

Mechanics, material science, industrial engineering and management
Mechanika, medžiagų inžinerija, pramonės inžinerija ir vadyba

**MEDŽIAGŲ, SKIRTŲ ORTOPEDINIŲ ĮTVARŲ 3D SPAUDAI,
SAVYBIŲ TYRIMAS**

Živilė Marija JASIŪNAITĖ, Andžela ŠEŠOK*, Rimantas STONKUS , Nikolaj ŠEŠOK

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva

Gauta 2020 m. gruodžio 17 d.; priimta 2021 m. sausio 20 d.

Santrauka. Straipsnyje nagrinėjamos 3D spaudos taikymo ortopedinių įtvarų gamyboje galimybės. Nagrinėjami biologiškai suderinamų medžiagų 3D spaudos ypatumai. Darbe atlikti trijų atspausdintų bandinių mechaninio lenkimo bandymai. Remiantis bandymų rezultatais, 3D modeliavimui bei spausdinimui parenkama PETG medžiaga. Pateikiama spausdinimo technologinių parametrų suvestinė. Įtvoro prototipo modeliavimas bei spausdinimas, lyginant su tradiciniu būdu gaminamais įtvaramis, užtrunka mažiau laiko, sunaudojami mažesni medžiagų kaštai, nereikalauja daug fizinių pastangų, puikiai atitinka paciento kūno anatomiją, turi įvairaus dizaino galimybę.

Reikšminiai žodžiai: ortopedinis įtvaras, mechaninės savybės, 3D modeliavimas, 3D spauda.

Įvadas

Sparčiai besivystančios moderniosios technologijos leidžia sukurti tikslesnį ir patogesnį įtvarą, tai leidžia gerinti jo mechanines savybes. Bėgant laikui, ortezų gamyba reikalauja vis mažiau rankų darbo. Nuo natūralių medžiagų naudojimo, kaip antai medis, oda, pereita prie dirbtinių – įvairūs plastikai bei jų kompozitai, susintetintos pluoštinės medžiagos (anglies, stiklo pluoštai). Sintetinių medžiagų įtvarai efektyviau apdirbami bei tiksliau suprojektuojami. Tačiau labai didelė dalis laiko paskiriama pasiruošti – gipsiniams modeliams kurti. Taupant laiką, vertėtų pasinaudoti naujausiomis technologijomis – 3D skenavimo bei spausdinimo sistemomis. Ar 3D atspausdintuvai gali atspausdinti efektyvų bei funkcionalų įtvarą?

Tam, kad įtvaras būtų pajėgus atlaikyti kūno masę ir kartu atlikti savo funkciją – stabilizuoti, įmobilizuoti ar prilaikyti – turi pasižymėti tinkamomis savybėmis. Svarbiausios būtų šios: atsparumas deformacijoms, stiprumas, lengvas svoris. Tokioms savybėms užtikrinti dažniausiai naudojamas plastikas polipropilenas (PP), tačiau dar geresnėmis mechaninėmis savybėmis pasižymi kompozitai (Wan et al., 2007). Kiekvieną dieną dėvimi čiurnos-pėdos įtvarai turi būti pakankamai stiprūs atlaikyti ėjimo metu atsirandančias apkrovas bei patogūs kasdieniam naudojimui (Jin et al., 2016).

Dažniausiai literatūroje pasitaikantis reikalavimas įtvarui – funkcionalumas. Tai reiškia, jog dėvima ortopedinė priemonė turi atlikti savo funkciją – prilaikyti, stabilizuoti, įmobilizuoti, tačiau tuo pačiu metu kuo mažiau riboti žmogaus natūralius judesius, jei įmanoma konkrečios traumos atveju (Muñoz, 2018). Reikia tinkamai tvirtinti įtvarą prie galūnės, jog būtų palaikomas tinkamas sąnario judesys, atitinkamai paskirstoma apkrova, nesumažinant paciento aktyvumo lygio ir tuo pat metu išlaikant terapinį poveikį. Įtvoro funkcinės bei mechaninės savybės priklauso nuo keletu aspektų: medžiagos, iš kurios pagamintas ortezas; įvairių įtvoro formų ar modifikacijų. Šie aspektai svarbūs kuriant tam tikrai problemai spręsti reikiamą ortezą. Medžiaga ir jos savybės turi užtikrinti įtvoro stiprumą, ilgaamžiškumą. Forma padeda užtikrinti reikiamą stabilumą bei dėvėjimo patogumą (Wach et al., 2018). Ortezai gali būti gaminami dviem būdais: individualiai ir pagal standartinių matmenų modelius. Individualūs labiausiai atitinka paciento kūno linijas bei apimtis. Įtvarai, gaminami pagal statistinius matmenis, negali visiškai atkartoti žmogaus kūno formų – šios yra labai individualios (Wan et al., 2007).

