



RĪGAS TEHNISKĀ  
UNIVERSITĀTE

**Vlads Vladinovskis**

## **3D DRUKAS IEKĀRTU IZSTRĀDE UN IZPĒTE ORTOPĒDISKO REHABILITĀCIJAS LĪDZEKĻU RAŽOŠANAI**

Promocijas darba kopsavilkums



# RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultāte  
Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūts

**Vlads Vladinovskis**

Doktora studiju programmas "Elektrotehnoloģiju datorvadība" doktorants

## 3D DRUKAS IEKĀRTU IZSTRĀDE UN IZPĒTE ORTOPĒDISKO REHABILITĀCIJAS LĪDZEKĻU RAŽOŠANAI

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs  
profesors *Dr. sc. ing.*  
IĻJA GALKINS

RTU Izdevniecība  
Rīga 2024

Vladinovskis V. 3D drukas iekārtu izstrāde un izpēte ortopēdisko rehabilitācijas līdzekļu ražošanai. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2024. 57 lpp.

Publicēts saskaņā ar RTU promocijas padomes “P-14” 2024. gada 26. jūnija lēmumu, protokols Nr.232.7.



Promocijas darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu darbības programmas “Izaugsme un nodarbinātība” 8.2.2. specifiskā atbalsta mērķa “Stiprināt augstākās izglītības institūciju akadēmisko personālu stratēģiskās specializācijas jomās” projektā Nr. 8.2.2.0/20/I/008 “Rīgas Tehniskās universitātes un Banku Augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās”.

Pētījums tapis ar Rīgas Tehniskās universitātes Doktorantūras grantu programmas atbalstu.

Vāka attēls ir ņemts no *Unsplash*, un to veidojis Toms Klaess (@tomspentys).

<https://doi.org/10.7250/9789934371141>

ISBN 978-9934-37-114-1 (pdf)

# PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2024. gada 23. oktobrī plkst. 15, Rīgas Tehniskās universitātes Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultātē, Āzenes ielā 12/1 ielā, 525. auditorijā.

## OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesore *Dr. sc. ing.* Nadežda Kuņicina,  
Rīgas Tehniskā universitāte

Asociētais profesors *Dr. sc. ing.* Vladimir Kuts,  
Tallinas Tehnoloģiju universitāte, Igaunija

Asociētais profesors *Dr. sc. ing.* Andrei Lobov,  
Norvēģijas Zinātnes un tehnoloģiju universitāte, Norvēģija

## APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Vlads Vladinovskis ..... (paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, sešas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 88 attēli, 13 tabulas, trīs pielikumi, kopā 111 lappuses, ieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 84 nosaukumi.

## PATEICĪBA

Vispirms vēlos izteikt visdziļāko pateicību un cieņu savam promocijas darba vadītājam, profesoram Iljam Galkinam, par viņa nenovērtējamo atbalstu, ieteikumiem un profesionālo vadību visa promocijas darba izstrādes laikā. Viņa zināšanas, padomi un veltītais laiks sniedza būtisku ieguldījumu mana darba kvalitātē un veicināja manu izaugsmi akadēmiskajā un profesionālajā jomā. Profesora Galkina atbalsts un iedrošinājums ir bijis neaizstājams.

Īpašu paldies vēlos izteikt saviem kolēģiem no Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūta. Jūsu profesionālie padomi, tehniskā palīdzība un draudzīgais atbalsts veidoja būtisku daļu no šī ceļa. Jūsu koleģialitāte un sadarbības gars palīdzēja pārvarēt grūtības un sasniegt izvirzītos mērķus. Esmu ļoti pateicīgs, ka man bija iespēja strādāt kopā ar tik zinošiem un atbalstošiem cilvēkiem.

Pateicos arī promocijas darba recenzentiem par viņu vērtīgajiem komentāriem, kritiku un ieteikumiem, kas veicināja darba uzlabošanu un pilnveidošanu. Jūsu profesionālais redzējums un objektivitāte palīdzēja skaidrāk saskaņot un uzlabot būtiskos darba aspektus.

Visbeidzot, īpaši sirsnīgi pateicos Mg. sc. ing. Nikai Ijudinai par viņas neatlaidīgo atbalstu, vērtīgajiem padomiem un nenovērtējamo palīdzību visa promocijas darba izstrādes laikā. Viņas iedrošinājums un motivācija bija būtisks spēks, kas palīdzēja pārvarēt izaicinājumus un sekmīgi virzīties uz priekšu.

Nevaru nepateikties arī savai ģimenei — par viņu neizsīkstošo atbalstu, izpratni un pacietību šajā laikā. Jūsu klātbūtne un iedrošinājums ir devuši man spēku un izturību turpināt darbu un sasniegt nospraustos mērķus. Paldies jums no sirds!

# SATURS

IEVADS .....	6
Promocijas darba mērķis.....	7
Promocijas darba uzdevumi.....	7
Pētījumā metodes un iekārtas .....	8
Pētījuma novitāte .....	8
Darba aprobācija.....	9
<b>LITERATŪRAS APSKATS .....</b>	<b>10</b>
1. ORTOPĒDISKIE REHABILITĀCIJAS LĪDZEKĻI .....	10
1.1. Lietojums un prasības .....	10
1.2. Ortozes apraksts un ar to risināmās problēmas .....	10
1.3. 3D drukātas ortozes izgatavošanas tehnoloģija .....	11
2. 3D DRUKAS TEHNOLOĢIJAS IZPĒTE .....	12
2.1. 3D drukas apraksts .....	12
2.2. 3D drukas tehnoloģijas un izmantotie materiāli .....	12
3. MODEĻA SAGATAVOŠANAS METOŽU IZPĒTE <i>FDM</i> 3D DRUKAI .....	14
3.1. 3D objekta novietojums telpā un 3D modeļa griešanas metodes.....	14
3.2. Esošo 3D modeļa griešanas metožu izpēte .....	14
3.3. Esošo <i>FDM</i> drukas ierobežojumu, izaicinājumu un problēmu izpēte .....	15
LITERATŪRAS APSKATA KOPSAVILKUMS.....	19
<b>EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA .....</b>	<b>20</b>
4. NEKĀRTAINĀS GRIEŠANAS METODES IZPĒTE UN IZSTRĀDE ORTOZES IZGATAVOŠANAI, PROTOTIPA IZSTRĀDE UN METODES PIELĀGOŠANA .....	20
4.1. Cilindriskas 3D drukas metodes izstrāde.....	20
4.2. Eksperimentālā stenda parametru aprēķini .....	21
4.3. Eksperimentāla cilindriskā 3D drukas stenda izstrāde.....	22
4.4. Eksperimentu gaita un rezultātu apkopojums .....	23
4.5. Koncepta pārbaudes secinājumi .....	25
5. TRĪSASU <i>FDM</i> 3D DRUKAS CILINDRISKĀS GRIEŠANAS METODES UN PROTOTIPA IZSTRĀDE .....	25
5.1. <i>FDM</i> 3D drukas cilindriskās griešanas metodes izstrāde .....	25
5.2. Trīsasu <i>FDM</i> cilindriskas koordinātu sistēmas printera prototipa izstrāde.....	34
5.3. Trīsasu <i>FDM</i> 3D cilindriskā printera prototipa testēšana .....	39
5.4. Rezultāti .....	42
NEKĀRTAINĀS TRĪSASU 3D DRUKAS METODES REZULTĀTU KOPSAVILKUMS .....	46
6. PIECASU 3D DRUKAS RISINĀJUMS KOMPLEKSAS FORMAS ORTOŽU DRUKAI.....	48
6.1. Piecasu cilindriskā neplakana 3D printera metodes izstrāde .....	48
6.2. Piecasu cilindriskā neplakana 3D printera izstrāde.....	50
6.3. Eksperimentu veikšana un rezultātu apkopojums .....	53
<b>SECINĀJUMI .....</b>	<b>55</b>
LITERATŪRAS SARAKSTS .....	56

# IEVADS

Strauji attīstoties medicīnas nozarei, stipri augusi prasība pēc personalizētiem medicīnas rīkiem, kas sniedz individuālu pieeju katra cilvēka vajadzībām un veicina atrāku veselšanās procesu. Šķērslis personalizētai pieejai ir tas, ka šādu ierīču izgatavošana ir dārgāka, toties rezultātā cilvēks iegūst daudz augstāka līmeņa veselības aprūpi. Lai samazinātu šo trūkumu, kā alternatīvu var izmantot 3D drukāšanu. Izveidojot cilvēka rehabilitējamās ekstremitātes 3D modeļus, izmantojot 3D skenēšanu, var panākt to, lai izdrukātais izstrādājums pilnīgi atbilst ķermeņa daļas pareizai anatomiskai formai. Savukārt, izmantojot agrās prognozēšanas metodes, ortozi varēs drukāt, balstoties nākotnē sagaidāmajā rezultātā, drukājot jaunas ortozes atbilstoši rehabilitācijas gaitai. Izstrādājumi, kas ražoti, izmantojot 3D drukāšanu, būs vieglāki un ar labākām mehāniskajām īpašībām. Lai 3D drukātam izstrādājumam nebūtu šuvju, kas var noberzt ādu, tiks konstruēts daudzazu neplakana cilindriska tipa 3D printeris, kas spēj novērst šo problēmu.

Promocijas darbs ir vērsts uz 3D drukāšanas tehnoloģiju robežu paplašinājumu, attīstot un ieviešot neplakanu un cilindrisku drukāšanu, kas var pārvarēt tradicionālās slāņveida drukāšanas ierobežojumus. Tas palīdzēs veicināt tādu nākamās paaudzes individuāli piemērotu ortožu un medicīnisko rehabilitācijas ierīču izstrādi, kas labāk atbilst pacienta anatomijai, uzlabojot pacienta komfortu un veiktspēju. Darbā ir plānots uzlabot drukāšanas procesa energoefektivitāti un samazināt materiālu atkritumus, optimizējot *CAD* modeļa griešanas programnodrošinājumu un drukāšanas procesu. Pētāmajā un izstrādājamā neplakana daudzazu 3D printera prototipā tiks iekļautas uzlabotas kontroles metodes, kuru mērķis ir novērst esošās tradicionālās 3D drukāšanas problēmas. Kopā ar jaunas modeļu sagriešanas metodes izveidi šie sasniegumi kopīgi uzlabo drukāto objektu kvalitāti un strukturālo viendabīgumu 3D drukāšanā.

Promocijas darba gaitā veikta daudzazu neplakana un cilindriskas tehnoloģijas izpēte 3D drukāšanas printera izstrādei, kur prototips potenciāli varēs efektīvi izgatavot sarežģītas cilindriskas un arī brīvas formas ar labākiem mehāniskajiem parametriem bez atbalsta materiāla izmantošanas. 3D drukāšanas jomā ir nepieciešama pieejama un lielākas funkcionalitātes programnodrošinājuma izstrāde, izmantojot *Python* kodu, un vizuālas 3D izstrādes vidi *Rhinoceros 3D*, tās attīstītība un izpēte šajā jomā ir perspektīva un svarīga zinātnes vidē.

*Ortozēm* ir dažāda veida sarežģītas formas, un tā izgatavošanai nepieciešams izmantot dažāda veida aprīkojumu. Ja tiek izmantoti 3D drukāšanas risinājumi, nepieciešams lietot dažādus printerus, savukārt, lai dotu iespēju drukāt ortozes uz vienas iekārtas, darbā ir izstrādāta iekārta un metodes, kas realizē tradicionālo *FDM (Fused Deposition Modeling)* drukāšanu, kas apvienota ar trīsas un piecas nekārtaino cilindrisko 3D drukāšanu.

Uzmanība tiek pievērsta 3D drukāto modeļu atslāņošanas problēmu mazināšanai, izstrādājot alternatīvas *CAD* modeļu griešanas metodoloģijas un *CAD* objektu pārorientāciju telpā modeļu iepriekšējās sagatavošanas laikā. Ņemot vērā to, ka esošo neplakano 3D printeru vadības metodēm trūkst precizitātes, to izmantošana ir sarežģīta, bet eksistējoša unificētu printeru programnodrošinājuma nav.

Promocijas darbā aprakstīti ortopediskās rehabilitācijas līdzekļi, to prasības un izgatavošanas process, esošās 3D drukāšanas tehnoloģijas lietojamas medicīnā un 3D drukāšanas

nozārē, esošās 3D drukas problēmas un to iespējamie risinājumi, kā arī izveidota eksperimentāla daļa, kurā aprakstīti posmi, kā tika izstrādāti šāda tipa printerim nepieciešamie materiāli un soļi. Izveidots daudzazu neplakana cilindriskā tipa 3D printera prototips ar iespēju pārslēgties no trīsasu režīma uz piecasu režīmu. Darbā salīdzināti arī prototipa parametri, kā arī formulēti secinājumi par paveikto.

## Promocijas darba mērķis

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt neplakanas cilindriskas 3D drukas metodi un *FDM* 3D drukas iekārtu, kas apvieno tradicionālās un cilindriskās drukas metodes izmantošanu vienā iekārtā individuālo ortopēdisko rehabilitācijas līdzekļu ražošanai. Darbā ir paredzēta specializētas programmatūras un vadības algoritmu izstrāde un ieviešana cilindriskai un neplanārai 3D drukai, lai paaugstinātu individuālu un personalizētu rehabilitācijas produktu drukas precizitāti un efektivitāti ar uzlabotiem mehāniskajiem parametriem, salīdzinot ar tradicionālajām 3D drukas metodēm. Programmatūra un vairāku asu 3D printera prototipi izstrādāti, lai varētu precīzāk kontrolēt drukas procesu un uzlabot izstrādājumu mehāniskās īpašības.

Primārais mērķis ir izveidot elastīgāku un savstarpēji saistītu slāņu struktūru, kā arī risināt drukāto objektu nevienmērīgā sastāva problēmu. Izmantojot neplakanas un cilindriskas metodes modeļu sadalē, kā arī objektu orientācijas optimizāciju telpā, šī pētījuma mērķis ir ievērojami uzlabot 3D drukāto objektu virsmas kvalitāti un strukturālo viendabīgumu.

## Hipotēze

3D apdrukāto individuāli pielāgojamo ortopēdiskās rehabilitācijas ierīču virsmas kvalitāti un mehāniskos parametrus var būtiski uzlabot, kā arī pašu 3D drukāšanu var būtiski paātrināt un samazināt izmaksas, izmantojot jaunu kontroles un sagatavošanas metodi neplanārajai *FDM* drukāšanai, kas ietver:

1. CAD modeļu ģeometrijas izmaiņu pakāpeniska secība;
2. Standarta ģenerētā G-koda pilnveidošana, kas apvieno standarta atvērtās piekļuves aparatūru un programmatūras risinājumus *FDM* 3D drukāšanai CAD modeļu sagatavošanai un griešanai.

## Promocijas darba uzdevumi

1. Apkopot zinātniskā literatūrā atrodamo informāciju par 3D drukas metodēm un *CAD* modeļu griešanas metodēm.
2. Izmeklēt un ierosināt alternatīvas neplakanas griešanas metodes *FDM* 3D drukas iekārtai, izveidot eksperimentālo stendu un veikt izstrādātās metodes testēšanu.
3. Apkopot eksperimentālā stenda iegūtos rezultātus un uz to bāzes izstrādāt pilnvērtīgu *FDM* 3D prototipu.



4. Veikt prototipa uzlabojumus un realizēt daudzasu risinājumu komplekso formu *FDM* 3D drukai.
5. Realizēt ātro pārslēgšanos starp tradicionālo, trīsasu cilindrisko un piecasu neplakano *FDM* 3D drukas režīmu, veikt tehnoloģiski ražotu izstrādājumu testēšanu.
6. Apkopot rezultātus un definēt priekšlikumus par tehnoloģijas priekšrocībām, trūkumiem un iespējamiem uzlabojumiem.

## Pētījumā metodes un iekārtas

Datu apkopojums un aprēķini tika veikti *MS Excel* vide, elektrisko ķēžu modelēšanai un attēlojumam izmantots *Autodesk Tinkercad*, datu apstrādei un vizualizācijai – *Matlab* vide, 3D modeļu modelēšanai un animācijai tika izmantots *Autodesk Fusion 360* un *Solidworks 3D CAD*, modeļu sagatavošanai 3D drukas programmā tika izmantots *Ultimaker Cura 5.2.0*, *Prusa Slicer 2.7.1* un *Creality Slicer 4.8.2*, G koda rediģēšanai un prototipa vadības programmas sastādīšanai – *Python* un *C++* valodas, gaisa plūsmas aprēķiniem un temperatūras simulācijām – *Autodesk CFD* un *Solidworks 3D CAD* programmatūra.

Promocijas darba un eksperimentālas daļas izstrādes laika tika izmantotas *RTU IEEI* laboratorijas un *RTU Deign Factory theLAB* laboratorijas instrumenti un iekārtas. Tajā skaita dažāda vaida barošanas avoti, termiskā kamera, osciloskopi, multimetri un citi materiāli.

Prototipa izstrādes laika tikai izmantotas vairākas mikrokontrolleru vadības plates ar dažādām soļu dzinēju draiveru konfigurācijām. Tajā skaita vairākas *STM32*, *Arduino Mega*, *Uno* un *Raspberry Pi* mikrokontrolleru plates. Mikrokontrolleru programmēšanai un atklūdošanai izmantota *Visual Code Studio* saistībā ar *Python 3.11* un *Arduino IDE*.

## Pētījuma novitāte

1. Izstrādāta nekārtaina *FDM* 3D drukas metode, kas pakāpeniski apraksta pieeju, kā sagatavot 3D *CAD* modeļus drukai, izmantojot nekārtainas *FDM* 3D drukas aparāttechnisko risinājumu, kas izstrādāto metodi ļaus izmantot cilvēka anatomijai individuāli pielāgojamu ortopēdisko rehabilitācijas līdzekļu izstrādei.
2. Izstrādāta *STL CAD* modeļu nolasīšanas un rediģēšanas metode, kas pielāgo modeli drukai uz cilindriskas rotējošas pamatnes tā, lai drukas laikā modeļa ģeometrija sakristu ar nepieciešamo ģeometriju.
3. Izstrādāta *FDM* 3D printeru nepieciešamā materiāla padošanas apjoma koeficienta aprēķina un regulēšanas programma, kas nolasa tradicionāli sagriezto G kodu, definē esošo ekstrūzijas apjomu un pareizina to ar aprēķināto koeficientu atkarība no slāņa numura.
4. Izstrādāts aparāttechniskais risinājums nekārtainas drukas realizēšanai ar ātru drukas režīmu pārslēgšanu, izmantojot vienu un to pašu programmatūru, kas atvieglo darbu ar iekārtu un efektīvi izmanto darba vietu.

## Darba aprobācija

1. 2020 IEEE 61st Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2020.
2. Proceedings of the 9th IEEE Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering, AIEEE 2021.
3. 21st International Symposium “TOPICAL PROBLEMS IN THE FIELD OF ELECTRICAL AND POWER ENGINEERING” and “DOCTORAL SCHOOL OF ENERGY AND GEOTECHNOLOGY III”, 2022.
4. 11th International Doctoral School of Energy Conversion and Saving Technologies, 2022.
5. 2022 IEEE 63rd Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2022.
6. 64th International Scientific Conference of Riga Technical University on Power and Electrical Engineering RTUCON2023, 2023.

## Doktorantūras laikā izstrādāto publikāciju saraksts

Kopā studiju laikā tika izstrādātas sešas publikācijas, promocijas darba pētījuma rezultātu aprobācija un praktiskā nozīme aplūkota četrās no tām.

1. **V. Vladinovskis**, “Potential Power Management Efficiency Improvements in Desktop 3D Printers,” *2022 IEEE 63th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Riga, Latvia, 2022, pp. 1–6, doi: 10.1109/RTUCON56726.2022.9978882.
2. **V. Vladinovskis**, “Review of 3D Printing Technologies and Considerations on Their Use in Orthopedy,” *2020 IEEE 61th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Riga, Latvia, 2020, pp. 1–6, doi: 10.1109/RTUCON51174.2020.9316483.
3. **V. Vladinovskis**, “Review of Lathe Type 3D Printers and Their Possible Improvements,” *2021 IEEE 9th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE)*, Riga, Latvia, 2021, pp. 1–5, doi: 10.1109/AIEEE54188.2021.9670257.
4. **V. Vladinovskis**, “Selection of microcontroller board and stepper motor driver for FDM 3D printing to reduce power consumption”, *2023 IEEE 64th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Riga, Latvia, 2023, pp. 1–6, doi: 10.1109/RTUCON60080.2023.10413037.

# LITERATŪRAS APSKATS

## 1. ORTOPĒDISKIE REHABILITĀCIJAS LĪDZEKĻI

### 1.1. Lietojums un prasības

Ortopēdija ir medicīnas nozare, kas pēta cilvēka balsta un kustību sistēmas diagnostiku, profilaksi un rehabilitāciju. Tajā iekļauta protezēšana, t. i., protēžu un ortožu izgatavošana, pielāgošana un izpēte. Savukārt rehabilitācija ir pasākumu komplekss, kura uzdevums ir atjaunot pacienta zaudētas spējas pēc traumas vai operācijas. Pacientu rehabilitācijai plaši tiek izmantotas dažāda veida palīgiekārtas. Lai atvieglotu lauztu kaulu vai mežģīījumu dzīšanas procesu, tiek izmantoti ortopēdiskie pārsēji. Tie darbojas kā balsti, kas notur ekstremitātes vietā, lai fiksētu kaulus pareizā anatomiskā stāvoklī. Ortopēdiskos pārsējus izgatavo no ģipša, stiklašķiedras, termoplastiskiem, koka vai metāla.

Ortozes galvenās prasības ir būt ērtai, vieglai un izturīgai. Tām jābūt viegli uzliekamām un noņemamām, funkcionālām un nekaitīgām, ar ilgu kalpošanas laiku un viegli remontējamām.

Kopš 2013. gada mūsdienu ortožu izgatavošanai tiek izmantotas 3D drukas tehnoloģijas, un šo tehnoloģiju izmanto dažādi uzņēmumi.

3D drukāto ortožu galvenā priekšrocība ir pareiza spiediena sadalījums visā ortozes garumā un attiecīgi pareiza spiediena nodrošināšana ātrākam atveseļošanās procesam rehabilitācijas laikā.

Otra priekšrocība ir iespēja padarīt ortozes elpojošas, to izgatavošanā izmantojot dažāda veida formas un paņēmienus, savukārt gatavais produkts nezaudēs savas mehāniskās īpašības, būs ciets, elastīgs un noturēs ekstremitāti nepieciešamajā pozīcijā [1].

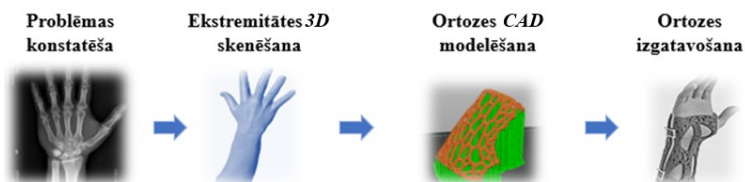
### 1.2. Ortozes apraksts un risināmās problēmas

Ortoze ir medicīniska iekārta arējai lietošanai, tās galvenās funkcijas ir daļēji vai pilnībā ierobežot ekstremitātes kustības noteiktā virzienā, samazinot slodzes izraisīta ekstremitātes svara ietekmi uz traumas vietu un sāpes, nodrošinot ātrāku dzīšanu un pareizas ekstremitātes kustības.

Ortozes tiek klasificētas pēc kustību veida, lietojuma jomas un konkrētā traumas veida. Ortozes tiek klasificētas arī pēc funkcionalitātes: tās var būt daļēji kustīgas vai tām ir papildu funkcijas. Ir statiskas ortozes, kas pilnībā ierobežo locītavu, saišu un ekstremitāšu kaulu kustību, un dinamiskās ortozes, kurās ir arī kustīgās daļas, kas ļauj ekstremitātei funkcionēt, bet ierobežo tās kustību apjomu. Otrs klasifikācijas veids ir klasifikācija pēc lietojuma jomas – augšējo (roku, plaukstu, plaukstu), apakšējo ekstremitāšu (gūžas, ceļgalu, potīšu, pēdas, kājas un kombinētās) un mugurkaula (kakla) ortozes (krūtis, mugurkauls).

