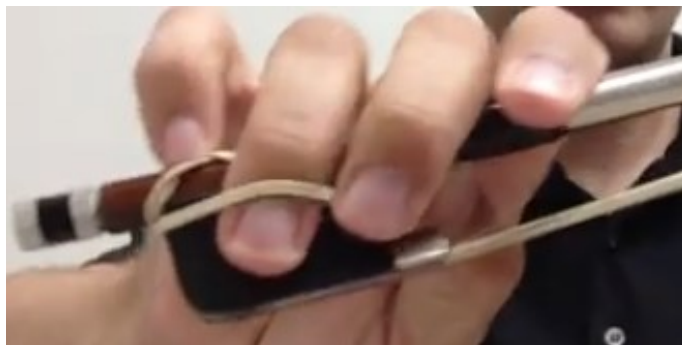
Opciju manjeg volumena nudi proizvođač Meterk [13]. Bez dodatka prepoznatljivog oblika ili mogućnosti izbora boje, ova inačica mnogo je suptilnija na gudalu. Tanke je izrade te je zbog tamne boje teško uočljiva na prvi pogled. Zbog manjeg volumena koji zauzima, daje tek općenite smjernice za pravilni položaj svakog prsta navodeći korisnika provrtima na dodirne točke s gudalom [14].



*Slika 2.7 Meterk pomagalo za korekciju držanja gudala [14]*

## 2.4 Priručni prenamijenjeni pribor

Jedan od priručnih primjera pribora obična je elastična gumica oblikovana u svojevrsno sedlo, tj. uležištenje za treći prst (Slika 2.8). Pruža između ostalog i lokacijsku vodilju za postavljanje četvrtog prsta na gudalo. Pričvršćuje se na samu žabicu i jednostavno je za ukloniti. Time se postiže olakšanje za šaku jer ima dodatnu potporu u preuzimanju težine gudala na sebe te istovremeno osigurava da treći prst ostane obavijen oko žabice, a ne odignut u zraku [15].



*Slika 2.8 "Seat belts" za gudalo [15]*



Daljnje moguće rješenje proizlazi iz pojednostavljene vrste hvata prstima, a to uključuje iskustveno vježbanje pravilnog položaja prstiju u svakoj prilici, uključujući i one bez gudala u neposrednoj blizini. Vježbe se u tom slučaju svode na pronalazak najbližeg dostupnog oblika te korištenje istog kao zamjenske podloge. Primjer takve podloge je kemijska ili tehnička olovka s čepom ili nazuvkom s lisnatom oprugom za prihvat na primjerice papir ili džep. Pritom se nazuvak i čep olovke usmjere uz desni rub dlana, a vrh olovke je na strani palca desne ruke (Slika 2.9).



Slika 2.9 Primjena nazuvka kemijske olovke s drškom za prihvat na papir za vježbu desne ruke [16]

Ovisno o obliku opruge, praktično je utaknuti palac u prostor između samog tijela olovke i opruge čime se postiže zaobljenost prsta, a drugi i treći prst istovremeno obaviju olovku te imaju dodatno uporište kojim mogu bolje upravljati težinom gudala. Kao alternativna verzija, još je lakše postaviti gornja dva prsta na opružni mehanizam kao oslonac, čime se dobiva ravnoteža s palcem, ali malo manje i konačni položaj prstiju u kojem bi trebali biti položeni niže na žabici. Bitno je uzeti u obzir izazove pri prilagodbi preinake u namjeni poput razlike u obliku jer olovci je oblik primarno cilindričan, dok je gudalo mnogokutno te sadrži primjetnu promjenu oblika u području žabice koju je potrebno premostiti pri ovakvom konceptu primjene.



### 3 OSNOVNI PRINCIPI I KORIŠTENE TEHNIKE POVRATNOG INŽENJERSTVA

U ovom poglavlju bit će opisani principi povratnog inženjerstva korišteni u izradi pomagala koji obuhvaćaju 3D skeniranje, obradu podataka te 3D tisak. Te tehnologije korištene su u kombinaciji prilikom izrade dijelova pomoću povratnog inženjerstva počevši od postojećeg proizvoda i ideje za daljnji razvoj istog sve do stvaranja obrađene verzije te u konačnici izrade novog proizvoda.

#### 3.1 Proces konstruiranja

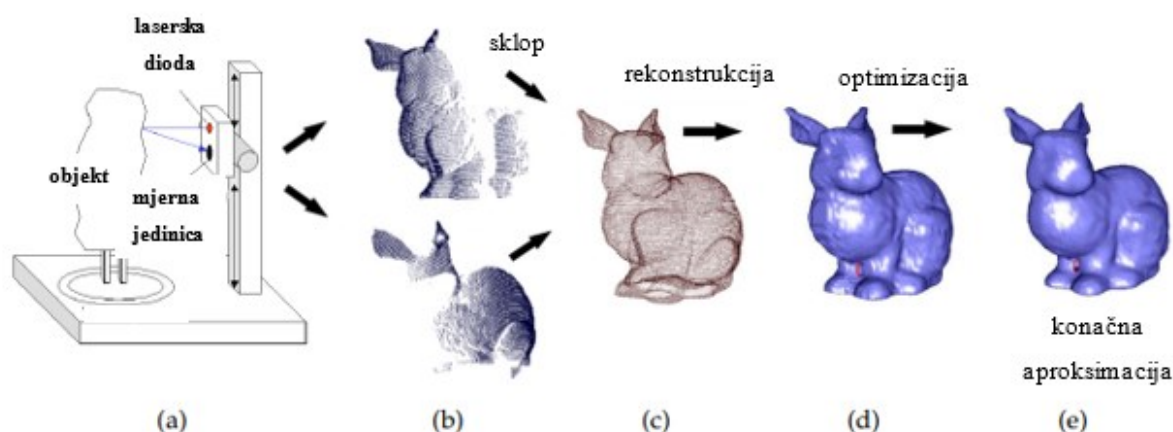
Proces konstruiranja obuhvaća osmišljavanje sustava, komponenata ili procesa koji zadovoljavaju inženjerske izazove i željene potrebe s naglaskom na kreativnost i originalnost. Povratno inženjerstvo usredotočeno je na analizu predmeta imajući u vidu rekonstrukciju izvornih dijelova, nadopunjujući postojeća ograničenja alternativnim inženjerskim rješenjima. Povratno inženjerstvo uvelo se u opću inženjersku primjenu u slučajevima kad je potrebno replicirati ili popraviti istrošenu komponentu kada izvorni podaci ili specifikacije nisu dostupni. Spomenuta tehnologija koristi se i za rekonstrukciju starih istrošenih dijelova [17].

Takvo oblikovanje prati slijed rekonstrukcije odozgo prema dolje (engl. *top down*), dok je klasično konstruiranje proces stvaranja odozdo prema gore (engl. *bottom up*). U procesu povratnog inženjerstva postojeći i ponekad istrošeni dio mjeri se i analizira odgovarajućim tehnikama kako bi se na taj način dobio crtež modela za buduću proizvodnju. Naspram toga, u procesu konstruiranja, crtež modela prvo se izrađuje iz nove ideje, a tek potom slijedi izrada dijela. Prvi korak povratnog inženjerstva je mjerenje i prikupljanje podataka gotovog proizvoda. Te prikupljene informacije zatim se usustavljaju u cjelinu, prije čega bi inženjer trebao steći što više ključnih podataka, uključujući dostupnu dokumentaciju, postojeće tehničke podatke i crteže dostupne za javno korištenje. Također je važno što prije identificirati sve podatke i informacije koje nedostaju. Uspješnost ovog postupka iziskuje dovoljno poznavanje i zadovoljavajuće znanje vezano uz proizvod koji se dobiva povratnim inženjerstvom. Funkcionalnost povratnog inženjerstva većinom je već iskazana u svom dotadašnjem postojanju. Ako se proces povratnog inženjerstva promatra u kontekstu stvaranja alternativnog ili konkurentnog proizvoda, može se razdijeliti prema tri primarne uloge:

- 1) za repliciranje ili proizvodnju izvorne opreme proizvođača čija konstrukcijska dokumentacija nije dostupna;
- 2) za popravak ili zamjenu istrošenih dijelova bez poznavanja izvorne tehničke dokumentacije;
- 3) za dobivanje modela ili prototipa temeljenog na postojećem proizvodu koji bi se koristio za daljnju analizu [17].

U ovom radu, naglasak je na trećoj opciji, odnosno na dobivanju modela 3D tiskom čiji je oblik temeljen na prethodno oblikovanom prototipu pomagala.

Sveukupni postupak reverzibilnog inženjerstva sastavljen je u četiri glavna koraka (**Pogreška! Izvor reference nije pronađen.**): prikupljanja oblaka točaka skeniranjem, preliminarnu obradu (engl. *preprocessing*) ulaznih podataka, površinskog omrežavanja (engl. *meshing*) te naknadna obrada (engl. *postprocessing*) podataka.



Slika 3.1 (a) Prikupljanje oblaka točaka 3D objektom skenerom; (b) isječci skenirani iz različitih pogleda; (c) kombinacija oblaka točaka; (d) omrežavanje; (e) konačan oblik dobiven naknadnom obradom [18]

### 3.2 Uvod u 3D skeniranje

Kao što je navedeno u prethodnom poglavlju, početni je korak povratnog inženjerstva 3D skeniranje objekta. Lasersko 3D skeniranje je tehnologija kojom je moguće zaprimiti podatke o točnim dimenzijama i obliku predmeta koristeći lasersku zraku za stvaranje trodimenzionalnog prikaza istog. Laserskim se 3D skenerima prikupljaju podaci u obliku oblaka točaka kojim se mogu dobiti precizni podaci fizikalnih veličina i složenijih geometrija. Princip rada 3D skenera je

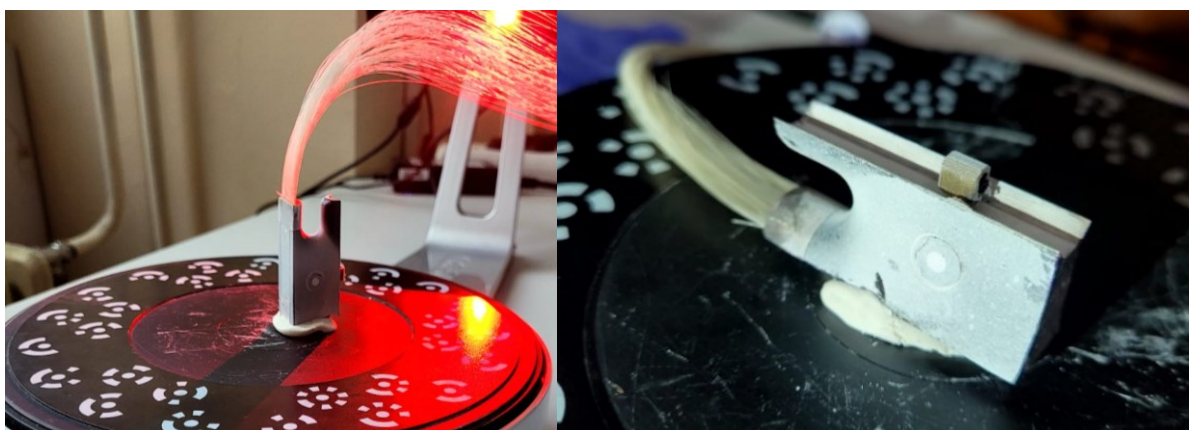
sakupljanje podataka nekog predmeta, okolnog prostora ili osobe. U povratnom inženjerstvu naglasak je stavljen na proučavanje različitih objekata i njihove geometrije potrebne za daljnju konstrukcijsku razradu [18].

Za dobivanje oblaka točaka najčešće su korišteni stacionarni skeneri koji većinom laserski ili na bazi računalne tomografije pod koju pripadaju radiološke metode snimanja najčešće korištene u medicini. Najpoznatiji primjer je CT uređaj pri čemu se slika snima u presjecima kroz promatrano tijelo za dobivanje uvida u prostornu građu u cjelini [19].

Primjer primjene 3D skeniranja strukturiranim svjetlom u ovom poglavlju baziran je na dobivanju računalnog prikaza 3D modela donjeg dijela gudala od kojeg je samo na žabici proveden proces povratnog inženjerstva u kombinaciji s 3D oblikovanjem ostatka pomoću CAD softvera. Korištena oprema detaljnije je opisana u poglavlju 5.1.

### 3.2.1 Priprema objekta za skeniranje

Prije pokretanja procesa skeniranja, bitno je osigurati što bolje preduvjete kako bi se omogućili kvalitetniji rezultati. To uključuje osiguravanje mogućnosti skeniranja u više položaja kako bi se obuhvatila što veća površina objekta. U slučaju prevelikih dimenzija tijela koje su nestabilne za pozicioniranje tijekom rotacije pri skeniranju, nužno je prilagoditi proces ili pronalaskom načina uklještenja ili rastavljanjem na dijelove koji se mogu fiksirati prilikom rotacije te stanu u područje skeniranja poput prikaza rastavljenog gudala uz fiksaciju žabice komadićem gline za okretni stol (Slika 3.2).



*Slika 3.2 Omogućavanje skeniranja u više položaja rastavljanjem gudala na dijelove*

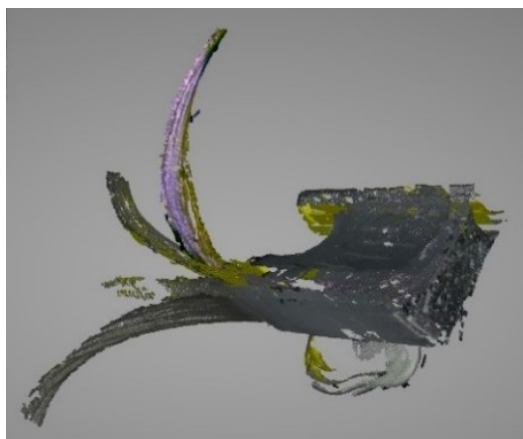
Druga stavka na koju je potrebno obratiti pozornost jest vrsta površine te, u slučaju da je reflektivna ili pretjerano tamne boje, prekriti tijelo za to predviđenim anti-reflektivnim sredstvom poput spreja za 3D skeniranje bijele boje prikazanog na Slika 3.3.