Ortopedijoje naudojamus plastikus galime skirstyti į dvi grupes: žematemperatūriai ir aukštamperatūriai plastikai (Šešok, 2012b). Pasirinkimas, kokias medžiagas

*Autorius susirašinėti. El. paštas andzela.sesok@vilniustech.lt

naudoti, priklauso nuo ortopedo techniko kvalifikacijos ir patirties, traumos lokalizacijos ir sudėtingumo.

Ortezų gamyboje aukštoje temperatūroje minkštėjantys plastikai negali būti formuojami ant paciento kūno, nes jie tampa minkšti, pasiekę aukštesnę nei 100 °C temperatūrą. Ortezų gamybai iš aukštatemperatūrio plastiko reikalingas galūnės gipsinis modelis, ant kurio formuojamas galutinis gaminys. Modelio paruošimas užtrunka nemažai laiko ir yra reikalinga ortopedo techniko patirtis modelio apdirbimo metu.

Polipropilenas (PP) yra gerai žinomas dėl savo kietumo, aukšto elastiškumo ir stiprumo, tačiau keblumų kelia siaura temperatūros variacija ir jautrus paviršius termoplastinėje būsenoje (Smit, 2014). Polipropilenas atsparus nuovargiui, karščiui bei cheminiam ir vandens poveikiui, o medžiagos elastiškumo modulis siekia iki 1,4 GPa (Hindle, n.d.). Atlikto mokslinio tyrimo metu buvo analizuojama spalvos priemaišos įtaka polipropileno mechaninėms savybėms ir pastebėta, jog elastiškumo modulis kinta nuo 1,2 GPa iki 1,48 GPa (Ross et al., 1999). Lietuvos ortopedinėms įmonėms tiekiamų plastiko lakštų Jungo modulis – 1,38 GPa. Kol kas PP nėra pritaikytas 3D spausdinimui dėl didelio atspausdintų gaminių susitraukimo.

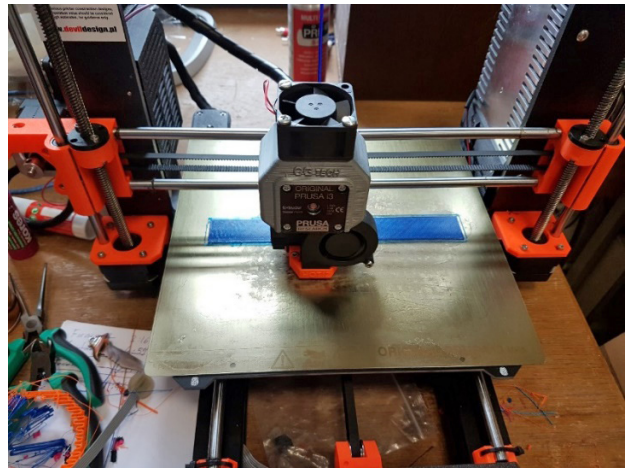
Greitai besivystančios pramonės laikais naujovės tampa kasdieniais įvykiais, kurie palengvina ir pajvairina mūsų gyvenimą. 3D spausdinimo technologija vis dar stebina savo galimybėmis, kurios apima daugelį pramonės bei kasdienio gyvenimo sričių. Neabejotina, jog besiplečiančios 3D spausdinimo galimybės labai svarbios ir medicinoje (Adeleke, 2018).

