

Terēza Bezručko

APRITES EKONOMIKAS LĒMUMU PIENĒMŠANAS ALGORITMS

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Dabaszinātņu un tehnoloģiju fakultāte
Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

Terēza Bezručko

Doktora studiju programmas “Vides inženierija”

APRITES EKONOMIKAS LĒMUMU PIEŅEMŠANAS ALGORITMS

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskās vadītājas
profesore *Dr. habil. sc. ing.*
DAGNIJA BLUMBERGA

tenūrprofesore *Dr. sc. ing.*
ANDRA BLUMBERGA

RTU Izdevniecība
Rīga 2026

Bezručko, T. Aprites ekonomikas lēmumu pieņemšanas algoritms. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2026. – 39 lpp.

Publicēts saskaņā ar promocijas padomes RTU P-19” 2025. gada 3. decembra lēmumu, protokols Nr. 234.

Vāka attēls no www.shutterstock.com.

<https://doi.org/10.7250/9789934372667>
ISBN 978-9934-37-266-7 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2026. gada 12. martā Rīgas Tehniskās universitātes Dabaszinātņu un tehnoloģiju fakultātē, Āzenes ielā 12 k1, 607. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Asociētais profesors *Ph. D.* Maksims Feofilovs
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors *D. sc (tech).* *Timo Laukkanen*
Ålto Universitāte, Somija

Profesors *Dr. rer. oec.* *Wolfgang Irrek*
Rūras Rietumu lietišķo zinātņu universitāte, Vācija

APSTIPRINĀJUMS

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

Terēza Bezručko (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts kā publikāciju kopa latviešu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, 40 attēli, 21 tabulas, pielikumā ir astoņas publikācijas, kopā 259 lappuses.

SATURS

IEVADS	5
Darba aktualitāte	5
Darba mērķi un uzdevumi	5
Zinātniskā novitāte	6
Hipotēze	6
Praktiskā nozīme	6
Darba struktūra	7
Zinātniskā darba aprobācija	9
1. LITERATŪRAS APKOPOJUMS	10
1.1. Aprites bioekonomikas pamatprincipi	10
2. IZPĒTES METODES	11
2.1. Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metode (<i>MCDA</i>)	11
2.1.1. Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metode tekstila aprites potenciālam	11
2.1.2. Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metode jauktā tekstila atkritumu pārstrādei	12
2.1.3. Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metode CO ₂ uzglabāšanai mežizstrādes atlikumos	13
2.2. Aprites cikla novērtējums (ACN)	15
2.2.1. Šķērsām līmētas koksnes aprites cikla novērtējums	15
2.2.2. Aprites cikla novērtējums tekstila pārstrāde	16
2.3. Bibliometriskā analīze	16
2.3.1. Jaukta tekstila aprites potenciāla bibliometriskā analīze	16
2.3.2. Energoaudita prakšu bibliometriskā analīze	17
2.4. Sistēmdinamika	17
2.5. Izplūdušī kognitīvā karte (<i>FCM</i>)	20
3. REZULTĀTU APKOPOJUMS	23
3.1. Daudzkriteriju lēmumu pieņemšanas metode (<i>MCDA</i>)	23
3.1.1. Tekstilmateriālu aprites potenciāla analīzes piemērs	23
3.1.2. Jauktā tekstila atkritumu pārstrādes analīzes piemērs	24
3.1.3. CO ₂ uzglabāšanas mežizstrādes atlikumos analīzes piemērs	25
3.2. Aprites cikla novērtējums (ACN)	27
3.2.1. Pārstrādāti šķērsām līmēti kokmateriāli kā zemas ietekmes uz vidi neapstrādāta materiāla alternatīva: Latvijas gadījuma izpēte	27
3.2.2. Jaukto tekstilizstrādājumu pilnīgas dzīves cikla analīzes trūkums	29
3.3. Bibliometriskā analīze	30
3.3.1. Jaukto tekstilizstrādājumu bibliometriskās analīzes piemērs	30
3.3.2. Energo pārvaldības bibliometriskās analīzes piemērs	33
3.4. Sistēmdinamika	34
3.5. Izplūdušī kognitīvā karte (<i>FCM</i>)	37
SECINĀJUMI	39

IEVADS

Eiropas Savienība (ES) ir noteikusi skaidru kursu uz ilgtspējīgu attīstību, uzsverot nepieciešamību pāriet no lineārās ekonomikas uz aprites ekonomikas modeli. Tradicionālā pieeja “paņem–izmanto–izmet” mūsdienu resursu patēriņa un vides slodzes kontekstā vairs nav uzskatāma par dzīvotspējīgu risinājumu. Aprites ekonomika piedāvā alternatīvu, kuras centrā ir esošo materiālu un produktu dzīves cikla pagarināšana, atkārtoti tos izmantojot, remontējot, pārstrādājot un atgriežot tautsaimniecībā. Šāda pieeja ļauj būtiski samazināt atkritumu daudzumu un veicina resursu efektivitāti visā ekonomisko vērtību ķēdē.

Statistikas dati liecina, ka ES ik gadu rodas vairāk nekā 2,2 miljardi tonnu atkritumu, no kuriem ievērojama daļa joprojām tiek apglabāta poligonos. Vienlaikus rūpnieciskie procesi un produktu lietošana veido 9,1 %, savukārt atkritumu apsaimniekošana – 3,32 % no kopējām siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisijām ES līmenī. Jau produkta izstrādes stadijā tiek noteikts līdz pat 80 % no tā kopējās ietekmes uz vidi. Tas nozīmē, ka ilgtspējīgai ražošanai ir jābalstās stratēģiskajā plānošanā jau agrīnā posmā. Šo apsvērumu dēļ Eiropas Parlaments 2021. gada februārī pieņēma rezolūciju par jauno aprites ekonomikas rīcības plānu, nosakot ambiciozus mērķus oglekļneitralitātes sasniegšanai līdz 2050. gadam, kā arī saistošus kritērijus attiecībā uz materiālu izmantošanu līdz 2030. gadam.