### 1.3. 3D drukātas ortozes izgatavošanas tehnoloģija

3D drukātas ortozes izgatavošana ir samēra ātrs, bet sarežģīts process. Ortozes ražošanas posmi redzami 1.1. attēlā.



1.1. att. 3D drukātas ortozes izgatavošanas posmi.

Pirmais posms ir definēt pacienta traumas veidu un veikt attiecīgos izmeklējumus. Attiecīgi, ja ir laužti kauli vai plīsumi vai sastiepta saite, pacients tiek norīkots veikt traumētās ekstremitātes rentgenogrāfiju. Otrais posms ir ekstremitātes 3D skenēšana. Mūsdienās tiek izmantots mobilais telefons ar iebūvētu *LiDAR* un mobilo aplikāciju vai tas tiek veikts, izmantojot pārnēsamus 3D skenerus. Nākamais posms ir 3D modeļa apstrāde. Apstrādes laikā tiek izveidots traumētās ekstremitātes 3D modelis, dzēsta liekā informācija un papildus noskenētie fona objekti. Tālāk darba gaitā ekstremitātes 3D modelis tiek sagatavots ortozes modelēšanai. Modelim uzstādīts pareizais izmērs, tas tiek sagriezts tā, lai paliktu tikai nepieciešamā traumētā ekstremitātes daļa, uz kuras tiks modelēta orthoze. Nākamais posms ir ortozes modelēšana. Tiek uzstādīti nepieciešami parametri – biezums, struktūra, spiediena sadalīšana pa zonām, traumas fiksācijas veids (atkarībā no traumas veida), atstarpe starp ekstremitāti un ortozi. Mūsdienās ortozes modelis var būt ģenerēts, izmantojot *AI* sistēmas. Tomēr ģenerēto modeļi joprojām jāpārbauda arī medicīnas speciālists, lai konstatētu, ka modelim nav kļūdu un tas ir ģenerēts pareizi. Kad modelis ir gatavs, tiek izvēlēta izgatavošanas metode. 3D drukā iespējams izmantot dažāda veida objektu izgatavošanas metodes, ortozes izgatavošanai jāņem vērā nepieciešamie galaizstrādājuma mehāniskie parametri (elastīgums, cietība utt.). Jāizvēlas pēc iespējas ātrāko un lētāko metodi. Tālāk tiek izvēlēts izgatavošanas materiāls. 3D drukā var izmantot dažāda veida cietas plastmasas, plastmasas pulverus, sveķus, metālu un oglekļa šķiedras (1.2. att.).



1.2. att. 3D drukā izmantojamie materiāli ortozes izgatavošanai.

Nākamais solis ir modeļa sagatavošana drukai. Atkarībā no modeļa struktūras tiek izvēlēts modeļa atbalsta materiāls. Modelis tiek sagriezts slāņos atkarībā no nepieciešamās precizitātes un slāņa biezuma, balansējot starp kvalitāti un izgatavošanas ātrumu. Kad modelis ir gatavs, tas tiek nosūtīts uz 3D druku. Izgatavotais izstrādājums tiek apstrādāts un sagatavots izsniegšanai pacientam. Viss ražošanas process atkarībā no tehnoloģijas un ortozes parametriem var aizņemt no 30 minūtēm līdz dažām stundām, tomēr tas ir ātrāks un ērtāks, salīdzinot ar ģipša pārsēju uzklāšanu, kas var aizņemt 24–72 stundas, turklāt jāņem vērā pacienta diskomfortu ģipša pārsēja uzklāšanas laikā [2], [3], [4].

## 2. 3D DRUKAS TEHNOLOĢIJAS IZPĒTE

### 2.1. 3D drukas apraksts

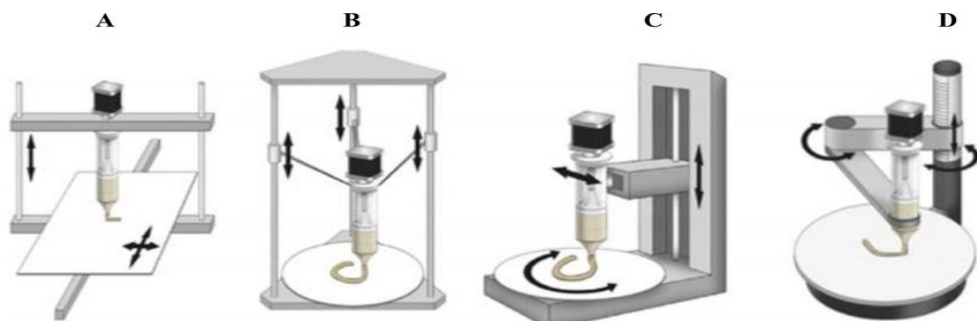
3D druka ir detaļu un sistēmu ražošanas process, kas dod iespēju ātrāk ražot vieglākas un izturīgākas sarežģītas formu un konstrukcijas detaļas. 3D drukā tiek izmantots ar datora palīdzību izstrādāts dizains (*CAD*), lai pakāpeniski – slāni pa slānim pēc noteiktas iepriekš iestatītas ģeometriskas formas – uzklātu materiālu un rezultātā iegūtu gatavu 3D detaļu. *CAD* programma sadala detaļu noteikta biezuma slāņos, katrā slānī tiek izveidots nosacīts ceļš, kuram sekos printera drukas galva, uzklājot materiālu. Katrs nākamais slānis savienojas ar iepriekšējo izkusušā vai daļēji izkusušā materiāla slāni. Tādā veidā var izgatavot sarežģītas formas detaļas vai saliktas sistēmas ar lielu precizitāti un bez papildu apstrādes. 3D drukai tiek izmantoti termoplasti, UV sveķi, metāls, keramika, kompozītmateriāli un arī bioloģiskās vielas [5], [6].

### 2.2. 3D drukas tehnoloģijas un izmantotie materiāli

3D tehnoloģijas atšķiras atkarībā no izmantojamā materiālā veida, materiāla uzklāšanas veida un materiāla savienošanas tehnoloģijas veida. Biežāk izmantotās tehnoloģijas ir tās, kas izmanto druku ar termoplastiem, termoplastu pulveriem un UV sveķiem. 3D druku var iedalīt septiņās kategorijās: materiāla ekstrūzija; tvertnes polimerizācija; pulvera gultas saplūšana; laminēšana; materiālu un saistvielu strūklas; tiešā enerģijas nogulsnešanās. Promocijas darbā apskatītas trīs no tām – *FDM*, *SLA*, *SLS*, ko varētu izmantot ortozes izgatavošanai, balstoties produkta izgatavošanas cenā, izgatavošanas ātrumā un tehnoloģiju pieejamībā [3].

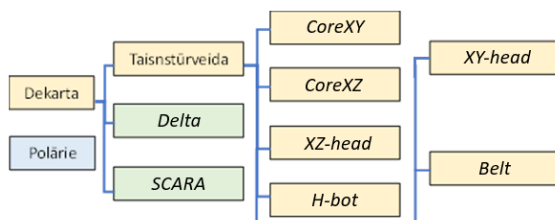
Materiāla ekstrūzijas tehnoloģijās tiek izmantoti dažāda veida materiāli, kas tiek padoti no printera sprauslas. Galvenokārt tie ir termoplasti, kas tiek padoti no sakarsētas printera sprauslas, tomēr eksistē arī tādas tehnoloģijas, kas spēj tādā veidā drukāt arī, izmantojot metālu, betonu, bioloģiskā vielās un citus materiālus. Šajā kategorijā ietilpst *FDM*, bioloģiskā druka, būvniecības druka u. c. *FDM* tehnoloģijas precizitāte ir līdz pat 0,1mm [7].

Promocijas darbā pētītas ekstrūzijas (*FDM*) tehnoloģijas kā lētas, vienkāršas un izplatītas 3D drukas tehnoloģijas veids, ko potenciāli var lietot ortozu izgatavošanā. *FDM* ir kausētu kvēldiegu izgatavošana (*FDM*), tehnoloģijā, kur materiāls tiek padots ar motoru uz sakarsēto sprauslu, termoplasti tiek kausēti līdz materiālā kušanas punktam un slāni pa slānim uzklāti atbilstoši *CAD* programmas iepriekš noteiktiem iestatījumiem. Slāni savstarpēji turas kopā materiāla adhēzijas dēļ. Tiek izmantoti dažāda veida termoplasti: *ABS*, *PLA*, *PET-G*, *ASA*, *PP*, *PA12*, *TPU* un citi. *FDM* tehnoloģijā tiek izmantoti termoplasti, kas iepriekš sagatavoti cieta kvēldiega veida un noteiktā diametrā (parasti 1,75 mm vai 2,85 mm). *FDM* printeri izmanto Dekarta vai polāro koordinātu sistēmu trīsas virzienā – X, Y un Z (2.1. att.) [8].



2.1. att. A) Dekarta; B) delta; C) polārais; D) *SCARA* koordinātu 3D drukas princips [8].

Kustības notiek, ņemot vērā *CAD* programmatūrā iestatītās koordinātes, un printeris padod materiālu caur sakarsētu sprauslu. *FDM* printeri tiek klasificēti pēc izmantojamās koordinātu sistēmas izmantošanas veida un mehānikas būtības (2.2. att.). Dekarta taisnstūrveida (*rectilinear*) printeri izmanto trīssasu kustības, lai kontrolētu printera galvas atrašanās pozīciju, un katra ass tiek kontrolēta atsevišķi ar vienu vai vairākiem motoriem. Dekarta sistēmas printeri, kas izmanto taisnstūrveida formas mehāniku, ir *CoreXY*, *CoreXZ*, *H-bot*, *Belt*, *XZ-Head*, *XY-head*. Delta printeri izmanto trīs vai vairāk kustīgas sliedes, kas pievienotas pie printera galvas no vienas puses un pie vertikālām sliedēm no otras puses. Regulējot katras sliedes augstumu, var kontrolēt *Z* augstumu un *X*, *Y* galvas pozīciju. *SCARA* printeri izmanto robotizēto mehānisko roku, kuras galā piestiprināta drukas galva. Ir arī polārie printeri, kas izmanto polāro koordinātu sistēmu [9].



2.2. att. *FDM* 3D printeru klasifikācija.

Lai īstenotu koncepciju un apstiprinātu teoriju, par pamatu ņemta *FDM* tehnoloģija. Darba izstrādes laikā tika pētīta *FDM* 3D printeru piedziņa un vadība. Pētījums ir vērsts uz *FDM* tehnoloģiju izpēti, jo lielākā daļa šīs kategorijas printeru var uzklāt slāņus pa nedaudz izliektiem ceļiem, ievērojot nogulsnešanās slīpuma un biezuma ierobežojumus.

Tiek pieņemts, ka, pārnēsot *FDM* tehnoloģiju uz polāro koordinātu sistēmu, Dekarta koordinātu sistēmā ir iespējams izdrukāt objektus, ko ar šo tehnoloģiju izdrukāt nevar, neizmantojot atbalsta materiālu, kas nepieciešams, lai samazinātu drukas laiku un materiālā patēriņu. Turklāt šī metode dos iespēju sadalīt modeli slāņos no modeļa centra uz tā ārējo daļu, tādējādi pārdalot slodzi un samazinot modeļa atslāņošanas stiepšanās un vērpes laikā, kas nepieciešama ortožu izgatavošanai, lai nodrošinātu nepieciešamo konstrukcijas stingrību un izturētu dažāda veida slodzes.

### **3. MODEĻA SAGATAVOŠANAS METOŽU IZPĒTE *FDM* 3D DRUKAI**

#### **3.1. 3D objekta novietojums telpā un 3D modeļa griešanas metodes**

Neskatoties uz to, ka 3D drukai ir liela perspektīva un tā kļūst arvien populārāka, patlaban tai ir daudz ierobežojumu. Ja nepieciešams izgatavot sarežģītas formas detaļas, kurās ir daudz pārkāres elementu lielā leņķī, parasti tiek izmantots balsta palīgmateriāls. Tādos gadījumos nepieciešama papildu modeļa apstrāde. Tas prasa laiku, palielina izmaksas un pazemina izgatavojamā objekta virsmas kvalitāti. Problēmas risināšanai tika pētītas dažādas metodikas, piemēram, palīgmateriāla balsta formas izmaiņas, citu materiālu izmantošana un jaunu materiālu izpēte, drukas parametru maiņa, tomēr rezultātā problēmā atrisināta netika. Problēmas būtība ir sākotnējā objekta orientēšanās vidē un tā sagatavošana un sagriešana, jo jebkurā 3D drukas tehnoloģijā ir nepieciešams pareizi novietot objektu tā, lai griešanas posmā nebūtu elementu, kas atrodas gaisā vai to druka ir ar daudziem pārkāres elementiem, kas tiek drukāti tādā leņķī, ko printeris nevar izdrukāt. Viss drukas process tiek kontrolēts ar *CAD* programmatūras iepriekš definētiem parametriem, tātad nepieciešams pievērst lielāku uzmanību modeļu izvietošanai telpā, drukas iestatījumu kontrolei un modeļa griešanai.

#### **3.2. Esošo 3D modeļa griešanas metožu izpēte**

Patlaban eksistē vairākas 3D modeļa griešanas metodes: tradicionālā; daudzvirzienu; neslāņains (*non-layerwise*) (3.1. tab.). Tradicionālā modeļa griešanas metode sagriež modeli vienāda biezuma slāņos paralēli drukas galdam vai noteiktā taisnas līnijas virzienā, rezultāta veidojot virkni paralēli izvietotus slāņus. Tradicionālā griešanas metode labi piemērota vienkāršiem objektiem, kuriem nav pārkāres un citu sarežģītu elementu.



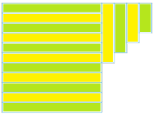

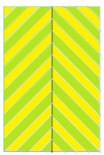
No šī metodes izriet nākamā metode – adaptīvā griešana. Tajā modelis joprojām tiek sagriezts viena konkrētā virziena, tomēr katra slāņa biezums ir mainīts atbilstoši objekta ģeometrijas sarežģītībai. Adaptīvā metode dod iespēju iegūt labāku kvalitāti, drukājot objektus ar ne īpaši sarežģītu ģeometriju, kuriem nav elementu, ko nepieciešams drukāt, pārorientējot objektu vai mainot griešanas virzienu. Ar abām metodēm izgatavotos objekta virsmas izliekumos būs redzamas slāņu kāpnes, jo ar šādām griešanas metodēm nevar efektīvi panākt līdzenu objekta virsmu, nepalielinot drukas laiku un izmaksas.

Gadījumā, ja drukas objektam ir kompleksa forma un tam ir daudz pārkāres elementu, modeli var sadalīt, ņemot vērā šo papildelementu virzienu, un atsevišķus elementus sagriezt izdevīgākā virzienā. Tādu griešanas veidu sauc par daudzvirziena griešanu. Ja objektam nav izteiktas formas un citas griešanas metodes nedarbojas, tiek izmantota neslāņainā griešanas metode. Patlaban griešanas metodes ir vērstas uz drukājamā objekta virsmas kvalitātes uzlabošanu un palīgmateriāla mazāku izmantošanu. Darbā pētītas esošās objektu griešanas metodes un piedāvāta autora izstrādāta metode, balstīta neslāņainās griešanas

metodē, lai uzlabotu ne tikai drukājamo objektu virsmas kvalitāti, bet arī to mehānisko izturību pret dažādā veida slodzēm.

3.1. tabula

3D modeļu griešanas metodes

Nosaukums	Attēls	Apraksts
Tradicionālā metode		Sagriez modeli paralēlos vienāda biezuma slāņos. Visizplatītākā un lietojamākā metode. Viegli izmantojama un universāla metode. Zema precizitāte. Nepieciešams izmantot daudz palīgmateriālu. Pārkares drukājas ļoti slikti.
Adaptīva metode		Atkarībā no objekta formas lokāli maina slāņu biezumu vietas dažādiem elementiem, izmantojot kontūru ekstrapolāciju. Palielinātā ārējā perimetra precizitāte. Laba objekta virsmas kvalitāte. Pārkares slikti drukājas.
Daudzvirzienu metode		Sadala objektu atsevišķos elementos, un katram elementam izvēlas optimālu griešanas virzienu. Nepieciešams izmantot mazāk balsta materiāla. Grūti izmantot, nepieciešama uzraudzība.
Nekārtainas metodes		Automātiskā pārkares elementu noteikšana. Izmanto centrālo asi objektu sagriešanai cilindriskā koordinātu sistēmā. Nav nepieciešams izmantot balsta materiālu.
Koniska metode		Slāņi ir sagriezti leņķī, parasti konusveida formā. Izmanto, lai samazinātu slāņa līniju redzamību galīgajā drukātajā objektā, tādējādi nodrošinot vienmērīgāku virsmas apdari. Var drukāt pārkares bez balsta materiāla.

### 3.3. Esošo FDM drukas ierobežojumu, izaicinājumu un problēmu izpēte

#### Slāņaina drukājamo objektu struktūra

Kā viens no izplatītākajiem FDM drukas ierobežojumiem ir slāņu struktūras izmantošana. Slāņu izmantošana 3D drukā tika piedāvāta kā viena no pirmām 3D drukas metodēm, tomēr to izmantošana vienlaikus ir 3D drukas ierobežojums.

Tradicionālā sagriešanas programma sadala 3D modeli horizontālos slāņos turpmākai drukāšanai, un slāņu struktūras izmantošanas laikā rodas vizuāli defekti, kas parādās kā pamanāmi horizontāli slāņi uz apdrukātā objekta virsmas. Tas rada pamanāmas līnijas, īpaši uz objekta vertikālajām virsmām. Drukājot objektu slāņi pa slānim, ir redzamas slāņu robežas. Šis efekts ir pazīstams arī kā “kāpņu efekts”, jo tas ir vizuāli līdzīgs kāpņu formai. Jo lielāks slāņa biezums, jo slāņojums būs pamanāmāks.



Nepietiekama slāņu saplūšana var radīt sliktu stiprību un robežu redzamību starp slāņiem. Nepareiza griešana var radīt redzamus slāņus uz izliektām virsmām, kas samazina apdrukātā objekta estētiku.

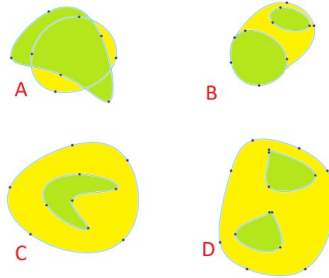
Slāņu struktūras problēmu risināšanai tiek izmantota slāņa biezuma optimizēšana. Optimālā slāņa biezuma izvēle atkarīga no nepieciešamās kvalitātes un drukas laika prasībām. Piemēram, lai izveidotu vienmērīgākas pārejas, nepieciešams samazināt slāņa biezumu, kas prasa papildu kalibrēšanu un var palielināt drukāšanas laiku. Lai palielinātu drukas kvalitāti un vēl vairāk novērstu “kāpņu efektu”, tiek izmantota adaptīvās griešanas tehnika, kas maina drukas parametrus atkarībā no objekta ģeometrijas, izlīdzinot pārejas starp slāņiem. Ja drukātā objekta kvalitāte neapmierina un to nevar novērst ar printera iestatījumiem, tiek izmantotas pēcapstrādes metodes, piemēram, slīpēšana, lai vēl vairāk izlīdzinātu virsmu, tāpēc var būt nepieciešamas papildu darbības.

Koniskās griešanas izmantošanas laikā tiek mainīts griešanas leņķis atkarībā no objekta ģeometrijas, kas var izlīdzināt pārejas starp slāņiem un samazināt slāņu redzamību uz izliektām virsmām. Tomēr koniskās griešanas izmantošana var palielināt drukas laiku, un, lai iegūtu optimālu rezultātu, nepieciešama rūpīga kalibrēšana.

Lai izvairītos no starpslāņu pārejas redzamības, galvenokārt tiek izmantota kombinētā pieeja. Problēmas risināšanai nepieciešama integrēta pieeja, kas ietver gan griešanas algoritmu uzlabošanu, gan jaunu tehnoloģiju un iekārtu izstrādi. Ir svarīgi turpināt pētījumus šajā jomā, lai uzlabotu 3D drukas tehnoloģiju. Ir nepieciešama efektīvāku neplakano griešanas algoritmu izstrāde, ņemot vērā drukas ātrumu un virsmas kvalitāti. Nepieciešams izmantot neironu tīklu metodes, lai neironu tīkli varētu optimāli atlasīt katra objekta sagriešanas parametrus. Neplakanās griešanas metodes nodrošina daudzsoļus risinājumus 3D drukas kvalitātes uzlabošanai, samazinot slāņu redzamību un veidojot gludākas virsmas [10].

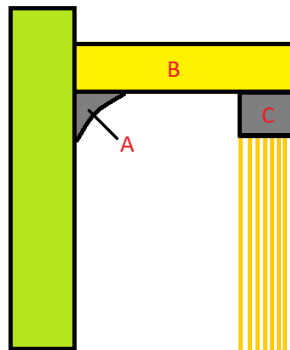
### **Pārkāres un balsta materiāla izmantošana**

Pārkāres ir objekta daļas, kas izvirzītas telpā bez tieša balsta pie iepriekšējā slāņa. 3D drukas laikā rodas gadījumi, kad sarežģītas drukājama objekta struktūras dēļ daļa elementu tiek drukāti bez iepriekšējā slāņa atbalsta. Vairākās griešanās metodēs tiek izmantots balsta palīgmateriāls, lai stabilizētu izvirzījumus drukas procesa laikā un lai pārkāres elements drukātos uz balsta materiāla. Pārāk stāvi pārkāres leņķi var radīt grūtības ar atbalstu un stabilizāciju. Pārkāres var klasificēt pēc elementu ietveršanas kontūrā un pēc atbalstu izmantošanas tipa. Klasifikācijā pēc kontūras pārkāres var iedalīt pēc tā, kā nākamā slāņa kontūra elementi tiek ietverti iepriekšējā slāņa kontūrā, četri definētie tipi redzami 3.1. attēlā: A) fragments; B) sarežģīts fragments; C) atsevišķs kontūrs vai gredzens; D) sarežģīts gredzens [11].



3.1. att. Pārkares elementu klasifikācija pēc kontūra veida [12].

Ņemot vērā balstu izmantošanas tipu, izšķir trīs pārkares veidus, kas redzami 3.2. attēlā: lejupejošs pagarinājums; mikropārkare; makropārkare [13]. Mikropārkare ir elements, kur iepriekšēja slāņa ārējais perimetrs ir lielāks nekā iepriekšēja slānī. Tāda veida pārkares var drukāt bez balsta materiāla atkarībā no slīpuma leņķa un materiāla īpašībām. Makropārkares ir pārkares, ko var drukāt bez balsta materiāla, ja pārkares būs sasaistīta ar citu drukājamo elementu, taču ja tāda elementa nav, tad nepieciešams izmantot atbalstus. Lejupejošs pagarinājums ir pārkares veids, kurā elements nav saistīts ar pamata objektu un to nevar izdrukāt bez atbalstu izmantošanas [14].



3.2. att. Pārkares veidi: A) mikropārkare; B) makropārkare; C) lejupejošs pagarinājums [13].

