TARTU ÜLIKOOL

LOODUS- JA TÄPPISTEADUSTE VALDKOND

Tehnoloogiainstituut

Kaisa Kumpas

Tikitud vaskulaarne struktuur robotikoele tehislehe näitel

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Materjaliteadus

Juhendaja:

Indrek Must, PhD

Kaasjuhendaja:

Leonid Zinatullin

Tartu 2024

Infoleht

Tikitud vaskulaarne struktuur robotikoele tehislehe näitel

Uurimistöös keskenduti taimedes leiduvate keerukate vaskulaarsete võrgustike tikkimisele robotikoele, mille eesmärk on edendada pehmerobootika valdkonda ja looduslike protsesside mõistmist. Töö eesmärkideks oli uurida, kuidas tikitud vaskulaarstruktuurid võivad tõhustada robotikudede funktsionaalsust, sealhulgas toitainete tarnimist.

Uurimistöö keskne küsimus oli, kuidas saab looduslikest lehtedest inspireeritud vaskulaarstruktuuride tikkimine parandada vedeliku juhtimist robotikoes. Selle saavutamiseks uuriti erinevaid alusmaterjale ja niite, et leida optimaalseid kombinatsioone vedeliku ühtlaseks ja kontrollitud liikumiseks.

Katsetes kasutati mitmesuguseid alusmaterjale, nagu kile, lina ja siid. Iga materjali omadusi analüüsiti, et määrata nende sobivus vaskulaarstruktuuride tikkimiseks. Samuti testiti erinevaid niite: naturaalset, puuvillast ja polüestrist õmblusniiti, et hinnata nende vedeliku juhtivuse omadusi.

Uurimistöö raames rakendati ka Murray seaduse põhjal modelleeritud fraktaalse struktuuriga tikandit. Murray seadus, mis sõnastab, et hargnenud kanalite raadiuste kuupide summa on võrdne hargneva kanali raadiuse kuubiga, tagab optimaalse vedeliku jaotuse võrgustikus. Algoritmiga genereeriti fraktaalseid mustreid, mis jäljendasid looduslikke vaskulaarstruktuure.

Tulemused näitasid, et siidist alusmaterjal ja polüestrist õmblusniit olid vedeliku juhtimiseks kõige sobivamad, võimaldades vedeliku ühtlast ja efektiivset liikumist üle kogu tehislehe. Uurimistöö tõi esile tikitud vaskulaarstruktuuride potentsiaali pehmerobootikas ja interdistsiplinaarsete teadusuuringute olulisuse, pakkudes uusi arengu võimalusi nii meditsiinis kui ka keskkonnatehnoloogiates.

Märksõnad: vaskulaarsed struktuurid, fraktaalsed struktuurid, robotikude, tehisleht, tikkimine

CERCS klassifikatsioon: T470 Tekstiilitehnoloogia

Embroidered Vascular Structure for Robot Tissue: A Case Study on Artificial Leaves

The research focused on embroidering the complex vascular networks found in plants onto robotic tissues, aiming to advance the field of soft robotics and enhance the understanding of natural processes. The objectives of the study were to investigate how embroidered vascular structures could improve the functionality of robotic tissues, including nutrient transport.

The central research question was how the embroidery of vascular structures, inspired by natural leaves, could enhance fluid management in robotic tissues. To achieve this, various substrate materials and threads were tested to identify optimal combinations for uniform and controlled fluid movement.

The experiments utilised various substrate materials such as plastic film, soluble film, linen, and silk. The properties of each material were analysed to determine their suitability for embroidering vascular structures. Additionally, different threads, including natural, cotton, and polyester sewing threads, were tested to assess their fluid conductivity.

In the course of the research, an embroidery pattern was implemented based on a fractal structure modelled after Murray's law. Murray's law states that the sum of the cubes of the radii of branched channels is equal to the cube of the radius of the main channel, ensuring optimal fluid distribution in the network. An algorithm was used to generate fractal patterns that mimicked natural vascular structures.

The results showed that silk as a substrate and polyester thread were the most suitable for fluid management, allowing for uniform and efficient fluid movement throughout the artificial leaf. The study highlighted the potential of embroidered vascular structures in soft robotics and the importance of interdisciplinary research, offering new development opportunities in both medical and environmental technologies.

Keywords: vascular structures, fractal structured, robotic tissue, artificial leaf, embroidery

CERCS classification: T470 Textile technology

Sisukord

Infoleht ... 2
1 Sissejuhatus ... 6
2 Kirjanduse ülevaade ... 7
2.1 Vaskulaarsed süsteemid ... 7
2.1.1 Vaskulaarsed süsteemid loomades ... 7
2.1.2 Vaskulaarsed süsteemid taimedes ... 8
2.1.3 Vaskulaarsüsteemi rakendused ja tulevikusuunad ... 9
2.2 Tehisleht ... 10
2.2.1 Tehislehtede vaskulaarsüsteemi struktuur ja disain ... 10
2.2.2 Tehislehtede vaskulaarsüsteemi funktsioonid ... 11
2.2.3 Tehislehtede vaskulaarsüsteemi tehnoloogiline innovatsioon ... 11
2.3 Tekstiilid ja tikkimine ... 12
2.3.1 Tekstiil kui kapillaarne struktuur ... 12
2.3.2 Tikkimine loomaks fraktaalseid struktuure ... 13
3 Meetodid ... 14
3.1 Tikkimine erinevatele alusmaterjalidele ... 14
3.2 Fraktaalstruktuuri programmeerimine/modelleerimine ... 14
3.3 Kolorimeetria ... 15
3.4 Pildi- ja videotöötlus ... 16
4 Tulemused ja analüüs ... 18
4.1 Alusmaterjalide analüüs ... 18
4.2 Niitide analüüs ... 19
4.3 Parima alusmaterjali ja niidi kombinatsiooni leidmine ... 20
4.4 Tikandi mustrite analüüs ... 21
4.5 Sobiva vedeliku valimine ... 22
4.6 Vedeliku liikumine fraktaalses struktuuris ... 23
5 Kokkuvõte ... 25
6 Kasutatud kirjandus ... 27
LISA 1 ... 31
LISA 2 ... 32

1 Sissejuhatus

Taimede vaskulaarsüsteemi keerukus ja efektiivsus vedelike transportimisel on inspireerinud paljusid teadusvaldkondi, sealhulgas pehmerobootikat ja biomimeetikat. Nende süsteemide uurimine ja jäljendamine võib pakkuda uusi lahendusi näiteks meditsiini valdkonnas, parandades meie võimet luua elutruusid ja funktsionaalseid tehislikke struktuure.

Tehislehtede arendamisel on tikitud vaskulaarsüsteemi kasutamine paljulubav lähenemisviis, mis võimaldab luua keerukaid kanaleid vedeliku transpordiks. Need struktuurid täidavad olulisi funktsioone, nagu vedeliku ja toitainete ühtlane tarnimine. Tikitud vaskulaarsüsteemi rakendamine robotikoes võimaldab uurida vedelike dünaamikat ja liikuvust kapillaarvõrgustikes.

Kapillaarvõrgustike efektiivseks toimimiseks on oluline mõista kapillaaride suuruse, kuju ja materjali koostise mõju vedeliku juhtivusele. Erinevate tikkimistehnikate ja -mustrite analüüs aitab optimeerida vedeliku voolu, tagades sujuva ja tõhusa vedeliku juhtimise. Parameetriseeritud lähenemisviis vedeliku juhtimiseks kapillaarvõrgustikus hõlmab dünaamilisi mudeleid ja algoritme, mis optimeerivad vedeliku jaotust, võttes arvesse voolukiirust ja võrgu topoloogiat.

Looduslike lehtede vaskulaarsüsteemi uurimine annab väärtuslikku teavet, mida saab rakendada tehislike süsteemide arendamisel ning vedeliku liikumise kaudu toimuva teabe edastamise mehhanismide jäljendamine aitab luua funktsionaalseid tehisstruktuure. Mikrofluidika ja biomimeetilise inseneeria edusammud võimaldavad arendada vaskulaarseid süsteeme, mis on kohandatud erinevatele rakendustele, sealhulgas biomeditsiini ja pehmerobootika valdkonnas.

Selle töö eesmärk on uurida tikitud vaskulaarsüsteemi rakendamist robotikoes, keskendudes vedeliku juhtimisele kapillaarvõrgustikes ühtlasema jaotuse saavutamiseks ning parametriseeritud lähenemisviiside väljatöötamisele vedeliku jaotuse optimeerimiseks. Uurimistöös kasutati erinevaid niite ja alusmaterjale, sealhulgas puuvillast ja polüestrist õmblusniiti ning prinditavat kilet ja siidi, et määrata nende sobivus tikitud vaskulaarsüsteemide loomiseks. Samuti programmeeriti algoritm, mis loob Murray seadusel põhineva fraktaalse struktuuri ning selle kasutamine pidi tagama ühtlase vedeliku jaotumise kogu tehislehe ulatuses. Töö eesmärgid on nii teoreetilised kui ka praktilised - arendatakse nii teoreetilisi algoritme kui ka demonstreeritakse nende praktilist rakendust, luues ja testides tikitud vaskulaarstruktuure. Töö laiem eesmärk on edendada looduslike süsteemide matkimise võimekust vedeliku dünaamika, biomimeetika ja koetehnika valdkonnas.

2 Kirjanduse ülevaade

2.1 Vaskulaarsed süsteemid

Mõiste vaskulaarsüsteem viitab kanalite võrgustikule, mis on ette nähtud vedelike transportimiseks ühest kohast teise. Seda mõistet võib kasutada paljude erinevate süsteemide kirjeldamiseks, alates imetajate kopsude mikroveresoonkonnast kuni puude ja taimede lehtede vedeliku transpordisüsteemide. Vaskulaarsüsteem on selgelt määratletud suletud kanalite võrgustik, mis vastutab vedelike ringluse eest. Nende vedelike olemus võib olla erinev, alates hingamiseks kasutatavatest lahustunud gaasidest putukatel kuni toitainete ja vee transpordini kõrgemat liiki loomadel ja taimedel. (Banda, jt., 2023)

2.1.1 Vaskulaarsed süsteemid loomades

Loomade vereringesüsteemide terviklikuks mõistmiseks on oluline uurida ja rõhutada nende erinevaid funktsioone ja keerulisi struktuure, mis need süsteemid moodustavad. Nende komponentide tundmaõppimisega ei täiusta me mitte ainult oma teadmisi selle kohta, kuidas verevoolu reguleeritakse inimese ajus, vaid mõistame rohkem ka seda, kuidas selliseid struktuure tehislikult juhtida. Lisaks on tuleviku perspektiivis vajalik pöörata tähelepanu olulistele füsioloogilistele ja kliinilistele mõjudele, mis tulenevad autoregulatsioonist selles süsteemis. (Claassen jt., 2021)

Äärmiselt oluline on veresoonte ja nende tehislike jäljendustega seotud mehaaniliste omaduste hindamine. Tähtis on välja töötada täpsed standardid, mis peegeldavad füsioloogilisi olusid, et tagada kasutatavate materjalide sobivus ja ohutus (Bozuyuk jt., 2021). Arvutuslike mudelite ja biomehaaniliste analüüside kaasamine on samuti oluline, eriti inimese südame uurimisel, kuna süda toimib inimese vaskulaarsüsteemi keskse pumbana (Fedele jt., 2023). Lisaks on uuritud pinna mikrorullikute liikumist veresoonte sarnastel mikrotopograafiatel koos nende dünaamika ja potentsiaalsete rakendustega (Bozuyuk jt., 2021). Elektrooniliste veresoonte kontseptsiooni tutvustamine toob esile potentsiaalsed edusammud regeneratiivses meditsiinis ja biomeditsiinitehnikas. Elektroonilised veresooned on loodud ühendades tehislike veresoonte materjalid elektrooniliste komponentidega, mis võimaldavad aktiivset jälgimist ja sekkumist veresoonte funktsioonidesse, sealhulgas näiteks verevoolu dünaamika reguleerimisse ja ravimi kohaletoimetamisesse (Cheng jt., 2021).

