

Vlads Vladinovskis

3D DRUKAS IEKĀRTU IZSTRĀDE UN IZPĒTE ORTOPĒDISKO REHABILITĀCIJAS LĪDZEKĻU RAŽOŠANAI

Promocijas darbs



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 darbs

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. 111 lpp.

Iespiests 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).

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 grāda (*Ph. D.*) iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Vlads Vladinovskis (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, 6 nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 88 attēli, 13 tabulas, 3 pielikumi, kopā 111 lappuses, ieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 84 nosaukumi.

ANOTĀCIJA

Promocijas darba nosaukums ir "3D drukas iekārtas izstrāde un izpēte ortopēdisko rehabilitācijas līdzekļu ražošanai". Promocijas darba galvenie izpētes objekti ir 3D drukas printeru programnodrošinājums un aplikācijas, CAD modeļu sagatavošanas un griešanas programmas un 3D printeru vadības plates.

Galvenās pētniecības metodes ietver aktuālas literatūras analīzi un apkopošanu, CAD modeļu griešanas programmu parametru pielāgošanu, CAD modeļu ģeometrijas pārveidošanu, 3D printera materiāla plūsmas regulēšanu, 3D printera darbības simulācijas izveidošanu, 3-asu un 5-asu 3D printera prototipu izgatavošanu, eksperimentālas verifikācijas veikšanu laboratorijās, testa paraugu izgatavošanu un mehānisko parametru salīdzinājumu. Galvenie pētījumu rezultāti ietver tehnoloģiskus uzlabojumus un ieteikumus 3D drukas tehnoloģiju uzlabošanai un praktiskai pielietošanai ortopēdisko rehabilitācijas līdzekļu izgatavošanai un pielietošanai citas jomās. Piedāvātas tehnoloģijas izmantošanas rezultāta ir iespējams izgatavot izturīgākas pret lieci un triecieniem detaļas no PLA un PET-G materiāliem, kā arī uz 2-3% samazināt elektroenerģijas patēriņu mainot 3D printera vadības plātes aprīkojumu un iestatījumus.

Promocijas darba pirmā daļā ir pētīta un apkopota literatūra par aktuālo 3D drukas tehnoloģiju un to programnodrošinājuma iespējam, ir pētītas esošas un nerisinātas 3D drukas problēmas un pieejas ka to var novērst, veikts griešanas metožu pētījums un piedāvāti ieteikumi un idejas kā var risināt problēmas, izmantojot CAD modeļu cilindriskas un neplakanas griešanas metodes, kā arī piedāvāta CAD modeļu apstrādes un pielāgošanas metode cilindriskai drukai.

Promocijas darba otrā daļā ir veikta 3D printera prototipa komponēšu izvēle, balstoties uz cilindriskas un neplakanas drukas parībam, ir izstrādāts risinājums, kas apvieno tradicionālo, 3-asu un 5-asu 3D drukas metodes vienā iekārtā, kas izmanto cilindriskas un neplakanas drukas tehnoloģijas. Pēc prototipu izstrādes ir veikti drukāto paraugu mehānisko īpašību testi, izstrādāto prototipu parametru un darbības principa izpēte un apraksts, kā arī doti ieteikumi un priekšlikumi tālākiem pētījumiem.

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā. Promocijas darbs ietver 6 nodaļas, 88 attēli, 13 tabulas. Kopējais lappušu skaits ir 112, literatūras saraksta ir 84 atsauces.

ANNOTATION

The title of the thesis is "Research and development of 3D printing equipment for the production of orthopedic rehabilitation equipment". The main research objects of the doctoral thesis are 3D printing printer software and applications, CAD model preparation and slicing programs, and 3D printer control boards.

The main research methods include the analysis and compilation of current literature, adjusting the parameters of CAD model cutting programs, modifying the geometry of CAD models, adjusting the material flow of the 3D printer, creating a simulation of the operation of the 3D printer, making 3-axis and 5-axis FDM 3D printer prototypes, performing experimental verification in laboratories, manufacturing of test samples and comparison of mechanical parameters. The main research results include technological improvements and recommendations for the improvement and practical application of 3D printing technologies for the manufacture of orthopedic rehabilitation devices and their application in other areas. As a result of using the proposed technology, it is possible to make parts more resistant to bending and breaking from PLA and PET-G materials, as well as to reduce electricity consumption by 2-3% by changing the equipment and settings of the 3D printer control board.

In the first part of the thesis, the literature on the current 3D printing technology and its software provisioning possibilities has been researched and compiled, existing and unsolved 3D printing problems and approaches that can be prevented have been studied, a study of CAD model slicing methods has been carried out and recommendations and ideas have been offered on how to solve problems using cylindrical and non-planar cutting methods of CAD models, as well as a proposed method of processing and adjusting CAD models for cylindrical printing.

In the second part of the thesis, the selection of components of the 3D printer prototype has been made, based on the balance of cylindrical and non-planar printing, a solution has been developed that combines traditional, 3-axis and 5-axis 3D printing methods in one device that uses cylindrical and non-planar printing technologies. After the development of the prototypes, tests of the mechanical properties of the printed samples have been carried out, research and description of the parameters and operating principle of the developed prototypes, as well as recommendations and proposals for further research have been given.

The thesis is written in Latvian. The thesis includes 6 chapters, 88 images, and 13 tables. The total number of pages is 112, the bibliography has 84 references.

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 saskatīt 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

ANOTĀCIJA	4
ANNOTATION	5
PATEICĪBA	6
SATURS	7
IEVADS	10
Promocijas darba mērķis	11
Promocijas darba uzdevumi	11
Pētījuma metodes un iekārtas	12
Pētījuma novitāte	12
Aprobācijas konferences	13
LITERATŪRAS APSKATS	14
1. ORTOPĒDISKIE REHABILITĀCIJAS LĪDZEKĻI	14
1.1. Pielietojums un prasības	14
1.2. Ortozes apraksts un risināmas problēmas	15
1.3. 3D drukātas ortozes izgatavošanas tehnoloģijā	17
2. 3D DRUKAS TEHNOLOĢIJAS IZPĒTE	19
2.1. 3D drukas apraksts	19
2.2. 3D drukas tehnoloģijas un izmantotie materiāli	19
2.3. 3D printeros izmantojama piedziņa	23
2.4. FDM elektriskas piedziņas apraksts un darbības princips	23
2.5. Soļu dzinēju apraksts un darbības princips	24
2.6. Soļu dzinēju vadība FDM tipa printeros	26
2.7. Soļu dzinēju vadība ar draiveru palīdzību	28
2.8. Soļu dzinēju reversīva vadība	29
2.9. 3D printeru vadības plates	31
2.10. 3D printeros izmantojamie devēji un palīgiekārtas	32
2.10.1. Temperatūras noteikšana	32
2.10.2. Pozīcijas noteikšanas devēji	33
2.10.3. Informācijas ievadišana un izvadišanā (I/O)	33
3. MODEĻA SAGATAVOŠANAS METOŽU IZPĒTE FDM 3D DRUKAI	34
3.1. 3D objekta novietojums telpā un 3D modeļa griešanas metodes	34
3.2. Esošo 3D modeļa griešanas metožu izpēte	34
3.3. Tradicionālas metodes izpēte	35

3.4.	Adaptīvas metodes izpēte.....	37
3.5.	Daudzvirzienu griešanas metodes izpēte.....	38
3.6.	Nekārtaina griešanas metodes izpēte.....	39
3.7.	Koniskas griešanas metodes izpēte	42
3.8.	Esošo FDM drukas ierobežojumu, izaicinājumu un problēmu izpēte.....	43
3.8.1.	Slāņaina drukājamo objektu struktūra.....	43
3.8.2.	Pārkares un balsta materiāla izmantošana	44
3.8.3.	Materiāla uzlikšanas lenķis un drukas galvas attālums no drukas galda	46
	SECINĀJUMI.....	47
	EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA.....	48
	Eksperimentālas dāļās darba struktūra	50
4.	NEKĀRTAINAS GRIEŠANAS METODES IZPĒTĒ UN IZSTRĀDE ORTOZES IZGATAVOŠANAI, PROTOTIPA IZSTRĀDĒ UN METODES PIELĀGOŠANA.....	52
4.1.	Cilindriska 3D drukas metodes izstrāde	52
4.2.	Eksperimentāla stenda parametru aprēķini	53
4.3.	Eksperimentāla cilindriskā 3D stenda izstrāde	55
4.4.	Eksperimentu veikšanā un rezultātu apkopojums	56
4.5.	Secinājumi.....	57
5.	Trīs asu FDM cilindriskas 3D drukas metodes un prototipa izstrāde.....	58
5.1.	FDM 3D drukas cilindriskas griešanas metodes izstrāde.....	58
5.1.1.	CAD modeļu sagatavošanas metodes apraksts un veiktie aprēķini.....	63
5.1.2.	Materiāla padošanas apjoma uzlabošanas metode.....	64
5.2.	Trīs asu cilindriskā FDM 3D printera prototipa aprīkojumā izvēle.....	67
5.2.1.	Dekarta koordinātu sistēmas kinemātikas FDM 3D printera izvēle	67
5.2.2.	Vadības plates izvēle.....	69
5.2.3.	Soļu dzinēja un pāvades mehānisma izvēle.....	70
5.2.4.	Soļu dzinēja draivera izvēle.....	74
5.2.5.	Drukšanas galvas elementu un dzesēšanas sistēmas izvēle.....	75
5.2.6.	Temperatūras un pozīcijas devēju izvēle.....	76
5.2.7.	Barošanas avota izvēle	77
5.3.	3 asu FDM cilindriskas koordinātu sistēmas printera prototipa izstrāde.....	78
5.3.1.	Programmnodrošinājumā iestatījumi un sagatavošana drukai.....	82
5.4.	3 asu FDM 3D cilindriskā printera prototipa testēšana.....	83
5.4.1.	3 asu FDM 3D cilindriskā printera prototipa testēšanas metodoloģijas apraksts.....	83
	Lieces stipruma testēšanā:.....	84
5.5.	Rezultāti	86

5.5.1.	Trīs dimensiju cilindrisko koordinātu sistēmas printera prototipa testēšana	86
5.6.	Secinājumi.....	90
6.	5 ASU 3D DRUKAS RISINĀJUMS KOMPLEKSAS FORMAS ORTOŽU DRUKAI.....	92
6.1.	5-asu cilindriskā neplakana 3D printera metodes izstrāde	92
6.2.	5-asu cilindriskā neplakana 3D printera izstrāde	94
6.3.	Eksperimentu veikšana un rezultātu apkopojums	98
	SECINĀJUMI.....	99
	LITERATŪRAS SARAKSTS	100
	PIELIKUMS 1	106
	PIELIKUMS 2	107
	PIELIKUMS 3	109

IEVADS

Strauji attīstoties medicīnas nozarei stipri augusi prasība pēc personalizētas medicīnas rīkiem, kas sniedz individuālu pieeju katra cilvēka vajadzībām un veicina atraku veselības procesu. Par šķērslī personalizētai pieejai var kalpot dārgāka ierīču izgatavošana, toties rezultātā cilvēks iegūst daudz augstāku veselības aprūpes līmeni. Lai samazināt šo trūkumu var izmantot 3D druku ka alternatīvu. Izveidojot cilvēka rehabilitējamās ekstremitātes 3D modeli, izmantojot 3D skenēšanu, var panākt to, lai gala izdrukāts izstrādājums pilnīgi atbilst ķermeņa daļas pareizai anatomiskai formai. Toties izmantojot agras prognozēšanas metodes, ortozi varēs drukāt balstoties uz nākotnē sagaidāmo rezultātu, drukājot jaunas ortozes atbilstoši rehabilitācijas gaitai. Izstrādājumi, kas ražotas ar 3D druku būs vieglāki, bet ar labākam mehāniskam īpašībām. Lai 3D drukātam izstrādājumam nebūtu šuvju, kas var berzt ādu tiks konstruēts daudzazu neplakana cilindriska tipa 3D printeris, kas spēj novērst šo problēmu.

Promocijas darbs ir versts uz 3D drukas tehnoloģiju robežu paplašināšanu, attīstot un ieviešot neplakanu un cilindrisku druku, kas var pārvarēt tradicionālās slāņveida drukas ierobežojumus. Tas palīdzēs veicināt tādu nākamās paaudzes individuāli piemēroto ortožu un medicīnisko rehabilitācijas ierīču izstrādi, kas labāk atbilst pacienta anatomijai, uzlabojot pacienta komfortu un veiktspēju. Darbā ir plānots uzlabot drukas procesa energoefektivitāti un samazināt materiālu atkritumus, optimizējot CAD modeļa griešanas programmnodrošinājumu un drukāšanas procesu. Izpētāma un izstrādājama neplakana daudzazu 3D printera prototipā tiks iekļautas uzlabotas kontroles metodes, kuru mērķis ir novērst esošās tradicionālas 3D drukas problēmas. Kopā ar jaunas modeļu sagriešanas metodes izveidi šie sasniegumi kopīgi cenšas uzlabot drukāto objektu kvalitāti un strukturālo viendabīgumu 3D drukā.

Promocijas darba ir veikta daudzazu neplakanas un cilindriskas tehnoloģijas izpēte 3D drukas printera izstrāde, kur prototips potenciāli varēs efektīvi izgatavot sarežģītas cilindriskas un arī brīvas formas ar labākiem mehāniskiem parametriem bez atbalsta materiāla izmantošanas. Pieejamas un lielākas funkcionalitātes programmnodrošinājumā izstrāde uz Python koda un vizuālas 3D izstrādes vides Rhinoceros 3D bāzes, ir nepieciešama 3D drukas jomā, tas attīstītība un izpēte šajā jomā ir perspektīva un svarīga zinātnes vidē.

Ortozem piemīt dažāda veida sarežģītas formas un to izgatavošanai nepieciešams izmantot dažāda veida aprīkojumu. Ja izmantot 3D drukas risinājumus, nepieciešams izmantot dažādus printerus un lai dod iespēju drukāt ortozes vienas iekārtas ietvaros darba ir izstrādāta iekārta un metodes, kas realizē tradicionālo FDM druku apvienotu ar trīs un piecu asu nekārtaino cilindrisko 3D druku.

Uzmanība tiek pievērsta 3D drukāto modeļu atslāņošanas problēmu mazināšanai, izstrādājot alternatīvas CAD modeļu griešanas metodoloģijas un CAD objektu pārorientāciju telpā modeļu iepriekšējās sagatavošanas laikā. Balstoties uz to kā esošo neplakano 3D printeru vadības metodēm trūkst precizitātes, to izmantošana ir sarežģīta, un nav eksistējoša unificēta printeru programmnodrošinājuma.

Promocijas darbā tiks aprakstītas ortopedisko rehabilitācijas līdzekļi, to prasības un izgatavošanas process, esošas 3D drukas tehnoloģijas pielietojamas medicīnā un 3D drukas nozarē, esošas 3D drukas problēmas un to iespējamie risinājumi, kā arī tiks izveidota

eksperimentāla daļa, kur tiks aprakstīti posmi kā tika izstrādāti šāda tipa printeri nepieciešamie materiāli un soļi. Ir izveidots daudzazu neplakana cilindriskā tipa 3D printera prototips ar iespēju pārslēgties no 3 asu režīma uz 5 asu režīmu. Arī ir salīdzināti prototipa parametri un veikti secinājumi par paveikto darbu.

Promocijas darba mērķis

Darba mērķis ir izstrādāt neplakanas cilindriskas 3D drukas metodi un FDM 3D drukas iekārtu, kas apvieno tradicionālas 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. Izstrādāt programmatūru un vairāku asu 3D printera prototipu, 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 nevienmērīgu 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.

Hipotēzes

Nekārtainas 3D drukas ieviešanu var ievērojami paātrināt un samazināt izmaksas, tādējādi būtiski uzlabojot individuāli pielāgojamu ortopēdiskās rehabilitācijas ierīču 3D drukas virsmas kvalitāti un mehāniskos parametrus, tas ietver jaunas kontroles un sagatavošanas metodes izmantošanu nekārtainai FDM drukāšanai, tostarp pakāpenisku CAD modeļu ģeometrijas izmaiņu secību, un standarta ģenerētā G-koda precizēšanu, kas apvieno standarta atvērtas 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 priekš FDM 3D drukas iekārtai, izveidot eksperimentālo stendu un veikt izstrādātās metodes testēšanu.
3. Apkopot eksperimentālā stenda iegūtus rezultātus un uz to bāzes izstrādāt pilnvērtīgu FDM 3D prototipu.
4. Veikt prototipa uzlabojumus un realizēt daudzazu risinājumu komplekso formu FDM 3D drukai.
5. Realizēt ātro pārslēgšanos starp tradicionālo, trīs asu cilindrisko un piecu asu neplakano FDM 3D drukas režīmiem, veikt ar tehnoloģiju ražot izstrādājumu testēšanu.

6. Apkopot rezultātus un dot priekšlikumus par tehnoloģijas priekšrocībām, trūkumiem un iespējamiem uzlabojumiem

Pētījuma metodes un iekārtas

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

Promocijas darba izstrādes un eksperimentālas daļas laika tika izmantotas *RTU IEEI 524. kabineta* laboratorijas un *RTU Deign Factory theLAB* laboratorijas instrumenti un iekārtas. Tajā skaita ietilpst dažādā veida barošanas avoti, termiska kamera, osciloskopi un multimetri un citi materiāli.

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

Pētījuma novitāte

1. Darbā ir izstrādāta nekārtaina FDM 3D drukas metode, kas pakāpeniski apraksta pieeju, kā sagatavot 3D CAD modeļus drukai uz nekārtaina FDM 3D drukas aparat tehniska risinājuma, kas ļaus izmantot izstrādāto metodi individuāli pielāgojamu cilvēka anatomijai ortopēdisko rehabilitācijas līdzekļu izstrādei.
2. Ir izstrādāta STL CAD modeļu nolasīšanas un rediģēšanas metode, kas pielāgo modeli drukai uz cilindriskas rotējošas pamatnes, tā lai drukas laika modeļa ģeometrija sakristu ar nepieciešamo ģeometriju.
3. Ir izstrādātā FDM 3D printeru nepieciešama materiāla padošanas apjoma koeficienta aprēķina un regulēšanas programma, kas nolasa tradicionāli sagrieztu G-kodu, definē esošo ekstrūzijas apjomu un pareizina to ar aprēķināto koeficientu atkarība no slāņa numura.
4. Ir izstrādāts aparat tehniskais 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.

Aprobācijas konferences

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 6 publikācijas, no kurām 4 ir minētas promocijas darbā. Pētījuma rezultātu aprobācija un praktiskā nozīme ir aplūkota sekojošās publikācijās:

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. Pielietojums un prasības

Ortopēdijā ir medicīnas sadaļa, kas pēta cilvēkā balsta un kustības sistēmas diagnostēšanu, profilaksi un rehabilitāciju. Tajā iekļauta protezēšanā – disciplīnā, kas aizņemas ar protēžu un ortožu izpēti un izgatavošanu. Cita ortopēdijas sadaļa ir rehabilitācijā. Tas ir pasākumu komplekss, kura uzdevums ir atjaunot pacienta zaudētas spējas pēc traumas vai operācijas. Pacientu rehabilitācijai plaši tiek pielietotas dažādā veida palīgiekārtas. Lai atvieglotu lauztu kaulu vai mežģījumu dzīšanas procesu tiek izmantots ortopēdiskais pārsējus. Tas darbojas balsts, kas notur ekstremitātes vietā, lai nofiksētu kaulus nepieciešama pareiza anatomiska stāvoklī. Ortopēdiskus pārsējus izgatavo no ģipša, stikla šķiedras, termoplastiskiem, koka vai metālā.

Ortozes galvenās prasības ir:

- būt ērtam;
- jābūt vieglam un izturīgam;
- viegli uzvilkt un novilkt;
- labi strādāt un funkcionēt
- nedarīt pāri;
- būt lētam;
- ilgi kalpot
- būt viegli un ātri izgatavojamam no pieejamiem materiāliem
- būt viegli remontējamam, vai aizvietojamam.

Izvērsto prasību pilnveidošanai mūsdienas ortožu izgatavošanai tiek pielietotas 3D drukas tehnoloģijas un jau kopš 2013. gada dažādas kompānijas izmanto šo tehnoloģiju ortožu izgatavošanai. Tādā veida izgatavota ortoze izpilda gandrīz visas ortozem izvirzītas prasības un vienlaikus piedāvā zemu izgatavošanas cenu un ātru izstrādājumā izgatavošanu, tieši piemērotu konkrētā cilvēkā vajadzībām. To izgatavošanai nav nepieciešams veikt mērījumus un ortozi var uztaisīt noskenējot traumēto vietu ar 3D skeneri un/vai rentgenstarojumu. Galvenā 3D drukas pārsēju priekšrocībā ir pareizi sadalīt spiedienu visa ortoza garumā. Nodrošinot pareizo spiedienu ātrākai traumas novēršanai.

Otra priekšrocība ir iespēja padarīt pārsēju elpojošu, izmantojot dažādā veida struktūras to izgatavošanas laikā, vienlaikus gatavs izstrādājums nepazaudēs savas mehāniskas īpašības, būs ciets, elastīgs un noturēs ekstremitāti tieši nepieciešama pozīcijā [1].

1.2. Ortozes apraksts un risināmas problēmas



Ortoze ir medicīniskā iekārtā arējai lietošanai kuras galvenās funkcijas ir daļēji vai pilnībā ierobežot ekstremitāšu kustību noteiktos virzienos. Tas samazina slodzes izraisītas no ekstremitātes svara uz traumas vietu, nodrošinot ātrāku dzīšanu, samazinot sāpes un nodrošinot pareizo ekstremitātes kustību.

Cilvēkā locītavas ir divu vai vairāku kaulu savienojums ar noteiktu darbības diapazonu. Ikdienas laika cilvēks izmanto locītavas, laik nodrošinātu ķermeņa kustību, attiecīgi to pareiza darbībā ir ļoti svarīgs faktors, bet vienlaikus uz tiem visu laiku ir pielietotas dažādā veida slodzes. Locītavu traumas veidojas, kad locītavas tiek vai nu pārslogotas, vai nu darbojas ārpus sava darba diapazona. Locītavas ir ļoti svarīgs cilvēkā ķermeņa elements un to pareiza darbībai bez sāpēm ir liela nozīme, bet cilvēkam dzīves laika rodas dažādā veida traucējumi un problēmas saistītas ar tam. Traumas var būtu akūtas vai hroniskas. Akūtas ir kaulu lūzumi, locītavu mežģīļumi, muskuļu sastiepumi, cīpslu iekaisumi un saišu plīsumi. Hroniskas sāpes ir nervu bojājumi locītavā vai sāpes no ilgstoša stresa. Galvenās locītavu traumas ir stresa lūzumi, plaukstu locītavu kaulu lūzumi, saišu plīsumi, karpālā kanāla sindroms. Šādā veida traumas pārsvarā tiek ārstētas ar cietas vai elastīgas ģipša vai šinas uzklāšanu, lai samazināt locītavas slodzes uz kauliem, locītavām un saitēm, un lai nodrošināt locītavas pareizo pozīciju ātrākai ārstēšanai. Atkarībā no traumas veida tie var fiksēt arī ekstremitāšu pirkstu kustības, kaut arī pārsvarā, ja tas ir iespējams ekstremitātei nodrošināt brīvu pirkstu izmantošanu, lai neierobežotu tas funkcionalitāti.












Ortozes klasificējas pēc kustības tipa, pielietošanas zonas un noteiktas traumas veida. Ortozes klasificē pēc funkcionalitātes, vai ir nepieciešama kustībā, vai papildu funkcijas. Izšķir statiskas un dinamiskas ortozes (1.1.tab.). Otrs klasifikācijas veids ir klasifikācijā pēc pielietojuma zonām, kur izšķir augšējo un apakšējo ekstremitāšu un mugurkaula ortozes (1.2.tab.).

1.1. tabula

Ortozes klasifikācijā pēc kustības veida

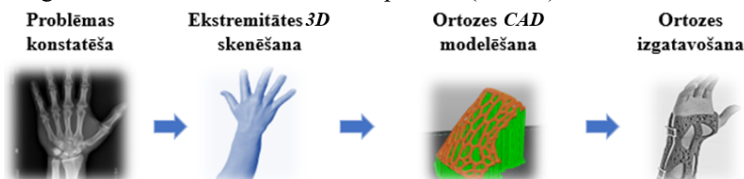
Nosaukums	Attēls	Apraksts
Statiskie		Pilnībā ierobežo ekstremitātes locītavu, saišu vai kaulu kustību.
Dinamiskie		Ir kustīgas daļas, kas ļauj ekstremitātei funkcionēt, tomēr ierobežo kustību noteiktā diapazona.

Ortozes klasifikācijā pēc pielietojuma

Klase	Nosaukums	Attēls	Apraksts
Augšējā ekstremitāte	Plaukstas		Nodrošina plaukstas satvērienu un atbrīvošanu.
	Rokas		Pielietojas visas rokas garuma fiksācijai, izņemot plaukstas.
Apakšējā ekstremitāte	Kombinētie (ceļgala, potītes un pēdas)		Iekļauj sevi visas kājas ortozes, nodrošinot ceļgala locītavas fiksāciju.
	Gurniem		Izmanto gūžas pēcoperāciju vai nomaiņas fiksācijai. Novērs gūžas rotāciju.
	Ceļgaliem		Izmanto osteoartrītu un artrītu ārstēšanai. Izmanto ceļgala stiprināšanai. Atslogo locītavas daļu
	Potītēm		Nodrošina potītes pareizo darbību un funkciju izpildīšanu.
	Pēdām		Nodrošina pareizu spiedienu uz pēdām, pēdas deformācijas vai nepareizas formas laikā.
	Apavu ieliktni		Pareiza pēdu spiediena nodrošināšanā sliktas asinsrites, neiropātijas un citu slimību ārstēšanai. Iekļauj arī sporta un individuālas pēdas formas zolītes.
Mugurkaula	Kaklam		Lieto kakla kaulu traucējumu gadījumos, lai nodrošinātu pareizu galvas pozīciju, ierobežojot kakla kustības un galvas pagriezienus.
	Kaklam un krūškurvim		Izmanto lūzumu laikā, lai ierobežotu krūškurvja saspiešanu un atlaišanu.
	Mugurkaulam		Izmanto, lai koriģētu mugurkaula stāvokli, samazinātu aksiālo slodzi konkrētam ķermeņa mugurkaula segmentam un uzlabotu tā darbību.

1.3. 3D drukātas ortozes izgatavošanas tehnoloģijā

3D drukas izgatavošana ir samēra ātrs un ērts process (1.1.att.).



1.1. att. 3D drukātas ortozes izgatavošanas posmi.

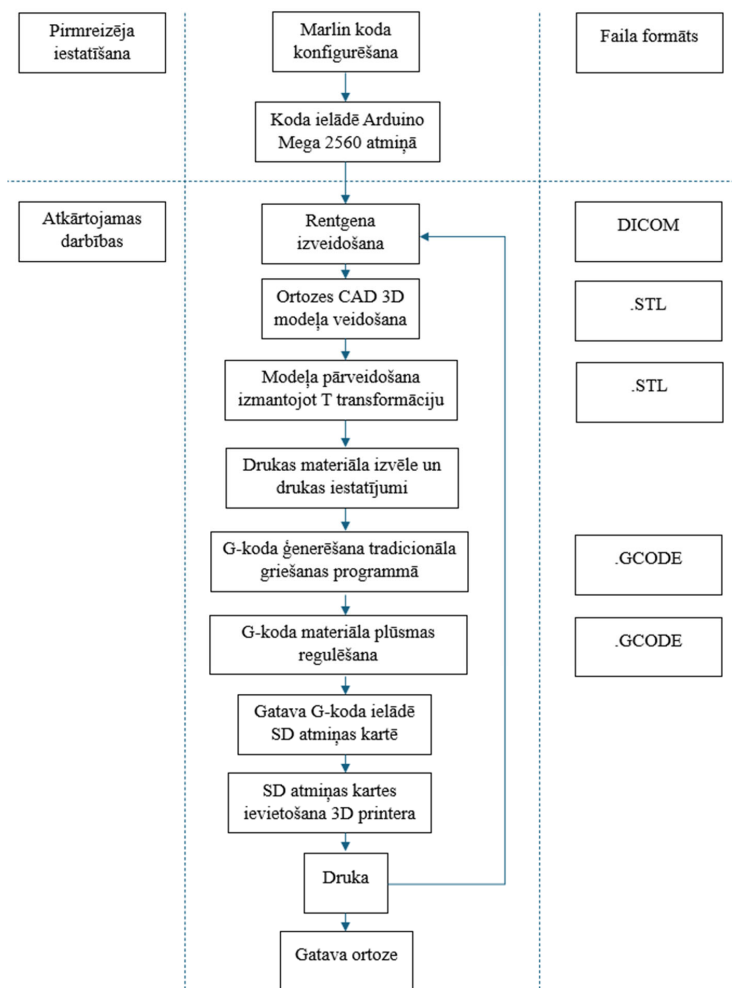
Pirmais posms ir definēt pacienta traumas veidu un veikt attiecīgos izmeklējumus. Attiecīgi, ja ir laužti kauli vai plīsumi vai sastiepta saite, pacients tiek norīkots veikt traumētās ekstremitātes rentgenogrāfiju. Otrais posms ir ekstremitātes 3D skenēšana. Mūsdienās tiek izmantots mobilais telefons 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. Tālākā 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 ortoze. 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 speciālisti, 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

Nākamais solis ir modeļa sagatavošana drukai. Attiecība no modeļa struktūras izmantojas modeļa atbalsta materiāls. Modelis tiek sagriezts uz slāņiem atkarībā no nepieciešamas precizitātes un slāņa biezuma, balansējot starp kvalitāti un izgatavošanas ātrumu. Kad modelis ir gatavs to aizsūta uz 3D drukas. Pēc drukas izgatavots izstrādājums tiek apstrādāts un sagatavots izsniegšanai pacientam. Viss ražošanas process attiecīgi no tehnoloģijas un ortozes parametriem, var aizņemt no 30 minūtēm līdz dažām stundām, tomēr tas ir ātrākais un ērtākais process salīdzinājumā ar ģipša pārsēju uzklāšanu, kura var aizņemt no 24 līdz 72 stundām un uzklāšanas laika izraisīt lietotajam diskomforta sajūtās [2], [3], [4].

Ir paredzēts ka ortozes izgatavošanas princips būs veidots atbilstoši 1.3.att. attēlotai shēmai:



1.3.att. Ortozes izgatavošanas etapi izmantojot promocijas darba izstrādājamo metodi.

Sākotnējā ortožu izgatavošanas procesā tiek pieņemts, ka vadāmajā printerī tiks ielādēta Marlin vadības programma, pēc tam, pamatojoties uz 3D skenēto ekstremitāti, tiks izgatavota ortoze, kuras forma tiks mainīta drukāšanai uz izstrādājamā prototipa. Tālāk tiek atlasīts uzdevumam piemērotākais materiāls un iestatījumi. Pēc iestatījumu pielietošanas tiek ģenerēts 3D printera vadības kods, kurā tiek regulēts piegādātā materiāla apjoms un gatavais G kods tiek ierakstīts atmiņas kartē, kas tiek ievietota prototipā un tiek veikta drukāšana, pēc drukāšanas process var atkārtot.

2. 3D DRUKAS TEHNOLOĢIJAS IZPĒTE

2.1. 3D drukas apraksts

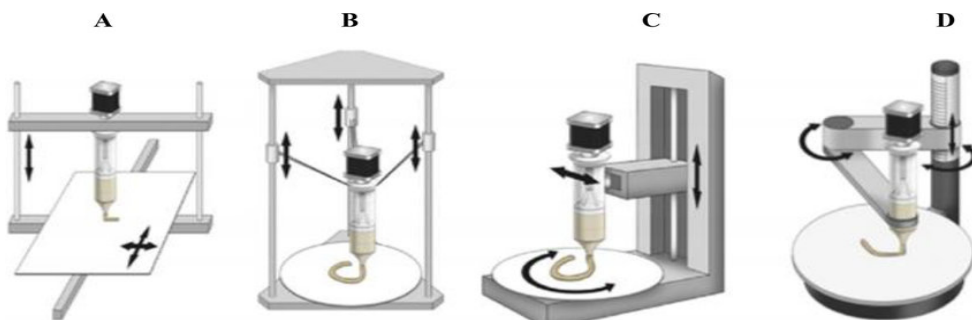
3D druka, ir detaļu un sistēmu ražošanas paņēmiens, kas dod iespēju ātrāk ražot vieglākas un izturīgākas detaļas, ar sarežģītu formu un konstrukciju. 3D drukā izmanto ar datora palīdzību apstrādāto dizainu (CAD) lai pakāpeniski uzklāt materiālu, slāni uz slāņa pēc noteiktas iepriekš uzdotas ģeometriskas formas, lai rezultāta iegūtu gatavu apjoma detaļu. CAD programma sadala detaļu uz noteikta biezuma slāņiem, kur katrā slānī tiek izveidots ceļš pēc kurā sekos printera drukas galva uzliekot materiālu. Katrs nākamais slānis savienojas ar iepriekšējo izkusušā vai daļēji izkusušā materiāla slāni. Tāda veida var pagatavot sarežģītas formas detaļas, vai uzreiz saliktas sistēmas ar lielu precizitāti un bez nepieciešamības papildu apstrādei. AM drukai izmantojas termoplasti, UV sveķi, metāls, keramikā, kompozītā materiāli un arī bioķīmiskās vielas [5], [6].

2.2. 3D drukas tehnoloģijas un izmantotie materiāli

AM tehnoloģijas atšķiras ar izmantojama materiālā veidu, materiālā uzklāšanas veidu, materiāla savienošanas tehnoloģijas veidu. Biežāk izmantojamas tehnoloģijas ir tehnoloģijas, kuras izmanto druku ar termoplastiem un UV sveķiem. 3D druku var sadalīt uz 7 kategorijām: materiālā ekstrūzija, tvertnes polimerizācijā, pulvera gultas saplūšana, laminēšanā, materiālu un saistvielu strūklas, un tieša enerģijas nogulsnešanas kategorijas. Darbā ir apskatāmas 3 kategorijas, kas varētu būt pielietojamas ortozes izgatavošanai, balstoties uz produkta izgatavošanas cenu, izgatavošanas ātrumu un tehnoloģiju pieejamību [3].

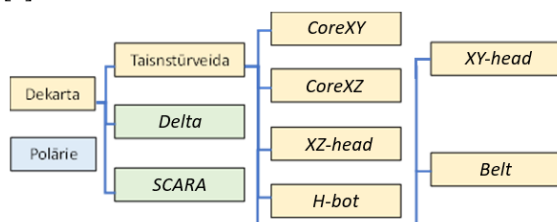
Materiāla ekstrūzijas tehnoloģijas izmanto dažādā veida materiālus, kuri tiek padoti no printera sprauslas. Pārsvārā tas ir termoplasti kas tiek padoti no sakarsētas printera sprauslas, tomēr eksistē tehnoloģijas, kas spēj tādā veida drukāt arī ar metālu, betonu, bioloģiskām vielām un citiem materiāliem. Pie šīs kategorijas piešķir FDM, bioloģiska druka, būvniecības druka un citi. Ekstrūzijas precizitāte ir līdz pat 0.2mm [7].

FDM (FFF) - kausētu kvēldiegu izgatavošana (Fused filament fabrication), ir tehnoloģijā, kur materiāls tiek padots ar motoru uz sakarsēto sprauslu, kur termoplasti tiek kausēti līdz materiālā kušanas punktam un uzklāti attiecīgi CAD programmas iepriekš uzdotiem uzstādījumiem slānis uz slāņa. Slāni starp sevi turas materiāla adhēzijas dēļ. Izmantojas dažāda veida termoplasti: ABS, PLA, PET-G, ASA, PP, PA12, TPU un citi. FDM tehnoloģijai izmantojas termoplasti kas ir iepriekš sagatavoti cieta kvēldiegā veida un noteikta diametra (parasti 1.75mm vai 2.85mm). FDM printeri izmanto Dekarta vai Polāro koordinātu sistēmu 3 asu virziena, X,Y un Z (2.1.att.) [8].



2.1.att. (A) Dekarta, (B) Delta, (C) Polara un (D) SCARA koordinātu 3D drukas princips [8].

Kustības notiek sakara ar CAD programmatūru uzdotam koordinātēm un printeris padod materiālu caur sakarsētu sprauslu. FDM printeri tiek klasificēti pēc izmantojamās koordinātu sistēmas izmantošanas veida un mehānikas būvības (2.2.att.). Dekarta taisnstūrveidā (rectilinear) printeri izmanto 3 asu kustības, lai kontrolētu printera galvas atrašanās pozīciju, kur katra ass tiek kontrolētā atsevišķi ar atsevišķo motoru. Pie Dekarta sistēmas printeriem kas izmanto taisnstūrveidā formas mehāniku piešķir *CoreXY*, *CoreXZ*, *H-bot*, *Belt*, *XZ-Head*, *XY-head*. Delta printeri izmanto 3 vai vairāk savienojumus, kuri pievienoti pie printera galvas no vienas puses un pie vertikālam sliedēm no otras puses. Regulējot katras sliedes augstumu var kontrolēt Z augstumu un X, Y galvas pozīciju. SCARA printeri izmanto robotizēto mehānisko roku, kurā galā piestiprinātā drukas galva. Eksistē arī Polārie printeri kas izmanto polāro koordinātu sistēmu [9].