Promocijas darba izstrādes gaitā veikta resursu (tekstila atlikumu, kokapstrādes atlikumu, pārtikas pārstrādes blakusproduktu, enerģijas atlikumu) analīze. Ir lietota daudzkritēriju analīze, aprites cikla novērtējums, bibliometriskā analīze, sistēmdinamika, izplūdušās kognitīvās kartes un CO₂ aprēķini, kā arī definēti un ņemti vērā izaicinājumi ceļā uz produktu ar augstāku pievienoto vērtību.

Darba aktualitāte

Eiropas Parlaments ir izstrādājis un noteicis par nepieciešamu pāreju no lineārā ekonomikas modeļa uz aprites ekonomikas modeli. Šī brīža aktualitāte ir maksimāli samazināt atkritumu apjomu, pagrināt produkta aprites ciklu, ideālā gadījumā – viena ražošanas procesa atkritumus padarīt par cita ražošanas procesa izejvielu vai resursu, tā atgriežot atpakaļ tautsaimniecībā. Rezolūcija par jauno aprites ekonomikas rīcības plānu paredz papildu pasākumus, lai līdz 2050. gadam panāktu oglekļneitrālu, ekoloģiski ilgtspējīgu, netoksisku aprites ekonomiku, tostarp stingrākus pārstrādes noteikumus un saistošus mērķus attiecībā uz materiālu izmantošanu un patēriņu līdz 2030. gadam, taču katrai dalībvalstij ir jārod savs visefektīvākais risinājums mērķu sasniegšanai dažādās tautsaimniecības jomās.

Darba mērķi un uzdevumi

Darba mērķis ir izpētīt, kādas metodes ir lietojamas un kā tās ir kombinējamās, lai ražošanas procesa atlikumus vai produktus, kas ir sava dzīves cikla noslēgumā, izmantotu kā resursus jauna, augstākas pievienotās vērtības produkta ražošanā. Jebkura resursu pārstrāde mazina ietekmi uz klimatu, nodrošina ceļu uz ilgtspējīgu attīstību un veicina produktu ar augstāku pievienoto vērtību attīstību.

Lai sasniegtu mērķi, tika definēti trīs uzdevumi:

- 1) atlasīt resursus, kas ir ražošanas atlikumi vai produkti sava dzīves cikla noslēgumā, fokusējoties uz potenciālajiem resursiem, kas ir pieejami lielā apjomā vai kas lielos apmēros tiek noglabāti poligonos;
- 2) izvēlēties atbilstošas analīzes metodes, definēt izaicinājumus ceļā uz produktu ar augstu pievienoto vērtību, radīt metožu kopumu vai kombināciju kā rīku sistēmu aprites ekonomikas attīstībai;
- 3) aprobēt metožu kopumu, izvērtējot dažādus ražošanas procesus, novērtēt iegūtos rezultātus un apkopot pamatotus secinājumus.

Zinātniskā novitāte

Promocijas darba visaptverošais unikālais jaunievedums ir dažādu zinātnisko metožu izmantošana vienkopus, to secīga kombinēšana, lai attīstītu un paātrinātu virzību uz aprites ekonomiku ceļā uz produktu ar augstāku pievienoto vērtību. Metožu kopums izmantots arī ieviešanas soļu dinamiskai precizēšanai, identificējot visnozīmīgākos aspektus un definējot problēmu potenciālos risinājumus. Darbā ir izstrādāti jauni un saderīgi lietoto zinātnisko metožu atlases kritēriji. Katrā ražošanas procesā identificētas stiprās un vājās puses resursu patēriņa, energoefektivitātes, atkritumu mazināšanas un emisiju apjoma kontekstā.

Darba izstrādes gaitā vairākkārt un dažādās kombinācijās lietotas dzīves cikla novērtējuma un daudzkritēriju analīzes metodes. Izmantota sistēmdinamikas modelēšana, izplūdušā kognitīvā karte un SEG (CO₂) emisiju aprēķini. Dažādos griezumos ļoti plaši analizēta zinātniskā literatūra.

Šāda dinamiskā daudzlīmeņu un daudzdimensiju analīze kā strukturāls skatījums vienkopus ir kategoriski nepieciešama aprites ekonomikas virzībai un uzskatāma par promocijas darba galveno zinātnisko novitāti.

Hipotēze

Aprites ekonomikai ceļā uz ilgtspējīgu attīstību viens no galvenajiem virzieniem ir produktu patēriņa samazinājums.

Praktiskā nozīme

Promocijas darbā paustās atziņas un secinājumi ir noderīgi Latvijai aprites ekonomikā, it īpaši tekstilatkritumu un koksnes izmantošanas jomā, politikas izstrādes un pilnveides procesā, ievērojot līdzšinējos atsevišķos centienus šajā sektorā Latvijā. Darba rezultāti ir svarīgi dažāda līmeņa institūcijām un tiem sabiedrības locekļiem, kuri iesaistās vai arī ir gatavi iesaistīties rūpniecības ražošanas blakusproduktu izmantošanā un jaunu uzņēmumu izveidē.

Tekstilatkritumu atkārtota izmantošana ir svarīga gan ministriju un valsts aģentūru ierēdņiem, gan pašvaldībām jaunu investoru piesaistei, gan arī jaunuzņēmumu investoriem.

Koksnes pilnvērtīgai izmantošanai piedāvātie risinājumi ir nozīmīgi meža un koksnes pārstrādes potenciālajiem investoriem.