Enne süvenemist vaskulaarse ainevahetuse uurimisse on oluline mõista ka Murray seaduse põhikontseptsiooni. See seadus väidab, et veresoonte läbimõõdud hargnevas võrgus on optimeeritud

nii, et minimeerida energiakulu, tagades samal ajal piisava verevarustuse igas piirkonnas. Seadus hõlmab endas valemit, mis näitab, et hargnenud kanalite raadiuste kuupide summa on võrdne kargneva kanali raadiuse kuubiga. See põhimõte on aluseks kunstlike vereringesüsteemide väljatöötamisel. Murray seaduse põhimõtteid arvesse võttes püütakse kavandada tõhusamaid ja bioloogiliselt inspireeritud vereringe võrke, mis parandavad verevoolu dünaamikat ja kliinilisi tulemusi. Nende põhimõtete mõistmine võimaldab näiteks täiustatud loomasimulatsioone, arvutuslikke mudeleid ja märkimisväärseid edusamme meditsiini valdkonnas, sealhulgas paranenud kirurgilised tehnikad, tõhusamad meditsiiniseadmed ja isikupärastatud ravimeetodid. (Liu jt., 2007)

2.1.2 Vaskulaarsed süsteemid taimedes

Taimedes leiduval vaskulaarsüsteemil on oluline ülesanne transportida tõhusalt toitaineid, et toetada taimede ainevahetust (Słupianek jt., 2021). See süsteem koosneb kahte tüüpi kanalitest, mida tuntakse ksüleemi ja floeemi nime all.

Ksüleemi rakud on piklikud, õhukesed ja eluta, mille sekundaarne sein sisaldab ligniini (Rajput jt., 2022). Ksüleemis on erinevaid rakutüüpe, millest kõige olulisemad on traheoidid ja anumelemendid. Traheoidid on pikad, õhukese seinaga rakud, mis on mõlemast otsast suletud ja mille seintes on augud, mis võimaldavad vee külgmist liikumist nende vahel. Seevastu anumelemendid on lühemad, laiemad ja õhemate seintega rakud, mis on mõlemast otsast avatud, moodustades rea torusid, mis hõlbustavad vee juhtimist (Jacobsen, 2021).

Ksüleemil on oluline roll vee ja mineraalide transportimisel kogu taime ulatuses. Transpiratsiooni kaudu imatakse vesi juurtest ksüleemi soontesse, kust see juhitakse edasi lehtedesse ja teistesse taime maapealsetesse osadesse (Zhang jt., 2023). Selline vee liikumine ülespoole raskusjõu vastu on võimalik tänu veemolekulide siduvatele ja adhesiivsetele omadustele ning ksüleemianumates moodustuvatele pidevatele kolonnidele. Vee transport on oluline rakkude püstuvuse säilitamiseks, fotosünteesi võimaldamiseks ning taime üldise kasvu ja arengu toetamiseks.

Erinevalt ksüleemi rakkudest on floeemi rakud elusad ja koosnevad sõeltorudest, kaasrakkudest ja bast-kiududest. Sõeltorude otsaseinas olevad perforatsioonid loovad sõelataolise struktuuri, mis võimaldab toitainete transportimist. Iga sõelatoruga on seotud kaasrakud, mis täidavad sõelatoru metaboolseid funktsioone. (Schenk jt., 2021)

Floeemil, mida tuntakse ka kui toitu juhtivat kude, on oluline roll orgaaniliste toitainete, näiteks suhkrute ja aminohapete, transportimisel allikatest, näiteks väljakujunenud lehtedest

neeldumiskohtadesse, arenevatesse viljadesse, ladestusjuurtesse ja kasvavatesse kudedesse. Seda ainete liikumist hõlbustab survevoolu mehhanism, mis tugineb suhkrute aktiivsele laadimisele sõelatorudesse kaaslaste poolt ja sellest tulenevale osmoosilise rõhu gradiendile. Nende toitainete transportimine läbi floeemi on energia salvestamiseks, kasvuks ja taime üldiseks toimimiseks ülioluline. (Zheng jt., 2022)

Nii ksüleem kui ka floeem mängivad olulist rolli vee ja toitainete transportimisel läbi taime eri osade, sealhulgas varre, okste ja lehe võrsete. Lehed, mis on taime esmased fotosünteetilised organid, on eriti olulised, kuna nad talletavad ja vabastavad fotosünteesi käigus tekkinud orgaanilisi ühendeid ja energiat (Zhang jt., 2023). Vee ja toidu tõhusa liikumise hõlbustamiseks on lehtedel väga kompleksne ja liigendatud kanalite võrgustik, mis sarnaneb lähedalt ksüleemi ja floeemi struktuurilisele koostisele (Perico jt., 2022). Need keeruliste mustritega kanalid jäljendavad ksüleemi ja floeemi kanali- ja anumalaadseid struktuure, luues sarnase hargneva võrgustiku, mis võimaldavad ainete kiiret ja tõhusat transporti taime vaskulaarsüsteemis (Zhang jt., 2023). See vaskulaarsüsteem tagab taime kasvuks, arenguks ja üldiseks heaoluks vajalike ainete jaotumise (Perico jt., 2022).

2.1.3 Vaskulaarsüsteemi rakendused ja tulevikusuunad

Üks teadusuuringute suund hõlmab materjali loomist, mis on inspireeritud bioloogiast, looduslikest lehtedest. Tehislehe arendamise senised edusammud, samuti tekstiili ja tikandi puhul kasutatavad meetodid, annavad sihi ja aluse edasisteks teadustöödeks (Doersam jt., 2022). Vaskulaarsüsteemi jäljendamise üheks eesmärgiks on luua tehisorganeid või elutegevust toetavaid seadmeid, mis matkivad looduslike süsteemide funktsioone ja struktuure. Arvestades looduslike kanalite struktuuride keerukust, võib nende täpne jäljendamine olla aga kauge eesmärk. Selle asemel on realistlikum võimalus asendada osaliselt konkreetseid looduslikke funktsioone, näiteks gaasivahetust kopsudes või konstrueerida maksa abimoodul. Lisaks on oluline optimeerida meditsiiniliste implantaatide jaoks mõeldud veresoonte konstruktsiooni. (Liu jt., 2023).

Neid eesmärke on võimalik saavutada, kasutades täiustatud biomaterjale ja insener-tehnikat, et luua kohandatud vaskulaarsed võrgustikud, mis jäljendavad soovitud funktsioone. Need kohandatud võrgustikud võivad parandada hapniku ja toitainete transporti kudedesse, tõhustada jääkainete eemaldamist ning hõlbustada kunstlike ja looduslike kudede integreerimist taastavas meditsiinis (Liu jt., 2023). Lisaks võivad tehislikud vaskulaarsed struktuurid pakkuda võimalust arendada ravimite sihipärast manustamist inimkehas. See võib tuua meditsiinivaldkonnas kaasa suure arengu, võimaldades haiguste ja seisundite täpset ja lokaliseeritud ravi, mis vähendaks kõrvaltoimeid ja parandaks lõppkokkuvõttes patsientide ravitulemusi (Huang jt., 2023).

Erinevate vaskulaarsete struktuuride loomine, kasutades näiteks selliseid kontseptsioone nagu hierarhiline ja fraktaalne arhitektuur, on kahtlemata teostatav. Tänu sellisele uurimissuunale on võimalik looduslike vormide jäljendamine või optimaalsete struktuuride kavandamine konkreetsete funktsioonide jaoks. Meditsiini valdkonnas tähendaks see sünteetiliste ja elusate veresoonte transplantaatide konstrueerimist, et asendada kahjustatud või ummistunud veresooni (Huang jt., 2023). Tehislehele vaskulaarse struktuuri konstrueerimine, mis peegeldab loodusliku lehe kanalite mustrit, aitab aga kaasa lehe füsioloogia mõistmisele. Tekstiili- ja tikkimismeetodid mängivad selles valdkonnas materiaalsete mudelite konstrueerimisel olulist rolli (Doersam jt., 2022).

2.2 Tehisleht

Tehislehe üks võimalik eesmärk on imiteerida taimede fotosünteesi protsessi, võimaldades päikesevalguse muundamist kasutatavaks energiaks keemiliste reaktsioonide kaudu. Sellised lahendused on välja töötatud vastuseks kasvavale keskkonnaprobleemile ja tungivale vajadusele säästvate energiaallikate järele. Kasutades materjale nagu räni, titaandioksiid ja koobaltfosfaat, suudavad kunstlikud lehed tõhusalt absorbeerida päikesevalgust ja katalüüsida olulisi keemilisi reaktsioone. Lisaks on tehnoloogiate ja lähenemisviiside, nagu nanotehnoloogia ja biomimeetika, integreerimine oluliselt parandanud kunstlike lehtede energiamuundamise tõhusust ja üldist vastupidavust. (Hann jt., 2022)

2.2.1 Tehislehtede vaskulaarsüsteemi struktuur ja disain

Tehislehe disainimiseks on vaja kanalite võrgustiku mudelit, mida saab ehitada ja testida makroskaalal. Selle saavutamiseks on rakendatud looduslikes lehtedes esineva keerulise hierarhilise võrgu lihtsustamine (S. Niu, 2021). Konstrueeritud on ühekordse järjestusega võrk, kus suured veenid jagunevad otse väiksemateks kõrvalharudeks. See tähendab, et võrgu struktuuris on ainult üks veenide tase, ilma täiendavate harudeta või mitme hargnemistasemeta, nagu tavaliselt leidub looduslikes lehtedes. Seda peetakse piisavaks, kuna peamiste soonte põhifunktsiooniks on vee juhtimine katalüütilistesse kohtadesse ehk spetsiifilistesse aladesse ensüümi või muu katalüsaatori pinnal, kus toimub keemiline reaktsioon (A. Roth-Nebelsick ja M. Krause, 2023) ning seda on võimalik näidata ka lihtsustatud süsteemides. Tehislehe kontekstis on katalüütilised kohad need piirkonnad, kus veest eraldatakse hapnik ja vesinik läbi valguse käes toimuva fotokatalüütilise protsessi.

Tehislehtede arendamisel on kasutatud reaalsete lehtede vaskulaarsüsteemi põhimõtteid, jäljendades looduslike lehtede kanalite mustreid, et luua tõhusad ja funktsionaalsed vaskulaarsüsteemid. (M. Mao jt., 2023). Reaalsete lehtede vaskulaarsed süsteemid koosnevad keerukatest hierarhilistest

võrgustikest, kus suured veenid hargnevad väiksemateks kanaliteks, et tagada tõhus vedeliku ja toitainete transport kogu lehe struktuuris. Need hierarhilised võrgustikud on kohandatud nii, et suudavad optimeerida vedeliku voolu ja minimeerida takistust, võimaldades seeläbi ühtlast jaotust (C. Perico jt., 2022).

Kirjanduses on pakutud ka lahendust, milles tehislehe peamistes veenides on vesiniku emissiooni katalüsaatorid ja need on ümbritsetud sitke paindliku ionomeerplaadiga, mis toimib prootonivahetuse membraanina nin väikesed veenid toimetavad vett sihipärastesse kohtadesse (S. Niu, 2021). See on otsene analoog loodusliku lehe vaskulaarsüsteemile, kus on kanalid, mille kaudu toimetatakse rakkudesse olulisi toitaineid sisaldav vesi, ja vesiniku tekkimise kohad on fotosünteesiga seotud ensüümide katalüütiliste kohtade abstraktsiooni abil (M. Mao jt., 2023).