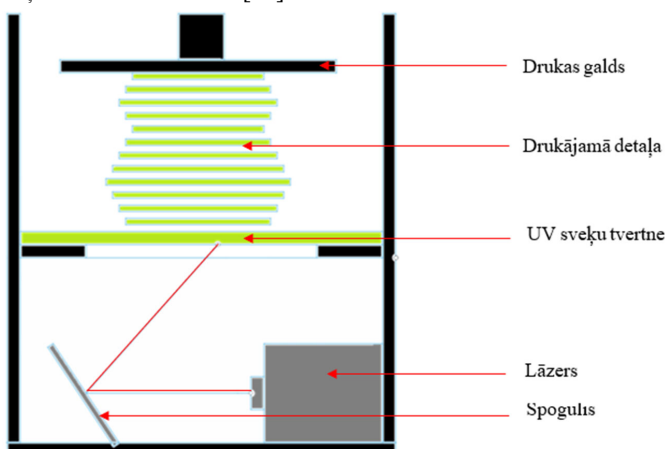


2.2.att. FDM (FFF) 3D printeru klasifikācijā

Nākamās tehnoloģijas kategorija ir šķidro sveķu polimerizācijā tvertnē ar ultravioletas (UV) gaismas starojumu. Tehnoloģijā izmantojas fotoķīmisks process, kura šķidri UV sveķi apstarojas ar augstas intensitātes ultravioleto gaismu un sacietē. Izmantojas monomēri, oligomēri, fotopolimerizācijas iniciatori un citi UV sveķi, kas sacietē 365nm līdz 410nm starojumā diapazonā. UV sveķus var sadalīt uz akrila un epoksīda kategorijām, kur atšķiras sacietēšanas process. Tā akrilā sveķi sacietēšanai izmantojas radikāla polimerizācija, kur UV starojuma laika sveķos parādās radikāļi kuri sāk reakciju. Epoksīdu sveķos izmantojas katjonu polimerizācijā, kur sveķos parādās katjoni, kuri sāk reakciju. Atkarībā no sveķu polimerizācijas veida ir atkarīgi tādi parametri kā sveķu sacietēšanas saraušanās, skābekļa ietekmes sacietēšanā, materiālā izturībā pret uzkaršēšanu un ķīmiskām vielām. Sacietēšanai izmanto UV-LED lampas un liela spiediena dzīvsudraba lampas. Lampas atšķiras ar to ka dzīvsudraba lampas izstaro

gaismu kāda diapazona, kur stiprākais starojums ir kādam konkrētam viļņa garumam, bet LED lampām ir tikai kāds konkrēts viļņa garums. Izšķir dažādā veida sveķu 3D drukas tehnoloģijas, atkarībā no starojuma avota, piemēram: SLA, DLP, LCD. Polimerizācijās kategorijā izgatavošanas precizitāte ir līdz pat 5 nm [10].

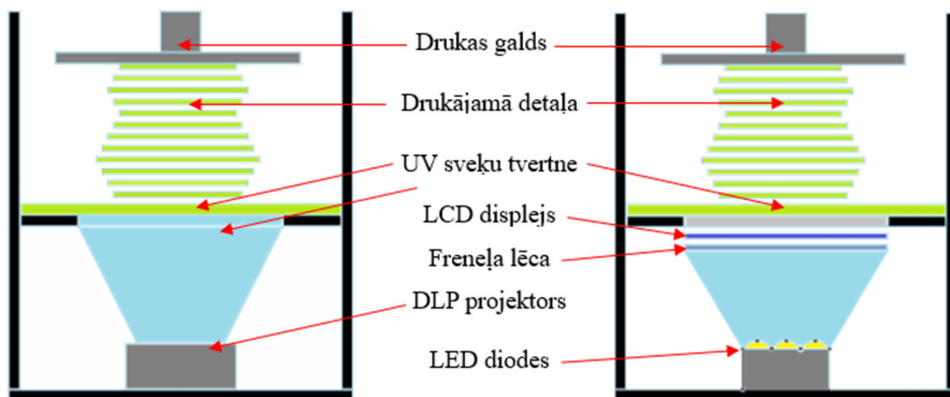
SLA (Stereolitogrāfijas aparāts) ir tehnoloģijā, kur izmantojas lāzera stars, kas tiek fokusēts ar spoguļiem. Stars veido attēlu attiecīgi CAD programmai slānis uz slāņa (skat 2.3.att.). Drukas galds var būt izvietots gan no augšas, gan no apakšas. Abos variantos nepieciešams izmantot tvertni ar sveķiem. Par materiālu tiek izmantoti dažāda veida UV starojumam jutīgie sveķi. Tādos printeros izmantojas viena kustības virziena ass Z, jo slānis tiek veidots ar lāzera starojumu un nav nepieciešamības pārvietoties X un Y asu virzienos. SLA tehnoloģijā ir ļoti precīza un spēj izgatavot ļoti detalizētas detaļas, tomēr ir samēra lēna, jo lāzeram jānobrauc katru atsevišķu slāņa formu individuāli [11].



2.3.att. SLA tehnoloģijas darbības princips [12].

DLP (Digital Light Processing) ir tehnoloģija, kur kā UV starojuma avots izmantojas DLP projektor. Projektor apstaro visu darba virsmu, kas attiecas uz attiecīgo slāni tādā veidā apstaro visu slāni vienā laikā, uz drukas laiku ietekme tikai slāņa biezums, tomēr drukas precizitāte var būt mazākā salīdzinājuma ar SLA printeriem, kā arī iespējama neveļams aizspīdums izkliedētas gaismas dēļ [13], [14].

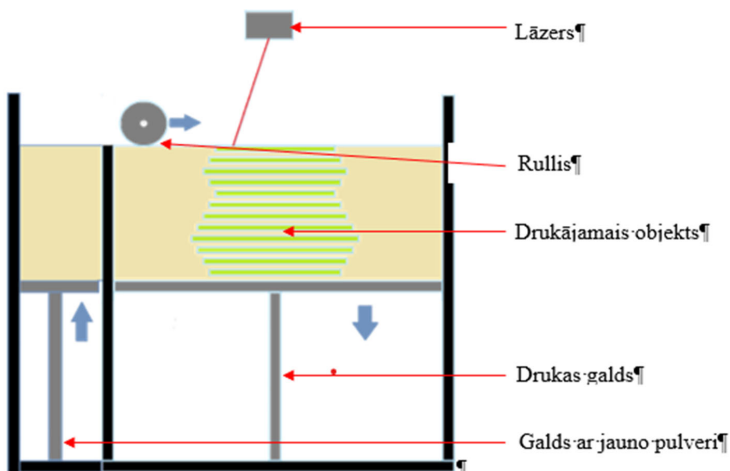
LCD (Liquid Crystal Display) ir tehnoloģija, kur kā UV starojuma avots izmantojas UV displejs. Starojums līdzīgi kā DLP (2.4.att.) tehnoloģijā aizpilda uzreiz visu darba virsmu un ātrums ir atkarīgs no slāņa biezuma un materiāla sacietēšanas laikā. Salīdzinājumā ar DLP tehnoloģiju var parādīties LCD ekrāna režģa līnijas, veidojot ne īpaši gludu modeļa virsmu, tomēr to var kompensēt palielinot LCD ekrāna izšķirtspēju [15].



2.4.att. DLP un LCD 3D printeru darbības princips.

Pulvera gultas saplūšana (PBF) ir 3D drukas kategorija kurā kāds termālas enerģijas avots uzskarsē kādu materiālu (termoplasti, metāls, keramika un citi) līdz materiāla kušanas punktam pa slāņiem lai izveidotu apjoma 3D objektu. Katrā slāņa viss darba galds tiek uzklāts ar smalkas dispersijas pulveri, kas tiek uzklāts ar rulli, asmenī vai slotu. Termālas enerģijas avots, parasti ir lāzers, sakausē uzklātā pulvera daļu kas atbilst konkrētai 3D objekta ģeometrijai. Pēc 3D drukas viss neizmantotais pulveris tiek atgriezts un tik izmantots atkārtoti. Par PBF kategorijas tehnoloģijām uzskata SLS, EBM, LPBF tehnoloģijas. Tehnoloģijas precizitāte ir līdz 5nm [16].

SLS (Selective Laser Sintering) ir tehnoloģijā kur ka enerģijā avots izmantojas lāzers. Tas līdzīgi SLA tehnoloģijai pakāpeniski haotiska secībā kustas attiecīgi CAD uzdotai slāņa formai sacepot pulveri stars sevi. Tālāk galds ar nolaižas, galds ar jauna slāņa materiālu paceļas un ar rulli tiek uzklāts jaunais pulvera slānis. Haotiskas kustības nepieciešamas, lai neizraisītu materiāla nevēlamas slodzes. SLS printera shēma ir attēlota 2.5.att. .



2.5.att. SLS tehnoloģijas darbības princips.

Balstoties uz esošo informāciju zinātniska vidē, tehnoloģiju izplatību, aptuveno drukas laiku un aptuveno gala izstrādājuma cenas var secināt kā ekstrūzijas, tvertnes polimerizācijas un pulvera saplūšanas tehnoloģijas ir atbilstošie ortožu izgatavošanai. Visas tehnoloģijas 3D modeļa sagatavošanas paņēmieni ir līdzīgi un izmanto tradicionālo paralēlo slāņu sagriešanu. Kaut arī ražošanas process tehnoloģijām atšķiras, galvenā 3D drukas problēmā netika atrisinātā – slāņu paralēlā uzklāšanā, kura potenciāli jebkurā ražošanas procesā dos vāju mehānisku izturību pret stiepšanu un vērpi perpendikulāri slāņu virzienam. Otrā problēmā - nelīdzenu drukas virsmu. Rezultāta būs nepieciešams samazināt slāņu biezumu. Kas savukārt palielina drukas laiku. Slāņi starp sevi turas tikai materiāla adhēzijas dēļ, kura savukārt ir atkarīga no drukas iestatījumiem, un labākais slāņu saķerei nepieciešams palielināt drukas temperatūru. Attiecīgi visas tehnoloģijas tika pētītas šajā darba, lai risinātu šo problēmu un izstrādātu tehnoloģiju, kurā izstrādāta ortoze būs ātri izgatavojama, lēta un izturīga.

Lai īstenotu koncepciju un apstiprinātu teoriju, par pamatu tiek ņemta FDM tehnoloģija. Tika petita FDM 3D printeru piedziņa un vadība. Šis 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.

2.3. 3D printeros izmantojama piedziņa

3D drukas nosaukums ir celts no apjoma modeļu ražošanas 3 dimensiju virzienos. Attiecīgi 3D printeriem ir nepieciešams pārvietot drukas galvu trīs dimensijās X,Y, Z. To var nodrošināt pievienojot uz katru kustības asi vienu vai vairākus motorus. Minimāls nepieciešams daudzums ir 3 motori uz X, Y un Z asīm. Materiāla padošanai (ekstrūzijai) nepieciešams vēl viens motors. 3D drukai parasti tiek izmantoti elektriskie soļu dzinēji sertificēti ar NEMA standartu, kuriem ir apmierinoša precizitāte, pietiekošs griezes moments, mazs elektroenerģijas patēriņš, unificētā pieslēgšana un nelieli izmēri. FDM printeriem izplatītākam modeļiem slāņa biezums mainās diapazonā no 0.05mm līdz dažiem centimetriem, attiecīgi motoram nepieciešams nodrošināt ātru un precīzu printera galvas pārvietošanu [17].

SLA, LCD un DLP printeros parasti ir izmantota viena kustīga ass Z ar vienu vai vairākiem elektrodzinējiem, kas regulē drukas galda augstumu, attiecīgi slāņa biezumu. Citu kustīgu elementu kas atbild par drukājamā galda pozicionēšanu šajos printeros nav, bet elektrodzinējam jābūt pēc iespējas precīzākam, jo slāņa biezums var būt mazāks par 0.01mm, lai sasniegtu tādu precizitāti tiek izmantoti dažādā veida soļu dzinēji.

2.4. FDM elektriskas piedziņas apraksts un darbības princips

Elektriskas piedziņa ir ierīce, kas pārveido elektrisko enerģiju mehāniskajā, lai nodrošinātu mehāniskas darbības vadību ar elektrības palīdzību.

Elektriska piedziņa sastāv no:

VS – vadības sistēmas

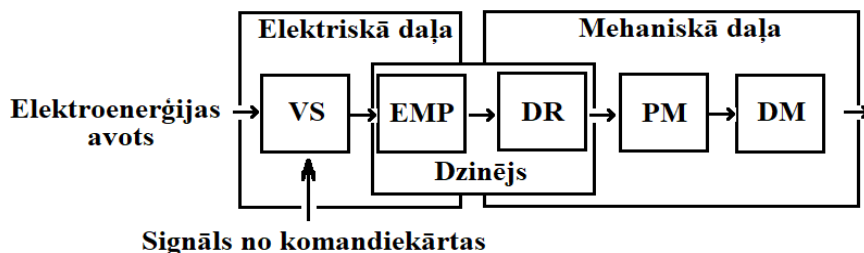
EMP – elektromehāniska pārveidotāja

DR – dzinēja rotora

PM – pārvades mehānisma, jeb reduktora

DM – darba mašīnas

Elektriska piedziņā sastāv no elektriskas un mehāniskas daļas, kur vienlaikus padod gan elektroenerģiju barošanai, gan vadības signālus (2.6.att.).



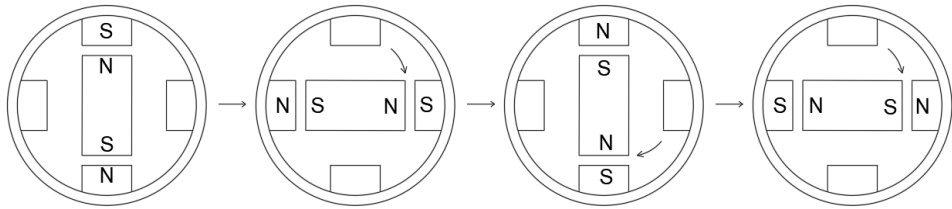
2.6.att. Elektriskās piedziņas struktūrshēma [18].

Par elektriskas piedziņas vadību atbild vadības iekārta. Soļu dzinējiem vadības iekārtā ir speciāli izstrādāts draiveris (ierīču kopa salikta uz vienas plates), kurš padod vadības signālu uz dzinēju, lai tas saprastu uz kādā virziena un cik ilgi tam ir jāgriežas. Signāls no vadības iekārtas padodas uz elektromehānisko pārveidotāju (EMP). EMP ir ierīce, kas pārveido elektrisko enerģiju mehāniskā, parasti tas ir elektrodzinēja rotors un stators kopā ar dažādu spoļu konfigurāciju, atkarīgi no dzinējā veida un konstrukcijas .

Kā atsevišķa daļa ir izdalīts dzinēja rotors (DR), tieši rotora vārpsta, jo tā var būt izpildītā dažādas konstrukcijas un formas, un tieši saistās ar nākamā elementu – reduktoru. Reduktora, jeb pārvades mehānisma (PM) izmantošana nav obligāta, īpaši tas attiecas uz soļu dzinējiem, jo pats elektrodzinējs var nodrošināt nepieciešamo griezes momentu, un soļu dzinējos samazināt soļa garumu var ar draivera palīdzību, taču, ja nepieciešams palielināts griezes moments un vēl mazāks soļa garums, tad tiek izmantots reduktors. Vārpsta caur reduktoru, vai bez tā, pieslēdzas pie darba mašīnas (DM), tas ir iekārta, kurai nepieciešams pielikt mehānisko spēku [18].

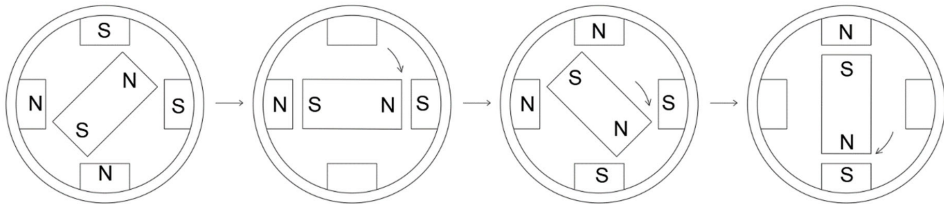
2.5. Soļu dzinēju apraksts un darbības princips

FDM 3D printeros iespējams izmantot abus vadības variantus, pilna soļu vadību un pussoļu vadību. Jo vairākos pussoļu daudzumos tiek sadalīts pilnais solis, jo vienmērīgāka un precīzāk notiks soļu dzinēja rotora kustības. Soļu dzinēju darbības aprakstam tika izmantots soļu dzinējs ar mainīgo magnētisko pretestību. Tādam dzinējam ir divi polu pāri, 4 zobi uz statora, 4 spoles, saistītas pa pāriem, pretēji viena otrai, un divi zobi uz rotora (2.7.att.). Par vienu soli dzinējs spēj pagriezties uz: $360/4=90$ grādu leņķi. Katrs spoļu pāris ir barots no atsevišķa pastāvīga strāvas avota. Kad uz spoles parādās barošana, rotors sāk kustību, jo pretēji magnētiskie poli pievilkās (S un N, N un S), bet vienādi atgrūžas (S un S, N un N) [19].



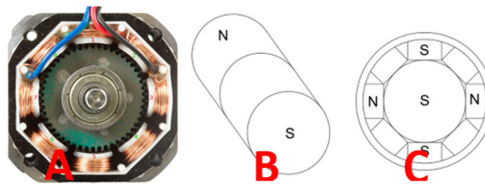
2.7.att. Soļu dzinēja ar mainīgo magnētisko pretestību pilnā soļa vadība [18].

Soļu vadībai izmantojas dažādā veida paņēmieni kā var samazināt soļa garumu lai palielināt precizitāti, viens no tādiem paņēmieniem ir pussoļu vadība. Soļu garumu var samazināt divreiz, ja izmantot pussoļu vadību, kad rotors aizņem pozīciju pa vidu starp vienādiem poliēm, nesasniedzot nevienu no tiem (2.8.att.). Kad spoles ir ieslēgtas vienlaikus, pēc tam, atslēdzas viens spoļu pāris un tad tālāk ieslēdzas, mainot polaritāti, tāda veida soļa garums kļūst $360/8=45^\circ$, jo rotors pagriežas un apstājas pa vidu starp statora zobiem.



2.8.att. Soļu dzinēja ar mainīgo magnētisko pretestību pussoļa vadība [18].

3D printeros parasti izmantojas hibrīdie soļu dzinēji, kur izmantojas kombinētas spoles pa 2 pāri pa 4 spolēm, kopa 8 spoles, 50 zobi uz statora un 48 zobi uz rotora (2.10.att.). Tāda dzinēja pilnais solis veido $360/50=7.2$ grādu leņķi, tomēr sakara ar to ka nobīdes leņķis ir $1/4$ no pilna soļa (jo mums ir 4 spoļu pāri, kas dod iespēju griezt rotoru ar 4 reizes mazāko soļa garumu). Tāda veida dzinēja soļa garumu s ir $360/(50*4)=1.8^\circ$. Tomēr arī tas nav viss un atkarība no izmantotas vadības plātes un draivera veida soļu nobīdes leņķi var samazināt līdz pat $1/256$. Tas ir sasniedzams, izmantojot 8 bitu (un vairāk) ciparu vadības plātes. Hibrīda soļu dzinēja rotors ir magnetizēts citādāk nekā dzinējos ar mainīgo magnētisko pretestību, rotors ir magnetizēts garumā nevis platumā, tā ka viena rotora daļa ir ar vienu polaritāti, bet cita ar citu, tātad viena rotora daļa ir dienvidu pōls, bet otra ziemeļu pōls, un virsu ir uzgali ar zobiem (2.9.att.) [19].



2.9.att. Hibrīds soļu dzinējs ar 50 zobiem statorā un 48 rotorā.

a) Hibrīda soļu dzinēja attēls. b) Rotorā sadalījums pa polaritātei. c) Rotorā un spoļu attiecība dzinēja iekša [19].

Eksistē arī dažāda veida soļu dzinēju variācijas, kā piemēram:

- soļu dzinēji ar vienu vārpstu no vienas rotora puses;
- soļu dzinēji ar divām vārpstām no abām rotora pusēm;
- soļu dzinēji ar tukšo rotoru;
- soļu dzinējs ar tukšo rotoru, pa kuru brīvi var pārvietoties pārvadskrūve;
- soļu dzinēju ar iebūvēto reduktoru;
- soļu dzinēju ar iebūvētu nekodētu;
- soļu dzinēju ar iebūvētam bremsēm, un citi;

Viens no galvenajiem soļu dzinēju parametriem ir griezes moments. Griezes moments ir spēka iedarbība uz mehānisko objektu kura var izraisīt objekta rotāciju. Griezes momentu \vec{M} aprēķinā kā vektorālo pielikta spēka \vec{F} un spēka plecs \vec{r} reizinājumu (2.1):

$$\vec{M} = \vec{F} * \vec{r} \quad (2.1)$$

kur \vec{F} - spēks, kas darbojas uz ķermeni, N;

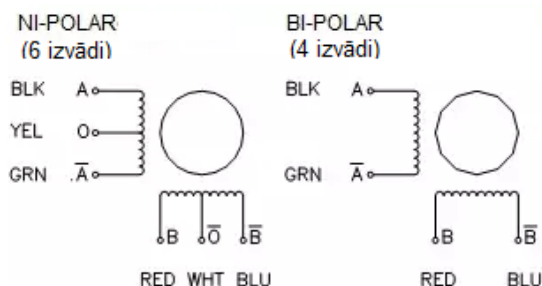
\vec{r} - spēka plecs, m;

\vec{M} -griezes moments, N*m.

Griezes momenta mērvienības ir Ņūtons uz metru (Nm). 3D printeru vadībai izmantojas dažādā veida soļu dzinēji un atkarībā no to izvietojuma atšķiras to minimāli nepieciešamais griezes moments. Drukas galvas pārvietojumam uz X un Y ass ir nepieciešams mazāks griezes moments nekā Z asij, kura paceļ visu drukas galvas konstrukciju kopā ar pašam sliedēm un X,Y motoriem. Parasti izmantojas NEMA 17 vai NEMA 23 soļu dzinēji, kur griezes moments ir mērīts kā Ņūtons uz centimetru, jo parasti 3D drukas diapazons nav lielāks par vienu metru, Griezes momenta diapazons 3D printeros ir no 10 N*cm līdz aptuveni 300 N*cm [19].

2.6. Soļu dzinēju vadība FDM tipa printeros

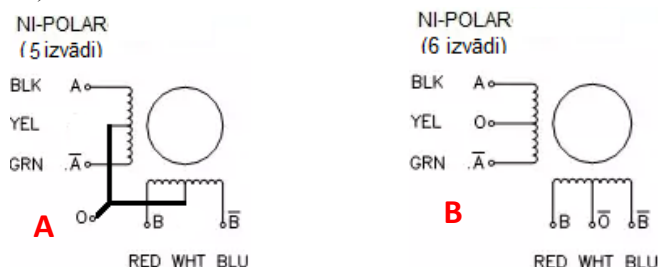
Soļu dzinēji ir daudzfāžu motori, sakara ar to jo vairāk spoļu, jo lielāks būs dzinēja laidenums. Griezes moments nav atkarīgs no spoļu daudzuma, ka arī fāžu skaits nav atkarīgs no spoļu daudzuma. Spoles var tikt slēgtas gan paralēli gan virknē, atkarība no dzinēja konstrukcijas un pielietojuma. Soļu dzinējiem ir divi spoļu konstrukcijas veidi: unipolārs un bipolārs slēgums (2.10.att.)



2.10.att. Soļu un lineāro dzinēju unipolārs un bipolārs slēgums.

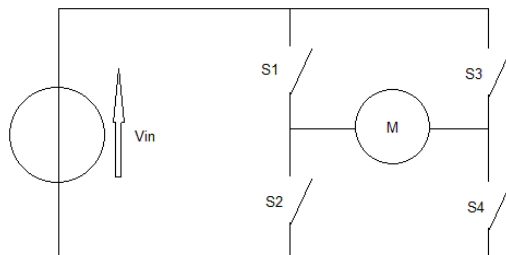
Bipolārie dzinēji pieslēdzas pie draivera ar 4 savienojumiem, jo sastāv no diviem spoļu pāriem, kur spoles var būt slēgtas gan paralēli, gan virknē. Lai mainītu strāvas virzienu tādos dzinējos nepieciešams izmantot draiverus

Unipolārie spoļu dzinēji pieslēdzas ar 6 vadiem (īpaša gadījumā ar 5), jo satur viduspunkta izvadu katra fāzē, ar kuru palīdzību var mainīt rotācijas virzienu, bet attiecīgi tiek izmantota tikai puse no pieejama spoļu vītņu daudzuma, tādējādi ir mazāks griezes moments. Lai izmantotu visu spoles jaudu, spoles viduspunktu nepieslēdz, pieslēdzot visu spoli uzreiz, tāda veida pārveidojot dzinēju par bipolāro, bet patērējot iespēju mainīt virzienu ar viduspunkta slēgumu. Izvadu skaits unipolāros dzinējos ir atkarīgs no tā vai ir savienoti kopā abu spoļu viduspunkti (2.11.att.).



2.11.att. Unipolārs dzinējs ar a) 5 izvadiem, b) 6 izvadiem .

Spoļu dzinēju vadībai izmanto draiveri vai kontrolleri, promocijas darbā tiek izmantota spoļu dzinēju vadība izmantojot spoļu dzinēju draiverus, bet ir iespējams vadīt spoļu dzinējus arī manuāli neizmantojot tos. Tādā gadījumā ir izmantota H-tilta pieslēguma shēma(2.12.att.), kurā ir iespēja pārslēgt spoļu polaritātes, lai grieztu dzinēju pretējā virzienā (reversā).



2.12.att. H-tilta pieslēguma shēma .

H-tilta shēmā slēdži tiek slēgti pa pāriem S1 un S4; S3 un S2 tādējādi mainot strāvas plūsmu dažādos virzienos, kas attiecīgi griež dzinēju kāda no virzieniem.

Kontrolleros tiek izmantots elektroniskais bloks, kas formē signālu grupas un to signālu secību, kas tiek padoti uz statora spolēm. Ja ir izmantots kontrolleris, tad tas dod iespēju vadīt ar spoļu dzinēju dažādos režīmos. Lai pasargātu kontrolleru no īssavienojuma un sadegšanas, uz katra spoļu dzinēja izvada uzstāda diodes, kas nedod iespēju impulsam nonākt otrāda virziena. Izmanto divas kontrolleru slēguma shēmas: ar diferenciālo izeju, un ar atvērta kolektorā izeju. Vadība ar kontrolleru ar diferenciālo izeju izmantojas mazas slodzes gadījumā. Tiešie un inversi

signāli tiek tieši padoti uz attiecīgiem poliem. Vadība ar kontrolleru ar atvērta kolektorā izeju dod iespēju uzstādīt soļu skaitu ar noteikto ātrumu, paātrinājumu un citiem parametriem. Šajā shēmā savieno pozitīvas kontrollera izejas, kas tiek pievienoti pie pozitīva pola. Tomēr vadība izmantojot atsevišķu kontrolleru ir novecojusies un ir diezgan sarežģīta, aizņem vairāk vietas, tāpēc tagad tiek pielietota vadība ar draiveru palīdzību.

2.7. Soļu dzinēju vadība ar draiveru palīdzību

Draiveris ir elektroniska iekārta, kas sastāv no spēka daļas un kontrollera. Draiveri var būt gan salodēti uz vadības plātes, gan kā atsevišķas mikroshēmas, kas pievienojas pie vadības plātes.

Spēka daļa parasti sastāv no pusvadītāja jaudas pastiprinātāja, kas pārveido fāžu impulsus rotora pagriezienos. Viens vadības impulss pagriež rotoru uz vienu soļi, tipiskiem soļu dzinējiem uz 200 soļiem, viens impulss pagriež rotoru uz 1.8° vai $0,9^\circ$, (atkarīgs no dzinēja veida). Spēka daļas uzdevums ir padod nepieciešamu strāvu uz statora tinumu un turēt to kādu laiku, un pēc iespējas ātrāk padot tādus impulsus, lai nepatērētu iespējamo soļa dzinēja jaudu un ātrumu. Strāvas virziens atkarīgs no tā, kurā ir nepieciešams pagriezt rotoru, jo lielāka strāva, jo lielāks solis. Draiveris padod soļu dzinējiem vadības signālu par to cik soļu tam ir jāizpilda, uz kādu leņķi tam jāpagriežas un ar kādu ātrumu tām jāpagriežas [20].

Draivera kontrolleris parasti ir veidots uz mikrokontrollera bāzes. Kontrolleris vada ar spēka daļu, un no tā ir atkarīgs kurā momentā, kurā laikā un cik liela strāva tiks padota. Draiveru kontrolleriem ir iespēja pieslēgties pie datora un tikt pārprogrammētiem, kā arī dod iespēju reālā laika kontrolēt programmas izpildi un mainīt kodu.

Draivera kontrollera ir iespējams ierakstīt loģisko soļa lieluma dalītāju, tādejādi sadalot soļi 2, 4, 8 un līdz pat 256 vai vairāk mikrosoļiem. Strāva viena spole būs lielāka nekā strāva otra spole, tādejādi palielinot soļu skaitu. Soļu dalītāju skaits ir atkarīgs no draivera iespējam un tehniskiem parametriem, jo mikrokontrolleram lai sasniegtu tādu pašu rotora ātrumu būs nepieciešams attiecīgi padot tik reizes lielāku komandu skaitu uz to pašu laika periodu.

Lai sāktu darbību ar draiveri tam nepieciešams pieslēgt: barošanas avotu, soļu dzinēju spoles un vadības signālu iekārtu, par kuru parasti pieņem vadības plati [7].

Draivera vadīšana ir standartizēta un parasti tam ir trīs signāla veidi: STEP, DIR, ENABLE.

STEP signāls – ir soļa signāls, takts signāls, kur viens STEP signāls pagriež rotoru uz vienu soļi, kas ir ierakstīts draivera (1/1, 1/4, 1/8 utt.). STEP signāla apstrāde notiek pa impulsa priekšējo vai aizmugurējo fronti.

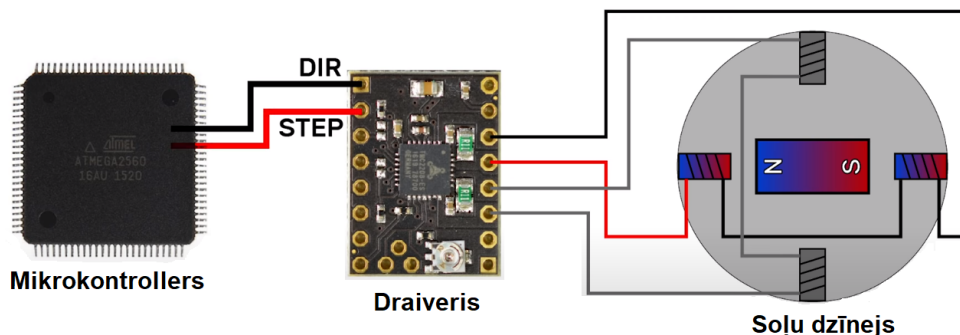
DIR signāls – ir virziena signāls, kur loģiskais vieninieks (1) dod komandu rotoram griezties pulksteņrādītāja virzienā, bet loģiska nulle (0) – pretī pulksteņa rādītājam. DIR signāla invertēšanai var izmainīt programmas kodu draivera kontrollera, vai fiziski pārslēgt spoļu fāzes draivera pieslēguma vietā.

ENABLE signāls – draivera ieslēgšanas un izslēgšanas signāls, kad uz draivera ieejas ir loģiskais vieninieks (5 V), draiveris izslēgts un spoles ir atslēgtas, kad uz ieejas ir loģiska nulle (0 V), draiveris darbojas un spoles ir ieslēgtas.

Atkarība no draivera konstrukcijas tam var būt papildu signāls STEP, kas atbild par draiverā iebūvēto frekvences ģeneratoru. Šis signāls dod iespēju bez pieslēguma datoram palaist draiveri testēšanai vai pieslēgt draiveri pie ārēja frekvences ģeneratora.

TMC2209 draiveros, kas tālāk ir izmantoti darbā, ir dažādas papildfunkcijas, kā piemēram, soļu dzinēja pārslodzes kontrole atkarība no strāvas; draivera pārsprieguma kontrole (pret-EDS novēršanai); spoļu strāvas samazināšana, patēriņa samazināšanai kad soļu dzinējs ir apstādīnāts (SLEEP režīms); automātiska rezonanses samazināšana, jo soļu dzinējiem ir rezonanses parādība pie noteiktiem apgriezieniem (6-12 apgr./sek.), kura rezultāta rotors var apstāties .

Draivera pieslēgšanas shēmā (2.13.att.) varam redzēt, ka ar STEP ir padotas komandas, DIR norāda rotora rotācijas virzienu, bet pats soļu dzinējs ir parasti pieslēgts draivera paredzētam fāžu savienojumiem. Lai neizmantotu dārgāku mikrokontrolleri, draiveru ražotāji pievienoja iespēju interpolēt soļus tā, lai mikrokontrollers padotu signālu ar mazāku dalītāju, bet paša draivera jau signāls sadalās vēlreiz samazinot soļi attiecīga reizinātāja lieluma. Tas dod iespēju palielināt dzinēja kustības laidenumu, ka arī pazemināt dzinēja darbības skaļumu, kaut arī nepalielina to precizitāti.

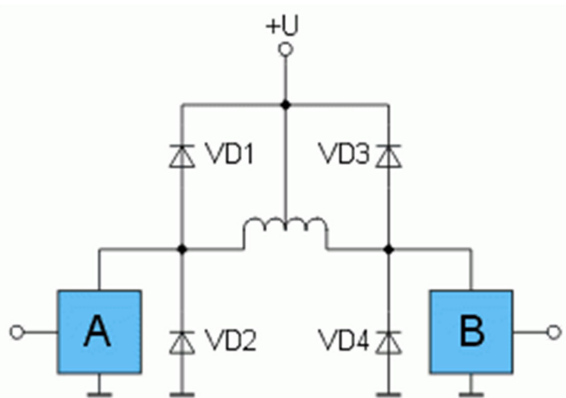


2.13.att. Soļu dzinēja draivera pieslēguma shēma [18].

Atsevišķus draiverus ir iespējams vadīt caur UART, SPI vai I2C protokoliem, bet vadības platei jābūt izgatavotai attiecīgam vadības veidam, un programmodrošinājumam attiecīgi nepieciešams veikt koda izmaiņas. Tāds vadības veids dos iespēju caur programmu vadīt ar soļu režīmu, mainīt dalītāju, ieslēgt un izslēgt interpolāciju, un caur programmu kontrolēt strāvas stiprumu. Ka arī izmainīt fiziskus ierobežojumus, jo parasti draivera darbības režīmu regulē ar džamperiem uz vadības plates, bet caur UART protokolu paradās iespēja samazināt soļa garumu vēl vairāk [21].

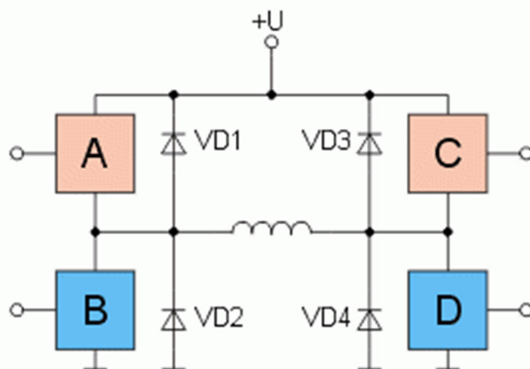
2.8. Soļu dzinēju reversīva vadība

Soļu dzinēju darbībai nepieciešama magnētiska lauka virziena izmaiņa neatkarīgi katrai fāzei, ko var sasniegt ar dažādiem paņēmieniem. Parasti H tilts ir iebūvēts soļu dzinēju draiveri un tas nodrošina soļu dzinēja vadība gan tieša virziena, gan reversīva. Unipolāriem dzinējiem spoles ir sadalītas uz pusēm ar viduspunkta izvadu, vai katrai fāzei ir divas atsevišķas spoles. magnētiska lauka virziens mainās, pārslēdzot spoļu puses vai pilnas spoles. šādā gadījumā izmantojas divas atslēgas A un B katrai fāzei (2.14. att.).



2.14.att. Unipolaro soļu dzinēju vadības shēma

Bipolaro dzinējos lauka virziens mainās, pārslēdzot spoļu polus, kur nepieciešams izmantot H tiltu (2.15.att.). Atslēgu pārvaldīšanai jāizmanto loģiska shēma, kas realizē vajadzīgo darba algoritmu. Paredzams, ka shēmas strāvas avotam ir nominālais dzinēja spriegums.

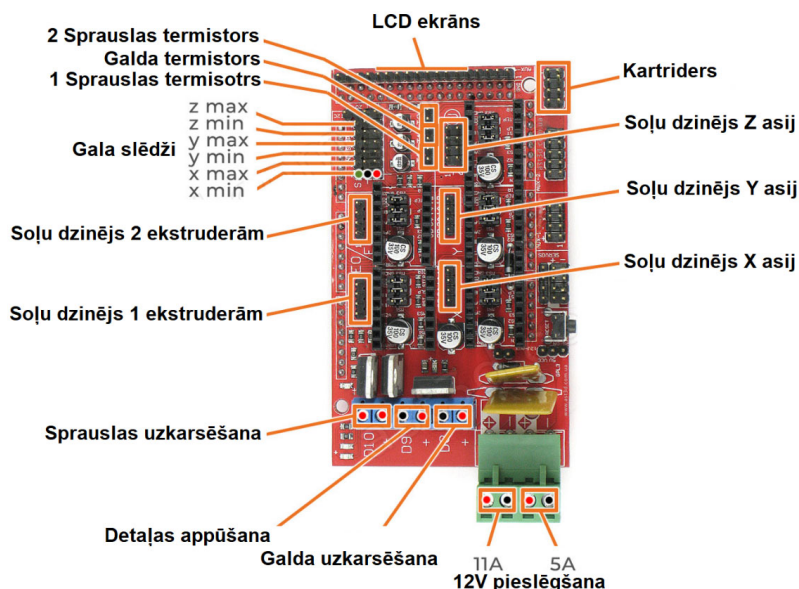


2.15.att. Bipolaro soļu dzinēju vadības shēma. H-tilts.