Pārtikas ražošanas blakusproduktu plašais klāsts ir potenciālo investoru nākotnes izaicinājums. Promocijas darba zinātniskās izpētes piemērs šādā jomā varētu risināt un iedrošināt meklēt risinājumus šo blakusproduktu izmantošanai.

Enerģijas atlikumu izmantošana ir aktuāla visiem enerģijas lietotājiem.

Darba struktūra

Promocijas darba pamatā ir astoņu zinātnisko publikāciju kopa, tajās galvenā uzmanība ir pievērsta resursiem, kas ir cita ražošanas procesa atlikumi vai produkti, kas jau ir sava dzīves cikla noslēgumā, un to ceļu uz produktu ar augstāku pievienoto vērtību, izmantojot dažādas metodes, saskaroties ar problēmām un izaicinājumiem.

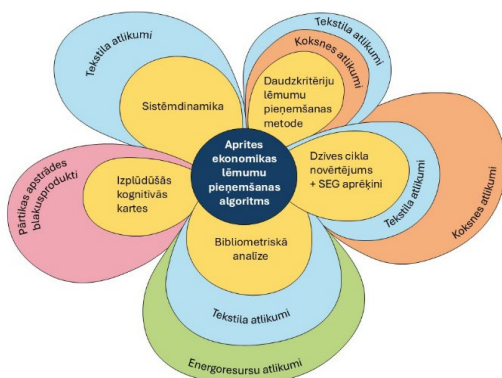
Promocijas darbā veikts literatūras apskats, kur izklāstītas diskusijas par potenciālajiem resursu veidiem, kas sākotnēji ir šķiroti vai nešķiroti atkritumi, vai cita ražošanas procesa blakusprodukti, kā arī aplūkota līdz šim gūtā pieredze mērķu sasniegšanas akadēmiskajā analīzē.

Darbā izmantotas sešas pētniecības metodes:

- 1) daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metode;
- 2) izplūdušās kognitīvās kartes;
- 3) sistēmdinamika;
- 4) dzīves cikla analīze;
- 5) SEG emisiju aprēķini;
- 6) bibliometriskā analīze.

Promocijas darbā novērtēti un atlasīti risinājumi produktiem ar augstu pievienoto vērtību, izvērtējot augstāko iespējamo potenciālu.

Promocijas darba struktūra konceptuāli veidota kā zieda modelis, kur auglenīca simbolizē aprites ekonomikas centrālo jēdzienu un teorētisko kodolu. Ziedlapiņas attēlo dažādus aprites ekonomikas aspektus un to savstarpējās sakarības, kas kopumā veido sistēmisku skatījumu uz pētāmo problēmu. Katras ziedlapiņas atšķirīgā krāsa un forma norāda konkrētā elementa unikālo pienesumu kopējā koncepcijā, savukārt visa zieda kopaina ilustrē aprites ekonomikas plašumu, integrētību un starpdisciplināro raksturu. Uzskatāma promocijas darba struktūra redzama 1. attēlā.

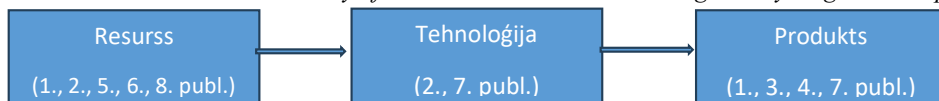


1. att. Promocijas darba struktūra.

Lai darbā iegūtie rezultāti būtu pēc iespējas plašāk izmantojami, izvērtējamie resursi tika izvēlēti iespējami dažādi un analizēti, kuri resursi rada vislielāko ietekmi uz vidi vai kuru apjoma pieauguma tendences ir ļoti ievērojamas. Darbā apskatīti šādi resursi:

- 1) tekstila atlikumi;
- 1) kokapstrādes atlikumi;
- 2) pārtikas ražošanas blakusprodukti;
- 3) energoresursu atlikumi.

Darba struktūras sasaiste ar publikāciju kopu parādīta 2. attēlā. Resursu izpēte atspoguļota šādās publikācijās: “*Analysis of Textile Circularity Potential*”, “*CO₂ Storage in Logging Residue Products with Analysis of Energy Production Scenarios*”, “*Unleashing Energy Potential: Insights of Energy Audit Practices*”, “*What Drives the Circular Economy? Textile Sorting or Consumption Reduction*”, “*Recycling of Mixed Post-Consumer Textiles: Opportunities for Sustainable Product Development*”. Tehnoloģiju izpēte atspoguļota šādās publikācijās: “*CO₂ Storage in Logging Residue Products with Analysis of Energy Production Scenarios*”, “*Bioeconomy Towards Green Deal. Case Study of Citric Acid production Through Fuzzy Cognitive Maps*”. Savukārt produkta izpēte atspoguļota šādās publikācijās: “*Analysis of Textile Circularity Potential*”, “*Recycled Cross-laminated Timber as a Low Environmental Impact Alternative to Virgin Material: Latvia Case Study*”, “*Uncertainty of Life Cycle Assessment Studies for Blended Textiles*”, “*Bioeconomy Towards Green Deal. Case Study of Citric Acid Production Through Fuzzy Cognitive Maps*”.



2. att. Darba struktūras sasaiste ar publikāciju kopu.

Tehnoloģiskās sistēmas risinājuma izvēles un ieviešana praksē, kā arī problēmu analīze, metodoloģijas lietojums un saistība ar promocijas darba analīzes līmeņiem apkopoti 1.tabulā. Publikācijās izmantotās metodes un iegūtie rezultāti veido promocijas darba pamatdaļu.

