

Jiri Karvinen

3D-TULOSTAMISEN HYÖDYNTÄMINEN PROTEESEISSA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Mikko Vanhatalo
Toukokuu 2024

TIIVISTELMÄ

Jiri Karvinen: 3D-tulostamisen hyödyntäminen proteeseissa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta, Konetekniikka
Toukokuu 2024

Proteesit ovat apuvälineitä, joiden tarkoitus on helpottaa amputoitujen elämää. Proteesi voi toimia apuvälineenä päivittäisissä arjen asioissa tai kosmeettisena asuna, jonka tarkoitus on peittää arvet. Proteeseissa on ongelmia. Niiden saatavuus on huono kehitysmaissa ja kriisialueilla, missä niiden tarve on suurta. Proteesien huonoon saatavuuteen vaikuttaa niiden korkea hinta ja puute osaajista. Proteesien laaduissakin on ongelmia. Proteesien epämukavuus, epäesteettisyys ja funktionaalisuuden puute voivat johtaa proteesin käytön lopettamiseen.

Tässä kandityössä tarkastellaan 3D-tulostamisen hyödyntämistä proteesien valmistamisessa. Tarkkailtavat proteesit ovat raajaproteeseja ja kosmeettisia proteeseja. Tutkimus toteutettiin kirjallisuuskatsauksena, jonka tavoitteena oli selvittää, miten eri 3D-tulostuksessa hyödynnettäviä suunnittelu- ja valmistusmenetelmiä voidaan hyödyntää erilaisissa proteeseissa, jotta niiden valmistamisesta tulisi edullisempaa ja proteeseista tulisi helpommin saatavampia. Myös proteesien laatuun kuten kestävyteen, ulkonäköön ja mukavuuteen vaikuttaviin tekijöihin keskitytään ja verrataan perinteisillä valmistusmenetelmillä valmistettuihin proteeseihin. Sekä pohditaan 3D-tulostamisen kannattavuutta proteesien valmistamisessa.

Tutkielmassa käsitellään laajemmin 3D-tulostamista proteeseissa yleisellä tasolla, minkä jälkeen keskitytään topologisen optimoinnin ja non-assembly-periaatteen hyödyntämiseen 3D-tulostetuissa proteeseissa. Myös realististen soft tissue -proteesien valmistamista 3D-tulostamisella käydään läpi.

Raajaproteeseissa 3D-tulosmaisen suurimmat edut ovat edullinen valmistaminen, kevyt paino ja vähemmän rajoitteita proteesin muotoilussa. Topologisella optimoinnilla proteesin painoa pystytään vähentämään entisestään. Non-assembly-periaatteen mukaiset proteesit ovat puolestaan edullisia valmistaa. Kosmeettisissa proteeseissa 3D-tulostamisen edut ovat nopea valmistaminen, vapaa muotoilu ja proteesin edullisuus.

3D-tulostetut proteesit ovat usein laadultaan ja kyvyiltään huonompia perinteisillä valmistusmenetelmillä valmistettuihin proteeseihin verrattuna. Myös 3D-tulostettujen proteesien kestävyys on perinteisiä proteeseja heikompi. 3D-tulostetu proteesit ovat vielä uutta teknologiaa ja niiden moni ongelma johtuu tutkimusten puutteista ja 3D-tulostimien rajoitteista.

Avainsanat: 3D-tulostus, Kosmeettiset proteesit, Raajaproteesit

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. 3D-TULOSTUS	2
3. PROTEESIT	4
3.1 Yläraajaproteesit.....	4
3.2 Alaraajaproteesit.....	6
3.3 Kosmeettiset proteesit	7
4. 3D-TULOSTUS PROTEESISSA	8
4.1 Topologinen optimointi proteeseissa.....	9
4.2 Soft tissue -proteesit.....	10
4.3 Non-assembly-periaate proteeseissa.....	12
5. JOHTOPÄÄTÖKSET	14
LÄHTEET	16

1. JOHDANTO

Proteeseille on paljon tarvetta kriisialueilla ja köyhissä maissa. Proteesit ovat kuitenkin kalliita niiden monimutkaisuuden ja pienten tuotantoerien takia. Tämän seurauksena alueille, joissa on suurin tarve proteeseille, ei ole saatavilla tarvittavia proteeseja.

Proteeseja on kosmeettisia, staattisia, kehovoimaisia- ja ulkoisilla voimilla toimivia proteeseja. Jokaisella proteesilla on omat vahvuutensa ja heikkoutensa. Cordellan et al. (2016) mukaan kosmeettisissa ja keholla toimivissa proteeseissa tärkeää on mukavuus, ulkonäkö ja käytännöllisyys. Keholla toimivat proteesit ovat suosittuja fyysisiä töitä tekevillä ja ulkoisilla voimilla toimivat yläraajaproteesit ovat suosittuja toimistotöitä tekevillä (Cordella et al. 2016). Proteesien vahvuudet ovat henkilökohtaisia, ja ne riippuvat henkilön vaatimuksista proteesin toiminnoille sekä ostajan ekonomisesta tilanteesta.

3D-tulostaminen on halventunut viimeisten 5 vuoden aikana merkittävästi ja siitä on tullut kannattava valmistustapa useassa pientä tuotantoeria valmistavassa yrityksessä. Tavallisen kuluttajan 3D-tulostimia pystyy ostamaan jopa 200 €:lla. Ammattikäyttöön tarkoitett 3D-tulostimet ovat vielä kalliita.

Tämän työn tarkoituksena on selvittää, miten erilaisien proteesien valmistamisessa pysyttäisiin hyödyntämään 3D-tulostamista, ja vertailla, miten eri 3D-tulostusmenetelmillä valmistetut proteesit poikkeavat perinteisistä ainetta poistavia valmistusmenetelmiä hyödyntävistä proteeseista. Tarkoituksena on vertailla asioita, kuten proteesien kestävyyttä ja valmistuksen hintaa, sekä pohtia mahdollisia käyttökohteita eri 3D-tulostusmenetelmillä suunnitelluille proteeseille niiden vahvuuksien avulla.

Aluksi työn luvussa 2 kerrotaan 3D-tulostamisen perusteita. Aiheet, joita luvussa 2 käsitellään, ovat eri 3D-tulostinmallien toimintaperiaatteet sekä vahvuudet, kuten pinnanlaatu ja tulostamisen hinta. 3D-tulostamisesta siirrytään proteeseihin luvussa 3. Luvun alussa käsitellään proteeseja ja niiden piirteitä. Luvun 3 alaluvuissa esitellään tiettyjä proteesimalleja tarkemmin. Lopuksi luvussa 4 yhdistetään proteesit ja 3D-tulostaminen ja tarkastellaan erilaisten 3D-tulostamisperiaatteiden kelpoisuutta proteesien valmistamisessa ja suunnittelemisessa.