Tā kā dzinēja tinums ir induktivitāte, šī induktivitāte nosaka strāvas uzaugšanas un krituma laiku, tāpēc, ja uz tinuma ir taisnstūra formas spriegums, strāvas forma nebūs taisnstūra. Zemā ātrumā strāvas pieaugums un kritums nespēj būtiski ietekmēt momentu, taču augstajos ātrumos moments krīt. Tas ir saistīts ar to, ka augstajos strāvu ātrumos dzinēja tinumos nav iespējams sasniegt nominālo vērtību. Pēc induktivitātes atvienošanas no strāvas avota, strāva nevar pazust uzreiz, un rodas pašindukcijas EDS (elektrodzinējspēks), kurai ir enerģijas avotam pretējais virziens. Pašreizējā momentā H-tilta vadība ir realizēta soļu draiveru iekšā un lielākais draiveru variants izmanto vadību uz H-tilta pamata, attiecīgi darbā izmantojamajos draiveros ir izmantota bipolaro soļu dzinēju H-tilta vadības princips.

2.9. 3D printeru vadības plates

Galvenais 3D printeru vadību plates uzdevums ir apvienot kopā un pārvaldīt visus pieslēdzamus 3D printera elementus (2.16.att.). Ātrākai, kompaktai un efektīvai 3D printeru vadībai tika izgudrotas speciālas vadības plates uz mikroprocesoru bāzes. Projekta ietvaros izstrādāja paplašināšanas plati ātrākai un ērtākai 3D printera komponentu pieslēgšanai. Tika izgudrotas paplašinājumā plates pieslēdzamas pie *AVR* mikrokontrolera platēm, pārsvarā dažādas Arduino un citas plates, kuras tika unificētas un sauktas par *RAMPS*. Eksistē uzreiz apvienoti *RAMPS* (2.16.att.) un mikrokontroleru risinājumi, kas ir ļoti populāri un attiecīgi diezgan lēti, tie izmantojas gan lētos 3D printeros, gan dārgos ražotāju risinājumos, jo piedāvā lielu funkcionalitāti un dažādas vadības iespējas [22], [23].



2.16.att. RAMPS paplašināšanas plates pieslēguma iespējas [24].

Arduino ražotāja mikrokontroleru plates ir plates ar salodētu mikroprocesoru kopā ar savu atmiņu, ieejam/izejam, un darbībai nepieciešamam elektriskām komponentēm. Arduino ražotājs savas plates izmanto *AVR* arhitektūras mikroprocesorus ar iebūvētu atmiņu un ar procesoru noteikto ieeju/izeju skaitu. Ka operētājsistēmu Arduino mikrokontrolleri izmanto savu *Arduino C* valodu, kas ir balstīta uz *C++* valodas ar *Wiring framework* apvienojumu. 3D printeros izmantojas *Arduino Mega 2560* un *Arduino Due* plates, kas nodrošina nepieciešamu izvadu skaitu, nepieciešamu atmiņas daudzumu un plates formfaktoru (to var tieši apvienot ar *RAMPS* paplašināšanas plati) [25].

Darbā izmantojas *STM32* mikrokontroleru plates balstītas uz *ARM* mikrokontrolleriem [26]. Uz tam ir draiveru, soļu dzinēju, dzesēšanas sistēmas un dažādu devēju pieslēgvietas. Atsevišķi plātes vadībai bez datora pieslēgšanās pa *USB* vai citu protokolu tika izgatavotas vadību displeji ar iebūvētu sensoru vai pogu vadību. Kā *Flash* atmiņu tādas sistēmas izmanto arējus datu nesējus (*USB* atmiņas kartes, *SD* kartes, cietus disku un citas). Kā

programmnodrošinājums tādām platēm tika izveidota Marlin atvērta koda programmatūra balstītā uz Arduino platformas. Marlin programmas valoda ir C++. Kaut arī Marlin kļuva par standartu 3D druka, to var pielietot arī CNC un lāzerešanas mašīnu izgatavošanai [27].

Promocijas darbā eksperimentālā daļā izmantojas sistēmas balstītas uz kompakto datoru vadību, kā *Raspberry Pi* risinājumi, balstoties uz ARM arhitektūras mikroprocesoriem, bet atšķiras ar programmatūras daļu, jo darbojas uz atsevišķas operētājsistēmas balstītas uz Linux kodola operētājsistēmas, kas nosaukta *Raspberry Pi OS*. Tomēr ir iespēja instalēt Klipper 3D operētājsistēmu, kurā var vienlaikus kontrolēt vairākas mikrokontrolera plātes [28].

2.10. 3D printeros izmantojamie devēji un palīgiekārtas

2.10.1. Temperatūras noteikšana

Precīzā temperatūras noteikšana uzkaršējamam galdam, sprauslai, apkārtējai videi ir viens no galvenīgākajiem parametriem, ko nepieciešams kontrolēt FDM 3D printeros. Nepareiza temperatūras izvēle var pilnīgi sabojāt izgatavojamo objektu. Uzkaršējamam materiālam ir noteikti temperatūrā limiti, kuros var izmantot materiālu. Ja sprauslas temperatūrā būs pārāk maza materiāls paliks ciets un netiks izspiests no sprauslas, ja temperatūra būs pārāk liela materiāls sāks degt un kristalizēties. Jo precīzākā ir temperatūras kontrole, jo viendabiskāk un kvalitatīvāk izgatavosies drukājams objekts.

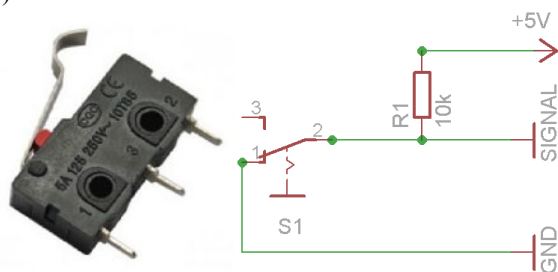
FDM 3D druka temperatūras noteikšanai izmanto termistorus. Termistori ir lēti divvadu ātrie temperatūras devēji. Termistora darbības princips balstās uz pretestības izmaiņām atkarībā no temperatūras. Izmantojas divu veidu termistori *NTC* un *PTC*. *NTC* termistoros pretestībā samazinās paaugstinoties temperatūrai un otrādi *PTC* termistoros pretestībā pieaug pieaugot pretestībai. Termistoru darbībā nav lineāra, piemēram, *NTC* termistoriem pretestībā palielinās ātrāk samazinoties temperatūrai un palielinās lēnāk palielinoties temperatūrai. Termistori darbojas temperatūras diapazonā no -100 līdz 300 °C un pretestības diapazonā no 10^{-2} līdz 10^5 Ohm.

Termistora vieta var izmantot termopāri. Termopāris ir temperatūras noteikšanas devējs, kur ir salodēti divu dažādu materiālu vadi. Termopāri tiek izmantots *Zebeka* efekts - metālu kontakta vieta ir dažādi potenciāli un uz nesavienotiem vadu galiem, kuri atrodas cita temperatūrā rodas elektrodzinējspēks (*EDS*). To izmantošanai nepieciešams izmantot sprieguma pastiprinātājus un tos ir grūti kalibrēt, kaut arī tie darbojas pie lielākām temperatūrām.

Vēl viens variants ir izmantot pretestības termometrus (*RTD*). To darbības princips balstās uz materiāla pretestības izmaiņām atkarībā no temperatūras. Pretestības termometros pielieto platīnas, vara un niķeļa vadus. Parasti izmantojas *RTD* ar 10, 100 vai 1000 Ohm pretestību pie 0 °C temperatūras. Parasti 3D drukā izmantojas *NTC100K B3950* un tam līdzīgi termistori, ka arī *PT100* un *PT1000* pretestības termometri.

2.10.2. Pozīcijas noteikšanas devēji

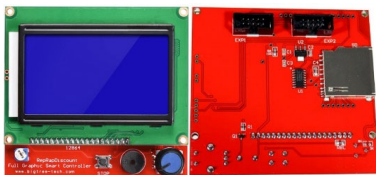
3D drukā nepieciešams zināt kur tieši atrodas kustīgie elementi, lai varētu precīzi pozicionēt drukas elementus attiecīgi citu elementu atrašanās vietas. Pretējā gadījumā kustīgie elementi var pārsniegt sava darba diapazona robežas un nebūt precīzi nopozicionēti. Attiecīgi katrai kustīgai ass nepieciešams noteikt elementu gala pozīciju, kuru var saukt par nulles koordinātēm. Šīm nolūkam izmanto limita devējus jeb gala slēdžus. Gala slēdži var būt izpildīti dažāda veida: optiskie, mehāniskie, magnētiskie, bet to galvenais uzdevums ir signalizēt mikrokontrolleram par soļu dzinēja kontrolējamā objekta galapunkta sasniegšanu. Gala slēdža darbības princips ir vienkāršs un atgādina pogu, kad tā nav uzspiestās signāls nepadodas, kad poga ir uzspiesta, uz mikrokontrollera ieeju padodas 5V signāls, kur mikrokontrollera vadības programma sāk izpildīt instrukcijas dzinēja apstādināšanai un pozīcijas noteikšanai. Lai nodrošinātu ka signāls netiks padots pirms poga ir uzspiesta izmanto pieslēgšanu pie GND zemējumā kontakta un 10K Ω rezistoru (2.17.att.).



2.17.att. Mehāniskais gala slēdzis un tā elektriska shēma.

2.10.3. Informācijas ievadišana un izvadīšanā (I/O)

3D printeru vadībai nepieciešams ievadīt un dabūt datus, attiecīgi lai to paveiktu galvenokārt izmanto dažādā veida LCD ekrānus ar iebūvētiem vadības elementiem (pogām, potenciometriem, skārienjutīgiem ekrāni un citi) (2.18.att.). 3D printeros informācijas nolasīšanai no datu nesējā izmanto SD karšu un USB flash atmiņas datu nesējus. Datoru pieslēgumā izmanto USB, microUSB protokolus. Atsevišķi var izdalīt bezkontakta printera vadību izmantojot Wi-Fi un Bluetooth protokolus. Lai izmantotu tādus komunikācijas tipus šīm funkcijām nepieciešams būt paredzētam ar mikrokontrollera vadības plates ražotāju. Tādā mikrokontrollera plates izvēlēs laika nepieciešams izvēlēties ne tika tehniskus parametrus kā mikrokontrollera darbības ātrums, atmiņas apjoms, darba spriegums, bet arī papildu funkcijas ērtai 3D printera vadībai.



2.18.att. LCD 12864KBA ekrāns ar iebūvēto SD karšu lasītāju, pogu un potenciometru.

3. MODEĻA SAGATAVOŠANAS METOŽU IZPETE FDM 3D DRUKAI

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

Neskatoties uz to kā 3D drukai ir lielā perspektīvā un tā kļūst ar vien populārākā, pašreizējā momenta tai ir daudz ierobežojumu. Kad nepieciešams izgatavot detaļas ar sarežģīto formu, kur ir daudz pārkāres elementu ar lielo leņķi parasti ir izmantots balsta palīgmateriāls. Tādos gadījumos nepieciešama papildu apstrāde. Tas atņem laiku, palielina izmaksas un pazemina izgatavojama objekta virsmas kvalitāti. Problēmas risināšanai bija pētītas dažādas metodikas, kā palīgmateriālā atbalstu formas izmaiņas, citu materiālu izmantošana un jaunu materiālu izpētē, drukas parametru maiņa, tomēr rezultāta problēmā netika risināta. Problēmas būtībā ir paša sākotnējā objekta orientēšanā vidē un to sagatavošana un sagriešana, jo jebkurā 3D drukas tehnoloģijā ir nepieciešams pareizi izvietot objektu tā, lai griešanas posma nebūtu elementu kuri atrodas gaisā vai to druka ir ar daudziem pārkāres elementiem, kuri drukājas ar tādu leņķi kuru printeris nevar izdrukāt. Viss drukas process tiek kontrolēts ar CAD programmatūras iepriekš definētiem parametriem, tātad nepieciešams pievērst lielāko uzmanību modeļu izvietojumam telpā, sagatavošanai un griešanai.

3.2. Esošo 3D modeļa griešanas metožu izpēte

Uz doto brīdi momenta eksistē trīs 3D modeļa griešanas metodes: tradicionālā, daudzvirzienu un neslāņains (*non-layerwise*) (3.1.tab.). Tradicionālā modeļa griešanas metode sagriež modeli vienāda slāņu biezuma paralēli drukas galdam, vai noteikta taisnas līnijas virziena ,rezultāta veidojot virkni ar paralēli izvietotiem slāņiem Tradicionālā griešanas metode labi piemērota vienkāršiem objektiem, kur nav pārkāres un citu sarežģīto elementu.



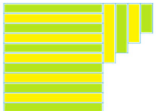


No šī metodes izriet nākamā metode – adaptīvā griešana. Tajā modelis joprojām tiek sagriezts viena konkrētā virziena, tomēr katrā slāņa biezums ir mainīts attiecīgi objekta ģeometrijas sarežģītībai. Adaptīvā metode dod iespēju iegūt labāku kvalitāti drukājot objektus ar ne īpaši sarežģītu ģeometriju,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

Gadījuma ja objektam ir kompleksa forma un daudz pārkāres elementu modeli var sadalīt ņemot vērā šo papildelementu virzienu un atsevišķus elementus sagriezt izdevīgākā virzienā, tādu griešanas veidu sauc par daudzvirziena griešanu. Jā objektam nav izteiktas formas un citas griešanas metodes nedarbojās pielieto neslāņaino griešanas metodi. Pašreizējā momenta griešanas metodes ir virzītas uz drukājamā objekta virsmas kvalitātes uzlabošanu un palīgmateriālā mazāko izmantošanu. Darbā ir pētītas esošas objektu griešanas metodes un piedāvātā sava metode, bastotā uz neslāņainas griešanas metodes, kā

uzlabot nē tikai drukājamo objektu virsmas kvalitāti, bet arī uzlabotu objektu mehānisko izturību pret dažādā veida slodzēm.

3.1.tabula

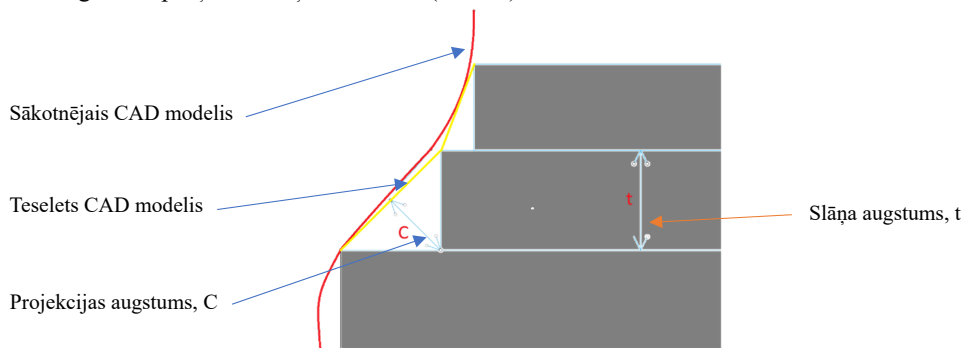
Eksistējošas 3D modeļu griešanas metodes

Nosaukums	Attēls	Apraksts
Tradicionālā metode		Sagriež modeli uz paralēliem vienādā biezuma slāņiem; Visizplatītākā un pielietojamākā metode; Viegli izmantojama un universālā metode; Zema precizitāte; Nepieciešams izmantot daudz palīgmateriālā; Maza precizitāte; Ļoti slikti druka pārkares;
Adaptīva metode		Atkarībā no objekta formas lokāli maina slāņu biezumu vietas ar dažādiem elementiem izmantojot kontūru ekstrapolāciju; Palielinātā precizitāte ārējos perimetros; Labākā objekta virsmas kvalitātē; Slikti druka pārkares;
Daudzvirzienu metode		Sadala objektu uz atsevišķiem elementiem un katram elementa izvēlas optimālo griešanas virzienu; Nepieciešams izmantot mazāk balsta materiālā; Grūti izmantot un nepieciešama uzraudzība;
Nekārtainas metodes		Automātiskā pārkares elementu noteikšana; Izmanto centrālo ass objektu sagriešanai cilindriskā koordinātu sistēmā; Nav nepieciešams izmantot palīgmateriālu;
Koniska metode		Slāņi ir sagriezti leņķī, parasti konusveida vai konusveida formā. Izmanto, lai samazinātu slāņa līniju redzamību galīgajā drukātajā objektā, tādējādi nodrošinot vienmērīgāku virsmas apdari. Var drukāt pārkares bez balsta materiāla.

3.3. Tradicionālas metodes izpēte

Tradicionālā metode ir pirmā modeļu griešanas metode, kura bija paredzētā 3D drukas tehnoloģijai. Griešanas programma sagriež CAD modeli uz paralēliem slāņiem kuru biezums ir iepriekš definēts ar lietotāju. Lietotājs pats izvēlas objekta orientāciju telpā, izvēlas mālu ar kuru objekts gulēs uz drukājamā galda, tādā veida pats definē griešanas virzienu. Tradicionālā metodē objekta sākotnēji pielieto teselācijas apstrādi, kas ir ģeometriskā modeļa sadalīšanas process daudzos mazos taisnos trīsstūros. Tradicionālā metode izmanto projekcijas augstuma noteikšanas metodi, kur projekcijas garums tiek aprēķināts ka maksimāls attālums C starp

iepriekšējo slāni un normāli. Lietotājs izvēlētas maksimālo projekcijas augstumu C_{max} un attiecīgi tiek aprēķināts slāņa biezums t (3.1.att.).



3.1.att. Projekcijas augstuma noteikšana CAD modelī [29].

Izmantojot tradicionālo modeļa griešanas metodi rodas kāpņu efekts, kad uzliekot katru nākamo slāni uz iepriekšējo slāņu malas veido perpendikulāro pareju no viena slāņa pie otra un drukas rezultātā uz modeļa virsmas veidojas kāpnes. Rodas problēma, kad teselejojot objektu drukātais profils Q nevar atkārtot CAD modeļa ģeometriju P (3.2.att.). Attiecīgi eksistē trīs varianti ka var sagatavot modeli:

1. Drukātais profils ir iekļauts CAD modelī (3.1):

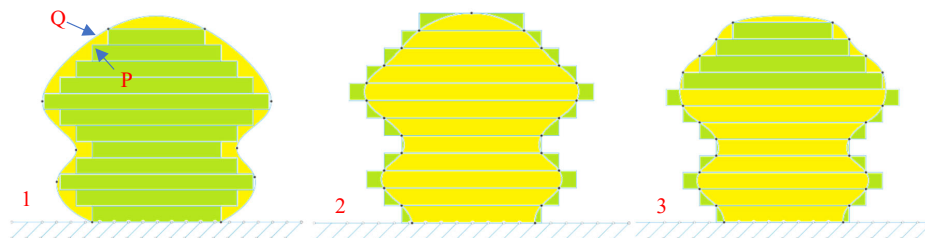
$$Q \subseteq P \quad (3.1)$$

2. CAD modelis ir iekļauts drukāta profilā (3.2):

$$P \subseteq Q \quad (3.2)$$

3. Vidējais variants, kad kāda objekta daļa ir iekļaut, bet kāda nav iekļauta (3.3):

$$P \not\subseteq Q \text{ un } Q \not\subseteq P \quad (3.3)$$



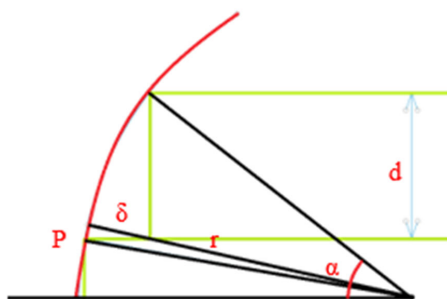
3.2.att. Drukātā objekta ievietošanas problēmā un kāpņu efekts.

Tradicionāla metode ir tieša un viegli realizējama, padarot to pieejamu 3D drukas iesācējiem. Šī metode ir atbalstīta dažādās 3D drukas programmās un iekārtās, nodrošinot saderību ar dažādiem sistēmu veidiem. Tā ietver vienkāršu slāņu-pēc-slāņa pieeju, tā var rezultēt ātrākām apstrādes laikiem salīdzinājumā ar sarežģītākām slāņošanas metodēm. Tomēr šī metode var radīt vairāk pamanāmas slāņu līnijas uz izdrukātā objekta, ietekmējot virsmas kvalitāti un iespējams prasot pēc apstrādi gludākam rezultātam. Atkarībā no slāņu orientācijas, pamatslāņošana var rezultēt samazinātu izturību un noturību izdrukātajā detaļā, it īpaši

objektiem ar sarežģītu ģeometriju. Ir nepieciešams izmantot balsta struktūras, palielinot materiāla izmantošanu un radot izaicinājumus balsta materiāla noņemšanas laikā.

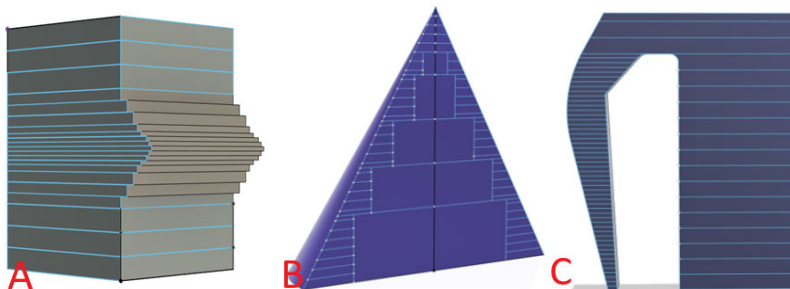
3.4. Adaptīvas metodes izpēte

Adaptīva griešanas metode ir metode, kura balstās uz 3D modeļa ģeometrijas sarežģītības analizēšanu, kas dinamiski pielāgojas objekta ģeometrijai, lai palielinātu efektivitāti, samazinātu materiālu izmaksas un uzlabotu izgatavoto detaļu kvalitāti. Lietotājs joprojām izvēlas griešanas virzienu, bet ļauj algoritmam novērtēt smalkas detaļas, izņemt liekos elementus un izcelt vietās, kur nepieciešama palielināta izšķirtspēja. Metode izmanto parametru dinamisku regulēšanu, kas ietver slāņa biezuma, drukas ātruma un ekstrūdera temperatūras reāllaika pielāgošanu, nodrošinot optimālus apstākļus katram modeļa segmentam. Adaptīvā metode izmanto *kontūrā ekstrapolācijas* metodi. Metode izmanto iepriekšējo slāņa ekstrapolāciju un izmanto sfēru nākamā slāņa virsmas aprēķināšanai (3.3.att.), bet slāņa augstums tiek aprēķināts ar šīs sfēras iepriekš iestatīto projekcijas augstuma pielāgšanas parametriem. Kad tiek identificēti apgabali ar kontūru izmaiņām, kontūru ekstrapolācijas metode ļauj dinamiski mainīt šo kontūru parametrus. Piemēram, sienas biezumu var palielināt vai samazināt atkarībā no vietnes īpašībām. Otrs paņēmieni ir izmantot *divvirzienu interpolāciju*, kad sakuma modelis ir sagriezts uz vienādiem maksimālā biezuma slāņiem un tālāk vietas, kur nepieciešama detalizācijā atsevišķi slāņi tiek sagriezti mazākos slāņos. Arī var būt pielietojama lokāla adaptīva metode Vēl viens paņēmieni ir *precīzu perimetru un ātras aizpildīšanas* izmantošana, kad visi ārējie slāņi tiek aprēķināti un drukāti ar lielāku precizitāti un mazāku slāņa biezumu nekā iekšējie objekta slāņi, tādā veida samazinot kopējo objekta drukas laiku. Un pēdējais paņēmieni ir izmantot *lokālo griešanu*, kad vienā augstuma slāņiem tiek pielietota lokālā slāņa biezuma izmaiņā. Tādā veida var noteikt objekta atsevišķus reģionus ar sarežģītu ģeometriju un pielietot lokālo adaptīvu griešanu, lai nepazaudēt objekta kvalitāti, vienlaikus samazinot drukas laiku (3.4.att.) [30].



3.3.att. Kontūra ekstrapolācijas metode [30].

kur d – slāņa biezums, mm;
 α – leņķis, °
 r – sfēras rādiuss, mm
 δ – projekcijas garums, mm
 P – sfēras kontūrs

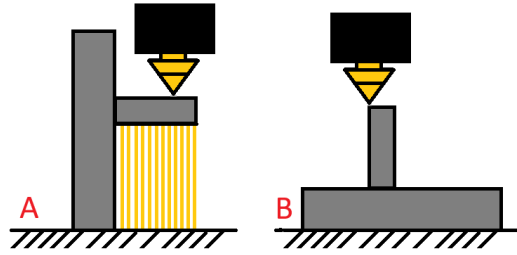


3.4.att. Adaptīvas griešanas metodes paņēmieni un to izmantošana:
 (A) Divvirzienu interpolācijas metode, (B) precīzu perimetru un ātras aizpildīšanas metode,
 (C) lokāla adaptīva griešanas metode [31].

Adaptīvas griešanas metodes izpētes rezultātā var secināt kā to pielietojums dod efektīvu laika un materiālu optimizāciju, paaugstinot precizitāti un izdrukāto detaļu kvalitāti. Dod materiālu ekonomiju, kontrolējot aizpildījuma un balsta veidošanu tikai nepieciešamajās vietās. Tas izmantošana uzlabo virsmas kvalitāti, pielāgojot drukas parametrus kritiskajiem modeļa segmentiem. Kā arī dod mehānisko īpašību uzlabošanu un izstrādājumu izturību. Tomēr adaptīvās metodes izmantošana var prasīt papildu skaitļošanas resursus, kas var palielināt laika izmaksas. Adaptīvajiem griešanas metodēm var būt nepieciešams papildu laiks testēšanai un parametru pielāgošanai optimāliem rezultātiem. Nepilnīgi algoritmi var novest pie neprognozējamām vai neapmierinošām rezultātu situācijām, prasot papildu uzmanību un testēšanu.

3.5. Daudzvirzienu griešanas metodes izpēte

Daudzvirzienu griešanas metodes attiecas uz 3D drukāšanas metodēm, kurās objekta slāņi tiek sagriezti un drukāti vairākos virzienos, pretstatā tradicionālajai slāņošanai vienā virzienā. Šo metožu mērķis ir uzlabot dažādus drukāšanas procesa aspektus, tostarp virsmas kvalitāti, izturību un kopējo drukas kvalitāti. Viena no idejām ir drukāt pārkares bez balsta materiāla izmantojot drukas virziena maiņu un objekta pozīciju telpā (3.5.att.) [32]. Daudzvirzienu metode piedāvā mainīt drukas galvas pozīciju vai mainīt paša drukājamā objekta pozīciju telpā. Atšķirībā no tradicionālas sagriešanas, kurā visi slāņi ir orientēti vienā virzienā, daudzvirzienu sagriešana ļauj mainīt slāņu orientāciju. Tas var ietvert izmaiņas XY plaknē, kā arī izmaiņas Z ass virzienā. Mainot slāņu pielietošanas virzienu, vairāku virzienu sagriešana var samazināt slāņu līniju redzamību drukātā objektā. Tas veicina gludāku virsmu, īpaši izliektām vai sarežģītām ģeometriskām formām. Kā vel viens daudzvirzienu metodes paņēmieni ir sadalīt modeli mazākos elementos, kur katram elementam attiecīgi noteikt drukas virzienu un tāda veida sagatavot secību pēc kuras tiks drukāts objekts, un pēc visu virzienu noteikšanas objektam pielieto tradicionālas griešanas metodes [33].



3.5.att.Daudzvirzienu metodes izmantošanā: A. Pārkares drukai nepieciešams balsta materiāls; B Mainot objekta pozīciju drukas laikā nav nepieciešams izmantot balsta materiālu [31].

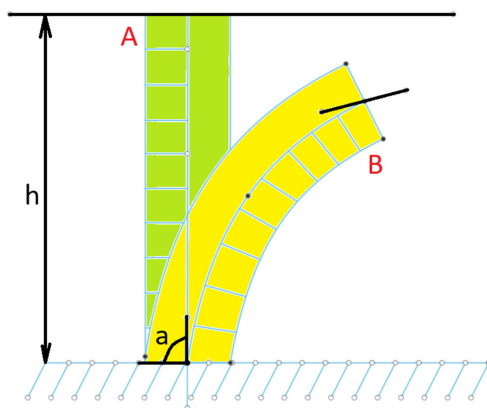
Tomēr daudzvirzienu sagriešanas ieviešana bieži ietver sarežģītākus algoritmus un programmatūru, lai noteiktu optimālo slāņa orientāciju dažādām modeļa sadaļām un šī sarežģītība var ietekmēt skaitļošanas prasības. Metode var piedāvāt mazākā balsta materiāla izmantošanu, vai vispār izvairīties no balsta materiāla, palielināt objekta virsmas kvalitāti un samazināt kāpņu efektu, kā arī palielināt objekta mehāniskās īpašības, jo slāņi var būt izlikti daudzos virzienos un pārklāties starp sevi [31].

3.6. Nekārtaina griešanas metodes izpēte

Dažādā veida slāņu metodes ir ierobežotas ar noteikta biezuma slāņu griešanas koncepciju un nepievērš uzmanību modeļa ģeometrijas īpašībām [34]. Attiecīgi slāņu metodes nav elastīgas un nevar pielāgoties kompleksam struktūrām, kā arī gandrīz visos gadījumos ir nepieciešams izmantot balsta materiālu. Savukārt, nekārtaina metodes piedāvā izvairīties no

balsta materiāla un uzlabot drukāto objektu virsmas kvalitāti [35]. Tomēr neeksistē kādas konkrētas nekārtainas metodes un šī kategorija ir apkopotas dažādas metodes, kas cenšas izvairīties no slāņu koncepta izmantošanas.

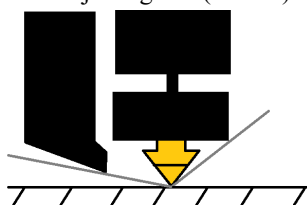
Viens no paņēmieniem ir G koda izliekšana izmantojot *Python* skriptu [36]. Šis paņēmieni pārvērš tradicionāli sagriezto modeļi izliekta modeļi, izlīdzinot to attiecīgi definētai līnijai ar vismaz diviem punktiem, kas iestatīja sākuma leņķi perpendikulāri drukas pamatnei un galu līdz tam, cik ir nepieciešams izliekt modeļi. Katrā slānī G kods tiek pārveidots attiecīgi virziena līnijas leņķim. Vienlaicīgi tiek regulēts materiāla padošanas plūsmu, jo izliekumu iekšpusē slāni kļūst tuvāki, bet izliekumā ārpusē kļūst biezāki, tātad nepieciešams aprēķināt materiāla plūsmu visu laiku, arī viena slāņa iekšpusē (3.6.att.). Vienlaicīgi nepieciešams regulēt virziena līnijas garumu, jo *Python* skripts pārveido visu modeļi un ja modeļa augstums nesakrīt ar virziena līnijas garumu, tad modelis tiks deformēts .



3.6.att. G koda izliekšanas skripta darbība.

(A) G-kods pirms izliekšanas; (B) G-kods pēc izliekšanas [37].

Viens no trūkumiem, kas piemīt G koda izliekšanas skriptam ir 3D printera drukas galvas uzbūve. Galvenokārt šo metodi ierobežo attālums no drukas sprauslas līdz citiem drukas galvas elementiem, attiecīgi galvenais parametrs kas ļauj izmantot šo modeļus griešanas metodi ir leņķis starp drukas sprauslu un uzkaršējamo bloku un pašas sprauslas garums un forma [38]. Pārsvārā vairākums FDM tehnoloģijas 3D printeri izmanto standartizētas drukas sprauslas, kurus var iedalīt pēc vītnes garuma un diametrā, un pievienošanas veida pie uzkaršējamā bloka. Pašreizējā momenta drukas sprauslas pārsvārā tiek sadalītas pēc to ražotājā, MK8 E3D V6, BambuLab, tomēr visas sprauslas ir kopumā līdzīgas un to garums ir standartizēts. Attiecīgi G-koda izliekšanas metodes izmantošanai nepieciešams mainīt sprauslas uz paštaisītam vai specializētam [6]. Tas ļoti apgrūtinā šī metodes izmantošanu, jo šī metodes izmantošanas laikā 3D printera drukas galva tiek aktīvi pārvietota Z virzienā, kas nav paredzēts ar 3D printeru ražotajiem un drukas galvas elementi var aiztikt drukājamo objektu, kas rezultātā deformēs objektu, vai objekts tiks atvienots no drukājamā galdā (3.7.att.) .



3.7.att. 3D printera fiziskais ierobežojums izmantot G koda izliekšanu [6].

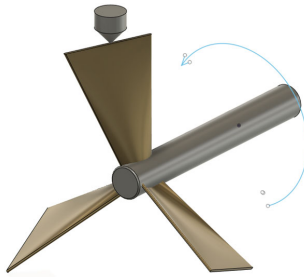
Kā šī metodes turpinājums bija izveidota pārkāres struktūras segmentācijas metode. Tas galvenā atšķirība kā 3D modelis tiek segmentēts vairākos atsevišķos segmentos, kur katram segmentam tiek atsevišķi aprēķināts pārkāres leņķis uz kuru šis segments būs izliekts. Kā šī metodes rezultāts ir izveidots detaļas kurai nav kādas vienas centrālas līnijas, bet katram segmentam ir sava atsevišķa. Tas dod iespēju izlikt objektu uz jebkuru leņķi un jebkurā vietā un nākamā segmenta leņķis nav atkarīgs no iepriekšēja segmenta. Gadījuma ja nav pārkāres ir aprēķināts sākotnējais virziens un jā nākamā segmentā parādās pārkāre, tad metode aprēķinā

tas garumu un leņķi un attiecīgi maina segmenta drukas leņķi (3.8.att.) [37]. Pēc modeļa sadalīšanas uz segmentiem, katrs segments tiek apgriezts ar tradicionālo metodi un pēc sagriešanas sagatavots modelis apvienojas vienā. Šī metode efektīvi novērš problēmu ar pārkarēm, tomēr tai piemīt tādas pašas problēmas kā G kode izliekšanas metodei. Nepieciešamībā mainīt 3D printera konstrukciju un sprauslas garumu, kas attiecīgi samazina sprauslas spēju efektīvi uzkarstēt materiālu, attiecīgi ir nepieciešams palielināt drukas temperatūru un joprojām sprauslai temperatūras sadalījums nav viendabīgs. Šo problēmu var risināt CHT tipa sprauslas, kurām ir izveidota iekšējo kanālu struktūra labākai materiālā uzkarstēšanai visā sprauslās garumā, tomēr garākās sprauslas kuras izmanto CHT tehnoloģiju masveidā ražošana nav sakusies un iegādāties vai izveidot savu sprauslu ir liels ierobežojums šī griešanas metodes izmantošanai [39].



3.8.att. Ar pārkares struktūras segmentācijas metodi sagriezts modelis [37].

Nākama nekārtaina griešanas metode ir balstīta uz cilindriskās koordinātu sistēmas izmantošanu un ir saukta par cilindrisko koordinātu griešanas metodi [40]. Šī metode bija paredzēta 6 asu robotizētai rokai saistītai ar 2 asu rotējošo galdu. Ideja ir uz rotējošas pamatnes drukāt bāzes elementu uz kurā stiprināsies dažādā veida pārkares elementi. Metode ir balstīta uz daudzvirzienu griešanas metodes, kad objekts ir sadalīts uz atsevišķiem elementiem [33]. Kā viens no piemēriem ir propellers, kur sākotnēji tika izdrukātā propellera pamatne un tālāk uz rotējošas pamatnes bija izdrukātas propellera lāpstiņas (3.9.att.). Pēc modeļa sadalīšanas uz pamatni un pārkares elementiem, pamatne tiek drukātā ar tradicionālo metodi, bet kad nepieciešams drukāt pārkares elementus par to pamatni tiek uzskatīts pamatnes elements. Abiem elementiem nepieciešams būt cieši apvienotiem starp sevi un jāietver vairākas kopīgas malas [41].

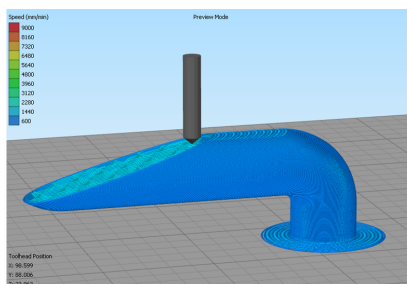


3.9.att. Cilindrisko koordināšu griešanas metodes drukājams objekts, kur pārkāres ir drukātas uz propellera pamatnes [42].

Cilindrisko koordināšu griešanas metode piedāvā izvairīties no balsta materiāla un dabūt detaļas ar perfekto virsmas kvalitāti, un vienlaicīgi daļēji izvairīties no struktūras segmentācijas galvenā trūkumā – lielas atstarpes nepieciešamības starp drukājamo objektu un drukas galvas elementiem. Rotējošas platformas būtības dēļ drukājams objekts pagriežas un vienlaicīgi nolaižas pagriežoties pamatnei, tādā veidā objekts netiks aiztikts ar drukas galvas elementiem un sprauslu. Tomēr izmantojama drukas aparatūrā, kad drukai nepieciešams izmantot gan robotizēto roku gan daudzu asu kustīgo galdu, ir ļoti sarežģītā un nevar tikt izmantota pārsvarā gadījumos, attiecīgi zaudē savas priekšrocības sarežģītas izmantošanas dēļ.

3.7. Koniskas griešanas metodes izpēte

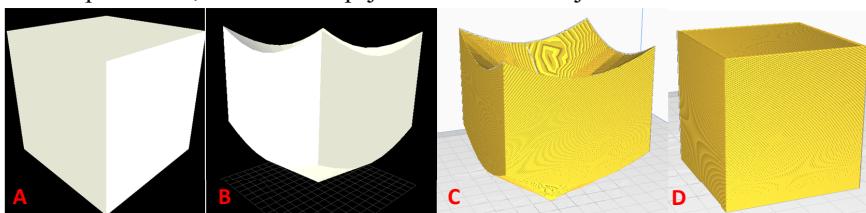
Viens no jaunākajām metodēm, kura risina horizontālo pārkāres druku ir koniska griešanas metode. Metodes darbības princips ir balstīts uz to kā griešanas laikā slāņi ir nobīdīti uz kādu noteiktu leņķi no drukas galda un slāņi tiek sagriezti pēc koniskas formas ar konusu iz iekšējo vai ārējo pusi. Drukājot pārkāres modeļa perimetri kuri drukājas gaisā ir savienoti ar iepriekšējā slāņa perimetriem. Tāda pieeja izliekams materiāls pielīp pie iepriekšējā slāņa materiāla un tas dod iespēju drukāt pat līdz 90 horizontālas pārkāres bez balsta materiāla (3.10.att.). [43].