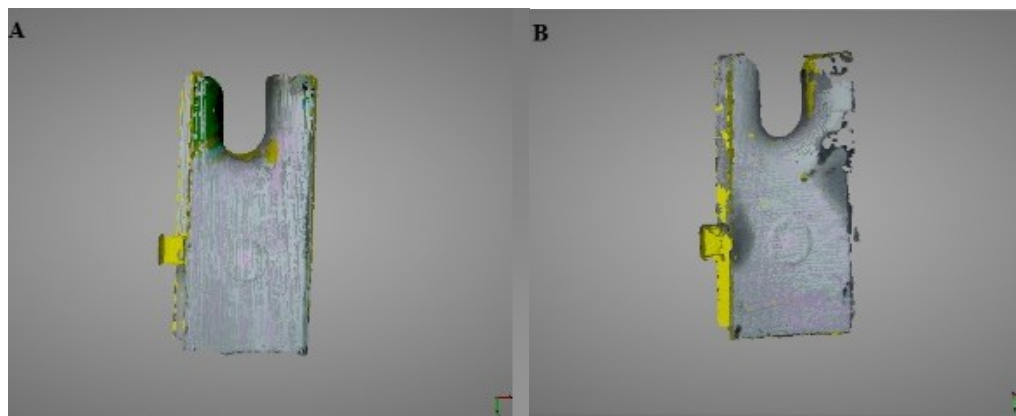
*Slika 3.3 Sprej za oblaganje površina zahtjevnih za skeniranje uz primjer primjene*

### 3.2.2 Prikupljanje oblaka točaka 3D skeniranjem

U slučaju 3D laserskog skenera, primijenjenog u ovom radu, površina se prikuplja jednom ili pomoći više laserskih zraka. Udaljenost je u pritom mjerena vremenskim odmakom ili kutom odbijanja zrake (Slika 3.4). Nakon nekoliko skeniranja iz različitih pogleda, prikupljene točke spajaju se u jedan oblak (Slika 3.5) iz kojeg je potrebno dobiti površinu [20].



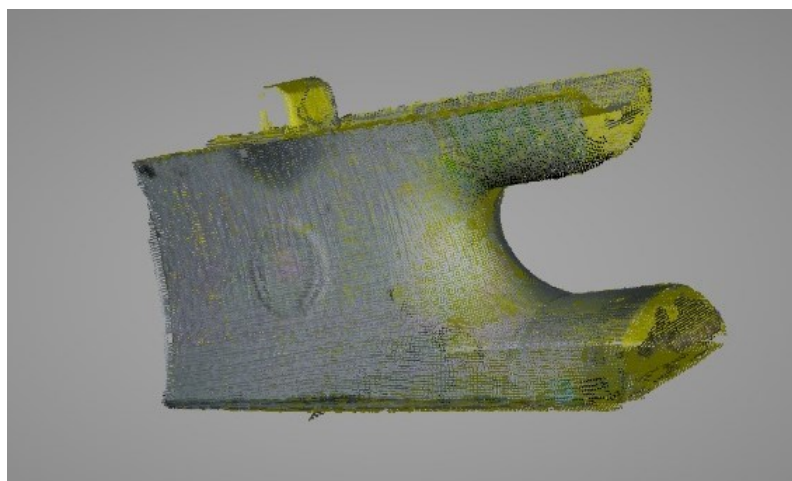
*Slika 3.4 Skeniran i neobrađen oblak točaka*



Slika 3.5 Kombinacija više pogleda skeniranja u jedan oblak točaka

### 3.2.3 Preliminarna obrada ulaznih podataka

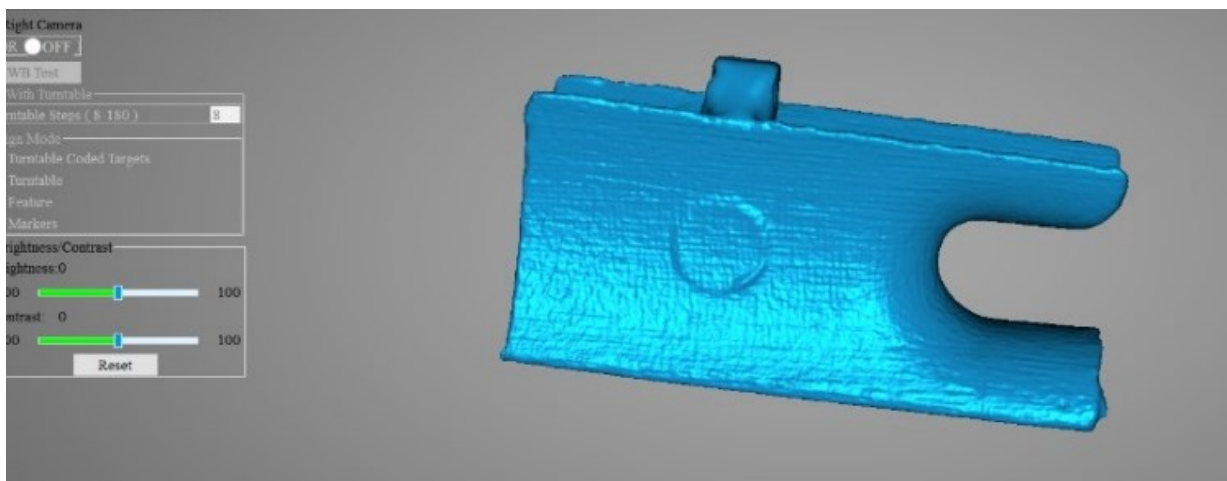
Preliminarna obrada je korak koji je ponekad nužan zbog pogrešaka u prikupljanju podataka, mjestimične razlike u gustoći i suvišno pridodanih točaka. Područja koja su pokrivena višestrukim skeniranjem mogu kao posljedicu imati površinski šum koji je potrebno ukloniti čišćenjem nepotrebnih točaka koje otežavaju aproksimaciju njihovog spajanja u površinsku cjelinu, što je vidljivo na Slika 3.6 u usporedbi s početnim oblakom točaka (Slika 3.4). Na preostalim mjestima niže gustoće zbog provrta ili skeniranja pod kutom različitim od  $90^\circ$ , moguće je iskoristiti parametrizaciju zasebnih skeniranja te interpolacijom dobivenog popuniti potrebne prazne prostore [20].



Slika 3.6 Očišćeni oblak točaka

### 3.2.4 Površinsko omrežavanje

Primarni načini transformacije podataka iz oblaka točaka u CAD model oslanjaju se na stvaranje mreže poliedarskih elemenata ili segmenata koji stanu u model. Metoda trokutastog poliedarskog omrežavanja postavlja se prvo mrežom trokuta kako bi se iz grupiranih točaka dobila uobličena cjelina (Slika 3.7). Povećanjem broja trokuta stvara se sve vjernija verzija površine, ali i istovremeno se, zbog gustoće mreže, povećava veličinu datoteke. Softverska datoteka za triangulaciju obično je zapisana u standardnom triangulacijskom jeziku (engl. *Standard Triangulation Language - STL*), poznatim kao STL format. Optimalni broj trokuta moguće je prepustiti softveru da odredi automatski ili samostalno prilagoditi ovisno o željenoj veličini datoteke [17].

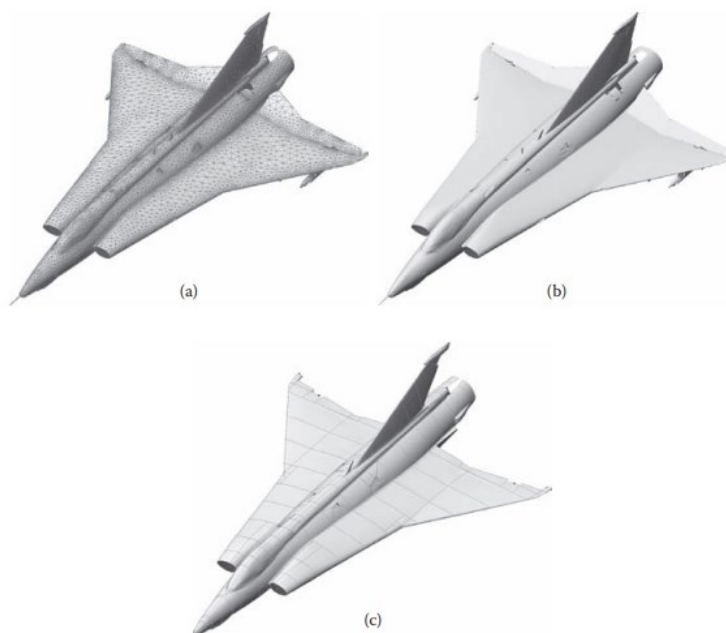


Slika 3.7 Dobiveni omreženi oblik

### 3.2.5 Naknadna obrada podataka

Dobivši redom omreženi oblik u žičanom, površinskom obliku ili nekom drugom matematičkom oblikovanju poput NURBS-a (Slika 3.8), postoje dodatne mogućnosti za daljnju obradu dobivenih rezultata u postojećim softverskim paketima za povratno inženjerstvo.

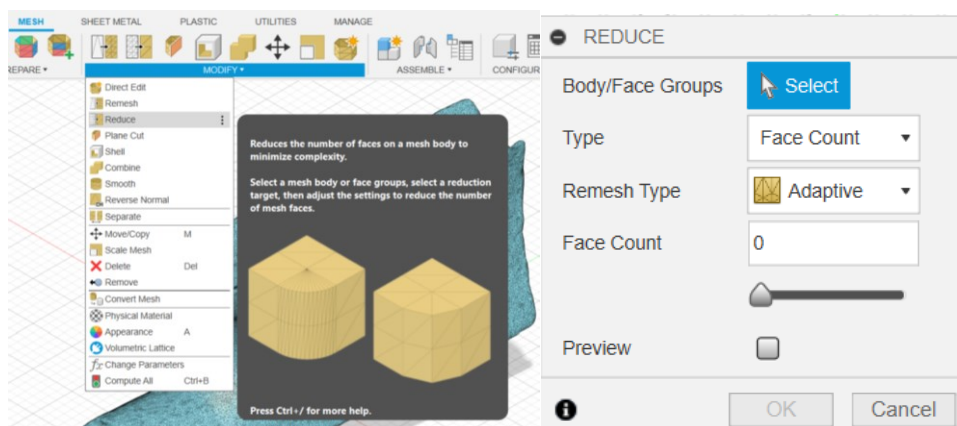




Slika 3.8 Omrežavanje: (a) žičani poligonalni model; (b) površinski poligonalni model; (c) NURBS model [17]

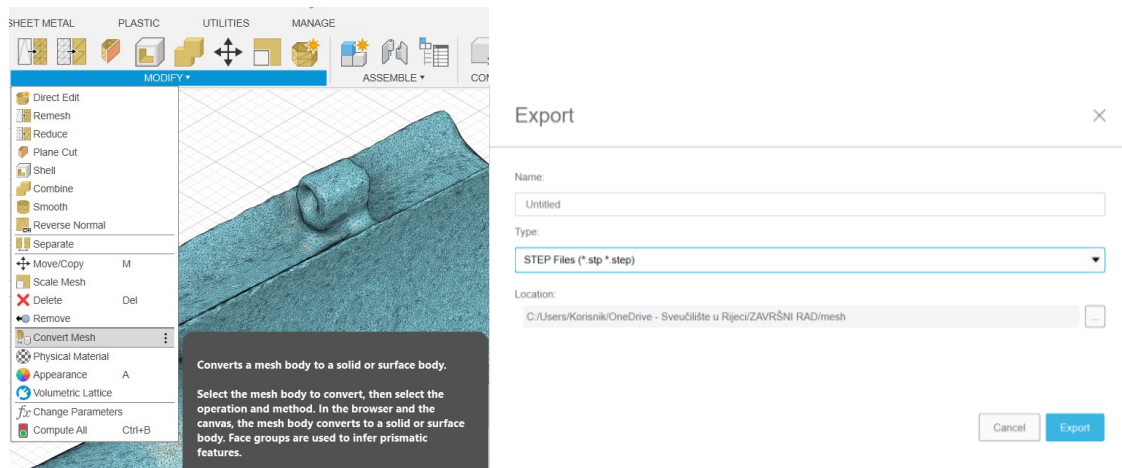
Moguće je po potrebi dodatno ručno redefinirati specifična kritična mjesta poput nepravilnih ili oštih bridova i utora uz koje je najbolje povećati gustoću mreže kako bi alat mogao što točnije aproksimirati željeni oblik. Takve su preinake moguće nakon što se datoteka učita u programu poput Fusion-a 360<sup>®</sup> [21], gdje je moguće nadodati željene referentne površine te pomoću funkcije *Reduce* prilagoditi gustoću mreže (Slika 3.9).

Ako ni to nije dovoljno, za dodatne preinake postoje mogućnosti poput softverskih rješenja koji mogu stilizirati konačan oblik po želji za danu funkciju [17], [20].



Slika 3.9 Naknadna prilagodba gustoće mreže u programu Fusion 360<sup>®</sup>

Kako bi se omogućila daljnja manipulacija omreženog oblika, potrebno je mrežu pretvoriti u čvrsto tijelo (engl. *solid*) koristeći funkciju *Convert mesh* te je potom izvesti u neutralni 3D oblik po izboru (.stp ili .igs) funkcijom *Export* (Slika 3.10).



Slika 3.10 Dobivanje 3D formata za CAD oblikovanje iz omreženog oblika

### 3.3 Spoj povratnog inženjerstva i modeliranja

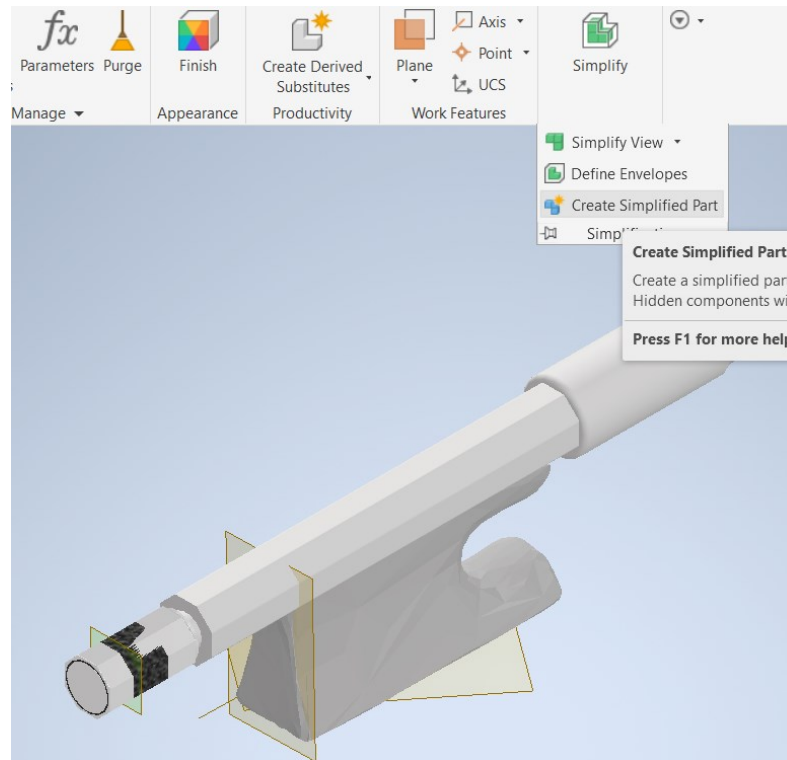
Ovaj korak nije uvijek prisutan, ali je moguće koristiti spoj standardnog 3D modeliranja u CAD programima kao što su Inventor<sup>®</sup> ili Solidworks<sup>®</sup> te ih spojiti s računalnim modelom dobivenim povratnim inženjerstvom. Takav je slučaj nastao pri spoju skenirane te obrađene žabice u poglavlju 3.2 te 3D oblikovanih dijelova sklopa donjeg dijela štapa i vijka koji su konstruirani u programu Inventor<sup>®</sup> prema mjerama dobivenim mjerenjem pomoću pomičnog mjerila (Slika 3.11).