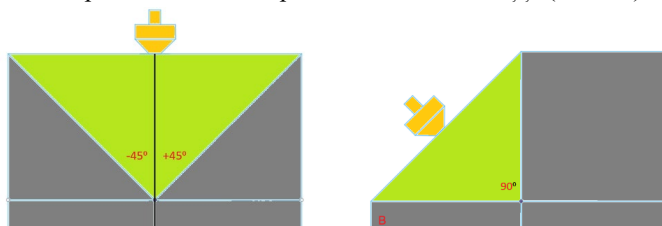
Balsta materiāls tiek izmantots, lai atbalstītu izvirzītās objekta daļas drukāšanas laikā, novēršot sabrukšanu gravitācijas dēļ. Pašreizējā momenta sagriešanas *CAD* programmās ir iekļauta funkcionalitāte, lai automātiski izveidotu atbalstus, pamatojoties uz objekta ģeometriju. Tomēr balsta zīmes var atstāt redzamas pēdas uz drukas virsmas, kas prasa papildu apstrādi, lai tās pēc drukāšanas noņemtu. Lai samazinātu pārkares leņķus, tiek izmantota arī drukājamā modeļa izvietojuma optimizācija, kas var samazināt vajadzību pēc balstiem, tomēr tas ierobežo drukājamā objekta izskatu un nevar būt lietojams sarežģītām objektu formām [15].

Problēmas risināšanai tiek izmantotas dažādas nekārtainās griešanas metodes, piemēram, koniskās griešanas metode. Tās pamatā ir pārkares elementu slīpuma leņķa maiņa, veidojot konisku formu. Šī metode uzlabo pārkares atbalstu un stabilitāti, samazinot sabrukšanas risku un nepieciešamību pēc balstiem. Tā samazina arī pārkares leņķa stāvumu, kas savukārt samazina saplacināšanas iespējamību drukas procesa laikā. Koniskā slāņu forma veido plašāku

saskares virsmu ar iepriekšējo slāni, kas nodrošina labāku atbalstu drukāšanas laikā. Šo metodi var pielāgot dažādām ģeometriskām formām, padarot to par universālu risinājumu dažādiem objektiem. Tomēr koniskajai metodei var būt ierobežojumi, ja to piemēro pārāk stāviem pārkares leņķiem, to ir rūpīgi jāpielāgo optimāliem rezultātiem, kas var prasīt laiku un pieredzi, un ir nepieciešams vairāk darba, lai optimizētu un kalibrētu šo metodi.

### Materiāla uzlikšanas leņķis un drukas galvas attālums no drukas galda

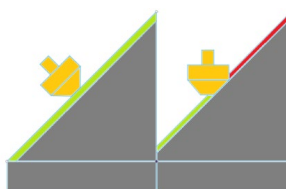
Pēc pārkares problēmas izpētes un piedāvātā risinājuma izmantot konisko griešanu rodas problēma, kas saistīta ar pārkares elementu druku ar esošām 3D printera sprauslām. Esošām 3D printeru sprauslām ir koniska 45° leņķa forma, un parasti tās ir izvietotas tieši perpendikulāri drukas galdam, tāpēc rodas fizisks ierobežojums pārkares drukas leņķim. Dekarta tipa *FDM* 3D printeri var drukāt pārkares ar līdz 45° leņķī (3.3. att.).



3.3. att. Pārkares leņķis atkarība no drukas sprauslas izvietojuma.

A) Perpendikulāri drukas galdam; B) ar 45° nobīdi [16].

Ierobežojums rodas sprauslas uzbūves un novietojuma dēļ, kā arī tas ir atkarīgs no materiāla uzlikšanas veida. Šis ierobežojums stingri nosaka, kādā veidā un cik sarežģītas formas objektus var izdrukāt. Tāpēc koniskās metodes drukas lietojums ir ierobežots 3D printera konstrukcijas dēļ, un sprauslas novietojums neļauj efektīvi izmantot šo metodi, jo rodas problēmas, kas saistīta ar materiāla padošanu jeb ekstrūzijas problēma, kad sprausla sāk aizskart jau ekstrudēto materiālu stāvos leņķos. (3.4. att.).



3.4. att. Koniskas drukas ekstrūzijas problēma [16].

Viens no paņēmieniem, kā palielināt šo leņķi, ir pagriezt sprauslu 45° leņķī, tāda veidā rodas iespēja drukāt pārkares līdz 90°. Tāds risinājums ir izmantots zobsiksnas 3D printeros, tomēr tādiem printeriem nevar izmantot konisko metodi printera konstrukcijas dēļ, jo to drukas galvas kustības ir ierobežotas, ņemot vērā ekstrūzijas problēmu [17].

## LITERATŪRAS APSKATA KOPSAVILKUMS

Patlaban problēma ar balsta materiāla izmantošanu un pārkarēm 3D drukāšanā joprojām ir aktuāla, īpaši, veidojot sarežģītas ģeometriskas formas un pārkares elementus. Slāņu griešanas metožu izmantošana joprojām ietekmē drukāto objektu estētiku un mehānisko izturību, īpaši *FDM* drukāšanā. Adaptīvo griešanas metožu, jaunu atbalstu tipu un optimizētu griešanas algoritmu izmantošana var samazināt slāņu redzamību un uzlabot kopējo drukas kvalitāti, tomēr pilnībā nerisina problēmu, tāpēc nepieciešams izmantot jaunas kombinētas metodes, piemēram, daudzvirzienu sagriešanas un nekārtainās griešanas metodes, lai nodrošinātu visaptverošākus un efektīvākus risinājumus. Galvenais faktors jaunu problēmu risināšanas metožu un paņēmieni izstrādē ir sistematiska testēšana un eksperimentēšana, turklāt ir nepieciešama arī turpmāka 3D drukas un kalibrēšanas parametru optimizācija, lai sasniegtu labākus rezultātus. Koniskas vai cilindriskas nekārtainās griešanas metodes rada lielu potenciālu un piedāvā vairāk iespēju, un šī promocijas darba gaitā izmantotie un piedāvātie risinājumi balstīti šo metožu pamatos. Kopumā *FDM* printeri nodrošina iespēju izveidot ortozes, kas ir pielāgotas pacienta anatomijai un atbilst medicīnisko ortozu pamatprasībai. *FDM* tehnoloģija ir salīdzinoši pieejama un ekonomiski izdevīga 3D drukas metode, kas var būt pievilcīga no ortozu izgatavošanas viedokļa, jo *FDM* 3D printeri ir ērti lietojami un tiem ir vienkāršs dizains, kas atvieglo to apkopi un personāla apmācību. Tomēr kārtainās struktūras dēļ esošie tradicionālā tipa 3D printeri nevar piedāvāt konkurētspējīgus mehāniskus parametrus, salīdzinot ar citiem izgatavošanas paņēmieniem un tehnoloģijām, savukārt nekārtainās griešanas izmantošana var nodrošināt konkurētspējīgu risinājumu, kā arī efektīvu un lētu izgatavošanu, kas var radikāli mainīt situāciju tirgū un 3D drukas tehnoloģijas izmantošanu medicīnas jomā.

Izpētot *FDM* Dekarta 3D drukas ierobežojumu, to risinājumu un esošo 3D modeļu griešanas metodes, konstatēts, ka patlaban perspektīvākā drukas metode ir nekārtainā druka, taču vēl nav ērta un vienota risinājuma un programmatūras tās ieviešanai. Tika nolemts izveidot metodiku, ar kuras palīdzību var panākt nekārtaino drukāšanu, izmantojot pieejamās un izplatītās tradicionālās modeļu sagatavošanas metodes, vienlaikus nodrošinot tehnisko risinājumu drukas veidu pārslēgšanai, lai paplašinātu tirgū esošo risinājumu iespējas.

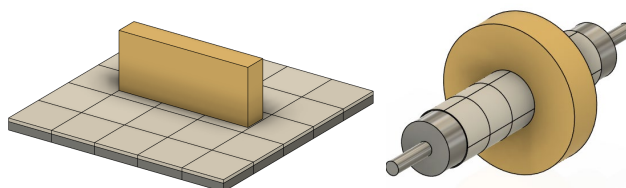
Promocijas darba gaitā tika izlemts izstrādāt trīsas cilindriskas nekārtainās drukas imitēšanas metodi, izmantojot esošus tradicionālos modeļu sagatavošanas risinājumus, uzbūvēt 3D printera prototipu, lai apstiprinātu konceptu, un veikt testēšanu un eksperimentus, lai salīdzinātu ar tradicionālām un adaptīvām griešanas metodēm, kas patlaban ir izplatītākas un lētākas. Otrais posms ir izstrādāt vairāku asu nekārtaino griešanas metodi, kas balstīta trīsas metodē un prototipa rezultātos, uzbūvēt prototipu un salīdzināt abas jaunās metodes, to izmantošanas sarežģītību, efektivitāti un pielāgojamību ortozes izgatavošanai. Formulēt secinājumus par paveikto darbu, kā arī piedāvāt ieteikumus nākamajiem uzlabojumiem.

# EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA

## 4. NEKĀRTAINĀS GRIEŠANAS METODES IZPĒTE UN IZSTRĀDE ORTOZES IZGATAVOŠANAI, PROTOTIPA IZSTRĀDE UN METODES PIELĀGOŠANA

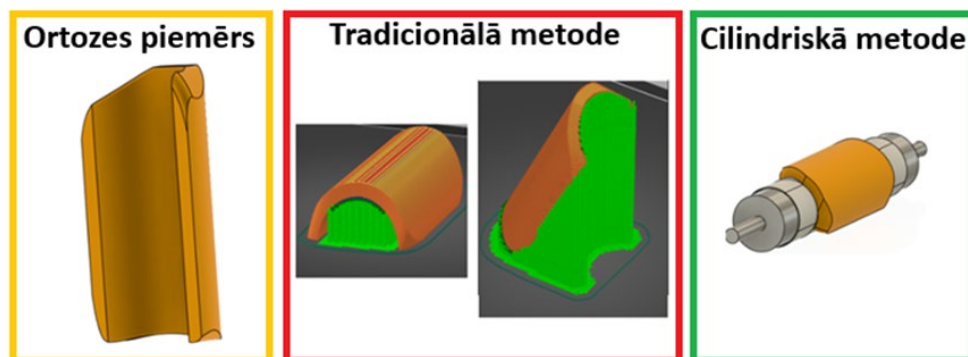
### 4.1. Cilindriskas 3D drukas metodes izstrāde

Balstoties apkopotajā literatūrā, konstatēts, ka ortopēdiskajiem izstrādājumiem parasti ir dažādas sarežģītas formas un izliekumi, tie var būt cilindriskas formas vai daļēji izliektas formas, kas nozīmē, ka to 3D drukāšanai ir jāņem vērā to cilindriskais raksturs. Izstrādājamā metode ir paredzēta cilindriskas forma izstrādājumu drukas kvalitātes uzlabošanai. Viens no veidiem, kā to panākt, ir izmantot plakanu drukas virsmu un noapaļot to tā, lai plaknes malas saskaras, veidojot cilindru. Šī virsma būs slēgta, nodrošinot neierobežotu galda garumu. Tradicionālā druka pa slāņiem, pārnesot uz cilindrisku virsmu, radīs cilindriskus objektus. Šī transformācija redzama 4.1. attēlā.



4.1. att. Pāreja no plakanās slāņu drukas uz cilindrisku druku.

Tradicionālajās metodēs vienā slānī var mainīt slāņa aizpildījuma leņķi, un, ja šī pieeja tiek izmantota cilindriskajā drukā, vienlaikus mainot aizpildījuma leņķi perpendikulāri iepriekšējā slāņa leņķim, lai slāņi veidotu blīvu līniju tīklu. Šādā veidā var nodrošināt optimālāko izliektu vai cilindrisku izstrādājumu druku, neizmantojot balstus. Līdzīgu izstrādājumu druka uz līdzenas virsmas tiks veikta slāni pa slānim, līdz ar to slāņus kopā turēs tikai materiāla saķere un papildus būs jāizmanto balsti, jo nebūs iespējams novietot objektu, lai drukātu, neizmantojot balstus (4.2. att.).



4.2. att. Cilindriskas formas objekta izvietošana telpā tradicionālā un cilindriskā metodē.

## 4.2. Eksperimentālā stenda parametru aprēķini

Balstoties uz to, kā cilindrisko ortožu izvietojums ir optimāls, izmantojot cilindrisko drukas galdu, metodes aprobācijai tika izlemts izstrādāt eksperimentālo stendu drukas. Paredzēts izveidot rotējošo drukas cilindrisko galdu, kas savienots ar soļu dzinēju un vadāms ar vadības plati uz mikrokontrollera bāzes. Ir pieņemts, ka izstrādājamā eksperimentālā stendā tiek izmantota drukas galva ar 0,4 mm sprauslu, 1,75 mm biezs kvēldiegs (līnijas biezums – 0,4 mm). Lai panāktu precizitāti, kas nepieciešama veiksmīgai materiāla uzklāšanai uz cilindra, nepieciešams aprēķināt minimālo leņķi, kādā pagriezīsies soļu dzinēja rotors par vienu soļu dzinēja soli. Leņķi  $\Theta$  var aprēķināt pēc 4.1. formulas [18].

$$\Theta = \frac{\text{spraustas precizitāte}}{\text{maksimālais drukas rādiuss}} = \frac{0,4}{10} \times \frac{180}{\pi} = 2,29^\circ \quad (4.1)$$

Ir pieņemts, ka soļu dzinēja viena soļa leņķis ir  $1,8^\circ$ , kas atbilst izplatītākam *NEMA 17* soļu dzinēju leņķim [19], tad, izmantojot 4.2. formulu, var aprēķināt pārvades mehānisma nepieciešamo attiecību  $R$  starp soļa dzinēju un cilindrisko drukas galdu.

$$R = \frac{\text{dzinēja soļa garums}}{\text{leņķiska precizitāte}} = \frac{1,8}{2,29} = 0,78 \quad (4.2)$$

Soļu dzinēja griezes momenta aprēķinam nepieciešams noteikt masas inerces momentu  $I_g$  un minimālo leņķisko paātrinājumu  $\alpha$ . Stenda masas inerces momentu  $I_g$  var aprēķināt, definējot visu komponentu kopējo masas inerces momentu, ko aprēķina, izmantojot 4.3. formulu.

$$I_g = \frac{1}{2} \rho \pi L r^4 = \frac{1}{2} M r^2, \quad (4.3)$$

kur  $r$  – drukājamā objekta rādiuss, m;

$L$  – drukājamā objekta garums, m;

$\rho$  – drukas materiāla blīvums,  $\text{kg/m}^3$ ;

$M$  – drukājamā objekta masa, kg.

Aprēķinātais stenda elementu kopējais inerces moments ir vienāds ar  $I_g = 0,00474 \text{ kg/m}^2$ .

Leņķiskais paātrinājums ir leņķiska ātruma izmaiņšanās ātrums laikā (4.4. formula). Ja pieņem, ka cilindra vidējais rotācijas ātrums ir 500 rpm un ātruma izmaiņas notiek 1 sekundes laikā, tad aprēķinātais leņķiskais paātrinājums ir aptuveni  $50 \text{ rad/s}^2$ .

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}, \quad (4.4)$$

kur  $\alpha$  – ir leņķiskais paātrinājums,  $\text{rad/s}^2$ ;

$\Delta\omega$  – rotācijas ātrums, rpm;

$\Delta t$  – laiks, s.

Eksperimentālā stenda griezes moments tiek aprēķināts kā masas inerces momenta  $I_g$  un minimālā leņķiskā paātrinājuma  $\alpha$  reizinājums, izmantojot 4.5. formulu.

$$M = I_g \times \alpha = 0,00474 \times 10 = 0,0474 \text{ Nm}. \quad (4.5)$$

### 4.3. Eksperimentāla cilindriskā 3D drukas stenda izstrāde

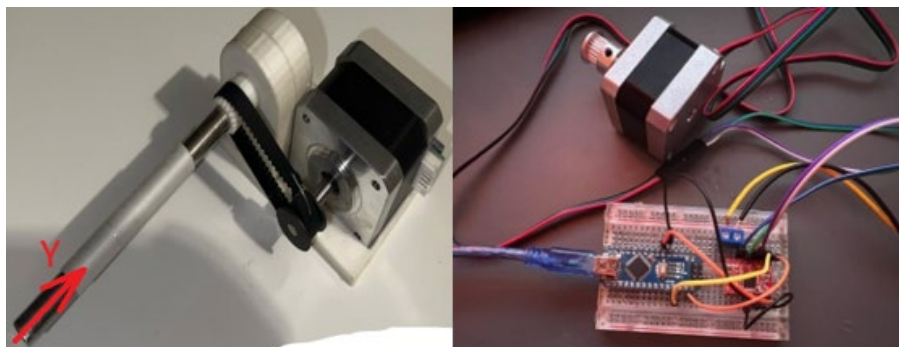
Sekojošu konceptu aprobācijai ir veidots cilindriskas drukas testēšanas stends. Stenda sastāvdaļas ir norādītas Tabula 4.2.

4.2. tabula

Cilindriska 3D printera stenda sastāvdaļas

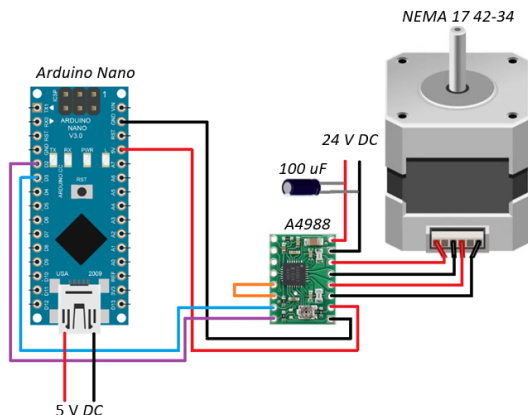
Nosaukums	Modelis	Parametri
3D printera rāmis	<i>Creality Ender-3 V2</i>	<i>CoreXZ</i> Dekarta sistēmas <i>FDM</i> 3D printeris
Soļu dzinējs	<i>1 x NEMA 17 42-34 BJ42D15-26V12</i>	Soļa leņķis – $1,8^\circ$ , nominālā strāva 0,8 A, fāžu skaits – 2, griezes moments – 0,8 Nm
Soļu dzinējā draiveris	<i>Pololu RepRap A4988</i>	Darba spriegums – 8–35 V DC, loģikas spriegums – 3–5,5 V, $I_{max}$ 2 A
Barošanas avots	<i>Meanwell LRS-350-24</i>	24 V DC, 350 W, 14,6 A, 48–63 Hz
Mikrokontrollera vadības plate	<i>Arduino Nano</i>	<i>ATmega328P CH340</i> mikrokontrolers, 14 ciparizejas, 6 PWM izejas, 8 analogās izejas, darba spriegums 5 V, loģikas spriegums 3,3 V
Pārvades mehānisms	Divi 20 zobu <i>GT2</i> zobrati, <i>124-2GT-6</i> siksnā, $2 \times 688ZZ$ gultņi, $100 \times 8$ mm stienis	Pārvades attiecība 1 : 1
Programmnodrošinājums	<i>Arduino IDE</i>	<i>RepRap</i> 3D printeru saimes atvērtā pirmkoda programmaparatūra

Stends balstīts klasiska *RepRap* 3D printera konstrukcijas, un tā uzdevums ir pierādīt iespēju drukāt uz rotējoša cilindra, aizvietojot Y ass drukas galdu uz rotējošo cilindru. Prototips ir izveidots uz *Creality Ender-3 V2* printera bāzes [20], kas ir klasisks *FDM* printeris, kur 3D printerim ir pārslēgts Y soļu dzinējs, kas atbild par drukas galda pārvietošanu Y plaknē. Uz plakana drukas galda, kas ir nofiksēts viena pozīcijā, ir novietots 3D drukāts un salikts testa stends, kas apvieno pārvades mehānismu un soļu dzinēju ar pārvades attiecību 1 : 1, izmantojot divus *2GT* 20 zobu zobratus. Šāda attiecība atbilst minimāli nepieciešamai attiecībai drukas precizitātes sasniegšanai. Testa stends ir novietots tā, lai stienis sakristu ar X ass virzienu un abas ass būtu paralēlās. Testa stends un to izvietojums redzams 4.3. attēlā.



4.3. att. Eksperimentālais stends un to vadības elementi.

Rotējošā cilindra Y ass vadība tiek nodrošināta ar *BJ42D15-26V12* soļu dzinēju un *A4988* soļu dzinēja draiveri kontrolējamo ar *Arduino Nano* vadības plati, un ass kustība tiek kontrolēta ar *Arduino IDE* vidē uzrakstīto kodu. Y ass kustības ir sinhronizētas ar 3D printera vadības kodu, manuāli mainot Y ass griešanas ātrumu un soļu skaitu milimetrā attiecību. Testu stenda elementu slēgums redzams 4.4. attēlā.

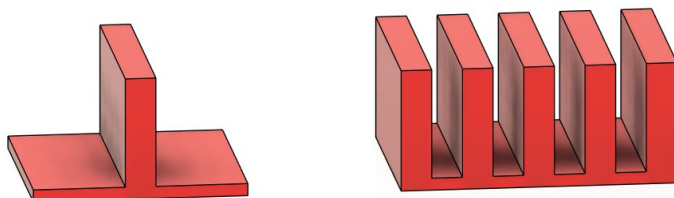


4.4. att. Cilindriskās drukas testa stenda elementu slēgums.

*Arduino Nano* vadības plates barošanu nodrošina *USB 5 V DC*. Soļu dzinēja draivera vadība realizēta, pieslēdzot pie *Arduino* 2 un 3 ciparu izejām un pie *5 V DC* un *GND* izejām. Draivera barošanu nodrošina *Mean Well 24 V DC* impulsu barošanas bloks kas savienots ar  $100 \mu\text{F}$  kondensators sprieguma lēcienu samazināšanai. Bloks savukārt ir pieslēgts  $230 \text{ V}$   $50 \text{ Hz}$  *AC* tīklam. Soļu dzinēja tinumi ir pieslēgti soļu dzinēja draiverim 2B, 2A un 1A, 1B izejās. Atsevišķi ir savienotas *A4988* draivera *SLEEP* un *RESET* izejas, lai uz *SLEEP* izeju padotu *HIGH* signālu, kas ir nepieciešams draivera darbībai. Soļu dzinējs ir ievietots pārvades mehānismā un savienots ar tērauda 8 mm diametra stieni, izmantojot 2GT 20 zobu zobratu un 2GT 100 mm zobsiksnu.

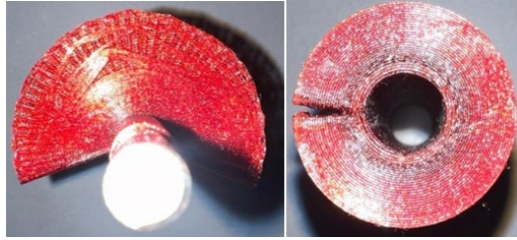
#### 4.4. Eksperimentu gaita un rezultātu apkopojums

Testa drukai ir sagatavoti dažāda veida plakanas formas *CAD* modeļi (4.5. att.), kas sagriezti ar tradicionālo griešanas metodi *Prusa Slicer* programmā, drukas materiāls *PLA*, drukas temperatūra  $230 \text{ }^\circ\text{C}$  [21]. Rezultātā ir iegūti cilindriskas formas objekti (4.6. att.).



4.5. att. *Autodesk Fusion 360* programmā sagatavotie *CAD* modeļi testa drukai.

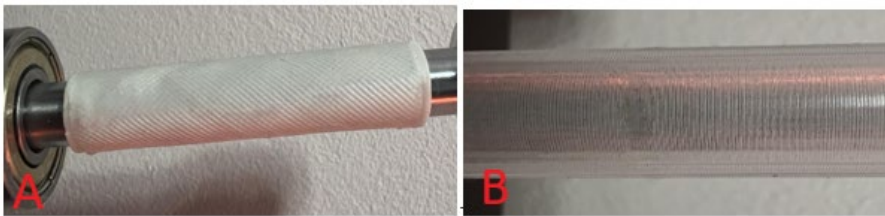




4.6. att. Cilindriskās drukas rezultāts un trūkumu apliecinājums.

Iegūtajos paraugos bez iepriekšējas apstrādes modeļu ģeometrija deformējas, un, ja sākumā drukātie slāņi savienojas ar malām, veidojot veselu cilindru, tad, palielinoties slāņu daudzumam un palielinot diametru, objekta malas sāk attālināties, veidojot atstarpi.