1. tabula

Promocijas darba metožu un publikāciju pārskats

Resurss	Metode	Publikācijas numurs	Publikācijas nosaukums
Tekstila atlikumi	Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metode	1.	<i>Analysis of Textile Circularity Potential</i>
Tekstila atlikumi	Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metode	8.	<i>Recycling of Mixed Post-Consumer Textiles: Opportunities for Sustainable Product Development</i>
Kokapstrādes atlikumi	Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metode un SEG (CO ₂) emisiju aprēķini	2.	<i>CO₂ Storage in Logging Residue Products with Analysis of Energy Production Scenarios</i>
Kokapstrādes atlikumi	Dzīves cikla novērtējums	3.	<i>Recycled Cross-laminated Timber as a Low Environmental Impact Alternative to Virgin Material: Latvia Case Study</i>

1. tabulas turpinājums

Tekstila atlikumi	Dzīves cikla novērtējums un bibliometriskā analīze	4.	<i>Uncertainty of Life Cycle Assessment Studies for Blended Textiles</i>
Energoresursu atlikumi	Bibliometriskā analīze	5.	<i>Unleashing Energy Potential: Insights of Energy Audit Practices</i>
Tekstila atlikumi	Sistēmdinamika	6.	<i>What Drives the Circular Economy? Textile Sorting or Consumption Reduction</i>
Pārtikas apstrādes atlikumi	Izplūdušās kognitīvās kartes	7.	<i>Bioeconomy Towards Green Deal. Case Study of Citric Acid Production Through Fuzzy Cognitive Maps</i>

Darba noslēgumā apspriesti pētījuma rezultāti, definēti secinājumi un izstrādātas rekomendācijas, lai ieviestu aprites ekonomikas modeli dažādās tautsaimniecības nozarēs.

Zinātniskā darba aprobācija

1. Analysis of Textile Circularity Potential. Valtere, M., Bezrucko, T., Blumberga, D. Environmental and Climate Technologies, 2023, 27 (1), pp. 220–232.
2. CO₂ Storage in Logging Residue Products with Analysis of Energy Production Scenarios. Viksne, G., Vamža, I., Terjanika, V., ... Pubule, J., Blumberga, D. Environmental and Climate Technologies, 2022, 26 (1), pp. 1158–1168.
3. Recycled cross-laminated timber as a low environmental impact alternative to virgin material: Latvia case study Vasuks, P., Vamza, I., Valtere, M., Bezrucko, T., Blumberga, D. Case Studies in Construction Materials, 2025, 22, e04094.
4. Uncertainty of Life Cycle Assessment Studies for Blended Textiles. Valtere, M., Bezrucko, T., Poberznik, M., Vamza, I., Blumberga, D. Environmental and Climate Technologies, 2024, 28 (1), pp. 794–811.
5. Unleashing Energy Potential: Insights of Energy Audit Practices. Liberova, V., Bremane, I., Lauka, D., ... Bezrucko, A.E., Blumberga, D. Energies, 2025, 18(3), 522.
6. What Drives the Circular Economy? Textile Sorting or Consumption Reduction Valtere, M., Bezrucko, T., Lauka, D., Blumberga, A., Blumberga, D. Circular Economy and Sustainability, 2025.
7. Bioeconomy towards green deal. Case study of citric acid production through fuzzy cognitive maps. Bezrucko, T., Lauka, D., Laktuka, K., ... Terjanika, V., Blumberga, D. Environmental and Climate Technologies, 2022, 26 (1), pp. 684–696.
8. Recycling of Mixed Post-Consumer Textiles: Opportunities for Sustainable Product Development. Valtere, M., Bezrucko, T., Liberova, V., Blumberga, D. Environmental and Climate Technologies 2025, vol. 29, no. 1, pp. 323–343.

1. LITERATŪRAS APKOPOJUMS

1.1. Aprites bioekonomikas pamatprincipi

Cilvēce turpina patērēt dabas resursus un pakalpojumus neilgtspējīgi, pārsniedzot ātrumu, ar kādu šie resursi var vairoties un/vai atjaunoties, tādējādi palielinot spiedienu uz klimatu, ekosistēmām, dzīvotnēm un bioloģisko daudzveidību. Zaļā kursa mērķis ir risināt klimata pārmaiņu problēmas, cenšoties pārvērst 27 valstu bloku par taisnīgu un plaukstošu sabiedrību ar modernu, resursefektīvu, konkurētspējīgu, zemu oglekļa dioksīda emisiju ekonomiku, aizsargāt un stiprināt ES dabas kapitālu un uzlabot dzīves kvalitāti pašreizējām un nākamajām paaudzēm. Kopējie mērķi, ko noteikusi ES, ir:

- sasniegt klimatneitralitāti līdz 2050. gadam;
- aizsargāt cilvēku dzīvību, dzīvniekus un augus, samazinot piesārņojumu;
- palīdzēt uzņēmumiem kļūt par pasaules līderiem tīru produktu un tehnoloģiju jomā;
- nodrošināt taisnīgu un iekļaujošu pielāgošanos.