Slika 3.11 Mjerenje štapa i vijka gudala pomičnim mjerilom



Konačan sklop izrađen je u istom softverskom programu nakon uređivanja pojedinih dijelova zasebno kako bi se mogli što vjernije spojiti. Za daljnje pojednostavljenje prije 3D tiska moguće je odabrati opciju *Create simplified part* koja omogućava pretvorbu sklopa (engl. *assembly*) u jednu cjelinu, odnosno dio (engl. *part*) za lakši izvoz u program za pripremu 3D tiska (Slika 3.12).



Slika 3.12 Pojednostavljenje sklopa za izvoz u 3D tisak

### 3.4 Uvod u 3D tisak

Zahvaljujući razvoju tehnologije 3D ispisa mnoge su grane industrije dobile veliku pomoć u ubrzanju i pojednostavljenju svoje proizvodnje. Aditivna proizvodnja (engl. *additive manufacturing*), poznata kao 3D tisak, proces je izrade fizičkih objekata temeljenih na digitalnom zapisu geometrijski oblikovanih modela [22].

#### 3.4.1 Najčešće korištene tehnologije 3D tiska

Uređaji za 3D tisak mogu se podijeliti na otvorene i zatvorene te cjelovite uređaje i komplete za sastavljanje. Razlikujemo više tehnologija 3D tiska, a najčešće su [22]:

- Digitalna obrada svjetlom (DLP)
- Taljenje snopom elektrona (EBM)
- Taložno očvršćivanje fuzijskog filameta (FDM/FFF)
- „Film transfer imaging“ (FTI)
- Selektivno lasersko taljenje (SLM)/selektivno lasersko sinteriranje (SLS)
- Stereolitografija (STL/SLA)

U ovom radu bit će korištena FDM tehnologija koja obuhvaća proces zagrijavanja posebno pripremljenih niti polimernog materijala od kojih se taloženjem više slojeva izrađuje 3D objekt. Polimerna nit, odnosno filament se transportira preko ekstrudera u mlaznicu te se u rastaljenom stanju istiskuje na postolje na kojem se izravno skrućuje. Predmet izrađen na taj način često zahtjeva dodatnu površinsku obradu [22].

### 3.4.2 Proces 3D tiska

Proces 3D tiska sastoji se od slijeda koraka: pripreme 3D stroja i materijala za tisak, učitavanja geometrijskih podataka, pripreme G-koda, pokretanje 3D tiska.

#### A) Priprema 3D pisača i materijala za tisak

Korak neophodan za planiranje 3D tiska odabir je materijala, a time i filameta koji je namijenjen za primjenu odabranog materijala u ovu svrhu. Pripremljeni filament potrebno je smjestiti na za to predviđeno mjesto u 3D pisaču (Slika 3.13).

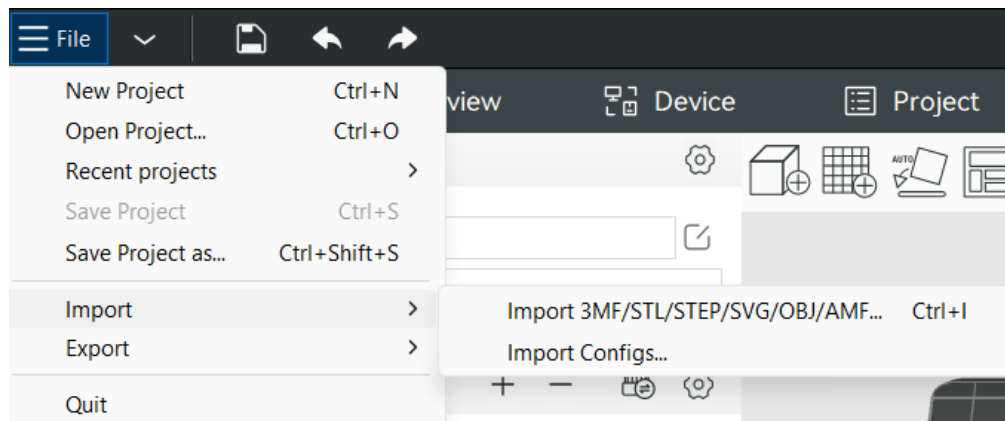


Slika 3.13 AMS (lijevo) i vanjski držač filameta (desno) Bambu Lab X1 Carbon pisača [19]

Kako bi se datoteka objekta mogla učitati potrebno je povezivanje 3D pisača s programom „slicera“ poput Bambu Studio ili PrusaSlicer programa. To je moguće povezivanjem odgovarajućim USB kablom te izravnom poveznicom pisača i programa ili naknadnim ručnim prijenosom podataka putem USB diska ili memorijske kartice.

### B) Učitavanje geometrijskih podataka

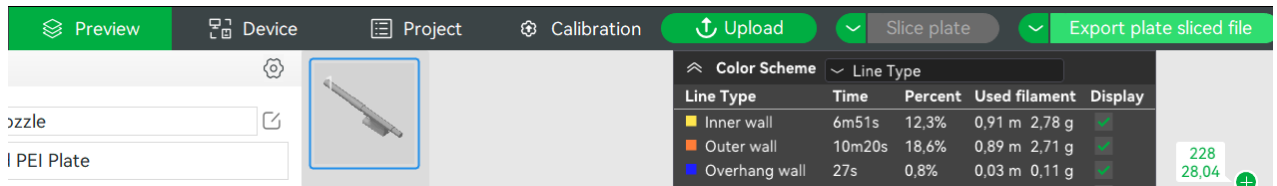
Podaci koji se učitavaju i usmjeravaju do 3D pisača digitalne su datoteke nastale procesom povratnog inženjerstva, CAD oblikovanja ili učitavanjem iz odabranog izvora. One se učitavaju u odabrani program zvan *slicer* u nekoj od kompatibilnih vrsta datoteka (Slika 3.14).



Slika 3.14 Učitavanje datoteke u program za pripremu 3D tiska

### C) Priprema G-koda

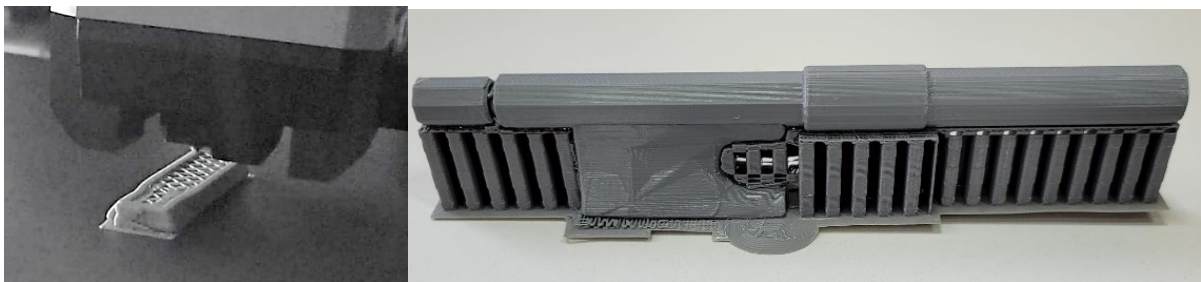
Prije pokretanja ispisa potrebno je 3D pisaču pripremiti upute na jeziku koji može očitati. Zato se digitalizirani oblik spremljen u geometrijskom obliku nekog od dostupnih formata (.obj, .3mf i sl.) prevodi u jezik pisača kojim se raspisuju upute za ispis sloj po sloj navodeći pisač na raslojenu putanju kojom će se postupno postići zadani oblik. Zbog takvog je načina tiskanja ovaj proces nazvan aditivnom proizvodnjom. Nakon odabira postavki tiskanja, potrebno je generirati uvid prikaza procesa pritiskom na *Preview* (Slika 3.15) te u gornjem padajućem izborniku u desnom uglu odabrati opciju izvoza *Export plate sliced file*, čime se pokreće obrada podataka u G-kod spremajući te podatke u novu datoteku.



Slika 3.15 Odabir opcije izvoza datoteke s G-kodom

#### D) Pokretanje 3D tiska

Prije početka izrade objekta, datoteka s G-kodom učitava se na dostupan način na sučelje 3D pisača. Ako nije predodređeno postavkama u G-kod datoteci, potrebno je prethodno ručno zagrijati postolje s grijaćom pločom i mlaznicu. Po potrebi provodi se kalibracija postolja i vrha mlaznice. Zatim se postolje i grijaća glava za ispis s mlaznicom približavaju jedno drugom. Tisak se pokreće kad se rastaljena nit filameta nanese na zagrijanu podlogu postolja stvarajući prvi sloj. Ako je postolje pomično, prije svakog sljedećeg sloja pomiče se za visinu prethodnog prema dolje. Slojevi se zatim nanose jedan za drugim prema zadanim postavkama ispisa postavljajući prema potrebi potporne slojeve od istog ili različitog filameta prema potrebama oblika objekta. Taj proces nanošenja ponavlja se sve dok objekt nije izrađen u potpunosti (Slika 3.16). Nakon uklanjanja gotovog izratka, potrebno je ukloniti postojeći potporni materijal [22].



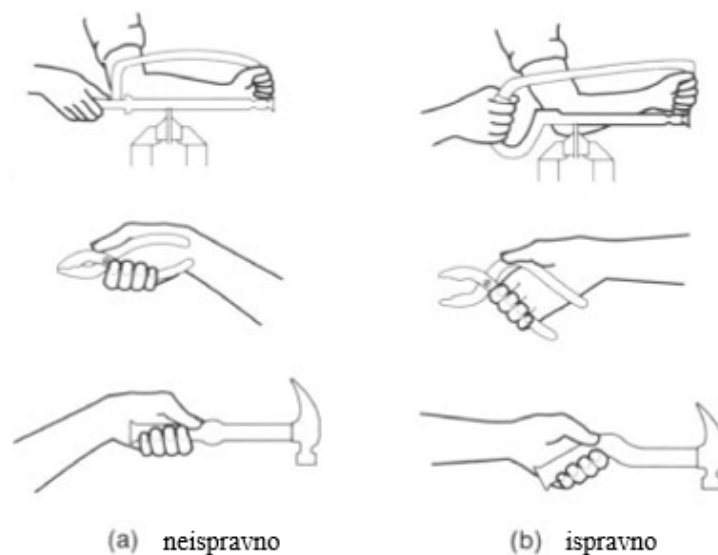
Slika 3.16 Proces 3D tiskanja te gotov izradak gudala s potpornim materijalom

## 4 PRIJEDLOZI RJEŠENJA

### 4.1 Ergonomičan prihvata šake

Ergonomija, kao znanost o radu, stavlja težište na postupke koji prilagođavaju karakteristike rada tjelesnim i psihičkim osobinama čovjeka. To se odnosi na radne površine, strojne dijelove, alate, razne odašiljače, alate i sl. Naziv se uvriježio unutar britanskih psihologa, ali je ova disciplina u drugim zemljama poznata kao „inženjerska psihologija“, što je smisljeno uzevši u obzir da je multidisciplinarna znanost u kojoj dolazi do spoja anatomije, fiziologije, inženjerstva, psihologije i dr. [23].

U ovom slučaju, u području šake i ruku nužno je uzeti u obzir koji položaji omogućuju maksimalnu iskoristivost pokreta za traženu radnju. Stoga se uzima u obzir prilagodba oblika alata i pomagala na takav način da se postigne željeni prihvata šake ili dovoljno bliska inačica izvorišnog oblika, a da suviše ne umara aktivnu grupu mišića ili stvara odbojnost prema radnji. To ne moraju biti velike preinake, nego tek dovoljne da se osjeti pozitivna razlika, kao što je vidljivo na primjerima prikazanim na **Pogreška! Izvor reference nije pronađen.** Lijevi stupac prikazuje ergonomski neispravne oblike, dok su u desnom preoblikovani oblici za olakšano korištenje alata [24].



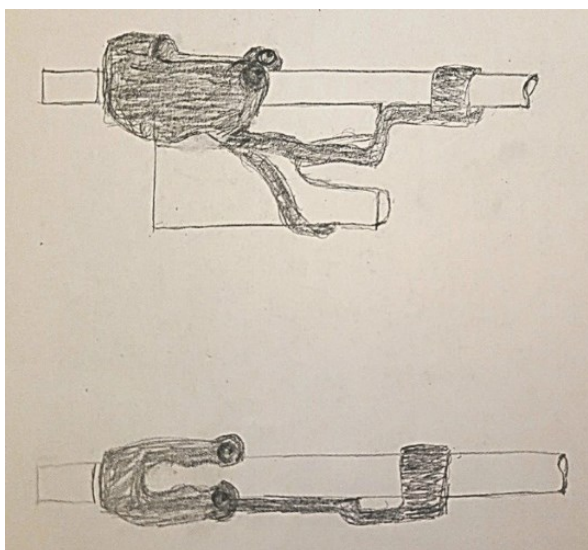
Slika 4.1 Preporuke za oblikovanje alata s prihvatom [24]

## 4.2 Konceptualizacija idejnih rješenja

Uzevši u obzir dosad spomenute postojeće inačice u upotrebi, kao i njihove prednosti i nedostatke, cilj je dobiti funkcionalno pomagalo iz već primjenjivanog situacijskog pribora, ali kao jednoznačan proizvod u svrhu učenja držanja gudala. U nastavku će biti opisano nekoliko idejnih rješenja kao i njihovo vrednovanje.