2.2.2 Tehislehtede vaskulaarsüsteemi funktsioonid

Tehislehe vaskulaarsüsteemide transpordi funktsioonidel on fundamentaalne roll selle üldises tõhususes energiaallikana. Üks selle keerulise süsteemi peamisi funktsioone on kontrolli ja reguleerimise funktsioon (Zhu jt., 2022). Selleks on tähtis automatiseeritud süsteemi rakendamine ja integreerimine, kuna see võimaldab energia tootmise sujuvat ja täpset reguleerimist (Kuromori jt., 2022). Lisaks saab kontrolli- ja reguleerimisfunktsiooni täiustada, kasutades kiudude massiivi, mis on konstrueeritud moodustamaks radu, mille kaudu hõlbustada vee ja ioonide transporti lehe sees (Sakurai ja Miklavcic, 2021).

Teine oluline funktsioon, mis tehislehe puhul on välja toodud, on vastupidavus ja taastumine, mis keskendub lehe enda struktuurilise terviklikkuse ja optimaalse funktsionaalsuse säilitamisele (Gu jt., 2022). Seepärast on oluline erinevat tüüpi kiudude ja tekstiilide integreerimine ja kombineerimine, et luua hoolikalt kavandatud ja vastupidav kangas ning sulgeda katalüsaator ja ioonid keerukalt konstrueeritud kaitsetaskusse, mis sarnaneb loodusliku ksüleemi ja floeemiga (Azeem jt., 2021).

2.2.3 Tehislehtede vaskulaarsüsteemi tehnoloogiline innovatsioon

Tehislehtede arendamisel on tikkimine praktiline meetod, et luua tee vedeliku voolu jaoks. Kuigi vaba liikumisega tikkimine ehk tehnika, kus tikkija saab vabalt juhtida tikkimise protsessi, võimaldab suuremat paindlikkust ja loomingulisust, siis eelprogrammeeritud ja masina poolt juhitav tikkimise meetod osutub tehislehtede loomisel eelistatumaks meetodiks, kuna see võimaldab suuremat täpsust ning kontrollitust tikitavate struktuuride üle. (F. Alshabouna jt., 2022)

Selles lähenemisviisis kasutatav võrgustik võimaldab luua kanalid vedeliku transpordiks, tagades samal ajal vedeliku leviku kindlaksmääratud punktidesse tikandi tihendamise abil. Praegune väljakutse seisneb aga veelgi täpsemate ja paremini kontrollitavate meetodite väljatöötamises, et juhtida vedeliku voolu ja eelkõige lihtsustada kanalite sulgemist ja avamist kindlates kohtades (C. P. D. J. Satpathy jt., 2023).

Üks paljutõotav lähenemisviis selle väljakutse lahendamiseks hõlmab taimede mudeli ja inimkeha vereringe funktsiooni ühendamist. Seda lähenemisviisi rakendades ja uurides alternatiivsete materjalide kasutamist, on potentsiaalselt võimalik luua sünteetilisi süsteeme, mis suudavad täpselt toimetada informatsiooni spetsiifilistesse kohtadesse, võimaldades lokaliseeritud keemilisi reaktsioone (J. Forman jt., 2023). See on oluline meditsiinis, farmaatsiatööstuses ja keemiatehnikas, tagades ainete toimetamise täpselt sinna, kus neid kõige rohkem vajatakse (S. R. Schrock, 2021).

2.3 Tekstiilid ja tikkimine

Tikkimine ja eelkõige masinjuhitav tikkimine on tehnika, mille abil luuakse kangale täpsed mustrid ning mis on kasulik näiteks kunstlike kapillaaride loomiseks. See on kuluefektiivne ja täpne meetod erinevate struktuuride loomiseks, pakkudes suuremat efektiivsust ja kiirust võrreldes juhusliku teekonna meetoditega ehk tikkimise ja õmblemisega, kus protsess on inimjuhitav. Binaarse puu struktuuri, mis on andmestruktuur, kus iga sõlm jaguneb maksimaalselt kaheks alamsõlmeks, kohandamine võimaldab saavutada erinevaid keerukuse ja mustri tiheduse tasemeid.
Binaarse puu fraktaalne struktuur, kus sama mustrit korratakse erinevates mõõtkavades, sarnaneb väga looduslike vaskulaarsüsteemide mustritega. See sarnasus muudab binaarse puu ideaalseks mudeliks tikkimismasinate koordinaatide määramiseks, kuna seda saab kasutada täpsete ja keerukate tikandite loomiseks, mis jäljendavad looduslikke kapillaarvõrgustikke (Xiong, Chen ja Lee, 2021).

2.3.1 Tekstiil kui kapillaarne struktuur

Kapillaarpinnad mängivad olulist rolli vee transportimisel struktuurides, näiteks kunstliku lehe vaskulaarsüsteemis. Tekstiilid on kujunenud praktiliseks vahendiks kapillaarpindade jäljendamiseks tänu nende võimele imada ja transportida vett (M. Garg jt., 2021). On uuritud tekstiilide kasutamist kapillaarpindade jäljendamiseks ja seeläbi näidatud, et tekstiilid suudavad tõhusalt jäljendada looduslikel kapillaarpindadel täheldatavat vedeliku transporti (N. Karim jt., 2020).

Kasutades ära kapillaarsust ja niiskuse reguleerimist, võivad tekstiilid hõlbustada vee liikumist oma pinnal. Kapillaarsus, mis viitab vedeliku liikumisele läbi kitsaste pooride või torude pinnapingete ja adhesiooni abil, võimaldab uurida, kuidas vedelik liigub ja jaotub bioloogilistes süsteemides, näiteks

vaskulaarsetes süsteemides (A. Shahzad, 2023). Tekstiilid on teadlastele mitmekülgne vahend kapillaarpindade omaduste uurimiseks ning aitab kaasa vedeliku dünaamika paremale mõistmisele. Tekstiilide võime jäljendada bioloogilisi kapillaarvõrgustikke, nagu need, mis esinevad taimede ja loomade vaskulaarsetes süsteemides, muudab need praktiliseks tööriistaks vee transpordi uurimisel. See võimaldab paremini mõista vedeliku liikumise mehhanisme, analüüsida vedeliku jaotumist ja liikumist tekstiilmaterjalides, ning samuti optimeerida niiskuse reguleerimise omadusi, mis on olulised nii tehniliste kui ka biomeditsiiniliste rakenduste jaoks (M. Garg jt., 2021).

2.3.2 Tikkimine loomaks fraktaalseid struktuure

Tikkimismeetod on mitmekülgne ja kuluefektiivne meetod. Kasutades traditsioonilisi tikkimismeetodeid või arvjuhitavaid tikkimismasinaid, on võimalik luua keerukaid kanalite mustreid mitmesugustele pindadele, mida saab kasutada tehisorganite ja -kudede arendamisel (T. Gries jt., 2022). See meetod ei võimalda mitte ainult luua veresoonte struktuure, vaid hõlbustab ka kangakihide ühendamist, et jäljendada näiteks ksüleemi ja floeemi funktsioone looduslikes lehtedes.

Hiljutised edusammud tikkimistehnoloogias on viinud 3D-tikkimismasinate väljatöötamiseni, mis suudavad keeruliste mustrite loomiseks mitmekihiliselt kangaid kokku panna (T. Gries jt., 2022). Tikkimise tihedust ja pikkust reguleerides saab simuleerida keerulisi vaskulaarseid struktuure, mis sarnanevad lähedalt looduses esinevatele struktuuridele (I. I. Shuvo jt., 2022). Lisaks saab tikkimismeetodit veelgi täiustada, et luua fraktaalstruktuure, muutes järk-järgult õmblustihedust, mis võimaldab täpselt kujutada lehtede vaskulaarsüsteemi kanalite mustreid (T. A. Greig, 2023).

Kokkuvõttes on tikkimine väga tõhus ja võimalusterohke meetod eelkõige 2D-pinnal väga täpsete ja üksikasjalike vaskulaarsete võrkude loomiseks (I. Bettermann jt., 2022). Tikkimistehnoloogia võimaldab luua keerukaid mustreid ja struktuurseid elemente, mis on vajalikud tehislehtede arendamisel. See meetod pakub suurt täpsust ja kontrollitud liikumist, mis on tähtis vedeliku ja toitainete tõhusaks jaotamiseks tehislikes vaskulaarsetes süsteemides. Lisaks võimaldab tikkimine kasutada erinevaid materjale ja niite, mis võivad jäljendada looduslike lehtede struktuurseid omadusi, suurendades seeläbi tehislehtede funktsionaalsust ja vastupidavust (A. Bündgens jt., 2022).

3 Meetodid

3.1 Tikkimine erinevatele alusmaterjalidele

Töös kasutati puuvillast, linast, naturaalset (täpne koostis teadmata) ja polüestrist õmblusniiti. Alusmaterjalideks olid prinditav kile (*AVERY Zweckform*), lahustuv kile, lina ja siid.
Vedelikena kasutati vesilahust ning silikoonõli.

Niitide vedeliku juhtivuse mõõtmine viidi läbi esialgu prinditava kile pinnal. Kile hüdrofoobsed omadused võimaldasid niite eraldiseisvalt uurida, kuna see vähendas vedeliku imendumist alusmaterjali ja keskendus niidi omadustele. Katsete jaoks tikiti kilele kordsed sirged ja struktuuride lähtmesse tikiti alati ka tihedalt sik-sak mustriga seotud padjake, kuhu lisati katse käigus lahust. Seejärel analüüsiti vedeliku liikumist mööda loodud kanaleid. Iga katse käigus tilgutati padjakesele konstantselt lahust ning liikumist jälgiti 30 minuti jooksul.

Alumaterjali sobivust määrati selle imavust hinnates. Selle jaoks tikiti materjalile taas kordsed sirged ja struktuuride lähtmesse tihedalt sik-sak mustriga seotud padjake. 30 minuti vältel lisati padjakesele konstantselt lahust ning jälgiti vedeliku frondi liikumist alusmaterjalis eeldusel, et front on suunatud tikandist eemale.

Siidi tikkimisel kasutati lahustuvat kile ning tikiti läbi kahe materjali korraga. See võimaldas luua keerukaid mustreid ilma, et siidi struktuur tikkimise käigus liigselt kahjustuks ning kahjustused hakkaksid materjali omadusi häirima. Pärast tikkimist lahustati kile ettevaatlikult, jättes alles ainult siidile tikitud struktuurid. Et tagada puhas alusmaterjal ja seeläbi täpsed katsed, kontrolliti peale lahustamise protsessi optilise mikroskoobiga, et siidi kiudude vahel ei oleks kile jääke.

3.2 Fraktaalstruktuuri programmeerimine/modelleerimine

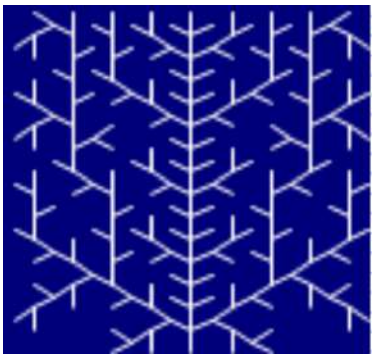
Fraktaalstruktuuri programmeerimine tikkimismasina jaoks algas ideest kasutada Murray seadust ja loodusliku lehe struktuuri, et luua efektiivne vaskulaarne võrgustik. Eesmärgiks oli arendada algoritm, mis suudaks genereerida tikandimustri, mis jäljendab looduslikke soone mustreid ja tagab optimaalse vedeliku jaotumise.