ES izaugsmes stratēģija norāda nepieciešamību ātri mainīt pašreizējo situāciju, ieguldīt finanšu resursus pētniecībā, veicināt inovācijas, nodrošināt tīru enerģiju, stimulēt nozares pāreju uz tīru ekonomiku, rīkoties energoefektīvi un resursefektīvi, atrast risinājumus pārtikas drošībai un dabas resursu pārvaldībai, samazināt klimata pārmaiņas un atkarību no fosilajiem resursiem, palielināt Eiropas konkurētspēju, radīt jaunas darba vietas un veicināt bioekonomiku. Mūsdienās bioekonomika tiek uzskatīta ne tikai par bioresursu ekonomiku, bet arī par ilgtspējīgu bioresursu patēriņu, kas rada pievienoto vērtību sabiedrībai. Lai gan ES Direktīvā 2008/98/EK ir noteikts, ka ražošanas blakusprodukti netiek klasificēti kā atkritumi, uzņēmumos tos bieži uzskata par tādiem un nosūta uz atkritumu plūsmām vai zemas vērtības plūsmām, piemēram, biogāzes vai cietā kurināmā ražošanai. Bioekonomikas attīstība, balstoties inovāciju prasmēs un ieguldījumos zināšanās, ir neizbēgami nepieciešama, lai sasniegtu lielu daļu no definētajiem mērķiem. Bioekonomikas pamatā ir trīs ilgtspējīgas attīstības principi – ekonomika, sabiedrība un daba. Šiem trim fundamentālajiem principiem jāveido slēgts cikls, kurā procesa blakusprodukts (atkritumu produkts) ir cita procesa izejmateriāls. Šāda pieeja bioekonomikai palielina un uzlabo produktu pievienoto vērtību, aizstāj fosilos kurināmos enerģijas ražošanā un samazina SEG emisijas. Promocijas darba mērķis ir radīt un piedāvāt aprites ekonomikas iespējas, demonstrējot, analizējot un aprakstot iespējamus risinājumus ar dažādu piemēru palīdzību. Tas ir ilustratīvs un demonstratīvs pētījums par to, kā radīt iespējamus risinājumus, kas veicinātu Zaļā kursa mērķu sasniegšanu, attīstītu aprites ekonomikas virzienu un būtu piemēroti ieviešanai Latvijā.

2. IZPĒTES METODES

2.1. Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metode (MCDA)

Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metode (MCDA) ir izplatīta metode lēmumu pieņemšanas problēmu risināšanai. Tā ir piemērota jebkurai jomai, kurā var definēt problēmu, kritērijus un alternatīvas, kas jāsalīdzina. Promocijas darbā tā lietota gan tekstila aprites potenciāla izvērtējumam, gan jauktā tekstila atkritumu pārstrādes izvērtējumam un koksnes atlikumu izmantošanai jauna produkta ražošanai.

Promocijas darbā izmantotais TOPSIS analīzes modelis

Lai sāktu daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metodes aprēķinus, vispirms kritērijiem ir jāpiešķir svarīguma koeficienti, kas norāda katra kritērija nozīmīgumu. Kritēriju svarīgumu var noteikt ar dažādām metodēm, piemēram, analītiskās hierarhijas procesu vai jutīguma analīzi. Šajā gadījumā, ņemot vērā to, ka analizējamo kritēriju skaits pārsniedz septiņus, analītiskās hierarhijas metodi izmantot nav iespējams, jo iegūtie rezultāti būtu nekonsekventi. Tāpēc šajā pētījumā pieņemts, ka visiem kritērijiem ir vienāda nozīme, t. i., visiem tika piešķirts vienāds svarīguma koeficients.

Pēc ievaddatu un svarīguma koeficientu noteikšanas analīzei lietota TOPSIS metode. Jutīguma analīze tiek veikta, lai novērtētu kritēriju ietekmi uz galarezultātiem un apstiprinātu to ticamību.

2.1.1. Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metode tekstila aprites potenciālam

Kritēriju izvēle

MCDA analīze sākas ar kritēriju atlasī. Izvēlētie 15 kritēriji apkopoti 2.1. tabulā. Tehniskais aspekts tika iekļauts, lai analīze būtu daudzveidīgāka un vairāk saistīta ar aprites ekonomikas attīstību.

2.1. tabula

Daudzkritēriju lēmumu analīzes kritēriji

Kritēriju kategorija	Kritēriji	Ideālā vērtība
Vides aspekti	Ietekme uz vidi – produkta globālās sasilšanas potenciāls, $\text{kgCO}_2\text{eq kg}^{-1}$.	+
	Mazgāšanas reizes – lietošanas ietekme uz vidi, ko nosaka pēc tekstilizstrādājuma mazgāšanas reizēm vidēji.	+
	Paredzamais kalpošanas laiks – vidējais produkta kalpošanas laiks gados.	–
	Poligonā apglabāto atkritumi – poligonā apglabāto atkritumu attiecība pret kopējo atkritumu daudzumu, %.	+
	Pārstrādātie atkritumi – pārstrādāto atkritumu īpatsvars no kopējā atkritumu daudzuma, %.	–
	Auduma izcelsme – sintētisko materiālu attiecība, %.	+

2.1. tabulas turpinājums		
Ekonomiskie aspekti	Tirgus pieprasījums – pasaules tirgus apjoma novērtējums, miljardi EUR.	+
	Ražošanas apjoms – saražotā produkta apjoma attiecība, %.	+
	Starptautiskā tirdzniecība – eksportētās produkcijas apjoma attiecība, %.	+
	Darba ražīgums – bruto pievienotā vērtība uz vienu nodarbināto, tūkst. EUR.	+
	Pievienotā vērtība – pievienotās vērtības īpatsvars kopējā ražošanā, %.	+
Tehniskie aspekti	Ražošanas tehnoloģiju energoefektivitāte – enerģijas patēriņa attiecība produktu ražošanas posmā pret enerģijas patēriņu visā dzīves ciklā, %.	+
	Inovācijas kapacitāte – patentu skaits, kas iesniegti no 2015. līdz 2019. gadam, patenti.	+
Sociālie aspekti	Nodarbinātība – nozarē nodarbināto personu īpatsvars, %.	+
	Uzņēmumi – nozares uzņēmumu īpatsvars, %.	+

Ideālā vērtība attēlota kā “+” vai “–”. Ja ideālā vērtība ir maksimālā vērtība, tad kritēriji tiek attēloti ar plusa zīmi, savukārt, ja ideālā vērtība ir minimālā vērtība, tad ar mīnusa zīmi. Šajā gadījumā tekstilmateriālu aprites potenciāla analīzes publikācijas mērķis bija atrast, kurā grupā ir vislielākās iespējas aprites ekonomikas attīstībai, nevis kurā nozarē jau ir visaugstākā aprites efektivitāte.