3.10.att. Ar konisko griešanas metodi horizontālo pārkāres elementu un slāņu uzlikšanas piemērs Simplify3D programmā [43].

Ka viens no pirmajiem prototipiem bija printeris, kura drukas galva ir pagriezta uz 45° leņķi un visi slāņi tiek uzlikti ar 45° nobīdi. Modelim tiek definēts centrālais ass, ap kuru ir sagriezts modelis un visi slāņi tiek uzlikti koniskā formā.

Koniskas griešanas metodes pamata ir modeļa pārveidošanas process pēc koniskas formas kurš ir saukts par T transformāciju, kur ir noteikts uz kuru virzienu būs sagriezts modelis (uz centru vai no centra), tiek definēts griešanas leņķis, uzdota precizitāte un aprēķinu iterācijas skaits. Otrais posms ir kad ar T transformāciju pārveidots modelis tiek sagriezts ar tradicionālo griešanas metodi, tas ir parasts process ko var pielietot jebkurā griešanas programmā. Pēc koniska modeļa sagriešanas G-kods tiek pārveidots atpakaļ pie sākotnējā modeļa izskata, ko sauc par T^{-1} transformāciju. Visu pārveidojumu rezultātā tiek iegūts sagriezts modelis, kur slāņi ir nobīdīti uz iepriekš uzdoto leņķi. Viss process ir parādīts 3.11.att.. Tādā veida sagatavotā modelī slāņi tiek uzklāti pēc koniskas formas ar mainīgu Z augstumu, kas dod labāku slāņu saķeri un pārklāšanos starp sevi. Koniska metode dod iespēju drukāt detaļas ar labāko virsmas kvalitāti, jo mainās slāņa uzklāšanas virziens, kas dod izvairīties no radiālo perimetru uzklāšanas problēmas, ka arī dod iespēju drukāt neizmantojot balsta materiālu.



3.11.att. Pēc koniskas griešanas metodes kuba modeļa sagatavošanas piemērs.

(A) STL formāta 3D modelis; (B) STL modelis pēc T transformācijas; (C) Transformēts modelis sagriezts ar tradicionālo metodi; (D) Atpakaļ ar T^{-1} transformēts sagriezts modelis [43].

Koniska griešana var būt pielietota arī priekš eksistējošiem FDM 3D printeriem, tomēr rodas drukas galvas klirensa problēma, līdzīgi kā iepriekšējā metodē. Attiecīgi ir nepieciešams samazināt slāņu leņķi attiecība pret drukas galdu. Koniskas metodes izmantošana eksistējošos 3D risinājumos ir liela perspektīvā, jo nav nepieciešams pārtaisīt printera elementus, kā arī modeļa sagatavošana nav tik sarežģīts process, tomēr pagaidām eksistējošas 3D modeļu griešanas CAD programmas nepiedāvā konisku griešanas metodi kā vienu no alternatīvam un lietotajam pašam nepieciešams izmantot Python skriptus, lai sagatavotu modeli drukai, un šis process nav vienkārši saprotams parastam lietotajam, jo nepieciešams veikt daudzus soļus un jebkurā posma var satikties ar problēmām.

3.8. Esošo FDM drukas ierobežojumu, izaicinājumu un problēmu izpēte

3.8.1. Slāņaina drukājamo objektu struktūra

Kā viens no izplatītākiem FDM drukas ierobežojumiem ir slāņu struktūras izmantošana. Slāņu izmantošana 3D drukā bija piedāvātā ka viena no pirmām 3D drukas metodēm, tomēr to izmantošana vienlaicīgi un ir 3D drukas ierobežojums.

Tradicionāla sagriešanas programma sadala 3D modeli horizontālos slāņos turpmākai drukāšanai un slāņu struktūras izmantošanas laikā rodas vizuāli defekti, kas parādās kā pamanāmi horizontāli slāņi uz apdrukāto objektu virsmas. Tas rada pamanāmas līnijas, īpaši uz objekta vertikālajām virsmām. Drukājot objektu slāni pa slānim, tiek parādītas redzamas slāņu

robežas. Šis efekts ir pazīstams arī kā "kāpņu efekts", jo tas ir vizuāli līdzīgs pakāpju formai. Atkarība no slāņa biezuma, slāņojums būs pamanāmāks, ja biezums būs lielāks. Nepietiekama slāņu saplūšana var izraisīt sliktu stiprību un robežu redzamību starp slāņiem. Nepareiza griešana var radīt redzamus slāņus uz izliektām virsmām, kas samazina apdrukātā objekta estētiku.

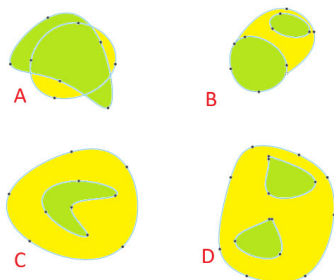
Slāņu struktūras problēmu risināšanai izmanto slāņa biezuma optimizēšanu. Ir iemantota optimālā slāņa biezuma izvēle atkarībā no kvalitātes un drukas laika prasībām. Piemēram, lai izveidotu vienmērīgākas pārejas nepieciešams samazināt slāņa biezumu, kas prasa papildu kalibrēšanu un var palielināt drukāšanas laiku. Lai palielinātu drukas kvalitāti un vēl vairāk novērstu kāpņu efektu izmanto adaptīvās griešanas tehniku, kas maina drukas parametrus atkarībā no objekta ģeometrijas, kas Izlīdzina pārejas starp slāņiem. Ja drukāta objekta kvalitāte neapmierina un to nevar novērst ar printera iestatījumiem izmanto pēcapstrādes instrumentus piemēram, slīpēšana, lai vēl vairāk izlīdzinātu virsmu, kur var būt nepieciešamas papildu darbības.

Vēl viens variants ir izmantot citas griešanas metodes, kā apskatītas paragrāfā 4.4-4.6.. Koniskā griešanas izmantošanas laika tā maina griešanas leņķi atkarībā no objekta ģeometrijas, kas var izlīdzināt pārejas starp slāņiem, un samazina slāņu redzamību uz izliektām un izliektām virsmām. Tomēr koniskas griešanas izmantošana var palielināt drukas laiku, un, lai iegūtu optimālus rezultātus, nepieciešama rūpīga kalibrēšana

Kopumā izmanto kombinēto pieeju, lai izvairīties no starpslāņu pārejas redzamības. 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. Nepieciešama neironu tīklu metožu pielietošana, lai neironu tīkli varētu optimāli atlasīt sagriešanas parametrus katram objektam. Neplakanas griešanas metodes nodrošina daudzsoļus risinājumus 3D drukas kvalitātes uzlabošanai, samazinot slāņu redzamību un veidojot gludākas virsmas [44].

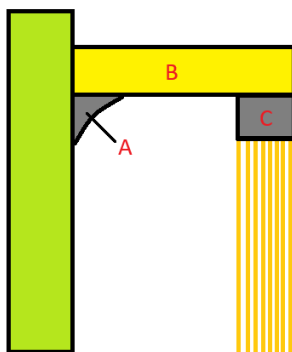
3.8.2. Pārkares un balsta materiāla izmantošana

Pārkares ir objekta daļas, kas izvirzītas gaisā bez tieša balsta no iepriekšējā slāņa. 3D drukas laikā rodas gadījumi, kad sarežģītas drukājama objekta struktūras dēļ daļa no elementiem tiek drukātā gaisā ar noteikto leņķi. Vairākās griešanās metodēs izmanto balsta palīgmateriālu, lai stabilizētu izvirzījumus drukas procesa laikā, un lai pārkares elements drukātos uz balsta materiāla. Pārāk stāvi pārkares leņķi var radīt grūtības ar atbalstu un stabilizāciju. Pārkares var klasificēt pēc elementu ietveršanas kontūrā un pēc atbalstu izmantošanas tipa. Klasifikācijā pēc kontūra sadalās pēc tā kā nākama slāņa kontūra elementi tiek ietverti iepriekšēja slāņa kontūrā un tiek definēti 4 tipi attēloti 3.12.att.: (A)fragments, (B)sarežģīts fragments, (C)vienīgs kontūrs vai gredzens un (D)sarežģīts gredzens [45].



3.12.att. Pārkares elementu klasifikācija pēc kontūra veida [31].

Pēc balstu izmantošanas tipa izšķir 3 pārkares veidus, kas attēloti 3.13.att.: lejupejošs pagarinājums, mikro-pārkare un makro-pārkare [32]. Mikro pārkare ir elements, kur iepriekšēja slāņa ārējais perimetrs ir lielāks nekā iepriekšēja slānī. Tāda veida pārkares var drukāt bez balsta materiāla atkarība no slīpuma leņķa un materiāla īpašībām. Makro pārkares ir pārkares, kuras var drukāt bez balsta materiāla, ja pārkare būs sasaistīta ar citu drukājamo elementu, un ja tāda elementa nav, tad nepieciešams izmantot atbalstus. Lejupejošs pagarinājums ir pārkares veids kur elements nav saistīts ar pamata objektu un to nevar izdrukāt bez atbalstu izmantošanas [46].



3.13.att. Pārkares veidi: (A) mikro-pārkare, (B) makro-pārkare un (C) lejupejošs pagarinājums [32].

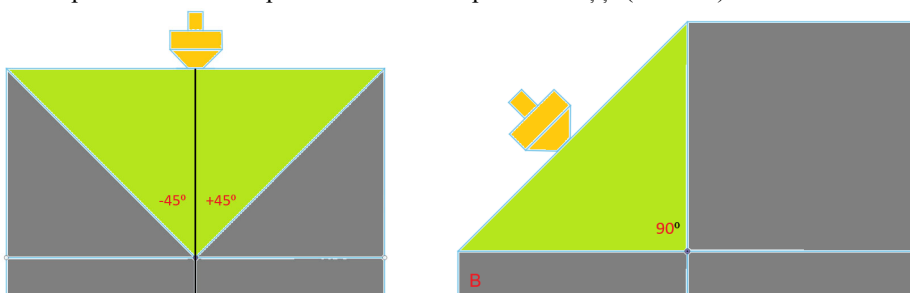
Balsta materiāls tiek izmantots, lai atbalstītu izvirzītās objekta daļas drukāšanas laikā, novēršot sabrukšanu gravitācijas dēļ. Pašreizējā momenta sagriešanas CAD programmās ir iekļauta funkcionalitāte, lai automātiski izveidotu atbalstus, pamatojoties uz objekta ģeometriju. Tomēr, balsta zīmes var atstāt redzamas pēdas uz drukas virsmas, kas prasa papildu apstrādi lai tās noņemt pēc drukāšanas. Izmanto arī drukājama modeļa izvietojuma optimizāciju, lai samazinātu pārkares leņķus, kas var samazināt vajadzību pēc balstiem, tomēr tas ierobežo drukājamo objekta izskatu, un nevar būt pielietojams sarežģītam objektu formām [47].

Problēmas risināšanai izmanto dažādas neplānas griešanas metodes, piemēram koniskas griešanas metode. Koniskā metodes pieejas pamatā ir pārkares elementu slīpuma leņķa maiņa, veidojot konisku formu. Šī metode uzlabo pārkares atbalstu un stabilitāti, samazinot sabrukšanas risku un samazinot nepieciešamību pēc balstiem. Tā samazina pārkares leņķa stāvumu, kas 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 un to ir rūpīgi jāpielāgo optimāliem rezultātiem, kas var prasīt laiku un pieredzi, un ir nepieciešams vairāk darba, lai optimizētu un kalibrētu šo metodi.

3.8.3. Materiāla uzlikšanas leņķis un drukas galvas attālums no drukas galda

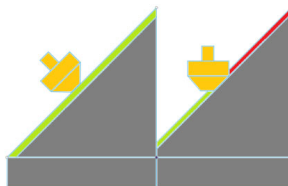
Pēc pārkares problēmas izpētes un piedāvāta risinājuma izmantot konisko griešanu rodas problēma saistīta ar pārkares elementu druku ar esošām 3D printera sprauslām. Esošām 3D printeru sprauslām ir koniska 45° leņķa forma un prasti tie ir izvietoti tieši perpendikulāri drukas galdam, sakara ar to kā rodas fiziskais ierobežojums pārkares drukas leņķiem. Dekarta tipa FDM 3D printeri var drukāt pārkares ar līdz 45° pārkares leņķi (3.14.att.).



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

(A) Perpendikulāri drukas galdam, (B) Ar 45° nobīdi [37].

Tas ierobežojums izriet no sprauslas uzbūves un novietojuma, kā arī no materiāla uzlikšanas veida. Šis ierobežojums stingri noteic kādā veidā un cik sarežģītas formas objektus var izdrukāt. Attiecīgi koniskas metodes drukas pielietojums ir ierobežots ar 3D printera konstrukciju un sprauslas esošs novietojums nedod efektīvi izmantot šo metodi, jo rodas problēma saistīta ar materiāla padošanu jeb ekstrūzijas problēma, kad sprausla arvien vairāk sāk vilkt pāri savam ekstrudētajam materiālam stāvos leņķos. (3.15.att.).



3.15.att. Koniskas drukas ekstrūzijas problēma [37].

Viens no paņēmieniem kā palielināt šo leņķi ir pagriezt sprauslu uz 45° leņķi, tādā 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 ar ekstrūzijas problēmu [43].

SECINĀJUMI

Pašreizējā momentā 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 optimizētiem griešanas algoritmu izmantošana var samazināt slāņu redzamību un uzlabot kopējo drukas kvalitāti, tomēr pilnība nerisina problēmas, attiecīgi nepieciešams izmantot jaunas kombinētas metodes, piemēram, daudzvirzienu sagriešanas un nekārtainas griešanas metodes, lai nodrošināt visaptverošākus un efektīvākus risinājumus. Galvenais faktors jaunu problēmu risināšanas metožu un paņēmieni izstrādē ir sistemātiska testēšana un eksperimentēšana, kā arī nepieciešama turpmāka 3D drukas un kalibrēšanas parametru optimizācija, lai sasniegtu labākos rezultātus. Koniskas vai cilindriskas nekārtainas griešanas metodes rada lielu potenciālu un piedāvā vairāk iespēju un šīs darba ietvaros tiks izmantotas un piedāvāti risinājumi balstīti uz šo metožu pamatiem. Kopumā FDM printeri nodrošina iespēju izveidot ortozes, kas ir pielāgotas pacienta anatomijai, kas atbilst medicīnisko ortožu pamatprasībai. Šī tehnoloģija ir salīdzinoši pieejama un ekonomiski izdevīga 3D drukas metode, kas var būt pievilcīga no ortožu izgatavošanas viedokļa, jo FDM 3D printeri ir ērti lietojami, un tiem ir vienkāršs dizains, kas atvieglo to apkopi un personāla apmācību. Tomēr, kārtainas struktūras dēļ esošie tradicionālā tipa 3D printeri nevar piedāvāt konkurētspējīgus mehāniskus parametrus salīdzinājumā ar citiem izgatavošanas paņēmieniem un tehnoloģijām, un nekārtainas griešanas izmantošana var nodrošināt konkurētspējīgu risinājumu, kā arī efektīvu un lētu izgatavošanu, kas var radikāli izmainīt situāciju tirgu un 3D drukas tehnoloģijas izmantošanu medicīnas jomā.

EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA

Izmantotais aprīkojums:

Iekārtas:

- FDM 3D printeris Creality Ender-3 V2 (*Creality, Ķīna*);
- SLA 3D printeris Anycubic Mono (*Anycubic, Ķīna*);
- Ciparu osciloskops TENMA 72-10510 25MHz 250MS/s (*Tenma, Japāna*);
- 3D skeneris EinScan Pro 2X Plus (*SHINING 3D, Ķīna*);
- 230VAC 50Hz barošanas avots;
- Ciparu stieņcirkulis *Parkside HG08763A*;
- Izod triecienizturības stends *CEAST Resil impactor* ;
- Lieces stipruma testēšanas stends *Instron 5965*;
- Bezkontakta infrasarkans termometrs Wintact WT700;
- Skaņas līmeņa mērītājs Sound Bee TFA;

3D printera prototipa materiāli:

- Slēgta tipa impulsu barošanas bloks LRS-350-12, 12V DC 350W 29A (*MeanWell, Taiwan*);
- Slēgta tipa impulsu barošanas bloks LRS-350-24, 24V DC 350W 14.6A (*MeanWell, Taiwan*);
- Mikrokontrollera vadības plāte Arduino Mega 2560 (Arduino, *Ķīna*);
- Mikrokontrollera vadības plāte Arduino Uno (Arduino, *Ķīna*);
- Strāvas devējs ACS712ELCTR-20A-T (*Allegro, ASV*);
- Mikrokontrollera plātes paplašināšanas plāte RAMPS 1.4 (*RepRap, Ķīna*);
- Mikrokontrollera vadības plāte Manta M8P 2.0 (*BIGTREETECH, Ķīna*);
- Soļu dzinējs NEMA 17 42-34 BJ42D15-26V12 0.8A 0.4N/m (Creality, *Ķīna*);
- Soļu dzinējs NEMA 17 42-40 42HS040DF260A-01 1,0A 0,4N/m (Creality, *Ķīna*);
- Soļu dzinēja draiveris A4988 (*Ķīna*);
- Soļu dzinēja draiveris TMC2209 (ADI Trinamic, *Ķīna*);
- Bimetāliska sprausla MK8 0.4mm (Creality, *Ķīna*);
- Misiņa sprausla MK8 0.4mm (Creality, *Ķīna*);
- Vara sakausējuma sprausla MK8 0.4mm (Creality, *Ķīna*);
- Plakana drukas galda paklājs flexplate-pārklāts ar PEI pūderi 235x235mm (PRIMACREATOR, *Ķīna*);
- Capricorn PTFE teflona caurule 1m 5 gab. (Creality, *Ķīna*);
- Aksiālais ventilators 3D printerim 4010 24V (Creality, *Ķīna*);
- Pūtēja dzesēšanas ventilators ar termināli 4010 24V (Creality, *Ķīna*);
- Keramiska kārtidžu karstuma caurule 12V 40W SM2.54 (Creality, *Ķīna*);
- 2GT 2000mm 6mm bieza zobsiksna (Creality, *Ķīna*);

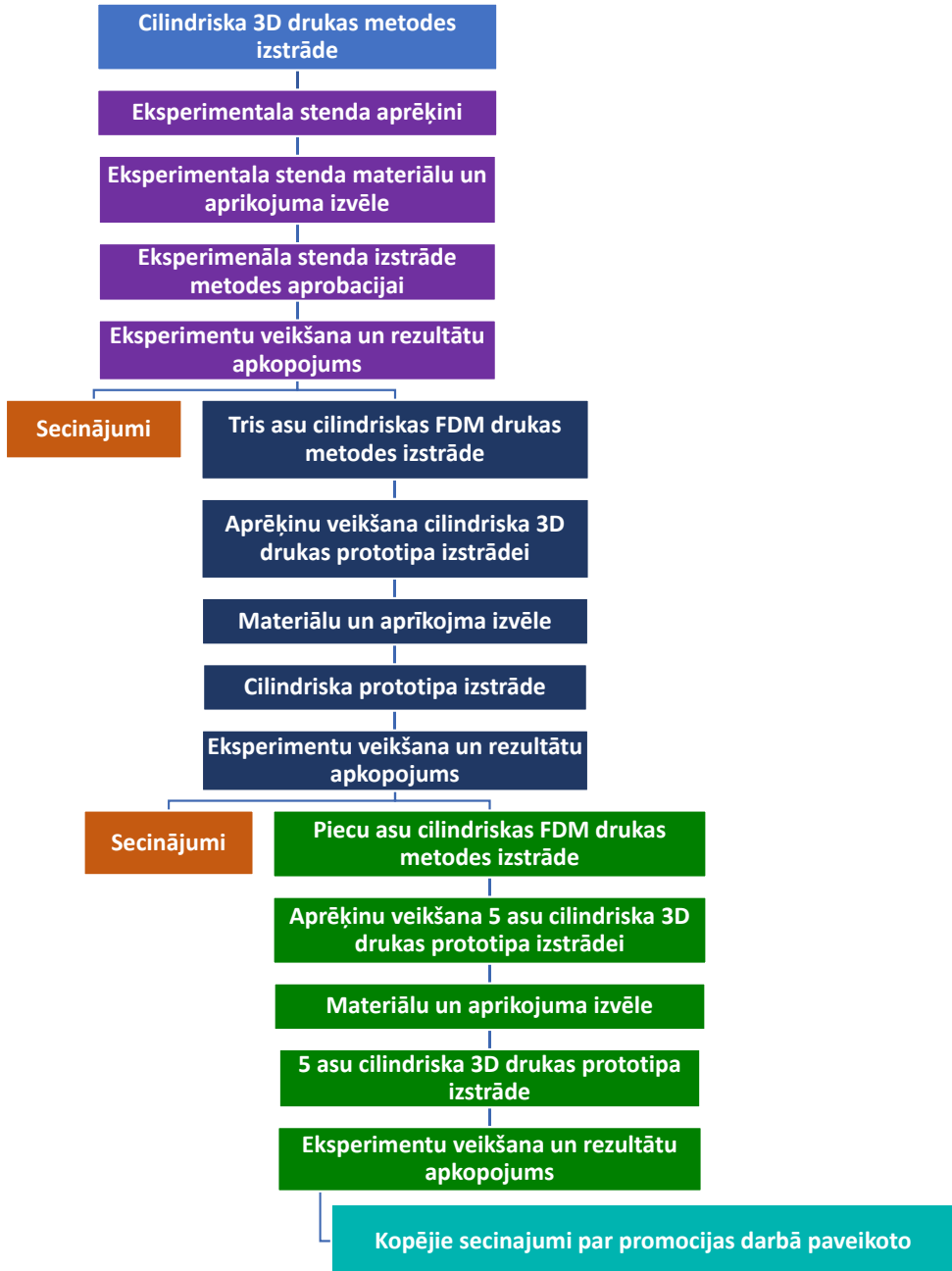
- Temperatūras devējs NTC 100K B3950 darba diapazonu no -50 līdz 300 °C, precizitāti ±1% un pretestību 100K Ohm pie 25 °C (Creality, *Ķīna*);
- Pozīcijas noteikšanas devējs CR-Limit-S ar darba spriegumu līdz 250V un darba strāvu līdz 5A (Enomaker, *Ķīna*);
- Automātiskais augstuma sensors 3D printerim CR-Touch (Creality, *Ķīna*);
- 12V DC 96W drukas galds 220x220mm 100 °C (*Two Trees, Ķīna*);
- LCD ekrāns 12864KBA (*Ķīna*);
- Tērauda vītņota skrūve 8mm diametra 400mm 2mm pitch 8mm lead (*Maccurat, Ķīna*);
- Tērauda vītņota skrūve 8mm diametra 350mm 2mm pitch 8mm lead (*Maccurat, Ķīna*);
- DC/DC pārveidotājs no 12V uz 24V 1A Kangwobei, *Ķīna*);
- 2GT 20 zobu 6mm biezs zobrats ar 5mm iekšējo diametru (*Maccurat, Ķīna*);
- 2GT 20 zobu 6mm biezs zobrats ar 8mm iekšējo diametru (*Maccurat, Ķīna*);
- 2GT 60 zobu 6mm biezs zobrats ar 8mm iekšējo diametru (*Maccurat, Ķīna*);
- 2GT 124mm 6mm bieža zobsiksna (*Maccurat, Ķīna*);
- 2GT 218mm 6mm bieža zobsiksna (*Maccurat, Ķīna*);
- MK8 uzkaršanās bloks (Micro Swiss, ASV);
- Bimetāla karstumlauža vara titāna TC4 rīkle (*Creality, Ķīna*);
- Teflona PTFE caurule 3m (*Capricorn, Ķīna*);
- Ender 3 (CR10) ekstrūdera radiators (*Creality, Ķīna*);

3D drukas materiāli:

- 3D drukas kvēldiegs Fiberlogy PA12 baltas krasas (*Polija*);
- 3D drukas kvēldiegs Fiberlogy PLA baltas krasas (*Polija*);
- 3D drukas kvēldiegs Fiberlogy PLA rubina krasas (*Polija*);
- 3D drukas kvēldiegs Rosa3D PLA baltas krasas (*Polija*);
- 3D drukas kvēldiegs Fiberlogy PET-G baltas krasas (*Polija*);
- 3D drukas kvēldiegs Fiberlogy PET-G rubina krasas (*Polija*);
- 3D drukas kvēldiegs Rosa3D PET-G baltas krasas (*Polija*);
- 3D UV cietošie sveķi Anycubic Grey 1kg (*Ķīna*);

Eksperimentālas daļas darba struktūra

Lai realizēt cilindriskas drukas metodes pielietojumu izmantojot 3D drukas tehnoloģijas ir veidots darbā plāns, attēlots 4.1.att.:



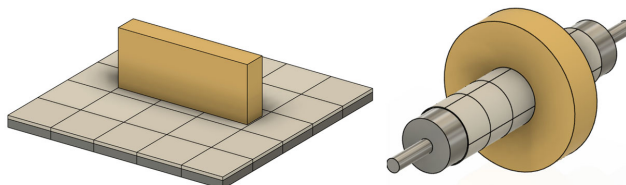
4.1.att. Cilindriskas 3D drukas izstrādes plāns.

Pēc eksistējošo FDM Dekarta 3D drukas ierobežojumu, to risinājumu un esošo 3D modeļu griešanas metožu izpētes, promocijas darbā ietvaros tika lemts izstrādāt 3 asu cilindrisko nekārtaino griešanas metodi izmantojot esošus risinājumus, uzbūvēt 3D printera prototipu, lai apstiprinātu konceptu un veikt testēšanu un eksperimentus, lai salīdzinātu ar tradicionālam un adaptīvam griešanas metodēm, kas uz pašreizējo momentu ir izplatītāki un lētāki risinājumi. Otrais posms ir izstrādāt 5 asu nekārtaino griešanas metodi, balstīto uz 3 asu prototipa rezultātiem, uzbūvēt prototipu un salīdzināt abas jaunas metodes, to izmaksas, izmantošanas sarežģītību, efektivitāti un pielāgojamību ortozes izgatavošanai. Veikt secinājumus par paveikto darbu, kā arī piedāvāt ieteikumus nākošiem uzlabojumiem.

4. NEKĀRTAINAS GRIEŠANAS METODES IZPĒTĒ UN IZSTRĀDE ORTOZES IZGATAVOŠANAI, PROTOTIPA IZSTRĀDĒ UN METODES PIELĀGOŠANA

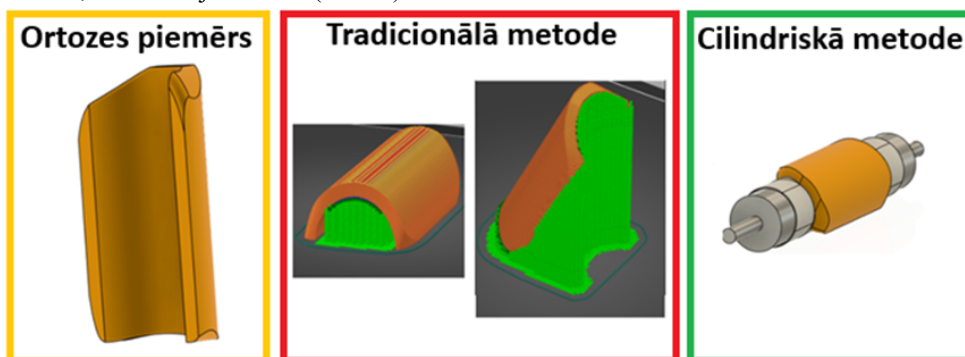
4.1. Cilindriska 3D drukas metodes izstrāde

Balstoties uz apkopoto literatūru ir konstatēts kā ortopēdiskajiem izstrādājumiem parasti ir dažādas sarežģītas formas un izliekumi, un tie var būt cilindriskas formas vai daļēji izliektas formas, kas nozīmē, ka to 3D drukāšanai ir jāņem vērā to cilindriskais raksturs. Izstrādājama metode ir paredzēta cilindriskas forma izstrādājumu drukas kvalitātes uzlabošanai. Viens no veidiem, kā to panākt, ir izmantot plakānu drukas virsmu un noapaļot to tā, lai plaknes malas saskaras, veidojot cilindru. Šī virsma būs slēgta, nodrošinot neierobežotu galda garumu. Tradicionālā drukā pa slāņiem, pārnesot uz cilindrisku virsmu, radīs cilindriskus objektus. Šī transformācija ir attēlota 4.2. att..



4.2.att. Pārejā no plakānas slāņu drukas pie cilindriskas drukas.

Tradicionālajās metodēs vienā slānī var mainīt slāņa aizpildījuma leņķi, un, ja izmantojat šo pieeju cilindriskajā drukā, vienlaikus mainot aizpildījuma leņķi perpendikulāri iepriekšēja slāņa leņķim, lai slāņi veidotu blīvu līniju tīklu. uzklāto materiālu, tad šādā veidā var nodrošināt optimālāko izliektu vai cilindrisku izstrādājumu druku, neizmantojot balstus. Līdzīgu izstrādājumu druka uz līdzenas virsmas tiks veikta slāņi pa slāņim, līdz ar to slāņus kopā turēs tikai materiāla saķere un papildus būs jāizmanto balsti, jo nebūs iespējams novietot objektu. lai drukātu, neizmantojot balstus (4.3.att.).



4.3.att. Cilindriskas formas objekta izvietošana telpa tradicionālā un cilindriskā metodēs.

4.2. Eksperimentāla stenda parametru aprēķini

Balstoties uz to, kā cilindrisko ortožu izvietojums ir optimāls izmantojot cilindrisko drukas galdu ir lemts izstrādāt eksperimentālo stendu drukas metodes aprobācijai. Paredzēts izveidot rotējošo drukas cilindrisko galdu savienoto ar soļu dzinēju un vadāmo ar vadības plati uz mikrokontrollera bāzes. Ir pieņemts kā izstrādājamā eksperimentālā stenda izmantojas drukas galva ar 0.4mm sprauslu, kas izmanto 1.75mm biezo kvēldiegu, ar līnijas biezumu 0.4mm. Lai panāktu precizitāti, kas ir nepieciešama veiksmīgai materiāla uzklāšanai uz cilindra nepieciešams aprēķināt minimālo leņķi kādā pagriezīsies soļu dzinēja rotors par vienu soļu dzinēja soli. Leņķi Θ var aprēķināt pēc formulas (4.1) [48]:

$$\Theta = \frac{\text{sprauslas precizitate}}{\text{maksimālo drukas rādiusu}} = \frac{0,4}{10} * \frac{180}{\pi} = 2,29^{\circ} \quad (4.1)$$

Ir pieņemts ka soļu dzinēja viena soļa leņķis ir 1.8° , kas atbilst izplatītākam NEMA 17 soļu dzinēju leņķim[20], tad var aprēķināt pārvades mehānisma nepieciešamu attiecību R (4.2) 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 griezēs momenta aprēķinam nepieciešams noteikt masas inerces momentu I_g un minimālo leņķisko paātrinājumu α . Stenda masas inerces momentu I_g var aprēķināt definējot visu komponentu kopējo masas inerces momentu, ko aprēķina izmantojot formulu 4.3.

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

kur r ir drukājama objekta rādiuss, m;

L ir drukājama objekta garums, m;

ρ ir drukas materiāla blīvums, kg/m³;

M ir drukājama objekta masa, kg;

Aprēķināta stenda elementu masas inerces momenta aprēķini attēloti tabula 4.1, un kopējais inerces moments ir vienāds ar $I_g = 0.00474 \text{ kg/m}^2$

Tabula 4.1

Masas inerces momenta aprēķini eksperimentāla stenda komponentēm

Komponents	r (m)	L (m)	ρ (kg/m ³)	I_g (kg/m ²)
Drukšanas cilindrs	0.004	0.15	7800	$4,70 * 10^{-3}$
20 zobu GT2 zobrats	0.015	0.016	2700	$3,43 * 10^{-6}$
2x gultni 608zz	0.022	0.008	7800	$2,29 * 10^{-5}$
Soļu dzinējs BJ42D15-26V12	0,005	0,06	7800	$1,20 * 10^{-5}$
Kopā				$4,74 * 10^{-3}$

Leņķiskais paātrinājums ir leņķiska ātruma izmaiņas ātrums laikā (4.4), un ja pieņem kā cilindra vidējais rotācijas ātrums ir 500 rpm un ātruma izmaiņas notiek 1 sekundes laikā, tad aprēķinātais leņķiskais paātrinājums ir aptuveni 50 rad/s².

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

Kur α ir leņķiskais paātrinājums, rad/s²;

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

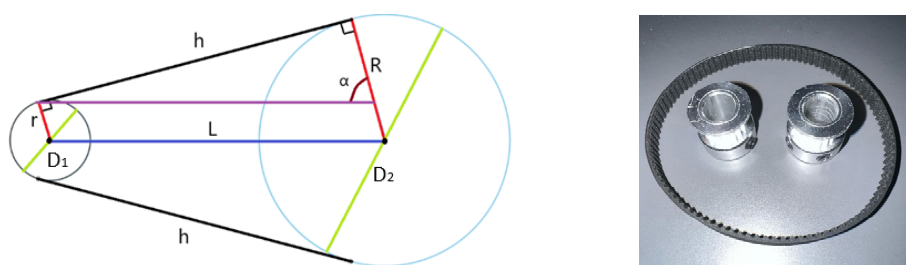
Δt ir laiks, s;

Eksperimentāla stenda griezes momentu ir aprēķināts kā masas inerces momenta I_g un minimāla leņķiska paātrinājumu α reizinājumu 4.5:

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

Par eksperimentāla stenda soļu dzinēju ir izvēlēts soļu dzinējs BJ42D15-26V12.

Maksimāla nepieciešama pārvades mehānisma attiecība izstrādājamam prototipam, kuru nepieciešams nodrošināt ir 0,78:1, lai nodrošinātu nepieciešamu pārvades attiecību ir izvēlēti divi 2GT 20 zobu zobrati, kas nodrošina 1:1 attiecību, kas pārsniedz nepieciešamo minimālo attiecību. Lai novērst pretreakciju nepieciešams izvēlēties jostu nepieciešama garuma l , ko var aprēķināt zinot zobratu garumus D_1 un D_2 un augstumu h (5.6) ko var redzēt attēlā 4.4:



4.4.att. Zobratu savienošanas zobsiksna garuma noteikšanas parametri un izmantojamie zobsiksna un zobrati.

$$l = (D_1 - D_2) \cos^{-1} \left(\frac{D_2 - D_1}{2a} \right) + \pi D_2 + 2 \sqrt{a^2 - \left(\frac{D_2 - D_1}{2} \right)^2} \quad 4.6$$

Pieņemts ka zobratu izmēri ir $D_2=37,5\text{mm}$ un $D_1 = 12\text{mm}$, zobsiksna garums l ir vienāds ar 4.7:

$$l = (12 - 37,5) \cos^{-1} \left(\frac{12-37,5}{2*24} \right) + \pi * 24 + 2 \sqrt{24^2 - \left(\frac{12-37,5}{2} \right)^2} = 123,36 \quad 4.7$$

Pēc zobsiksna garuma aprēķina ir izvēlēts 2GT 124mm gara zobsiksna ar 6mm platumu un 2mm soli. Attālums starp zobratu centriem L ir 43mm.

4.3. Eksperimentāla cilindriskā 3D stenda izstrāde

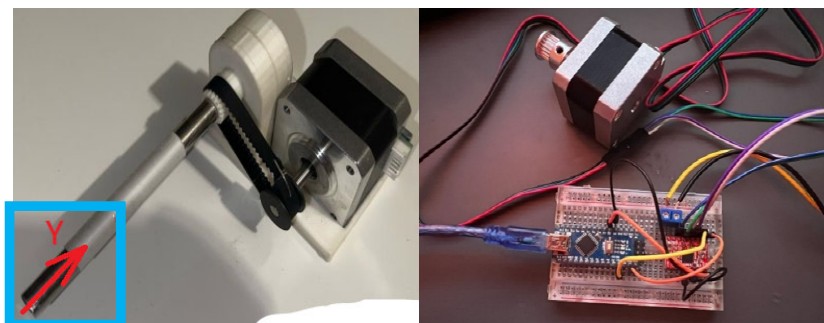
Sekojošu konceptu aprobācijai ir veidots cilindriskas drukas testēšanas stends. Stenda sastāvdaļas ir norādītas Tabulā 4.2.

Tabula 4.2.

Cilindriskā 3D printera stenda sastāvdaļas

Nosaukums	Modelis	Parametri
3D printera rāmis	Creality Ender-3 V2	CoreXZ Dekarta sistēmas FDM 3D printeris
Soļu dzinējs	1 x NEMA 17 42-34 BJ42D15-26V12	, Soļa leņķis: 1.8°, Nomināla strāva 0.8A, Fažu skaits: 2, Griezes moments: 0.8 Nm
Soļu dzinējā draiveris	Pololu RepRap A4988	Darba spriegums: 8-35V DC, Loģikas spriegums: 3-5.5V, I _{max} 2A
Barošanas avots	Meanwell LRS-350-24	24V DC, 350W, 14.6A, 48-63Hz
Vadības mikrokontrollera plāte	Arduino Nano	ATmega328P CH340 mikrokontrollers, 14 cipar izejas 6 PWM izejas, 8 analoga izejas, Darba spriegums 5V, loģikas spriegums 3.3V
Pārvades mehānisms	Divi 20 zobu GT2 zobrati, 124-2GT-6 siksna, 2 x 688ZZ gultni, 100x8mm stienis	Pārvades attiecība 1:1
Programmnodrošinājums	Arduino IDE	RepRap 3D printeru saimes atvērtā pirmkoda programmāparatūra

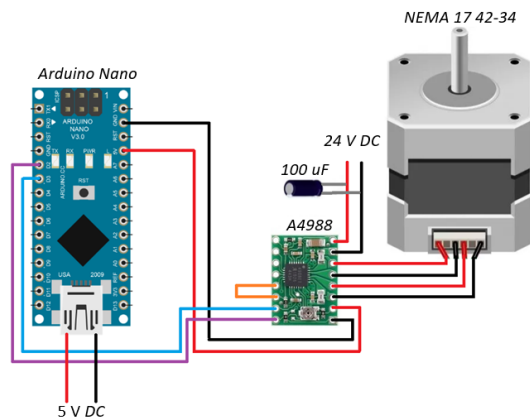
Stends balstīts klasiska *RepRap* 3D printera konstrukcijas, un tā uzdevums ir pierādīt iespēju drukāt uz rotējošā cilindra, aizvietojo Y ass drukas galdu uz rotējošo cilindru. Prototips ir izveidots uz *Creality Ender-3 V2* printera bāzes [49], kas paņemts kā klasisks FDM printeru pārstāvis, kur 3D printerim ir pārslēgts Y soļu dzinējs, kas atbild par drukas galda pārvietošanu Y plakne. Uz drukas plakana galda, kas paliek un 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. Tādā attiecība atbild minimāli nepieciešamai attiecībai drukas precizitātes sasniegšanai. Testa stends ir novietots tā, lai stienis ass sakristu ar X ass virzienu un abas ass būtu paralēlās. Testa stends un to izvietojumus ir attēloti 4.5.att.