### 4.2.1 Prvo idejno rješenje

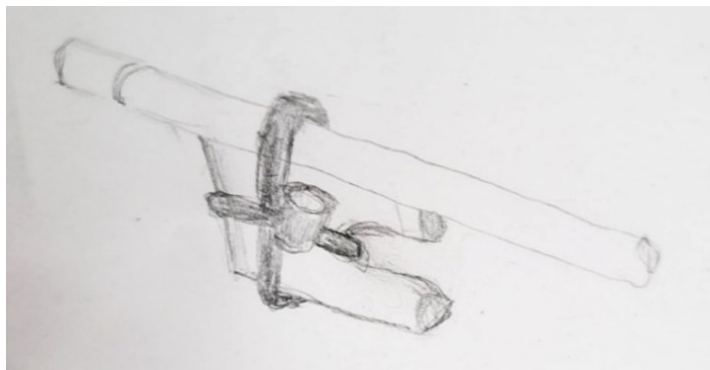
Prvi koncept temeljen je na nazuvku s lisnatom oprugom za papir na kemijskoj olovci. Opis korištenja iste je obuhvaćen u poglavlju 2.4 te je bilo potrebno na što sličniji način primijeniti podršku nazuvka na gudalu. Pri korištenju kemijske olovke za vježbu, glavni je problem previsok položaj drugog i trećeg prsta kad se polože na dršku kao oslonac. Stoga je prije oblikovanja modela bilo važno planski približiti njihovu poziciju sredini žabice. Kako bi se prostor za palac dobro pozicionirao što bliže spoju štapa i žabice gudala na uobičajenom položaju, potrebno je imitaciju opruge kemijske olovke postaviti pokrivajući taj položaj sprijeda s malim odmakom od gudala prema naprijed kako bi se palac mogao smjestiti u međuprostor. Prototip bi imao dva provrta. Jedan uz svaki bok žabice te bi se postavljao rastavljajući gudalo na štap, a osigurao položajno povratkom sklopa u prvobitno stanje gudala. Mogao bi se oblikovati tako da je nalik hobotnici čime bi djeci pružalo dodatnu zabavu u korištenju.



Slika 4.2 Prvo idejno rješenje

#### 4.2.2 Drugo idejno rješenje

Drugi pristup razvoja rješenja proizašao je iz poznavanja primjene raznih tehnika s početnicima na satu te manjka dostupnih didaktičkih pomagala na tržištu usredotočenih na prvenstveno treći prst. Kao što je objašnjeno na početku poglavlja 2.4, spoj trećeg prsta sa žabicom može znatno olakšati držanje gudala. Ako mu se pruži ispravna potpora, može preuzeti težinu gudala na sebe čime se umanjuje grčenje prstiju u strahu od ispuštanja istog iz ruke. U tom bi se slučaju izradio nazuvak za prst slično kao zaštita od uboda pri šivanju te bi taj utor bio povezan dvama nitima (Slika 4.3). Jedna bi bila usmjerena od bočne plohe žabice na strani vijka, pri čemu bi nit na boku služila kao graničnik, te bi se nastavila prema zaobljenoj plohi između struna i štapa.. Druga bi povezivala dno žabice s vrhom štapa te služila za pružanje otpora pri uvlačenju i izvlačenju prsta, ali i omogućila klizno postavljanje na gudalo [25].



Slika 4.3 Drugo idejno rješenje

#### 4.2.3 Treće idejno rješenje

Treća opcija je napraviti sveobuhvatno pomagalo koje bi osiguralo poziciju svih prstiju istovremeno. Za razliku od prethodna dva rješenja, ovaj je najkompliciranijeg oblika jer su za svaki prst potrebna zasebna ograničenja spojena u jedan mehanizam. U ovom slučaju mali prst bio bi uležišten povišenim obručem od vrha štapa gudala kroz koji bi se prst morao provući (Slika 4.4). Obruč bi bio povezan podatljivim mehanizmom s rubnim provrtom obujmljenim oko štapa na području između vijka i žabice. Taj provrt služio bi kao glavni držač za gudalo. U nastavku provrta je postavljena obostrana izdužena masa, slično kao u prvom rješenju koja služi kao graničnik za sprječavanje neželjene rotacije oko osi štapa gudala. S prednje strane izduljene mase je izbočenje



koje služi za obuhvaćanje trećeg prsta te bi se masa nastavljala između drugog i trećeg prsta prema stražnjem dijelu gudala. U nastavku iste mase je utor u obliku obruča za palac pozicioniran sa stražnje strane gudala na dodiru žabice i štapa. Ista masa zatim je izdužena vertikalno prema gore stvarajući luk i na samom kraju izduljene mase još jedan obruč za prvi prst [25].



*Slika 4.4 Treće idejno rješenje*

### 4.3 Vrednovanje rješenja

Sva idejna rješenja konceptualizirana su na način da su u obzir uzeti parametri učinkovitosti, lakoće izrade i postavljanja na gudalo, univerzalnosti primjene za sve korisnike.

Imajući na umu spomenute parametre, najprimjenjivije je treće rješenje te je unatoč svojoj složenosti za izradu najfleksibilnije u primjeni. Za razliku od prvih dvaju rješenja, nije potrebno rastavljati gudalo da bi se moglo primijeniti. U usporedbi s drugim rješenjem koje je moguće koristiti u kombinaciji s već postojećim pomagala Bow buddies, treće rješenje je samodostatno. Izrađeno od dovoljno prilagodljivog materijala moglo bi se koristiti u potpunosti ili djelomično ovisno o potrebi. S obzirom da materijal izdanka ne bi bio uklješten na gudalu, prilagodljiviji je za veći raspon veličina ruku. Dodatna prednost prvog i trećeg rješenja jest prilagodba u zabavna oblik za djecu. Prvi koncept je moguće oblikovati poput hobotnice, a treći u oblik slonovske glave.

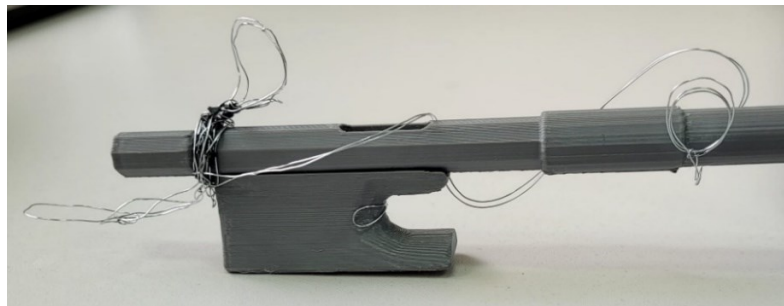
### 4.4 Oblikovanje modela pomagala na temelju najpovoljnijeg rješenja

Zbog osjetljivosti gudala, prije početka oblikovanja plastelinom i glinom bilo je potrebno napraviti proces povratnog inženjerstva za žabicu i 3D oblikovanje dna gudala na kojem bi pomagalo kasnije bilo pozicionirano. Taj postupak opisan je u poglavljima 3.2 - 3.4.



Nakon stečenih konceptualnih ideja, potrebno ih je materijalizirati na takav način da je oblikovani model moguće dovoljno stabilno postaviti na okretni stolić za 3D skeniranje. S obzirom na kombinaciju oblika gudala i ergonomskih zahtjeva prilagodbe šaci, najjednostavnije oblikovljiv materijal jest glina ili plastelin. Odabran je plastelin za postavljanje temeljenog oblika iz kojeg će se kasnije moći digitalizirati krajnji proizvod zbog lakšeg procesa oblikovanja. Iako je glina bolja jer nakon perioda sušenja zadržava svoj oblik, pri izradi tankih izdanaka često dolazi do pucanja što ju čini prekrhkom za uklanjanje s modela gudala.

Zbog velike podatljivosti materijala, potrebno je stvoriti prvobitni temelj na koji će plastelin biti postavljen te će zajednički moći održavati željeni oblik. Za bazu odabrana je aluminijska žica od 0.3 mm koja je također lako oblikovljiva, ali kruća te time otpornija na deformaciju.



*Slika 4.5 Žičana baza za model pomagala*

Žicu je potrebno oblikovati što bliže tiskanom modelu gudala prateći pritom predviđeni položaj svakog prsta (Slika 4.5).

Nakon toga slijedi oblaganje žice plastelinom te oblikovanje plastelinskog modela pomagala na pomoćnom modelu gudala. Nakon dobivenog željenog oblika, potrebno je pažljivo ukloniti plastelinski model s baze gudala pokušavajući ne narušiti dobivene dimenzije (Slika 4.6).



*Slika 4.6 Ožičeni model pomagala oblikovan od plastelina sa i bez oslonca na model gudala*

## 5 SKENIRANJE 3D MODELA

U ovom poglavlju bit će opisan proces skeniranja prototipa pomagala za desnu ruku pri učenju držanja gudala violine s ciljem dobivanja 3D CAD modela, koji će poslužiti za daljnju razradu i izradu funkcionalnog pomagala.

### 5.1 Korištena oprema za skeniranje

Za proces skeniranja postojećeg dijela korišten je Einscan-SP skener [26] s okretnim stolićem dostupnim u Laboratoriju za povratno inženjerstvo na Tehničkom fakultetu u Rijeci (Slika 5.1).



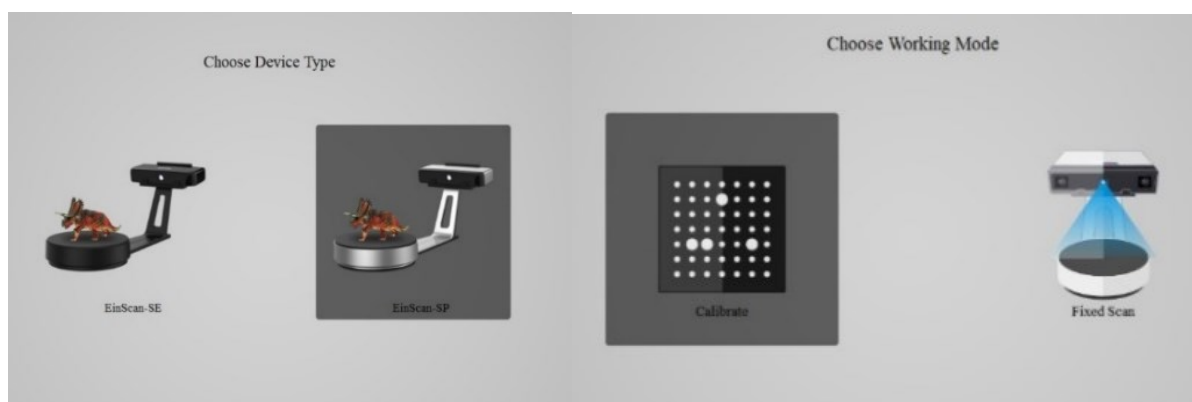
Slika 5.1 Einscan\_SP V2 3D skener[26]

3D skener obuhvaća minimalan volumen dimenzija 30 x 30 x 30 mm te maksimalan 200 x 200 x 200 mm u slučaju korištenja okretnog stola, a čak 6 puta više bez postavljanja na stol. Može se koristiti uz referentne markere koji olakšavaju pozicioniranje više oblaka točaka u jedan zajednički. Brzina jednog skena je manja od jedne sekunde te je omogućeno skeniranje površinskih karakteristika (engl. *texture*) promatranog tijela. Izvor snage skenera je 40 W, a maksimalni kapacitet opterećenja stolića je 5 kg. Podržani formati spremanja datoteka su .obj, .stl, .3mf, .asc te .ply [26].

## 5.2 Kalibracija

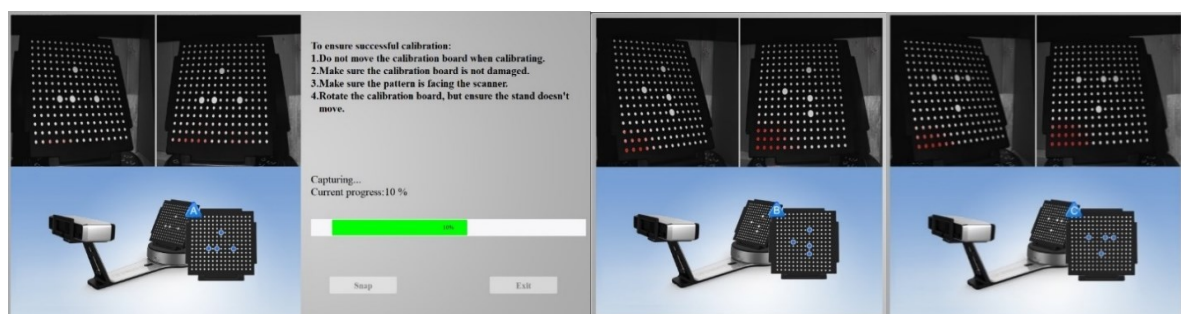
Prije skeniranja potrebno je provesti kalibraciju skenera kako bi se osigurao što vjerniji prikaz konačnog oblika. Preporučljivo je provesti kalibraciju prije svakog novog procesa skeniranja kako bi se isključili utjecaji okolnih uvjeta proučavanog primjerka poput različitih svjetlosnih izvora i promjene okruženja ili udaljenosti i pozicije kamere od stolića na koji se postavlja predmet [27].

Za početak potrebno je na početnom sučelju softvera Einscan-S odabrati odgovarajući skener te u sljedećem koraku sliku ploče za kalibraciju (Slika 5.2).



Slika 5.2 Opcije početnog sučelja Einscan programa za pokretanje kalibracije

Potom se ploča za kalibraciju postavlja na okretni stolić u početnu A poziciju (Slika 5.3) te se nakon gotovog punog okretnog kruga kalibracije taj postupak ponavlja još dva puta za B i C poziciju rotirajući ploču u smjeru suprotnom od kazaljke na satu, nakon čega je kalibracija upotpunjena.



Slika 5.3 Pozicije ploče (A, B i C) tijekom kalibracije Einscan-SP skenera

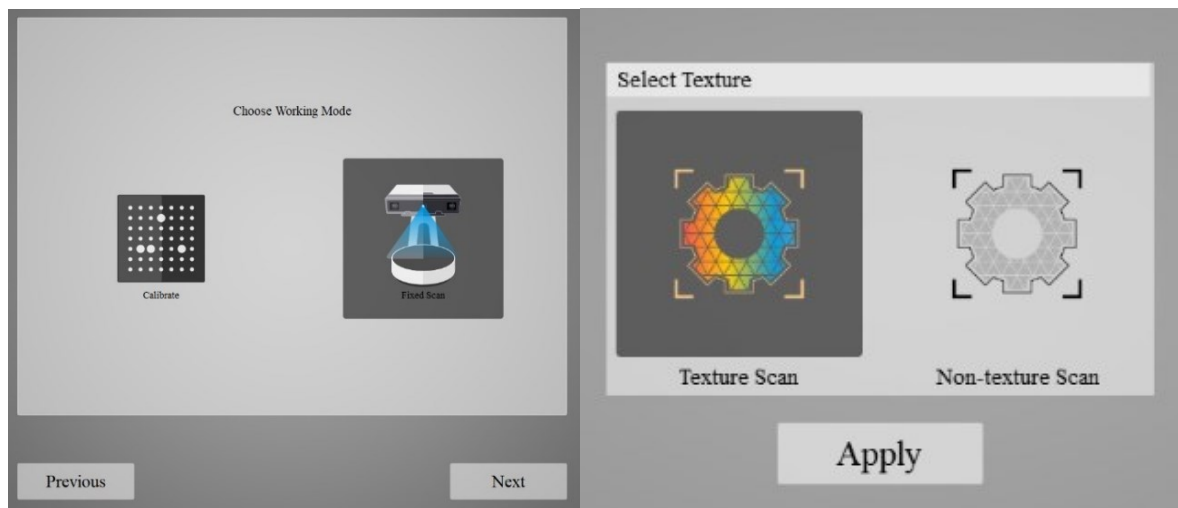
### 5.3 Skeniranje modela

Postupak skeniranja počinje postavljanjem promatranog modela na okretni stol (Slika 5.4).