2. 3D-TULOSTUS

3D-tulostaminen on ainetta lisäävää tuotantoa, jossa kappale muodostetaan lisäämällä materiaalia kerroksittain. Kootut kerrokset muodostavat halutun kappaleen. Riippuen 3D-tulostimesta sillä pystyy tulostamaan polymeerejä, keraameja, metalleja tai komposiitteja. Suuri osa edullisista 200–5 000 €:n 3D-tulostimista tulostaa polymeerejä, joten keskitytään pääosin niihin.

Yleisimmät 3D-tulostustyyliä ovat Stereolithography (SLA), Selective laser sintering (SLS) ja Fused deposition modeling (FDM). SLS-tulostimissa kovetetaan kerroksia jauhemaista materiaalia kappaleen muodostamiseksi sulattamalla jauhe laserilla. SLS-tulostimissa lopputuote on jauheeseen haudattuna. Puolestaan FDM-tulostuksessa kerrokset muodostetaan siirtämällä suutinta, josta tulee sulaa materiaalia ennalta määrätyn radan mukaisesti, jotta voidaan muodostaa tulostettavan kappaleen muodot. SLA-tulostimissa materiaalina toimii nestemäinen hartsij, joka kovetetaan UV-valolla.

FDM-tulostimien suurin etu SLS-tulostukseen verrattuna on laaja variaatio erilaisia materiaaleja. FDM-tulostimet kykenevät tulostamaan sähköä johtavia materiaaleja. (Koprnický et al., 2018) Suuri materiaalivariaatio mahdollistaa erilaisten projektien toteuttamisen. Kafle et al. (2021) mukaan SLA ja SLS tuottavat paremman tulostusjäljen FDM:ään verrattuna. FDM-tulostimet ovat kuitenkin tulostusprosessiltaan yksinkertaisempia, eivätkä FDM-tulostetut osat tarvitse jälkikäsittelyä. Puolestaan SLA-tulostimet ovat tarkimpia, ja niillä kyetään jopa 10 µm:n kerrostarkkuuteen. SLA-tulostimilla valmistetut kappaleet vaativat usein jälkikäsittelyä, jotta tulostettu materiaali saa halutut mekaaniset ominaisuudet. (Kafle et al., 2021)

Suunniteltaessa kappaleita 3D-tulostukseen on huomioitava kappaleeseen vaikuttavien voimien suunnat. Tulostetun kappaleen lujuus riippuu tasojen suunnista. Tulosteet ovat kestävimmillään kohtisuoraan tasoon kohdistuviin voimiin ja heikoimmillaan tason suuntaisten voimien kanssa. Suunniteltaessa FDM- ja SLA-tulostimille tulee ottaa huomioon tarvittavat tukirakenteet. (Kafle et al., 2021) Tukirakenteiden poistaminen valmiista osasta voi heikentää kappaleen pinnanlaatua, jos niiden käyttöä ei suunnitella hyvin. SLS-tulostimissa kappaleen hautaama pulveri toimii tukena, joten erillisiä tukirakenteita ei vaadita.

SLS-, FDM- ja SLA-tulostimista SLS-tulostimet ovat kalliimpia, ja niiden hinta on 10 000–500 000+ € (Formlabs, 2024a). SLA- ja FDM-tulostimet ovat merkittävästi halvempia.

Halvimmat SLA- ja FDM-tulostimet ovat noin 200 € (All3dp, 2024). Ammattikäyttöön tarkoitettut FDM-tulostimet ovat 2 000–8 000 € ja vastaavat SLA-tulostimet alkavat 3 750 €:sta. Hinnan lisäksi toinen merkittävä kustannus 3D-tulostamisessa on materiaalit. Riippuen materiaalista tulostuksen hinta voi vaihdella paljon. FDM-tulostuksessa yleiset tulostusmateriaalit polylaktidi (PLA) ja akryyliniiriibutadieenistyreeni ABS maksavat suunnilleen 50 €/kg. Puolestaan teknisiin kohteisiin hyödynnetyt filamentit maksavat 100–150 € kilogrammaa kohden. SLA-tulostuksessa käytetyt tekniset hartsit maksavat 150–200 €/kg. (Formlabs, 2024a)

3D-tulostimille on monia käyttötarkoituksia. 3D-tulostimilla pystyy valmistamaan nopeita prototyyppisiä, joiden avulla kykenee hahmottamaan idean ongelmia ja hyötyjä. Toinen merkittävä käyttökohde 3D-tulostimille on tuotanto. 3D-tulostimet mahdollistavat yksittäisten erikoisosien ja varaosien valmistamisen. Ruiskuvalulla pystytään valmistamaan osia nopeammin verrattuna 3D-tulostamiseen, mutta 3D-tulosmainen mahdollistaa osien helpon muokkaamisen omiin tarpeisiin (ten Kate et al., 2017). Tulostetut osat ovat usein heikompia. Manero et al. (2019) mukaan ABS osien tulostaminen tuottaa osia, joiden vahvuus on 10–73 % ruiskuvalutusta vastaavasta osasta. Vahvuus riippuu tulostetavan osan tulostussuunnasta.

3. PROTEESIT

Proteesit ovat keinotekoisia apuvälineitä, joiden tarkoitus on toimia korvikkeena puuttuvalle ruumiinosalle (Brack & Amalu, 2021). Proteeseilla on monia eri tarkoituksia riippuen proteesista ja sen käyttäjästä. Proteesit voivat toimia apuvälineenä helpottaakseen arkea tai kosmeettisena asuna. Proteeseja on monenlaisia, kuten

- raajaproteesit
- hammasproteesit
- sekä erilaiset kosmeettiset proteesit.

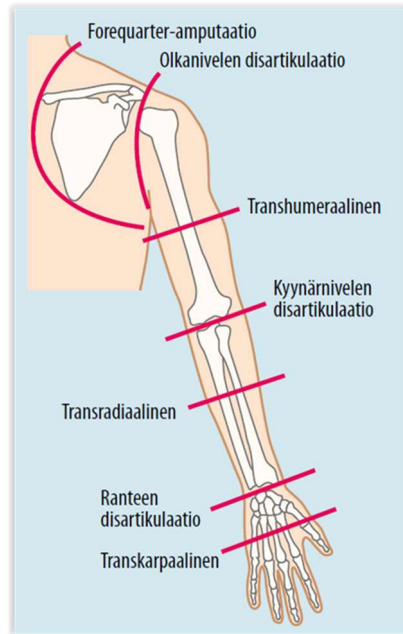
Tapauskohtaisesti proteesi voidaan kiinnittää käyttäjään holkilla tai luuhun kiinnitettyyn implantaattiin, joka on usein valmistettu titaanista (Leijendekkers et al., 2017).