4.5.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 ir kontrolēta ar Arduino IDE vidē uzrakstīto kodu. Y Ass kustības ir sinhronizēts ar 3D printera vadības kodu

manuāli mainot Y ass griešanas ātrumu un soļu skaitu milimetrā attiecību. Testu stenda elementu slēgums ir attēlots 4.6.att..

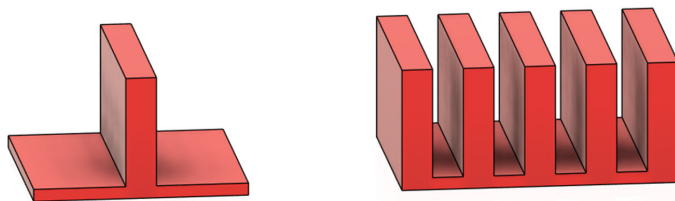


4.6.att. Cilindriskas drukas testa stenda elementu slēgums.

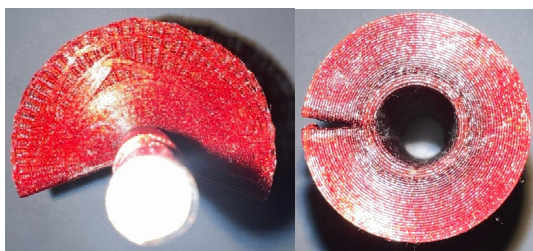
Arduino Nano vadības plates barošanu nodrošina *USB 5 V DC*. Soļu dzinēja draivera vadība realizēta, pieslēdzot pie *Arduino* 2 un 3 ciparu izejām un pie *5 V DC* un *GND* izejām. Draivera barošanu nodrošina *Mean Well 24 V DC* impulsu barošanas bloks kas savienots ar $100\ \mu\text{F}$ kondensators 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 veikšanā un rezultātu apkopojums

Testa drukai ir sagatavoti dažāda veida plakanas formas CAD modeļi (4.7.att.), sagriezti ar tradicionālo griešanas metodi *Prusa Slicer* programmā, drukas materiāls PLA, drukas temperatūra $230\ \text{°C}$ [50]. Rezultāta ir iegūtas cilindriskas formas objekti (4.8.att.).



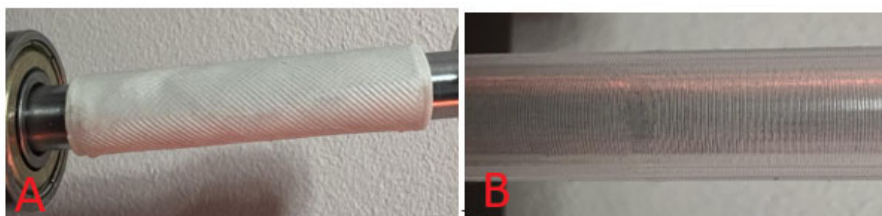
4.7.att. Sagatavotie testa drukai CAD modeļi Autodesk Fusion 360 programmā.



4.8.att. Cilindriskās drukas rezultāti un trūkumu apliecinājums.

Iegūtajos paraugos bez iepriekšējas apstrādes modeļu ģeometrijā deformējas, un ja sakuma 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 perpendikularu pārklāšanu bija sagatavoti 8mm diametra un 50mm garuma ar slāņa biezumu 1mm cilindru CAD modeli. A variantā cilindri bija sagriezti ar tradicionālo drukas metodi, kur slāņi iet paralēli viens otram, B varianta ir sagatavotas plakņu modeļi, kur katrs nākamais slānis ir ar aizpildījumu, kas iet perpendikulari leņķim kas bija iepriekšēja slāņa aizpildījumā. Plaknes modeļi tiks drukāti uz cilindriskas platformas un ka rezultāts tiks iegūti cilindri ar nepieciešamiem parametriem. Rezultāts ir attēlots 4.9.att.:



4.9.att. Testa stenda drukas rezultāti materiāla pārklājuma testam uz cilindru piemēriem, kur (A) ir tradicionālas metodes paraugs un (B) ir cilindriskas metodes paraugs.

Var redzēt ka pirmā varianta slāņi ir novietoti paralēli viens otram, bet otra varianta tie pārkrustojas veidojot tikla aizpildījuma formu. Visi modeļi ir sagatavoti ar 0.3mm slāņa biezumu, 0.4mm līnijas biezumu, 60mm/s drukas ātrumu un 500mm/s² paātrinājumiem. Kā drukas materiāls izmantojas *Crealty* PLA baltas krasas un *Crealty* PET-G caurspīdīgs kvēldiegi. Drukas temperatūra ir 230 °C, drukas ātrums 60mm/s, paātrinājumi 500mm/s².

4.5. Secinājumi

Pāreja uz cilindrisko koordinātu sistēmu objekta slāņa loka garums ir nenemainīgs, kad cilindra loka garums visu laiku pieaug un trūkstošā loka neesamība izpaužas uz drukājama objekta. Tātad ir modeļa sagatavošanas posmā nepieciešams papildu apstrādāt modeli, lai novērst šo defektu. Arī ir apliecināts ka palielinoties slāņa daudzumam un pieaugot modeļa augstumam paradās materiāla ekstrūzijas trūkums, kas izpaužas kā mazāks modeļa blīvums un pamanāmas drukāšanas nepilnības. Ka rezultāts ir nepieciešama 3D drukas metodes izstrāde, kas varētu novērst konstatētus trūkumus.

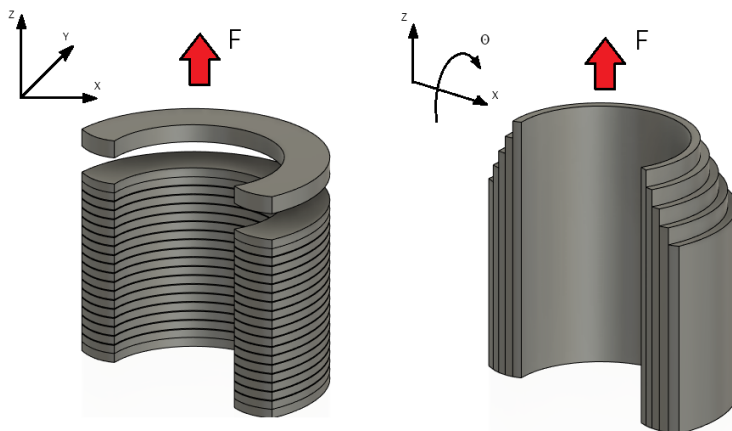
5. Trīs asu FDM cilindriskas 3D drukas metodes un prototipa izstrāde

5.1. FDM 3D drukas cilindriskas griešanas metodes izstrāde

Balstoties uz eksperimentāla stenda rezultātiem 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. Eksistējošās tradicionālās 3D griešanas metodes, izmantojamas pašreizējās griešanās programmās, balstās uz slāņu izmantošanas stratēģijas, kur katrs slānis tiek drukāts horizontāli, izveidojot starpslāņu savienojumu, kas ir produkta potenciāls 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 savēršanas slodzēm, kas darbojas slāņu plaknē. Tas saistīts ar to, ka izstrādājuma iekšējā struktūra veidojas, konsekvēnti uzliekot slāņus, kas rada apstākļus spriegumu rašanās materiālam savijoties. Rezultātā šādu slodžu aplikšana var novest pie izstrādājuma deformācijas vai sabrukšanas gar slāņiem, kas samazina tā funkcionalitāti un uzticamību. Turklāt, neoptimāls atbalstu un drukas trajektorijas sadalījums var novest pie materiāla neefektīvas izmantošanas un drukāšanas laika palielināšanās. Vienlaikus, horizontālā griešana ierobežo dizaina iespējas, jo īpaši, ja ir precīzi jāatveido sarežģītas anatomiskas formas. [51], [52] [53].

Darbā izstrādājama cilindriskā griešanas metode piedāvā risinājumu šīm problēmām, 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.

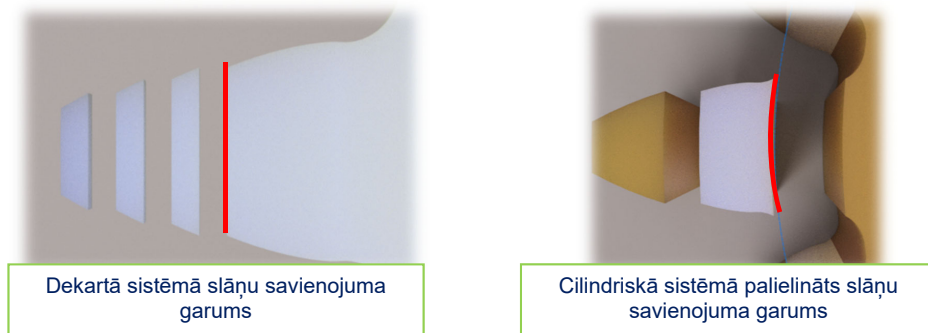
Izmantojama metode apvieno ģeometrisko optimizāciju ar mainīgu slāņa aizpildīšanas leņķi, lai samazinātu stiepes spriegumus, izmantojot standarta slāņa sagriešanas metodi, bet drukājot uz rotējoša cilindra. Cilindriskās formas izmantošana 3D drukātiem objektiem uzlabo drukāto izstrādājumu mehāniskās īpašības, palielinot to izturību pret stiepes slodzēm un atslāņošanu. Cilindriskās ģeometriskās formas izstrādājuma slāņi ir verstī viens pret otru, radot fizisku ierobežojumu, efektīvi novēršot atslāņošanu, kas ir izplatīta problēma standarta daudzslāņu konstrukcijās (5.1.att.).



5.1.att. Slāņu izvietojums Dekarta un cilindriskā koordināšu 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 adhēziju un slāņu saskares laukumu. Tomēr parasti slāņu materiāls netiek uzklāts perfekti uz 100% un rezultātā rodas starpslāņu atstarpes. Šis parametrs ir definēts ar drukājama objekta parametriem un izmantojamo 3D printeri, un tieši ietekmētu uz to var tikai mainot drukas parametrus (slāņa biezumu, ekstrūzijas parametrus, drukas ātrumu).

Ir divi varianti kā var 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 drukājama 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 turēties starp sevi cilindriskas izvietouma dēļ, kur slāņi ir savstarpēji savienoti un mainās slodzes vektors (5.2.att.).



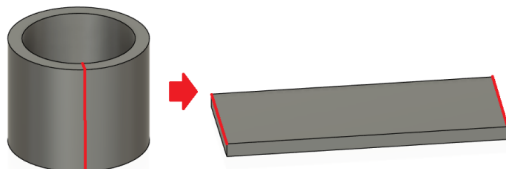
Dekartā sistēmā slāņu savienojuma garums

Cilindriskā sistēmā palielināts slāņu savienojuma garums

5.2.att. Palielināts starpslāņu savienojuma laukums

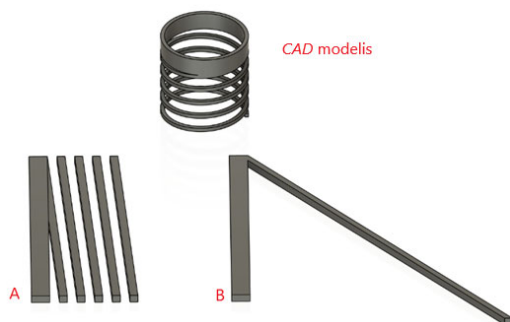
Izstrādājamas metodes ideja ir izmantot Dekarta koordināšu sistēmas 3D printeri, aizvietot Y asi ar rotējošo cilindru, tādā veidā minimāli mainot 3D printera konfigurāciju pāriet pie cilindriskās koordināšu sistēmas. Galvenā problēma, kas rodas pārejot uz cilindrisko

sistēmu, ir CAD modeļu sagatavošanas programmatūras neesamība, visi eksistējošie risinājumi piedāvā vienkāršo tradicionālo vai adaptīvu griešanu, kas neļauj pilnībā izmantot doto metodi. Tieši tāpēc tika lemts izstrādāt pieeju, kas ļaus brīvāk un saprotamāk izmantot šādā veida printerus. Kā viena no pieejām, kuru izmantoja iepriekšējos pētījumos ir eksistējošo CAD modeļi sagriezti kādā brīvi izvēlēta vieta un iztaisnot to plakana veidā (5.3.att.) [54].



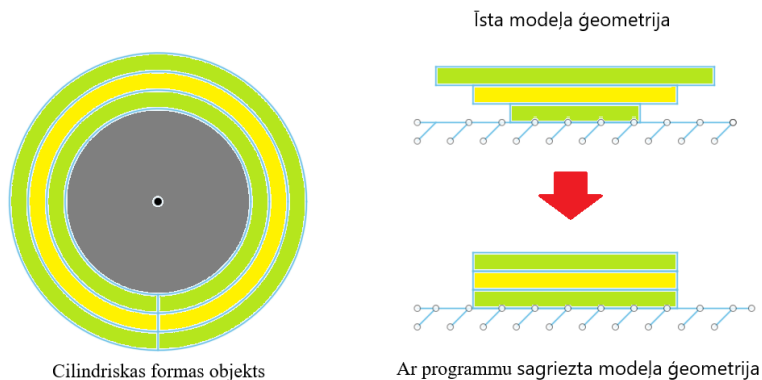
5.3.att. Cilindra sagriešana un pārveidošanā plaknē.

Darbā izmantojas divas 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 viena ass garumā. Kad taisnas iztaisnošanas objekts tiek drukāts abas objekta malas pa kurām bija sagriezts modelis, savienojas un rodas redzama šuve. Taisnu iztaisnošanu ir vērts izmantot, kad šuves ietekme uz drukājama objekta izmantošanas veidu neietekmē, vai kad nepieciešams izdrukāt cilindriskas formas objektu, kura malas nav savienotas un ir loka formas. Otrs veids ir spirālveida CAD modeļa iztaisnošana, kad objekts ir pilnīgi cilindriskas formas un to var iztīt vienā neplīstā slānī (5.4.att.).

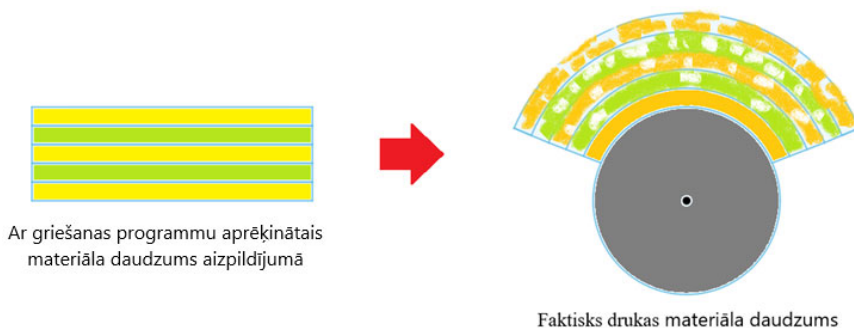


5.4.att. CAD modeļa taisna plakana (A) un spirālveida (B) iztaisnošana

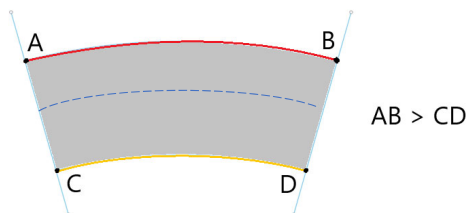
Kompleksam ģeometriskam formām un modeļiem ar vairākiem slāņiem, kuru augstums ir samēra liels, tāda veida iztaisnošana deformēs sākotnējo ģeometriju, jo rotējošam drukas cilindram (drukas galdam) ir noteikts diametrs un katrām slānim šis parametrs būs atšķirīgs, atkarībā no slāņa biezuma. Tāpēc nepieciešams izmantot kompleksus iztaisnošanas algoritmus, kuri vēl pirms modeļa sagriešanas jau aprēķinā slāņu biezumu (5.5.att.). Otrā problēma, ka sagatavojot modeļus drukai ar Dekarta tipa tradicionālam griešanas programmām, programma aprēķinās noteikto materiāla apjomu uz katru slāni, bet atkarība no slāņu biezuma materiāla daudzums katram slānim palielināsies un rezultāta drukājamam objektam palielinoties slāņu daudzumam padota materiāla apjoms samazināsies uz noteikto procentu (5.6.att.). Kā arī vienā slānī ietvaros iekšēja un ārēja cilindra līnijas garuma atšķirības dēļ materiāls tiks sadalīts nevienmērīgi (5.7.att.), tomēr šo trūkumu var minimizēt mainot slāņa dūkas augstumu.



5.5.att. Modeļa deformācija iztaisnošanas procesa laikā.



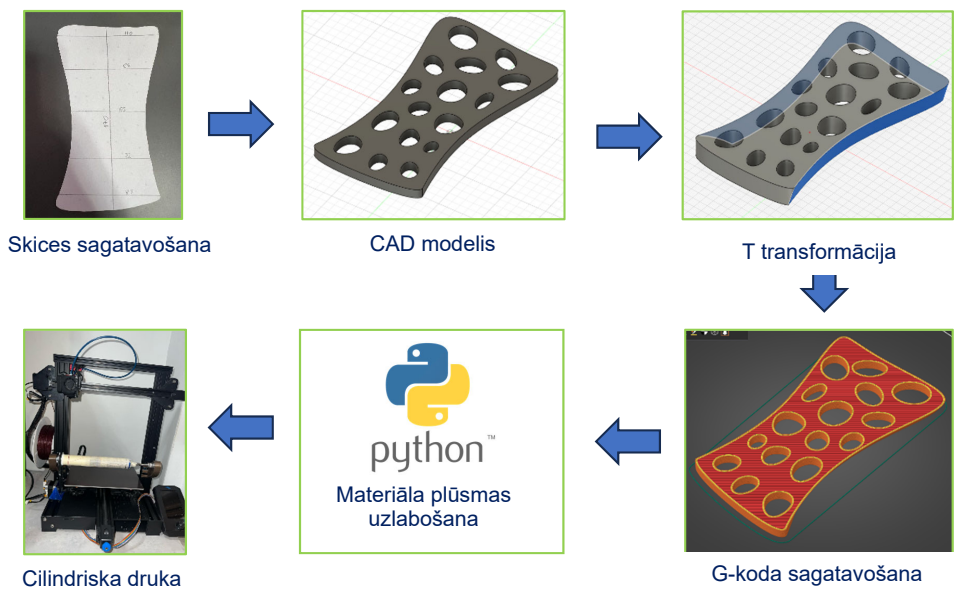
5.6.att. Nepietiekama padota materiāla daudzuma problēma.



5.7.att. Materiāla sadalījums vienā slāņa ietvaros.

Promocijas darbā izstrādājama metode ir pielāgota ortozes izgatavošanai. Kad ortozes parametri ir definēti (skat. nod. 1.) un ja iztaisnoto ortožu ģeometrija ir tuva pilnīgi plakanaī formai, sakuma CAD modeli ir iespējams sagatavot ka plakānu objektu. Otrais uzdevums ir novērst problēmas, kas piemīt cilindriskai griešanas metodei. Balstoties uz šiem parametriem bija izveidota jauna modeļu sagatavošanas metode.

Schematisks drukas sagatavošanas process ir attēlots 5.8.att.:



5.8.att. Jaunas cilindriskas modeļa sagatavošanas metodes stratēģija.

Sakuma tiek ņemti cilvēka ekstremitātes parametri un izmēri, ir veidots vienkāršais papīra ortozes makets, kas tiek sagriezts un pārņemts CAD programma kā sakuma skice. Nākamā posmā uz skices pamata ir veidots ortozes CAD 3D modelis vienkāršā Dekarta koordināšu sistēmā, pieņemot to ka slāņu leņķis pret drukas galdu ir 90°, jeb visi slāni iet perpendikulāri drukas galdam. Plakanam modelim pielieto jaunu T transformāciju. Šī transformācijas mērķis ir sagatavot modeli cilindriskai drukai, nedaudz mainot objekta ģeometriju, tā lai objekts drukātos atbilstībā ar cilindrisko koordināšu sistēmas prasībām. Kad CAD modelis ir gatavs to sagriež ar tradicionālo griešanas metodi ar jebkuru pieejamu programmu, kur norada slāņa aizpildījumā nobīdi, labākai ortozes mehāniskai izturībai pret noteiktas slodzes veidu atkarība no ortozes veida un pielietojuma.

Rezultātā ir iegūts pārveidotas ortozes G-kods, kuram nepieciešams pielietot materiāla aizpildījuma koeficienta palielināšanu izmantojot *Python* veidoto kodu (Pielikums 3), kas aprēķina materiāla padošanu pēc formulas 5.1.:

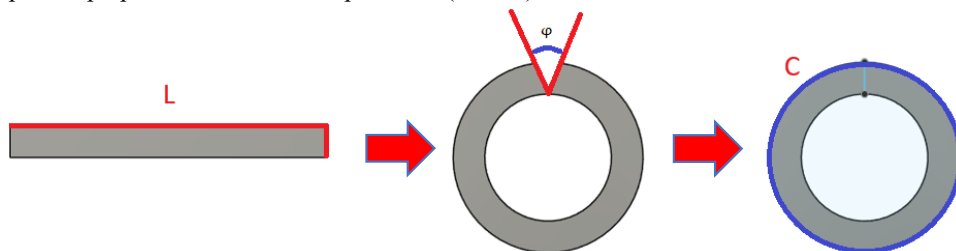
$$palielinašanas\ koeficients = \frac{esoša\ slāņa\ biezums * 2 * \pi}{slāņa\ loka\ garums} \quad (5.1)$$

Šis kods aprēķina nepieciešamu materiāla apjomu nolasot sagatavoto G-kodu un aizvietojo norādītas 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 rezultāta ir iegūta ortoze ar palielinātu mehānisko izturību, kas drukāta bez balsta materiāla un novēršot pārkāres drukas problēmas.

5.1.1. CAD modeļu sagatavošanas metodes apraksts un veiktie aprēķini

T transformācija ir paredzēta lai kompensētu leņķi, kas rodas parejot no Dekarta sistēmas pie cilindriskās koordinātu sistēmas, kur rodas slāņa augstuma attiecība pret cilindra līnijas garumu. Aptinot plakano modeli ap cilindru, modeļa vertikālās malas kļūst izliektas, un tāpēc mainās leņķi, ko tās veido ar pamatni. Drukas cilindram ir izliekums, un, kad plakans modelis apņēms šo izliekumu, modeļa iekšējās un ārējās malas izliekas atšķirīgi. Modeļa apakšējās malas ir tuvāk cilindra centram, un tāpēc tām ir mazāks izliekums salīdzinājumā ar augšējām malām.

Lai kompensētu šo efektu un saplūstu arī augšējie modeļa gali, vispirms ir jāsaliek modeļi. 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 piemērojama modeļa mālu 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 φ augšējai pusei, lai tā pēc aptišanas paliktu perpendikulāra pamatnei.

Pārveidojumu var izteikt ar formulu (5.2), kur π ir vienāds ar 3,1415:

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

kur C ir cilindra loka garums, mm;

R ir cilindra rādiuss, mm.

Ja modeļa garums ir vienāds ar L , tad leņķi φ var aprēķināt kā (5.3):

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

kur φ ir nobīdes leņķis, $^{\circ}$;

L ir modeļa malas garums, mm;

C ir cilindra loka garums, mm.

Ar šo aprēķinu var noteikt nobīdes leņķi φ uz kuru ir nepieciešams pārveidot modeli. Tomēr sakara ar to ka pārējā uz cilindrisko koordinātu sistēmu notiek ar tikai vienas ass izmaiņu, 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 virziena uz noteikto attālumu kas ir aprēķināts no modeļa ģeometrijas parametriem.

Darbā ir pieņemts kā drukas cilindra diametrs sastādīs 32mm, tad ja pieņemts ka slāņa biezums ir 0.3mm, modelim ar 5 slāņiem parametri ir apkopoti tabulā 5.1:

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

5.1.2. Materiāla padošanas apjoma uzlabošanas metode

Otra lieta kā mainās materiāla padošanas daudzums ir saistītā ar to kā cilindriska koordinātu sistēmā, parejot no viena slāņa pie nākamā, nepieciešams palielināt padota 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, mēs redzam, ka 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 (tabula 4.5). 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. Ja pievienojat tādu pašu materiāla apjomu dažāda diametra slāņiem, šis apjoms veidos mazāku procentuālo daļu no lielākā slāņa kopējā izmēra, salīdzinot ar mazāko.

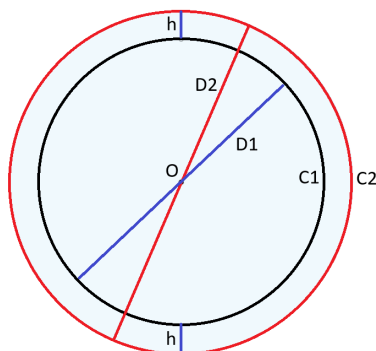
Tādējādi, lai gan pievienotā materiāla daudzums (un līdz ar to arī loka garuma pieaugums) var būt nemainīgs, šī pieauguma procentuālā daļa no kopējā loka garuma samazinās, palielinoties objekta diametram. Attiecīgi ir divi varianti kā var aprēķināt materiāla padošanas apjomu:

- Balstoties uz sākotnējā drukas cilindra izmēriem skaitīt kopējo procenta palielināšanos katrām slānim, tādā veida palielinājuma procents skaitīsies no kopēja palielinājuma procenta un palielinājuma procents lineāri samazināsies palielinoties slāņu augstumam. Attiecīgi ir nepieciešams precīzāk aprēķināt palielinājuma procentu parejot pie katra nākama slāņa, kas nav optimāli apstrādājot liela apjoma kodus.
- Otrais variants ir aprēķināt nākama slāņa materiāla palielinājuma procentu balstoties uz iepriekšēja slāņa loka garuma.

Ja pieņemt kā slāņa biezums ir nemainīgs un modelis ir sagriezts ar tradicionālo metodi, tad abos variantos faktiskais palielinājuma procents paliks nemainīgs, tomēr pirmām variantam palielinoties slāņa augstumam nepieciešams atkārtoti pārskaitīt palielinājuma procentu, vai izmantot komplekso formulu materiāla apjoma aprēķināšanai.

Otrā varianta, zinot slāņa biezumu un drukas cilindra diametru, var sākotnēji aprēķināt palielinājuma procentu no slāņa pie slāņa un piemērot to palielinājuma procentu parejot uz nākamo slāni, tādā veidā nav nepieciešamības veikt kompleksus aprēķinus ekstrūzijas apjoma aprēķināšanai.

Darbā ir izmantoti un salīdzināti abi varianti, tomēr cilindriska prototipa variantā izmantojas 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 (5.4):

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

Kur C ir loka garums, mm;

D ir cilindra diametrs, mm;

Kad pievienojam slāņa augstumu h uz cilindru, diametrs palielinās par $2h$, jo pievienošana notiek abās cilindra pusēs, kas ietekmē loka garumu. Ekstrūzijas procentuālās izmaiņas var aprēķināt, salīdzinot loka garums pirms un pēc slāņa pievienošanas. Ja sākotnējais loka garums ir C_0 , un loka garums pēc slāņa pievienošanas ir C_1 , tad procentuālās izmaiņas var P izteikt šādi (5.5):

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

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.

Aprēķinu piemērs, kur drukas cilindra diametrs ir vienāds ar 30mm un slāņa biezums ir definēts un ir 0.3mm katrā slānī:

1. Drukas cilindra loka garums ir $C_0 = \pi * 30 = 94,25mm$
2. Diametrs pēc slāņa pievienošanas $D_1 = 30 + 2 * 0,3 = 30,6mm$
3. Jauna slāņa loka garums $C_1 = \pi * D_1 = 96,13mm$
4. Aprēķinam materiāla palielinājuma procentu $P = \left(\frac{C_1 - C_0}{C_0} \right) * 100\% = 2,00\%$

Sākotnējais loka garums ir aptuveni 94,25 mm. Pēc pirmā slāņa pievienošanas ar biežumu 0,3mm 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 mēs vēlamies saglabāt vienmērīgu pārklājumu, palielinoties drukājamā objekta diametram, mums ir jāpalielina ekstrūziju par noteiktu procentuālo daļu (šajā gadījumā par 2%) katram nākamajam slānim, sākot ar otro, ja pieņemt kā pirmais slānis ir nemainīgs un to ekstrūzija ir vienāda ar aprēķinātu ar griešanas programmu un sastāda 100%.

Manuāla aizpildījuma koeficienta iestatīšanas rezultāts salīdzinājuma ar neregulēto materiāla plūsmu ir attēlots 5.11.att.. Pēc testa drukas rezultātiem var secināt kā manuāli iestatīts procents sakuma dod lielāku materiāla apjomu, bet pēc slāņu daudzuma palielināšanas materiāla apjoms kļūst mazāks nekā nepieciešams tālākai drukai.



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

Lai nodrošinātu dinamisku plūsmas koeficientā izmaiņu ir izveidots *Python* kods (Pielikums 3), kas apstrādā G-koda failu un maina ekstrūzijas parametru katram slānim atsevišķi (pielikums 3). Koeficients tiek rēķināts balstoties uz katra iepriekšēja slāņa loka garuma un plūsmas koeficienta. Kopējais plūsmas koeficients tiek skaitīts atsevišķi un tiek attēlots koda apstrādes laikā, procentu aizpildījuma piemēru pie 32mm diametra cilindra ir attēlots tabula 5.2:

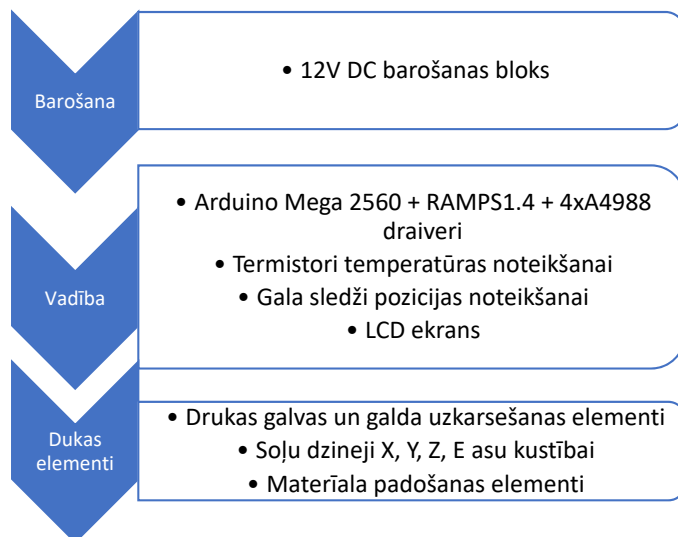
Tabula 5.2

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	1,85%	7,62%
6	1,79%	9,44%
7	1,75%	11,23%

5.2. Trīs asu cilindriskā FDM 3D printera prototipa aprīkojumā izvēle

Šajā sadaļā ir aprakstīts cilindriskā 3D printera prototips, kas izstrādāts, lai atbilstu īpašām drukas prasībām, kuras nevar izpildīt tradicionālie plakanie 3D printeri. Prototipa komponentu un elementu mijiedarbības shēma ir attēlota 5.12.att.:



5.12.att. Prototipa elementu mijiedarbība.

Šī sadaļā ir iekļauts detalizēts prototipa tehnisko parametru apraksts, tostarp konstrukcijas īpatnības, izmantotie materiāli, darba temperatūras diapazons, drukas ātrums un izšķirtspējas precizitāte. Sadaļā ir dots prototipa funkcionalitātes, precizitātes un uzticamības novērtēšanai veikto testu apskats, kā arī veikta iegūto rezultātu analīze. Visbeidzot, tiek izteiktas piezīmes par cilindriskās 3D drukas potenciālu un apspriesti iespējamie virzieni tehnoloģiju uzlabošanai un attīstībai [55].

5.2.1. Dekarta koordinātu sistēmas kinemātikas FDM 3D printera izvēle

3D printera prototipa kinemātikas izvēle ir viena no svarīgākajiem faktoriem, jo tas nosaka gan drukāšanas precizitāti un ātrumu, gan ierīces kopējo stabilitāti un uzticamību. Dekarta kinemātika ir visizplatītākais 3D drukāšanā izmantotais kinemātikas veids. Viņi izmanto trīs asis, kas atbilst trim telpas dimensijām: X, Y un Z. Eksistē vairāki varianti kā var uzbūvēt Dekarta FDM 3D printeri, tomēr to atšķirība ir ar to kāda veida ir izvietoti soļu dzinēji un ka ir realizēta asu vadība. Vienkāršā Dekarta kinemātika, vēl saukta par taisnstūra kinemātiku, kustīgas ir X un Y ass, kas var brīvi pārvietoties vienas plaknes robežās, un Z ass ir realizēta kā kustīgais galda, kas paceļas un nolaižas regulējot drukas augstumu. Katrai asij ir savs soļu dzinējs un katrā ass ir realizēta uz fiksētas nekustīgas bāzes. Tas ir vienkāršākais variants ar lielu precizitāti un labu kustību atkārtamību. Otrais variants ir *CoreXY* kinemātika, kur X un Y ass ir stiprinātas pie jostu sistēmas, bez Z ass stiprinātas pie drukšanas galda un maina augstumu.

Šī kinemātika ir līdzīga taisnstūra kinemātikai un atšķiras ar jostu sistēmu un drukas galvas pārvietošanas veidu. Nākamais veids ir *H-Bot* kinemātika kas ir līdzīgā ar *CoreXY* kinemātikā, atšķiras zobsiksna sistēmas stiprināšanas veids, jo šeit izmantojas viena zobsiksna, kas iet gar visu sistēmu, tomēr atšķirība no *CoreXY*, šī sistēma ir vecāka un var rasties izkropļojumi kustības laikā. Kā viena no populārākām un precīzākām sistēmām uz pašreizējo momentu ir portāla vai *Gantry* kinemātika, kur uz Y ass ir izvietots drukas galds, bet drukas galva pārvietojas X un Z ass diapazonā, kas padara konstrukciju vienkāršāku un arī drukas galvas pārvietoējumi kļūst precīzāki [56]. Par prototipa kinemātikā tika izvēlēta portāla kinemātika, kas nodrošina lielāku precizitāti un dod iespēju vienkāršāk pārveidot vienu no asīm uz cilindrisku koordinātu sistēmu.

Lai izvēlētos 3D printeri, kura kinemātika un sastāvdaļas izmantosies prototipa izstrādē, bija veikts pētījums ar dažādu parametru novērtēšanu, kur katrs parametrs ir novērtēts uz noteiktu punktu skaitu, un par prototipu tiks izvēlēts 3D printeris no labākajiem pārstāvjiem (Pielikums 2). Par kinemātikas pārstāvjiem bija apskatīti vairāki 3D printeri, un risinājums, kuru printeri izmantot tika lemts pēc 3D printeru novērtēšanas (5.3 tabula), kur bija salīdzināta pārveidošanas vienkāršībā, cena, drukas platības izmērs, drukas ātrums, stabilitāte un citi parametri. Vairāk informācijas par 3D printeru sadalījumu var apskatīt sadaļā 2.

Tabula 5.3

3D printeru salīdzinājums un novērtēšana izmantošanai prototipā.

Nosaukums	Kinemātika	Drukas tūlums	Izmantojamie materiāli	Precizitāte	Ātrums	Drošums	Cena	Rezultāts
Prusa i3 MK3S	5	4	5	5	4	5	3	31
Creality Ender 3 V2	5	4	5	4	4	4	5	31
Anycubic Predator	4	5	4	5	5	4	3	30
Prusa Mini+	4	3	4	4	4	5	4	28
Creality CR-10	4	5	4	4	4	4	4	29
Anet A8 Plus	3	3	3	2	3	3	5	22
Artillery Sidewinder X1	4	4	4	4	4	4	4	28
FlashForge Creator Pro	4	4	4	4	3	4	4	27
LulzBot Mini 2	4	4	4	4	3	5	3	22
Monoprice Select Mini V2	3	3	3	3	3	3	4	27

Pēc novērtēšanas var redzēt kā labākie FDM 3D printeru pārstāvji ir *Prusa i3 MK3S* un *Creality Ender 3 V2*, kuru rezultāts ir vienāds, tomēr *Prusa* modelim ir lielāka cena salīdzinot ar *Creality* ražotāja modeli, tāpēc par prototipa pamatu tika izvēlēts *Creality Ender 3 V2* printera modelis. *Ender 3 V2* ir viens no labākiem apskatāmiem variantiem, ir sabalansēts 3D printeris, ar līdzsvarotam īpašībām un kvalitāti.

5.2.2. Vadības plates izvēle

Galvenais 3D printera vadības plates uzdevums ir nolasīt iepriekš sagatavoto G-kodu un pārvaldīt ar 3D printera elementiem. Standartam vadības platem 3D printeros ir ierobežojumi, kas var padarīt to mazāk piemērotu noteiktiem projektiem, īpaši prototipēšanai ar noteiktam prasībām, piemēram, atsevišķām asu vadības elementiem un dažādiem soļu dzinēju draiveriem.