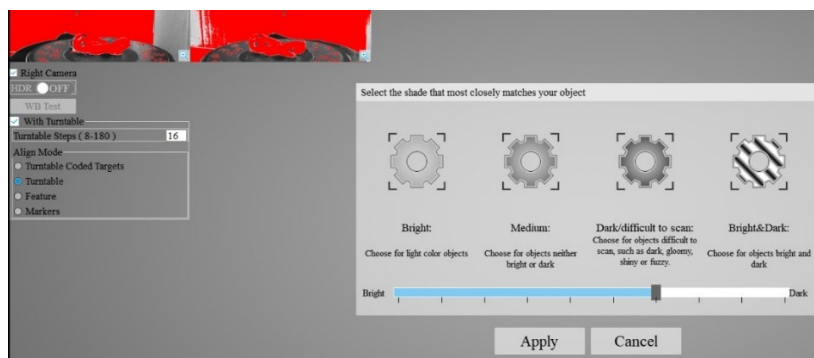
Slika 5.4 Postavljanje oblikovanog modela pomagala na okretni stol

U softveru se odabire opcija početnog sučelja *Fixed scan* te zatim vrsta površinske koju želimo postići, u ovom slučaju je to opcija *Non-texture scan*.



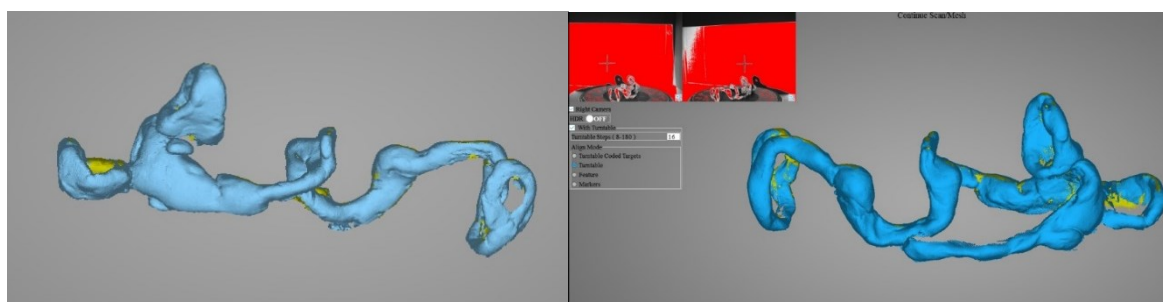
Slika 5.5 Postavljanje početnih opcija za skeniranje

Odabravši početne postavke, nužno je prilagoditi sljedeće opcije specifičnom komadu koji se obrađuje. Pomicanjem u izborniku moguće je odabrati po vlastitoj procjeni i slici kamere skenera koja kategorija nijanse je u pitanju, tj. kao kakva je najbolje prepoznata uređajem.



Slika 5.6 Prilagodba nijanse skeniranog modela

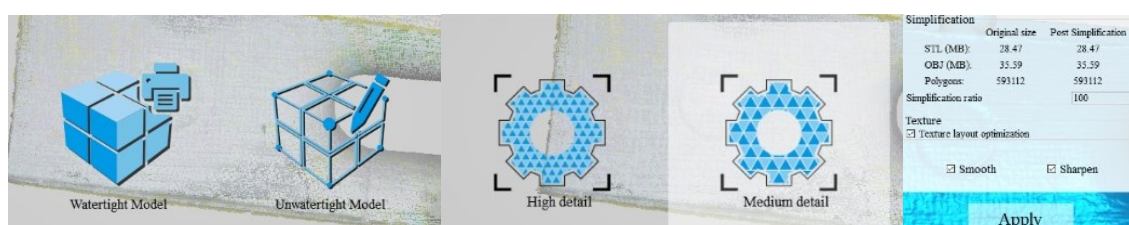
Nakon dvostruko pozicioniranog skeniranja, potrebno je uskladiti oblak točaka (Slika 5.7) kako bi se mogao omrežiti u cjelinu.



Slika 5.7 Dvostrani prikaz spoja oblaka točaka modela pomagala

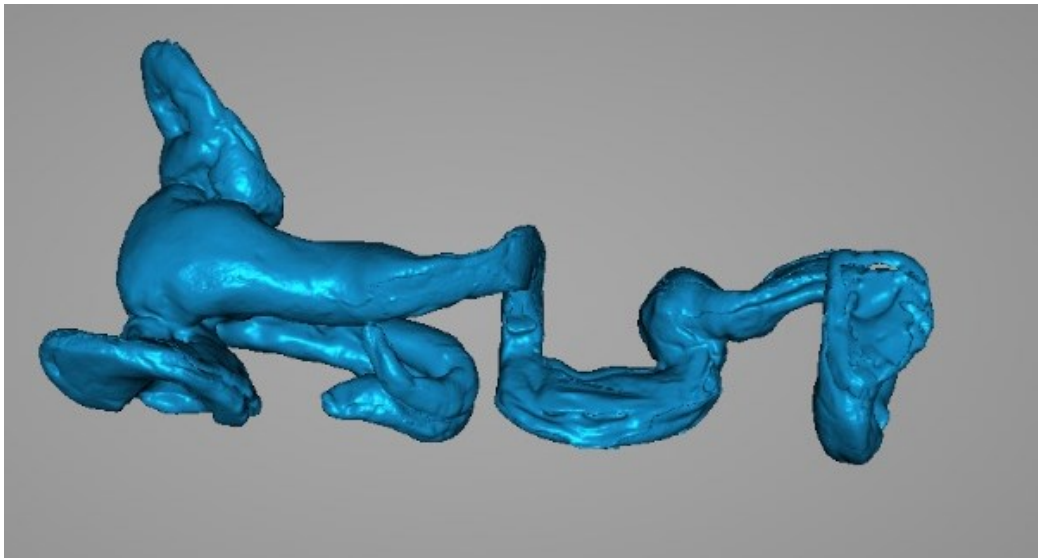
## 5.4 Obrada dobivenih podataka

Za omrežavanje obrisa dobivenog oblakom točaka potrebno je postaviti opcije na *Watertight*, nakon čega slijedi *Medium detail* te potvrda odabirom gumba *Apply* (Slika 5.8).



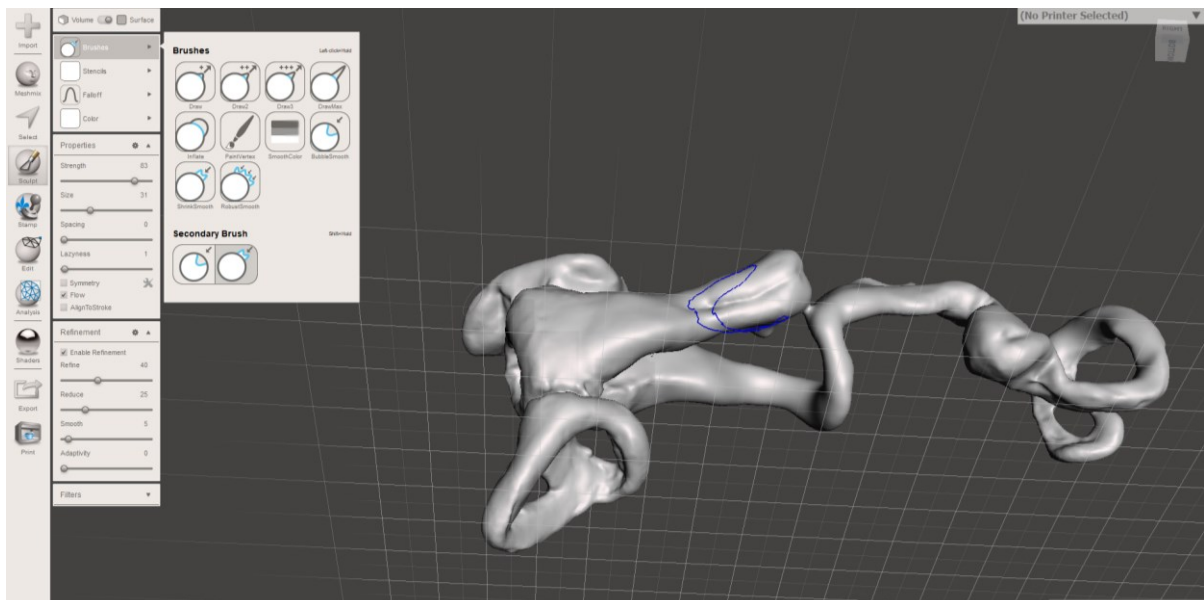
Slika 5.8 Postavke omrežavanja oblaka točaka

Dobiveni oblik potom izgleda kao na Slika 5.9.



Slika 5.9 Omreženi model pomagala

Za dodatno uređivanje te isticanje potrebnih detalja, dobivena se STL datoteka učitava u programski softver Autodesk® Meshmixer (Slika 5.10) u kojem je moguće definirati provrte i ostale nedovoljno definirane bridove obuhvaćene samim skeniranjem



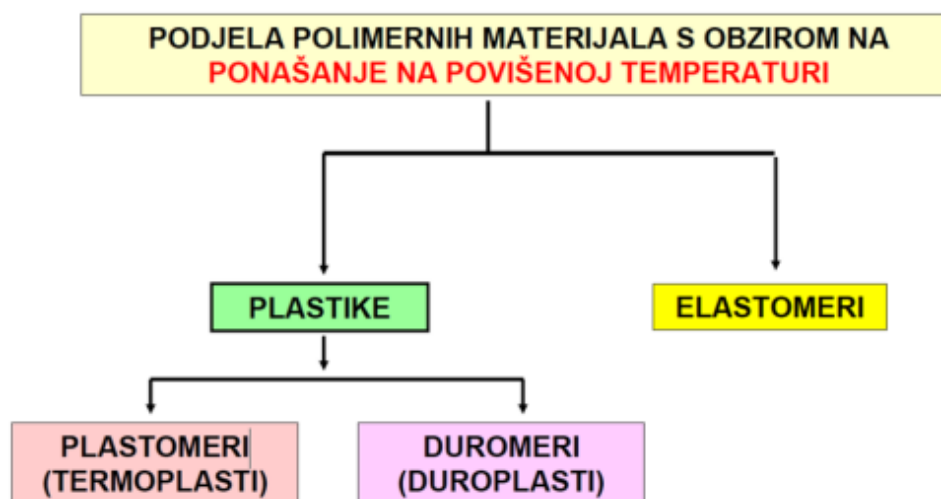
Slika 5.10 Uređivanje pomoću alata Meshmixer



## 6 IZBOR MATERIJALA

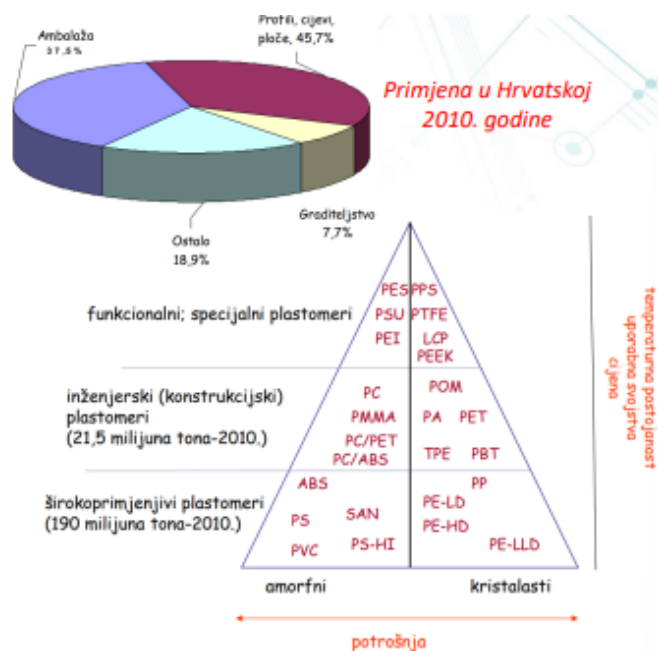
### 6.1 Svojstva i vrste polimera

Polimeri mogu biti prirodne, sintetičke, organske i anorganske tvari te materijali čiji su bazni dio makromolekule. Sama makromolekula sastoji se od više mera, tj. manjih lanaca molekula, a polimerizacijom nastaju višemolekulni spojevi poznatiji pod nazivom polimeri koji se dijele na plastomere, duromere i elastomere. Oni se razlikuju prvenstveno po svom ponašanju pri visokim temperaturama (Slika 6.1), ali ta svojstva djelomično se mogu pripisati i njihovoj uređenosti molekularne strukture [28].



Slika 6.1 Podjela polimernih materijala s obzirom na ponašanje pri povišenoj temperaturi [29]

Polimeri su zbog svojih mnogobrojnih prednosti pogodni za razne primjene. Mala gustoća, jednostavna i ekonomična proizvodnja kompliciranih dijelova u većim količinama uz veliku slobodu unutar konstrukcijskog oblikovanja čine ih široko primjenjivim u raznim granama industrije (Slika 6.2). Pritom je nužno uzeti u obzir i nedostatke poput snižene čvrstoće pri višim temperaturama uz nisku krutost i ograničenje radne temperature na maksimalno 200°C [30].