Proteeseilla on useita haasteita, kuten huono saatavuus kehitysmaissa ja kriisialueilla (Cuellar et al., 2018a). Moni hylkää tai lopettaa proteesien käytön niiden huonon käytännöllisyyden, luotettavuuden, ulkonäön tai mukavuuden takia. Raporttien mukaan noin 20 % yläraaja-amputoiduista potilaista ei käytä proteesia, ja noin 26 % aikuisista ja 46 % lapsista ovat epätyytyväisiä proteeseihinsa ja luopuvat niistä (Brack & Amalu, 2021).

Seuraavissa alaluvuissa käsitellään raajaproteeseja ja kosmeettisia proteeseja. Alaluvuissa käydään läpi millaisia yläraaja-, alaraaja-, kosmeettisia proteeseja on ja missä tilanteissa niitä käytetään.

3.1 Yläraajaproteesit

Yläraajaproteesit ovat proteeseja, jotka sijoittuvat olkapään ja sormien väliselle alueelle Kuvan 1 mukaisesti. Niitä on sormi-, käsi- ja koko käsivarren ja olkapään korvaavat proteesit. Yläraajaproteesit jaetaan kolmeen ryhmään passiivisiin, kehovoimaisiin ja ulkoisella voimalla toimiviin proteeseihin.



Kuva 1. Amputaatiotasot yläraajassa (Barner-Rasmussen et al. 2019).

Passiiviset yläraajaproteesit ovat staattisia tai säädettäviä. Säädettävissä yläraajaproteeseissa mekanismeista säädetään ulkoisella voimalla. Tällaisia mekanismeista ovat proteesin käden puristuksen säätäminen ulkoisella voimalla kuten terveellä kädellä. Puolestaan staattiset yläraajaproteesit eivät sisällä mekanismeista, joten niiden asentoa ei pysytä liikuttamaan. (Maat et al., 2018) Kolmasosa yläraaja amputoiduista käyttää jossakin kapasiteetissa passiivisia proteeseja. Ne on suhteellisen edullisia muihin kehittyneempiin proteeseihin verrattuna ja niitä usein suositellaan äskettäin amputoidulle. (Brack & Amalu, 2021)

Kehovoimaiset yläraajaproteesit kykenevät toteuttamaan toiminnon hyödyntämällä kehon voimaa. Yleisin ja edullinen kehovoimainen järjestelmä yläraajaproteeseissa toimii Bowden-kaapeleilla. Kaapeleiden jännitys ohjaa proteesissa olevaa mekanismeista. Kehovoimaisissa yläraajaproteeseissa yleinen mekanismi on käden puristava liike, joka mahdollistaa asioiden kantamisen. (Nagaraja et al., 2022) Kehovoimaisissa yläraajaproteeseissa mekanismin aktivoiva voima voi olla liian suuri käyttäjälle, mikä hankalauttaa proteesin käyttöä ja aiheuttaa fyysistä väsymistä. Myös proteesin käden puristusvoima on usein liian alhainen päivittäisiin tehtäviin, ja moni tykkää käyttää proteesissa käden tilasta koukkuja helpottaakseen proteesin käyttöä. Kehovoimaiset proteesit ovat kuitenkin suosittuja niiden ongelmista huolimatta suhteellisen edullisen hinnan ja käytännöllisyyden ansiosta. (Brack & Amalu, 2021)

Yleinen ulkoisella voimalla toimiva yläraajaproteesi on myoelektrinen proteesi. Nämä proteesit hyödyntävät moottoreita ja akkuja proteesiin mekanismin liikuttamisessa. Myoelektrisiä proteeseja ohjataan sensoreilla, jotka lukevat potilaan lihasten antamia signaaleita. Jokaiselle proteesin toiminnolle valitaan lihas, jota jännittämällä proteesia ohjataan. (Henson, 2021) Myoelektristen käsiproteesien puristusvoima on usein moninkertainen verrattuna samankaltaisiin kehovoimaisiin proteeseihin. Kyseisten proteesien heikkoudet ovat niiden tarve päivittäiselle lataukselle ja korkea hinta verrattuna muhin vaihtoehtoihin. Myoelektrinen yläraajaproteesi voi maksaa kymmeniätuhansia euroja, mikä hankalauttaa pienituloisia hankkimasta myoelektristä proteesia maissa, joissa terveydenhuolto tai potilaan vakuutus ei kustanna proteesia. Puolestaan länsimaissa noin 90 % potilaista käyttää myoelektrisiä proteeseja. (Brack & Amalu, 2021)

3.2 Alaraajaproteesit

Alaraajaproteesit ovat proteeseja, jotka sijoittuvat lonkalle tai sen alapuolelle. Yleisimmät alaraajaproteesit ovat sääriproteesit ja reisiproteesit. Sääriproteesit ja reisiproteesit eroavat toistaan niiden sijainnilla. Koska reisiproteesi sijaitsee polven yläpuolella, vaatii proteesi akselin, joka sallii proteesin taipumisen polven kohdalta. Mohanty et al. (2020) väittää, että reisiproteesin tärkein osa on sen polvi, joka on perusteellinen osa kävelykyvyn palauttamiselle ja kosmeettiselle ulkonäölle. Reisiproteesien polvet voidaan luokitella niiden kiinnitystapojen ja ohjaus menetelmien perusteella. Yksiaksiaalisen polven nivel mallintaa jalan liikettä keskinkertaisella tasolla eikä ole vakaa asentoa muuttaessa. Yksiaksiaalisten nivelten etu on niiden suhteellinen edullisuus ja yksinkertaisuus. Erilaisilla proteesin polvilla voi olla useampi akseleita parantaakseen proteesia vakautta. (Mohanty et al., 2020) Polven nivelessä on usein manuaalinen tai aktiivinen lukko, jolla pystyy estämään tai rajoittamaan nivelen liikettä. Lukon tarkoitus on helpottaa päivittäistä elämää. (Murphy, 2014) On myös hydraulilla ja sähköllä toimivia proteesin polvia, joiden tavoite on parantaa liikkuvuutta. Usein kyseisten proteesien polvet hyödyntävät sensoreita ja gyroskooppeja. Osa sähköllä tai hydraulilla toimivista polvista mahdollistaa portaiden kiipeämisen. (Murphy, 2014)

Sääri- ja reisiproteeseissa yhteisiä osia ovat jalka, holkki, sääri ja liittimet. Proteesin jaloista on monenlaista versiota. Jalkoja on kiinteitä, joissa nilkka ei taivu sekä nivelellisiä, joissa nilkka liikkuu. Jaloista on myös taipuvia versioita, missä jalkapohja tai koko jalka on tehty joustavaksi. Usein joustavat jalat on valmistettu hiilikuidusta. Useat joustavat jalkaproteesit mahdollistavat juoksemisen tai muun urheilun. (Murphy, 2014) Kiinteät jalat ovat puolestaan yksinkertaisia ja edullisia.