Standartam vadības platēm parasti ir ierobežota paplašināšana, kas var apgrūtināt papildu komponentu vai funkcionalitātes iekļaušanu prototipā. Parasti tas piedāvā ierobežotu iestatījumu komplektu, ar ko var nepietikt, lai pielāgotu dažādus parametrus, piemēram, kustības ātrumu un paātrinājumu, vadītāju mikrosoļus un citus, kas ir svarīgi, lai izveidotu prototipu ar augstu precizitāti un produktivitāti. Vadības plates izvēlē ir balsītā uz tādiem parametriem kā:

- Pielāgošanas elastība - vadības platei ir jānodrošina plašas iespējas dažādu parametru konfigurēšanai, kas ļauj pielāgot vadības sistēmu prototipa specifiskajām prasībām.
- Dažāda veida draiveru atbalsts - ļauj izvēlēties piemērotākos draiverus atkarībā no nepieciešamajām kustības īpašībām un klusas prototipa darbības.
- Atsevišķo asu vadība - Svarīga prasība prototipa izveidei var būt iespēja atsevišķi vadīt katru no asīm (X, Y, Z), kā arī papildu asis, ja tādas ir nepieciešamas.
- Drošums un stabilitāte - stabilai prototipa darbības nodrošināšanai visā testēšanas un izstrādes procesā.

3D printera vadību var realizēt ar dažādā veida paņēmieniem, var izmantot eksistējošos mikrokontrolera plates ar paplašināšanas plati, kas paredzēta 3D printeru veidošanai, kā piemēram *Arduino Mega* mikrokontrolera kombināciju ar RAMPS paplašinājuma plati. Vēl viens variants izmantot specializētas jau gatavus risinājumus, kas ir tieši piemēroti 3D printeru ražošanai, kā *Smoothieboard*, *Duet 3D*, vai *Bigtreetech* vadības plates, kas ir balstītas uz ARM mikroprocesoru izmantošanas. Kā arī var izveidot paštaisīto paplašināšanas plati kombinācijā ar mikrokontrolera plati un *Rasperi Pi* vadības plati, tāda kombinācija dod iespēju izmantot attālināto vadību ar *Web* interfeisu izmantojot *OctoPrint* vai *Klipper* programmnodrošinājumu. Jebkura no sistēmām nodrošina 3D printera vadību ar komponentu paplacināšanas iespējam, tomēr mikrokontrolleros atšķiras arī iebūvētas *Flash* atmiņas apjoms un darbības ātrums, kas var ietekmēt G-koda nolasīšanas ātrumu un attiecīgi rezultēt par lēnāko 3D printera kopējo darbību. Tabula 5.4 ir salīdzināti vairāki mikrokontrolera plašu veidi, pašlaik izmantojamie vairākos esošos 3D printeru modeļos, un uz kuru bāzes tiek izstrādātas zinātniskas iekārtas, minētas[24], [57], [58] avotos.

Mikrokontrolera plašu salīdzinājums pēc ātrdarbības un atmiņas apjoma.

Mikrokontrolera plate (Mikrokontrollers)	Darbības ātrums	Flash atmiņas apjoms	SRAM atmiņas apjoms
Arduino Mega 2560 R3 (ATmega2560)	16 MHz	256 KB	8 KB
STM32F103xF (ARM Cortex®-M3)	72 MHz	768 KB	96 KB
BIGTREEEACH SKR MINI E3 (STM32G0B1RET6)	64 MHz	512 KB	144 KB
Duet 3 Mini 5+ (ARM Cortex M4)	120 MHz	1 MB	256 KB
Manta M8P (STM32H723)	550 MHz	1 MB	564 KB

Var redzēt ka atsevišķi parametri var atšķirties vairākas reizes, un mainot vadības plati 3D printera potenciāla ātrdarbība palielinās. Vēl viens faktors 3D printeru uzbūve ir iespēja brīvi mainīt soļu dzinēja draiveri, kas saņem komandas no vadības plates un kontrolē soļu dzinēja kustības. Draiveru maiņa dod iespēju mainīt 3D printera parametrus kā arī atbrīvo no nepieciešamības izmantot to draiveri kas jau iepriekš ir iebūvēts ar ražotāju, jo dažreiz ražotājs nenorāda draiveru specifikāciju un 3D printera kontrole var būt apgrūtināta. Izvēloties vadības plati bija paņemti divi varianti Arduino Mega ar RAMPS 1.4 paplašinājumā un Manta M8P. Abi varianti piedāvā brīvu soļu dzinēju draiveru maiņu, liela apjoma papildu aprīkojuma (ventilatoru, temperatūras devēju u.c.) pieslēguma skaitu un minimāli nepieciešamo soļu dzinēju pieslēguma skaitu, kas sastāda 5 vienības, pa 1 dzinējam uz katru kustības ass, (X, Y, Z) un 2 dzinēji uz materiāla padošanu, kas ir nepieciešams divu krāsu vai divu materiālu drukāšanai vai papildu ekstrūderis produktivitātes palielināšanai. Cilindriskas drukas 3D printera prototipam ir izmantota Arduino Mega ar RAMPS 1.4 kombinācija, bet 5 asu cilindriskam printerim Manta M8P vadības plate kombinācijā ar Raspberry Pi.CM4 (sadaļa 6). Raspberry Pi un RAMPS izmantošana un pielietojumi plašāk ir aprakstītas [59], [60], [61], [62].

5.2.3. Soļu dzinēja un pārvades mehānisma izvēle

Nākamais solis ir izvēlēties soļu dzinēju, kas kontroles rotējošas ass kustību. Šim dzinējam jābūt ar lielu precizitātes pakāpi, jo ass rotējošas būtības dēļ palielinoties drukas cilindra diametram vai drukas objekta augstumam drukas precizitāte samazināsies. Lai iegūtu labu precizitāti un samazinātu pārvades mehānisma pretreakciju nepieciešams izvēlēties pareizo soļu dzinēju un pārvades mehānismu, soļu dzinējam jābūt augsta leņķiskā precizitāte.

Šādiem parametriem atbilst NEMA standarta soļu dzinēji plašāk aprakstāmie [63] avotā. Lai izvēlēties soļu dzinēju nepieciešams noteikt cik liels būs drukas izmērs un materiāla uzklāšanas līnijas biezums. Balstoties uz izvelta *Creativity Ender 3 V2* printera drukas tilpuma izmēriem, kas sastāda 220x220x250mm (X,Y,Z) var izvēlēties maksimālo rādiusu kas tiks

ņemts aprēķinos. Maksimālais izmērs X un Y virzienos ir 220mm, un var pieņemt to ka diametru, tad rādiuss sastādīs 110mm, tomēr svarīgi ņemt vērā ka faktiskie drukas izmēri var atšķirties parejot uz rotējošo sistēmu, un drukas galvas elementi kā arī printera plakans drukas galds, kas netiks noņemts, lai dod iespēju brīvi pārslēgties starp drukas veidiem, papildu ierobežo drukas izmērus. Rezultāta iespējamo drukas rādiusu nepieciešams samazināt uz noteikto lielumu.

Izstrādājams prototips galvenokārt ir paredzēts nelielo ortožu un to sastāvdaļu drukai, sakara ar to ir ievērots aptuvenš maksimālais ekstremitātes izmērs ar diametru 100mm, kas atbilst vidējā vīrieša līdz 100kg masas un 190cm auguma maksimālas ekstremitātes izmēriem. Aprēķinos maksimālais rādiuss tiks uzskatīts par 50mm, kas atbilst 100mm diametram.

Otrais svarīgais parametrs ir materiāla uzlikšanas precizitāte. 3D printeros pēc noklusējuma izmanto 0.4mm sprausla, tomēr eksistē sprausla no 0.1mm līdz 1.8mm printeriem kas izmanto 1.75mm biezo kvēldiegu. Līnijas biezumu var regulēt ar griešanas programmas iestatījumiem un katram sprauslas izmēram līnijām biezumu var palielināt vai samazināt aptuveni divreiz, balstoties uz sprauslas konstrukcijas īpašībām. Soļu dzinēja izvēlē aprēķinos tika ņemta standarta sprausla 0.4mm ar līnijas biezumu 0.6mm, tas dod ātrāku drukas laiku gandrīz nesamazinot drukas kvalitāti. Rezultātā var aprēķināt leņķisko precizitāti θ (5.6) [48]:

$$\theta = \frac{\text{sprauslas precizitate}}{\text{maksimālo rādiusu}} = \frac{0,6}{50} * \frac{180}{\pi} = 0,68^{\circ} \quad (5.6)$$

Soļu dzinēja viena soļa leņķis ir pieņemts par 1.8° . Lai aprēķināt pārvades mehānisma nepieciešamo maksimālo attiecību R starp rotējošo cilindru un soļu dzinēju (5.7):

$$R = \frac{\text{dzinēja soļa garums}}{\text{leņķiska precizitāte}} = \frac{1,8}{0,68} = 2,61 \quad (5.7)$$

Nākamais solis ir aprēķināt nepieciešamo minimālo griezes momentu M. Lai to aprēķinātu nepieciešams noteikt masas inerces momentu I_g un minimālo leņķisko paātrinājumu α . Prototipa masas inerces momentu I_g var aprēķināt definējot visu komponentu kopējo masas inerces momentu, ko aprēķina izmantojot formulu 5.8, kur r ir komponenta rādiuss, L ir tā garums, ρ ir materiāla blīvums un M ir tā masa. Aprēķinus var apskatīt tabulā 5.5. Aprēķināta prototipa drukas galda masas inerces moments ir $I_g = 0.00118 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$

$$I_g = \frac{1}{2} \rho \pi L r^4 = \frac{1}{2} M r^2 \quad (5.8)$$

Leņķiskais paātrinājums ir leņķiska ātruma izmaiņas ātrums laikā (5.9), un ja pieņem kā cilindra vidējais rotācijas ātrums ir 500 rpm un ātruma izmaiņas notiek 1 sekundes laikā, tad aprēķinātais leņķiskais paātrinājums ir aptuveni 50 rad/s².

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad (5.9)$$

Griezes momentu varam aprēķināt kā masas inerces momenta I_g un minimāla leņķiska paātrinājuma α reizinājumu 5.10

$$M = I_g * \alpha = 0,00118 * 50 = 0,059 \text{ Nm} \quad (5.10)$$

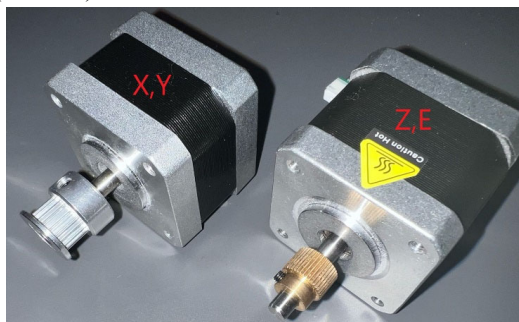
Visi aprēķināmie parametri ir apkopoti tabula 5.5:

Tabula 5.5

Masas inerces momenta aprēķini 3D printera prototipa drukas cilindra komponentēm

Komponents	r(m)	L(m)	ρ (kg/m ³)	I_g (kg/m ²)
Drukšanas cilindrs	0.05	0.01	7800	$7.65 \cdot 10^{-4}$
Cilindra pamatne	0.05	0.01	1230	$1.21 \cdot 10^{-4}$
Vadošā skrūve	0.008	0.03	7800	$1.50 \cdot 10^{-6}$
60 zobu GT2 zobrats	0.044	0.016	2700	$2.54 \cdot 10^{-4}$
20 zobu GT2 zobrats	0.015	0.016	2700	$3.43 \cdot 10^{-6}$
2x gultņi 608zz	0.022	0.008	7800	$2.29 \cdot 10^{-5}$
Soļu dzinējs BJ42D15-26V12	0,005	0,06	7800	$1.20 \cdot 10^{-5}$
Kopā				$1.18 \cdot 10^{-3}$

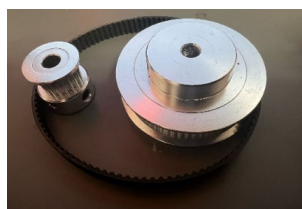
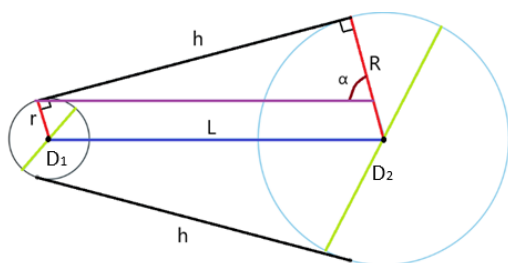
Ir izvēlēts NEMA 17 42-34 BJ42D15-26V12 soļu dzinējs, kas atbilst visam prasībām. Dzinēja griezes moments ir 0.4 Nm un 0.8A nomināla darba strāva. Izvēlēts dzinējs nodrošina lielāku griezes momentu un atbilst pretreakcijas novēršanas prasībām. Šis dzinējs arī ir izmantots X asij, jo tas noslodze ir līdzīga Y asij. Z un E (ekstrudera) asīm ir līdzīgas prasības kā X un Y asīm, tomēr lai nodrošinātu lielāku griezes momentu pie vienādās darba strāvas Z ass pacelšanai un materiāla padošanas mehānismam E asij, kur slodzes ir lielākas, šo asu kontrolei ir izvēlēts 42HS040DF260A-01 soļu dzinējs ar 0.4 Nm griezes momentu un 1.0 A maksimālo darba strāvu (5.13.att.).



5.13.att.Izvēlētie soļu dzinēji prototipa izstrādei

Maksimāla nepieciešama pārvades mehānisma attiecība izstrādājamam prototipam, kuru nepieciešams nodrošināt ir 2.61:1, un balstoties uz to var paņemt GT2 (Gates Tooth, 2mm pitch) standarta komponentes, ko plaši pielieto 3D printeros.

Lai nodrošinātu nepieciešamu pārvades attiecību ir izvēlēts GT2 60 zobu un 20 zobu zobrats, kas nodrošina 3:1 attiecību, kas pārsniedz nepieciešamo minimālo attiecību. Lai novērst pretreakciju nepieciešams izvēlēties jostu nepieciešama garuma l , ko var aprēķināt zinot zobratu garumus $D1$ un $D2$ un augstumu h (5.11) ko var redzēt attēlā 5.14:



5.14.att. Zobratu savienošanas zobsiksna garuma noteikšanas parametri.

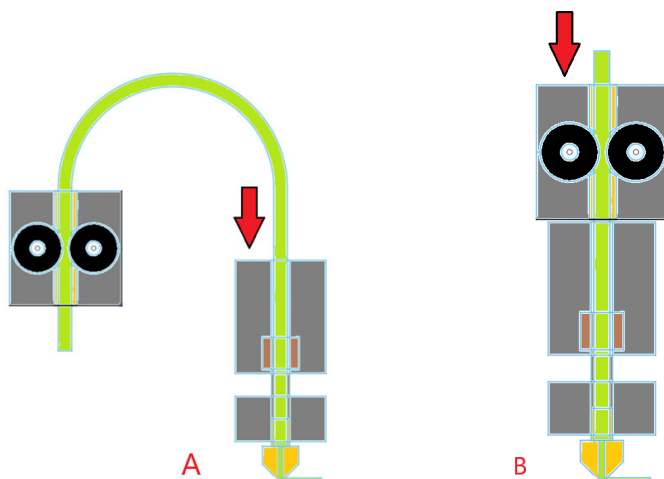
$$l = (D1 - D2) \cos^{-1} \left(\frac{D2 - D1}{2a} \right) + \pi D2 + 2 \sqrt{a^2 - \left(\frac{D2 - D1}{2} \right)^2} \quad (5.11)$$

Zobratu izmēri ir $D2=37,5\text{mm}$ un $D1 = 12\text{mm}$, zobsiksna garums l tiek aprēķinās kā:

$$l = (12 - 37,5) \cos^{-1} \left(\frac{37,5 - 12}{2 \cdot 49,5} \right) + \pi \cdot 37,5 + 2 \sqrt{49,5^2 - \left(\frac{37,5 - 12}{2} \right)^2} = 217,75 \quad (5.12)$$

Pēc zobsiksna garuma aprēķina ir izvēlēts GT2 218mm gara zobsiksna ar 6mm platumu un 2mm soli. Attālums starp zobratu centriem L ir 68.5mm.

Drukas galvas mehānismu var realizēt divos variants Bowden, kur materiāla padošanas mehānisms ir atdalīts no drukas galvas, un Direct, kur materiāla padeves mehānisms ir uzstādīts tieši uz drukas galvas (5.15.att.).



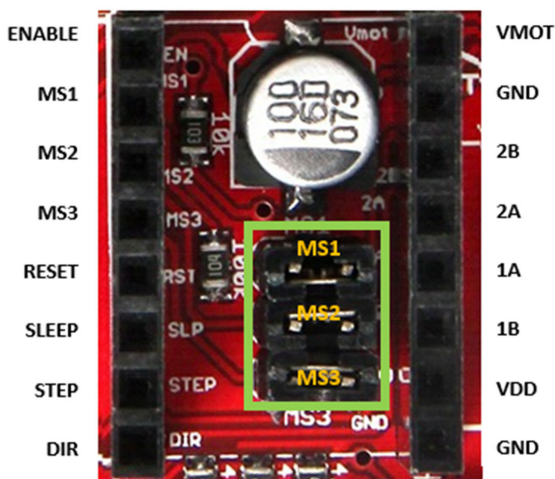
5.15.att. Bowden (A) un Direct (B) drukas galvas materiāla padošanas mehānisma stiprināšanas veids.

Drukas galvas konstrukcijas veids ietekme uz drukas galvas svaru, drukas laiku, drukas galvas paātrinājumiem un izmantojamiem materiālu veidiem. Tā izmantojot *Bowden* tipa drukas galvu samazinās drukas galvas svars, padarot to vieglāku un tas dod iespēju izmantot

lielākus drukas galvas paātrinājumus, tomēr palielinās attālums no materiāla padošanas mehānisma līdz uzkaršējamiem elementiem, ka rezultāta nepieciešams palielināt materiāla padošanas-atgriešanas distanci, kas palielina drukas laiku, jo materiāla padošanas komandu biežums drukas laika ir ļoti liels. Otrādi, izmantojot *Direct* drukas galvas veidu viss mehānisms atrodas uz drukas galvas, tas palielina svaru, tomēr dod iespēju izmantot īsākus materiāla padošanas-atgriešanas attālumus, kas arī var palielināt drukas ātrumu un vienlaicīgi dod iespēju drukāt ar plašāko materiālu klāstu, tādu ka elastīgie *Flex* materiāli, TPU un citi. 3D cilindriskas drukas prototipam ir izvēlēts *Bowden* tipa padošanas mehānisms, tomēr piecu asu cilindriskam prototipam ir izvēlēts *Direct* padošanas mehānism, tas dos iespēju salīdzināt abus variantus.

5.2.4. Soļu dzinēja draivera izvēle

3D printeru vadības plates soļu dzinēju vadībai parasti izmanto tādu pašu spriegumu ka uz pašas plates, tomēr dažas plates var izmantot sadalītu vadību. Tā RAMPS platei ir divi 12V slēgumi, kur viens uz 5A atbild par soļu dzinēju vadību, visam papildu komponentēm kā arī pašas plates barošanu, bet 11A izeja atbild par uzkaršējamo elementu barošanu – drukas galda uzsildi un drukas galvas uzsildi. Dažādi soļu dzinējiem ir dažāda spoļu pretestība un lai sasniegtu maksimālo dzinēja griezes momentu nepieciešams padot lielāku strāvu, tomēr vienlaikus tas palielina dzinēja temperatūru, tāpēc ir svarīgi izvēlēties pareizo draiveri, kas spēj padot nepieciešamo strāvas lielumu. Draiveri var pieslēgt pie plates izmantojot dažādus protokolus kā STEP/DIR, SPI, UART. Izmantojams protokols ir atkarīgs no vadības plates un draivera iespējam. Draiveriem ir iespēja ieslēgt mikrosoļu vadību, sadalot vienu soli uz vairākiem, ko var ieslēgt ar *džamperu* pārslēgšanu uz vadības plates, vai ieslēgt vadības programmā, ja tāda iespēja ir draiverī. Lai izvēlēties draiveri kurš atbilst izvēlētam dzinējam un vadības platei ir veikts draiveru salīdzinājums (tabula 5.6). Draiveris ir izvēlēts tā lai nebūtu nepieciešams veikt kādus papildu plates modifikācijas, lai to nodrošinātu nepieciešams zināt vadības plates kontaktu izvietojumu (5.16.att.).



5.16.att RAMPS 1.4 draiveru pieslēgšanas kontakti

Soļu dzinēja draiveru salīdzinājums

Nosaukums	U_{max} , V	I_{rms} , A	I_{max} , A	Maksimāls mikrosoļu režīms	Pieslēgšanas veids
A4988	35V	-	2A	STEP/DIR: 1/16	STEP/DIR
DRV8825	36V	-	2.2A	STEP/DIR: 1/32	
LV8729	45V	-	1.5A	STEP/DIR: 1/128	
ST820	45V	1.5A	6.8A	STEP/DIR: 1/256	
S6128	35V	-	2.2A	STEP/DIR: 1/128	
S109	50V	-	4A	STEP/DIR: 1/32	
TMC2100	46V	1.25A	2.5A	STEP/DIR: 1/16	
TMC2130	46V	1.2A	2.5A	STEP/DIR: 1/16 SPI: 1/256	STEP/DIR/SPI
TMC2208	36V	1.4A	2A	STEP/DIR: 1/32 UART: 1/256	STEP/DIR UART
TMC2209	29V	2A	2.8A	STEP/DIR: 1/64 UART: 1/256	STEP/DIR UART

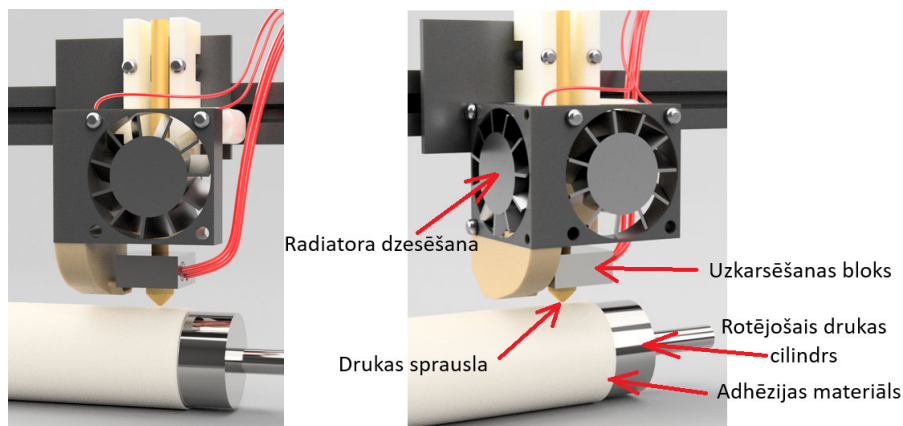
Sakara ar to ka ir izvēlētas 2 vadības plates 8-bitu *Arduino Mega* un 32-bitu *Manta M8P*, ir izvēlēti divi draiveru veidi. *Arduino Mega* plati ir izvēlēts vienkāršāks un vienlaicīgi drošāks *A4988* draiveris, kas piedāvā mikrosoļu vadību līdz 1/16 kas ir maksimāli iespējamais mikrosoļu lielums 8-bitu platēm, jo palielinot mikrosoļu daudzumu vadības platei būs nepieciešams attiecīgi padot vairāk *STEP* un *DIR* komandu skaitu, kas novedis pie 3D printera nestabilas darbības. *Manta M8P* platei ir izvēlēti *ADI Trinamic TMC 2209* draiveri, tie piedāvā lielāko mikrosoļu lielumu 1/256, tos var pieslēgt izmantojot *UART* protokolu, kas dos iespēju iespēju iestatīt mikrosoļu skaitu vadības programmā. Vienlaicīgi tam ir lielāka izspējama maksimāla strāva no *UART* tipa salīdzināmajiem draiveriem, kas nodrošinās izvēlēto soļu dzinēju vadības stabilitāti un labāko griezes momentu. *RAMPS* paplašināšanas plate lai iestatītu mikrosoļus nepieciešams izmantot *džamperus*, un savienojot *MS1*, *MS2* un *MS3* kontaktus un izmantojot *A4988* draiveri ir ieslēgta 1/16 mikrosoļu vadība. Katrām prototipam uz katru soļu dzinēju ir izvēlēti vienāda tipa draiveri ar uzliktiem virsu radiatoriem, lai novērstu draiveru pārkaršanu prototipa ilgstošas lietošanas laikā.

5.2.5. Drukšanas galvas elementu un dzesēšanas sistēmas izvēle

3D printeros ir divas vietas kur ir nepieciešama izmantot uzkaršēšanas elementus: drukas galds un drukas galva. Izvēlēta materiāla uzkaršēšanai nepieciešams izvēlēties attiecīgu uzsildīšanas elementu, kas spēs nodrošināt drukas galvas sprauslas uzkaršēšanu līdz materiāla kušanas temperatūrai. Balstoties uz to ka visiem izvēlētiem materiāliem drukas temperatūra nepārsniedz 250 °C nepieciešams izvēlēties uzkaršēšanas elementu, kas nepārsniedz *RAMPS* plates iespējas, kas ir 12V DC 11A, tomēr balstoties uz to ka daļa no jaudas ir paredzēta uzkaršējamam galdam, reāla jauda nedrīkst pārsniegt 50W. Ir izvēlēta 12V 40W SM2.54 kārtidžu keramikā karstuma caurule, ar maksimālo strāvu 2.5A un maksimālo uzkaršēšanas

temperatūru 250 °C. Rotējoša cilindra uzkaršēšana nav paredzēta, tomēr lai dod iespēju pārslēgties starp plakano un cilindrisko drukku, ir izmantots *Two Trees* 12V DC 96W drukas galds ar 220x220mm izmēru, kas spēj uzkaršēties līdz 100 °C. Drukšanas galvas un modeļa dzesēšanai nepieciešams izvēlēties dzesētājus, lai nepārkarsētu drukšanas galvu vairāk par 260 °C un lai dzesētu modeli drukšanas laikā labākai materiāla uzklāšanai.

Par dzesēšanas ventilatoriem tika izvēlēti *Creality CHA4024BM-10B 4010 24V DC 0.10A* un *Creality 4010 24V 0.10A EFS-04D24L* kas bija iepriekš uzstādīti *Creality Ender 3 V2* 3D printerā [64]. Tie nodrošina nepieciešamo dzesēšanu un gaisa plūsmu, bet balstoties uz to ka izmantojamās vadības plates spriegums ir 12V to barošanai ir izmantot *Kangwoobei DC/DC Bust* pārveidotais no 12V līdz 24V 1A. Cilindriskās drukas būtības dēļ ir nepieciešams nodrošināt pietiekamu drukšanas galvas elementu attālumu no drukšanas cilindra, tāpēc drukšanas galvas konstrukcija ir mainīta, lai atbilstu prasībām. Drukšanas galvas elementu izvietošanai ir uzmodelēts 3D korpusa modelis un izdrukāts izmantojot neilona kvēldiegs *Fiberlogy PA12 + GF15* balts 1,75 mm ar temperatūras izturību līdz 170°C, kas nodrošinās drukšanas galvas izturību pret uzkaršējamas daļas temperatūras izmaiņām (5.16.att.) [65], [66], [67].



5.16.att. Drukšanas galvas uzbūve un izmantojamie elementi.

5.2.6. Temperatūras un pozīcijas devēju izvēle

Izstrādājamā prototipā ir 3 vietas kur nepieciešams veikt temperatūras mērījumus: drukšanas galvas uzkaršējama daļā (*hotend*), plakana drukšanas galdā un Arduino Mega mikrokontrolera izvietošanas vietā drošības dēļ, jo lielas noslodzes laikā mikrokontrolers un soļu dzinēju draiveri var uzkaršēties un lai kontrolētu temperatūru ir izvietots papildu temperatūras devējs. Izvēlētais keramiskais sildītājs ir paredzēts izmantošanai ar temperatūrām līdz 260 °C, vadības plates uzkaršēšanas diapazons ir paredzēts aptuveni no 30 līdz 80 °C diapazonā, un plakana drukšanas galdā temperatūra nepārsniedz 100 °C. Labākai precizitātei un tālākiem eksperimentiem ir nepieciešams izvēlēties temperatūras devējus diapazona no 5 °C līdz 300 °C. Prasībām atbilst termistori ar darba diapazonu no -100 līdz 300 °C, pretestības termometri ar diapazonu no -260 līdz 600 °C un termopāri ar diapazonu no -200 līdz 1800 °C.

3D printeros temperatūras izmaiņas ātrums dažādiem elementiem var būt ātrāk par 1s un drukas galvas uzkaršēšana no 25 °C līdz 250 °C notiek aptuveni 1 minūtes laikā, balstoties uz šiem parametriem nepieciešams izmantot atbilstošu devēju. Temperatūras svārstības drukas laikā ir var sastādīt ± 2 °C, attiecīgi nepieciešams izvēlēties nepieciešamas precizitātes devēju.

Vadības plate barošana ir nodrošināta no 12V DC sprieguma un temperatūras devēju pieslēgšanai ir paredzēti trīs 2-vadu, attiecīgi nepieciešams izmantot 2-vadu devējus. Visam prasībām atbilst termistoru grupa. Termistori ir ātrdarbīgi, precīzi 2-vadu devēji. Ir izvēlēti trīs NTC100K B3950 termistori ar darba diapazonu no -50 līdz 300 °C, precizitāti $\pm 1\%$ un pretestību 100K Ohm pie 25 °C.

Izstrādājamam prototipam 3 asu kustību virzienos ir nepieciešams noteikt kustīgo elementu minimālo pozīciju. Maksimāla pozīcija tiks definēta programmnodrošinājumā. X asij nepieciešams noteikt minimālo X, Z asij noteikt minimālo Z pozīciju, un Y2 asij minimālo Y2 pozīciju plakanam drukas galdam. Cilindriskam drukas galdam Y asij noteikt minimālo drukas pozīciju nav nepieciešamības, jo ass ir neierobežota pēc garuma, jo ir cilindriskas formas, un minimāla Y pozīcija ir noteikta ar programmnodrošinājumu. Balstoties uz vadības plates darba spriegumu 12V DC un 3-vadu pieslēguma spaiļes (SIGNAL, GND, +5V). Prasībām atbilst izvēlētais pozīcijas devējs *Enomaker CR-Limit-S* ar darba spriegumu līdz 250V un darba strāvu līdz 5A [68].

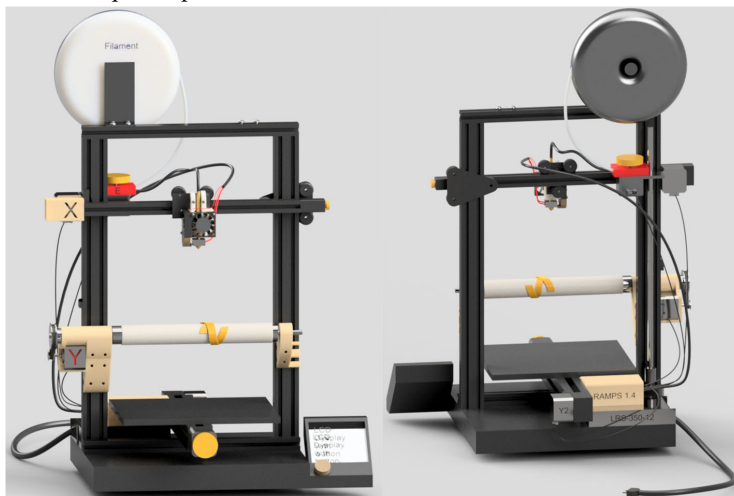
5.2.7. Barošanas avota izvēle

RAMPS 1.4 paplašināšanas plates slēgumam paredzēta maksimāla strāva līdz 5A uz vadības plates un soļu dzinēju barošanu, un 11A uz uzkaršējamo elementu barošanu, tad minimāli nepieciešama barošanas bloka parametri ir 12V DC 16A, bet balstoties uz to ka izvēlēto elementu jauda ir 40W drukas galvas uzsildīšanas elementam un 96W drukas galdam jauda pārsniedz vadības plates pieļaujamo jaudu. Drukas galda uzkaršēšana būs limitēta ar vadības plates iespējam un teorētiski varēs izpildīt savas funkcijas. Balstoties uz barošanas avotu efektivitātes pakāpēm atlasāmajam barošanas avotam ir nepieciešams pēc iespējas būt uz 20-30% lielākas jaudas nekā uzstādama slodze, lai efektīvi pārvaldītu ar elektroenerģiju.

Izvēlts 12V 29A 348W slēgta tipa Mean Well LRS-350-12 impulsu barošanas bloks, kas atbilst jaudas un izmēra prasībām, lai ietilpstu 3D printera barošanas bloka vietā. Ar TENMA oscilloskopā veiktiem mērījumiem uz 3D printera 12V pieslēguma pie barošanas bloka, tika konstatēts, kā pie maksimālas noslodzes, pie maksimāli iespējamam temperatūrām prototipa sistēma darbojas pie 14.5A, kas aptuveni atbilst 175W patēriņam, tomēr lielākas jaudas barošanas bloks ir paredzēts, lai arī nodrošinātu iespēju papildu komponentu un vēl viena soļu dzinēja slēgumam.

5.3. 3 asu FDM cilindriskas koordinātu sistēmas printera prototipa izstrāde

Pirmais posms prototipā izveide ir sagatavot prototipa 3D CAD konceptu (5.17.att.), kas ir modelēts Autodesk Fusion 360 aplikācijā, kur norādīts visu elementu izvietojums. Izmantojamo komponentu saraksts prototipa izveidei ir attēlots tabula 5.7:



5.17.att. Autodesk Fusion 360 izveidots cilindriskā 3D printera prototipa CAD modelis

Tabula 5.7

5 asu cilindriskam FDM 3D printera prototipa izmantojamo komponentu saraksts.

Nosaukums	Modelis	Parametri
3D printeris	Creativity Ender-3 V2	CoreXZ Dekarta sistēmas FDM 3D printeris
Soļu dzinējs	2 x NEMA 17 42-34 BJ42D15-26V12 2 x NEMA 17 42-40 42HS040DF260A	Soļa leņķis: 1.8°, Nomināla strāva 0.8A, 1.0 A Fāžu skaits: 2, Griezies moments: 0.8 Nm
Soļu dzinējā draiveris	4 x A4988	Darba spriegums: 8-35V DC, Loģikas spriegums: 3-5.5V DC, I _{max} 2A
Barošanas avots	Meanwell LRS-350-12	12V DC, 350W, 27A, 48-63Hz
Vadības elementi	Arduino Mega 2560, RAMPS 1.4	ATMega 2560 16 MHz
Pārvades mehānisms	1 x 2GT 20 zobu zobrats, 1 x 2GT 60 zobu zobrats 1 x 2GT-6 218mm zobsiksna, 2 x 688ZZ gultni, 400x8mm vītņota skrūve	Pārvades attiecība 3:1
Programmnodrošinājums	Marlin	Prototipa vadība realizējama izmantojot Web interfeisu ar Wi-Fi protokolu
3D drukas materiāli	Creativity PA12 white 1.75mm	Tiek drukāti drukas galvas elementi, Y ass korpus.

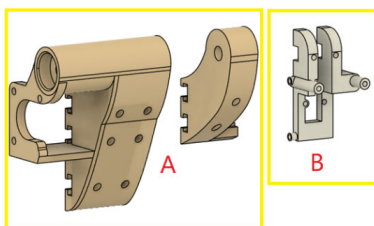
Prototipa korpuss ir izveidots no 4020 un 2020 alumīnija profiliem, kas nodrošina drukas stabilitāti un attiecīgi mazo asu svaru.

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 8mm diametra (2mm *pitch*, 8mm *lead*) un 400mm gara vītņota skrūve piestiprināta pie X ass stiprināšanas elementiem. X ass ir stiprināta pie 2020 alumīnija profila un tiek kontrolēta izmantojot NEMA 17 42-34 soļu dzinēju ar GT2 20 zobu zobratu un GT2 6mm biezu un 750mm garo jostu piestiprināto pie drukas galvas stiprināšanas elementiem.

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

Prototipa izgatavošanai bija nepieciešams izveidot mehāniski un temperatūrai līdz 150°C izturīgus elementus drukas galvas un cilindriskā galda stiprināšanai, kas tika izdrukāti ar tradicionālo FDM metodi izmantojot *Fiberlogy* neilona PA12 baltas krāsas kvēldiegu (5.18.att.).