Slika 6.2 Primjena polimernih materijala [30]

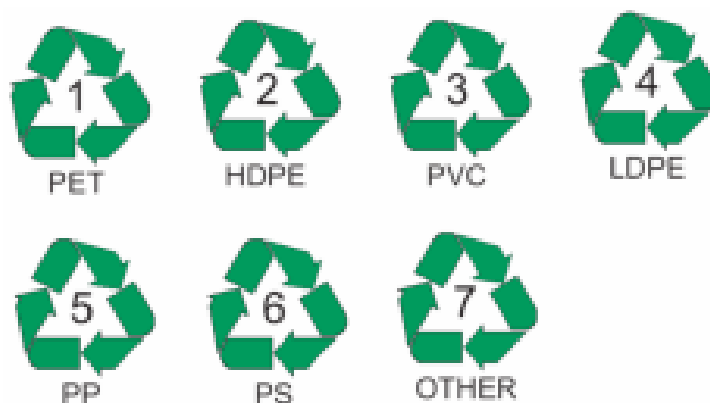
Plastomeri su sastavljeni od granatih ili linearnih makromolekula međusobno povezanih slabim sekundarnim vezama. Posljedica takve uređenosti je postojanje amorfnih i kristaličnih makromolekula. Njihova struktura omogućava da pri zagrijavanju, unutar slabljenja veza, dolazi do povećanja pokretljivosti dijelova makromolekula sve dok postupno ne prijeđu u taljevinu kad su zbog svoje viskoznosti jednostavni za oblikovanje. Suprotno od toga, hlađenjem na sobnu temperaturu postižu postojani oblik. Raspon svojstava nekih od njih prikazan je u (Tablica 6.1).

Tablica 6.1 Svojstva odabranih plastomera [29]

Materijal	Gustoća [kg m <sup>-3</sup> ]	Vlačna čvrstoća [MPa]	Najviša temperatura uporabe [°C]
PELD	920 – 930	6,2 – 17,2	82 – 100
PEHD	950 – 960	20 – 37	80 – 120
PVC	1490 – 1580	51 – 62	110
ABS	1050 – 1070	39	71 – 93
PTFE	2100 – 2300	6,9 – 27	288
PA 66	1130 – 1150	62,1 – 82,8	82 – 150

Karakteristični su po svojoj sposobnosti ponovnog zagrijavanja pri čemu se mogu iznova oblikovati bez ključnih promjena u svojstvima što ih čini pogodnim za recikliranje (Slika 6.3) [29].





Slika 6.3 Reciklabilne oznake na proizvodima [29]

Duromeri imaju prostorno umrežene granate makromolekule čija su poveznica kovalentne veze. Takva umreženost im onemogućava ponovno oblikovanje jer nakon faze dobivanja ne mekšaju, niti se tale, već umrežavaju, a na visokim temperaturama kovalentne veze pucaju ( $T_d$  – temperatura razgradnje). Stoga se oblikuju u fazi dobivanja kad se neumreženim monomerima dodaju ubrzivač i katalizator [29].

Elastomere čine makromolekule povezane kombinacijom kovalentnih i sekundarnih veza što ih omogućava mekšanje pri zagrijavanju, ali ne i taljenje. To su amorfni polimeri čiji je prijelaz iz staklastog u gumasto stanje na niskoj temperaturi. Niski modul elastičnosti doprinosi viskoelastičnom ponašanju u širem temperaturnom rasponu, nego drugi materijali [29].

## 6.2 Materijali odabrani za 3D ispis

Za 3D tisak moguće je koristiti razne polimere, metale i kompozite. Ti materijali proizvode se u obliku praha, smole ili u obliku namotaja niti na kolut (tzv. filament). Pri FDM tehnologiji, korišteni oblik je filament te je naglasak stavljen na njihovu raspodjelu.

Također, u ovom se radu zbog ergonomičnosti izbor suzio na polimere zbog ugodnosti korištenja te sprječavanja oštećenja na gudalu.

Neki od najčešće korištenih filamenata su PLA (poliaktid), PETG (Polietilen tereftalat ojačan glikolom), ABS (akrilonitril butadien stiren), i PP (polipropilen). Oni su pogodni za većinu potreba 3D tiskanja. Međutim, razvojem mogućnosti 3D pisača, počeli su se koristiti i podatljiviji materijali od kojih su najčešće korišteni elastomeri TPE i njegova inačica TPU (termoplastični poliuretan) koji su fleksibilniji te prikladni za drugu vrstu primjena.

Za izradu replike dijela gudala korišten je PETG filament, a za didaktičko pomagalo TPU 82A tvrdoće.

U usporedbi dvaju najčešće korištenih filamenata, PETG se ispostavio prikladnijim za 3D ispis replike donjeg dijela gudala naspram PLA-a. PETG je kopolimer koji ima dobru čvrstoću, kemijsku otpornost te otpornost na udarce, a usto je cjenovno povoljan. Dodatna prednost je njegova reciklabilnost. Raspon temperature za ekstruziju je između 220 i 260 °C te je lak za bojanje i netoksičan jer nema mirisa. Lak je za 3D ispis zbog svog izvrsnog prijanjanja slojeva. Bolji je od PLA filameta jer je mnogo čvršći, dok je glavni nedostatak PLA- a lomljivost, što nije povoljno kao zamjena za gudalo. PETG je također otporan na UV zrake, za razliku od PLA filameta te je unatoč neznatnog zahtjevnijeg pristupa u 3D tisku zbog pretjeranog prijanjanja bolji odabir za potrebe izrade prototipa pomagala za gudalo. [31]

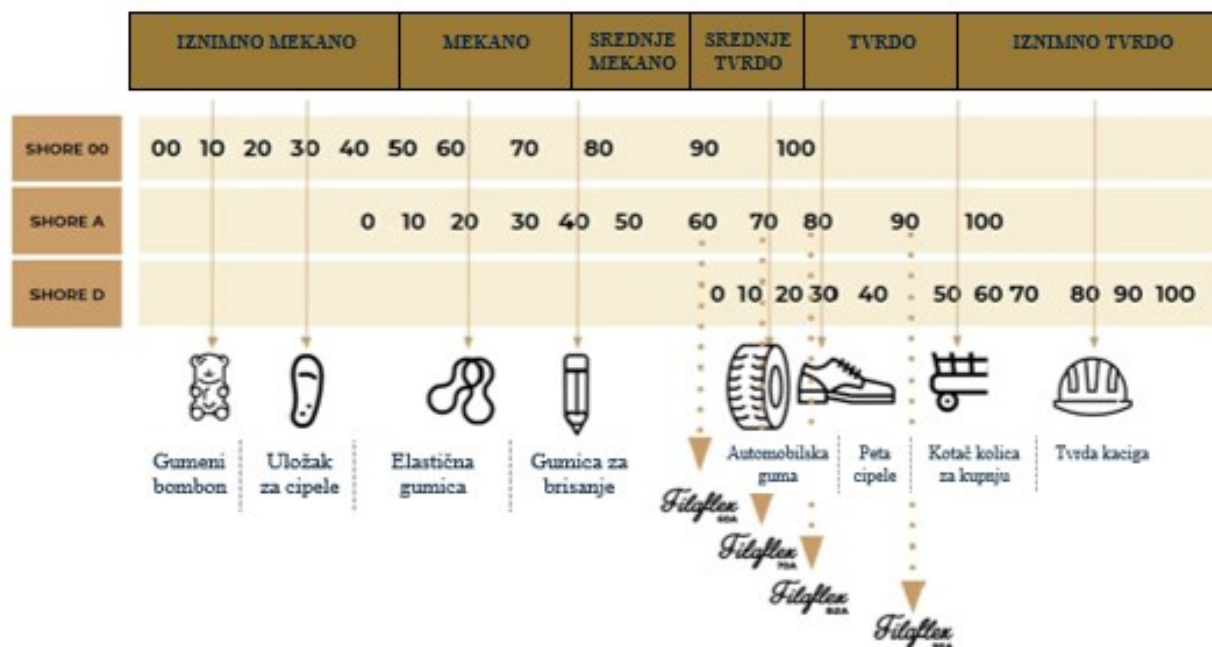
Pri odabiru materijala za 3D ispis pomagala za pozicioniranje desne ruke violinista, bilo je nužno uzeti u obzir podatljivost, elastičnost te čvrstoću. Standardni filamenti za korištenje u 3D tisku nisu odgovarali tim zahtjevima te je bilo potrebno proširiti raspon mogućnosti. Stoga su odabrani fleksibilniji elastomeri za međusobnu usporedbu i konačnu primjenu.

TPU je vrsta poliuretana oblikovljivog zagrijavanjem te topivog u otapalima. Ima visoku vlačnu čvrstoću te dobru istezljivost što je dobro za postavljanje na gudalo jer omogućava lakše i prilagodljivo prijanjanje uz vijak i štap te omogućuje korištenje na različitim veličinama gudala. Izvanredna otpornost na udarce je dobra jer u slučaju pada neće doći do oštećenja pomagala, a niti gudala jer može amortizirati pad. U usporedbi s materijalima poput PVC-a i gume (Tablica 6.2), vidljivo je da su slični u tvrdoći po Shoreu, ali su vrijednosti vlačne čvrstoće te istezljivosti TPU-a znatno bolje.

Tablica 6.2 Usporedba tvrdoće, vlačne čvrstoće i istezanja TPU-a s drugim materijalima [32]

Karakteristike	TPU		PVC		Chemigum	Neopren	Prirodna guma
Tvrdoća po Shoreu	95A	85A	95A	85A	78A	70A	77A
Vlačna čvrstoća [MPa]	34.3	25.3	16	16.3	11.6	10.3	16.3
Istezanje [%]	700	570	308	350	400	400	574

Tvrdoća je svojstvo koje je prilagodljivo u širokom rasponu za ovaj materijal. U ovom slučaju, odabran je mekši TPU u Shore A rasponu, naspram tvrdog Shore D-a. TPU tvrdoće 82A po Shoreu je u primjeru primjene usporediv s potplatom za cipelu (Slika 6.4).



Slika 6.4 Raspon tvrdoće po Shoreu [33]

Odabrana je tvrdoća dobra jer time onemogućava preveliku istezljivost te osigurava mogućnost održavanja oblika te pozicije prstiju u primjeni uz sprječavanje pucanja u korištenju provrta za prste. Za transport pomagala dobro je i što je otporan na vodu, ulje i plijesan [32].

## 7 3D TISAK

### 7.1 Opis laboratorijskog 3D pisača

Za izradu dijelova 3D tiskom korišten je Bambu Lab X1 – Carbon [34] 3D pisač koji radi na principu FDM tehnologije (Slika 7.1) u Laboratoriju za povratno inženjerstvo na Tehničkom fakultetu u Rijeci.

Navedeni 3D pisač dimenzija je  $56 \times 256 \times 256$  mm s mlaznicom od kaljenog čelika veličine 0.4 mm. Maksimalna temperatura koju može postići jest  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a kompatibilan promjer filameta je 1.75 mm. Materijali koje podržava uključuju PLA, PETG, TPU, ABS, ASA, PVA, PET te je idealno za PA, PC i kompozite sa staklenim i ugljičnim vlaknima kao ojačalima. Maksimalna temperatura zagrijavane ugrađene podloge (*Bambu Textured PEI Plate* ili *Bambu Cool Plate*) je  $110 - 120\text{ }^{\circ}\text{C}$  u rasponu od 220 – 110V te može postići brzinu alatne glave od 500 mm/s.



Slika 7.1 Bambu Lab X - Carbon 3D uređaj

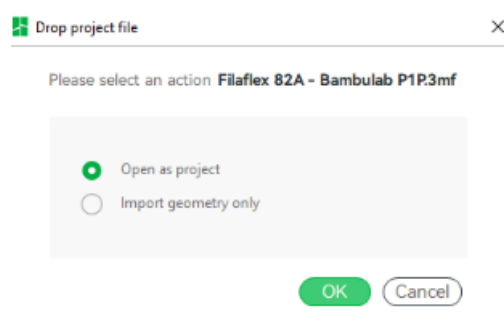
## 7.2 Izrada funkcionalnog rješenja tehnologijom FDM 3D tiska

Prije pokretanja procesa tiskanja pomagala, potrebno je pripremiti materijal kojim će se objekt tiskati. U ovom slučaju je to filament Recreus filaflex tvrdoće 82A na Shoreovoj ljestvici nabavljen u kolutu od 500 g u prozirnrom izdanju (Slika 7.2).



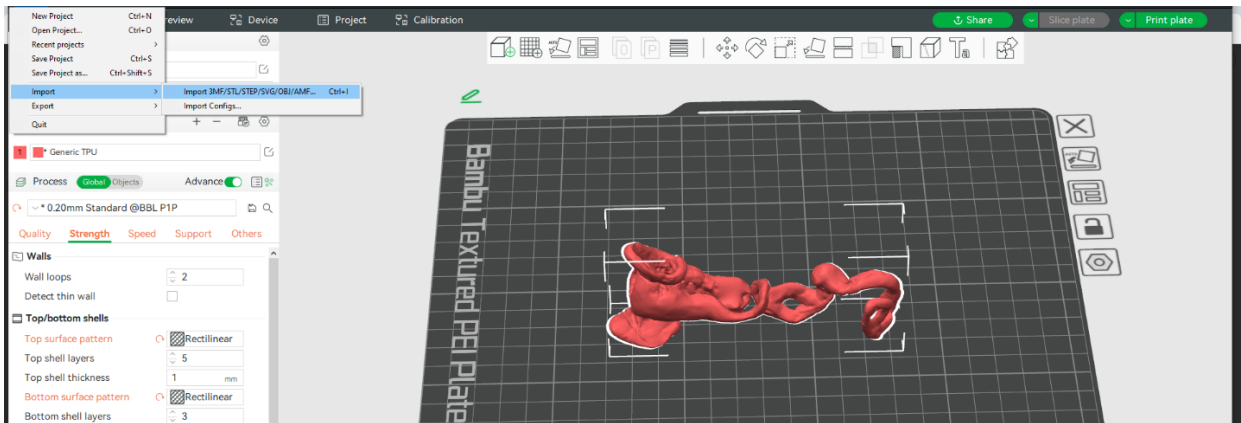
Slika 7.2 Podaci od filamentu s preporukama za ispis

Jedan od početnih koraka prilagodba je postavki 3D ispisa (Slika 7.2) koje je također moguće učitati (Slika 7.3) ako su dostupne od strane proizvođača odabranog filamenta ili ih je moguće ručno podesiti u padajućem izborniku programa.



Slika 7.3 Učitavanje preuzetih postavki za odabrani filament prema preporuci proizvođača

Pomagalo oblikovano i uređeno u prethodnim poglavljima potrebno je potom učitati kao STL datoteku (Slika 7.4) u slicer. U ovom slučaju korišten je program Bambu Studio sukladno stroju koji će kasnije biti primijenjen prilikom 3D tiska.