3.3 Kosmeettiset proteesit

Kosmeettisen proteesin päätehtävä on korvata puuttuva ruumiinosa esteettisellä korvikkeella (Cordella et al., 2016). Nämä proteesit voivat korvata sormen, varpaan tai muun kehonosan. Proteesin tavoite on saavuttaa ennen amputaatiota ollut ulkonäkö. (AOPA, 2024) Kosmeettiset proteesit ovat usein valmistettu silikonista tai vastaavanlaisesta materiaalista, joka muistuttaa ihoa. Proteesin materiaali ei aina näytä täysin realistiselta, siksi moneen proteeseista maalataan ihon yksityiskohdat. Funktionaalsiin proteeseihin on mahdollista hankkia kosmeettinen hanska, joka puetaan proteesin päälle. Hanskan tavoite on muuttaa proteesin ulkopuolisille näkyvä alue terveen käden näköiseksi. (Cruz et al., 2020)

Realistisuuden lisäksi proteesit voivat olla henkilöllisiä ja sisältää kuviointia tai muotoilua, jonka tavoite on tehdä funktionaalisesta proteesista miellyttävämmän näköinen. Proteesin ulkonäöllä on suuri merkitys ja sen puute on merkittävä syy raajaproteesien käytön lopettamiselle nuorten teinien keskuudessa. Jotta proteesin käyttäjä olisi tyytyväinen proteesiinsa ulkonäköön, proteesi voi tarvita käyttäjäkohtaista suunnittelua, mikä rajoittaa valmistamisnopeutta proteesien suurien eroavaisuuksien takia. Potilaan sisällyttäminen proteesin ulkonäön suunnitteluvaiheessa voi vähentää todennäköisyyttä proteesin hylkäämiselle lisäämällä proteesin tunnearvoa käyttäjälle. Funktionaaliset vaatimukset rajoittavat proteesin suunnittelua, ja proteeseissa on usein rakenteellinen kehys, johon pystyy kiinnittämään kosmeettisia komponentteja. (Manero et al., 2023)

4. 3D-TULOSTUS PROTEESISISSA

Tässä luvussa käydään yleisesti läpi 3D-tulostamisen käyttöä, vahaavuuksista ja heikkouksista proteesien valmistamisessa. Seuraavissa alaluvuissa keskitytään tiettyyn proteesityyppiin tai tapaan valmistaa proteeseja. Alalukujen alussa kerrotaan mitä asia on, minkä jälkeen käydään läpi menetelmän hyödyntämistä proteesien valmistamisessa käyttämällä 3D-tulostusta.

Proteesin suunnittelussa pystytään hyödyntämään 3D-skannaamista proteesin tumpin tai proteesin muodon luomisessa. Skannaamalla terve raaja tai muu mallinnettava ruumiinosa skannattua muotoa voidaan hyödyntää proteesin suunnittelussa. Skannaus voi nopeuttaa proteesin suunnittelua. (Mendoza-DeCal et al., 2023) 3D-tulostaminen, 3D-skannaus ja 3D-mallinnus ovat mahdollistaneet luonnollisten muotojen valmistamisen, mikä mahdollistaa proteesien suunnittelun omien tyyliimieltymysten mukaisesti. (Banga et al., 2020) Proteesin räätälöiminen on helpompaa 3D-tulostetuissa proteesissa, koska proteesien 3D-data ja potilaan mitat ovat digitaalisesti tallennettu. Tallennettu data on helposti muokattavissa, ja uusi muokattu proteesi on mahdollista tulostaa tunneissa. (Ribeiro et al., 2021) Suunnittelu 3D-tulostimille mahdollistaa enemmän proteesien kustomointia. Käyttäjakeskeinen suunnittelu on ollut nousussa. (Manero et al., 2019) 3D-tulostamista voi hyödyntää esteettisten proteesien tai proteesien koteloiden suunnittelussa ja valmistamisessa (Golovin et al., 2018).

3D-mallien jakaminen on 3D-tulostettavien proteesien yksi eduista. Moni yritys ja yhteisö jakavat tai myyvät ohjeita ja 3D-malleja erilaisten proteesien valmistamiseen. (Manero et al., 2019) Osa proteesien 3D-malleista löytyy internetistä ilmaiseksi. Jokainen 3D-tulostettavia proteeseja suunnitteleva ei ole ammattilainen, mikä käyttäjän kannatta ottaa huomioon. (ten Kate et al., 2017) Suuri osa 3D-tulostettavien yläraajaproteesien suunnittelusta ja tutkimuksista kohdistuu kehovoimaisiin proteeseihin, mutta osa keskittyy elektromyografisesti toimiviin proteeseihin (Manero et al., 2019).

Suuri osa 3D-tulostetuista proteeseista on suunnattu lapsille. Lasten kasvaessa he tarvitsevat uusia proteeseja (Brack & Amalu, 2021). Lasten proteesit tulee uudelleen sovittaa parin vuoden välein. 3D-tulostamalla proteesit on mahdollista alentaa proteesien kustannuksia lasten kasvamisen aikana. (Ribeiro et al., 2021)

Materiaalin valinta määrää proteesin kestävyuden ja painon. Yleensä 3D-tulostetut raajaproteesit ovat perinteisiä proteeseja kevyempiä. Liian painava proteesi voi tuntua epä-

mukavalta ja aiheuttaa lihasten väsymistä. Proteesin paino riippuu tulostuksessa käytetyistä asetuksista. Säättämällä tulostuksen täyttöä, tiheyttä ja paksuutta pystytään vaikuttamaan proteesissa käytetyn materiaalin määrään. 3D-tulostaminen vähentää käytetyn materiaalin määrää, mikä puolestaan vähentää materiaalikustannuksia. (Ribeiro et al., 2021)

Kun proteesia suunnitellaan otetaan huomioon proteesin kokemat realistiset kuormat, 3D-tulostaminen voi mahdollistaa proteesille edullisen valmistamisen ja kevyemmän painon (Manero et al., 2019). Tulostettujen proteesien kestävyydestä ei ole tehty määryksiä, mikä voi aiheuttaa ongelmia proteesin toiminnoissa. (Ribeiro et al., 2021) 3D-tulostetut proteesit tarvitsevat lisää tutkimusta niiden kestävyyteen ja pitkäaikaisen käytön vaikutuksiin proteesissa.