Protsess algas C# keeles koodi väljatöötamisega, mis modelleeris fraktaalstruktuuri, võttes sisendiks ühe segmendi pikkuse ja kogu struktuuri mõõtmed ning tagastades koordinaatide massiivi. Algoritmi keskmes oli sügavuselt esimese otsingu (*depth-first search*) modifitseeritud versioon, mis määras igale kõvera segmendile sobiva raja. Algoritm arvestas Murray seadust, mis määrab soonte paksuse

väärtused, võttes arvesse hargnemiste arvu. Selle tulemusena loodi hierarhiline muster, kus kanalid koosnevad ühendatud segmentidest. Algoritm järgib kontseptsiooni, et lehe vaskulaarne süsteem on loodud ressursside tõhusa jaotamise põhimõttel. Algoritm konstrueerib ruumi täitva võrgu (joonis 1), kus voolu suhted vastavad segmentide juhtivuse suhetele. Esiteks genereerib algoritm lehe 2D kontuuri, jagades selle väiksemateks kõverateks, mis on ühendatud joonsegmentidega.

Murray seadusel põhineva soonte paksuse arvutamiseks kasutati algoritmi, mis määras iga lõpliku soonelõigu paksuse ja edastas selle väärtuse järgmisele tasandile. Algoritm leidis kõik lõpp-punktid (viimased lõigud) ja määras nende paksuseks 1.0 ühikut. Seejärel liikus algoritm tagasi suunas, arvutades iga vanem-lõigu paksuse kuupjuurena selle laste lõikude raadiuste kuupide summast vastavalt Murray seadusele.

Kui C# kood oli valmis ja fraktaalstruktuur modelleeritud, eksporditi andmed tikkimismasina jaoks sobivasse failivormingusse. Tikkimismasina fail sisaldas koordinaate ja juhiseid, mis suunasid masinat looma tikitud struktuuri vastavalt genereeritud mudelile. Faili loomise protsess hõlmas koordinaatide ja nurkade väärtuste genereerimist iga struktuuri lõigu jaoks, koordinaatide ja juhiste salvestamist tikkimismasina jaoks pistete koordinaatide massiivina sobivasse failivormingusse (*.pcs*) ning faili laadimist tikkimismasinasse. Tikkimismasin luges faili ja määras tikandimustri koordinaadid, liikus vastavalt koordinaatidele ja tikkis sooned alusmaterjalile, järgides algoritmi poolt genereeritud mustrit.



Joonis 1: Programmeeritud fraktaalstruktuur.

3.3 Kolorimeetria

Transpordiprotsesside uurimiseks kasutati värvipigmente sisaldavaid lahuseid. Neid lahuseid kanti lehepõhisele struktuurile, mis võimaldas jälgida nende jaotumist kogu struktuuris. Värvipigmete lahustati vees ja silikoonõlis. Jälgiti ende värviliste lahuste voolamist läbi niitide ja tehislehe aluse moodustavate materjalide ning mõõdeti voolu ühtlasust simuleeritud lehe sees. Selleks olid loodud

sobivad tingimused kasutades tehislikku valget valgust ning selle ühtlustamiseks valguskasti. Täpsete tulemuste saamiseks kasutati valget aluspinda ning kalibreeriti kaamera sellele vastavalt. Töös kasutati Sony a6300 kaamerat ning sätted olid seatud järgnevalt: iso 100, säriaeg 1/200 ning ava f2.0. Katsed viidi läbi 15-60 minuti vältel ning saadud liikumine salvestati videona.

Värvide ja pigmentide lahustamisel kasutati kahte erinevat lahustit: vett ja silikoonõli. Vesi on polaarne lahusti, mis tähendab, et tal on võime lahustada paljusid erinevaid aineid, sealhulgas mitmesuguseid värvilisi pigmente. Kui pigmendid lahustuvad vees, hajuvad nad ühtlaselt, tekitades homogeense värvilise lahuse. Selles töös kasutati vesilahuse värvimiseks tavalist pastaka tinti ning kõikide katsete jaoks valmistati ühekordselt lahus, mille kontsentratsiooni katsete käigus ei muudetud. Seevastu silikoonõli on mittepolaarne lahusti, mis tähendab, et see ei suuda lahustada teatavaid pigmente, sest pigmendid on üldiselt polaarsed. Kui pigmendid segatakse silikoonõliga, ei pruugi need täielikult lahustuda ja selle asemel eralduvad õlist, moodustades ebaühtlase värvuse. Seetõttu kasutati töös silikoonõliga õlilahustuvat pigmenti (*Silc Pig, Smooth On*) ning valmistati samuti ühekordselt kindla kontsentratsiooniga lahus, mida kasutati kõigis katsetes.

3.4 Pildi- ja videotöötlus

Uurimistöös oli olulisel kohal videomaterjali töötlemine ja analüüsimine, et saada täpset ülevaadet vedelike ja pigmentide liikumisest modelleeritud struktuurides. Selle saavutamiseks jagati videomaterjal üksikuteks kaadriteks, mida analüüsiti järjestikku. Videomaterjali töötlemiseks ja analüüsimiseks kasutati programmi, mis võimaldas video kaadreid järjest näha ja analüüsida.

Videotöötluse käigus jälgiti vedelike ja pigmentide liikumist tikitud struktuurides, kasutades järgmisi tehnikaid:

- *Thresholdin*g ja *adaptive thresholding*: Need meetodid võimaldasid eristada vedeliku ja pigmendi piirkonnad taustast, mis hõlbustas vedeliku ja pigmendi liikumise jälgimist ja analüüsimist. *Thresholding* meetodit kasutati, et määrata kindlad värvi kanali vahemike künnised, millest alates vedeliku ja pigmendi piirkonnad olid nähtavad, samas kui *adaptive thresholding* võimaldas kohaneda erinevate valgustingimustega kaadrite vahel.
- Pseudovärvide kasutamine: Erinevate liikumismustrite ja kontsentratsiooni tasemete eristamiseks kasutati pseudo värve. See tehnika võimaldas visualiseerida vedeliku teekonda ja pigmendi levikut ajas, muutes erinevad kontsentratsioonid ja liikumissuuna visuaalselt eristatavaks.

- HSV (*Hue, Saturation, Value*): Künniste määramise ja kohandamise abil oli võimalik eristada erinevaid värvi piirkondi. HSV mudel aitas täpselt määrata, millised piirkonnad vastavad vedelikule ja pigmendile, võimaldades sellega tõhusat liikumise jälgimist.

Programm võimaldas kaadrite kerimist ja järjestikust analüüsi, et jälgida vedelike ja pigmentide liikumist ajas. Kasutajaliides oli loodud nii, et see võimaldas hõlpsasti reguleerida erinevaid parameetreid liugureid kasutades. Kasutaja sai kohandada HSV künniseid, et tekitada suurima kontrastsusega kaader ja vaadata valitud kaadrites muutusi, mis lihtsustas analüüsi ja tulemuste täpsustamist.

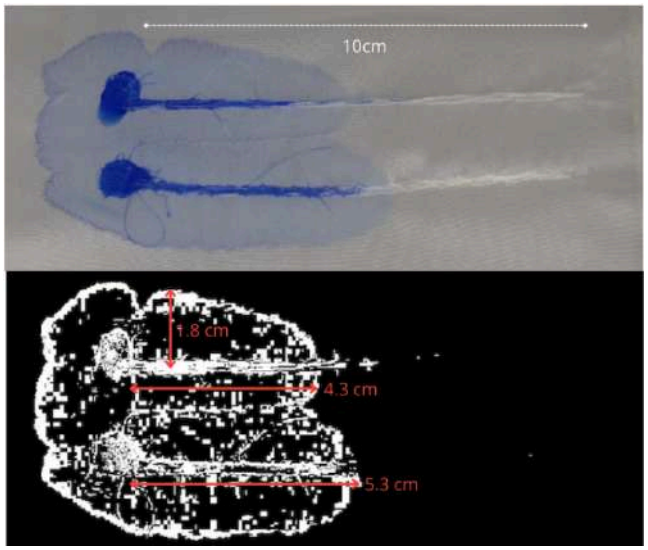
4 Tulemused ja analüüs

4.1 Alusmaterjalide analüüs

Kile kasutamine oli sobilik isoleeritult niitide vedeliku juhtivuse uurimiseks. Kile hüdrofoobsus võimaldas keskenduda ainult niidi omadustele, andes täpsemaid tulemusi vedeliku liikumise kohta niidis endas. See eraldatud lähenemine oli oluline, et mõista niitide vedeliku juhtivuse mehhanismi, ilma, et alusmaterjal seda mõjutaks.

Linase kanga kasutamine näitas, et see materjal juhib vedelikku isegi liiga hästi. Kuigi linane kangas oli algselt kaalutud võimaliku alusmaterjalina, selgus katsete käigus, et selle liigne vedeliku imavus tulenevalt materjali tihedusest ja kapillaarsusest muutis täpsete ja kontrollitud katsete läbiviimise keeruliseks. Linasel kangal toimus vedeliku liikumine kõrvale suunatult oluliselt kiiremini, kui mööda tikitud kanaleid, mistõttu ei olnud võimalik saavutada vedeliku ühtlast ja kontrollitud levikut.

Siid osutus kõige sobivamaks alusmaterjaliks. Joonisel 1 võib näha, et vedeliku frondi liikumine nii mööda tikandit kui ka mööda alusmaterjali toimus kontrollitult. See tähendab, et vedeliku transport juhildus tikitud kanalist ning jaotus ühtlaselt selle ümber. Seega oli tegu ideaalse materjaliga antud töö raames ning seda kasutati ka järgnevates katsetes.



Joonis 2: Naturaalne niit siidil. Tulemus 15 minuti järel peale vesilahuse lisamist padjakesele. Filtrid ülevalt alla: videopilt, HSV analüüs. Tikandid mõlemal pildil: ülemine neli kõrvutiasetsevat sirget, alumine neli kõrvutiasetsevat sirget seotud sik-sak mustriga.

4.2 Niitide analüüs

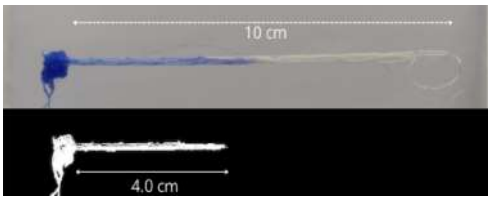
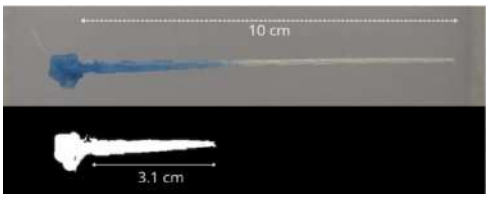
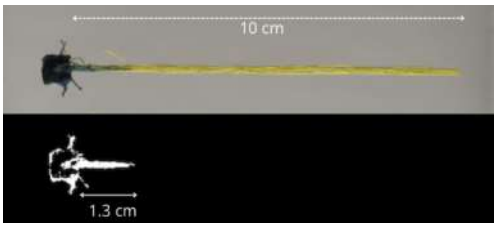
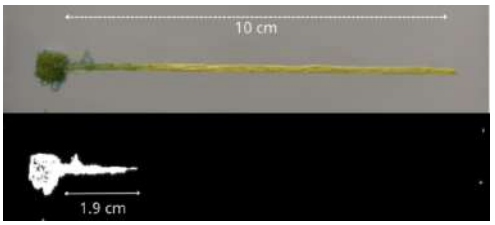
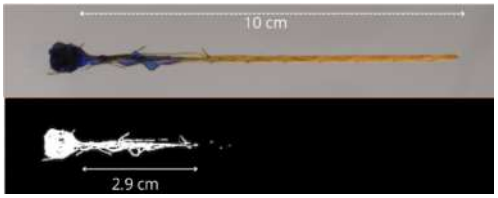
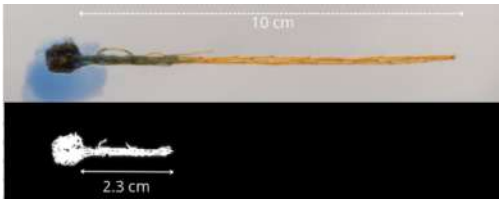
Naturaalse niidi kasutamine andis sobivaid tulemusi. Tabelis 1 on näha, et vesilahuse puhul on vedeliku liikumine mööda sirget 15 minuti jooksul 4 cm ning silikoonõli puhul 3.1 cm, mis on suurimad tulemused võrdluses teiste kasutatud niitidega. Kuigi täpne koostis ei ole teada, on tõenäoline, et naturaalsed kiud sisaldasid hüdrofiilseid komponente, mis soodustasid vedeliku imendumist ja liikumist mööda niiti. Naturaalsed kiud, nagu näiteks tselluloos, sisaldavad hüdroksüülrühmi, mis moodustavad vesiniksidemeid veemolekulidega, parandades seeläbi vedeliku juhtivust. Lisaks võimaldas niidi struktuur luua kapillaarkanaleid, mis kiirendasid vedeliku liikumist.