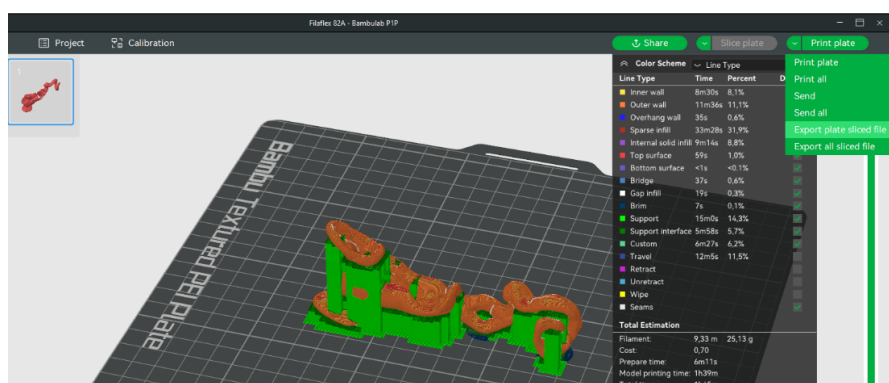


Slika 7.4 Učitavanje STL datoteke uređenog modela pomagala

Neke je postavke ispisa potrebno dodati podesiti poput postotka ispunje koji je u preporukama 99 %, za čime nema potrebe jer umanjuje elastičnost materijala, povećava krutost, ali prvenstveno produljuje vrijeme izrade te se stoga prilagođava na 35%. Također, potrebno je odabrati postavke omogućavanja potpornog materijala koji je nužan za sprječavanje pogrešaka pri ispisu nepravilnih oblika s provrtima. Odabire se opcija ugrađivanja potporna utemeljenih samo na postolju kako bi se skratio proces uklanjanja, smanjila hrapavost površine te spriječio suvišan utrošak materijala.

Zatim slijedi izvoz datoteke s uputama zapisanim u G-kodu (Slika 7.5) koja se učitava na pisač bežičnim putem ili u ovom slučaju prijenosom datoteke s računala putem memorijske kartice koja se potom umeće u utor na zaslonu 3D pisača te učitava za ispis.

Sljedeći korak je pokretanje ispisa prije čega je potrebno premostiti 3D ispis na stražnji stalak za kolut isključivanjem opcije AMS na zaslonu Bambu Lab pisača te prihvaćanjem ostalih postavki.



Slika 7.5 Izvoz datoteke s G – kodom

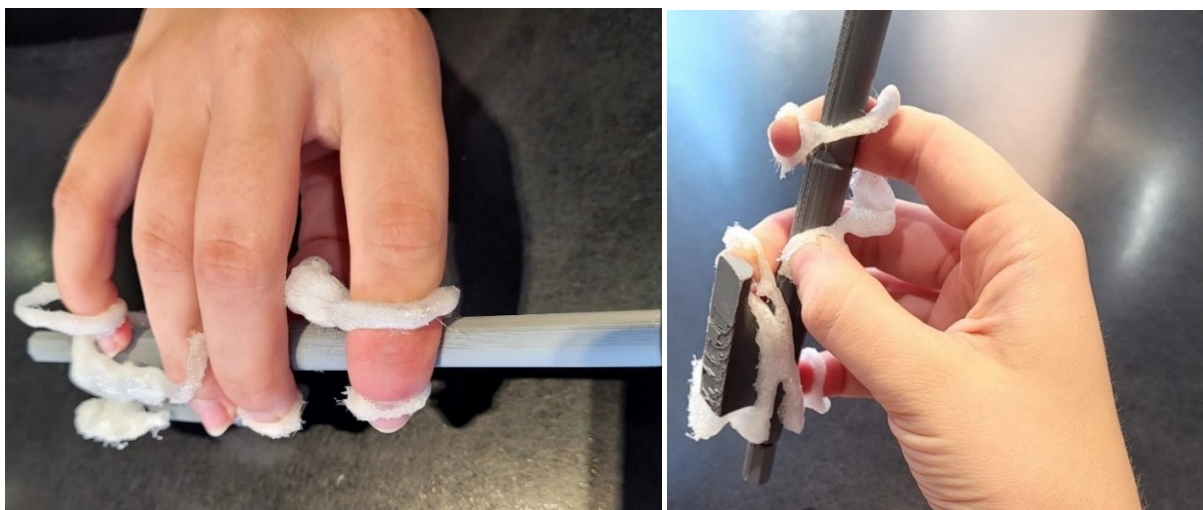


Nakon završetka 3D ispisa, potrebno je zagrijati podlogu postolja na 70°C kako bi se osiguralo odvajanje izratka bez oštećenja i bez teško uklonjivih krhotina materijala na podlozi. Potom je potrebno ukloniti potporni materijal (engl. *support*) (Slika 7.6) što je najlakše učiniti koristeći alat poput kliješta.



*Slika 7.6 3D tiskano pomagalo s potpornim materijalom*

Čišćenjem potpornog materijala dobiven je funkcionalni model pomagala za učenje držanja gudača prilikom sviranja violine (Slika 7.7).

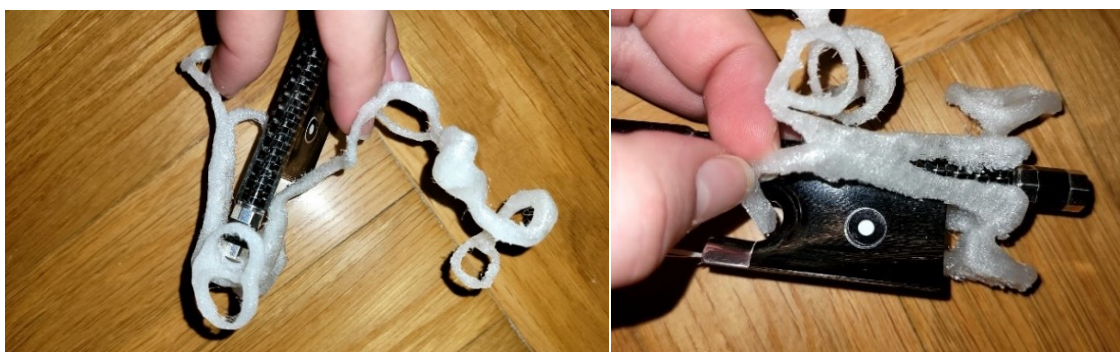


*Slika 7.7 3D ispisano pomagalo u primjeni*

## 8 UPUTE ZA POSTAVLJANJE POMAGALA

Pomagalo je moguće koristiti na nekoliko načina prilagođavajući ga potrebama pojedinca i njegovog pozicioniranja prstiju, ali i veličini ruke.

Za početak je potrebno postaviti pomagalo na gudalo tako da se razdvoje prednja i stražnja polovica pomagala te se vijak i štap provuku kroz rubni provrt između „ušiju slona“. Usto je potrebnu izdanak „kljove“ provući uz žabicu na prednji dio gudala.



*Slika 8.1 Postavljanje pomagala na gudalo*

Prvi korak je pozicioniranje malog prsta u utor na „uhu“ slonovske glave (Slika 8.2).



*Slika 8.2 Postavljanje 4. (malog) prsta*



Kao drugi korak potrebno je obujmiti treći prst početkom izdanka imitacije „surle“ te ostatak provući na stražnju stranu gudala između drugog i trećeg prsta (Slika 8.3).



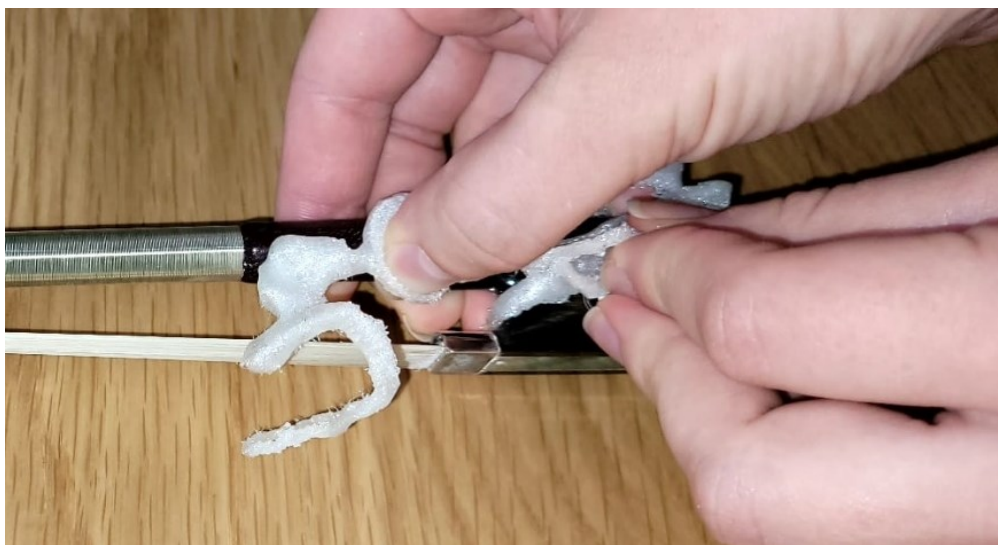
*Slika 8.3 Pozicioniranje 3. prsta (prstenjaka)*

Treći korak je opcionalan, a uključuje korištenje drugog stražnjeg izdanka „kljove“ s omčom za položaj drugog prsta provlačeći omču kroz prostor između štapa i struna te obuhvaćanjem prsta omčom (Slika 8.4).



*Slika 8.4 Pozicioniranje 2. (srednjeg) prsta*

Četvrti korak je uvlačenje palca u stražnji provrt te guranje prstom prema naprijed na donjoj strani štapa (Slika 8.5).



*Slika 8.5 Pozicioniranje palca*

Peti korak je postavljanje prvog prsta na gudalo te obuhvaćajući prst s gornje strane „surlom“ provući kraj s omčom između struna i štapa te osiguravajući položaj umetanjem kažiprsta u omču (Slika 8.6).



*Slika 8.6 Pozicioniranje 1. prsta (kažiprsta)*

## 9 ZAKLJUČAK

U ovom završnom radu razvijeno je preliminarno rješenje ergonomskog pomagala za učenje sviranja violine. Proces konstruiranja i oblikovanja bilo kojeg proizvoda, pa tako i pomagala za pravilno držanje gudala, počinje razjašnjavanjem zadatka. Kako bi to bilo moguće, bilo je potrebno prikupiti relevantne informacije o problemu, odnosno u ovom slučaju je Prije početka oblikovanja pomagala bilo je nužno proučiti tijek učenja pravilnog držanja gudala čime . Time je olakšan daljnji proces konstruiranja pomagala namijenjenog za korištenje pri vježbanju sviranja violine. Pregled stečenih informacija u područjima tehnika pravilnog držanja gudala te biomehanike šake omogućio je bolje razumijevanje pokreta desne ruke violinista te osigurao prikladan odabir materijala za oblikovanje prototipa pomagala. Nakon prikupljanja informacija i stanja tržišta te kvalitativnim vrednovanjem postojećih rješenja pristupljeno je razvoju koncepta ergonomskog pomagala. Osim uobičajenih inženjerskih skica, potencijalnih rješenja oblikovana su i plastelinom. Primjena plastelina u oblikovanju prototipa kako bi se osigurala pridonijela je ergonomičnosti pomagala te je suzila daljnju daljnja potragu za odgovarajućim filamentom za 3D tisk. Zbog adhezivnosti i krhkosti plastelina, bilo je potrebno izraditi repliku donjeg dijela gudala jer je plastelinska masa teško uklonjiva. Principi reverznog inženjerstva primijenjeni su kako na razvoj pomagala, tako i na dobivanje 3D CAD modela žabice gudala. 3D CAD model žabice bilo je najjednostavnije dobiti 3D skeniranjem te obradom podataka, dok su štap i vijak bili jednostavnijeg oblika za oblikovanje unutar CAD softvera. Sklop sva tri dijela, uspješno je izrađen 3D tiskom te je time omogućeno ručno oblikovanje ranije spomenutih idejnih rješenja. Dobiveni željeni oblik ergonomskog pomagala modela pomagala zatim se učitao na računalo kao oblak točaka koji je potom umrežen te dodatno površinski uređen. Poprimivši konačan oblik, model je bio spreman za 3D tisk uz prilagodbu odgovarajućih postavki za korišteni materijal.

Izrada ergonomskog pomagala nije jednostavan zadatak, pogotovo kad ima vrlo specificiranu primjenu te obuhvaća više podatljivih dijelova. Završni 3D ispis prikazan u prethodnom poglavlju prvi je funkcionalni model dobiven u procesu razvoja te svakako ima prostora za dodatnu optimizaciju u obliku i načinu izrade. Pomagalo za desnu ruku violinista u obliku slonovske glave oblikovano je na način pristupačan primarno djeci jer je većina početnika u sviranju violine tog uzrasta. Međutim, ovisno o boji pomagala moguće je odabrati manje primjetnu verziju poput izrađene, jer je korišteni filament proziran. Svaki prst moguće je pozicionirati istovremeno, ali i zasebno, ovisno od potrebama pojedinca. Izrađeni je model primjeren za razmjere manje šake. Prema promatranim pokušajima korištenja istog u kontaktu s odraslim korisnicima, može se

zaključiti da je pomagalo moguće izraditi u univerzalnoj veličini, ali iz ergonomskih razloga bilo bi poželjno prilagoditi otvore za prste u dvije veličine, jednu za početnike dječjeg uzrasta, a drugu za početnike odrasle dobi.

U primjeni izrade 3D tiskom, odabrani filament moguće je još bolje iskoristiti daljnjim preinakama u postavkama ispisa poput smanjivanja brzine pokreta glave s mlaznicom te prilagodbe temperature ispisa, kao i debljine slojeva i postotka ispune. Daljnje poboljšanje bilo bi moguće uvođenjem boljeg pozicioniranja potpornog materijala te čak kombinacije drugog materijala za potporanj zbog lakšeg uklanjanja pri završetku.