3D-tulostetuilla proteeseilla on paljon haasteita. Yläraajaproteeseista on mainittu heikko puristusvoima sekä ketteryys että kestävyys ovat huonoja perinteisiin proteeseihin verrattuna. Puolestaan alaraajaproteeseista on mainittu proteesin istuvuuden, muotoilun ja mukavuuden olevan suurimpia ongelmia. (Ribeiro et al., 2021) Myös proteesien ulkonäössä on ongelmia. Proteesit ovat Ribeiro et al. (2021) mukaan monelle epämiellyttäviä ulkonäkönsä takia. Moni tulostettu proteesi on valmistettu materiaaleista, jotka eivät muistuta ihmisen ihoa. Alaraajaproteeseissa materiaalit ovat rajoitetumpia, koska proteesien täytyy kestää suuria voimia. Yläraajaproteeseissa materiaalivaihtoehtoja on enemmän, mutta proteesia ei pysty piilottamaan yhtä helposti vaatteiden alle. Proteeseihin on mahdollista saada ihmismäisempi ulkoasu, mutta se lisää kustannuksia ja vaatii enemmän työvoimaa. (Ribeiro et al., 2021)

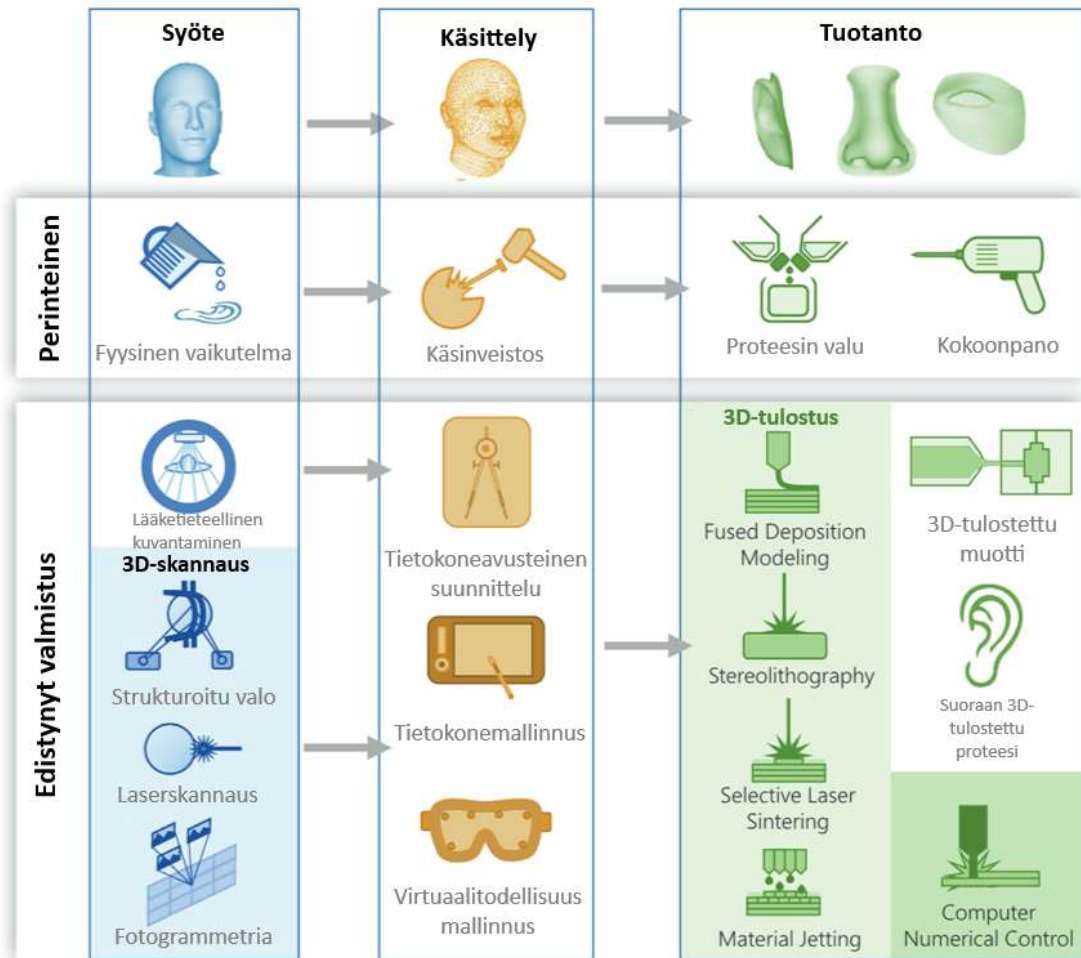
4.1 Topologinen optimointi proteeseissa

Topologinen optimointi on matemaattinen tapa optimoida kappaleessa käytetyn materiaalin asetelma. Suunnittelulle kappaleelle laaditaan rasiukset, reunaehdot ja rajoitukset, mitkä kappaleen tulee toteuttaa. Topologisen optimoinnin tarkoituksena on maksimoida kappaleen ominaisuudet ennalta määrättyissä tehtävissä. Topologinen optimointi on suunnittelun yksi vaihe saavuttaakseen haluttu arvot ja vaatii hienosäätöä, jotta valmistettavuus ja kappaleen suorituskyky toteutuu. (Siva Rama Krishna et al., 2017) Topologinen optimointi poistaa ylimääräisen materiaalin alueilta, jossa rasitus on pientä. Tämän takia topologista optimointia hyödynnetään osiin, joiden painoa tai valmistuksessa käytetyn materiaalin määrää halutaan vähentää. (Formlabs, 2024b) Usein topologisesti optimoidut kappaleet ovat monimutkaisia, mikä vaikeuttaa valmistamista perinteisillä valmistusmenetelmillä. Tämä ei ole yhtä suuri haaste 3D-tulostimille. (Siva Rama Krishna et al., 2017)

Topologista optimointia hyödynnetään valmistuksessa käytetyn materiaalin minimoimiseen ja osan painoa vähentämisessä (Formlabs, 2024b). Proteesin matala paino lisää käyttö mukavuutta ja vähentää lihasten rasitusta (Ribeiro et al., 2021). Topologinen optimointi vähentää käytetyn materiaalin määrää, joka voi laskea proteesin materiaalikustannuksia ja 3D-tulostusaikaa.