3D spausdinimas yra ekonomiškai naudingesnis nei tradicinis ortopedinių įtvarų gaminių būdas, nes su-naudojami mažesni medžiagų kaštai. Kita vertus reikalinga speciali įranga bei atitinkamos programos. Tačiau, mokslininkų nuomone, investiciją atperka – mažesni medžiagų kaštai, taip pat efektyvesnis paciento gydymas bei patogus dėvėjimas. Pastarasis aspektas pagrindžiamas tuo, jog įtvaras gaminamas labai preciziškai – atitinka paciento anatomijos ypatumus (Krivoniak ir Sirinterlikci, 2017). 3D spausdinimo technologija ortopedijoje jau daro įtaką gaminių kokybei, funkcionalumui bei estetikai. Taikant 3D skenavimo ir spausdinimo technologijas kuriami įtvarai, atitinkantys žmogaus kūno proporcijas ir formą. Šiuo metu reikalinga ištirti medžiagas, kurios gali būti naudojamos ar pritaikomos naudoti 3D spaudoje.

Darbo tikslas: pagal gautus mechaninių savybių rezultatus nustatyti, kuri medžiaga yra tinkamiausia gaminti čiuornos įtvarus taikant 3D spausdinimo technologiją. Sumodeliuoti ortezo prototipą ir atspausdinti 3D spausdintuvu iš nustatytos medžiagos. Įvertinti 3D modeliavimo ir spausdinimo technologinius parametrus.

1. Medžiagos ir metodai

Analizuojamas 3D spausdintuvuose naudojamų medžiagų tinkamumas ortopediniams įtvarams gaminti. Tyrimui pasitelkiamas eksperimentinis mechaninio lenkimo bandymas bei skaitmeninis modeliavimas kompiuterine progra-



1 paveikslas. Prusa 3D spausdintuvus
Figure 1. Prusa 3D printer

ma. Eksperimentinio tyrimo metu renkama informacija apie medžiagos savybes – veikiančias apkrovas ir poslinkį, tamprumo modulį. Tyrimui paruošiami trys bandiniai iš 3D spaudoje naudojamų plastikų.

Bandiniams paruošti naudojamas 3D spausdintuvus *Prusa 3D* (1 pav.). Bandiniai atspausdinti VILNIUS TECH Mechanikos fakulteto Biomechanikos inžinerijos katedros laboratorijoje.

Visų bandinių matmenys: 200×25×2,5 (mm). Bandinių medžiagos: 1) plastiko ir 20 % anglies kompozitas – 20 % *Carbon fiber XT-CF20* (toliau vadinamas 20 % *Carbon*). Matricinis plastikas – kopoliesteris; 2) polietileno tereftalato glikolio (PETG) plastikas. 3D spausdinimui naudojamas PETG filamentas yra stiprus ir pasižymi gera termine varža (toliau vadinamas – PETG); 3) *Flexfill 98A* plastikas. *Flexfill 98A* priklauso TPE (angl. *ThermoPlastic Elastomer* – termoplastikų elastomerų) šeimai ir yra vadinamas TPU (angl. *ThermoPlastic Polyurethane* – termoplastikas poliuretanais). *Flexfill* turi labai gerą atsparumą dilimui, lieka lankstus šaltoje aplinkoje, atsparus įvairiems tirpikliams.

Bandiniams spausdinti pasirinktas krypties pasikeitimas 45° kampu. Šis parametras pasirinktas sąmoningai, darant prielaidą, jog įvairiomis kryptimis atspausdintas gamins bus tvirtesnis nei spausdinant horizontaliomis tiesėmis.

Taip pat programos lange parenkamas spausdinio 100 % užpildymas, kuris užtikrina, jog bandinys atspausdinamas kaip vientisas kūnas, nepalikant tuštumų. Kiekvienai bandymo medžiagai reikalingos skirtingos spausdinimo sąlygos. Spausdinimo sąlygos pateiktos 1 lentelėje.

1 lentelė. Bandinių technologiniai spausdinimo parametrai
Table 1. Technological printing parameters of samples

Parametrai	20 % Carbon	PETG	Flexfill
Galvutės temperatūra, °C	260	250	240
Pagrindo temperatūra, °C	90	90	50



2 paveikslas. Mecmesin MultiTest 2.5-i bandymo stendas
Figure 2. Mecmesin MultiTest 2.5-i testing stand

Mechaninis trijų taškų lenkimo bandymas atliekamas VILNIUS TECH Mechanikos fakulteto Mechatronikos, robotikos ir skaitmeninės gamybos katedros laboratorijoje. Bandymas inicijuotas remiantis standarto ISO 178:2010 rekomendacijomis. Lenkimo bandymas atliktas naudojant Mecmesin MultiTest 2.5-i bandymo stendą (2 pav.). Naudojama matavimo celė: Mecmesin ILC-S 1000 N. Atstumas tarp laikiklių – 90 cm. Apkrovos greitis 500 mm/min.