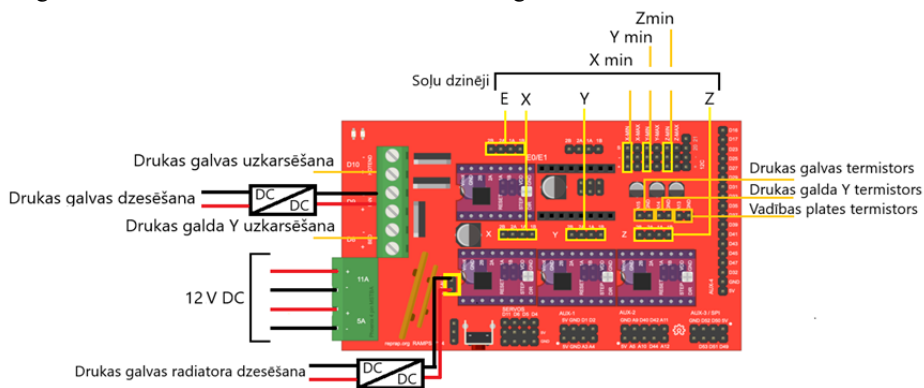


5.18.att. Ar tradicionālo FDM metodi izdrukātas PA12 neilona cilindriskā drukas galda, soļu dzinēja un vītņota stieņa (A) un drukas galvas elementu (B) stiprināšanas CAD modeli

Prototipa cilindriskās drukas galda elementu stiprināšanai ir modelēts CAD stiprināšanas korpuss, kas ir izdrukāts no *Fiberlogy* PA12 baltas krāsas neilona kvēldiegā, kas nodrošina lielu izturību pret mehāniskam slodzēm. Lai nodrošinātu Y ass koncentriskumu ir izveidots papildu stiprinājums uz otra Y ass gala, un pievienots automātiskās līmeņošanas zonde cilindra pozīcijas noteikšanai un regulēšanai. Lai nodrošinātu ātru pārslēgšanos starp plakano un cilindrisko droku, ir izvietots Y2 ass ar plakano galdu kontrolējams ar NEMA 17 42-34 soļu dzinēju un blakus motoram ir izvietots pozīcijas devējs minimālas Y2 galda pozīcijas noteikšanai [69]. Visi kontroles un vadības elementi ir pieslēgti pie Arduino Mega 2560 vadības plates ar RAMPS 1.4 paplašināšanas plati, kas ir pieslēgti pie 12V DC 29A impulsu barošanas bloka izvietojama 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

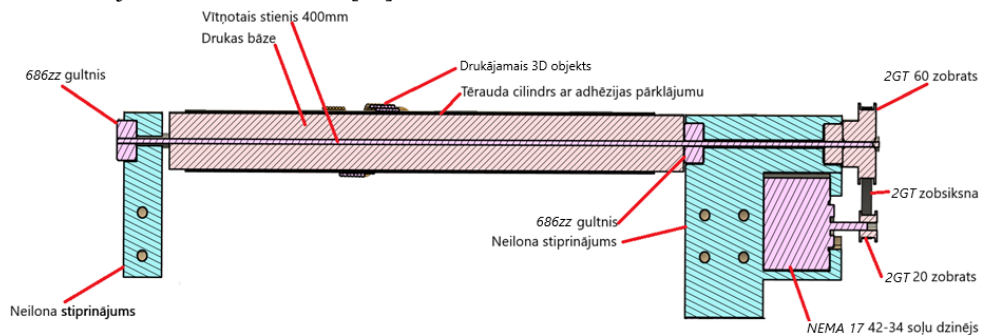
printera prototipa atmiņas karti ir paredzēta, izmantojot *USB* pieslēguma pie personālā datora vai izmantojot pārsesājamus *SD* atmiņas kāršu datu nesējus [70].

RAMPS 1.4 paplašināšanas plate ir uzstādīta virsu Arduino Mega 2560 mikrokontrollera platei un visi 3D printera prototipa elementi ir pieslēgti pie RAMPS 1.4 paplašināšanas plātes. Prototipa ir 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 galvā D9 izvadā drukājamo objektu dzesētājam ir paredzēta ātruma kontrole, bet 12V-AUX izvadā drukas galvas radiatora dzesētājam to nevar regulēt, attiecīgi ir nepieciešams izmantot divus atsevišķus DC/DC pārveidotājus, barošana pieslēgta no 12V DC barošanas bloka. Elementu slēgums ir redzams 5.19.att.:



5.19.att. Prototipa elementu pieslēguma shēma.

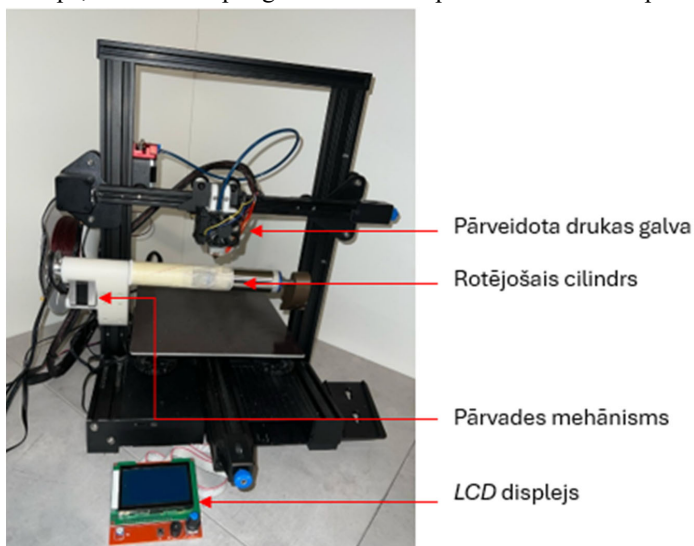
Cilindriska drukas galda konstrukcijas sastāv no diviem (4.19 att.) neilona stiprināšanas elementiem, trim 686zz gultņiem, 8mm diametra 400mm gara vītņota tērauda stieņa, 2GT 60 un 20 zobu zobratiem, 2GT 218mm zob siksnas, neilona drukātas cilindrisks 31mm arēja diametra bāzes ar 8mm diametra vītņotu caurumu un tukšs tērauda cilindrs 32mm diametrā un 0.5mm biezuma, kas nodrošina virsmas gludumu un precizitāti. Tērauda cilindram nav paredzēta uzkaršēšana sakara ar to virsmu ir nepieciešams pārklāt ar adhēzijas materiālu, piemēram laku, līmi vai papīra krāsošanas līmlenti, kas un ir izmantota testos. Salikta konstrukcija ir redzama 5.20.att. [71].



5.20.att. Cilindriska drukas galda uzbūve griezumā

Cilindriskas drukas galda bāze ir drukāta uz tradicionāla FDM 3D printera, izmantojot neilona PA12 kvēldiegu. Bāzes izmēru var regulēt mainot to diametru, un attiecīgi mainot drukas galda izmēru un diametru. Ir iespējams drukāt uzreiz uz drukas bāzes ja tā ir pārklātā ar atdalāmo adhēziju slāni, tomēr lai nodrošinātu cilindra gludumu un novērst ģeometrijas izmaiņas lielo temperatūru ietekmes dēļ ir izmantots papildu 0.5mm biezs tērauda cilindrs.

Izveidots un salikts prototips (5.21.att.) ir pieslēgts pie 230V AC barošanas avota un TENMA osciloskopa, lai nolasītu spriegumu un strāvas parametrus un veikt patēriņa aprēķinus.



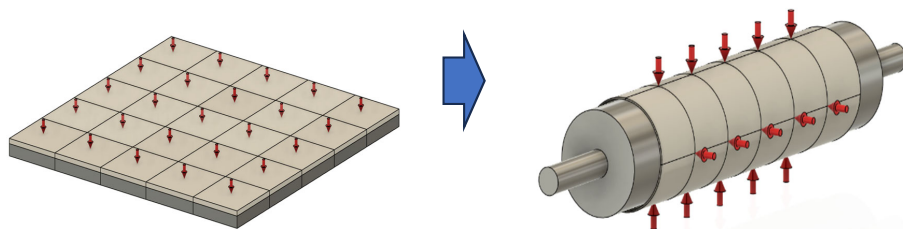
5.21.att. Izveidots cilindriskas drukas prototips.

Vadības platei kā programmnodrošinājums ir izvēlēts Marlin programmaparatūra. Marlin nodrošina C valodā rakstītu kodu ar vairākiem iestatījumu failiem. Lai ielādētu Marlin programmatūru uz vadības plates, tā ir savienota ar personālo datoru, izmantojot USB kabeli caur 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 plates atmiņā. Drukāšanai iepriekš sagatavots ģenerētais G-kods tiek ierakstīts SD atmiņas kartē un ievietots LCD ekrāna savienotājā. Ortozes izgatavošanas posmi un programmatūras sagatavošanas posmi ir attēloti diagrammā (5.22.att.).

Lai nodrošinātu augstu drukas precizitāti ir nepieciešams noteikt drukas galda koncentriskumu. Tas noteikšanai ir izmantots automātiskais augstuma sensors 3D printerim CR-Touch. Sensors tiek uzstādīts uz drukas galvu blakus drukas sprauslai. Šis sensors ir paredzēts plakanas drukas galda virsmas ģeometrijas noteikšanai un pārbaudes metode balstās uz to ka kad sensors saskaras ar virsmu, tas reģistrē to kā signālu un pārsūta šo informāciju uz vadības plati. Pamatojoties uz saņemtajiem datiem, vadības panelis nosaka galda augstumu un nelīdzenumus (4.22.att.). Lai CR-Touch darbotos pareizi, ir nepieciešama iepriekšēja kalibrēšana. Tas ietver sensora augstuma regulēšanu un tā attālumu no sprauslas, lai nodrošinātu optimālu saskari ar galda virsmu. Cilindriska 3D prototipā šis sensors ir izmantots līdzīgi

plakanam drukas galda 3D printerim. Drukas cilindrs tiek sadalīts pa zonām un pārbaudes laikā cilindrs griežas un sensors noteic attālumu no sprauslas līdz cilindram. Tādā veidā ir iegūts cilindra izvietojums telpā un var mehāniski koriģēt cilindra pozīciju mainot stiprināšanas elementu izvietojumu uz printera metāliskiem profiliem. Ja pēc pozīcijas noteikšanas ar sensoru visi attālumi ir vienādi vai līdzīgi, var konstatēt kā ass ir izvietota pareizi un tai ir labs koncentriskums visā garumā. Ja mainot ass pozīciju nu veicot mērījumus drukas galds joprojām rada ka attālumi visa ass garuma nesakrīt tad ass ir ar sliktu koncentriskumu un vajag aizvietot tā elementus.



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

5.3.1. Programmnodrošinājumā iestatījumi un sagatavošana drukai

Pirms drukas sākšanās ir nepieciešams veikt soļu dzinēju kalibrēšanu. Soļu dzinējam nepieciešams norādīt soļu skaitu uz vienu milimetru. Tas ir nepieciešams lai nodrošinātu soļu dzinēju pārgriešanu uz nepieciešamo noteiktu attālumu. Y ass ir aprīkota ar pārvades mehānismu 3:1 attiecībā, sakara ar to var paredzēt ka soļu skaits milimetrā būs trīs reizes lielāks, tomēr pēc veiktas kalibrēšanas bija konstatēts kā nepieciešams lielāks soļu daudzums nekā prognozēts. Pēc visu soļu dzinēju kalibrēšanas ir veikti sekojošie iestatījumi:

- X ass: 80 soļi uz mm
- Y ass: 260 soļi uz mm
- Z ass: 400 soļi uz mm
- E ass: 93 soļi uz mm

Nākamais solis ir iestatīt maksimāli pieļaujamos ātrumu, paātrinājumu un leņķisko ātrumu. Balstoties uz 3D printera kinemātikas un *Ender 3 V2* parametriem ir cilindriskam prototipam iestatīti sekojošie parametri:

- X ass: Maks. Ātrums: 100mm/s, Maks. paātrinājums: 500 mm/s², maks. Leņķiskais ātrums: 5 mm/s;
- Y ass: Maks. Ātrums: 100mm/s, Maks. paātrinājums: 500 mm/s², maks. Leņķiskais ātrums: 0.3 mm/s;
- Z ass: Maks. Ātrums: 5mm/s, Maks. paātrinājums: 100 mm/s², maks. Leņķiskais ātrums: 5 mm/s;
- E ass: Maks. Ātrums: 25mm/s, Maks. paātrinājums: 1000 mm/s², maks. Leņķiskais ātrums: 5 mm/s;

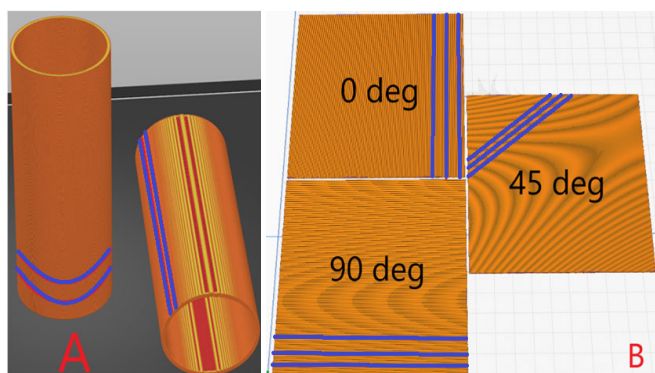
Maksimāla drukas galvas temperatūra ir ierobežota ar 260 °C, Maksimāla Y2 drukas galda temperatūra 100 °C.

5.4. 3 asu FDM 3D cilindriskā printera prototipa testēšana

5.4.1. 3 asu FDM 3D cilindriskā printera prototipa testēšanas metodoloģijas apraksts

Balstoties uz [72], [73], [74] avotiem ir izvēlēti testa paraugu izmēri un formas. Drukājamo objektu mehāniskās izturības pārbaudei ir izveidoti testa 3D CAD cilindra modeļi, kas ir 100mm gari ar 32mm sākotnējo diametru un 1.5mm biezumā. Pēc uzdotiem parametriem ārējais diametrs šādiem paraugiem sastādīs 35mm. Modeļus druka notika izvietojot modeļus trīs dažādas pozīcijas. Pirmais variants ir izvietot tā lai slāņi drukātos vienā ass virzienā Z, otrs variants ir drukāt modeļus izvietojot to XY virzienā, tāda veida teorētiski modeļi neatšķiries pēc testa radījumiem jo tiks pārbaudīta materiāla mehāniskā izturība.

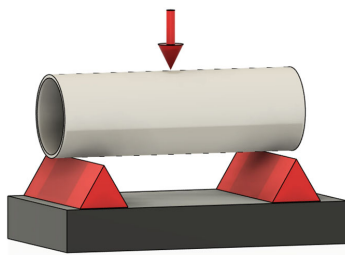
Trešais variants cilindriskam prototipam izdrukāt modeli XY virziena mainot aizpildīšanas leņķi (5.23.att.). Tādā veida pie 0 grādiem mēs pārbaudām materiāla adhēziju, pie 90 grādiem materiāla spēka parametru un pie 45 grādiem cilindriskas drukas paraugu, ko var salīdzināt ar abiem iepriekšējiem variantiem. Leņķis ir uzstādīts uz 45 grādiem, kas teorētiski atbilst lielākai izturībai. Lai pārliecinātos kā rezultāti rada tieši slāņu adhēziju nevis materiāla īpašības ir izdrukāti testa modeļi ar dažādo slāņa biezumu (0.1mm, 0.2mm, 0.3mm) un temperatūru (220 °C, 230 °C un 240 °C). Temperatūras palielināšanas laikā materiāls lielāku laiku paliek šķidra stāvoklī, attiecīgi slāņi starp savi saķeras labāk, tomēr palielinot temperatūru materiāls ātrāk degradē, sakara ar to cilindriskas druka teorētiski var palielināt drukājamo objektu mehānisko izturību nesamazinot materiāla īpašības. Testēšanas paraugu drukai ir izmantoti *Fiberlogy* PLA un PET-G un Rosa3D PLA un PET-G baltas krāsas 1.75mm kvēldiegi. Modeļu sagatavošana ir veikta *PrusaSlicer 2.7.1* un *Ultimaker Cura 5.2.0* programmās. Salīdzināšanai arī ir pievienoti UV cietošo sveķu paraugi drukāti uz *Anycubic Mono SLA 3D* printera izmantojot *Anycubic UV 405nm* cietošus sveķus. Sakara ar to kā sveķiem nav drukas temperatūras un slāņu parametrus testos piedalās tikai viens paraugs.



5.23.att. Testa 3D CAD modeļa izvietojums drukai plakana (A) un cilindriskā (B) printeros.

Lieces stipruma testēšanā:

Izdrukāto testa paraugu lieces stiprības testēšanai ir izmantots 3 punktu testēšanas stends, kur 2 punkti ir balsta materiāls un trešais punkts ir vieta kur piemēro slodzi (5.24.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 sastāda 50-200mm garumā, 10-50mm platumā un 2-10mm biezumā, tomēr mūsu gadījuma drukāto paraugu izmēri ir 100mm garumā, 35mm platumā un 1.5mm biezi. Lieces stipruma testēšanai izmantojas *Instron 5965* testēšanas stends [72], [73], [74].



5.24.att. Lieces stiprības testēšanas stenda shēma.

Izod triecienizturības testēšanā:

Otrajā testā tiek pārbaudīta drukāto paraugu triecienizturība pēc Izod metodes. Testēšanai nepieciešams lai katrā parauga pa vidu būtu izveidots noteikta izmēra lūzuma punkts, attiecīgi ir drukāti paraugi ar lūzuma punktu. Testēšana notiek novietojot paraugu skrūvspīlēs un nositot to ar 1.5-2m/s lielu ātrumu ar stendam pievienotu āmuru ar masu 0.67 kg veidojot un balstoties uz to var noteikt cik daudz enerģijas ir absorbējis testa paraugs. Izod triecienizturības testos izmantojas *CEAST Resil impactor* stends [75].

Strāvas un sprieguma piefiksēšana un elektroenerģijas patēriņa noteikšana:

Enerģijas patēriņa testa galvenais mērķis ir salīdzināt divu dažādu vadības sistēmu konfigurāciju efektivitāti cilindriskā prototipa 3D printerim: standarta Arduino Mega kombinācija ar A4988 draiveriem un modernāka BigTreeTech Manta M8P sistēma 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. Abām 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 sākotnējus iestatījumus, tā vispirms nepieciešams noteikt maksimālo soļu dzinēju strāvu uz spolēm, kura abiem izvēlētiem soļu dzinējiem sastāda 1A. Drošības koeficients ir pieņemts par 0.7. Tad vidēji kvadrātiska darba strāva uz spolēm priekš A4988 un TMC2209 tiek aprēķināta pēc formulas 4.8. Priekš A4988 draiveriem darba strāva ir regulējama ar regulējamo rezistoru uz paša

draivera, bet priekš TMC2209 strāva tiek norādīta vadības plates programnodrošinājumā un regulējot balstspriegumu V_{ref} , kas tiek aprēķināta pēc 5.13 formulas.

$$I_{rms} = I_{max} * 0.7 \quad (5.13)$$

Kur I_{rms} ir vidēji kvadrātiska darba strāva uz spolēm, A;

I_{max} ir maksimāla soļu dzinēja strāvu uz spolēm, A;

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

Kur V_{ref} ir draivera balstspriegums, V;

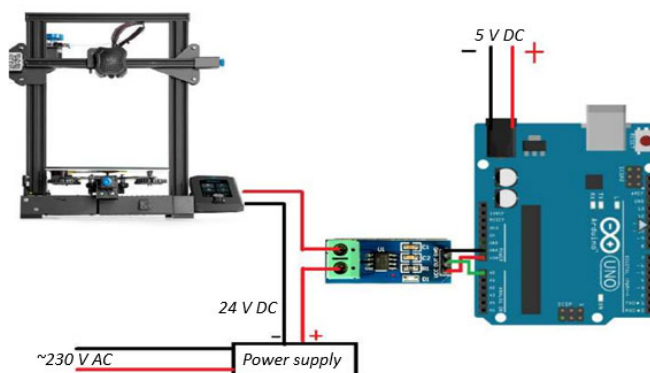
I_{rms} ir vidēji kvadrātiska darba strāva uz spolēm, A;

R_{sens} ir draivera rezistora pretestība, Ohm;

Pēc visiem aprēķiniem priekš A4988 draivera ir iestatīti $V_{ref} = 0.80V$, $I_{rms} = 0.71A$ un priekš TMC2209 draivera $V_{ref} = 1,00V$, $I_{rms} = 0.70A$.

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 [57].

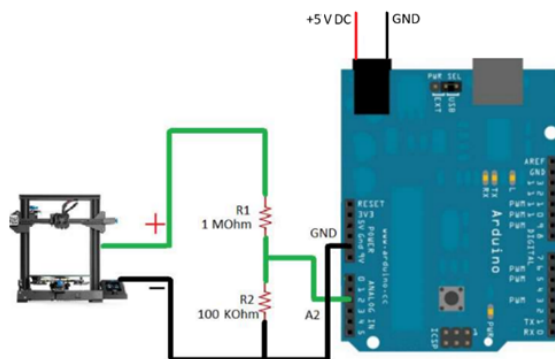
Lai apkopotu informāciju par spriegumu, strāvu un patērēto elektroenerģiju, tika izveidota datu iegūšanas sistēma, kuras pamatā ir Arduino Uno izstrādes plate ar ATmega328 mikrokontroleri. Šī plate ir kompakta, viegli programmējama un nodrošina visas nepieciešamās funkcijas. Strāvas mērījumiem ir papildu izmantots strāvas devējs Allegro ACS712 20V DC, jo maksimāla printera strāva ir paredzama 14.5A robežas. Strāvas mērījumu komponentu pieslēguma shēma ir attēlota 5.25.att. vadības plates barošana ir nodrošināta no 5V 1A barošanas bloka [76], [77], [78].



5.25.att. Strāvas mērīšanas sistēmas elementu savienojuma shēma [79].

Sprieguma mērījumiem ir izveidota sprieguma dalītāja shēma, kas arī ir pieslēgta pie tā pašas Arduino Uno vadības plātes, izmantojot divu rezistoru uz 100K Ohm un 1M Ohm slēgumu (5.26.att.). Šāds slēgums sadala ieejas spriegumu attiecība 1 pret 11 un dod iespēju

efektīvi mērīt spriegumu līdz aptuveni 50V DC, kas arī un ir nepieciešams, jo izmantojas 12V un 24V barošanas avoti. Sprieguma un strāvas mērījumi ir veikti uz impulsu barošanas bloka DC savienojuma spailēm. ACS712 strāvas devēja precizitāte ir 100mV uz 1 A un sprieguma dalītāja precizitāte pēc aprēķiniem ir aptuveni 4-5%. Papildu rezultātu pārbaudei ir izmantots ciparu multimetrs MASTECH M832 ar precizitāti 2mA strāvai un 0.1mV spriegumam [17], [80], [81], [82].

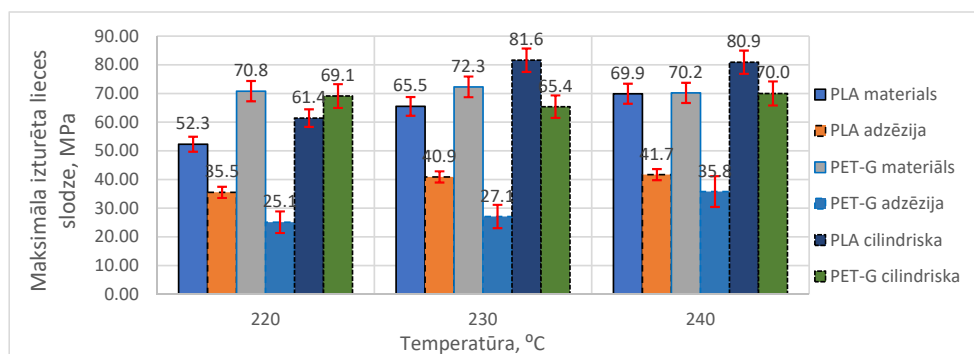


5.26.att. Sprieguma mērīšanas sistēmas elementu savienojuma shēma [79].

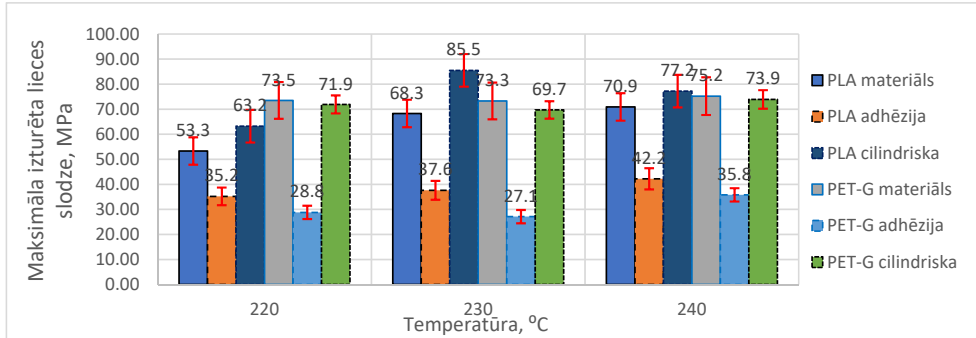
5.5. Rezultāti

5.5.1. Trīs dimensiju cilindrisko koordinātu sistēmas printera prototipa testēšana

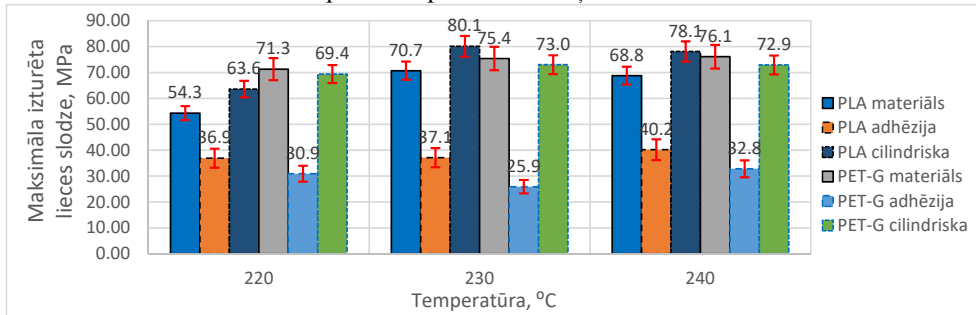
Katrā testa ir izdrukāti 3 testa paraugi katrām parametram Maksimāli izturētas lieces slodzes atkarības no slāņu izkārtojuma un drukas temperatūras testu rezultāti ir pie 220, 230 un 240 °C temperatūras un pie 0.1, 0.2 un 0.3mm slāņu biezumiem apkopoti grafikos 5.27., 5.28. un 5.29. Tricienizturības testu rezultāti apkopoti 5.30., 5.31., 5.32. att..



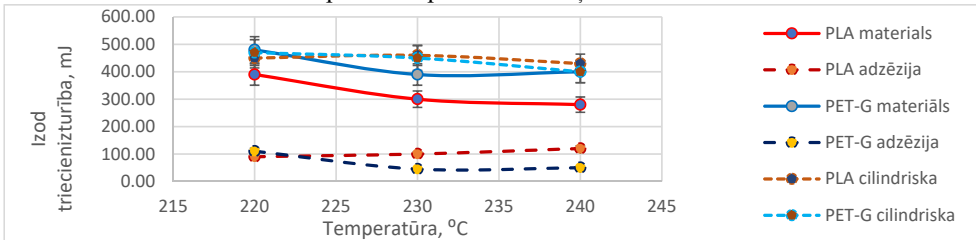
5.27.att. Maksimālā izturēta lieces slodze atkarība no slāņu izkārtojuma un drukas temperatūras pie 0.3mm slāņa biezuma.



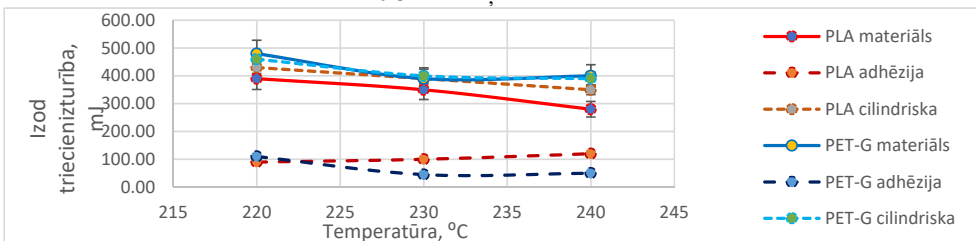
5.28.att. Maksimāla izturēta lieces slodze atkarība no slāņu izkārtojuma un drukas temperatūras pie 0.2mm slāņa biezuma.



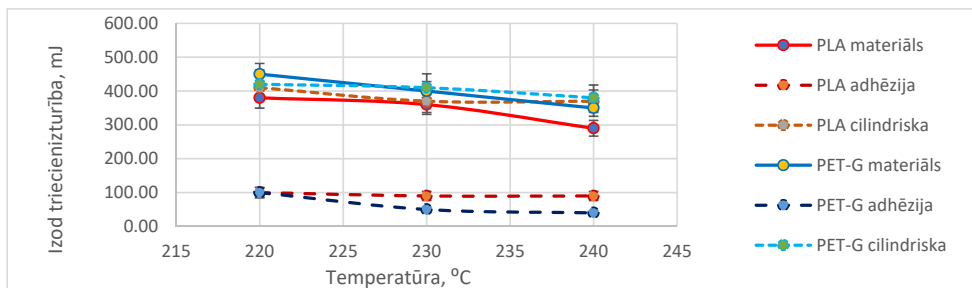
5.29.att. Maksimāla izturēta lieces slodze atkarība no slāņu izkārtojuma un drukas temperatūras pie 0.1mm slāņa biezuma.



5.30.att. Maksimāla triecienizturībā atkarība no slāņu izkārtojuma un drukas temperatūras pie 0.3mm slāņa biezuma.



5.31.att. Maksimāla triecienizturībā atkarība no slāņu izkārtojuma un drukas temperatūras pie 0.2mm slāņa biezuma.



5.32.att. Maksimālā triecienizturībā atkarība no slāņu izkārtojuma un drukas temperatūras pie 0.1mm slāņa biezuma.

Drukšanas precizitātes noteikšana:

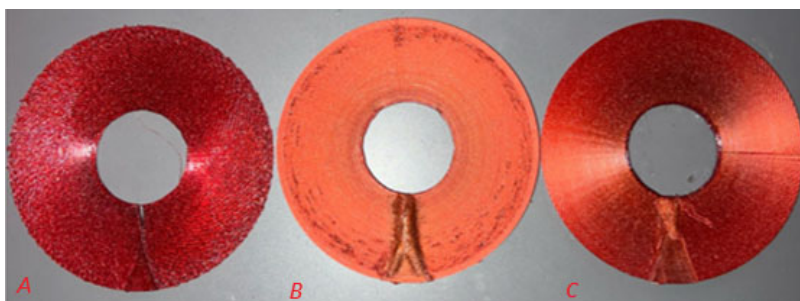
Ir salīdzināti plakanas (balta) un cilindriskas (rubina) *Fiberlogy* PLA un PET-G materiāla testa paraugu drukšanas izmēri. Ir salīdzināts paraugu platums, garums un biezums (5.33.att.). Modeļa izmēri CAD programma ir 100mm garumā 35mm diametrā un 1.5mm biezuma. Balstoties uz PLA materiālu drukšanas parametriem un to ka materiālam ir 0.2-0.3% saraušana, reāli PLA drukātie paraugi paredzēti kā būs attiecīgi mazāki uz aptuveni 0.25%. PET-G materiāla aptuvena saraušana ir paredzēta 0.5-1.5% robežās. Izmēri ir mērīti ar ciparu stieņcirkuli *Parkside HG08763A* ar 0.01mm precizitāti.



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

Materiāla plūsmas regulēšanas tests:

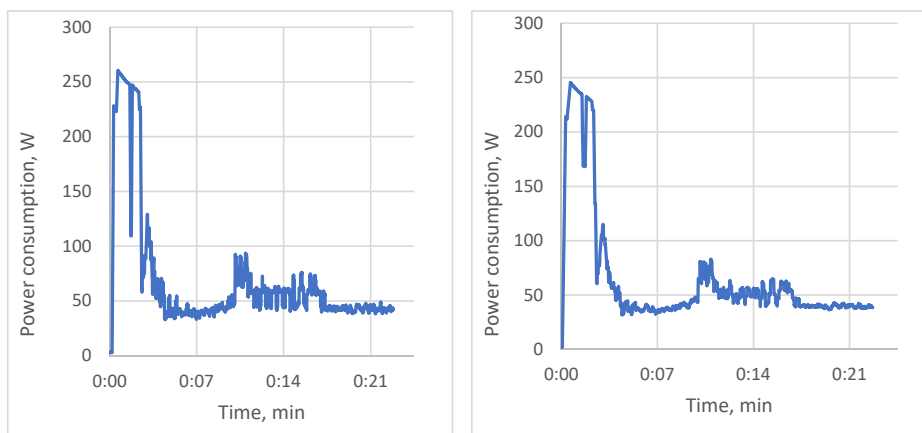
Materiālā plūsmas salīdzinājumam izmantojas *Fiberlogy* PLA rubina kvēldiegs. Balstoties uz to kā cilindriskā drukā palielinoties slāņu augstumam palielinās arī drukas cilindra loka garums un ir nepieciešams regulēt materiāla plūsmu. Ir izveidots CAD modelis ar 32mm sākotnējo diametru un 30mm slāņu biezumu, kas rezultāta dos ārējo 92mm diametru. Pirmā testa druka ir veidota bez materiālā plūsmas izmaiņām, otra druka ir manuāli uzstādīts plūsmas palielināšanas procents 1%, kur katrā nākama slānī šis procents ir pieskatīts. Un ir veikts trešais tests, ar materiāla plūsmas regulēšanu izmantojot *Python* kodu un balstoties uz iepriekš veiktiem aprēķiniem. Visi trīs paraugi ir attēloti 5.34.att..



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

Elektroenerģijas patēriņa noteikšana:

Elektroenerģijas patēriņā mērījumu testa rezultāti ir attēloti 5.35.att., kur (A) attēlo Arduino Mega un A4988 konfigurāciju, bet B attēlo STM32H723 un TMC2209, tests tika veikts uz vienādiem testa cilindriem ar 100mm garuma, 1.5mm slāņa biezuma un 35mm diametra izmēriem.



5.35.att. Elektroenerģijas mērījumu rezultāti priekš (A) Arduino Mega un A4988 un (B) STM32H723 un TMC2209.

5.6. Secinājumi

Pārbaudot lieces paraugus ar biezumu 0,3 mm, tika konstatēts, ka atkarībā no slāņu izvietojuma galaprodukta lieces izturība var atšķirties vidēji par 67-266%, tātad paraugi, 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% stiprākiem 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, samazinoties slāņa biezumam par 0,2 mm, stiprība mainījās no -2,9 līdz 3,5% un no -1,5 līdz 8,4% 0,1 mm paraugiem. Vidēji mūsu specifiskajam PLA materiālam temperatūras paaugstināšanās palielināja slāņu saķeri viens ar otru, savukārt PET-G materiālam lieces izturība praktiski nemainījās. Tajā pašā laikā paraugi, kas drukāti, izmantojot cilindrisko metodi, darbojās vienādi vai labāki nekā vertikālie paraugi, iespējams, vienmērīgāka slodzes sadalījuma dēļ, jo slāņi tika aizpildīti 45 grādu leņķī un katrs nākamais vārds tika pagriezts par 180 grādiem attiecībā pret iepriekšējais slānis, tādējādi slāņi krustojās un izveidoja spēcīgāku struktūru nekā tikai vertikālie slāņi. Papildu ir pārbaudīti UV sveķu drukātie paraugi, lai salīdzinātu dažādu tehnoloģiju iespējas un pēc rezultātiem UV cietošo sveķu paraugi parādīja par 650 mJ lielāku triecienizturību un 38 MPa lieces izturību, kas vidēji atbilst 35-66% lielākai triecienizturībai salīdzinot ar labākiem PLA un PET-G paraugiem, bet uz 42-44,5% mazāku lieces izturību.

Salīdzinot, kā tieši 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) Cilindriskas metodes paraugs.

Sliktākie izrādījās PET-G materiāla horizontāli apdrukāti paraugi ar slāņa biezumu 0,3 mm 220 grādu 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 grādu temperatūrā ar slāņa biezumu 0,2 mm un izturot 85,5 MPa slodzi. Šim ražotāja Fiberlog PLA materiālam 230 grādu temperatūra ir maksimāli pieļaujamā drukāšanai un, kā izrādās, nodrošina vislielāko izturību.

Triecienpārbaudēs paraugi veica 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 iespiests 230 grādu temperatūrā, izturot 45 MJ slodzi. Visizturīgākais bija PET-G paraugs ar 0,2 mm biezumu, vertikāli drukāts 220 grādu temperatūrā. Taču cilindriski iespiestie PLA un Pet-G paraugi spēja izturēt attiecīgi 460 MJ un 470 MJ slodzi, kas, ņemot vērā mērījumu precizitāti $\pm 5\%$, ir gandrīz identisks rādītājs un var būt atkarīgs no precizitātes mērījumus. Tādējādi cilindriskā druka ir izdevīgākā iespēja, jo nodrošina vidēji par 6,5-11,6% lieces izturīgāku izstrādājumu un salīdzināmu triecienizturību salīdzinājumā 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 saraušanos. 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 savienoti viens ar otru. Savienojuma šuve praktiski nav redzama.

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

6. 5 ASU 3D DRUKAS RISINĀJUMS KOMPLEKSAS FORMAS ORTOŽU DRUKAI

6.1. 5-asu cilindriskā neplakana 3D printera metodes izstrāde

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

Kvalitātes un parametru salīdzināšanai ir izvēlēts ortozes piemērs - pirksta šina distālās falangas locītavas fiksācijai ARmedical AR-061variantu (6.1.att.). Ja ņemam vērā piemēra ortozes formu, tad pirkstu ortozei parasti ir cilindriskā vai puscilindriska forma, kas atbilst pirksta kontūrai un izmēram. Dizains var būt diezgan vienkāršs, kas sastāv no mutes aizsarga vai sarežģītāk ar kustīgām daļām, lai ierobežotu vai atļautu noteiktu kustību apjomu.

Ja ņemt vērā sarežģītākas iespējas, piemēram, rokas ortozes, tad to apdruka ir grūtāka, jo tai jāatbalsta ne tikai plaukstas locītava, bet arī daļēji apakšdelms un roka. Tā var būt izliekta šina, kas aptin ap plaukstas locītavu un apakšdelmu, lai nodrošinātu stingrību un atbalstu. Dažkārt 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, kurus var būt grūtāk īstenot.

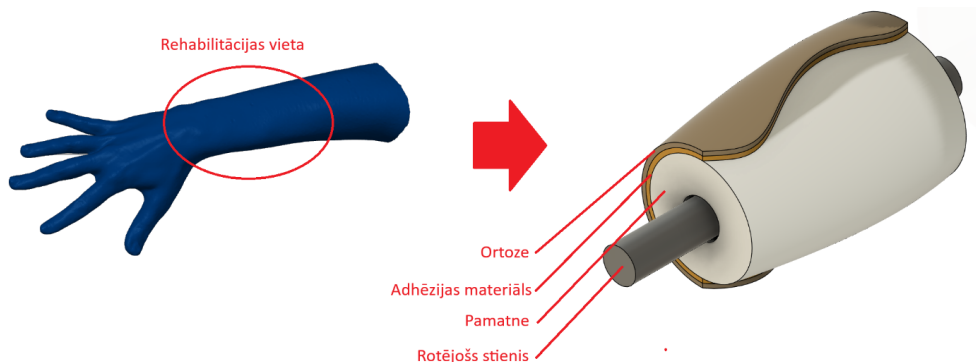


6.1.att. Ortozes piemērs, rokas pirksta šina distālās falangas locītavas fiksācijai ARmedical AR-061.