4.2 Soft tissue -proteesit

Soft tissue -proteesit ovat kosmeettisia proteeseja, jotka on valmistettu pehmeistä solujen ominaisuuksia sisältävistä materiaaleista, joista yleisin on silikonit. Tällaisia proteeseja on nenä-, korva- ja sormiproteesit. (Powell et al., 2020) Perinteisesti soft tissue -proteesit on valmistettu käsin. Proteesin valmistamisessa aluksi otetaan potilaan morfologia talteen. Morfologiaa hyödynnetään proteesin prototyypin luomisessa. Prototyyppi veistetään käsin. Luodun prototyypin avulla valmistetaan muotti proteesin valamista varten. Kuvan 2 mukaisesti edistyneet valmistusmenetelmät toimivat samalla periaatteella perinteisten valmistusmenetelmien kanssa. Aluksi kappaleen muoto otetaan talteen sähköisesti. Tämän jälkeen muodostetaan proteesin 3D-malli, ja lopussa luodaan muotti proteesin valamista varten 3D-tulostamalla tai vaihtoehtoisesti proteesi 3D-tulostetaan suoraan. Edistyneiden valmistusmenetelmien tavoite proteesien luomisessa on laskea valmistuskustannuksia, parantaa proteesin ulkonäköä ja tehostaa tehtyä työtä. (Powell et al., 2020)



Kuva 2. Soft tissue -proteesien valmistaminen (Muokattu lähteestä Powell et al., 2020).

3D-tulostetut silikonista valmistettu proteesit pystytään tulostamaan joko suoraan tai epäsuoraan. Epäsuorassa menetelmässä tulostettavalle proteesille tulostetaan muotti, jossa silikoni valetaan. Toinen vaihtoehto silikonin tulostamiseen on sen tulostaminen suoraan 3D-tulostimella. Silikonin suora tulostaminen jättää proteesiin pintaan tulostettujen kerrosten jäljet, mikä voi pilata proteesin. (Powell et al., 2020) Myös muoteissa valetut proteesit voivat saada huonon pinnanlaadun, jos tulostetun muotin laatu on huono. Teolliset 3D-tulostimet, joilla saa aikaiseksi hyvän tulostusjäljen ovat kalliita. He et al., (2014) tutkivat edullisilla kuluttaja 3D-tulostimilla valmistettuja silikonin proteeseja ja Scanning Printing Polishing Casting (SPPC) menetelmän hyötyjä soft tissue -proteesien valmistamisessa. Tutkielmassa todettiin, että tulostetun muotin pinnan tasoittaminen parantaa proteesin pinnan laatua, joten edullisia hyvälaatuisia silikonista valmistettuja proteeseja on mahdollista valmistaa kotiolosuhteissa edullisellakin 3D-tulostimella. (He, Y et al., 2014)

Silikonin lisäksi on muitakin materiaaleja, joita pystyy käyttämään soft tissue -proteesien tulostamisessa. Moni näistä materiaaleista sisältää jäykkiä kumimaisia ominaisuuksia. 3D-tulostettavien elastomeeristen materiaalien etu perinteisiin materiaaleihin kuten sili-koni on usein niiden kelpoisuus 3D-tulostamisessa. Termoplastinen polyuretaani (TPU) on yleinen elastomeeri, jota hyödynnetään käsiproteesien valmistamisessa. TPU on saa-tavilla edullisesti FDM-, SLS- ja SLA-tulostimille. (Powell et al., 2020)

Perinteiset käsin valmistetut korva- ja nenäproteesit voivat maksaa jopa 4 000 €. Kor-kean hinnan lisäksi proteesin luominen vaatii useita lääkärikäyntejä. Koko prosessi voi vaatia 5–10 viikkoa. (He, Y et al., 2014) 3D-tulostaminen voisi nopeuttaa prosessia. Te-olliset 3D-tulostimet ovat vielä kalliita. Kiinassa teollisella SLA-tulostimella proteesin muotin luominen voi maksaa 400 €. Ison-Britanniassa proteesi 3D-tulostamalla voi mak-saa lähes yhtä paljon perinteisesti valmistetun proteesin kanssa. (He et al., 2014) He et al. (2014) hyödynsi SPPC menetelmää ja onnistui valmistamaan korvaproteesin alle 30 €:lla. Taulukossa 1 vertaillaan eri tulostusmenetelmillä valmistettujen proteesien pinnan laatua ja hintaa. Taulukon 1 mukaisesti SPPC menetelmällä valmistetut proteesit ovat laadultaan hyviä ja edullisia.

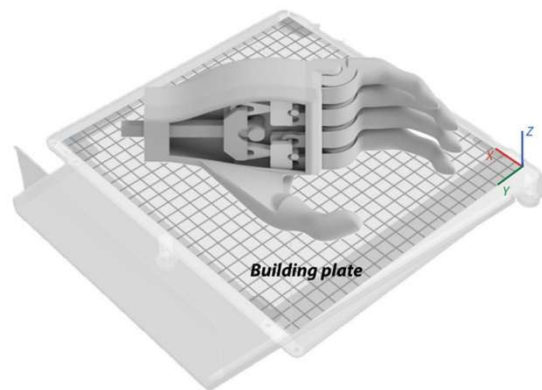
Taulukko 1. 3D-tulostusmenetelmien vertaileminen soft tissue -proteesien valmistami-
sessa (Muokattu lähteestä He et al., 2014).