Lai pārbaudītu iespēju mainīt slāņa aizpildījuma leņķi un slāņu perpendikulāru pārklāšanos, tika sagatavoti cilindru *CAD* modeļi, diametrs – 8 mm, garums – 50 mm, slāņa biezums – 1 mm. B variantā cilindri bija sagriezti ar tradicionālo drukas metodi, kur slāņi iet paralēli cits citam. A variantā sagatavoto plakņu modeļu katrs nākamais slānis ir ar aizpildījumu, kas iet perpendikulāri leņķim, kas bija iepriekšējā slāņa aizpildījumā. Plaknes modeļi tiks drukāti uz cilindriskas platformas, rezultātā iegūstot cilindrus ar nepieciešamiem parametriem (4.7. att.).



4.7. att. Testa stenda drukas rezultāti materiāla pārklājuma testam ar cilindru piemēriem, kur: A) tradicionālās metodes paraugs; B) cilindriskās metodes paraugs.

4.7. attēlā redzams, ka pirmajā variantā slāņi ir novietoti paralēli cits citam, savukārt otrajā variantā tie krustojas, veidojot tīkla aizpildījuma formu. Visu modeļu slāņa biezums – 0,3 mm, līnijas biezums – 0,4 mm, drukas ātrums – 60 mm/s, paātrinājums – 500 mm/s<sup>2</sup>. Kā drukas materiāls tiek izmantoti *Crealty PLA* balti un *Crealty PET-G* caurspīdīgi kvēldiegi. Drukas temperatūra – 230 °C, drukas ātrums – 60 mm/s, paātrinājums – 500 mm/s<sup>2</sup>.

## 4.5. Secinājumi

Pārejā uz cilindrisko koordinātu sistēmu objekta slāņa loka garums ir nav nemainīgs, cilindra loka garums visu laiku pieaug, un trūkstošā loka neesamība izpaužas uz drukājamā objekta. Tāpēc modeļa sagatavošanas posmā ir nepieciešams papildus apstrādāt modeli, lai novērstu šo defektu. Turklāt, palielinoties slāņa daudzumam un pieaugot modeļa augstumam, parādās materiāla ekstrūzijas trūkums, kas izpaužas kā mazāks modeļa blīvums un pamanāmākas drukāšanas nepilnības. Tāpēc ir nepieciešama 3D drukas metodes izstrāde, kas varētu novērst konstatētos trūkumus.

## 5. TRĪSASU *FDM* 3D DRUKAS CILINDRISKĀS GRIEŠANAS METODES UN PROTOTIPA IZSTRĀDE

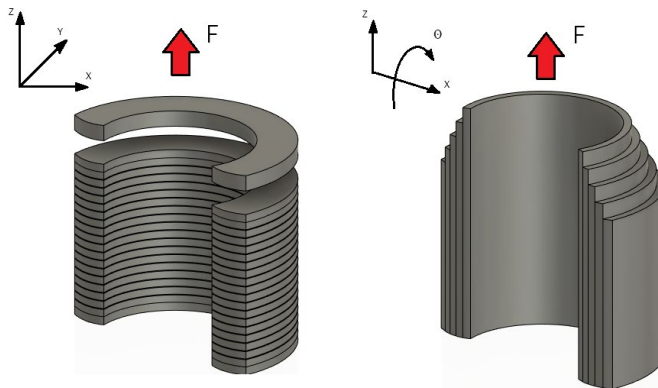
### 5.1. *FDM* 3D drukas cilindriskās griešanas metodes izstrāde

Balstoties eksperimentālā stenda rezultātos, ir izstrādāta pilnvērtīga cilindriskā *FDM* 3D drukas metode. Ortožu un citu ortopēdisko izstrādājumu ražošanā, kur izstrādājumi ir paredzēti nēsāšanai uz ķermeņa un kam ir dažāda veida slodzes, ir vairāki ierobežojumi, kas saistīti ar gatavo izstrādājumu mehāniskajām īpašībām un ilgmūžību. Esošās tradicionālās 3D griešanas metodes, kas tiek izmantotas pašreizējās griešanās programmās, balstās slāņu izmantošanas stratēģijās, kur katrs slānis tiek drukāts horizontāli, izveidojot starpslāņu savienojumu, kas ir produkta potenciālais vājais punkts. Šie starpslāņu savienojumi ir mazāk izturīgi pret spriedzi slāņiem perpendikulārā virzienā, kas var izraisīt produkta sadalīšanu slāņos un sabojāšanos, ja tiek piemērota atbilstoša slodze. Tas ir īpaši svarīgi ortozēm, kurām lietošanas laikā jāiztur dažāda veida mehāniskā slodze. Izstrādājumiem, kas izgatavoti ar tradicionālo 3D drukāšanas metodi, ir ierobežota noturība pret savērpšanas slodzēm, kas darbojas slāņu plaknē. Tas saistīts ar to, ka izstrādājuma iekšējā struktūra veidojas, konsekventi uzliekot slāņus, kas, materiālam savijoties, rada spriegumu. Rezultātā šāda slodze var izraisīt izstrādājuma deformāciju vai sabrukšanu gar slāņiem, kas samazina tā funkcionalitāti un uzticamību. Turklāt neoptimāls atbalstu un drukas trajektorijas sadalījums var radīt materiāla neefektīvu izmantošanu un drukāšanas laika palielināšanos. Vienlaikus horizontālā griešana ierobežo dizaina iespējas, jo īpaši, ja ir precīzi jāatveido sarežģītas anatomiskas formas [22], [23] [24].

Darbā izstrādātā cilindriskā griešanas metode piedāvā šo problēmu risinājumu, mainot izstrādājuma uzbūves slāņu orientāciju un stratēģiju. Ar cilindrisku griešanu slāņus var orientēt, lai labāk sadalītu slodzi, tostarp perpendikulāri slāņu virzienam, kas palielina izstrādājuma kopējo izturību pret stiepšanu. Optimizējot slāņa struktūru slodžu virzienā un šķērsvirzienā, izstrādājumi kļūst izturīgāki pret vērpes ietekmi, kas ir īpaši svarīgi ortozēm, kas ekspluatācijas laikā pakļautas sarežģītai dinamiskai slodzei. Tādējādi cilindriskā griešanas metode ne tikai uzlabo izstrādājumu mehāniskās īpašības, pateicoties efektīvākam slodzes sadalījumam, bet arī paplašina dizaina iespējas, ļaujot izveidot sarežģītākas un uzticamākas konstrukcijas.

Izmantojamā metode apvieno ģeometrisku optimizāciju ar mainīgu slāņa aizpildīšanas leņķi, lai samazinātu stiepes spriegumus, izmantojot standarta slāņa sagriešanas metodi, bet

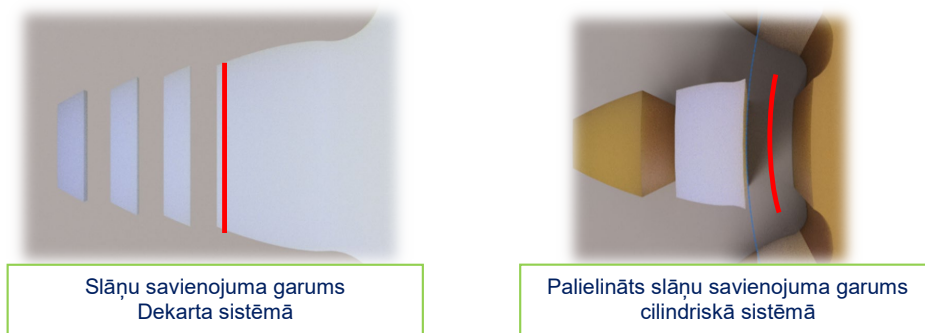
drukājot uz rotējoša cilindra. Cilindriskas formas izmantošana 3D drukātiem objektiem uzlabo drukāto izstrādājumu mehāniskās īpašības, palielinot to izturību pret stiepes slodzēm un atslāņošanos. Cilindriskas ģeometriskas formas izstrādājuma slāņi ir vērsti cits pret citu, radot fizisku ierobežojumu, efektīvi novēršot atslāņošanos, kas ir izplatīta problēma standarta daudzslāņu konstrukcijās (5.1. att.).



5.1. att. Slāņu izvietojums Dekarta un cilindriskā koordinātu sistēmā.

Ir pieņemts, ka slāņi ir novietoti tā, ka slāņu materiāla saskaras ar otra slāņa materiālu maksimāli cieši un starp slāņiem atstarpes nav, tad slāņu saķere ir balstīta drukas materiāla parametros jeb adhēzijā un slāņu saskares laukumā. Tomēr parasti slāņu materiāls netiek uzklāts perfekti, rezultātā rodas starpslāņu atstarpes. Šis parametrs ir definēts ar drukājamā objekta parametriem un izmantojamo 3D printeri, un tieši ietekmēt to var, tikai mainot drukas parametrus (slāņa biezumu, ekstrūzijas parametrus, drukas ātrumu).

Ir divi varianti, kā palielināt slāņu saķeri, mainīt materiāla parametrus un palielināt slāņu savienojuma laukumu. Dekarta sistēmā slāņi ir novietoti paralēli, un tieši palielināt slāņu savienojuma laukumu var, mainot drukājamā objekta aizpildījuma procentu. Tomēr, ja aizpildījums jau ir 100 %, tad vēl vairāk palielināt savienojuma laukumu vairs nav iespējams. Tomēr, pārejot uz cilindrisko koordinātu sistēmu cilindriskas formas dēļ, slāņu savienojuma laukums palielinās, kā arī slāņi sāk savstarpēji turēties kopā cilindriskā izvietoējuma dēļ, kur slāņi ir savstarpēji savienoti un mainās slodzes vektors (5.2. att.).

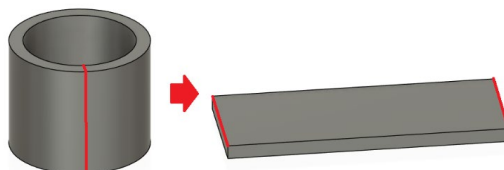


Slāņu savienojuma garums Dekarta sistēmā

Palielināts slāņu savienojuma garums cilindriskā sistēmā

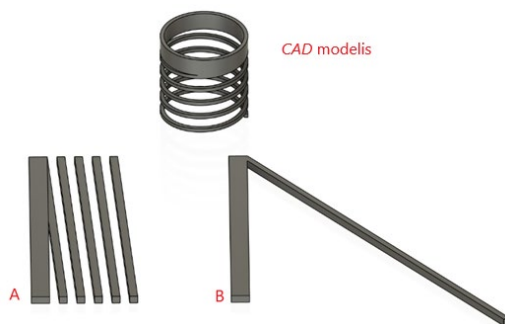
5.2. att. Palielināts starpslāņu savienojuma laukums.

Izstrādājamās metodes ideja ir, izmantojot Dekarta koordināšu sistēmas 3D printeri, aizvīdot Y asi ar rotējošu cilindru, tādā veida minimāli mainot 3D printera konfigurāciju, izmantojot cilindrisko koordināšu sistēmu. Galvenā problēma, kas rodas, pārejot uz cilindrisko sistēmu, ir *CAD* modeļu sagatavošanas programmatūras neesamība, jo visi esošie risinājumi piedāvā vienkāršo tradicionālo vai adaptīvo griešanu, kas neļauj pilnībā izmantot šo metodi. Tāpēc tika lemts izstrādāt pieeju, kas ļaus brīvāk un saprotamāk izmantot šādā veida printerus. Kā viena no pieejām, kas tika izmantota iepriekšējos pētījumos, ir eksistējošo *CAD* modeļi sagriezti kādā brīvi izvēlēta vietā un iztaisnot to plakanā veidā (5.3. att.) [25].



5.3. att. Cilindra sagriešana un pārveidošanā plaknē.

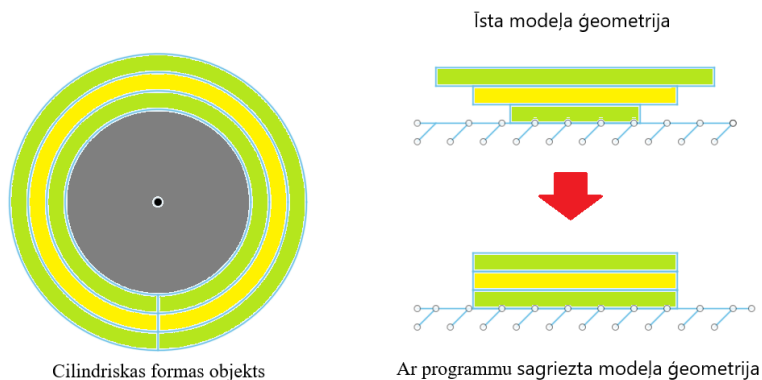
Darbā izmantojas divi *CAD* modeļa iztaisnošanas paņēmieni – taisna plakana iztaisnošana un spirālveida iztaisnošana. Pirmais variants ir izmantot taisnu plakānu iztaisnošanu, kad cilindriskas formas objekts tiek sagriezts brīvi izvēlēta vietā vienas ass garumā. Kad taisnas iztaisnošanas objekts tiek drukāts, abas objekta malas, pa kurām sagriezts modelis, savienojas un rodas redzama šuve. Taisnu iztaisnošanu ir vērts izmantot, kad šuve uz drukājamā objekta neietekmē tā izmantošanas veidu, vai tad, ja nepieciešams izdrukāt cilindriskas formas objektu, kura malas nav savienotas un kam loka forma. Otrs veids ir spirālveida *CAD* modeļa iztaisnošana, kad objekts ir pilnīgi cilindriskas formas un to var iztīt vienā vienotā slāni (5.4. att.).



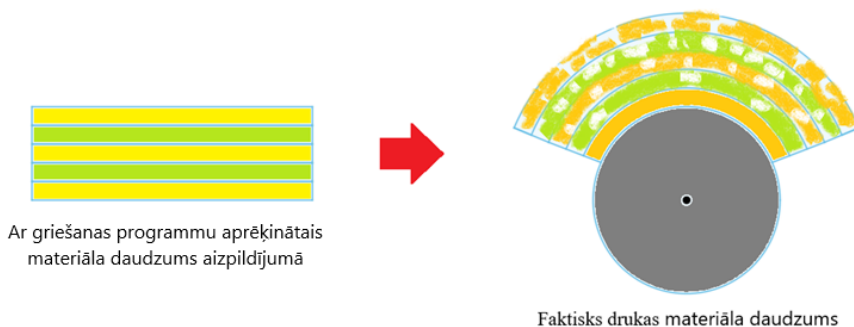
5.4. att. *CAD* modeļa taisna plakana (A) un spirālveida (B) iztaisnošana.

Kompleksām ģeometriskām formām un modeļiem ar vairākiem slāņiem, kuru augstums ir samēra liels, tāda veida iztaisnošana deformēs sākotnējo ģeometriju, jo rotējošam drukas cilindram (drukas galdam) ir noteikts diametrs un atkarībā no slāņa biezuma katram slānim šis parametrs ir atšķirīgs. Tāpēc nepieciešams izmantot kompleksus iztaisnošanas algoritmus, kas vēl pirms modeļa sagriešanas jau aprēķina slāņu biezumu (5.5. att.). Otra problēma ir tā, ka, sagatavojot modeļus drukai ar Dekarta tipa tradicionālam griešanas programmām, programma aprēķinās noteikto materiāla apjomu katram slānim, bet atkarībā no slāņa biezuma materiāla

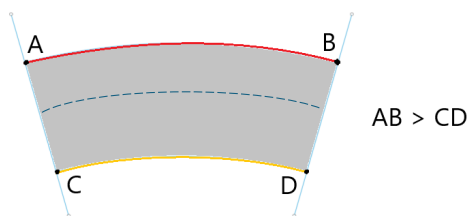
daudzums katram slānim palielināsies un rezultātā, palielinoties drukājamā objekta slāņu daudzumam, padotā materiāla apjoms samazināsies (5.6. att.). Turklāt arī katrā slānī iekšējās un ārējās cilindra līnijas garuma atšķirību dēļ materiāls tiks sadalīts nevienmērīgi (5.7. att.). Šo trūkumu var minimizēt, mainot slāņa dūkas augstumu.



5.5. att. Modeļa deformācija iztairošanas procesa laikā.

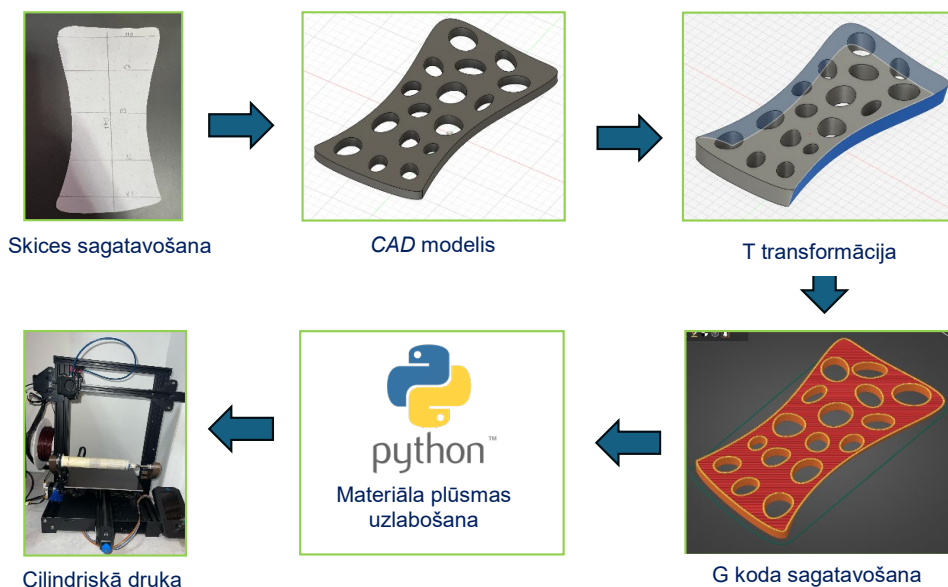


5.6. att. Nepietiekama padotā materiāla daudzuma problēma.



5.7. att. Materiāla sadalījums vienā slānī.

Promocijas darbā izstrādātā metode ir piemērota ortozes izgatavošanai. Kad ortozes parametri ir definēti (1. nod.) un ja iztaisnoto ortožu ģeometrija ir tuva pilnīgi plakanaī formai, sākumā *CAD* modeli ir iespējams sagatavot kā plakanu objektu. Otrs uzdevums ir novērst problēmas, kas konstatētas cilindriskai griešanas metodei. Balstoties šajos parametros, ir izveidota jauna modeļu sagatavošanas metode. Shematiskais drukas sagatavošanas process redzams 5.8. attēlā.



5.8. att. Jaunas cilindriskas modeļa sagatavošanas metodes stratēģija.

Vispirms, ņemot vērā cilvēka ekstremitātes parametrus un izmērus, tiek izveidots vienkāršs papīra ortozes makets, kas tiek sagriezts un pārņemts *CAD* programmā kā sākuma skice. Nākamajā posmā uz skices pamata tiek veidots ortozes *CAD* 3D modelis vienkāršā Dekarta koordinātu sistēmā, pieņemot, ka slāņu leņķis pret drukas galdam ir  $90^\circ$  jeb visi slāņi ir perpendikulāri drukas galdam. Plakanam modelim lieto jaunu T transformāciju. Šīs transformācijas mērķis ir sagatavot modeli cilindriskai drukai, nedaudz mainot objekta ģeometriju tā, lai objekts drukātos atbilstoši cilindrisko koordinātu sistēmas prasībām. Kad *CAD* modelis ir gatavs, to sagriež ar tradicionālo griešanas metodi jebkurā pieejamā programmā, norādot slāņa aizpildījumā nobīdi labākai ortozes mehāniskai izturībai pret noteiktas slodzes veidu atkarībā no ortozes veida un lietojuma.

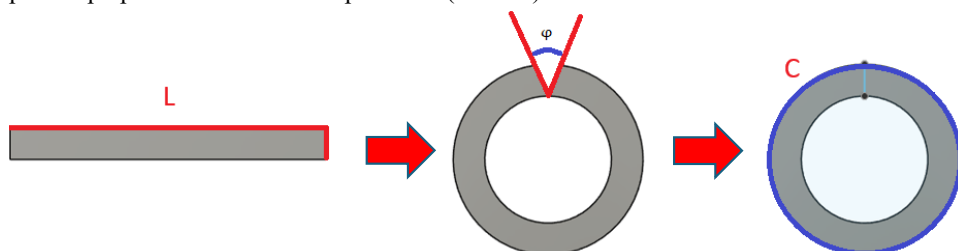
Rezultātā ir iegūts pārveidotas ortozes G kods, kam nepieciešams lietot materiāla aizpildījuma koeficienta palielināšanu, izmantojot *Python* veidoto kodu (3. pielikums), kas aprēķina materiāla padošanu pēc 5.1. formulas.

$$\text{palielināšanas koeficients} = \frac{\text{esošā slāņa biezums} \times 2\pi}{\text{slāņa loka garums}} \quad (5.1)$$

Šis kods aprēķina nepieciešamo materiāla apjomu, nolasot sagatavoto G kodu un aizvietojojot norādītās ekstrūzijas daudzumu uz nepieciešamo ekstrūzijas daudzumu kvalitatīvai drukai. Kad ir iegūts gala G kods, tas tiek aizsūtīts drukai uz cilindriskā tipa 3D printeri, un drukas rezultātā ir iegūta ortoze ar palielinātu mehānisko izturību, kas drukāta bez balsta materiāla, novēršot arī pārkares drukas problēmas.

## CAD modeļu sagatavošanas metodes apraksts un veiktie aprēķini

T transformācija ir paredzēta, lai kompensētu leņķi, kas rodas, pārejot no Dekarta sistēmas uz cilindrisko koordinātu sistēmu, kur rodas slāņa augstuma attiecība pret cilindra līnijas garumu. Aptinot plakano modeli ap cilindru, modeļa vertikālās malas kļūst izliektas, tāpēc mainās leņķi, ko tās veido ar pamatni. Drukas cilindram ir izliekums, un, kad plakans modelis apņēms šo izliekumu, modeļa iekšējās un ārējās malas izliecas atšķirīgi. Modeļa apakšējās malas ir tuvāk cilindra centram, tāpēc tām ir mazāks izliekums, salīdzinot ar augšējām malām. Lai kompensētu šo efektu un saplūstu arī augšējie modeļa gali, vispirms modelis ir jāsaliec. Šim izliekumam jāatbilst cilindra izliekumam, lai pēc modeļa aptišanas ap cilindru visas malas paliktu perpendikulāras cilindra pamatnei (5.9. att.).



5.9. att. Modeļu T transformācija, kas piemērojama modeļa malu šuves minimizēšanai.

Ir nepieciešams:

- 1) izmērīt drukas cilindra rādiusu  $R$  (mm);
- 2) aprēķināt loka garumu  $C$  (mm), ko veidos modeļa augšējā mala pēc aptišanas ap cilindru;
- 3) pamatojoties uz loka rādiusu  $R$  un garumu  $C$ , aprēķināt izliekuma izmaiņu leņķi  $\varphi$  augšējai pusei, lai tā pēc aptišanas paliktu perpendikulāra pamatnei.

Pārveidojumu var izteikt ar 5.2. formulu ( $\pi = 3,1415$ ).

$$C = 2\pi R, \quad (5.2)$$

kur  $C$  – cilindra loka garums, mm;

$R$  – cilindra rādiuss, mm.

Ja modeļa garums ir vienāds ar  $L$ , tad leņķi  $\varphi$  var aprēķināt ar 5.3. formulu.

$$\varphi = \frac{L}{C}, \quad (5.3)$$

kur  $\varphi$  – nobīdes leņķis, °;

$L$  – modeļa malas garums, mm;

$C$  – cilindra loka garums, mm.