Tampumo modulio reikšmė apskaičiuojama pagal formulę:

$$E = \frac{L^3 F}{4bh^3 s},$$

čia E – tampumo modulis, Pa; L – atstumas tarp laikiklių, mm; F – veikianti apkrova, N; b – bandinio plotis, mm; h – bandinio storis, mm; s – poslinkis, mm.

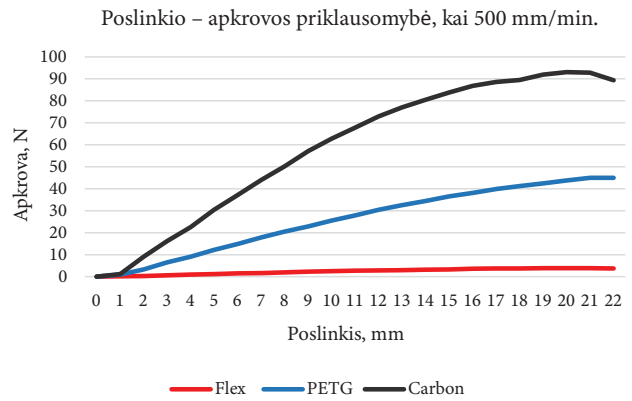
2. Rezultatai

3D atspausdintų bandinių poslinkio priklausomybė nuo apkrovos pateikta 3 paveiksle.

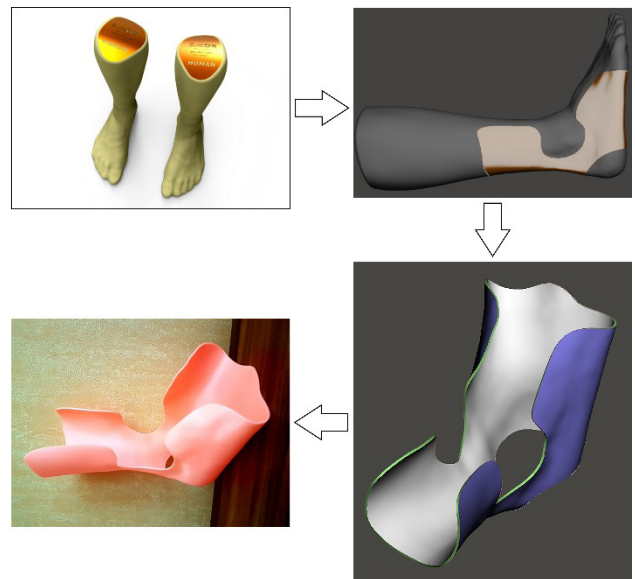
Apskaičiuotas trijų bandinių tampumo modulis: *Flex* – 113 MPa, *PETG* – 1,30 GPa, *Carbon* – 2,71 GPa.

20 % *Carbon* medžiaga puikiai tiktų ortopediniam įtvarui spausdinti, tačiau bandinio spausdinimo metu pastebėta, jog filamenta viela spausdintuvo kaitinimo galvutėje kemšasi, todėl didelio gabarito įtvaro spausdinimas būtų keblus. *PETG* bandinio tampumo modulis panašus kaip tradicinėje ortopedijoje naudojamų *PETG* lakštų – 1,27 GPa (Proteor orthopaedics, 2016) ir labai panašus į polipropileno – 1,48 GPa (Ross et al., 1999). *PETG* medžiaga yra biologiškai suderinama ir lengvai spausdinama, todėl yra pasirenkama įtvaro modeliui spausdinti 3D spaudos būdu.

Ortopedinio įtvaro 3D modeliavimo proceso eiga pa-vaizduota 4 paveiksle. Įtvarui modeliuoti reikalingas 3D skenuotas kojos modelis. Darbe naudojami kojų ir pėdų



3 paveikslas. Poslinkio priklausomybė nuo apkrovos
Figure 3. Load/displacement dependency



4 paveikslas. Ortopedinio įtvaro 3D modeliavimo ir gamybos procesas

Figure 4. 3D modelling and manufacturing process of orthosis

modeliai, paimti iš *GrabCad.com* (n.d.). Ant modelio piešiamas įtvaro modelis. Gaunama įtvaro forma, atkartojanti kojos modelio anatomiją. Modeliavimo programoje *MeshMixer* galima pritaikyti įvairių formų spausdinimo tinklę, kuris sukuria ypatingą dizainą. 3D spausdintuvo programoje atidaromas ortezo prototipas. Spausdinti ruošiamas modelis spausdintuvo programinėje įrangoje supjaustomas į sluoksnius.