2.1.2. Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metode jauktā tekstila atkritumu pārstrādei

Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metode ir pietiekami universāla un ar plašu lietojumu loku. Pētījumā [*Analysis of Textile Circularity Potential*] daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metode tika lietota modes tekstila aprites potenciāla izvērtēšanai, savukārt nākamajā pētījumā [*Recycling of Mixed Post-Consumer Textiles: Opportunities for Sustainable Product Development*] daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metode tika lietota ar citiem uzsvāriem, fokusējoties uz jaukta tekstila atkritumu pārstrādes procesu izvērtējumu. Tā ir piemērojama jebkurā jomā, kur iespējams formulēt problēmu, noteikt kritērijus un salīdzināmas alternatīvas. Pastāv vairākas *MCDA* metodes, taču katrai no tām ir savas aprēķinu darbības, tāpēc rezultāti var atšķirties pat tad, ja ievaddati ir identiski.

Šajā pētījumā tika izvēlēta metode “Tehnika izvēles secības noteikšanai pēc līdzības ar ideālu risinājumu” (angļu val. *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution – TOPSIS*), pamatojoties uz autores iepriekšējo pētījumu, kurā tika veikta produktu salīdzināšana, kas ir arī šī pētījuma mērķis. *TOPSIS* metode piedāvā salīdzinoši vienkāršus aprēķinu soļus, ļauj izmantot neierobežotu kritēriju un alternatīvu skaitu, un ievaddati var būt gan kvalitatīvi, gan kvantitatīvi. Rezultātā iegūtais vērtējums atspoguļo attālumu no alternatīvas līdz ideālajam punktam, kas šajā metodē ir vienāds ar 1. Jo tuvāk vērtējums ir skaitlim 1, jo piemērotāka ir alternatīva. *TOPSIS* aprēķini tika veikti, izmantojot *MS Excel* programmatūru.

MCDA analīze tika veikta, sekojot autores iepriekšējā pētījumā izstrādātajiem soļiem.

Produkta identificēšana

Literatūras analīzes mērķis bija identificēt produktus, ko iespējams iegūt no jauktiem tekstilmateriāliem pēc lietošanas.

Lai izvēlētos rakstus pēc diviem kritērijiem (izmantoti tekstilizstrādājumi pēc lietošanas, un tie ir jaukti tekstilmateriāli), bija nepieciešama papildu kvalitatīvā analīze. Visi produkti tika izvērtēti atbilstoši šiem diviem kritērijiem. Mērķis bija identificēt produktus, kas atbilst abiem nosacījumiem.

Izvēlētie deviņi kritēriji apkopoti 2.2. tabulā. Visos gadījumos ideālā vērtība ir maksimālā, proti, jo augstāka vērtība, jo labāka alternatīva.

2.2. tabula

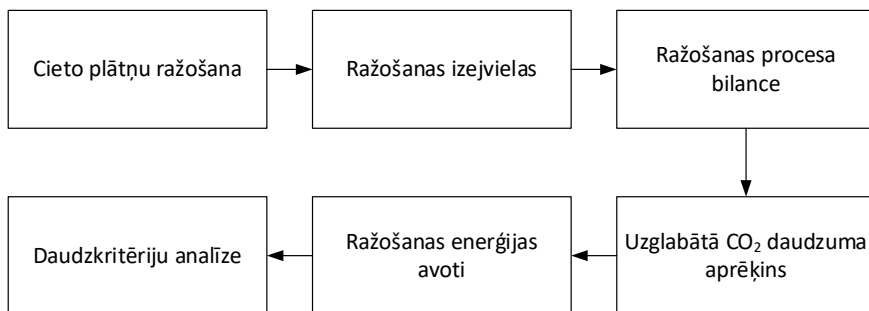
Daudzkritēriju lēmumu analīzes kritēriji

Kritēriju kategorija	Kritērijs	Apraksts
Vides aspekti	Vides ietekme	Globālās sasilšanas potenciāla salīdzinājums jaunajam un traicionālajam produktam (reizes)
	Resursu efektivitāte	Citu atkritummateriālu izmantošana ražošanā (svara īpatsvars, %)
	Ilgmūžība un pārstrāde	Produkta kalpošanas ilgums un tā pārstrādes potenciāls (punktu vērtējums)
Ekonomiskie aspekti	Produkta cena	Jaunā un tradicionālā produkta cenas salīdzinājums (reizes)
	Tirgus pieprasījums	Globālā tirgus apjoma novērtējums (miljardi EUR)
Tehniskie aspekti	Tehnoloģiju gatavības līmenis	Tehnoloģiskās gatavības līmenis (<i>TRL</i> 1–9)
	Izpētes līmenis	Pētījumu skaits par līdzīgiem produktiem (punktu vērtējums)
	Tirgus konkurētspēja	Jaunā un tradicionālā produkta īpašību salīdzinājums (punktu vērtējums)
Sociālie aspekti	Sociālie aspekti	Drošības un veselības risku novērtējums ražošanas laikā un darba rakstura specifika (punktu vērtējums)

Novērtēšana veikta deviņu punktu skalā. Lai nodrošinātu padziļinātu izpratni un vērtējumu, izmantots J. Mankinsa *TRL* apraksts.

2.1.3. Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metode CO₂ uzglabāšanai mežizstrādes atlikumos

Pētījumam izvēlēta cieto koka plātņu izolācijas materiāla ražošana. Ražošanas metodoloģija ietver tādos posmus kā ražošanas procesa apraksts un nepieciešamās izejvielas, kas ļauj aprēķināt CO₂ daudzumu, ko var uzkrāt galaproduktā. Enerģijas avoti cieto plātņu ražošanā, izmantojot daudzkritēriju analīzes metodi, arī tika salīdzināti trīs dažādos scenārijos. Visi metodoloģijas posmi redzami 2.1. attēlā.