Puuvillane niit osutus vedeliku juhtimisel aeglasemaks võrreldes teiste kasutatud niitidega. Tabelis 1 võib näha, et vesilahuse frondi kaugus lähtest 15 minuti jooksul mööda tikitud sirgeid on lausa 2.7 cm võrra väiksem ning silikoonõli frondi kaugus 1.2 cm võrra väiksem võrreldes naturaalse niidi frondi kaugusega sama ajavahemiku jooksul. Puuvill, olles looduslik kiud, omab hüdrofiilseid omadusi, kuid selle tihedam ja kompaktsem struktuur võib piirata vedeliku liikumise kiirust. Puuvillakiudude vahelised kapillaarkanalid võivad olla väiksemad ja tihedamad, mis aeglustab vedeliku imendumist ja liikumist. Seetõttu ei olnud puuvillane niit nii efektiivne vedeliku juhtimisel kui teised naturaalsed või sünteetilised niidid.

Õmblusniit, mis tõenäoliselt oli valmistatud polüestrist, andis samuti sobivad tulemused vedeliku juhtimisel. Tabelis 1 on näha, et vesilahus liikus mööda polüestrist niiti 15 minuti jooksul 2.9 cm ning silikoonõli 2.3 cm. Seega jäid polüesterniidiga kile pinnal tehtud katsete tulemused niitide võrdluses keskele. Polüester on sünteetiline materjal, millel on ühtlane ja sile struktuur, mis võib vähendada vedeliku imavust. Samas, polüestri kiudude vahelised tühimikud võivad luua efektiivsed kapillaarkanaleid, mis võimaldavad vedelikul kiiresti mööda niiti liikuda.

Linane niit osutus tikkimiseks ebasobivaks, kuna selle niidi paksus muutis tikkimise keeruliseks. Lisaks võib linane niit olla liiga jäik ja ebaühtlane, mis takistab ühtlast vedeliku voolu ja võib põhjustada niidi purunemist tikkimise käigus.

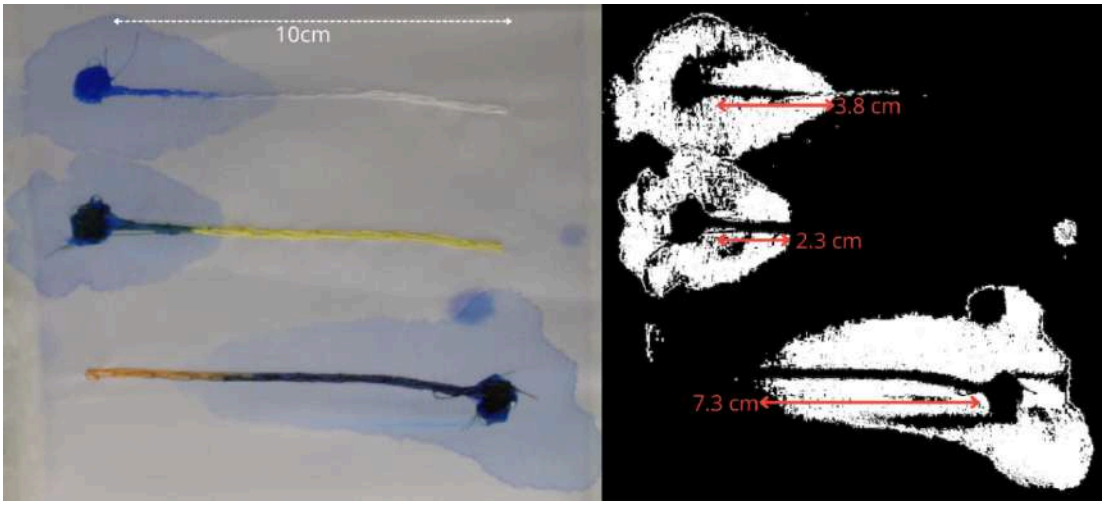
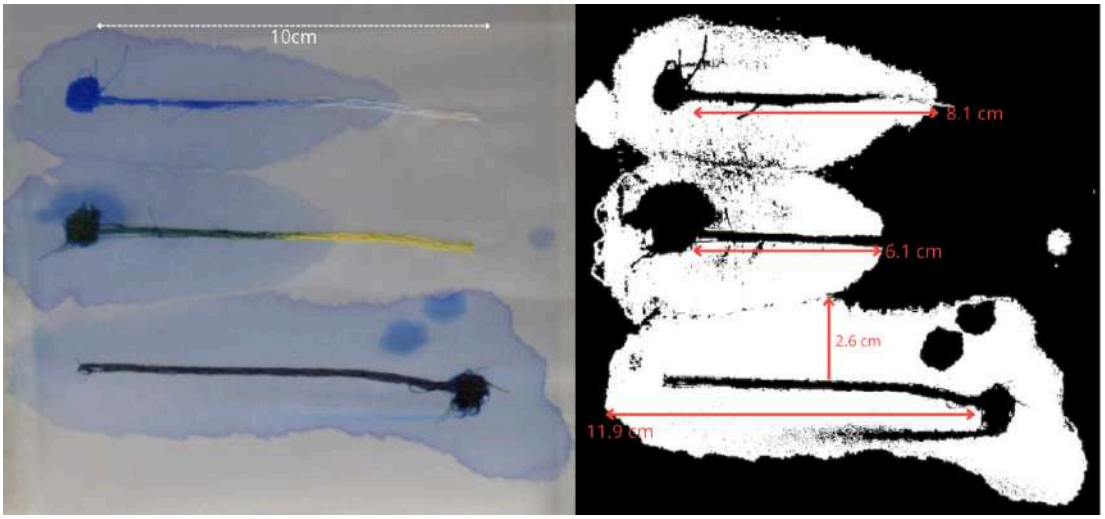
Kokkuvõttes jäid kile pinnal tehtud katsetest kõige sobivamateks niitideks naturaalne ja polüestrist niit, sest nende frontide liikumine mööda tikitud sirgeid oli kõige suurem. Seega kasutati neid edasistes katsetes spetsiifilisel aluspinnal.

Niit	Tulemus vesilahusega	Tulemus silikoonõliga
Naturaalne niit (täpne koostis teadmata)		
Puuvillane niit		
Polüester niit		

Tabel 1: Neljakordsete tikitud sirgete abil niitide võrdlus kile pinnal. Tulemused 15 minuti järel peale lahuse lisamist padjakesele. Igas lahtris ülemine videopilt ning alumine HSV analüüs. Eesmärgiks leida kõige suurema juhtivusega niit.

4.3 Parima alusmaterjali ja niidi kombinatsiooni leidmine

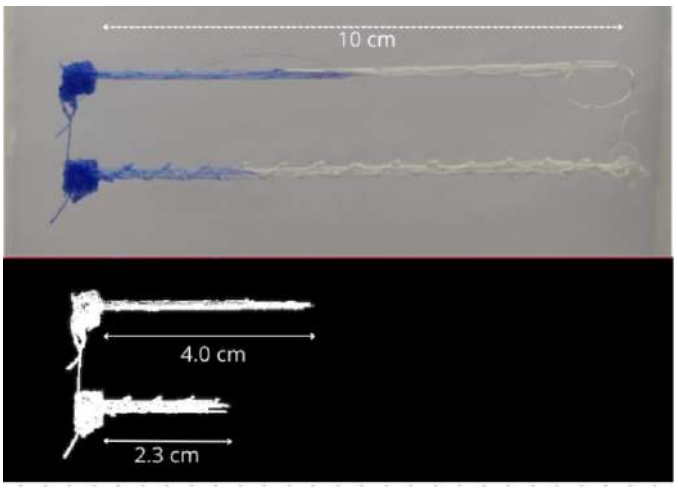
Katsete tulemusena osutus kõige sobivamaks polüestrist niit, kuna see tagas vedeliku ühtlase ja sobiva kiirusega liikumise nii edasi (ehk mööda tikitud struktuuri) kui ka kõrvale suunas (ehk imendumisel alusmaterjali). Tabelis 2 on HSV analüüsil toodud imendumine alusmaterjali valgena ning teises reas võib näha, et vesilahuse maksimaalne levik kõrvale suunas on 2.6 cm. Samuti on tabelis näha, et polüesterniidi levimise kiirus on suurim võrreldes teiste niitidega, kusjuures on levik ühtlane nii mööda tikitud kanalit kui mööda alusmaterjali. See ühtlane ja kontrollitud levimine on kriitiline vedeliku juhtivuse täpsuse ja reprodutseeritavuse seisukohast. Polüesterniidi omadused, sealhulgas selle ühtlane paksus ja piisav imavus, võimaldasid saavutada soovitud tulemusi.

15 min	
30 min	

Tabel 2: Niitide võrdlus siidil. Tulemused 15 ja 30 minuti järel peale vesilahuse lisamist padjakestele. Niidid ülevalt alla: naturaalne niit, puuvillane niit, polüesterniit. Igas lahtris vasakul videopilt ja paremal HSV analüüs. Eesmärk leida optimaalseim frondi liikumine.

4.4 Tikandi mustrite analüüs

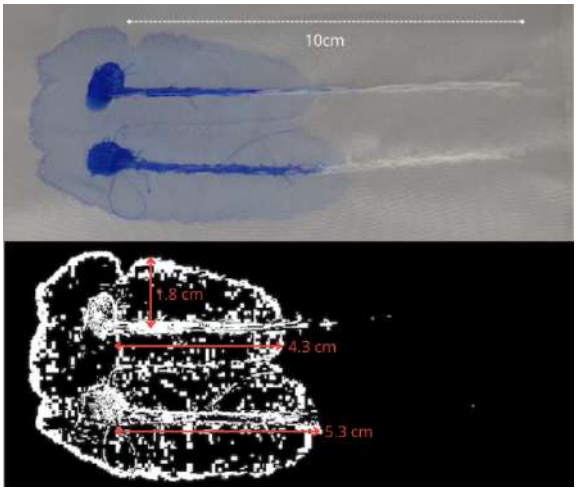
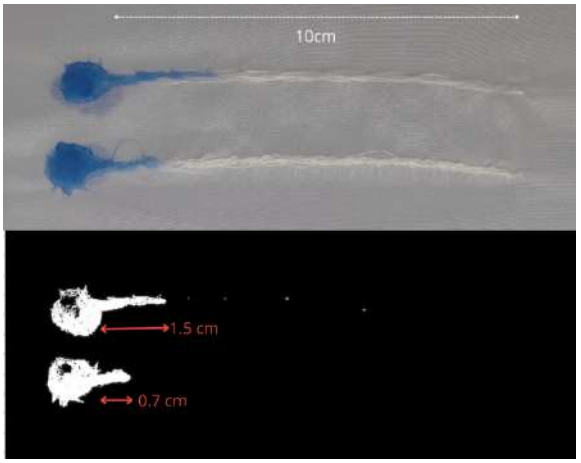
Lisaks uuriti erinevaid tikandi mustreid, et määrata parim meetod vedeliku suunamiseks. Tulemused näitasid, et lihtsalt kõrvuti olevad sirged niidid võimalikult hõredate pistetega olid tõhusaimad vedeliku juhtimiseks mööda määratud kanaleid. Joonisel 2 on näha, et sirgeid niite mööda toimus sama ajavahemiku jooksul 1.7 cm võrra suurem vedeliku edasi liikumine, kui sik-sak mustriga tikandi puhul. Selle tulemuse põhjal kasutati edaspidises töös kordselt ja hõredate pistetega tikitud sirgeid.