## 10 LITERATURA

- [1] The Editors of Encyclopaedia, „Károly Flesch“, Encyclopedia Britannica. Pristupljeno: 16. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.britannica.com/biography/Karoly-Flesch>
- [2] C. Flesch, *Umetnost sviranja na violini*. Beograd: Studio Lirica, 2000.
- [3] „Francusko-belgijski hvat gudala“. Pristupljeno: 24. srpanj 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTVL7hj2Q3IJNNN869AZkcqtdD3wB4bJUP3jg&s>
- [4] L. Marinović, „Tehnika desne ruke za violiste i violiniste“, Muzička akademija, Zagreb, 2023. Pristupljeno: 23. srpanj 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:116:111310>
- [5] „Violina – uglađena i sofisticirana kraljica orkestra“. Pristupljeno: 23. srpanj 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://melodija.hr/violina-ugladena-i-sofisticirana-kraljica-orkestra/>
- [6] „Učenje držanja gudala“. Pristupljeno: 25. srpanj 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://i.pinimg.com/originals/13/36/39/133639c9a33628d58b3a8358bdce11b5.gif>
- [7] „Što je zapravo biomehanika i zašto ju morate razumjeti?“. Pristupljeno: 25. srpanj 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.adsacrum.hr/sto-je-biomehanika/>
- [8] E. Stern, „Four Pre-Playing Warmup Stretches for Violinists and Violists“. Pristupljeno: 25. srpanj 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.violinist.com/blog/Sternmoves/202111/28998/>
- [9] N. Igić, „Biomehanika šake“, Univerzitet u Novom Sadu. Pristupljeno: 23. srpanj 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.slideshare.net/ssuserc33ffb/biomehanika-ake>
- [10] M. Brons i R. Brons, „Bow Hold Buddies“. Pristupljeno: 24. srpanj 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.things4strings.com>
- [11] M. Brons i R. Brons, „Meet the inventors“. Pristupljeno: 24. srpanj 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.things4strings.com/meet-the-inventors/>
- [12] „Bowpet violin bow grip partner“. Pristupljeno: 21. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://naomimusic.net/products/bowpet-violin-bow-grip-partner-violino-hold-bow-posture-corrector-universal-silicone-accessories-teaching-aid-for-beginner?variant=50161142235409>

- 
- [13] „Meterk trademark“. Pristupljeno: 09. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://trademarks.justia.com/870/88/meterk-87088728.html>
- [14] „Meterk violin bow holder grip corrector“. Pristupljeno: 21. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://i5.walmartimages.com/asr/81cc4787-94eb-48ca-9a33-dda9eaa2540b.62ca92d5643895007d2776f523d90f0d.jpeg?odnHeight=768&odnWidth=768&odnBg=FFFFFF>
- [15] C. Laux, „Bow ‚Seat belts““. Pristupljeno: 24. srpanj 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.orchestrteacher.net/2013/08/07/bow-seat-belts/>
- [16] „Beaufort Ink - Pen clips for kitless pens“. Pristupljeno: 25. srpanj 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.beaufortink.co.uk/pen-tubes-pen-springs-and-spares/pen-clips-for-kitless-pens>
- [17] W. Wang, „Reverse Engineering: Technology of Reinvention“.
- [18] © 2023 Prescient Technologies, „Types & Benefits of 3D Scanners and 3D Scanning Technologies“. Pristupljeno: 09. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.prescient.com/knowledge-center/product-development-by-reverse-engineering/scanners-scanning/>
- [19] „tomografija“, Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža. Pristupljeno: 01. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/tomografija>
- [20] A. C. Telea, *Reverse Engineering - Recent Advances and Applications*. InTech, 2012.
- [21] „Autodesk Fusion 360“. Pristupljeno: 08. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/personal>
- [22] „3D ispis – informacije o procesu 3D ispisa“, Print24 Journal. Pristupljeno: 02. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://print24.com/hr/journal/osnove-ispisa/3d-printanje>
- [23] „ergonomija“, Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža. Pristupljeno: 25. srpanj 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/ergonomija>
- [24] J. Kaljun i B. Dolsak, „Ergonomic design recommendations based on an actual chainsaw design“, *South African Journal of Industrial Engineering*, sv. 23, str. 215–229, srp. 2012, doi: 10.7166/23-2-342.
- [25] I. A. Tomić, „privatna komunikacija“, 27. travanj 2024.
- [26] Shining 3D, „Einscan SP“. Pristupljeno: 28. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.einscan.com/einscan-sp/>
-

- 
- [27] K. Akca, „EinScan SE/SP - Calibration tutorial“. Pristupljeno: 20. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://support.einscan.com/en/support/solutions/articles/60000718445-einscan-se-sp-calibration-tutorial>
- [28] M. Šercer, B. Križan, i R. Basan, „Konstruiranje polimernih proizvoda“, Sveučilište u Zagrebu - Fakultet strojarstva i brodogradnje; Sveučilište u Rijeci - Tehnički fakultet, 2009.
- [29] S. Smokvina Hanza i M. Fonović, „Materijali I - Polimeri“.
- [30] D. Iljkić i S. Smokvina Hanza, „Materijali III - Vrste i trendovi primjene nemetalnih materijala“.
- [31] FacFox 3D Printing Service, „PETG vs PLA filament“. Pristupljeno: 05. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <http://hr.insta3dp.com/info/what-is-petg-everything-you-need-to-know-76954741.html>
- [32] PECOAT thermoplastic, „TPU materijal - sveobuhvatna analiza“. Pristupljeno: 05. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.thermoplasticcoating.com/hr/comprehensive-analysis-of-tpu-material/>
- [33] „Specifikacije Recreus filaflex TPU 82A filamenta“, RECREUS INDUSTRIES S.L. Pristupljeno: 08. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://recreus.com/gb/content/24-print-parameters>
- [34] Bambulab GmbH, „Bambu Lab X1 Carbon“. Pristupljeno: 31. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://eu.store.bambulab.com/products/x1-carbon>



## 11 POPIS SLIKA

Slika 2.1 Francusko-belgijsko držanje gudala s referentnim oznakama prstiju [3] .....	2
Slika 2.2 Dijelovi violine i gudala [5] .....	3
Slika 2.3 Postavljanje prstiju na gudalo u obliku "zeca" [6].....	3
Slika 2.4 Funkcionalna pozicija ručnog zgloba [9].....	5
Slika 2.5 Bow Hold Buddies (lijevo) i Cellophant (desno) nastavna pomagala [10] .....	6
Slika 2.6 Bowpet pomagalo u obliku zrakoplova [12].....	6
Slika 2.7 Meterk pomagalo za korekciju držanja gudala [14].....	7
Slika 2.8 "Seat belts" za gudalo [15].....	7
Slika 2.9 Primjena nazuvka kemijske olovke s drškom za prihvat na papir za vježbu desne ruke [16] .....	8
Slika 3.1 (a) Prikupljanje oblaka točaka 3D objektnim skenerom; (b) isječci skenirani iz različitih pogleda; (c) kombinacija oblaka točaka; (d) omrežavanje; (e) konačan oblik dobiven naknadnom obradom [18].....	10
Slika 3.2 Omogućavanje skeniranja u više položaja rastavljanjem gudala na dijelove .....	11
Slika 3.3 Sprej za oblaganje površina zahtjevnih za skeniranje uz primjer primjene.....	12
Slika 3.4 Skeniran i neobrađen oblak točaka .....	12
Slika 3.5 Kombinacija više pogleda skeniranja u jedan oblak točaka .....	13
Slika 3.6 Očišćeni oblak točaka .....	13
Slika 3.7 Dobiveni omreženi oblik.....	14
Slika 3.8 Omrežavanje: (a) žičani poligonalni model; (b) površinski poligonalni model; (c) NURBS model [17].....	15
Slika 3.9 Naknadna prilagodba gustoće mreže u programu Fusion 360° .....	15
Slika 3.10 Dobivanje 3D formata za CAD oblikovanje iz omreženog oblika .....	16
Slika 3.11 Mjerenje štapa i vijka gudala pomičnim mjerilom .....	16
Slika 3.12 Pojednostavljenje sklopa za izvoz u 3D tisak .....	17
Slika 3.13 AMS (lijevo) i vanjski držač filoamenta (desno) Bambu Lab X1 CARbon pisača [19] .....	18
Slika 3.14 Učitavanje datoteke u program za pripremu 3D tiska.....	19
Slika 3.15 Odabir opcije izvoza datoteke s G-kodom.....	20
Slika 3.16 Proces 3D tiskanja te gotov izradak gudala s potpornim materijalom.....	20
Slika 4.1 Preporuke za oblikovanje alata s prihvatom [24].....	21



---

Slika 4.2 Prvo idejno rješenje.....	22
Slika 4.3 Drugo idejno rješenje .....	23
Slika 4.4 Treće idejno rješenje .....	24
Slika 4.5 Žičana baza za model pomagala .....	25
Slika 4.6 Ožičeni model pomagala oblikovan od plastelina sa i bez oslonca na model gudala....	25
Slika 5.1 Einscan_SP V2 3D skener[26].....	26
Slika 5.2 Opcije početnog sučelja Einscan programa za pokretanje kalibracije .....	27
Slika 5.3 Pozicije ploče (A, B i C) tijekom kalibracije Einscan-SP skenera .....	27
Slika 5.4 Postavljanje oblikovanog modela pomagala na okretni stol.....	28
Slika 5.5 Postavljanje početnih opcija za skeniranje.....	28
Slika 5.6 Prilagodba nijanse skeniranog modela.....	29
Slika 5.7 Dvostrani prikaz spoja oblaka točaka modela pomagala .....	29
Slika 5.8 Postavke omrežavanja oblaka točaka.....	29
Slika 5.9 Omreženi model pomagala .....	30
Slika 5.10 Uređivanje pomoću alata Meshmixer .....	30
Slika 6.1 Podjela polimernih materijala s obzirom na ponašanje pri povišenoj temperaturi [29]	31
Slika 6.2 Primjena polimernih materijala [30] .....	32
Slika 6.3 Reciklabilne oznake na proizvodima [29] .....	33
Slika 6.4 Raspon tvrdoće po Shoreu [33].....	35
Slika 7.1 Bambu Lab X - Carbon 3D uređaj .....	36
Slika 7.2 Podaci od filamentu s preporukama za ispis.....	37
Slika 7.3 Učitavanje preuzetih postavki za odabrani filament prema preporuci proizvođača .....	37
Slika 7.4 Učitavanje STL datoteke uređenog modela pomagala .....	38
Slika 7.5 Izvoz datoteke s G – kodom.....	38
Slika 7.6 3D tiskano pomagalo s potpornim materijalom.....	39
Slika 7.7 3D ispisano pomagalo u primjeni .....	39
Slika 8.1 Postavljanje pomagala na gudalo .....	40
Slika 8.2 Postavljanje 4. (malog) prsta.....	40
Slika 8.3 Pozicioniranje 3. prsta (prstenjaka).....	41
Slika 8.4 Pozicioniranje 2. (srednjeg) prsta.....	41
Slika 8.5 Pozicioniranje palca .....	42
Slika 8.6 Pozicioniranje 1. prsta (kažiprsta).....	42

## 12 POPIS TABLICA

Tablica 6.1 Svojstva odabranih plastomera [29].....	32
Tablica 6.2 Usporedba tvrdoće, vlačne čvrstoće i istežanja TPU-a s drugim materijalima [32] ..	34

## 13 SAŽETAK

Ovim radom obuhvaćen je proces konstruiranja i oblikovanja te izrade ergonomski oblikovanog didaktičkog pomagala namijenjenog za učenje pravilnog držanja violinskog gudala i pozicioniranja svih prstiju desne ruke. Pritom je korištena tehnologija povratnog inženjerstva u kombinaciji s 3D tiskom.

Počevši s uvidom u tijek učenja sviranja violine, navedene su već postojeće spoznaje o potencijalnim poteškoćama početnika pri sviranju s gudalom. Uzimajući u obzir stanje tehnike u području didaktičkih pomagala za glazbenike violiniste te raspon njihove uloge pri držanju gudala, započet je proces konstruiranja i oblikovanja optimizirane inačice pomagala. Pritom je, zbog svoje jednostavne oblikovljivosti, za materijal prototipa pomagala odabran plastelin. U svrhu zaštite gudala od teško uklonjivih ostataka plastelina, procesom povratnog inženjerstva prvotno je dobivena replika žabice gudala. Dobiven je 3D CAD model žabice, a ostali potrebni dijelovi većih dimenzija, ali jednostavnijeg oblika jednostavno su modelirani u CAD programu. Stvoreni sklop dijelova gudala zatim je uspješno 3D tiskan te korišten za oblikovanje prototipa pomagala plastelinom.

Prvobitna smjernica u koncipiranju modela pomagala bila je zadržati potrebnu pokretljivost zglobova, a ograničiti pomak prstiju pravilno pozicionirajući svakog od njih. Zadovoljavajuće konceptualno rješenje oblikovano je tako da nalikuje slonovskoj glavi kako bi bilo što pristupačniji djeci kao primarnim korisnicima. Na modelu izrađenom od plastelina proveden je isti postupak tehnologije povratnog inženjerstva kao i na žabici uz dodatno softversko uređivanje detalja oblika i površine. Tako oblikovan model pomagala izrađen je 3D tiskom uz prilagodbu postavki za fleksibilni filament. Odabrani materijal osigurava ergonomičnost prilikom korištenja uz lako postavljanje na gudalo te mogućnost izrade u širokom rasponu boja čime je pogodan za personalizaciju.

Razvijeno pomagalo je zasad jedno od vrlo rijetkih postojećih didaktičkih pomagala za učenje pravilnog držanja gudala za violiniste koje je izrađeno u jednom komadu te se može postaviti na gudalo bez njegova rastavljanja na dijelove, a da istovremeno omogućava ispravak i navođenje svih pet prstiju desne ruke .

**Ključne riječi:** povratno inženjerstvo, 3D skeniranje, 3D tisak, didaktičko pomagalo, ergonomsko pomagalo, violinsko gudalo

## 14 SUMMARY

This thesis outlines the process of creating an ergonomically shaped didactic aid designed to teach the correct violin bow hold and positioning of all the fingers of the right hand. In doing so, reverse engineering was utilized in conjunction with 3D printing.

The thesis begins with an overview of the learning process of violin playing and lists existing insights into potential problems beginners face when playing with a bow. Taking into account the state of the art in didactic aids for violinists and their role in promoting the correct bow hold, the conceptualization of an optimized version of the aid was initiated. Due to its ease of reshaping, plasticine was chosen as the material for the prototype. To protect the bow from hard-to-remove plasticine residue, reverse engineering was first applied to the bow frog. The process of structured-light 3D scanning is used in the creating a replica of the 3D CAD model of the bow frog. Other parts of the bow, due to their large dimensions and simple shapes, were designed using CAD software. The assembled bow parts were successfully 3D printed and used for shaping the plasticine prototype.

The primary guideline in conceptualizing the aid was to maintain the necessary joint agility while also restricting finger movement to their correct positions. The aid was designed in the shape of an elephant's head to make it as child-friendly as possible, given that children are the main users. The same reverse engineering process used for the bow frog was applied to the aid prototype, with additional software used for refining and reshaping details and surface texture. The final model was then fabricated using 3D printer with adjusted settings for the flexible filament. The chosen material is suitable because it ensures ergonomics during use and ease of installation on the bow with a wide range of choice in regards to the filament color, which can therefore be personalized.

Ultimately, this is so far one of the very rare didactic aids developed for the purpose of learning the correct bow hold for violinists made in a single undivided piece and can be fastened on the bow without its disassemble into parts, while simultaneously ensuring the correction and guidance of all five fingers of the right hand.

**Key words:** reverse engineering, 3D scanning, 3D printing, didactic aid, ergonomic aid, violin bow