Ar šo aprēķinu var noteikt nobīdes leņķi  $\varphi$ , uz kuru ir nepieciešams pārveidot modeli. Tomēr sakarā ar to, ka pāreja uz cilindrisko koordinātu sistēmu notiek, izmainot tikai vienu asi, tad arī modeli nepieciešams izmainīt tikai  $Y$  virzienā, nemainot  $X$  un  $Z$  koordinātes. Lai to realizētu, ir uzrakstīts *Python* kods, kas nolasa *.STL* modeli, nosaka to koordinātes un nobīda modeļa koordinātes  $Y$  ass virzienā noteiktā attālumā, kas ir aprēķināms, ņemot vērā modeļa ģeometrijas parametrus.

Darbā ir pieņemts, ka drukas cilindra diametrs ir 32 mm. Pieņemot, ka slāņa biezums ir 0,3 mm, parametri modelim ar pieciem slāņiem apkopoti 5.1. tabulā.

5.1. tabula

Cilindrisko paraugu loka garuma un nobīdes leņķa aprēķināšana

Slāņa numurs	Slāņa biezums, mm	Diametrs, mm	Loka garums, mm	Nobīdes leņķis, °
0	0	32	100,48	0
1	0,3	32,6	102,364	0,586144
2	0,6	33,2	104,248	1,151101
3	0,9	33,8	106,132	1,69600
4	1,2	34,4	108,016	2,221893
5	1,5	35,0	109,900	2,728952

### Materiāla padošanas apjoma uzlabošanas metode

Cilindriskā koordinātu sistēmā, parejot no viena slāņa pie nākamā, nepieciešams palielināt padotā materiāla daudzumu, jo, palielinoties slāņa augstumam, mainās drukas sprauslas attālums no drukas cilindra centra, palielinoties diametram. Palielinoties drukājamā objekta diametram, palielinās arī tā garums. Aprēķinot loka garuma procentuālās izmaiņas no slāņa uz slāni, nākama slāņa loka garuma pieaugums paliek relatīvi nemainīgs (jo katrs slānis pievieno vienādu biezumu), bet procentuālā aprēķina bāze (t. i., pats loka garums) palielinās. Pievienojot to pašu slāņa biezumu lielākam diametram, loka garuma pieaugums paliek līdzīgs, bet attiecībā pret kopējo loka garumu pieaugums veido arvien mazāku procentuālo daļu (4.5. tab.). Tas ir tāpēc, ka procentuālās izmaiņas tiek aprēķinātas kā pieauguma attiecība pret sākotnējo vērtību. Sākotnējai vērtībai (loka garumam) palielinoties ar katru slāni, tas pats absolūtais pieaugums veido mazāku daļu no šīs pieaugošās sākotnējās vērtības. Pievienojat tādu pašu materiāla daudzumu dažāda diametra slāņiem, šis daudzums veidos mazāku procentuālo daļu no lielākā slāņa kopējā izmēra, salīdzinot ar mazāko.

Tādējādi, lai gan pievienotā materiāla daudzums (un līdz ar to arī loka garuma pieaugums) var būt nemainīgs, šī pieauguma procentuālā daļa no kopējā loka garuma samazinās, palielinoties objekta diametram. Attiecīgi ir divi varianti, kā var aprēķināt materiāla padošanas daudzumu.

- Balstoties sākotnējā drukas cilindra izmēros, aprēķināt kopējo procenta palielināšanos katrām slānim, tādā veidā palielinājuma procents tiks aprēķināts no kopējā palielinājuma procenta un palielinājuma procents lineāri samazināsies, palielinoties slāņu augstumam. Attiecīgi ir nepieciešams precīzāk aprēķināt palielinājuma procentu, pārejot pie katra nākamā slāņa, kas nav optimāli, apstrādājot liela apjoma kodus.
- Otrs variants ir aprēķināt nākama slāņa materiāla palielinājuma procentu, balstoties iepriekšējā slāņa loka garumā.

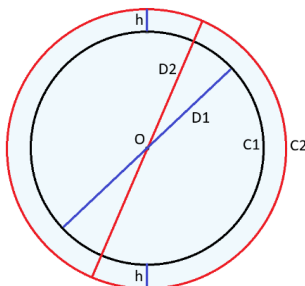
Ja pieņem, ka slāņa biezums ir nemainīgs un modelis ir sagriezts ar tradicionālo metodi, tad abos variantos faktiskais palielinājuma procents paliks nemainīgs, tomēr pirmajā variantā,



palielinoties slāņa augstumam, nepieciešams atkārtoti pārrēķināt palielinājuma procentu vai izmantot kompleksu formulu materiāla daudzuma aprēķināšanai.

Otrajā variantā, zinot slāņa biezumu un drukas cilindra diametru, var sākotnēji aprēķināt palielinājuma procentu slāni pa slānim un piemērot šo palielinājuma procentu, pārejot uz nākamo slāni, tādā veidā nav nepieciešamības veikt kompleksus aprēķinus ekstrūzijas apjoma aprēķināšanai.

Darbā ir izmantoti un salīdzināti abi varianti, tomēr cilindriska prototipa variantā tiek izmantots dinamiski aprēķināms koeficients, kas dinamiski aprēķina ekstrūzijas koeficientu un nodrošina ātrāku un efektīvāku ekstrūzijas aprēķinu (5.10. att.).



5.10. att. Slāņa loka garuma aprēķināšanas attēls.

Sākotnēji ir nepieciešams aprēķināt drukas cilindra loka garumu, izmantojot 5.4. formulu.

$$C = \pi D, \quad (5.4)$$

kur  $C$  – loka garums, mm;

$D$  – cilindra diametrs, mm;

Kad slāņa augstums  $h$  tiek pievienots cilindram, diametrs palielinās par  $2h$ , jo pievienošana notiek abās cilindra pusēs, kas ietekmē loka garumu. Ekstrūzijas procentuālās izmaiņas var aprēķināt, salīdzinot loka garumu pirms un pēc slāņa pievienošanas. Ja sākotnējais loka garums ir  $C_0$  un loka garums pēc slāņa pievienošanas ir  $C_1$ , tad procentuālās izmaiņas  $P$  var izteikt ar 5.5. formulu –

$$P = \left( \frac{C_1 - C_0}{C_0} \right) \times 100 \%. \quad (5.5)$$

Tādējādi, ja sākotnēji cilindra diametrs ir  $D_0$ , tad pēc pirmā slāņa pievienošanas diametrs kļūs  $D_0 + 2h$ , un loka garums attiecīgi mainīsies. Pieņemot, ka ekstrūzija mainās proporcionāli loka garumam, ekstrūzijas procentuālās izmaiņas pēc katra jauna slāņa atbilst loka garuma procentuālajām izmaiņām.

Aprēķina piemērs, ja drukas cilindra diametrs ir 30 mm un katra slāņa biezums ir 0,3 mm katrā slānī:

- 1) drukas cilindra loka garums  $C_0 = \pi \times 30 = 94,25$  mm;
- 2) diametrs pēc slāņa pievienošanas  $D_1 = 30 + 2 \times 0,3 = 30,6$  mm;
- 3) jauna slāņa loka garums  $C_1 = \pi \times D_1 = 96,13$  mm;
- 4) materiāla palielinājuma procents  $P = \left( \frac{C_1 - C_0}{C_0} \right) \times 100 \% = 2,00 \%$

Sākotnējais loka garums ir aptuveni 94,25 mm. Pēc pirmā slāņa, kura biezums ir 0,3 mm, pievienošanas jaunais loka garums ir aptuveni 96,13 mm. Tas nozīmē, ka ekstrūzijas procentuālās izmaiņas starp sākotnējo un jauno loka garumu ir aptuveni 2,00 %.

Tādējādi, ja nepieciešams saglabāt vienmērīgu pārklājumu, palielinoties drukājamā objekta diametram, ir jāpalielina ekstrūzija par noteiktu procentuālo daļu (šajā gadījumā par 2 %) katram nākamajam slānim, sākot ar otro, ja tiek pieņemts, ka pirmais slānis ir nemainīgs un to ekstrūzija ir vienāda ar ar griešanas programmā aprēķināto un veido 100 %.

Manuāla aizpildījuma koeficienta iestatīšanas rezultāts, salīdzinot ar neregulēto materiāla plūsmu, redzams 5.11. attēlā. Pēc testa drukas rezultātiem var secināt, ka manuāli iestatīts procents sākumā dod lielāku materiāla daudzumu, bet pēc slāņu skaita palielināšanas materiāla daudzums kļūst mazāks nekā nepieciešams tālākai drukai.



5.11. att. Cilindriskās drukas piemērs bez plūsmas regulēšanas un ar manuālo procentu.

Lai nodrošinātu dinamiskas plūsmas koeficienta izmaiņas, ir izveidots *Python* kods (3. pielikums), kas apstrādā G koda failu un maina ekstrūzijas parametru katram slānim atsevišķi (3. pielikums). Koeficients tiek rēķināts, ņemot vērā katra iepriekšēja slāņa loka garumu un plūsmas koeficientu. Kopējais plūsmas koeficients tiek skaitīts atsevišķi un tiek attēlots koda apstrādes laikā, procentuālais aizpildījuma piemērs, ja cilindra diametrs ir 32 mm, redzams 5.2. tabulā.

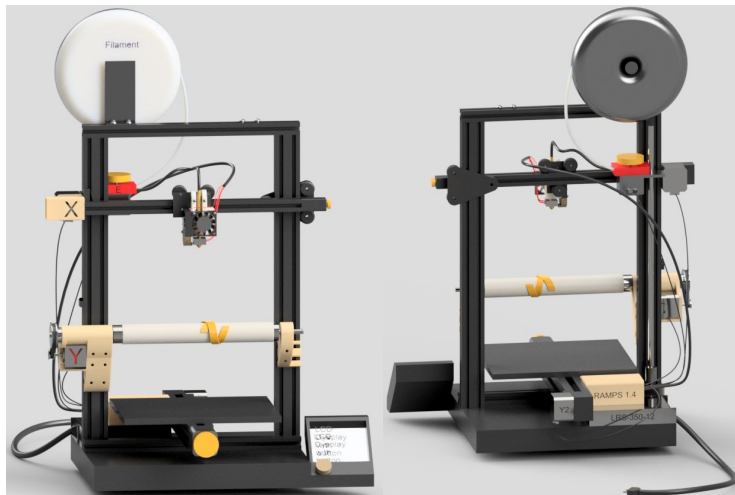
5.2. tabula

Dinamiski maināms materiāla ekstrūzijas koeficienta piemērs, izmantojot *Python* kodu

Slāņa numurs	Izmaiņas procents slānī	Kopējais procents
1	0,0 %	0 %
2	1,96 %	1,96 %
3	1,92 %	3,88 %
4	1,89 %	5,77 %

## 5.2. Trīsasu *FDM* cilindriskas koordinātu sistēmas printera prototipa izstrāde

Pirmais posms prototipā izveide ir sagatavot prototipa 3D *CAD* konceptu (5.12. att.), kas ir modelēts *Autodesk Fusion 360* aplikācijā, kur norādīts visu elementu izvietojums. Izmantoto komponentu saraksts prototipa izveidei redzams 5.3. tabulā.



5.12. att. *Autodesk Fusion 360* aplikācijā izveidots cilindriskā 3D printera prototipa *CAD* modelis.

5.3. tabula

Piecasu cilindriskā *FDM* 3D printera prototipā izmantoto komponentu saraksts

Nosaukums	Modelis	Parametri
3D printeris	<i>Creativity Ender-3 V2</i>	<i>CoreXZ</i> Dekarta sistēmas <i>FDM</i> 3D printeris
Soļu dzinējs	2 × <i>NEMA 17 42-34</i> <i>BJ42D15-26V12</i> 2 × <i>NEMA 17 42-40</i> <i>42HS040DF260A</i>	Soļa leņķis – 1,8°, nominālā strāva – 0,8 A, 1,0 A fāžu skaits – 2, griezes moments – 0,8 Nm
Soļu dzinējā draiveris	4 × A4988	Darba spriegums – 8–35 V <i>DC</i> , loģikas spriegums – 3–5,5 V <i>DC</i> , <i>I</i> <sub>max</sub> – 2 A
Barošanas avots	<i>Meanwell LRS-350-12</i>	12 V <i>DC</i> , 350 W, 27 A, 48–63 Hz
Vadības elementi	<i>Arduino Mega 2560</i> , <i>RAMPS 1.4</i>	<i>ATMega 2560</i> 16 MHz
Pārvades mehānisms	1 × 2GT 20 zobu zobrats, 1 × 2GT 60 zobu zobrats 1 × 2GT-6 218mm zobsiksna, 2 × 688ZZ gultņi, 400 × 8 mm vītņota skrūve	Pārvades attiecība 3 : 1
Programmnodrošinājums	<i>Marlin</i>	Prototipa vadība realizējama, izmantojot <i>Web</i> saskarni ar <i>Wi-Fi</i> protokolu
3D drukas materiāli	<i>Creativity PA12 white</i> 1,75 mm	Tiek drukāti drukas galvas elementi, Y ass korpusi.

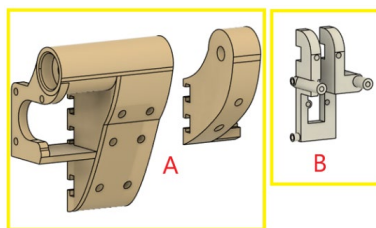
Prototipa korpuss ir izveidots no 4020 un 2020 alumīnija profiliem, kas nodrošina drukas stabilitāti un attiecīgi asu mazu svaru.

Drukas galva ir izveidota un izvietota tā, lai piedāvātu pēc iespējas vairāk vietas starp cilindrisko drukas galdu un drukas galvas elementiem, nodrošinot to, ka drukas galvas elementi nesaskarsies ar drukājamo objektu elementiem.

Par Z ass pacelšanu atbild *NEMA 17* 42–40 soļu dzinējs, pie kura piestiprināta 8 mm diametra (2 mm *pitch*, 8 mm *lead*) un 400 mm gara vītņota skrūve, piestiprināta pie X ass stiprināšanas elementiem. X ass ir piestiprināta pie 2020 alumīnija profila un tiek kontrolēta, izmantojot *NEMA 17* 42–34 soļu dzinēju ar *GT2* 20 zobu zobratu un *GT2* 6 mm biezu un 750 mm garu jostu, piestiprinātu pie drukas galvas stiprināšanas elementiem.

Zobsiksna spriedzi var iestatīt, izmantojot pie ass stiprināmo spriedzes regulēšanas mehānismu. Y ass sastāv no cilindriskā drukas galda, kas sastāv no metāliska 8 mm diametra un 400 mm gara vītņota stieņa, kas nodrošina iespēju izmantot visu X ass drukas garumu, diviem 8 mm bieziem un 22 mm diametra *686zz* gultņiem, pārvades sistēmas no *GT2* 60 zobu un *GT2* 20 zobu zobratiem, savienotiem ar 218 mm un garu *GT2* 6 mm biezu jostu, ievietotiem modelēta un izdrukāta neilona korpusā.

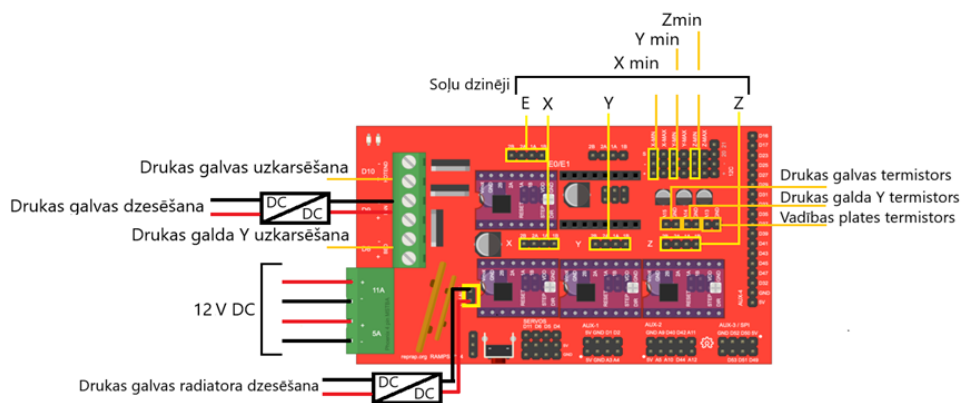
Prototipa izgatavošanai bija nepieciešams izveidot mehāniski līdz 150 °C temperatūrai izturīgus elementus drukas galvas un cilindriskā galda stiprināšanai, kas tika izdrukāti ar tradicionālo *FDM* metodi, izmantojot *Fiberlogy* neilona *PA12* baltu kvēldiegu (5.13. att.).



5.13. att. Ar tradicionālo *FDM* metodi izdrukāts *PA12* neilona cilindriskās drukas galda, soļu dzinēja un vītņota stieņa (A) un drukas galvas elementu (B) stiprināšanas *CAD* modelis.

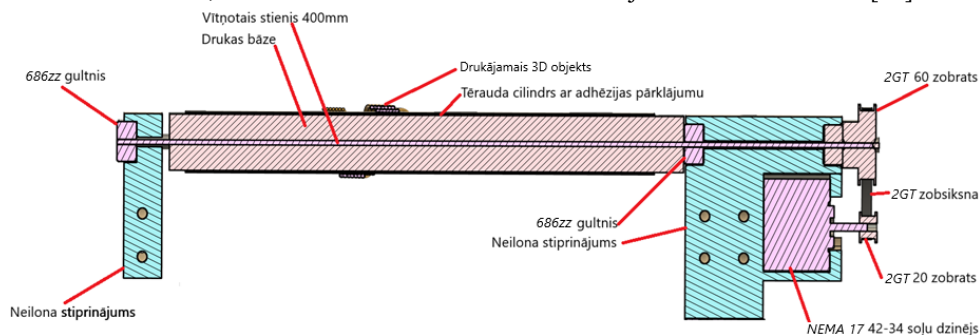
Prototipa cilindriskās drukas galda elementu stiprināšanai ir modelēts *CAD* stiprināšanas korpuss, kas izdrukāts, izmantojot *Fiberlogy* *PA12* baltas krāsas neilona kvēldiegu, kas nodrošina lielu izturību pret mehāniskam slodzēm. Lai nodrošinātu Y ass koncentriskumu, ir izveidots papildu stiprinājums uz otra Y ass gala, un pievienota automātiskās līmeņošanas zonde cilindra pozīcijas noteikšanai un regulēšanai. Lai nodrošinātu ātru pārslēgšanos starp plakano un cilindrisko druku, ir izvietots Y2 ass ar plakano galdu, kontrolējams ar *NEMA 17* 42–34 soļu dzinēju, blakus motoram ir izvietots pozīcijas devējs minimālās Y2 galda pozīcijas noteikšanai [26]. Visi kontroles un vadības elementi ir pieslēgti *Arduino Mega 2560* vadības platei ar *RAMPS 1.4* paplašinājuma plati, kas ir pieslēgta 12 V DC 29 A impulsu barošanas blokam, kas novietots uz 3D printera pamatnes. Lai kontrolētu drukas procesu un saņemtu informāciju par drukas gaitu, ir pieslēgts *LCD 12864KBA* ekrāns ar vadības pogu. *G-koda* ielāde uz 3D printera prototipa atmiņas karti ir paredzēta, izmantojot *USB* pieslēguma pie personālā datora vai izmantojot pārnēsājamus *SD* atmiņas kāršu datu nesējus [27].

*RAMPS 1.4* paplašinājuma plate ir uzstādīta uz *Arduino Mega 2560* mikrokontrollera plates, un visi 3D printera prototipa elementi ir pieslēgti *RAMPS 1.4* paplašinājuma platei. Prototipā izmantoti divi *NEMA 17* 42–34 soļu dzinēji uz X un Y ass, divi *NEMA 17* 42–40 soļu dzinēji uz E un Z ass, uzstādīti četri *A4988* soļu dzinēju draiveri, trīs pozīciju noteikšanas devēji, trīs *NTC 100K* tipa termistori, drukas galds, drukas galvas keramiskais uzkaršēšanas elements un divi dzesēšanas ventilatori, drukas galvas D9 izvadā drukājamo objektu dzesētajam ir paredzēta ātruma kontrole, bet *12V-AUX* izvadā drukas galvas radiatora dzesētajam to nevar regulēt, tāpēc nepieciešams izmantot divus atsevišķus *DC/DC* pārveidotājus, barošana pieslēgta 12 V DC barošanas blokam. Elementu slēgums redzams 5.14. attēlā.



5.14. att. Prototipa elementu pieslēguma shēma.

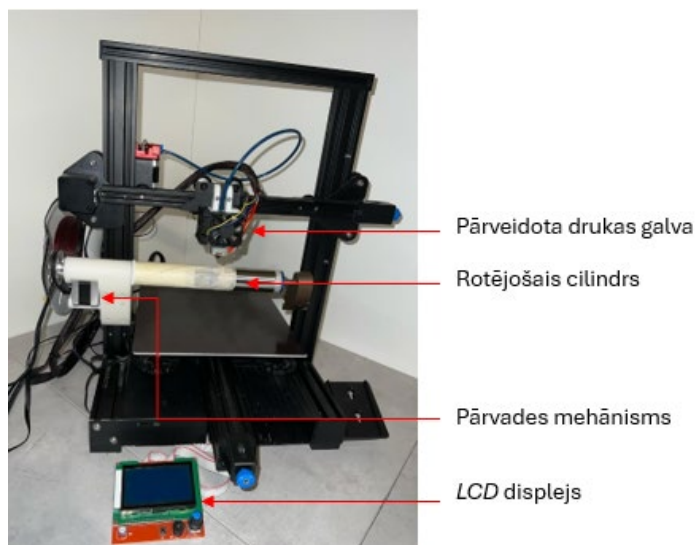
Cilindriskās drukšanas galda konstrukcijai ir divi (4.19. att.) neilona stiprināšanas elementi, trīs 686zz gultņi, 8 mm diametra un 400 mm garš vītņots tērauda stienis, 2GT 60 un 20 zobu zobrati, 2GT 218 mm zobsiksna, neilona drukāta cilindrisks 31 mm ārējā diametra bāze ar 8 mm diametra vītņotu caurumu un tukšs tērauda cilindrs 32 mm diametrā un 0,5 mm biežumā, kas nodrošina virsmas gludumu un precizitāti. Tērauda cilindram nav paredzēta uzkaršēšana, tāpēc tā virsmu ir nepieciešams pārklāt ar adhēzijas materiālu, piemēram, laku, līmi vai papīra krāsošanas līmlenti, kas izmantota testos. Saliktā konstrukcija redzama 5.15. attēlā [28].



5.15. att. Cilindriskās drukšanas galda uzbūve griezumā.

Cilindriskas drukas galda bāze ir drukāta uz tradicionāla *FDM* 3D printera, izmantojot neilona *PA12* kvēldiegu. Bāzes izmēru var regulēt, mainot tā diametru, attiecīgi mainot drukas galda izmēru un diametru. Ir iespējams drukāt uzreiz uz drukas bāzes, ja tā ir pārklāta ar atdalāmo adhēzijas slāni, tomēr, lai nodrošinātu cilindra gludumu un novērstu ģeometrijas izmaiņas lielo temperatūru ietekmes dēļ, papildus tiek izmantots 0,5 mm biezs tērauda cilindrs.

Izveidots un salikts prototips (5.16. att.) ir pieslēgts 230 V *AC* barošanas avotam un *TENMA* osciloskopam, lai nolasītu spriegumu un strāvas parametrus un veiktu patēriņa aprēķinus.



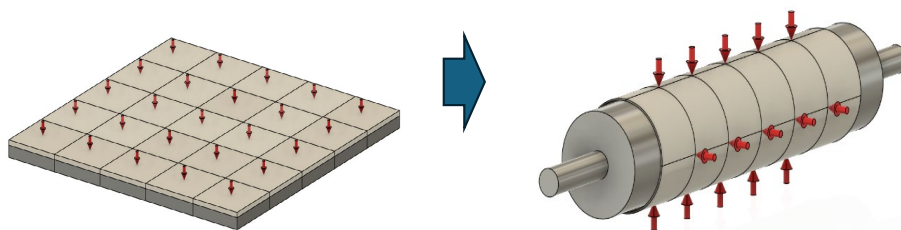
5.16. att. Izveidots cilindriskas drukas prototips.