Joonis 3: Naturaalne niit kile pinnal. Tulemus 15 minuti järel peale vesilahuse lisamist padjakesele. Filtrid ülevalt alla: videopilt, HSV analüüs. Tikandid mõlemal pildil: ülemine neli kõrvutiasetsevat sirget, alumine neli kõrvutiasetsevat sirget seotud sik-sak mustriga.

4.5 Sobiva vedeliku valimine

Katsete käigus võrreldi ka vesilahuse ja silikoonõli kasutamist. Siidist alusmaterjalil osutus sobivaimaks vesilahus. Tabelis 3 parempoolses tulbas on näha, et silikoonõli ei imendunud siidist alusmaterjali, vaid levis ainult mööda niiti, mis piiras selle kasutust katsete jaoks. Vastukaaluks näitas vesilahus häid tulemusi, tagades ühtlase ja kontrollitud leviku. See tähendab, et vedelik liigub stabiilselt ja pidevalt mööda määratud trajektoore, võimaldades täpselt reguleerida vedeliku voolu suunda ja jaotumist struktuuris. Vesilahuse võime imenduda siidist alusmaterjali ja liikuda mööda niiti tegi sellest valiku vedeliku juhtivuse katseteks.

Vesilahus	Silikoonõli
	

Tabel 3: Naturaalne niit siidil. Vesilahuse ja silikoonõli lisamine padjakesele. Tulemused 15 minuti järel. Eesmärk leida optimaalseim vedeliku frondi liikumine.

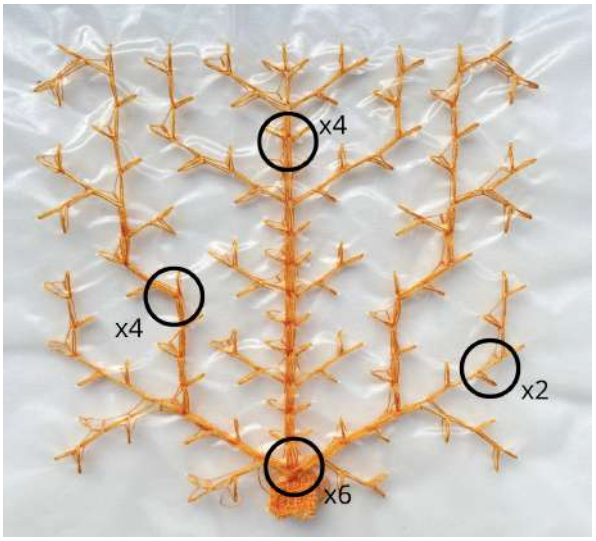
4.6 Vedeliku liikumine fraktaalses struktuuris

Tulemused näitasid, et vedelik jaotub ühtlaselt kogu tehislehe ulatuses ning liigub pea võrdselt kõigi harude suunas, võttes arvesse kaugust lähtmest. Tabelis 4 võib pesudovärvide analüüsi abil juba viie minuti möödumisel näha, et siniselt märgitud vesilahuse levik mööda peamisi hargnemisi on võrdne kõigis harudes.

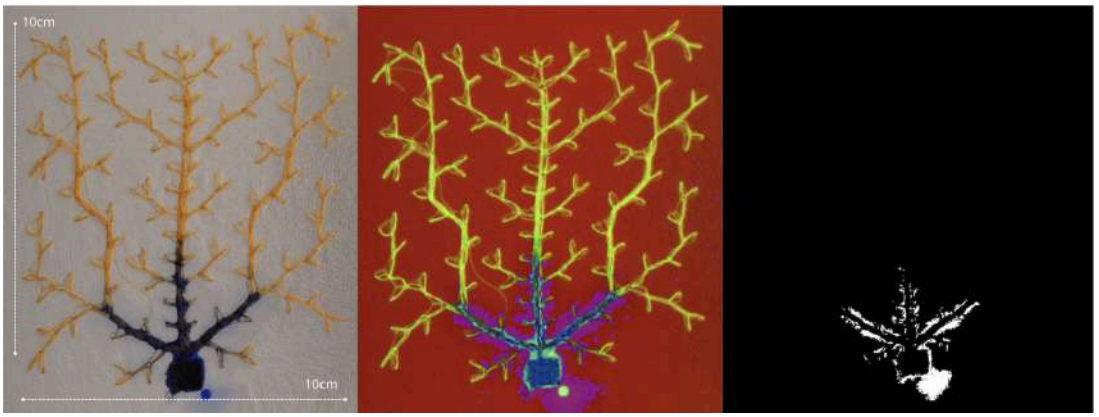
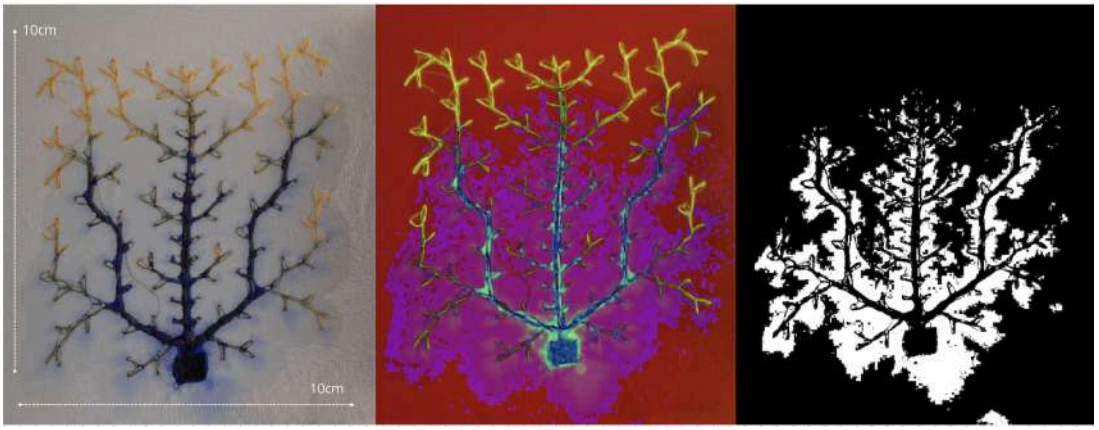
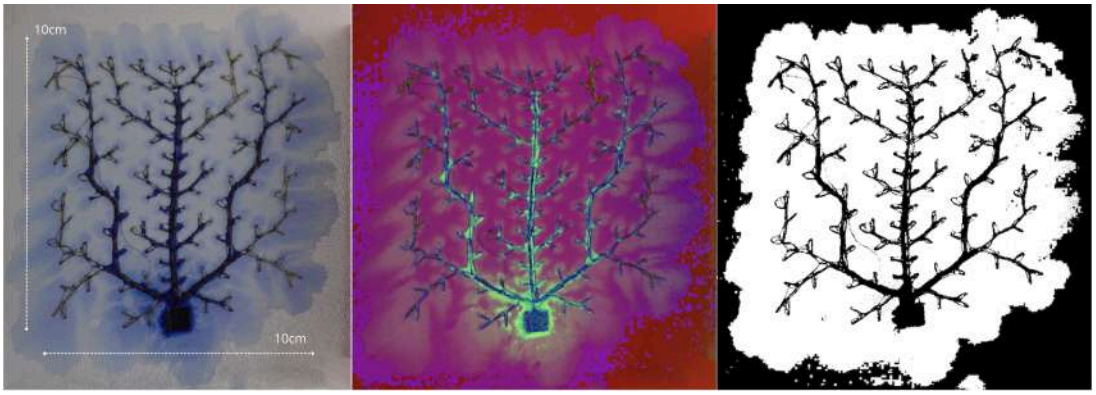
Vedeliku ühtlane jaotus fraktaalses struktuuris võib olla seletatav kapillaarse toime ja pindpinevuse koostoimel. Kapillaarsus võimaldas vedelikul liikuda kitsastes kanalites, mis tekkisid tikitud niitide vahel. Pindpinevus aga tagas vedeliku liikumise mööda niiti ühtlaselt, kuna vedeliku molekulid tõmbuvad üksteise poole, luues järjepideva voo.

Fraktaalse struktuuri disain, mida võib näha joonisel 3, mängis olulist rolli vedeliku liikumise ühtluse tagamisel. Hargnemine ja harude regulaarne jaotumine võimaldas vedelikul jaotuda ühtlaselt, kuna iga haru pakkus võrdselt takistust vedeliku liikumisele. Samuti oli muster kohandatud vastavalt Murray seadusele, mis tagas, et rohkem hargnevatel harudel oleks vedeliku liikumine kiirem tänu suuremale ristlõikele.

Katse tulemused kinnitasid, et fraktaalse struktuuri kasutamine vedeliku juhtimiseks siidil on efektiivne meetod ühtlase ja kontrollitud vedeliku jaotuse saavutamiseks. Tabelis 4 toodud HSV analüüsil on selgelt näha, et 45 minuti möödumisel on vesilahus jaotunud üle kogu tehislehe pinna.



Joonis 4: Programmeeritud fraktaalne struktuur tikitud lahustuvale kilele. Ringidega märgitud Murray seaduse alusel arvutatud kanalite paksused niidi kordsusena.

5 min	
15 min	
45 min	

Tabel 4: Vesilahuse liikumine fraktaalses struktuuris (10cm x 10cm) sõltuvalt ajast. Polüesterniidiga tikitud struktuur siidil. Filtrid vasakult paremale: videopilt, pseudovärvide analüüs, HSV analüüs.

5 Kokkuvõte

Uurimistöö keskendus taimedes leiduvate vaskulaarsete võrgustike tikkimisele robotikoele, mis on oluline samm pehmerobootika ja biomimeetika valdkonnas ning pakub uusi võimalusi tõhusamate ja täiustatud robotite arendamiseks. Tikitud vaskulaarstruktuuride kasutamine robotikoes võimaldab neil täita olulisi funktsioone, nagu toitainete transportimine ja ümbritseva keskkonna muutuste tajumine. Tehislehed, mis on konstrueeritud tikitud vaskulaarstruktuuri põhimõtteid kasutades, võivad aidata kaasa uute arusaamade formuleerimisele ja tehnoloogilistele arengutele. Näiteks, parema arusaamise loomine looduslike kapillaarvõrgustike vedeliku dünaamikast võimaldab täpsemate ja efektiivsemate mikrofluidiliste seadmete väljatöötamist. Samuti, rakendades teadmisi biomimeetikast, saab arendada uusi materjale ja struktuure, mis suudavad jäljendada looduslike süsteemide keerukust ja funktsionaalsust.

Töös analüüsiti, kuidas tikitud vaskulaarsed struktuurid soodustavad vedeliku juhtimist kapillaarvõrgustikes, uurides kapillaaride suurust, kuju ja materjalide koostist. Leiti, et hõredate pistetega teineteise kõrvale tikitud sirged niidid optimeerivad vedeliku voolu, tagades sujuva juhtimise. Uuring keskendus ka kapillaarvõrgustikes vedeliku juhtimiseks vajaliku parameetriseeritud lähenemisviisi väljatöötamisele, käsitledes fraktaalsete struktuuride loomist ja vereringest teatud Murray seaduse rakendamist, mis kontrollivad vedeliku jaotust dünaamiliselt, optimeerides protsessi voolukiiruse ja võrgu topoloogia järgi.