3D-tulostin	Materiaali	Hinta	Pinnan karheus	Valmistustapa
SLA	Ultraviolettiharts	Kallis	Korkea	Muottivalu
SLS	Jauhe	Kallis	Korkea	Muottivalu
Mustesuihku	Kipsijauhe	Keskihintainen	Keskinkertainen	Muottivalu
Biotulostin	Hydrogel	Keskihintainen	Korkea	Suora tulostus
SPPC	Polymeeri silkki	Halpa	Vähäinen	Muottivalu

4.3 Non-assembly-periaate proteeseissa

Non-assembly-mekanismi on mekanismi, joka valmistetaan yhtenä kappaleena eikä vaadi erillistä kokoonpanoa (Mavroidis et al., 2001; Cuellar et al. 2018a). Mekanismin valmistaminen non-assembly-menetelmällä mahdollistaa minimaalisen jälkikäsittelyn. Non-assembly-mekanismeissa hyödynnetään joustavia mekanismeja ja jäykkiä meka-nismeja myös ulkoisia komponentteja voidaan sisällyttää valmistuksen aikana (Cuellar

et al., 2018b). Non-assemblyn mahdollistaa 3D-tulostus teknologia, ja sen kyky valmistaa monimutkaisia muotoja. (Cuellar et al., 2018a) Cuellar et al. (2018a) suunnitteli non-assembly-periaatteita noudattavan kuvan 3 kehovoimaisen käsiproteesin. Proteesi valmistettiin FDM-tulostimella PLA:sta. Proteesin mekanismi vaatima voima on pieni, mutta myös proteesin puristusvoima on pieni. He uskovat, että 3D-tulostamalla valmistettujen proteesien saatavuutta rajoittaa niiden tulostuksen jälkeinen kokoonpano prosessi, joka vaatii erillisiä osia ja koulutettua henkilökuntaa. (Cuellar et al., 2018a) Cuellarin et al. (2019) mukaan kyseinen proteesi on hyvä vaihtoehtona kehitysmaissa asuville, joilla on käsivarren ongelmia.



Kuva 3. Hahmottava kuva non-assembly proteesista (Cuellar et al., 2018b).

Non-assembly-periaatteen mukaiset proteesit ovat vielä alkeellisia verrattuna muihin vaihtoehtoihin. Cuellar et al. (2018b) ehdottaa, että non-assembly-menetelmällä voitaisiin tulevaisuudessa valmistaa väliaikaisia proteeseja ilman erityisiä työkaluja. Uskon, että non-assembly-proteeseille on käyttöä tilapäisenä apuvälineenä kunnes parempi proteesi on valmis tai saatavilla.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä käsiteltiin raajaproteeseja ja kosmeettisia proteeseja. Proteesi pitää valita henkilökohtaisten tarpeiden ja mahdollisuuksien mukaisesti. Yläraajaproteesit jaetaan passiivisiin, kehovoimaisiin ja ulkoisella voimalla toimiviin. Erilaisilla yläraajaproteeseilla on eri vahvuuksia. Passiiviset proteesit voivat toimia kosmeettisena asuna tai tukivälineenä päivittäisissä arjen tehtävissä. Puolestaan kehovoimaiset proteesit ja ulkoisella voimalla toimivat proteesit toteuttavat jonkin toiminnon, joka helpottaa arjen töitä. Kehovoimaiset proteesit ovat kuitenkin merkittävästi kalliimpia kuin passiiviset proteesit, ja ulkoisella voimalla toimivat proteesit ovat näitä vielä huomattavasti kalliimpia.

Alaraajaproteeseissakin proteesi pitää valita tarpeiden ja mahdollisuuksien mukaisesti. Reisi- ja polviproteeseissa omiin tarpeisiin sopivan polven valinta on tärkeää. Kiinteät ja yksiakseliset polvet ovat edullisia, mutta ne ovat kyvyiltään keksinkertaisia. Paremmat polvet ovat monimutkaisempia ja kalliimpia. Proteesin jalkakin täytyy valita tarpeiden mukaan. Joustavat jalat voivat mahdollistaa juoksemisen tai muun urheilun. Kiinteät jalat ovat puolestaan edullisia.

Proteesin esteettinen ulkonäkö on merkittävä tekijä, jonka puute voi johtaa proteesin käytön lopettamiseen. Proteesit voivat jäljitellä ihmismäistä ulkoasua tai muuta teemaa, jonka muotoilu tai kuviointi on käyttäjän valitsema. Käyttäjän sisällyttäminen proteesin suunnittelu vaiheessa vähentää todennäköisyyttä proteesin hylkäämiselle. 3D-tulostaminen mahdollistaa monipuolisemman muotoilun proteesille.

3D-tulostaminen proteeseissa mahdollistaa halvempien ja kevyempien proteesien valmistamisen. Kosmeettisia soft tissue -proteeseja pystytään edullisesti valmistamaan 3D-tulostamalla muotti valua varten tai suoraan tulostamalla proteesi. Kuitenkin laatu on usein heikompi tulostetuissa soft tissue -proteeseissa verrattuna perinteisesti valmistettuihin. Myös raajaproteeseissa pystyy hyödyntämään 3D-tulostamista. 3D-tulostetut proteesit ovat usein kevyempiä perinteisiin proteeseihin verrattuna. Tulostetuista proteeseista pystytään karsimaan lisää painoa pois topologisella optimoinnilla, jossa materiaalia poistetaan vähän rasiudesta kokevilta aluilta. 3D-tulostetuissa proteeseissa on huomioitava proteesin kestävyys, joka on usein heikompi perinteisiin proteeseihin verrattuna.

3D-tulostamisen hyödyntäminen proteeseissa on vielä uutta teknologiaa. Tulostetuilla proteeseilla on käyttöä kehitysmaissa, joissa proteesien saatavuus on huono. Myös lap-

sille 3D-tulostetu proteesit voivat olla hyvä vaihtoehto niiden edullisuuden ansiosta. Lapsille täytyy ostaa uusi proteesi parin vuoden välein, kun he kasvavat. Vaikka 3D-tulostetuille proteeseille on käyttöä ne eivät vielä ole yhtä laadukkaita kuin perinteiset proteesit. 3D-tulostettu proteesi voi olla hyvä väliaikaiseksi proteesiksi edullisuuden ja nopean valmistamisen ansiosta. 3D-tulostimien kehittymisen myötä moni ongelma tämänhetkissä 3D-tulostetuissa proteeseissa voisi parantua.

LÄHTEET

All3dp (2024). Available at (referred 5.4.2024): <https://all3dp.com/1/best-resin-dlp-sla-3d-printer-kit-stereolithography/>

AOPA (2024). Available at (referred 5.5.2024): <https://www.aopa.org.au/publications/cosmetic-prostheses>.

Banga, H. K., Kalra, P., Belokar, R. M. & Kumar, R. (2020). Design and Fabrication of Prosthetic and Orthotic Product by 3D Printing. Mokhtar Arazpour (ed.) *Prosthetics and Orthotics*. Rijeka: IntechOpen, p. Ch. 4. doi: 10.5772/intechopen.94846.

Barner-Rasmussen, I., Hakkarainen, M., Siponen, E., Mattila, S., Pierides, G. & Waris, E. (2019). Artikkel: Kehittyvä kirurgia ja proteesiteknologia yläraajaamputaatioissa. *Duodecim*. <https://www.duodecimlehti.fi/duo14719>.