Vadības plātes programmnodrošinājumu veido *Marlin* programmaparatūra. *Marlin* nodrošina *C* valodā rakstītu kodu ar vairākiem iestatījumu failiem. Lai ielādētu *Marlin* programmatūru uz vadības plātes, tā ir savienota ar personālo datoru, izmantojot *USB* kabeli un *COM* portu. Programma piedāvā daudz iestatījumu, iespēju pieslēgt vairākas asis un citas vadības ierīces.

Kods tiek kompilēts *Arduino IDE* programmā un saglabāts *Arduino Mega 2560* vadības plātes atmiņā. Drukāšanai iepriekš sagatavotais ģenerētais *G* kods tiek ierakstīts *SD* atmiņas kartē un ievietots *LCD* ekrāna savienotājā. Ortozes izgatavošanas posmi un programmatūras sagatavošanas posmi redzami 5.22. attēla diagrammā.

Lai nodrošinātu augstu drukas precizitāti, nepieciešams noteikt drukas galda koncentriskumu. Tā noteikšanai izmantots automātiskais augstuma sensors 3D printerim *CR-Touch*. Sensors tiek uzstādīts uz drukas galvas blakus drukas sprauslai. Šis sensors ir paredzēts plakanas drukas galda virsmas ģeometrijas noteikšanai, un pārbaudes metode balstās faktā, ka brīdī, kad sensors saskaras ar virsmu, tas reģistrē to kā signālu un pārsūta šo informāciju uz vadības plāti. Pamatojoties uz saņemtajiem datiem, vadības panelis nosaka galda augstumu un nelīdzenumus (4.17. att.). Lai *CR-Touch* darbotos pareizi, ir nepieciešama iepriekšēja kalibrēšana. Tā ietver sensora augstuma regulēšanu un tā attālumu no sprauslas, lai nodrošinātu

optimālu saskari ar galda virsmu. Cilindriska 3D prototipā šis sensors ir izmantots līdzīgi plakanās drukas galda 3D printerim. Drukas cilindrs tiek sadalīts pa zonām, pārbaudes laikā cilindrs griežas, un sensors nosaka attālumu no sprauslas līdz cilindram. Tādā veidā ir iegūts cilindra izvietojums telpā un var mehāniski koriģēt cilindra pozīciju, mainot stiprināšanas elementu izvietojumu uz printera metāliskajiem profiliem. Ja pēc pozīcijas noteikšanas ar sensoru visi attālumi ir vienādi vai līdzīgi, var konstatēt, ka ass ir izvietota pareizi un tai ir labs koncentriskums visā garumā. Ja, mainot ass pozīciju un veicot mērījumus, drukas galds joprojām rāda, ka attālumi visā ass garuma nesakrīt, tad asij ir slikts koncentriskums un nepieciešams aizvietot tās elementus.



5.17. att. Cilindriska galda pozīcijas noteikšanas metode un koncentriskuma pārbaude.

### Programmnodrošinājuma iestatījumi un sagatavošana drukai

Pirms drukas sākšanās ir nepieciešams veikt soļu dzinēju kalibrēšanu. Soļu dzinējam nepieciešams norādīt soļu skaitu vienā milimetrā. Tas ir nepieciešams, lai nodrošinātu soļu dzinēju pagriešanu nepieciešamajā attālumā. Y ass ir aprīkota ar pārvades mehānismu 3 : 1 attiecībā, tāpēc var paredzēt, ka soļu skaits milimetrā būs trīs reizes lielāks. Tomēr pēc veiktās kalibrēšanas tika konstatēts, ka nepieciešams lielāks soļu daudzums nekā prognozēts. Pēc visu soļu dzinēju kalibrēšanas ir veikti šādi iestatījumi:

- X ass: 80 soļu/mm;
- Y ass: 260 soļu/mm;
- Z ass: 400 soļu/mm;
- E ass: 93 soļi/mm.

Nākamais solis ir iestatīt maksimāli pieļaujamo ātrumu, paātrinājumu un leņķisko ātrumu. Balstoties 3D printera kinemātikā un *Ender 3 V2* parametros, cilindriskajam prototipam iestatīti šādi parametri:

- X ass: maks. ātrums – 100 mm/s, maks. paātrinājums – 500 mm/s<sup>2</sup>, maks. leņķiskais ātrums – 5 mm/s;
- Y ass: maks. ātrums – 100 mm/s, maks. Paātrinājums – 500 mm/s<sup>2</sup>, maks. leņķiskais ātrums – 0,3 mm/s;
- Z ass: maks. ātrums – 5 mm/s, maks. Paātrinājums – 100 mm/s<sup>2</sup>, maks. leņķiskais ātrums – 5 mm/s;
- E ass: maks. ātrums – 25 mm/s, maks. Paātrinājums – 1000 mm/s<sup>2</sup>, maks. leņķiskais ātrums – 5 mm/s.



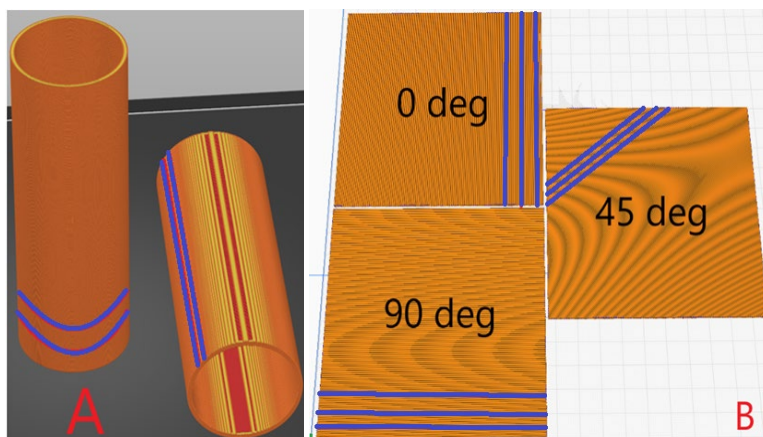
Maksimālā drukas galvas temperatūra ir 260 °C, maksimālā Y2 drukas galda temperatūra ir 100 °C.

### 5.3. Trīsasu *FDM* 3D cilindriskā printera prototipa testēšana

#### Trīsasu *FDM* 3D cilindriskā printera prototipa testēšanas metodoloģijas apraksts

Balstoties [29], [30], [31] avotos, ir izvēlēti testa paraugu izmēri un formas. Drukājamo objektu mehāniskās izturības pārbaudei ir izveidoti testa 3D *CAD* cilindra modeļi, kas ir 100 mm gari ar 32 mm sākotnējo diametru un 1,5 mm biezumā. Pēc iestatītajiem parametriem ārējais diametrs šādiem paraugiem veidos 35 mm. Modeļus druka notika, izvietojot modeļus trīs dažādas pozīcijas. Pirmais variants ir izvietot tā, lai slāņi drukātos vienā ass virzienā Z, otrais variants ir drukāt modeļus, izvietojot tos XY virzienā, tādā veidā teorētiski pēc testa rādījumiem modeļi neatšķiries, jo tiks pārbaudīta materiāla mehāniska izturība.

Trešais variants cilindriskam prototipam izdrukāt modeli XY virzienā, mainot aizpildīšanas leņķi (5.18. att.). Tādā veidā pie 0° tiek pārbaudīta materiāla adhēzija, pie 90° – materiāla spēka parametri, pie 45° – cilindriskās drukas paraugs, ko var salīdzināt ar abiem iepriekšējiem variantiem. Ir iestatīts 45° leņķis, kas teorētiski atbilst lielākai izturībai. Lai pārlicinātos, ka rezultāti attiecas uz slāņu adhēziju, nevis materiāla īpašībām, ir izdrukāti testa modeļi ar dažādu slāņa biezumu (0,1 mm, 0,2 mm, 0,3 mm) un temperatūru (220 °C, 230 °C un 240 °C). Temperatūras palielināšanas laikā materiāls ilgāku laiku paliek šķidrā stāvoklī, attiecīgi slāņi savstarpēji saķeras labāk, tomēr, palielinot temperatūru, materiāls ātrāk degradējas, tāpēc cilindriskā druka teorētiski var palielināt drukājamo objektu mehānisko izturību, nesamazinot materiāla īpašības. Testēšanas paraugu drukai izmantoti *Fiberlogy PLA*, *PET-G*, *Rosa3D PLA* un *PET-G* baltas krāsas 1,75 mm kvēldiegi. Modeļu sagatavošana ir veikta *PrusaSlicer 2.7.1* un *Ultimaker Cura 5.2.0* programmās. Salīdzināšanai pievienoti arī UV sveķu paraugi, drukāti uz *Anycubic Mono SLA* 3D printera, izmantojot *Anycubic UV 405 nm* sveķus. Ņemot vērā to, ka sveķiem drukas temperatūra ir ap 25°C un tiem nav nepieciešama uzkarsēšana pie istabas temperatūras, slāņu parametru testos izmantots tikai viens paraugs.

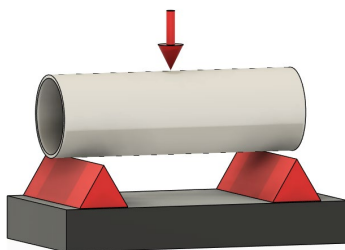


5.18. att. Testa 3D *CAD* modeļa izvietoējums drukai plakanā (A) un cilindriskā (B) printērī.



## Lieces stipruma testēšana

Izdrukāto testa paraugu lieces stiprības testēšanai izmantots trīs punktu testēšanas stends, kurā divi punkti ir balsta materiāls, savukārt trešais – vieta, kur tiek piemērota slodze (5.19. att.). Šo testu izmanto, lai noteiktu materiāla elastības moduli, lieces izturību un citas mehāniskās īpašības. Materiālu paraugi jāizgatavo saskaņā ar attiecīgajiem standartiem vai prasībām, parasti tiem ir taisnstūra forma un noteikti izmēri. Parasti paraugu izmēri ir 50–200 mm garumā, 10–50 mm platumā un 2–10 mm biezumā, taču promocijas darba pētījumā drukāto paraugu izmēri ir: garums – 100 mm, platums – 35 mm, biezums – 1,5 mm. Lieces stipruma testēšanai tiek izmantots *Instron 5965* testēšanas stends [29], [30], [31].



5.19. att. Lieces stiprības testēšanas stenda shēma.

## Izod triecienizturības testēšana

Otrajā testā tiek pārbaudīta drukāto paraugu triecienizturība pēc Izod metodes. Testēšanai nepieciešams, lai katra parauga vidū būtu izveidots noteikta izmēra lūzuma punkts, respektīvi, tiek drukāti paraugi ar lūzuma punktu. Testēšana notiek, ievietojot paraugu skrūvspilēs un sitot to ar stendam pievienotu āmuru, kura masa ir 0,67 kg, 1,5–2 m/s lielā ātrumā, tādā veidā nosakot, cik daudz enerģijas ir absorbējis testa paraugs. Izod metodes triecienizturības testos tiek izmantots *CEAST Resil impactor* stends [32].

## Strāvas un sprieguma fiksēšana un elektroenerģijas patēriņa noteikšana

Enerģijas patēriņa testa galvenais mērķis ir salīdzināt divu dažādu vadības sistēmu konfigurāciju efektivitāti cilindriskā prototipa 3D printerim – standarta *Arduino Mega* kombināciju ar *A4988* draiveriem un modernāko *BigTreeTech Manta M8P* sistēmu ar *TMC2209* draiveriem. Pārbaudes mērķis ir noskaidrot, vai vadības plates un draiveru nomainīšana samazina enerģijas patēriņu, vienlaikus saglabājot to pašu savienoto elementu komplektu, tostarp uzskarsējamo galdu, kas var liecināt par atjauninātās sistēmas energoefektivitātes uzlabošanu. Divām sistēmām ir pieslēgts vienāds elementu skaits, nodrošinot vienādu slodzi. Tomēr atsevišķiem soļu draiveru veidiem ir dažādas darba strāvas un, lai nodrošinātu sistēmu enerģijas pārvaldes efektivitātes salīdzinājumu, nepieciešams nodrošināt vienādus sākotnējos iestatījumus. Vispirms nepieciešams noteikt maksimālo soļu dzinēju strāvu uz spolēm, kas abiem izvēlētiem soļu dzinējiem veido 1 A. Pieņemtais drošības koeficients ir 0,7. Vidējā kvadrātiskā darba strāva uz spolēm *A4988* un *TMC2209* tiek aprēķināta pēc 4.8. formulas. *A4988* draiveriem darba strāva ir regulējama ar rezistoru uz paša draiveri savukārt *TMC2209*

strāva tiek norādīta vadības plates programnodrošinājumā, regulējot balstspriegumu  $V_{ref}$ , kas tiek aprēķināta pēc 5.13. formulas.

$$I_{rms} = I_{max} \times 0,7, \quad (5.13)$$

kur  $I_{rms}$  – vidējā kvadrātiskā darba strāva uz spolēm, A;

$I_{max}$  – maksimālā soļu dzinēja strāva uz spolēm, A;

$$V_{ref} = I_{rms} \times R_{sens}, \quad (5.14)$$

kur  $V_{ref}$  – draivera balstspriegums, V;

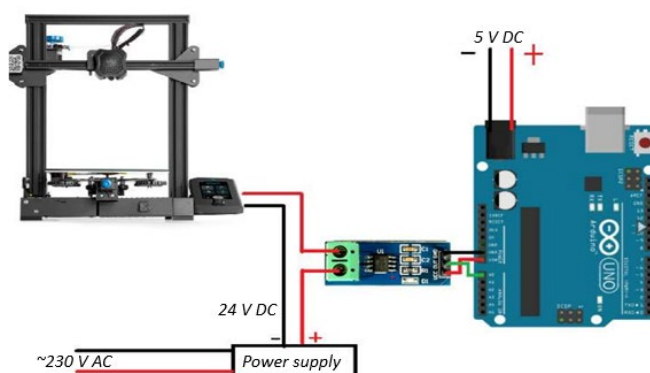
$I_{rms}$  – vidējā kvadrātiskā darba strāva uz spolēm, A;

$R_{sens}$  – draivera rezistora pretestība,  $\Omega$ .

Pēc visiem aprēķiniem *A4988* draiverim ir iestatīti:  $V_{ref} = 0,80 \text{ V}$ ,  $I_{rms} = 0,71 \text{ A}$ ,  
*TMC2209* draiverim:  $V_{ref} = 1,00 \text{ V}$ ,  $I_{rms} = 0,70 \text{ A}$ .

Vienādu soļu dzinēju parametru nodrošināšanai tika noteikti soļu dzinēja temperatūras un darba skaļuma parametri, izmantojot bezkontakta infrasarkanu (*IR*) termometru *Wintact WT700* un skaņas līmeņa mērītāju *Sound Bee TFA*. Par references iestatījumiem tika pieņemti 60,0 dB no 1 metra attāluma un 50,0 °C temperatūrā uz X un Y ass soļu dzinējiem, kas atbilst visvairāk noslogotiem dzinējiem [33].

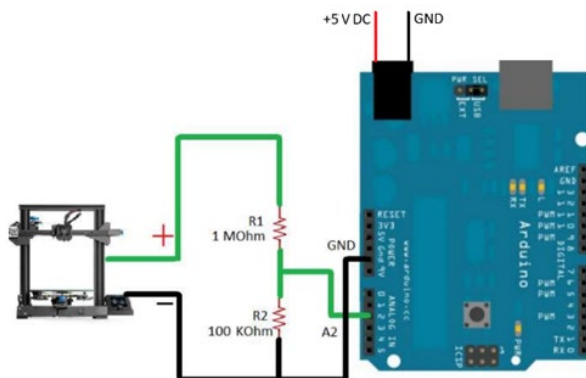
Lai apkopotu informāciju par spriegumu, strāvu un patērēto elektroenerģiju, tika izveidota datu iegūšanas sistēma, kuras pamatā ir *Arduino Uno* izstrādes plate ar *ATmega328* mikrokontroleri. Šī plate ir kompakta, viegli programmējama un nodrošina visas nepieciešamās funkcijas. Strāvas mērījumiem papildus izmantots strāvas devējs *Allegro ACS712* 20 VDC, jo maksimāla printera strāva ir paredzama 14,5 A robežās. Strāvas mērījumu komponentu pieslēguma shēma redzama 5.20. attēlā. Vadības plates barošana ir nodrošināta no 5 V 1 A barošanas bloka [34], [35], [36].



5.20. att. Strāvas mērīšanas sistēmas elementu savienojuma shēma [37].

Sprieguma mērījumiem ir izveidota sprieguma dalītāja shēma, kas arī ir pieslēgta pie tā pašas *Arduino Uno* vadības plates, izmantojot divu rezistoru uz 100 k $\Omega$  un 1 M $\Omega$  slēgumu (5.21. att.). Šāds slēgums sadala ieejas spriegumu attiecībā 1 : 11 un dod iespēju efektīvi mērīt

spriegumu līdz aptuveni 50 V DC, kas arī ir nepieciešams, jo tiek izmantoti 12 V un 24 V barošanas avoti. Sprieguma un strāvas mērījumi ir veikti uz impulsu barošanas bloka DC savienojuma spailēm. ACS712 strāvas devēja precizitāte ir 100 mV uz 1 A, sprieguma dalītāja precizitāte pēc aprēķiniem ir aptuveni 4–5 %. Papildu rezultātu pārbaudei izmantots ciparu multimetrs MASTECH M832 ar precizitāti 2 mA strāvai un 0,1 mV spriegumam [38], [39], [40], [41].

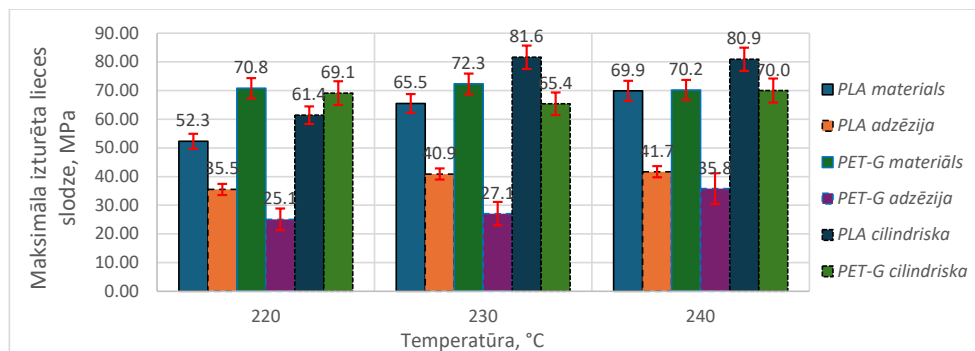


5.21. att. Sprieguma mērīšanas sistēmas elementu savienojuma shēma [37].

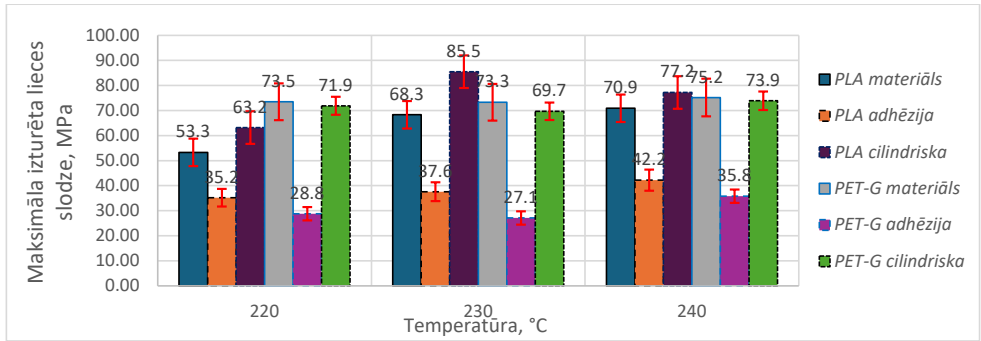
## 5.4. Rezultāti

### Trīs dimensiju cilindriska koordinātu sistēmas printera prototipa testēšana

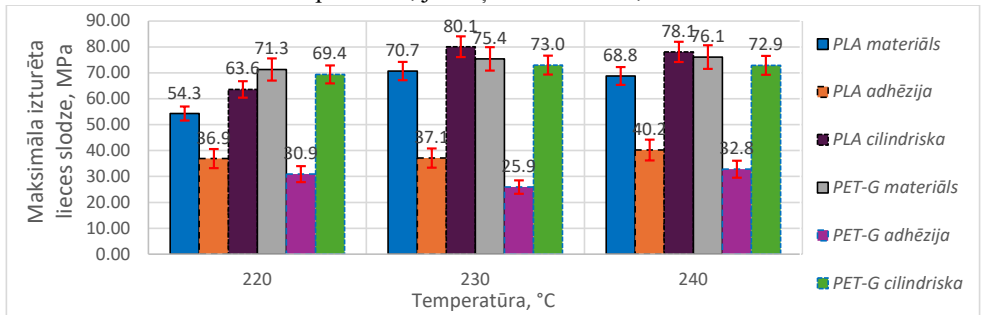
Katrā testā ir izdrukāti trīs testa paraugi katram parametram. Maksimāli izturētas lieces slodzes atkarības no slāņu izkārtojuma un drukas temperatūras testu rezultāti 220 °C, 230 °C un 240 °C temperatūrā, ja slāņa biezums ir 0,1 mm, 0,2 mm un 0,3 mm, apkopoti grafikos 5.22., 5.23. un 5.24. attēlā. Triecienizturības testu rezultāti apkopoti 5.25., 5.26., 5.27. attēlā.



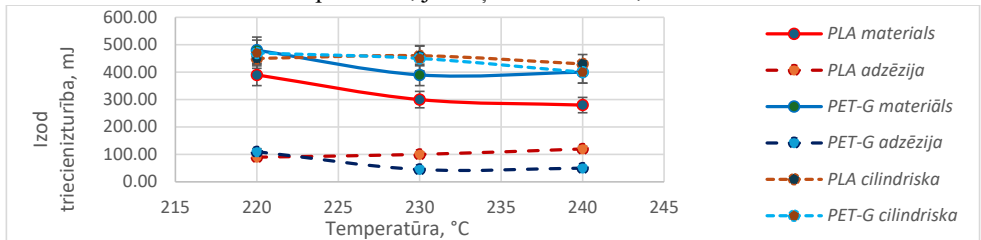
5.22. att. Maksimālā izturēta lieces slodze atkarībā no slāņu izkārtojuma un drukas temperatūras, ja slāņa biezums ir 0,3 mm.



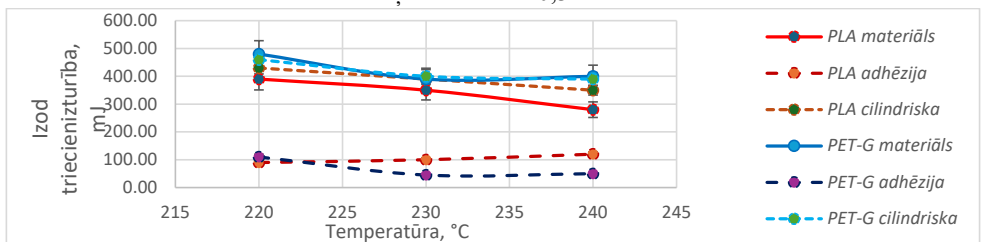
5.23. att. Maksimālā izturētā lieces slodze atkarībā no slāņu izkārtojuma un drukas temperatūras, ja slāņa biezums ir 0,2 mm.



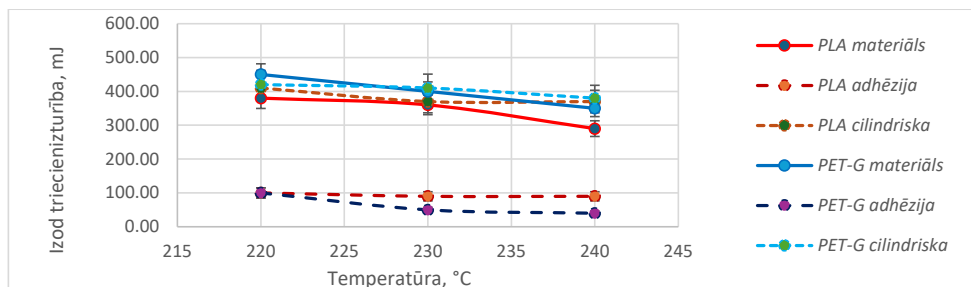
5.24. att. Maksimālā izturētā lieces slodze atkarībā no slāņu izkārtojuma un drukas temperatūras, ja slāņa biezums ir 0,1 mm.