2.1. att. Metodoloģijas algoritms.

Cieto plātņi ražo līdzīgi kā citas kokšķiedras plātnes, piemēram, *MDF* un *LDF*. Pēc žāvēšanas materiāls tiek formēts, presēts un profilēts.

Galvenā cieto plātņu ražošanas izejviela ir mežizstrādes atlikumi. Pieņemts, ka no mežizstrādes atlikumu izejvielām iegūtās koksnes šķeldas kvalitāte būs pietiekama, lai ražotu kokšķiedru plātnes.

Grupēti visi pārējie procesi, kam nepieciešama elektroenerģija, piemēram, šķeldošana, zāģēšana un profilēšana.

2.3. tabula

Enerģijas patēriņš ražošanai		
Ražošanas process	Elektroenerģija, MWh/m ³	Siltumenerģija, MWh/m ³
Žāvēšana	0,03	0,16
Ražošanas procesa balance	0,08	0,08
Spiežot	0,01	0,02
Šķeldošana, zāģēšana, profilēšana	0,01	—
Kopā	0,13	0,26

Lai aprēķinātu materiālā uzkrātā CO₂ iespējamo daudzumu, pārskatīti un izmantoti astoņi dažādi standarti biogēnā oglekļa uzskaitē produktos un dažādi tehniskie standarti aprites cikla analīzei (ACA) ar citām oglekļa uzskaites metodēm un pieejām. Tomēr šajā gadījumā izmantoti tikai tie standarti, kas attiecas uz meža būvmateriāliem un biogēno oglekli. Analīzei izvēlētie kritēriji apkopoti 2.4. tabulā.

2.4. tabula

Izvēlētie daudzkritēriju analīzes kritēriji		
Tehnoloģiskie kritēriji	Ekonomiskie kritēriji	Vides kritēriji
Kurināmā enerģētiskais saturs, GJ/m ³	Kapitālizmaksas, EUR/m ³	NO _x emisijas, g/m ³
	Degvielas izmaksas, EUR/m ³	CO emisijas, g/m ³
	O&M izmaksas, EUR/m ³	GOS emisijas, g/m ³
	Pirktā/pārdotā elektroenerģija, EUR/m ³	PM emisijas, g/m ³
		CO ₂ emisijas, kg/m ³

Lai veiktu daudzkritēriju analīzi, ir jānosaka kritēriju svarīgums. Tie noteikti, izmantojot analītiskā hierarhijas procesa (AHP) metodi. Vispirms kritēriji sarindoti pēc svarīguma, piešķirot prioritāti ekonomiskajiem un tehnoloģiskajiem kritērijiem, un pēc tam sarindoti vides kritēriji pēc to globālās sasilšanas potenciāla. Pēc tam noteikti katra kritērija svarīgums atkarībā no to ranga, tādējādi tos savstarpēji salīdzinot.

2.2. Aprites cikla novērtējums (ACN)

Tāpat kā daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metode tika apskatīta no tekstilrūpniecības un kokapstrādes sektoru puses, arī aprites cikla analīzi var lietot, pētot tekstilrūpniecības un kokapstrādes sektorus

Jāatsaucas uz aprites cikla analīzes tekstilrūpniecības avotu, jo arī pētījumā “*Uncertainty of Life Cycle Assessment Studies for Blended Textiles*” izmantota bibliometriskā analīze. Izpētot ACN pētījumus par CO/PES maisījumiem, identificēta zināšanu plaša. Ir veikti vairāki pētījumi par šī materiāla ietekmi uz vidi, taču tie neaptver detalizētu dzīves cikla inventarizāciju ACI. Veronika Vāgnere arī ir identificējusi šo zināšanu plaisu. Lai izstrādātu pilnīgu ACN CO/PES maisījumiem, ir nepieciešams literatūras pārskats. Šī pētījuma mērķis ir pārskatīt literatūru par kokvilnas un poliestera maisījumu ražošanas vides novērtējuma pētījumiem un identificēt, kādi pieņēmumi līdz šim ir veikti un kā šie pieņēmumi varētu ietekmēt novērtējumu. Ir zināms, ka tekstilizstrādājumu ražošana un patēriņš veicina vides degradāciju un SEG emisijas, taču šīs ietekmes faktiskie apmēri joprojām nav skaidri un tiek apspriesti. Tādējādi solis tuvāk pilnīgai dzīves cikla inventarizācijai var palīdzēt precīzāk novērtēt tekstilizstrādājumu ietekmi uz vidi, uzlabojot zināšanas par to ilgtspējību.

ACN ir vispāratzīts instruments, ko izmanto, lai novērtētu visu aprites cikla darbību ietekmi uz vidi. To izmanto, lai kvantitatīvi noteiktu produkta vai procesa ietekmi uz vidi. Starptautiskā standartizācijas organizācija (ISO 14040) nosaka, ka ACN jāievēro sistēma, kas ietver četrus savstarpēji saistītus posmus – mērķis un darbības joma, aprites cikla inventarizācija (ACI), aprites cikla ietekmes novērtējums (ACIN) un interpretācija.

Analīze sākas ar pētījuma mērķa, funkcionālās vienības (FV), sistēmas robežu, pieņēmumu un ierobežojumu, iedalījuma un izvēlētas ACIN metodes definēšanu sadaļā “Mērķis un darbības joma”. Pēc tam tiek izstrādāta ACI, kurā iekļautas ūdens, enerģijas un materiālu ieejas plūsmas un izejas, tostarp atkritumu plūsmas un izplūdes gaisā, ūdenī un zemē. ACIN daļā tiek izvēlētas ietekmes kategorijas, kategoriju rādītāji un raksturošanas modeļi. Līdztekus visiem procesiem interpretācijas procesā tiek novērtēts analīzes pilnīgums, jutīgums un konsekvence, kā arī noteikti secinājumi, ierobežojumi un ieteikumi.