Katsetes kasutati erinevaid niite ja alusmaterjale, sealhulgas puuvilla, lina, siidi ja klassikalist õmblusniiti. Kõige sobivamaks osutus siidi ja õmblusniidi kombinatsioon, mis võimaldas vedeliku ühtlast ja kontrollitud liikumist. Parimate tulemuste saavutamiseks ühendati siid lahustuva kilega, mis võimaldas luua keerukaid tikandmustreid ilma materjali kahjustamata.

Fraktaalstruktuuri programmeerimiseks kasutati Murray seadusel ja looduslikul lehe struktuuril põhinevat algoritmi, mis jäljendas ressursside tõhusat jaotamist ruumi täitva võrgu konstrueerimise kaudu. Uuriti värvipigmente sisaldavate lahuste liikumist läbi tikitud struktuuride, kasutades kolorimeetrilist analüüsi. Pildi- ja videotöötluse jaoks arendati välja meetod vedeliku ja pigmentide liikumise täpseks jälgimiseks ja analüüsimiseks, võimaldades saada üksikasjalikku teavet nende käitumise kohta ajas, nagu levimiskiirus ning levimise perimeeter.

Tulemused näitasid, et siidist alusmaterjalile tikitud fraktaalsed struktuurid võimaldavad vedeliku ühtlast jaotust, mis sarnaneb looduslike lehtede soonte süsteemidega. Katsete käigus demonstreeriti, et tikitud vaskulaarsed struktuurid suutsid tõhusalt juhtida vedelikku ja tagada ühtlase ja kontrollitud

jaotumise kogu tehislehe fraktaalse struktuuri ulatuses. Eriti tõhusaks osutus siidist alusmaterjali ja polüestrist niidi kombinatsioon, mis tagas vedeliku ühtlase liikumise nii horisontaalselt kui ka vertikaalselt kogu struktuuri ulatuses. Antud töö raames saavutati seega nii teoreetiliste mudelite väljatöötamine kui ka praktiline demonstreerimine, et tikitud vaskulaarsed struktuurid suudavad jäljendada looduslikke kapillaarvõrgustikke.

Tulevikus võiks uurida veelgi keerukamaid vaskulaarsete struktuuride disainilahendusi ja nende rakendusi erinevates valdkondades, näiteks biomeditsiinis ja keskkonnatehnoloogiates. Lisaks võiks keskenduda tikitud struktuuride optimeerimisele erinevate vedelike juhtimiseks ja teabe edastamiseks, samuti uute materjalide ja tikkimistehnikate arendamisele, et saavutada veelgi paremaid tulemusi.

6 Kasutatud kirjandus

1. C. H. Banda, M. Shiraishi, K. Mitsui, Y. Okada, K. Danno jt. "Newti lümfisüsteemi struktuurne ja funktsionaalne analüüs" (*"Structural and functional analysis of the newt lymphatic system"*), Scientific Reports, vol. 2023.
2. J. A. H. R. Claassen, D. H. J. Thijssen jt. "Inimese peaaju verevarustuse regulatsioon: füsioloogia ja autoregulatsiooni kliinilised mõjud" (*"Regulation of cerebral blood flow in humans: physiology and clinical implications of autoregulation"*), Physiological Reviews, vol. 101, no. 3, lk. 1487-1559, 2021.
3. M. Fedele, R. Piersanti, F. Regazzoni, M. Salvador. "Üksikasjalik ja biokeemiline arvutuslik mudel kogu inimese südame elektromehaanikast" (*"A comprehensive and biophysically detailed computational model of the whole human heart electromechanics"*), Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 2023, lk. 1068.
4. U. Bozuyuk, Y. Alapan, A. Aghakhani jt. "Pinnamikerullide liikumise juhtimine veresoonetaolistes mikrotopograafiates füsioloogiliste voolude vastu" (*"Shape anisotropy-governed locomotion of surface microrollers on vessel-like microtopographies against physiological flows"*), Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 2021.
5. S. Cheng, C. Hang, L. Ding, L. Jia, L. Tang, L. Mou, J. Qi jt. "Elektrooniline veresoon" (*"Electronic blood vessel"*), Matter, vol. 2, no. 6, 2020.
6. Y. Liu, G. S. Kassab. "Veresoonte metaboolne dissipatsioon Murray seaduses" (*"Vascular metabolic dissipation in Murray's law"*), American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology, vol. 292, no. 3, 2007.
7. A. Słupianek, A. Dolzblasz, K. Sokołowska. "Ksüleemi parenhüüm - roll ja tähtsus puidu funktsioneerimises puudel" (*"Xylem parenchyma—role and relevance in wood functioning in trees"*), Plants, vol. 10, no. 6, 2021.
8. K. S. Rajput, K. K. Kapadane, D. G. Ramoliya, K. D. Thacker jt. "Inter- ja intraksülaarne floeem vaskulaarsetes taimed: alamliikide, esinemiste ja arengu ülevaade" (*"Inter-and intraxylary phloem in vascular plants: a review of subtypes, occurrences, and development"*), Forests, vol. 13, no. 12, 2022.
9. Y. J. Zhang, U. Hochberg, F. E. Rockwell jt. "Ksüleemijuhtide deformatsioon vaskulaarsetes taimed: evolutsiooniline spandrel või kaitseklapp?" (*"Xylem conduit deformation across vascular plants: an evolutionary spandrel or protective valve?"*), New Phytologist, vol. 2023.
10. A. L. Jacobsen. "Juhtrakkude ja aukude struktuuri mitmekesisus olemasolevate okaspuuliikide seas" (*"Diversity in conduit and pit structure among extant gymnosperm taxa"*), American Journal of Botany, vol. 108, no. 6, 2021.

11. J. Zheng, Y. Li, H. Morris, F. Vandelook. "Okaspuude ksüleemirakkude mõõtmete varieerumine näitab kohanemist keskkonnatingimustega" (*"Variation in tracheid dimensions of conifer xylem reveals evidence of adaptation to environmental conditions"*), Frontiers in Plant Science, vol. 13, art. 774241, 2022.
12. H. J. Schenk, J. M. Michaud, K. Mocko, S. Espino. "Lipiidid puitunud taimede ksüleemimahlas kogu angiospermi fülogeneesis" (*"Lipids in xylem sap of woody plants across the angiosperm phylogeny"*), The Plant Journal, vol. 107, no. 6, 2021.
13. C. Perico, S. Tan, J. A. Langdale. "Lehe veenimustrite arengu regulatsioon: ühekojalised versus kahekodsed ja auksiini roll" (*"Developmental regulation of leaf venation patterns: monocot versus eudicots and the role of auxin"*), New Phytologist, vol. 232, no. 2, 2022.
14. Y. Liu, J. Li, S. Xiao, Y. Liu, M. Bai, L. Gong, J. Zhao jt. "Täpsusravi revolutsioon: kantavate sensorite uurimine terapeutilise ravimite jälgimise ja isikupärastatud ravi jaoks" (*"Revolutionizing precision medicine: exploring wearable sensors for therapeutic drug monitoring and personalized therapy"*), Biosensors, vol. 13, no. 7, art. 726, 2023.
15. S. Huang, Y. Gao, Y. Hu, F. Shen jt. "Hiljutine piezoelektriliste biosensorite areng füsioloogiliste signaalide tuvastamiseks ja masinõppel põhinev südame-veresoonkonna haiguste diagnoosimine" (*"Recent development of piezoelectric biosensors for physiological signal detection and machine learning assisted cardiovascular disease diagnosis"*), RSC Advances, vol. 13, no. 32, 2023.
16. A. Doersam, O. Tsigkou, C. Jones. "Ülevaade: Tekstiilitehnoloogiad ühe- ja mitmekihiliste torukujuliste pehmete kudede inseneritöös" (*"A Review: Textile Technologies for Single and Multi-Layer Tubular Soft Tissue Engineering"*), Advanced Materials Technologies, vol. 7, no. 2, 2022.
17. E. C. Hann, S. Overa, M. Harland-Dunaway, A. F. Narvaez. "Hübriidne anorgaaniline-bioloogiline kunstliku fotosünteesi süsteem energiatõhusaks toidutootmiseks" (*"A hybrid inorganic–biological artificial photosynthesis system for energy-efficient food production"*), Nature Food, vol. 3, 2022.
18. S. Niu. "Vaskulaarsete taimede lehtede kasvumehhanismidest inspireeritud komposiitpinna struktuuri genereerimine ja vormiotsing" (*"Composite surface structure generation and form-finding inspired by vascular plant leaves' growth mechanisms"*), 2021.
19. A. Roth-Nebelsick, M. Krause. "Taimede leht: biomimeetiline ressurss multifunktsionaalse ja ökonoomse disaini jaoks" (*"The plant leaf: A biomimetic resource for multifunctional and economic design"*), Biomimetics, vol. 8, no. 2, art. 145, 2023.
20. M. Mao, X. Qu, Y. Zhang, B. Gu, C. Li, R. Liu, X. Li. "Lehe veenimustritest juhitud rakuline joondamine makroskoopiliste südamekudede konstrueerimiseks koetaoliste funktsioonidega"

(*"Leaf-venation-directed cellular alignment for macroscale cardiac constructs with tissue-like functionalities"*), Nature Communications, vol. 14, 2023.

21. C. Perico, S. Tan, J. A. Langdale. "Lehe veenimustrite arengu regulatsioon: ühekojalised versus kahekodsed ja auksiini roll" (*"Developmental regulation of leaf venation patterns: monocot versus eudicots and the role of auxin"*), New Phytologist, vol. 232, no. 2, 2022.
22. I. Azeem, M. Adeel, M. A. Ahmad, N. Shakoor jt. "Nano/mikroplastide omastamine ja akumulatsioon taimedes: kriitiline ülevaade" (*"Uptake and accumulation of nano/microplastics in plants: a critical review"*), Nanomaterials, vol. 11, no. 11, art. 2935, 2021.
23. Q. Y. Zhu, Y. Wang, X. X. Liu, J. Y. Ye, M. Zhou jt. "Feroksidaasid on kriitilised Fe(II) oksüdatsiooniks ksüleemis, et tagada tervislik Fe jaotumine Arabidopsis thaliana" (*"The ferroxidases are critical for Fe(II) oxidation in xylem to ensure a healthy Fe allocation in Arabidopsis thaliana"*), Frontiers in Plant Science, vol. 13, art. 958984, 2022.
24. M. Gu, H. Huang, H. Hisano, G. Ding, S. Huang jt. "Sõlmes lokaliseeritud transporteri HvSPDT oluline roll fosfori laadimisel odrateradesse" (*"A crucial role for a node-localized transporter, HvSPDT, in loading phosphorus into barley grains"*), New Phytologist, vol. 233, no. 2, 2022.
25. G. Sakurai, S. J. Miklavcic. "Lehtede vee transpordi efektiivsus: ühendatud ksüleem-floeem mudel vee ja lahustunud ainete transpordist" (*"On the efficacy of water transport in leaves. A coupled xylem-phloem model of water and solute transport"*), Frontiers in Plant Science, vol. 12, art. 615457, 2021.
26. T. Kuromori, M. Fujita, F. Takahashi jt. "Organitevaheline signalisatsioon kuivastressi vastuses ja kuivakindluse fenotüüpide määratlemine" (*"Inter-tissue and inter-organ signaling in drought stress response and phenotyping of drought tolerance"*), The Plant Journal, 2022.
27. F. Alshabouna, H. S. Lee, G. Barandun, E. Tan, Y. Çotur. "PEDOT: PSS-modifitseeritud puuvillane juhtiv niit tekstiilil põhinevate elektriliste kantavate sensorite masstootmiseks arvutiga juhitava tikkimise abil" (*"PEDOT: PSS-modified cotton conductive thread for mass manufacturing of textile-based electrical wearable sensors by computerized embroidery"*), Materials Today, vol. 50, 2022.
28. J. Forman, O. Kilic Afsar, S. Nicita, R. H. J. Lin jt. "FibeRobo: 4D kiudliideste valmistamine temperatuuritundlike vedelkristallelastomeeride pideva tõmbamise abil" (*"FibeRobo: Fabricating 4D Fiber Interfaces by Continuous Drawing of Temperature Tunable Liquid Crystal Elastomers"*), Proceedings of the 36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, 2023.