5.25. att. Maksimālā triecienizturība atkarībā no slāņu izkārtojuma un drukas temperatūras, ja slāņa biezums ir 0,3 mm.



5.26. att. Maksimālā triecienizturība atkarībā no slāņu izkārtojuma un drukas temperatūras, ja slāņa biezums ir 0,2 mm.



5.27. att. Maksimālā triecienizturība atkarībā no slāņu izkārtojuma un drukas temperatūras, ja slāņa biezums ir 0,1 mm.

### Drukšanas precizitātes noteikšana

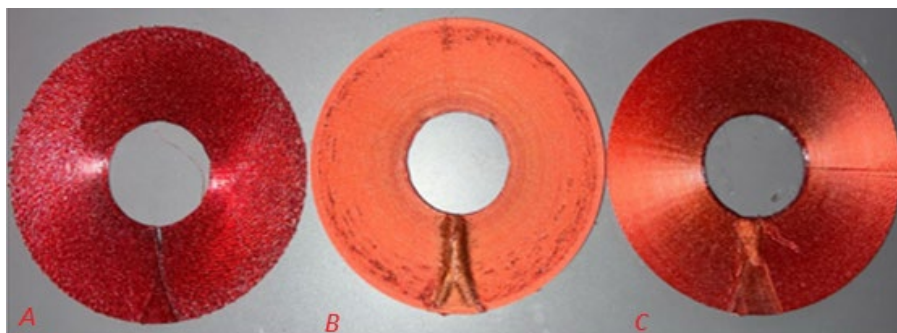
Promocijas darba gaitā salīdzināti plakana (balta) un cilindriska (rubina) *Fiberlogy PLA* un *PET-G* materiāla testa paraugu drukas izmēri, salīdzinot paraugu platumu, garumu un biezumu (5.33. att.). Modeļa izmēri *CAD* programmā ir: garums – 100 mm, diametrs – 35 mm, biezums – 1,5 mm. Balstoties *PLA* materiālu drukas parametros un faktā, ka materiāla sarukums ir 0,2–0,3 %, paredzēts, ka reāli *PLA* drukātie paraugi attiecīgi būs mazāki par aptuveni 0,25 %. *PET-G* materiāla aptuvenais sarukums ir paredzēts 0,5–1,5 % robežās. Mērījumi veikti ar ciparu stieņcirkuli *Parkside HG08763A* ar 0,01 mm precizitāti.



5.33. att. *PLA* materiāla drukāto paraugu izmēru salīdzināšanas rezultāti.

### Materiāla plūsmas regulēšanas tests

Materiālā plūsmas salīdzinājumam izmants *Fiberlogy* PLA rubīna kvēldiegs. Balstoties faktā, ka cilindriskā drukā, palielinoties slāņu augstumam, palielinās arī drukas cilindra loka garums un ir nepieciešams regulēt materiāla plūsmu, izveidots *CAD* modelis ar 32 mm sākotnējo diametru un 30 mm slāņu biezumu, kas rezultātā veidos 92 mm ārējo diametru. Pirmā testa drukā ir veidota bez materiālā plūsmas izmaiņām, otrajā drukā ir manuāli iestatīts plūsmas palielināšanas procents 1 %, un šis procents tiks pieskaitīts katrā nākamajā slānī. Ir veikts arī trešais tests, materiāla plūsmas regulēšanai izmantojot *Python* kodu, balstoties iepriekš veiktajos aprēķinos. Visi trīs paraugi redzami 5.34. attēlā.



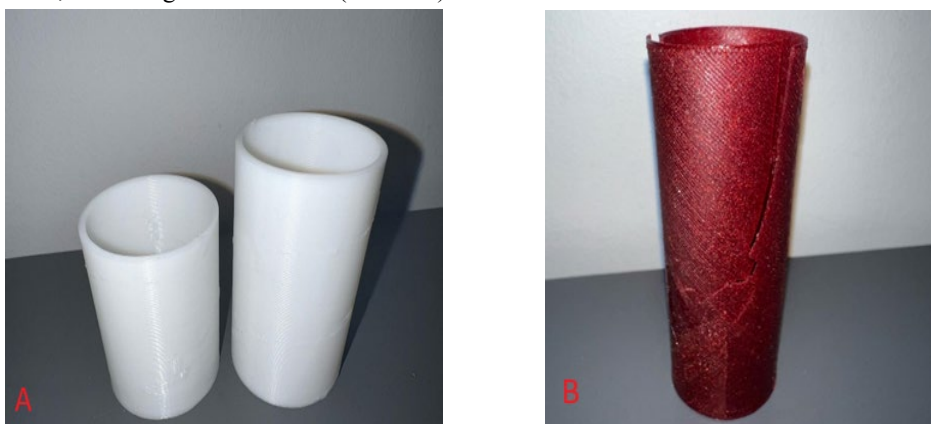
5.34. att. Plūsmas regulēšanas tests: A) paraugs bez regulēšanas; B) manuāli iestatīts procents; C) paraugs ar plūsmas regulēšanu, mainot G koda komandas.

## NEKĀRTAINĀS TRĪSASU 3D DRUKAS METODES REZULTĀTU KOPSAVILKUMS

Pārbaudot lieces paraugus, kuru biezums ir 0,3 mm, tika konstatēts, ka atkarībā no slāņu izvietojuma galaprodukta lieces izturība var atšķirties vidēji par 67–266 %, tātad paraugiem, kuros slāņi atrodas horizontāli attiecībā pret drukas galdu, ir zemāka stiprība nekā paraugiem, kuros slāņi atrodas vertikāli. Tajā pašā laikā paraugiem, kas ražoti cilindriski, *PET-G* materiālam vidēji bija tāds pats vai 10 % sliktāks sniegums nekā vertikālajiem paraugiem un līdz 18 % stiprāks nekā *PLA* materiālam.

Salīdzinot paraugus ar biezumu 0,2 mm, visu paraugu stiprība palika tāda pati vai palielinājās līdz 4,7 %, salīdzinot ar 0,3 mm paraugiem. Cilindrisko paraugu stiprība vidēji mainījās no –4,5 % līdz 6,5 %. Salīdzinot 0,1 mm paraugus ar 0,3 mm paraugiem, stiprība mainījās no –3,4 % līdz 11,6 %. Standarta paraugos, slāņa biezumam samazinoties par 0,2 mm, stiprība mainījās no –2,9 % līdz 3,5% un no –1,5 % līdz 8,4 % 0,1 mm paraugiem. Vidēji promocijas darbā izmantotajam specifiskajam *PLA* materiālam temperatūras paaugstināšanās palielināja slāņu savstarpējo saķeri, savukārt *PET-G* materiālam lieces izturība praktiski nemainījās. Tajā pašā laikā paraugi, kas drukāti, izmantojot cilindrisko metodi, darbojās vienādi vai labāk nekā vertikālie paraugi, iespējams, vienmērīgāka slodzes sadalījuma dēļ, jo slāņi tika aizpildīti 45° leņķī un katrs nākamais tika pagriezts par 180° attiecībā pret iepriekšējo, tādējādi slāņi krustojās un izveidoja spēcīgāku struktūru nekā tikai vertikālie slāņi. Papildus pārbaudīti UV sveķu drukātie paraugi, lai salīdzinātu dažādu tehnoloģiju iespējas un pēc rezultātiem UV sacietējušo sveķu paraugi parādīja par 650 mJ lielāku triecienizturību un 38 MPa lieces izturību, kas vidēji atbilst 35–66 % lielākai triecienizturībai, salīdzinot ar labākajiem *PLA* un *PET-G* paraugiem, taču par 42–44,5 % mazāku lieces izturību.

Salīdzinot, kā paraugi tika bojāti lieces laikā, ir skaidri redzams, ka horizontālie paraugi (A) lūzt tieši gar slāņa drukas līniju, savukārt cilindriski paraugi (B) plīst pa visu parauga virsmu, vienmērīgi sadalot slodzi (5.36. att.).



5.36. att. Lieces testa paraugu sabrukšanas veids. A) Horizontālo slāņu paraugs.  
B) Cilindriskās metodes paraugs.

Slīktākie izrādījās *PTE-G* materiāla horizontāli apdrukātie paraugi ar slāņa biezumu 0,3 mm, drukāti 220 °C temperatūrā, kas ir minimālā drukas temperatūra šim materiālam. Šis paraugs izturēja lieces slodzi 25,1 MPa. Labāko rezultātu uzrādīja cilindrisks *PLA* paraugs, kas drukāts 230 °C temperatūrā, ar slāņa biezumu 0,2 mm, izturot 85,5 MPa slodzi. Šim ražotāja *Fiberlog PLA* materiālam 230 °C temperatūra ir maksimāli pieļaujamā drukāšanai un, kā izrādās, nodrošina vislielāko izturību.

Triecienpārbaudes paraugi izturēja atšķirīgi, un gandrīz visi paraugi, paaugstinoties temperatūrai, kļuva mazāk izturīgi, kas skaidrojams ar to, ka, pieaugot drukas temperatūrai, materiāls kļūst trauslāks un neelastīgāks. Vājākais paraugs izrādījās 0,3 mm biezs paraugs, kas horizontāli drukāts 230 °C temperatūrā, izturot 45 MJ slodzi. Visizturīgākais bija *PET-G* paraugs ar 0,2 mm biezumu, kas vertikāli drukāts 220 °C temperatūrā. Taču cilindriski drukātie *PLA* un *Pet-G* paraugi spēja izturēt attiecīgi 460 MJ un 470 MJ slodzi, kas, ņemot vērā mērījumu precizitāti +/-5 %, ir gandrīz identisks rādītājs un var būt atkarīgs no mērījumu precizitātes. Tādējādi cilindriskā druka ir izdevīgākā iespēja, jo nodrošina vidēji par 6,5–11,6 % lieces izturīgāku izstrādājumu un salīdzināmu triecienizturību, salīdzinot ar vertikālo druku.

Salīdzinot drukas precizitāti, ar parasto metodi drukātie paraugi uzrādīja vidēji par 0,7 % mazākus parametrus nekā *CAD* modelī norādītie, kas skaidrojams ar materiāla sarukumu. Tajā pašā laikā slāņa biezums izrādījās par 3 % lielāks, kas skaidrojams ar drukas līnijas biezuma iestatīšanas precizitāti un paša printera un izmantotās sprauslas precizitāti.

Cilindriskais paraugs visos aspektos izrādījās vidēji par 1 % lielāks, kas skaidrojams ar printera un tā komponentu iestatījumu precizitāti.

Salīdzinot materiāla plūsmas regulēšanas metodes, skaidri redzams, ka, neregulējot plūsmu, jau pēc dažām kārtām paraugā veidojas tukšumi un nepietiekams piegādātā materiāla daudzums. Iegūtais paraugs ir porains un absolūti nestabils jebkura veida slodzei, jo slāņi praktiski nav savstarpēji savienoti. Savienojuma šuve praktiski nav redzama.

Manuāli iestatot pildījuma procentus, drukāšanas sākumā parādās nokarājošs materiāls, uz parauga vidu pildījums normalizējas un, tuvojoties augstākajiem slāņiem, parādās porainība, attiecīgi slāņi sāk vājāk savstarpēji savienoties. Arī šuve, kas savieno slāņus pilnas rotācijas laikā, kļūst skaidri redzama, un parādās materiāla nokarāšanās. Izmantojot kontrolētās padeves metodi, G koda apstrādi un *Python* kodu, pildījums ir izlīdzināts, nav porainības un šuve kļūst gandrīz neredzama.



## 6. PIECASU 3D DRUKAS RISINĀJUMS KOMPLEKSAS FORMAS ORTOŽU DRUKAI

### 6.1. Piecasu cilindriskā neplakana 3D printera metodes izstrāde

Ortoze ir ierīce, kas pielāgota anatomijai un paredzēta noteiktu ekstremitāšu imobilizācijai, balstam vai korekcijai. Ortoze var atšķirties no vienkāršas plāksņu konstrukcijas līdz sarežģītākām konstrukcijām ar savienojumiem un fiksācijas elementiem.

Kvalitātes un parametru salīdzināšanai ir izvēlēts ortozes piemērs – pirksta šina distālās falangas locītavas fiksācijai *ARmedical AR-061* variants (6.1. att.). Ņemot vērā piemēra ortozes formu, pirksta ortozei parasti ir cilindriskā vai puscilindru forma, kas atbilst pirksta kontūram un izmēram. Dizains var būt diezgan vienkāršs, no vienas nekustīgas daļas, vai sarežģītāks ar kustīgām daļām, lai ierobežotu vai atļautu noteiktu kustību apjomu.

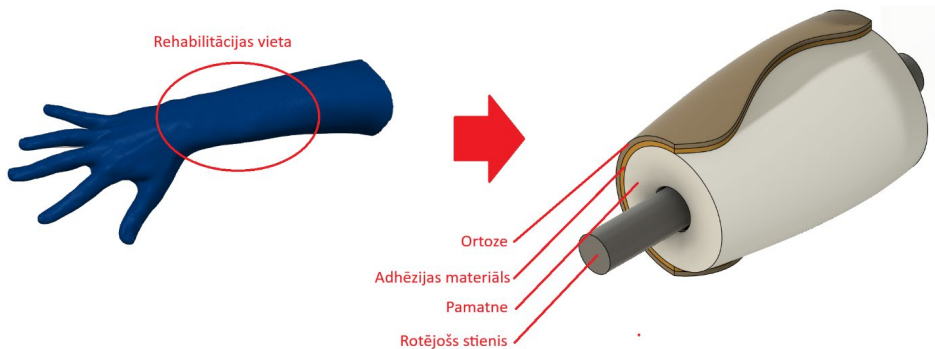
Sarežģītāka ir, piemēram, rokas ortoze, un to druka ir grūtāka, jo tai jāatbalsta ne tikai plaukstas locītava, bet daļēji arī apakšdelms un roka. Tā var būt izliekta šina, ko aptin ap plaukstas locītavu un apakšdelmu, lai nodrošinātu stingrību un atbalstu. Dažkārt tajā ir iekļauti šķēlumi vai regulējamas siksnas labākai piegulēšanai. Plaukstas stiprinājuma drukāšana var radīt zināmas problēmas tā sarežģītākās formas un izmēru dēļ, kas var būt ārpus cilindriskā printera iespējām. Atkarībā no ortozes konstrukcijas var būt nepieciešami drukas balsti, ko var būt grūtāk īstenot.



6.1. att. Ortozes piemērs – rokas pirksta šina distālās falangas locītavas fiksācijai *ARmedical AR-061*.

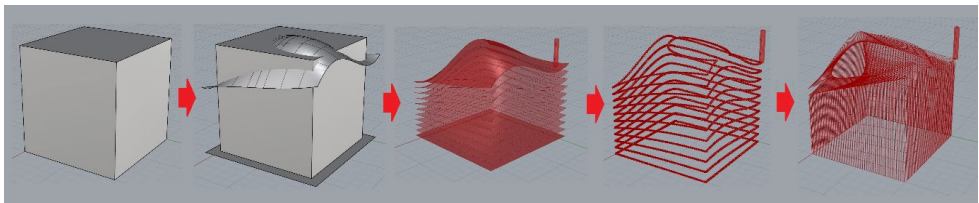
Izstrādājama prototipa galvenā priekšrocība ir ātra drukas režīmu pārslēgšana, kur, pārslēdzot asu vadus, var ātri pārslēgties no tradicionālas drukas režīma uz trīsasus cilindrisko druku un piecasu cilindrisko druku.

Piecasu prototipa ideja balstīta tajā, ka, veidojot cilvēka ekstremitātes *CAD* modeli, nepieciešamā daļa, kurai virsū tiks uzklāta ortoze, tiks drukāta kā pamatne, kas tiks uzstādīta uz rotējošu 8 mm diametra stieni. Rezultātā tiks iegūta rotējošā pamatne, uz kuras savukārt tiks drukāts ortozes modelis. Tādā veidā ir realizēts balsta materiāls, kas tiks pārklāts ar adhēzijas materiālu (papīra maskēšanas lente), ko var viegli atdalīt no ortozes. Piecasu risinājuma shēma redzama 6.2. attēlā.



6.2. att. CAD modeļa rehabilitācijas vietas definēšana un pārveidošana par ortozes izvietošanu uz rotējošas pamatnes.

Piemērs, kādā veidā ir veidots neplakans 3D drukas ceļš ar mainīgu aizpildījuma virziena leņķi, redzams 6.3. attēlā. Tas ir aprakstīts kuba modelis, kur ir attēloti neplakana ceļa ģenerācijas etapi (6.3. att.). Pirmajā posmā ir nepieciešams izmantot kādu telpu, kurā tiks novietots objekts tā tālākai griešanai. Par tādu telpu tiek izmantotas divas vienādas kvadrātveida plaknes, kur viena plakne atrodas tieši virs otras.



6.3. att. *Rhinoceros* 3D programmas *Grasshopper* paplašinājuma modeļa interpolācija un perimetru un aizpildījuma ceļa izveidošana.

Apakšējā plakne attēlo drukas pamatni, uz kuras tiks drukāts objekts, augšējā plakne ir nepieciešama, lai kontrolētu formu, kādā griežamais objekts tiks sagriezts. Augšējās plaknes formu var regulēt un pielāgot savām vajadzībām, šajā piemērā ar to var regulēt ortozes spiediena sadalījumu un veidu, kādā tiks drukāta ortoze.

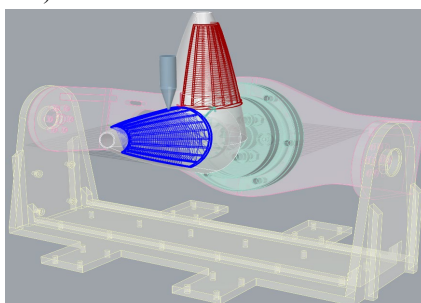
Nākamajā posmā tiek izmantota interpolācija, pavairojot plaknes daudzumu, izmantojot *Tween* funkciju, attālums starp plaknēm un to daudzums nosaka drukas augstumu un, jo vairāk slāņu tiks ģenerēti, jo plānāk objekts tiks sagriezts. Kad interpolētie slāņi tiek novietoti, izmantojot funkciju *Path*, starp slāņiem tiek ģenerēts nepārtraukts spirāles ceļš ar pāreju no apakšējā slāņa uz augšējo. Tomēr tādā veidā ir ģenerēti tikai objekta perimetra neplakana ceļš, un, lai izveidotu aizpildījuma ceļu, tiek izmantotas vēl divas plaknes, kas ir novietotas noteiktā leņķī pret esošo plakņu malām. Leņķis starp horizontālo plakņu malām un vertikālo plakņu malām nosaka aizpildījuma leņķi, un, lai iegūtu pēc iespējas izturīgākas detaļas, horizontālas aizpildījuma plaknes ir novietotas ar 45° leņķī. Veicot iepriekšējos posmus atkārtoti, tiek ģenerēti viens spirālveida ceļš [42], [43].

Rezultātā ir iegūts fails ar punktiem ar koordinātēm, ko var izmantot G koda ģenerācijai. Viss neplakanās metodes operāciju ceļš *Grasshopper* vizuālajā izstrādes vidē redzams 6.4. attēlā.



6.4. att. *Rhinceros* 3D programmas *Grasshopper* paplašinājuma modeļa griešanas un ceļa izveidošanas vadības kods.

Piecasu drukas mehānisms ir ievietots *Grasshopper* vidē, lai precīzi simulētu visu asu kustību. Atsevišķi ielādēti ekstremitātes formā balstītas pamatnes un drukājamās ortozes faili, un tiek simulēta piecasu prototipa kustība (6.5. att.). Kustības tiek pārveidotas G koda komandās, izmantojot *Python* rakstītu vadības kodu, kurā ievadīti visi nepieciešamie parametri (ātrums, paātrinājums, asu koordinātes, nepieciešamais materiāla padošanas apjoms, izvietoējums vadības platē u. c.).

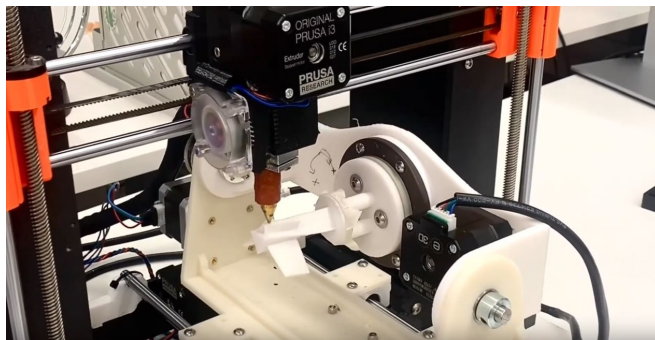


6.5. att. Piecasu 3D printera prototipa kustību simulācija *Rhinceros* 3D programmā.

## 6.2. Piecasu cilindriska neplakana 3D printera izstrāde

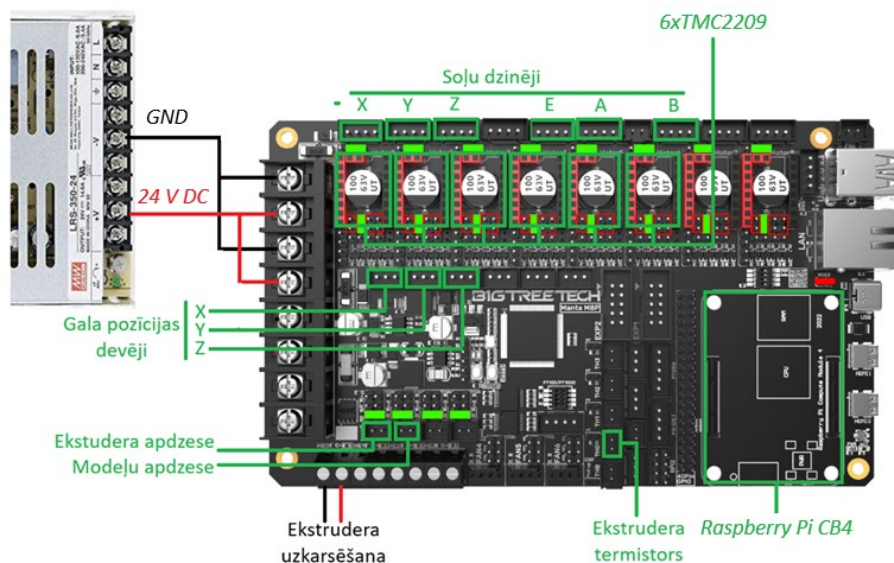
Sarežģītākas konstrukcijas drukai, vienlaikus saglabājot cilindriskas drukāšanas iespēju, mainot aizpildījuma leņķi jebkurā apdrukājamā izstrādājuma leņķī, bija nepieciešams atvērtā koda risinājums daudzasu risinājuma izstrādei. Par daudzasu prototipa pamatu ir ņemts 2022. gadā sāktais *Open5X* projekts, ko iepriekš minējis *F. Hong* [43]. Šis piecasu risinājums piedāvā printerim pievienot vēl divas asis, lai iegūtu papildu brīvības pakāpes, kas savukārt ļauj drukāt sarežģītākas formas. Par projekta pamatu ir ņemts *Prusa i3* Dekarta *CoreXZ* kinemātikas 3D printeris, kam papildus pievienotas asis kontrolējamas ar papildu soļu dzinējiem, rezultātā ir nepieciešams vienlaikus kontrolēt piecas atsevišķas asis. Papildu asis ir realizētas kā rotējošais galds, kas tiek uzstādīts uz vēl vienas rotējošas ass, kas savukārt tiek stiprināta pie printera Y asij. Projekta pamatā ir vizuāla koda izstrādes vide *Rhinceros* 3D programmā, kas vienlaikus izmanto *Grasshopper* un *Puffer Fish* paplašinājumus. Vizuālā vidē ir izstrādāts un simulēts kods, kas aizvieto neplakanas metodes griešanas programmu un simulē printera elementu vadību programmu. Tomēr šim risinājumam ir ierobežojumi, kas saistīti ar

neplakana koda ģenerēšanas grūtībām, tajā skaitā tikai modeļa perimetru druku, neiekļaujot modeļa aizpildījumu, un vairāku nepieciešamu funkciju neesamību, piemēram, perimetra un aizpildījuma leņķa regulēšana un līniju biezuma regulēšana. Tajā nav iespējams izmantot slāņu pārklāšanu un mainīgu aizpildījuma leņķi, taču tajā tiek izmantots neplakana griezšanas risinājums, kas dod iespēju drukāt modeļa elementus, pagriežot modeli nepieciešamajā pozīcijā (6.6. att.) [44].