Izstrādājama prototipa galvenā priekšrocībā ir ātra drukas režīmu pārslēgšana, kur pārslēdzot asu vadus var ātri pārslēgties starp tradicionālas drukas režīmu, trīs asu cilindrisko druku un piecu asu cilindrisko druku.

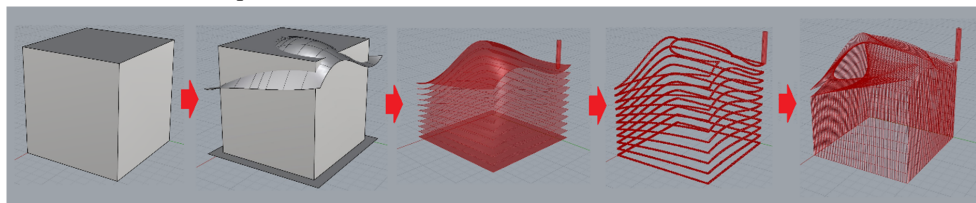
5 asu prototipa ideja ir balstīta uz to, ka kad ir modelēts cilvēka ekstremitātes CAD modelis, nepieciešama daļa, kurai virsu tiks uzklāta ortoze tiks drukāta kā pamatne, kura tiks uzstādīta uz rotējošo 8mm diametra stieni. Rezultātā tiks iegūta rotējošā pamatne uz kuru jau tiks drukāts ortozes modelis, tādā veidā ir realizēts balsta materiāls, kurš tiks pārklāts ar adhēzijas materiālu

(papīra maskēšanas lente), kuru var viegli atdalīt, no ortozes. 5 asu risinājumā shēma ir attēlotā 6.2.att.



6.2.att. No CAD modeļa rehabilitācijas vietas definēšana un pārveidošana par ortozes izvietojumu uz rotējošas pamatnes

Kā piemērs, kādā veida ir veidots neplakans 3D drukas ceļš ar mainīgo aizpildījuma virziena leņķi ir aprakstīts piemērs uz kuba modeļa, kur ir attēloti neplakana ceļa ģenerācijas etapi (6.3.att.). Pirmais posms, ir nepieciešams izmantot kādu telpu, kurā tiks novietots objekts tā tālākai griešanai. Par tādu telpu ir izmantotas divas vienādās kvadrāta plaknes, kur viena plakne atrodas tieši virs otras plaknes.

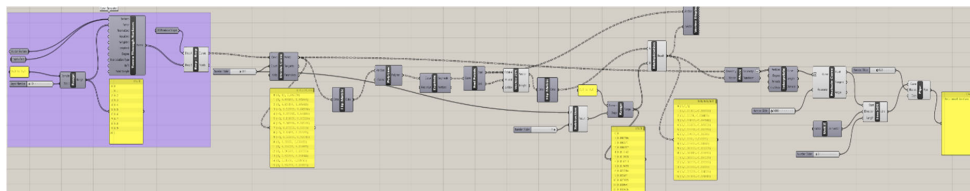


6.3.att. Rhinoceros 3D programmas Grasshopper paplašinājumā modeļa interpolācija un perimetru un aizpildījuma ceļa izveidošana.

Apakšēja plakne attēlo drukas pamatni uz kuras tiks drukāts objekts, bet augšēja plakne ir nepieciešama lai kontrolētu formu, kādā forma griežamais objekts tiks sagriezts. Augšējās plaknes formu var regulēta un pielāgot savam nepieciešamībām, piemēra gadījumā, ar to ver regulēt ortozes spiediena sadalījumu un veidu kādā tiks drukāta ortoze.

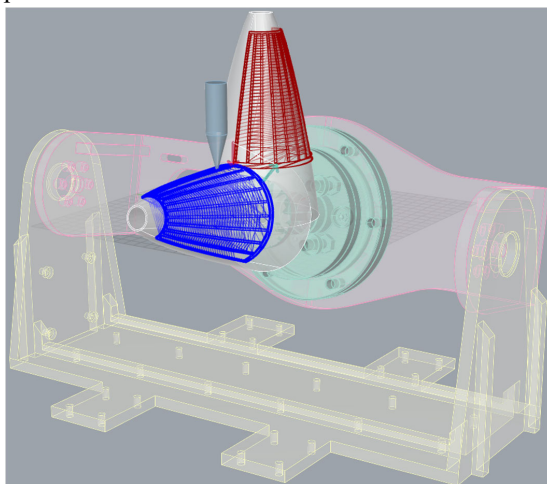
Nākamais posms ir izmantot interpolāciju pavairojot plaknes daudzumu, izmantojot *Tween* funkciju, attālums starp veidotam plaknēm un to daudzums nosaka drukas augstumu un, jo vairāk slāņu tiks ģenerēts, jo plānāk objekts tiks sagriezts. Kad interpolētie slāņi tiek novietoti, izmantojot funkciju *Path* starp slāņiem ir ģenerēts nepārtraukts spirāles ceļš ar pareju no apakša slāņa uz augšēju. Tomēr tādā veidā ir ģenerēts tikai objekta perimetra neplakans ceļš un lai izveidotu aizpildījuma ceļu ir izmantotas vēl divas plaknēs, kuras ir novietotas ar noteikto leņķi 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° leņķi. Izmantojot iepriekšējos posmus atkārtoti tiek ģenerēts viens spirālveida ceļš [42], [83].

Kā rezultāts ir iegūts fails ar punktiem ar koordinātēm, kurus var izmantot G-koda ģenerācijai. Visu neplakanas metodes operāciju ceļš Grasshopper vizuālajā izstrādes vidē ir attēlots 6.4.att.



6.4.att. Rhinoceros 3D programmas Grasshopper paplašinājumā modeļa griešanas un ceļa izveidošanas vadības kods.

5 asu drukas mehānisms ir ievietots iekša Grasshopper vidē, lai precīzi simulētu visu asu kustību. Atsevišķi ir ielādēti uz ekstremitātes formas balstīta pamatnes un drukājamas ortozes faili un tiek simulēta 5 asu prototipa kustība (6.5.att.). Kustības tiek pārveidotas G koda komandas izmantojot Python rakstītu vadības kodu kura iekša ir ievadīti visi nepieciešamie parametri (ātrumi, paātrinājumi, asu koordinātes, nepieciešamais materiāla padošanas apjoms, izvietojums vadības platē un citi).

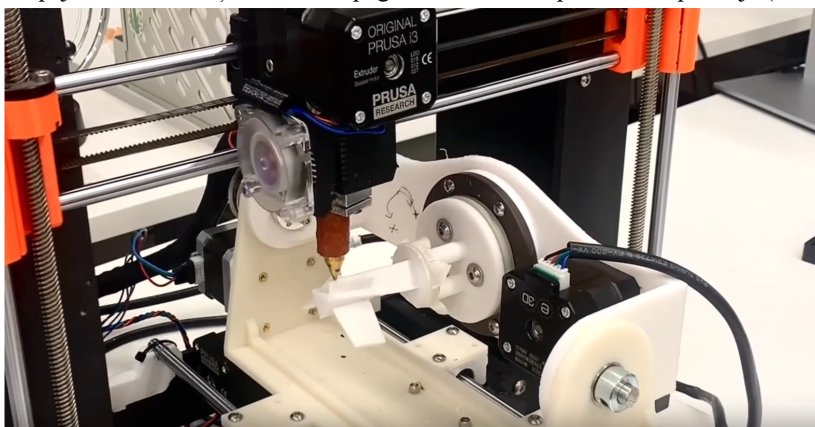


6.5.att. 5 asu 3D printera prototipa kustību simulācija Rhinoceros 3D programmā.

6.2. 5-asu cilindriska neplakana 3D printera izstrāde

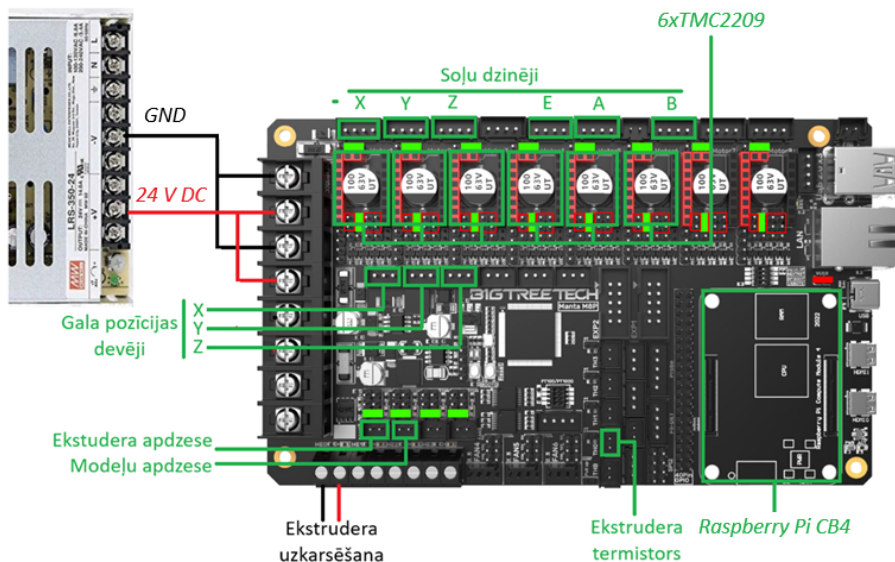
Lai drukātu sarežģītākas struktūras, vienlaikus saglabājot cilindriskās drukas iespēju, mainot aizpildes leņķi jebkurā apdrukātā izstrādājuma slīpumā, tika izmantots atvērta koda ir nepieciešams izstrādāt vairāku asu risinājumu. Par daudzasu prototipa pamatu ir ņemts 2022. gadā dibinātais Open5X projekts, ko iepriekš minēja F. Hong [42]. Šis 5 asu 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, kuram ir papildu pievienotas asis kontrolējamas ar papildu soļu dzinējiem, rezultātā ir nepieciešams vienlaicīgi kontrolēt 5 atsevišķas asis. Papildu asis ir realizētas kā rotējošais

galds, kas tiek uzstādīts uz vēl vienas rotējošas asis, kuras savukārt tiek stiprinātas pie printera Y asij. Projekta pamata ir vizuāla koda izstrādes vide Rhinoceros 3D programmā, kas vienlaicīgi izmanto Grasshopper un Puffer Fish paplašinājumus. Vizuāla vidē ir izstrādāts un simulēts kods, kas aizvieto neplakanas metodes griešanas programmu un simulē printera elementu vadību programmas iekšā. Tomēr šim risinājumam ir ierobežojumi, kas sasistas ar neplakana koda ģenerēšanas grūtības, tajā skaitā tikai modeļa perimetru druku, neiekļaujot modeļa aizpildījumu, un vairāku nepieciešamu funkciju neesamību, kā perimetru un aizpildījuma leņķa regulēšanu un līniju biezuma regulēšanu. Tā nav iespējams izmantot slāņu pārklāšanu un mainīgo aizpildījumā leņķi, tomēr ir izmantots neplakans griešanas risinājums, kas dod iespēju drukāt modeļa elementus pagriežot modeli nepieciešama pozīcijā (6.6.att.)[84].



6.6.att. Open5X daudzasu 3D printera projekts [42].

Lai pielāgotu cilindrisko druku 5 asu risinājumam ir veikti papildu uzlabojumi esoša prototipa konfigurācijā. Pirmkārt, lai palielinātu asu skaitu nepieciešams izmantot vairāk soļu dzinēju skaitu, katrai asij ir atsevišķais soļu dzinējs un kopā ar drukas galvas materiāla padeves dzinēju kopā nepieciešams pieslēgt 6 atsevišķi kontrolējamus soļu dzinējus. Šim nolūkam ir izmantota iepriekš izvēlēta Bigtreetech Manta M8P 2.0 vadības plate balstīta uz STM32H723ZET6 mikrokontrolleri ar 550Mhz ātrdarbību un iespēju pieslēgt līdz 8 atsevišķi kontrolējamiem soļu dzinējiem. Lai dod iespēju kontrolēt prototipu bez displeja izmantošanas un vadīt izmantojot WiFi protokolu ir izmantota papildu paplašināšanas 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 nepieciešamu griezes momentu. Ir izmantoti 6 x TMC2209 soļu dzinēji pieslēgti izmantojot UART protokolu, jo to izmantošana dod asu pozīcijas noteikšanas iespēju bez gala pozīcijas devēju izmantošanu. Balstoties uz to ka ir pievienoti papildu soļu dzinēji ar draiveriem un Manta M8P platei ir iespēja pieslēgt gan 12V gan 24V barošanu, ir izvēlēts jaunais barošanas bloks 24V Mean Well LRS-350-24, ar maksimālo jaudu 350W 14.6A. Klipper programmnodrošinājums ir ielādēts uz MicroSD atmiņas karti ievietoto Manta M8P vadības platē. Visu elementu slēgums ir attēlots 6.7.att.



6.7.att. 5 asu 3D printera prototipa element pieslēguma shēma.

Izmantojamo komponentu saraksts 5 asu cilindriskam FDM 3D printerim ir attēlots 6.1.tabula:

Tabula 6.1.

5 asu cilindriskam FDM 3D printera prototipa izmantojamo komponentu saraksts.

Nosaukums	Modelis	Parametri
3D printeris	Creality Ender-3 V2	CoreXZ Dekarta sistēmas FDM 3D printeris
Soļu dzinējs	4 x NEMA 17 42-34 BJ42D15-26V12 2 x NEMA 17 42-40 42HS040DF260A	Soļa leņķis: 1.8°, Nomināla strāva 0.8A, 1.0 A Fāžu skaits: 2, Griezies moments: 0.8 Nm
Soļu dzinējā draiveris	6 x TMC2209	Darba spriegums: 8-35V DC, Loģikas spriegums: 3-5.5V DC, Imax 2A
Barošanas avots	Meanwell LRS-350-24	24V DC, 350W, 14.6A, 48-63Hz
Vadības elementi	BigtreeTech Manta M8P 2.0 Raspberry Pi CB4 1GB	STM32H723 550Mhz vadības plate, divas 4GB SD FLASH atmiņas kartes
Pārvades mehānisms	2 x 2GT 20 zobu zobrats, 2 x 2GT 60 zobu zobrats 2 x 2GT-6 218mm zobsiksna, 4 x 688ZZ gultni, 150x8mm stienis	Pārvades attiecība 3:1
Programmnodrošinājums	Klipper	Prototipa vadība realizējama izmantojot Web interfeisu ar Wi-Fi protokolu
3D drukas materiāli	Creality PA12 white 1.75mm	Tiek drukāti drukas galvas elementi, A un B ass korpusi.

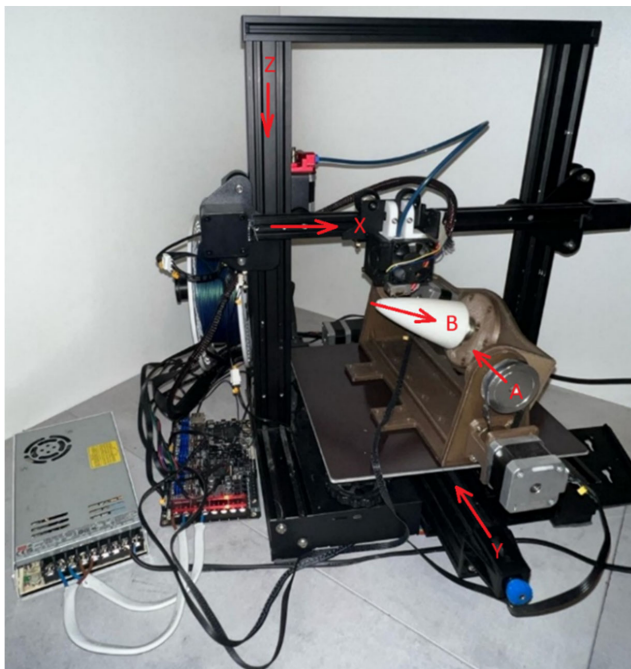
Papildu asu realizācijai ir drukāts PA12 neilona korpusi (5.4.att.), kas tika modificēts izmantošanai cilindriskai drukai. A un B asu realizācijai, tapāt kā 3 asu prototipā, ir izmantots redukcijas mehānisms realizējams ar 2GT 60 zobu un 20 zobu zobratiem. Kā drukas galda ir izmantots 8mm diametra 150mm garais tērauda stienis stiprināms pie 2GT 60 zobu zobratu un

668zz gultni. Zobrati ir savienoti izmantojot 218mm 2GT zobsiksnu. Papildu asu mehānisms ir uzstādīts uz Y ass drukas galda pieskrūvējams ar M3x20 skrūvēm. Saliktais mehānisms ir attēlots 6.8.att:



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

Pēc 5 asu prototipa vadība koda izveidošanas un prototipa salikšanas ir nepieciešams nokalibrēt gala pozīcijas devēju izvietošanu, novietojot A ass horizontālā stāvoklī, tā lai B ass būtu novietots horizontāls drukas galdam uz Y ass. Tālāk tiek izvietots drukas galvas augstums un novietots Z ass gala pozīcijas devējs. Visu asu izvietošanu un prototipa darbību var redzēt 6.9.att..



6.9.att. 5 asu 3D printera prototips neplakanas cilindriskas drukas realizācijai.

6.3. Eksperimentu veikšana un rezultātu apkopojums

Rezultātā ir izveidots 5 asu prototips ortožu drukai, kas izmanto neplakano cilindrisko drukas metodi ar mainīgo slāņa aizpildījuma leņķi. Kā piemērs ir drukāta pirksta ortoze izmantojot *Creativity* PLA sarkanas krāsas materiālu. Izgatavotai ortozei ir salīdzinātā ar tāda paša materiāla tradicionālo plakano drukas ortozi izdrukāto izmantojot horizontālo un vertikālo izvietošanu un pēc iegūtiem rezultātiem iegūta parauga parametri atbilst cilindriskas drukas parametriem un var secināt kā lieces testa salīdzinot ar horizontālo paraugu, kur slāņi turas vairāk adhēzijas dēļ neplakans paraugs ir līdz 266% stiprāks un ir ekvivalents vai līdz pat 18% stiprāks salīdzinot ar vertikāliem paraugiem, tomēr drukas kvalitāte ir salīdzināmi labāka, jo nav nepieciešama papildu balsta materiāla izmantošana un ortozi var viegli atdalīt no drukas pamatnes, jo izmantojas adhēzijas materiāla starpslānis. Rezultāta nav nepieciešama izgatavotas ortozes papildu apstrāde un virsmas kvalitāte ir gluda un vienmērīga (6.10.att.).



6.10.att. 5 asu 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 pielāgoto 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 salīdzināt 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 neplakano 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. [Online]. Available: <https://books.google.lv/books?id=7oZGEAAAQBAJ>
- [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. Adebo, "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] M. Coakley and D. E. Hurt, "3D Printing in the Laboratory: Maximize Time and Funds with Customized and Open-Source Labware," *J Lab Autom*, vol. 21, no. 4, pp. 489–495, 2016, doi: 10.1177/2211068216649578.
- [11] N. Vidakis *et al.*, "High-performance medical-grade resin radically reinforced with cellulose nanofibers for 3D printing," *J Mech Behav Biomed Mater*, vol. 134, 2022, doi: 10.1016/j.jmbbm.2022.105408.
- [12] D. Dong *et al.*, "Microstructures and mechanical properties of biphasic calcium phosphate bioceramics fabricated by SLA 3D printing," *J Manuf Process*, vol. 81, pp. 433–443, 2022, doi: 10.1016/j.jmapro.2022.07.016.

- [13] S. Barone, P. Neri, A. Paoli, A. V. Razionale, and F. Tamburrino, "Development of a DLP 3D printer for orthodontic applications," in *Procedia Manufacturing*, 2019, pp. 1017–1025. doi: 10.1016/j.promfg.2020.01.187.
- [14] S. Barone, P. Neri, A. Paoli, A. V. Razionale, and F. Tamburrino, "Development of a DLP 3D printer for orthodontic applications," in *Procedia Manufacturing*, 2019, pp. 1017–1025. doi: 10.1016/j.promfg.2020.01.187.
- [15] D. Dong *et al.*, "Microstructures and mechanical properties of biphasic calcium phosphate bioceramics fabricated by SLA 3D printing," *J Manuf Process*, vol. 81, pp. 433–443, 2022, doi: 10.1016/j.jmapro.2022.07.016.
- [16] N. Vidakis *et al.*, "High-performance medical-grade resin radically reinforced with cellulose nanofibers for 3D printing," *J Mech Behav Biomed Mater*, vol. 134, 2022, doi: 10.1016/j.jmbbm.2022.105408.
- [17] 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.
- [18] J. V. Leonīds Ribickis, *Elektriskā piedziņa mehatronikas sistēmās*. Rīga: RTU Izdevniecība, 2008.
- [19] S. Ambrogio, "Development of a complex flow phantom for diagnostic imaging," 2020. doi: 10.13140/RG.2.2.23369.36969.
- [20] "Motion Control, Solved. MOTOR ENGINEERING & MANUFACTURING." [Online]. Available: www.linengineering.com
- [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, 2022, doi: 10.1016/j.addma.2022.102998.
- [22] J. Blum, *Exploring Arduino: Tools and Techniques for Engineering Wizardry*. Wiley, 2019.
- [23] H. K. Kondaveeti, N. K. Kumaravelu, S. D. Vanambathina, S. E. Mathe, and S. Vappangi, "A systematic literature review on prototyping with Arduino: Applications, challenges, advantages, and limitations," *Comput Sci Rev*, vol. 40, p. 100364, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2021.100364>.
- [24] J. M. Pearce, N. C. Anzalone, and C. L. Heldt, "Open-Source Wax RepRap 3-D Printer for Rapid Prototyping Paper-Based Microfluidics," *J Lab Autom*, vol. 21, no. 4, pp. 510–516, 2016, doi: 10.1177/2211068215624408.
- [25] K. M. McLean, A. L. Pasulka, and E. E. Bockmon, "A low-cost, accessible, and high-performing Arduino-based seawater pH control system for biological applications," *HardwareX*, vol. 10, p. e00247, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2021.e00247>.
- [26] S. Sani, "Design and Implementation of A Low-Cost ECG Monitoring System Using ARM Cortex-M4 Family Microcontroller," in *2021 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, 2021, pp. 1–2. doi: 10.1109/ICCE50685.2021.9427729.
- [27] S. Chaudhari, P. Rathod, A. Shaikh, D. Vora, and J. Ahir, "Smart energy meter using Arduino and GSM," in *Proceedings - International Conference on Trends in Electronics and Informatics, ICEI 2017*, 2018, pp. 598–601. doi: 10.1109/ICOEI.2017.8300772.

- [28] S. Tsyrlunyk, V. Tromsyuk, M. Tsyrlunyk, and P. Rymar, “Energy monitoring system based on iot,” in *CEUR Workshop Proceedings*, 2021, pp. 136–153. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85121239704&partnerID=40&md5=eb96d751e9f655e980b48f67cbdab26f>
- [29] W. Wang, C. Zanni, and L. Kobbelt, “Improved Surface Quality in 3D Printing by Optimizing the Printing Direction,” 2016.
- [30] P. Mohan Pandey, N. Venkata Reddy, and S. G. Dhande, “Slicing procedures in layered manufacturing: a review,” *Rapid Prototyp J*, vol. 9, no. 5, pp. 274–288, Jan. 2003, doi: 10.1108/13552540310502185.
- [31] 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.
- [32] 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).
- [33] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li, N. Larkin, and S. van Duin, “Automatic multi-direction slicing algorithms for wire based additive manufacturing,” *Robot Comput Integr Manuf*, vol. 37, pp. 139–150, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.09.002>.
- [34] Y. Pan, C. Zhou, Y. Chen, and J. Partanen, “Multitool and Multi-Axis Computer Numerically Controlled Accumulation for Fabricating Conformal Features on Curved Surfaces,” *J Manuf Sci Eng*, vol. 136, no. 3, Mar. 2014, doi: 10.1115/1.4026898.
- [35] S. Lim, R. A. Buswell, P. J. Valentine, D. Piker, S. A. Austin, and X. De Kestelier, “Modelling curved-layered printing paths for fabricating large-scale construction components,” *Addit Manuf*, vol. 12, pp. 216–230, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.06.004>.
- [36] J. Etienne *et al.*, “CurviSlicer: Slightly curved slicing for 3-axis printers,” *ACM Trans Graph*, vol. 38, no. 4, p. 11, 2019, doi: 10.1145/3306346.3323022i.
- [37] W. Xiangping, Z. Haiou, W. Guilan, and W. Lingpeng, “Adaptive Slicing for Multi-axis Hybrid Plasma Deposition and Milling.”
- [38] D. Ahlers, M.- Fakultät, J. Zhang, and N. Hendrich, “3D Printing of Nonplanar Layers for Smooth Surface Generation.”
- [39] Bondtech, “INCREASING MELT CAPACITY WITH 3 KEY NOZZLE FEATURES.”
- [40] Y. Ding, R. Dwivedi, and R. Kovacevic, “Process planning for 8-axis robotized laser-based direct metal deposition system: A case on building revolved part,” *Robot Comput Integr Manuf*, vol. 44, pp. 67–76, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2016.08.008>.
- [41] 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.
- [42] 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.

- [43] 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.
- [44] 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>.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] L. Meng *et al.*, “From topology optimization design to additive manufacturing: Today’s success and Tomorrow’s roadmap.”
- [48] 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>.
- [49] 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.
- [50] 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>.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] 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.
- [55] M. Coakley and D. E. Hurt, “3D Printing in the Laboratory: Maximize Time and Funds with Customized and Open-Source Labware,” *SLAS Technol*, vol. 21, no. 4, pp. 489–495, 2016, doi: <https://doi.org/10.1177/2211068216649578>.
- [56] E. Kopets, A. Karimov, L. Scalera, and D. Butusov, “Estimating Natural Frequencies of Cartesian 3D Printer Based on Kinematic Scheme,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 9, May 2022, doi: 10.3390/app12094514.

- [57] V. Vladinovskis, "Selection of microcontroller board and stepper motor driver for FDM 3D printing to reduce power consumption."
- [58] M. M. M. Asad, I. A. Marouf, and H. M. Enshasy, "An effective way to program microcontrollers for high speed control operations," in *2017 IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS)*, 2017, pp. 1–4. doi: 10.1109/ITCOSP.2017.8303166.
- [59] G. Panic and M. Krstic, "Designing a Power Efficient Sensor Node Microcontroller," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, no. 4, pp. 298–303, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.06.049>.
- [60] "This is information on a product in full production. STM32F103xF STM32F103xG," 2015. [Online]. Available: www.st.com
- [61] "atmel-2549-8-bit-avr-microcontroller-atmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet".
- [62] "STM32F405xx STM32F407xx." [Online]. Available: www.st.com
- [63] R. J. Alonzo, "CHAPTER 8 - Motors, Generators, and Controls," in *Electrical Codes, Standards, Recommended Practices and Regulations*, R. J. Alonzo, Ed., Boston: William Andrew Publishing, 2010, pp. 213–255. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-2045-0.10008-4>.
- [64] S. Baas and V. Saggiomo, "Ender3 3D printer kit transformed into open, programmable syringe pump set," *HardwareX*, vol. 10, p. e00219, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2021.e00219>.
- [65] M. Choudhary, S. Mukherjee, and P. Kumar, "Analysis and optimization of geometry of 3D printer part cooling fan duct," *Mater Today Proc*, vol. 50, pp. 2482–2487, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.444>.
- [66] D. Nemova *et al.*, "Experimental Study on the Thermal Performance of 3D-Printed Enclosing Structures," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 12, 2022, doi: 10.3390/en15124230.
- [67] T. Hachimi, N. Naboulsi, F. Majid, R. Rhanim, I. Mrani, and H. Rhanim, "Design and Manufacturing of a 3D printer filaments extruder," *Procedia Structural Integrity*, vol. 33, pp. 907–916, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.10.101>.
- [68] J. M. Jafferson and H. Sharma, "Thermal analysis of novel heat-sink fins for FDM 3D printer liquefier," *Mater Today Proc*, vol. 46, pp. 1187–1194, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.063>.
- [69] 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.
- [70] 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.
- [71] 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.

- [72] 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.
- [73] 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>.
- [74] *National foreword*. 2019.
- [75] H. Ullah and V. V Silberschmidt, "19 – Dynamic large-deflection bending of laminates," 2016, doi: 10.1016/B978-0-08-100870-6.00019-5.
- [76] 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>.
- [77] 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.
- [78] "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
- [79] 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.
- [80] 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.
- [81] 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.
- [82] 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>.
- [83] Sean Aranda, *3D Printing Failures: 2022 Edition: How to Diagnose and Repair ALL Desktop 3D Printing Issues*, 2022 Edition. Independently published, 2021.
- [84] 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>.

PIELIKUMS 1

SAĪSINĀJUMI

AC - alternating current, maiņstrāva;
AM – additive manufacturing, piedevu ražošana;
DC – direct current, līdzstrāva;
DLP – digital light processing, ciparu starojuma ražošana;
DC/DC - direct current to direct current, no līdzstrāvas uz līdzstrāvu konvertors;
EU – European Union, Eiropas Savienība;
FFF – fused filament fabrication, kausēta kvēldiega ražošana;
FDM – fused deposition modeling, kausētas uzklāšanas modelēšana;
LCD – Liquid Crystal Display, šķidro kristālu displejs;
PWM – pulse-width modulation, impulsa platuma modulācija;
IR - Infrared radiation, infrasarkanais starojums
RX – receiver, uztvērējs;
SLA – stereolithography, stereolitogrāfija;
SLS – selective laser sintering, selektīva lāzera saķepināšana;
SPI - Serial Peripheral Interface, seriālā perifērijas saskarne;
TX – transmitter, raidītājs;
UART - Universal Asynchronous Receiver-Transmitter, Universāls asinhronais uztvērējs-raidītājs
VS – vadības sistēmas
EMP – elektromehāniska pārveidotāja
DR – dzinēja rotora
PM – pārvades mehānisma, jeb reduktora
DM – darba mašīnas
UV – ultravioleta;
 I_{rms} - vidēji kvadrātiskā strāva;
 I_{max} – maksimālā strāva;
 V_{ref} – balstspriegums, references spriegums;
 R_{sens} – soļu draivera pretestība;

PIELIKUMS 2

Novērtēšanas kritēriju paskaidrojums

Tips	Vērtējums	Paskaidrojums
Printera tips	5	Printeris ir tāda veida, kas vislabāk atbilst projekta prasībām, nodrošinot augstu drukāšanas precizitāti un ātrumu.
	4	Printera veids ir labi piemērots lielākajai daļai lietojumu un nodrošina uzticamus rezultātus.
	3	Printera tips var būt piemērots noteiktām lietojumprogrammām, taču tam nav visu nepieciešamo funkciju.
	2	Printera tipam ir ierobežojumi, kas var būtiski ierobežot tā pielietojamību.
	1	Printeris ir tāda tipa, kas neatbilst projekta prasībām, nepieciešamo drukas kvalitāti nevar sasniegt.
Drukas tilpums	5	Printeris spēj nodrošināt nepieciešamos modeļu izmērus ar augstu precizitāti un kvalitāti.
	4	Vidēja izmēra modeļu drukāšana darbojas diezgan labi, lai gan var būt dažī ierobežojumi.
	3	Printerim var būt izmēra ierobežojumi, tādēļ dažus modeļus nevar drukāt.
	2	Printeris nav pietiekami liels lielākajai daļai projektu.
	1	Drukas izmēri ir pārāk ierobežoti, tādēļ printeris nav piemērots lielākajai daļai projektu.
Izmantojamie materiāli	5	Printeris balsta plašu materiālu klāstu, tostarp TPU, neilonu, ABS un citus
	4	Atbalstītais materiālu klāsts atbilst projekta pamatvajadzībām.
	3	Printeris balsta ierobežotu materiālu klāstu, kas noteiktiem projektiem var nebūt pietiekams.
	2	Ierobežotā materiālu izvēle padara printeri nepiemērotu daudziem lietojumiem.
	1	Printeris balsta tikai ļoti ierobežotu apdrukājamo materiālu klāstu, tāpēc tas nav piemērots lielākajai daļai lietojumu.
Precizitāte	5	Printeris nodrošina augstas precizitātes drukāšanu.
	4	Drukas precizitāte ir augsta, ar nelieliem redzamiem defektiem
	3	Printeris nodrošina pieņemamu precizitāti
	2	Lielākajai daļai drukas precizitāte nav pietiekama.
	1	Drukas precizitāte ir zema, modeļi tiek ražoti ar zemu kvalitāti un detaļām.
Ātrums	5	Printeris nodrošina lielu drukāšanas ātrumu, nemazinot kvalitāti.
	4	Drukāšanas ātrums ir tādā līmenī, kas atbilst projekta prasībām.
	3	Printerim var būt dažī ātruma ierobežojumi, tomēr kvalitāte paliek augsta līmenī
	2	Drukāšanas ātrums nav pietiekami ātrs, lai efektīvi apstrādātu lielāko daļu projektu.
	1	Printeris drukā pārāk lēni, padarot to neefektīvu lielākajai daļai uzdevumu.
Drošums	5	Printeris demonstrē augstu drošumu un stabilu darbību pat pēc ilgstošas lietošanas.

	4	Printeris parasti ir drošs, taču dažkārt var rasties nelielas kļūmes vai problēmas.
	3	Printera drošums ir novērtēts kā vidējais, ar neregulāriem pārtraukumiem vai problēmām.
	2	Printeris ir pakļauts kļūmēm un nestabilitātei.
	1	Printeris bieži ir pakļauts kļūmēm un nestabilai darbībai.
Cena	5	Printerim ir laba cenas un kvalitātes attiecība, un tas ir viegli pieejams iegādei.
	4	Printera cena atbilst tā īpašībām un iespējām, kas ir pieejama lielākajai daļai patērētāju.
	3	Printeris var būt nedaudz dārgāks vai mazāk pieejams nekā citi līdzīgi modeļi.
	2	Printera cena ir pārāk augsta salīdzinājumā ar tā funkcijām, tāpēc lielākajai daļai lietotāju tas ir nepraktisks.
	1	Printeris ir pārāk dārgs vai nav pieejams lielākajai daļai lietotāju.

PIELIKUMS 3

```
import numpy as np
from stl import mesh

def stretch_model_for_cylinder(input_file, output_file,
cylinder_diameter, model_height, layer_height):
    # Ielādējam STL failu
    your_mesh = mesh.Mesh.from_file(input_file)

    # Iegūstam minimālās un maksimālās vērtības pa X un Z asi
    min_x = np.min(your_mesh.x)
    max_x = np.max(your_mesh.x)
    min_z = np.min(your_mesh.z)
    max_z = np.max(your_mesh.z)

    # Sākotnējais modeļa plātums pa X asi
    Lx = max_x - min_x

    # Sākotnējais cilindra diametrs un apkārtmērs
    D0 = cylinder_diameter
    C0 = np.pi * D0

    # Modeļa augstums
    H = model_height

    # Slāņa biezums
    h = layer_height

    # Slāņu skaits
    N = int(np.ceil(H / h))

    # Izveidojam masīvu kopējā izstiepuma uzkrāšanai katrā slānī
    total_stretch_factors = np.zeros(N)

    # Aprēķinām kopējo izstiepuma koeficientu katram slānim
    for n in range(N):
        # Pašreizējā slāņa diametrs un apkārtmērs
        Dn = D0 + 2 * n * h
        Cn = np.pi * Dn

        # Iepriekšējā slāņa diametrs un apkārtmērs
        if n == 0:
            Dn_1 = D0
            Cn_1 = np.pi * Dn_1
        else:
            Dn_1 = D0 + 2 * (n - 1) * h
            Cn_1 = np.pi * Dn_1
```

```

# Apkārtmēra starpība
delta_C = Cn - Cn_1

# Izplešanās koeficients pašreizējam slānim (dalām ar 2
simetriskai izplešanai)
stretch_factor = delta_C / 2

# Kopējais izstiepuma koeficients līdz pašreizējam slānim
if n == 0:
    total_stretch_factors[n] = stretch_factor
else:
    total_stretch_factors[n] = total_stretch_factors[n - 1]
+ stretch_factor

# Aprēķinām modeļa centru pa X asi vienu reizi
x_center = (min_x + max_x) / 2

# Ej cauri katrai modeļa virsmai (trijstūrim)
for i in range(len(your_mesh.vectors)):
    # Ej cauri katram virsmas virsotnei
    for j in range(3):
        # Iegūstam virsotnes koordinātes
        x = your_mesh.vectors[i][j][0]
        z = your_mesh.vectors[i][j][2]

        # Aprēķinām relatīvo virsotnes augstumu
        relative_z = (z - min_z) / (max_z - min_z)

        # Aprēķinām slāņa numuru, kuram virsotne pieder
        n = int(np.floor(relative_z * N))
        if n >= N:
            n = N - 1 # Apstrādājam augšējo virsmu

        # Iegūstam kopējo izstiepuma koeficientu dotajam slānim
        total_stretch = total_stretch_factors[n]

        # Relatīvais izplešanās koeficients
        relative_stretch = total_stretch / (Lx / 2)

        # Aprēķinām jauno X koordināti, ņemot vērā izplešanos
        x_new = x_center + (x - x_center) * (1 +
relative_stretch)

        # Atjauninām virsotnes X koordināti
        your_mesh.vectors[i][j][0] = x_new

# Atjauninām normāles
your_mesh.update_normals()

```

```

# Saglabājam modificēto modeli
your_mesh.save(output_file)
print(f"Modificētais modelis ir saglabāts failā {output_file}")

# Piemēra izmantošana
if __name__ == "__main__":
    input_stl_file = 'slicer/pros.stl'          # Jūsu sākotnējā
    STL faila nosaukums
    output_stl_file = 'pros_mod.stl' # Faila nosaukums modificētā
    modeļa saglabāšanai
    cylinder_diameter = 32.0                  # Sākotnējais cilindra
    diametrs mm
    model_height = 1.75                       # Modeļa augstums mm
    layer_height = 0.2                       # Slāņa biezums mm

    stretch_model_for_cylinder(input_stl_file, output_stl_file,
    cylinder_diameter, model_height, layer_height)

```




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.