29. C. P. D. J. Satpathy, P. S. Aithal, L. Misra, A. Das. "Keerukas korrastamata tikkimine otsustamisalgoritmides" (*"Complex Dis-Ordered Embroidery in Decisional Algorithms"*), Journal of IU Jharkhand, 2023.
30. S. R. Schrock. "Süsteemid kangal: avatud lähtekoodiga tikitud takistite disain, tootmine ja valideerimine" (*"Towards Systems on Cloth: The Design, Manufacturing, and Validation of Open-Source Embroidered Resistors"*), ProQuest Dissertations Publishing, 2021.
31. J. Xiong, J. Chen, P. S. Lee. "Funktsionaalsed kiud ja kangad pehmerobootika, kantavate seadmete ja inimese-roboti liideste jaoks" (*"Functional fibers and fabrics for soft robotics, wearables, and human-robot interface"*), Advanced Materials, vol. 33, no. 3, 2021.
32. M. Garg, J. E. Aw, X. Zhang, P. J. Centellas, L. M. Dean jt. "Vaskulariseeritud termoreaktiivsete materjalide ja komposiitide kiire sünkroniseeritud tootmine" (*"Rapid synchronized fabrication of vascularized thermosets and composites"*), Nature Communications, vol. 12, art. 23054, 2021.
33. N. Karim, S. Afroj, K. Lloyd, L. C. Oaten, D. V. Andreeva jt. "Jätkusuutlik isikukaitseriietus tervishoiurakenduste jaoks: ülevaade" (*"Sustainable personal protective clothing for healthcare applications: a review"*), ACS Nano, vol. 14, no. 12, lk. 16330-16355, 2020.
34. A. Shahzad. "Vedelike ja niiskuse juhtimise omaduste uurimine kangaste puhul, kasutades uut higistamissimulaatorit" (*"Study of liquid and moisture management properties of fabrics by using a novel sweating simulator"*), PolyU Theses, 2023.
35. T. Gries, I. Bettermann, C. Blaurock, A. Bündgens. "Aacheni tehnoloogiaülevaade 3D tekstiilmaterjalidest ja hiljutistest uuendustest ja rakendustest" (*"Aachen technology overview of 3D textile materials and recent innovation and applications"*), Applied Composite Materials, vol. 29, no. 2, lk. 519-541, 2022.
36. I. I. Shuvo, A. Shah, C. Dagdeviren. "Elektroonilised tekstiilsensorid elutähtsate kehade signaalide dekodeerimiseks: olekust ülevaade iseloomustuste ja soovitustega" (*"Electronic textile sensors for decoding vital body signals: state-of-the-art review on characterizations and recommendations"*), Advanced Intelligent Systems, vol. 3, no. 5, 2022.
37. T. A. Greig. "E-tekstiilil põhinev elektriline stimulatsioon haavade paranemiseks" (*"E-textile based electrical stimulation for wound healing"*), University of Southampton EPrints, 2023. Kasutatud 12.05.2024

LISA 1

Meetodid fraktaalse struktuuri loomiseks

Fail *Program.cs* (meetodite väljakutsumine)

```
var structureNew = StructureCalculator.uus_struktuur_lopp(110, 110, 7, 55, 0);

RootWidthCalculator.CalculateWidts(structureNew);
int v = 1;
List<Coordinate> a = new List<Coordinate>();
while (structureNew.Any(f => f.width >= v))
{
    var range = structureNew.Where(f => f.width >= v).ToList();
    var sorted = FileComposer.SortForPath(range);
    a.AddRange(sorted);
    v++;
}
```

Fail *StructureCalculator.cs* (peamine struktuuri loomine)

- Meetod *uus_struktuur_lopp*

```
public static List<Coordinate> uus_struktuur_lopp(double width, double height, double pikkus, double x1, double y1)
{
    startx = x1;

    return uus_struktuur(width, height, pikkus, x1, y1).SelectMany(f => f).ToList();
}
```

- Meetod *uus_struktuur*

```
public static List<List<Coordinate>> uus_struktuur(double width, double height, double pikkus, double x1, double y1, List<List<Coordinate>> struktuuur = null, int depth = 0)
{
    if (struktuuur == null)
        struktuuur = new List<List<Coordinate>>();

    if (depth == 0)
        struktuuur.Add(uus_fragment(pikkus, x1, y1));

    bool hasDepth = struktuuur.Last().First().depth == depth;
    List<List<Coordinate>> lisa = new List<List<Coordinate>>();
    foreach (var frag in struktuuur.Where(f => f[0].depth == depth))
    {
        var s1 = uus_fragment(pikkus, frag[0].x2, frag[0].y2, frag[0].angle, frag);
        if (kasMahub(width, height, struktuuur, s1))
        {
            lisa.Add(s1);
        }
        if (frag.Count() > 1)
        {
            var s2 = uus_fragment(pikkus, frag[1].x2, frag[1].y2, frag[1].angle, frag);
            if (kasMahub(width, height, struktuuur, s2))
            {
                lisa.Add(s2);
            }
        }
        if (frag.Count() > 2)
        {
            var s3 = uus_fragment(pikkus, frag[2].x2, frag[2].y2, frag[2].angle, frag);
            if (kasMahub(width, height, struktuuur, s3))
            {
                lisa.Add(s3);
            }
        }
    }
    struktuuur.AddRange(lisa);

    if (lisa.Any())
        uus_struktuur(width, height, pikkus, x1, y1, struktuuur, depth + 1);

    return struktuuur;
}
```

- Meetod *uus_fragment*

```
public static List<Coordinate> uus_fragment(double pikkus, double x1, double y1, int nurk = 0, List<Coordinate> lastFrag = null)
{
    List<Coordinate> children = new List<Coordinate>();
    var n = nurk;

    Coordinate sirge = new Coordinate
    {
        x1 = x1,
        y1 = y1,
        x2 = x1 + (pikkus * Math.Sin(n * (Math.PI / 180))),
        y2 = y1 + (pikkus * Math.Cos(n * (Math.PI / 180))),
        angle = n,
        depth = lastFrag == null ? 0 : (lastFrag[0].depth + 1)
    };
    children.Add(sirge);

    if (lastFrag == null)
    {
        return children;
    }

    bool isfromFirst = lastFrag[0].x2 == x1 && lastFrag[0].y2 == y1;
    var fromElement = lastFrag.FirstOrDefault(f => f.x2 == x1 && f.y2 == y1);

    if (fromElement == null)
        return children;

    if (lastFrag.Count() > 1 && isfromFirst)
    {
        if (lastFrag[1].angle < n)
            n += 60;
        else
            n -= 60;
    }
    else if (fromElement.angle >= lastFrag[0].angle)
    {
        n += 60;
    }
    else
    {
        n -= 60;
    }

    Coordinate eemamle = new Coordinate
    {
        x1 = x1,
        y1 = y1,
        x2 = x1 + (pikkus * Math.Sin(n * (Math.PI / 180))),
        y2 = y1 + (pikkus * Math.Cos(n * (Math.PI / 180))),
        angle = n,
        depth = lastFrag == null ? 0 : (lastFrag[0].depth + 1)
    };

    children.Add(eemamle);

    if (x1 == startx && nurk == 0)
    {
        n = n * (-1);

        children.Add(new Coordinate
        {
            x1 = x1,
            y1 = y1,
            x2 = x1 + (pikkus * Math.Sin(n * (Math.PI / 180))),
            y2 = y1 + (pikkus * Math.Cos(n * (Math.PI / 180))),
            angle = n,
            depth = lastFrag == null ? 0 : (lastFrag[0].depth + 1)
        });
    }

    return children;
}
```

- Meetod *kasMahub*

```
public static bool kasMahub(double width, double height, List<List<Coordinate>> kogu, List<Coordinate> yks)
{
    if (yks.Max(f => f.x2) > width || yks.Min(f => f.x2) < 0)
        return false;
    if (yks.Max(f => f.y2) > height || yks.Min(f => f.y2) < 0)
        return false;
    if (yks.Max(f => f.angle) > 180 || yks.Min(f => f.angle) < -180)
        return false;

    //kattumised
    foreach (Coordinate c in yks)
    {
        if (kogu.SelectMany(l => l).Any(l => Math.Abs(l.x2 - c.x2) < 5 && Math.Abs(l.y2 - c.y2) < 5))
            return false;
    }

    return true;
}
```

Fail *RootWidthCalculator.cs* (meetodid kanalite paksuste arvutamiseks)

- Meetod *CalculateWidts*

```
public static void CalculateWidts(IEnumerable<Coordinate> values)
{
    var lastLeafs = values.Where(f => !values.Any(v => v.x1 == f.x2 && v.y1 == f.y2));

    foreach (var leaf in lastLeafs)
    {
        leaf.width = 1.0;
    }

    foreach (var leaf in lastLeafs)
    {
        CalcWidts(values, leaf);
    }
}
```

- Meetod *CalcWidts*

```
private static IEnumerable<Coordinate> CalcWidts(IEnumerable<Coordinate> values, Coordinate leaf)
{
    var parent = values.FirstOrDefault(f => f.x2 == leaf.x1 && f.y2 == leaf.y1);

    if (parent == null)
    {
        return values;
    }

    var children = values.Where(f => f.x1 == parent.x2 && f.y1 == parent.y2);

    parent.width = Math.Pow(children.Sum(f => Math.Pow(f.width ?? 0, 3)), 1/3.0);

    CalcWidts(values, parent);

    return values;
}
```

Fail *FileComposer.cs* (meetodid koordinaatide massiivide sorteerimiseks)

- Meetod *SortForPath*

```
public static List<Coordinate> SortForPath(IEnumerable<Coordinate> structure)
{
    var root = structure.FirstOrDefault(f => !structure.Any(s => s.x2 == f.x1 && s.y2 == f.y1));

    if (root == null)
        throw new Exception("No root found! hmm.. strange, very strange..");

    //var leaves = structure.Where(f => f.x1 == rootStart.x2 && f.y1 == rootStart.y2).ToList();

    return GetStructurePath(structure, root);

}
```

- Meetod *GetStructurePath*

```
private static List<Coordinate> GetStructurePath(IEnumerable<Coordinate> structure, Coordinate leaf, int order = 0)
{
    List<Coordinate> path = new List<Coordinate>();
    var leaves = structure.Where(f => f.x1 == leaf.x2 && f.y1 == leaf.y2).OrderBy(f => f.angle).ToList();

    path.Add(leaf);
    foreach (var l in leaves)
    {
        path.AddRange(GetStructurePath(structure, l, order + 1));
    }
    path.Add(ReverseLeaf(leaf));

    return path;
}
```

- Meetod *ReverseLeaf*

```
private static Coordinate ReverseLeaf(Coordinate leaf)
{
    return new Coordinate
    {
        width = leaf.width,
        angle = leaf.angle,
        x1 = leaf.x2,
        y1 = leaf.y2,
        x2 = leaf.x1,
        y2 = leaf.y1
    };
}
```

LISA 2

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Kaisa Kumpas,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose
   "Tikitud vaskulaarne süsteem robotikoele tehislehe näitel",

   mille juhendaja on Indrek Must (PhD) ja kaasjuhendaja Leonid Zinatullin,

   reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commonsi litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Kaisa Kumpas
30.05.2024