Programinėje įrangoje pasirinkus medžiagą, iš kurios bus spausdinamas įtvaras, parodomi spausdinimo parametrai. Prototipui spausdinti naudojama medžiaga – *PETG*. Įtvaras spausdinamas 3D spausdintuvu *Prussa 3D*.

Atspausdintas įtvaras nuimamas nuo spausdintuvo pagrindo. Pašalinamos ant modelio esančios spausdinimo atramos. Spausdinti sunaudota 51,36 m, arba 156,89 g, filamenta. Spausdintuvo programos lange taip pat pateikiama gaminio kaina – 4,36 Eur. Kaina atspindi tik sunaudotos medžiagos kainą, tačiau neįvertinami papildomų

procesų įkainiai (elektra, nusidėvėjimas, modeliavimas, programinė įranga). Galime teigti, jog papildomų procesų įkainiai bus didesni nei medžiagos savikaina.

Įtvoro modeliavimas, spausdinimas ir apdirbimas reikalauja specialios programinės įrangos, projektavimo žinių bei įgūdžių, kruopštumo ir laiko resursų. Tačiau galutinis produktas leidžia džiaugtis šiuolaikišku dizainu, funkcionalumu, geromis modelio mechaninėmis savybėmis bei patogumu dėvint. Pastarąją ypatybę užtikrina įtvoro kūrimas ant skenuoto paciento galūnės 3D modelio, atitinkančio asmens anatomiją.

Įtvoro modeliavimo efektyvumas priklauso nuo naudotojo patirties bei įgūdžių. Šiame darbe aprašomas įtvoro modelis buvo sukurtas per maždaug 2 valandas. Lyginant su tradiciniu būdu gaminamo įtvoro pasiruošimo laiku, kuris trunka daugiau nei dvi paras (Šešok, 2012b), 3D modelio kūrimas užtrunka žymiai mažiau laiko. Būtinai paminėti, jog nevertinome 3D skenavimo ir nuskenavimo modelio apdirbimo laiko. Tačiau remiantis Krivoniak ir Sirinterlikci (2017) darbe pateiktais duomenimis, kojos skenavimas, skenuoto modelio apdorojimas ir įtvoro modeliavimas užtrunka 1 val. 40 min. Įtvoro gamyboje 3D spaudos būdu ilgiausiai trunka spausdinimas.

Kadangi įtvoras spausdinamas sluoksniu po sluoksnio, šiame darbe aprašomam modeliui atspausdinti prireikė apie 16,5 valandos. Susumavus laikus, galima teigti, jog 3D spaudos būdu gaminami įtvorai pagaminami greičiau nei tradiciniu būdu. 3D spaudos būdu sunaudojami mažesni medžiagų kaštai: čia nereikalingas paciento galūnės gipsinis modelis ir nelieta perteklinio plastiko. Be to, 3D spausdinimas yra labai švarus ir mažai fizinių jėgų reikalaujantis procesas. Tradiciniu būdu gaminamiems įtvorams reikalinga speciali įranga: kaitinimo krosnis, vibracinis skerspjuoklis, vakuumas, spaustuvai ir kt. 3D skenavimui ir spausdinimui reikalingi ne tik specialūs įrenginiai, bet ir programinė įranga: 3D skeneris, 3D spausdintuvas, kompiuteris, skenuoto modelio apdirbimo programa, įtvoro modelio kūrimo programa.

Išvados

Darbe ištirtos 3D spausdintuvų gautų bandinių mechaninės savybės. Palyginus gautus mechaninius parametrus, įtvorui modeliuoti, spausdinti ir technologiniams parametrų vertinti parinkta PETG medžiaga. Pasirinkimas pagrindžiamas šios medžiagos ypatybėmis: pasižymi panašiomis mechaninėmis savybėmis kaip plastikas polipropilenas, kuris plačiai naudojamas ortopedijoje, yra lengvai spausdinamas, biologiškai suderinamas.