Brack, R. & Amalu, E. H. (2021). A review of technology, materials and R&D challenges of upper limb prosthesis for improved user suitability. *Journal of orthopaedics*. [Online] Vol. 23, pp. 88–96.

Cordella, F., Ciancio, A.L., Sacchetti, R., Davalli, A., Cutti, A.G., Guglielmelli E. et al. (2016). Literature Review on Needs of Upper Limb Prosthesis Users. *Frontiers in neuroscience*. [Online] Vol.10 pp. 209–209.

Cruz, R. L. J., Ross, M. T., Powell, S. K. & Woodruff, M. A. (2020). Advancements in Soft-Tissue Prosthetics Part A: The Art of Imitating Life. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*. [Online] Vol. 8, pp. 121–121.

Cuellar, J. S., Smit, G., Zadpoor, A. A. & Breedveld, P. (2018a). Ten guidelines for the design of non-assembly mechanisms: The case of 3D-printed prosthetic hands. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part H, Journal of engineering in medicine*. [Online] Vol. 232 (9), pp. 962–971.

Cuellar, J. S., Smit, G., Plettenburg, D. & Zadpoor, A. (2018b). Additive manufacturing of non-assembly mechanisms. *Additive manufacturing*. [Online] Vol. 21 pp. 150–158.

Cuellar, J. S., Smit, G., Breedveld, P., Zadpoor, A. A. & Plettenburg, D. (2019). Functional evaluation of a non-assembly 3D-printed hand prosthesis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part H, Journal of engineering in medicine*. [Online] Vol. 233 (11), pp. 1122–1131.

Formlabs (2024a). Available at (referred 5.4.2024): <https://formlabs.com/eu/blog/selective-laser-sintering-sls-3d-printer-price/>.

Formlabs (2024b). Blog (referred 5.5.2024). <https://formlabs.com/blog/topology-optimization/>

Golovin, M. A., Marusin, N. V. & Golubeva, Yu. B. (2018). Use of 3D Printing in the Orthopedic Prosthetics Industry. *Biomedical engineering*. [Online] Vol. 52 (2), pp. 100–105.

He, Y., Xue, G. & Fu, J. (2014). Fabrication of low cost soft tissue prostheses with the desktop 3D printer. *Scientific reports*. [Online] Vol.4 (1), pp.6973–6973.

Henson, A. (2021). Article: Introduction to Myoelectric Prostheses. *Armdynamics*. <https://www.armdynamics.com/upper-limb-library/introduction-to-myoelectric-prostheses> (referred 5.5.2024).

Kafle, A., Luis, E., Silwal, R., Pan, H. M., Sherstha, P. L., Bastola, A. K. et al. (2021) 3D/4D Printing of Polymers: Fused Deposition Modelling (FDM), Selective Laser Sintering (SLS), and Stereolithography (SLA). *Polymers*. [Online] Vol. 13(18), pp.3101-.

Koprnický, J., Ackermann, M. & Šafka, J. (2018) Using of 3D Printing Technology in Low Cost Prosthetics. *Materials science forum*. [Online] Vol. 919 pp.199–206.

Leijendekkers, R. A., van Hinte, G., Frölke, J. P., van de Meent, H., Nijhuis-van der Sanden, M. W. G. & Staal, J. B. (2017). Comparison of bone-anchored prostheses and socket prostheses for patients with a lower extremity amputation: a systematic review. *Disability and rehabilitation*. [Online] Vol. 39 (11), pp. 1045–1058.

Maat, B., Smit, G., Plettenburg, D., Breedveld, P. (2018) Passive prosthetic hands and tools: A literature review. *Prosthetics and orthotics international*. [Online] Vol. 42 (1), pp. 66–74.

Manero, A., Smith, P., Sparkman, J., Dombrowski, M., Courbin, D., Kester, A. et al. (2019). Implementation of 3D Printing Technology in the Field of Prosthetics: Past, Present, and Future. *International journal of environmental research and public health*. [Online] Vol.16 (9), pp. 1641-.

Manero, A., Sparkman, J., Dombrowski, M., Smith, P., Senthil, P., Smith, S. et al. (2023). Evolving 3D-Printing Strategies for Structural and Cosmetic Components in Upper Limb Prosthesis. *Prosthesis (Basel, Switzerland)*. [Online] Vol. 5 (1), pp. 167–181.

Mavroidis, C., DeLaurentis, K. J., Won, J. & Alam, M. (2001). Fabrication of Non-Assembly Mechanisms and Robotic Systems Using Rapid Prototyping. *Journal of mechanical design* (1990). [Online] Vol. 123 (4), pp. 516–524.

Mendoza-DeCal, R., Peso-Fernandez, S. & Rodriguez-Quiros, J. (2023). Orthotics and prosthetics by 3D-printing: Accelerating its fabrication flow. *Research in veterinary science*. [Online] Vol.162, pp. 104960–104960.

Mohanty, R. K., Mohanty, R. C. & Sabut, S. K. (2020). A systematic review on design technology and application of polycentric prosthetic knee in amputee rehabilitation. *Australasian physical & engineering sciences in medicine*. [Online] Vol. 43 (3), pp.781–798.

Murphy, D. (Douglas P.) (2014). *Fundamentals of amputation care and prosthetics*. 1st ed. New York, NY: Demos Medical Publishing, LLC.

Nagaraja, V. H., da Ponte Lopes, J. & Bergmann, J. H. M. (2022) Reimagining Prosthetic Control: A Novel Body-Powered Prosthetic System for Simultaneous Control and Actuation. *Prosthesis (Basel, Switzerland)*. [Online] Vol. 4 (3), pp. 394–413.

Powell, S. K., Cruz, R. L. J., Ross, M. T. & Woodruff, M. A. (2020). Past, Present, and Future of Soft-Tissue Prosthetics: Advanced Polymers and Advanced Manufacturing. *Advanced materials (Weinheim)*. [Online] Vol. 32 (42).

Ribeiro, D., Cimino, S. R., Mayo, A. L., Ratto, M. & Hitzig, S. L. (2021). 3D printing and amputation: a scoping review. *Disability and rehabilitation: Assistive technology*. [Online] Vol. 16 (2), pp. 221–240.

Siva Rama Krishna, L., Mahesh, N. & N.Sateesh (2017). “Topology optimization using solid isotropic material with penalization technique for additive manufacturing,” in *Materials today : proceedings*. [Online] Vol. 4, pp. 1414–1422.

ten Kate, J., Smit, G. & Breedveld, P. (2017). 3D-printed upper limb prostheses: a review. *Disability and rehabilitation: Assistive technology*. [Online] Vol. 12 (3), pp.300–314.