6.6. att. *Open5X* daudzasu 3D printera projekts [43].

Lai pielāgotu cilindrisko druku piecasu risinājumam, ir veikti papildu uzlabojumi esošā prototipa konfigurācijā. Pirmkārt, lai palielinātu asu skaitu, nepieciešams izmantot vairāksu dzinēju skaitu, katrai asij ir atsevišķs soļu dzinējs un kopā ar drukas galvas materiāla padeves dzinēju nepieciešams pieslēgt sešus atsevišķi kontrolējamus soļu dzinējus. Šim nolūkam ir izmantota iepriekš izvēlētā *Bigtreetech Manta M8P 2.0* vadības plate, balstīta *STM32H723ZET6* mikrokontrolerī ar 550 Mhz ātrdarbību un iespēju pieslēgt līdz astoņiem atsevišķiem kontrolējamiem soļu dzinējiem. Lai dotu iespēju kontrolēt prototipu bez displeja izmantošanas un vadīt, izmantojot *WiFi* protokolu, tiek izmantota papildu paplašinājuma plate *Raspberry Pi CB4*, izmantojot *Klipper* vadības programmu. Papildu asīm tiek izmantoti *NEMA 17 42–34* soļu dzinēji, kas ir vieglāki par *NEMA 17 42–40* soļu dzinējiem un nodrošina nepieciešamo griezes momentu.  $6 \times$  *TMC2209* soļu dzinēji pieslēgti, izmantojot *UART* protokolu, jo to izmantošana dod asu pozīcijas noteikšanas iespēju bez gala pozīcijas devēju izmantošanas. Balstoties faktā, ka ir pievienoti papildu soļu dzinēji ar draiveriem un *Manta M8P* platei ir iespēja pieslēgt gan 12 V, gan 24 V barošanu, ir izvēlēts jauns barošanas bloks 24 V *Mean Well LRS-350-24* ar maksimālo jaudu 350 W 14,6 A. *Klipper* programmnodrošinājums ir ielādēts *MicroSD* atmiņas kartē ievietotajā *Manta M8P* vadības platē. Visu elementu slēgums redzams 6.7. attēlā.



6.7. att. Piecas 3D printera prototipa elementu slēguma shēma.

Izmantoto komponentu saraksts piecas cilindriskam *FDM* 3D printerim apkopots 6.1. tabulā.

6.1. tabula

Piecas cilindriskam *FDM* 3D printera prototipa izmantoto komponentu saraksts

Nosaukums	Modelis	Parametri
3D printeris	<i>Creativity Ender-3 V2</i>	<i>CoreXZ</i> Dekarta sistēmas <i>FDM</i> 3D printeris
Soļu dzinējs	4 × <i>NEMA 17 42–34 BJ42D15-26V12</i> 2 × <i>NEMA 17 42–40 42HS040DF260A</i>	Soļa leņķis – 1,8°, nominālā strāva – 0,8 A, 1,0 A, fāžu skaits – 2, griezies moments – 0,8 Nm
Soļu dzinēja draiveris	6 × <i>TMC2209</i>	Darba spriegums – 8–35 V <i>DC</i> , loģikas spriegums – 3–5,5 V <i>DC</i> , <i>I<sub>max</sub></i> – 2 A
Barošanas avots	<i>Meanwell LRS-350-24</i>	24 V <i>DC</i> , 350 W, 14,6 A, 48–63 Hz
Vadības elementi	<i>Bigtreetech Manta M8P 2.0</i> <i>Raspberry Pi CB4</i> 1 GB	<i>STM32H723</i> 550 Mhz vadības plate, divas 4 GB <i>SD FLASH</i> atmiņas kartes
Pārvades mehānisms	2 × <i>2GT 20</i> zobu zobrats, 2 × <i>2GT 60</i> zobu zobrats 2 × <i>2GT-6 218 mm</i> zobsiksna, 4 × <i>688ZZ</i> gultņi, 150 mm × 8 mm stienis	Pārvades attiecība 3 : 1
Programmnodrošinājums	Klipper	Prototipa vadība realizējama, izmantojot <i>Web</i> saskarni ar <i>Wi-Fi</i> protokolu
3D drukas materiāli	<i>Creativity PA12 white</i> 1.75mm	Tiek drukāti drukas galvas elementi, A un B ass korpusi.

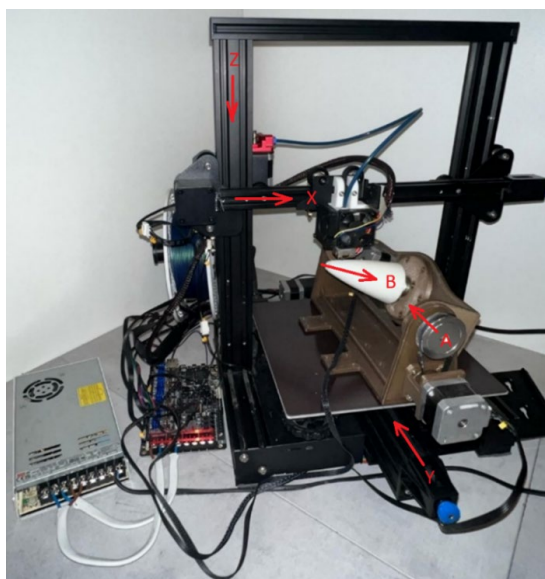
Papildu asu realizācijai tiek drukāts *PA12* neilona korpusi (5.4. att.), kas tika modificēts izmantošanai cilindriskai drukai. A un B asu realizācijai, tāpat kā trīsasu prototipā, ir izmantots redukcijas mehānisms, realizējams ar *2GT 60* zobu un *20* zobu zobratiem. Kā drukas galds ir

izmantots 8 mm diametrā 150 mm garš tērauda stienis, stiprināms pie 2GT 60 zobu zobrata un 668zz gultņa. Zobrati ir savienoti, izmantojot 218 mm 2GT zobsiksnu. Papildu asu mehānisms ir uzstādīts uz Y ass drukas galda, pieskrūvējams ar M3 x 20 skrūvēm. Saliktais mehānisms redzams 6.8. attēlā.



6.8. att. Papildu A un B asu drukas galda mehānisms no PA12 neilona materiāla.

Pēc piecasu prototipa vadības koda izveidošanas un prototipa salikšanas ir nepieciešams nokalibrēt gala pozīcijas devēju izvietošanu, novietojot A ass horizontālā stāvoklī tā, lai B ass būtu novietota horizontāli drukas galdam uz Y ass. Tālāk tiek izvietots drukas galvas augstums un novietots Z ass gala pozīcijas devējs. Visu asu izvietošanu un prototipa darbību redzama 6.9. attēlā.



6.9. att. Piecasu 3D printera prototips neplakanas cilindriskas drukas realizācijai.

### 6.3. Eksperimentu veikšana un rezultātu apkopojums

Rezultātā ir izveidots piecasu prototips ortožu drukai, kas izmanto neplakano cilindrisko drukas metodi ar mainīgo slāņa aizpildījuma leņķi. Piemērs ir izdrukāta pirksta ortoze, izmantojot *Creativity PLA* sarkanas krāsas materiālu. Izgatavotā ortoze ir salīdzināta ar tāda paša



materiāla tradicionālo plakano drukas ortozi, kas izdrukāta, izmantojot horizontālo un vertikālo izvietojumu. Iegūtā parauga parametri atbilst cilindriskas drukas parametriem, un var secināt, ka lieces testā, salīdzinot ar horizontālo paraugu, kur slāņi turas vairāk adhēzijas dēļ, neplakanais paraugs ir līdz 266 % stiprāks un ekvivalents vai līdz pat 18 % stiprāks, salīdzinot ar vertikālajiem paraugiem. Savukārt drukas kvalitāte ir salīdzināmi labāka, jo nav nepieciešama papildu balsta materiāla izmantošana un ortozi var viegli atdalīt no drukas pamatnes, jo tiek izmantots adhēzijas materiāla starpslānis. Nav nepieciešama arī izgatavotās ortozes papildu apstrāde, un virsmas kvalitāte ir gluda un vienmērīga (6.10. att.).



6.10. att. Piecasu drukāts pirksta ortozes piemērs ar 45° slāņa aizpildījumu.

## SECINĀJUMI

1. Promocijas darbā izstrādāta nekārtaina 3D drukas metode, kas, izmantojot manipulācijas 3D modeļu un griešanas programmas ģenerēto G koda rediģēšanai, ļauj izmantot atvērtās un bezmaksas tradicionālās *CAD* modeļu sagatavošanas metodes, kas jau ir pieejamas lietošanai, tādējādi ir iespējams iegūt 3D drukātus objektus ar labākiem parametriem, salīdzinot ar tradicionālajām drukas metodēm, drukāt bez balsta materiāla izmantošanas, tādējādi samazinot drukas laiku.
2. Liela nozīme ir *FDM* 3D printeru sastāvdaļu un komponentu izvēlei un savstarpējai pielāgošanai, jo tas tieši ietekmē drukas kvalitāti un precizitāti, kā arī var dod iespēju efektīvi izmantot komponentu potenciālu, kas rada drukas ātruma palielināšanos un elektroenerģijas efektīvu izmantošanu, samazinot elektroenerģijas patēriņu.
3. Tradicionālās *FDM* 3D drukas metodes izmantošana individuālo ortopēdisko rehabilitācijas līdzekļu ražošanai ir ierobežota ar tradicionālas metodes trūkumiem. Cilindriska trīsasu *FDM* 3D druka dod iespēju izgatavot individuāli pielāgotas ortopēdiskas rehabilitācijas līdzekļus bez balsta materiāla izmantošanas, kas nodrošina labāku izgatavojamā izstrādājuma virsmas kvalitāti un labākas mehāniskās īpašības, tomēr, izmantojot trīsasu risinājumu, nevar efektīvi drukāt sarežģītas formas bez balsta materiāla, un šāds risinājums nodrošina tikai vienkāršu ortožu formu druku.
4. Piecasu *FDM* 3D cilindriskā metode var novērst trīsasu metodes trūkumus un ir pilnīgi pielāgota individuāli pielāgots ortopēdisko rehabilitācijas līdzekļu ražošanai. Izstrādātā metode dod iespēju sagatavot *CAD* modeli un izveidot 3D printera vadības G kodu pieejamā veidā.
5. Izstrādātais *FDM* 3D printera prototips dod iespēju ātri pārslēgties starp tradicionālo, trīsasu cilindrisko un piecasu cilindrisko drukas metodi, mainot printera sastāvdaļas, kas dod iespēju izmantot vienu iekārtu vairākiem uzdevumiem, efektīvi izmantojot personāla laiku un nepieciešamo printera uzstādīšanas vietu.
6. Pamatojoties uz lieces un triecienizturības testu rezultātiem, tika konstatēts, ka paraugi, kas drukāti, izmantojot nekārtaino tehnoloģiju, rāda līdz pat 18 % lielāku izturību, salīdzinot ar vertikāliem paraugiem, kas izveidoti ar tradicionālo metodi, un līdz 266 %, salīdzinot ar paraugiem kur slāņi ir izvietoti horizontāli. Tas apstiprina hipotēzi, ka nekārtaina druka uzlabo izstrādājumu mehāniskās īpašības, pateicoties blīvākai slāņu saķerei.
7. Mūsdienīgu programmatūras risinājumu ieviešana un griešanas algoritmu optimizācija var būtiski samazināt drukāšanas. Ātrāku vadības paneļu izmantošana kombinācijā ar efektīvākiem pakāpju motora draiveriem var palielināt drukāšanas ātrumu, samazinot kopējo drukas laiku līdz pat 50 % ja salīdzinot ar paraugiem, kas tiek drukāti, izmantojot balsta materiālu. Izmantojot jaunāku mikrokontroleru enerģijas patēriņš vidēji samazinājās par 2–3 % bet ātrdarbība palielinājās, palielinot 3D drukāšanas procesa efektivitāti.
8. Ir nepieciešami turpmākie pētījumi, tostarp salīdzinošā analīze ar tradicionālajām 3D drukāšanas metodēm, lai precīzi izprastu enerģijas ieguvumus, izmantojot cilindrisko druku un neplakanāo sagriešanu. Tas palīdzēs izstrādāt vadlīnijas enerģijas patēriņa samazināšanai rūpniecībā.



# LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] M. Vorobyov and I. Galkin, "Development and optimization of adjustable vibration source for investigation of prosthesis-to-human feedback of intellectual artificial limb: Simulation study," in *2014 IEEE 2nd Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering, AIEEE 2014 – Proceedings*, 2015. doi: 10.1109/AIEEE.2014.7020314.
- [2] V. Vladinovskis, "Review of 3D Printing Technologies and Considerations on Their Use in Orthopedy," in *2020 IEEE 61th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/RTUCON51174.2020.9316483.
- [3] S. A. Ashter, *Applications of Polymers and Plastics in Medical Devices: Design, Manufacture, and Performance*. in Plastics Design Library. Elsevier Science, 2022.
- [4] P. Venezia, V. Ronsivalle, L. Rustico, E. Barbato, R. Leonardi, and A. Lo Giudice, "Accuracy of orthodontic models prototyped for clear aligners therapy: A 3D imaging analysis comparing different market segments 3D printing protocols," *J Dent*, vol. 124, 2022, doi: 10.1016/j.jdent.2022.104212.
- [5] W. Leal Filho, A. M. Azul, L. Brandli, P. G. özuyar, and T. Wall, Eds., "Additive Manufacturing," in *Responsible Consumption and Production*, Cham: Springer International Publishing, 2020, p. 1. doi: 10.1007/978-3-319-95726-5\_300002.
- [6] A. Al Rashid, S. A. Khan, S. G. Al-Ghamdi, and M. Koç, "Additive manufacturing: Technology, applications, markets, and opportunities for the built environment," *Autom Constr*, vol. 118, p. 103268, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103268>.
- [7] N. Shahrubudin, T. C. Lee, and R. Ramlan, "An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications," *Procedia Manuf*, vol. 35, pp. 1286–1296, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>.
- [8] Y. Kewuyemi, H. Kesa, and O. Adebó, "Trends in functional food development with three-dimensional (3D) food printing technology: prospects for value-added traditionally processed food products," *Crit Rev Food Sci Nutr*, vol. 62, pp. 1–38, May 2021, doi: 10.1080/10408398.2021.1920569.
- [9] S. Bukhari, T. Tanveer, A. Abid, and S. Anwar, *Design and Fabrication of Inexpensive Portable Polar 3D Printer*. 2023. doi: 10.1109/ICRAI57502.2023.10089592.
- [10] S. Singamneni, A. Roychoudhury, O. Diegel, and B. Huang, "Modeling and evaluation of curved layer fused deposition," *J Mater Process Technol*, vol. 212, no. 1, pp. 27–35, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.08.001>.
- [11] J. Xu, X. Gu, D. Ding, Z. Pan, and K. Chen, "A review of slicing methods for directed energy deposition based additive manufacturing," *Rapid Prototyp J*, vol. 24, Oct. 2018, doi: 10.1108/RPJ-10-2017-0196.
- [12] J. Jiang, X. Xu, and J. Stringer, "Support structures for additive manufacturing: A review," *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 2, no. 4. MDPI, Dec. 01, 2018. doi: 10.3390/jmmp2040064.
- [13] Y. Yang, J. Y. H. Fuh, H. T. Loh, and Y. S. Wong, "Multi-orientational deposition to minimize support in the layered manufacturing process," *J Manuf Syst*, vol. 22, no. 2, pp. 116–129, 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/S0278-6125\(03\)90009-4](https://doi.org/10.1016/S0278-6125(03)90009-4).
- [14] J. Xu, X. Gu, D. Ding, Z. Pan, and K. Chen, "A review of slicing methods for directed energy deposition based additive manufacturing," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 24, no. 6. Emerald Group Holdings Ltd., pp. 1012–1025, Oct. 15, 2018. doi: 10.1108/RPJ-10-2017-0196.
- [15] L. Meng *et al.*, "From topology optimization design to additive manufacturing: Today's success and Tomorrow's roadmap."
- [16] W. Xiangping, Z. Haiou, W. Guilan, and W. Lingpeng, "Adaptive Slicing for Multi-axis Hybrid Plasma Deposition and Milling."
- [17] M. Wüthrich, M. Gubser, W. J. Elspass, and C. Jaeger, "A novel slicing strategy to print overhangs without support material," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 18, Sep. 2021. doi: 10.3390/app11188760.
- [18] B. Kumar Mawandiya, K. Pancholi, D. B. Shah, and S. J. Joshi, "Parametric study on process parameters of FDM 3D printer for thermoplastic materials," *Mater Today Proc*, vol. 59, pp. 373–378, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.504>.
- [19] "Motion Control, Solved. MOTOR ENGINEERING & MANUFACTURING." [Online]. Available: [www.linengineering.com](http://www.linengineering.com).
- [20] S. Baas and V. Saggiomo, "Ender3 3D printer kit transformed into open, programmable syringe pump set," *HardwareX*, vol. 10, 2021, doi: 10.1016/j.ohx.2021.e00219.
- [21] K. F. Eichholz, I. Gonçalves, X. Barceló, A. S. Federici, D. A. Hoey, and D. J. Kelly, "How to design, develop and build a fully-integrated melt electrowriting 3D printer," *Addit Manuf*, vol. 58, p. 102998, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102998>.

- [22] P. Venezia, V. Ronsivalle, L. Rustico, E. Barbato, R. Leonardi, and A. Lo Giudice, "Accuracy of orthodontic models prototyped for clear aligners therapy: A 3D imaging analysis comparing different market segments 3D printing protocols," *J Dent*, vol. 124, 2022, doi: 10.1016/j.jdent.2022.104212.
- [23] H. Ramaraju *et al.*, "Clinical grade manufacture of 3D printed patient specific biodegradable devices for pediatric airway support," *Biomaterials*, vol. 289, 2022, doi: 10.1016/j.biomaterials.2022.121702.
- [24] R. Rogosic *et al.*, "Cost-effective, scalable and smartphone-controlled 3D-Printed syringe pump - From lab bench to point of care biosensing applications," *Physics in Medicine*, vol. 14, 2022, doi: 10.1016/j.phmed.2022.100051.
- [25] K. Reeser and A. L. Doiron, "Three-Dimensional Printing on a Rotating Cylindrical Mandrel: A Review of Additive-Lathe 3D Printing Technology," *3D Printing and Additive Manufacturing*, vol. 6, no. 6. Mary Ann Liebert Inc., pp. 293–307, Dec. 01, 2019. doi: 10.1089/3dp.2019.0058.
- [26] A. T. de Almeida, F. J. T. E. T. E. Ferreira, and J. A. C. Fong, "Standards for Efficiency of Electric Motors," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 17, no. 1, pp. 12–19, 2011, doi: 10.1109/MIAS.2010.939427.
- [27] M. M. Hoque, M. M. H. Jony, M. M. Hasan, and M. H. Kabir, "Design and Implementation of an FDM Based 3D Printer," in *2019 International Conference on Computer, Communication, Chemical, Materials and Electronic Engineering (IC4ME2)*, 2019, pp. 1–5. doi: 10.1109/IC4ME247184.2019.9036538.
- [28] V. Vladinovskis, "Review of Lathe Type 3D Printers and Their Possible Improvements," in *2021 IEEE 9th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE)*, 2021, pp. 1–5. doi: 10.1109/AIEEE54188.2021.9670257.
- [29] Y. Khan, "Characterizing the properties of tissue constructs for regenerative engineering," in *Encyclopedia of Biomedical Engineering*, vol. 1–3, Elsevier, 2019, pp. 537–545. doi: 10.1016/B978-0-12-801238-3.99897-0.
- [30] H. Farhat, "Chapter 3 – Materials and coating technologies," in *Operation, Maintenance, and Repair of Land-Based Gas Turbines*, H. Farhat, Ed., Elsevier, 2021, pp. 63–87. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821834-1.00007-1>.
- [31] British Standards Institution, *Plastics-Determination of flexural properties*. 2019.
- [32] H. Ullah and V. V. Silberschmidt, "19 – Dynamic large-deflection bending of laminates," 2016, doi: 10.1016/B978-0-08-100870-6.00019-5.
- [33] V. Vladinovskis, "Selection of microcontroller board and stepper motor driver for FDM 3D printing to reduce power consumption."
- [34] C. G. Jones and C. Chen, "An arduino-based sensor to measure transendothelial electrical resistance," *Sens Actuators A Phys*, vol. 314, p. 112216, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112216>.
- [35] G. Prachchhak, C. Bhatt, and J. Thik, "Data Logging and Visualization Using Bolt IoT," in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2019, pp. 155–164. doi: 10.1007/978-981-13-2673-8\_18.
- [36] "Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor with 2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor ACS712." [Online]. Available: [www.allegromicro.com](http://www.allegromicro.com)
- [37] V. Vladinovskis, "Potential Power Management Efficiency Improvements in Desktop 3D Printers," in *2022 IEEE 63th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/RTUCON56726.2022.9978882.
- [38] M. S. Khan, "Effective and Precise Energy Meter," in *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2022, pp. 795–802. doi: 10.1007/978-981-16-6407-6\_68.
- [39] O. V. Gnana Swathika, G. Kanimozhi, E. Umamaheswari, S. Rujay, and S. Saha, "IoT-Based Energy Management System with Data Logging Capability," in *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2021, pp. 547–555. doi: 10.1007/978-981-15-7241-8\_41.
- [40] A. Sharma, S. Pal, P. Mahalle, B. A. Botre, and S. A. Akbar, "The development of current, speed and torque measurement system for low power electric vehicle motion control applications," in *AIP Conference Proceedings*, 2021. doi: 10.1063/5.0043937.
- [41] F. Galliana, R. Cerri, and D. Corona, "Automatic DC voltage precision resistive divider with ratios between 10:1 and 107:1," *Measurement*, vol. 183, p. 109865, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109865>.
- [42] Sean Aranda, *3D Printing Failures: 2022 Edition: How to Diagnose and Repair ALL Desktop 3D Printing Issues*, 2022 Edition. Independently published, 2021.
- [43] F. Hong, S. Hodges, C. Myant, and D. E. Boyle, "Open5x: Accessible 5-axis 3D printing and conformal slicing," in *Extended Abstracts of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, in CHI EA '22. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2022. doi: 10.1145/3491101.3519782.
- [44] A. Dine and G.-C. Vosniakos, "On the development of a robot-operated 3D-printer," *Procedia Manuf*, vol. 17, pp. 6–13, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.004>.



**Vlads Vladinovskis** dzimis 1995. gadā Daugavpilī. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvis inženierzinātņu bakalaura grādu elektrozinātnē (2018) un profesionālā maģistra grādu un elektroinženiera kvalifikāciju (2020). Kopš 2021. gada strādā RTU, ieņemot zinātniskā asistenta amatu. Zinātniskās intereses saistītas ar 3D drukas tehnoloģijām, datorzinātnēm un kontrolleru, mikrokontrolleru un mikroprocesoru vadības sistēmām.