Įtvoro prototipo modeliavimas bei spausdinimas, lyginant su tradiciniu būdu gaminamais įtvorais, užtrunka mažiau laiko, sunaudojami mažesni medžiagų kaštai, nereikalauja daug fizinių pastangų, puikiai atitinka paciento kūno anatomiją, turi įvairaus dizaino galimybę.

Ateietyje gali būti atliekamas 3D spaudos būdu pagamintų įtvorų ciklinio apkrovimo mechaninis bandymas, kad būtų įvertinamas tokiu būdu pagamintų įtvorų ilgaamžiškumas ir patvarumas.

Literatūra

- Adeleke, W. (2018). *3D printing*. https://www.researchgate.net/publication/324680847_3D_printing
- GrabCad. (n.d.). *Scanned human foot and leg*. [https://grabcad.com/Hindle, C. \(n.d.\). Polypropylene \(PP\). British Plastics Federation. https://www.bpf.co.uk/Plastipedia/Polymers/PP.aspx](https://grabcad.com/Hindle, C. (n.d.). Polypropylene (PP). British Plastics Federation. https://www.bpf.co.uk/Plastipedia/Polymers/PP.aspx)
- International Organization for Standardization. (2010). *Plastics – Determination of flexural properties* (ISO 178:2010). <https://www.iso.org/standard/45091.html>
- Jin, Y., He, Y., & Shih, A. (2016). Process planning for the fuse deposition modeling of ankle-foot orthoses. *Procedia CIRP*, 42, 760–765. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.315>
- Krivoniak, A., & Sirinterlikci, A. (2017). *3D printed custom orthotic device development: a student-driven project* [Conference presentation], 2017 ASEE Annual Conference & Exposition, Columbus, Ohio. <https://doi.org/10.18260/1-2--27436>
- Muñoz, S. (2018). *The new generation of AFOS*. The O&P EDGE. <https://opedge.com/Articles/ViewArticle/2018-11-01/the-new-generation-of-afos>
- Proteor orthopaedics. (2016). *PETG*. <http://orthopaedics.proteor.com/family,1317-petg.php>
- Ross, R. S., Greig, R. J., & Convery, P. (1999). Comparison of bending stiffness of six different colours of copolymer polypropylene. *Prosthetics and Orthotics International*, 23(1), 63–71. <https://doi.org/10.3109/03093649909071613>
- Smit, E. (2014). *Thermoplastic materials used in Orthotics and Prosthetics*. https://prezi.com/yr0h-jvqt_nn/thermoplastic-materials-used-in-orthotics-and-prosthetics/
- Šešok, A. (2012a). *Medžiagos medicinoje: mokomoji knyga*. Technika. <https://doi.org/10.3846/1380-S>
- Šešok, A. (2012b). *Ortopedinės technikos projektavimas ir gamyba*. Technika. <https://doi.org/10.3846/1376-s>
- Wach, A., McGrady, L., Wang, M., & Silver-Thorn, B. (2018). Assessment of mechanical characteristics of ankle-foot orthoses. *Journal of Biomechanical Engineering*, 140(7), 071007. <https://doi.org/10.1115/1.4039816>
- Wan, Y. Z., Zak, G., Naumann, S., Redekop, S., Slywynska, I., & Jiang, Y. (2007). Study of 2.5-D glass-fabric-reinforced light-curable resin composites for orthotic applications. *Composites Science and Technology*, 67(13), 2739–2746. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.02.010>

RESEARCH OF MATERIALS PROPERTIES FOR 3D PRINTING OF ORTHOSES

Ž. M. Jasiūnaitė, A. Šešok, R. Stonkus, N. Šešok

Abstract

In this paper examines the possibilities of applying 3D printing in the manufacture of orthoses. Features of 3D printing of biocompatible materials are analyzed. In this work, mechanical bending tests of three printed samples were performed. Based on test results, PETG material is selected for 3D modeling and printing. Technological properties of 3D printing were summarized. Modeling and printing of the orthoses prototype, compared to traditional methods, takes less time, and uses lower material costs, does not require much physical effort, is well suited to the patient's body anatomy, and has a variety of design options.

Keywords: orthoses, mechanical properties, 3D modelling, 3D printing.