2.2.1. Šķērsām līmētas koksnes aprites cikla novērtējums

Mērķis un darbības joma

Kā piemērs ACN veikšanai ir izvēlēts pētījums par šķērsām līmētas koksnes (CLT) atgrieztumu pārstrādes ietekmi uz aprites ciklu. Šeit ACN mērķis ir noteikt plātnes, kas izgatavotas no šķērsām līmētas koksnes atgrieztumiem, kas iegūti to pārstrādes procesā, ietekmi uz vidi un salīdzināt to ar

tradicionāli ražotu šķērsām līmētas koksnes plātnes ietekmi uz vidi. Šajā pētījumā funkcionālā vienība tika definēta kā 1 m³ šķērsām līmētas koksnes plātne.

ACN veikts saskaņā ar *ISO 14040/14044* standartu. Analīzei izmantota *SimaPro* programmatūra. Ievaddatu kopas tika ņemtas no datubāzes *Ecoinvent 3.8*. Tika izvēlēta *ReCiPe Midpoint (H)* ACIN metode. Pētījumā netika veikts ražošanas procesu sadalījums. Veikts ACN “no vārtiem līdz vārtiem”. Ārpus ražošanas procesa tehniskajām robežām bija resursu ieguve, resursu transportēšana, enerģijas ieguve, iepakojuma materiālu ražošana un iekārtu ražošana.

2.2.2. Aprites cikla novērtējums tekstila pārstrāde

ACN datu avoti ir gan datus kopas, kas ietver uzņēmuma novērojumus, kā tas tika iepriekš apskatīts pētījumā par šķērsām līmētas koksnes aprites cikla novērtējumu, gan datu kopas, kas iegūtas literatūras analīzē, piemēram, apskatot ierobežojumus un pieņēmumus, kas ir izmantoti kokvilnas un poliestera maisījumu vides novērtējumā.

Šajā gadījumā literatūras analīzei izmantota ACN metode. Analīzes mērķis bija novērtēt iespējamo ietekmi uz *CO/PES* (kokvilnas un poliestera) jaukto tekstilizstrādājumu vides novērtējumiem, kas radušies pieejamo datu un literatūrā definēto pieņēmumu atšķirību dēļ. Visdetalizētākais ACN izmantots kā bāzes scenārijs, bet pārējie scenāriji tika izveidoti, mainot datus, kas pārklājas. Rezultāti nesniegs kvantitatīvus datus. Tā vietā secinājumi tiks izmantoti, lai pārbaudītu ACN rezultātu atšķirības, jo scenāriji balstīti bāzes scenārija ievaddatos. Tas nozīmē, ka tika mainīti tikai tie parametri, kas pārklājās, bet pārējie palika nemainīgi. Ir svarīgi atzīmēt, ka katram pētījumam, kurā ir balstīti scenāriji, ir dažādi ievaddati un procesi ar dažādām tehnoloģijām. Izmantots ACN “no šūpuļa līdz kapam”, un tas aptver šādus procesus: šķiedru ekstrakcija; dzijas ražošana; aušanas sagatavošana (izmēru noteikšana); aušana; pirmapstrāde; nepārtraukta krāsošana; auduma apdare. Detalizētāks procesu apraksts sniegts Veronikas Vāgneras u. c. pētījumā. ACN veikts saskaņā ar *ISO 14040/14044* standartu. Analīzei izmantota programmatūra *SimaPro*. Šajā pētījumā funkcionālā vienība tika definēta kā 1 kg kokvilnas un poliestera sajaukta tekstilizstrādājuma. Ievaddatu kopas tika ņemtas no *Ecoinvent 3.8* datubāzes. *ReCiPe Midpoint (H)* V1.08 dzīves cikla ietekmes novērtējuma metode tika izvēlēta, jo tā izmantota arī ACN pētījumā par līdzīgiem tekstilizstrādājumiem.

2.3. Bibliometriskā analīze

2.3.1. Jaukta tekstila aprites potenciāla bibliometriskā analīze

2.2.2. apakšnodaļā apskatīts datu ACN analīzes aspekts, novērtējot ierobežojumus un pieņēmumus, kas izmantoti kokvilnas un poliestera maisījumu vides novērtējumos. Šie dati iegūti ar bibliometriskā analīzes palīdzību.

Literatūras analīze sākas ar bibliometrisko analīzi, lai gūtu priekšstatu par pētāmo jomu un noteiktu galvenos atslēgvārdus turpmākai izmantošanai. Bibliometriskā analīze ir kvantitatīvā metode, ko izmanto, lai novērtētu pašreizējo stāvokli pētniecības jomā, aplūkojot savstarpējās attiecības starp zinātniskajām publikācijām šajā jomā. Analīzes pamatā ir liels skaits zinātnisku publikāciju, kas tiek analizētas, lietojot programmatūru, kas izmanto statistikas un tīkla rīkus. Šajā pētījumā izmantota programmatūra *VOSviewer*. Mērķis bija gūt ieskatu pētījumos par jauktu

tekstilizstrādājumu, īpaši *CO/PES* maisījumu, ietekmi uz vidi. Bibliometriskajai analīzei ieteicamas *Scopus* vai *Web of Science* datubāzes. Šajā pētījumā izmantota *Web of Science* datubāze, jo atbilstoši noteiktajiem atslēgvārdiem tika atrasts 381 rezultāts, savukārt *Scopus* datubāzē tika atrasti 211 rezultāti.

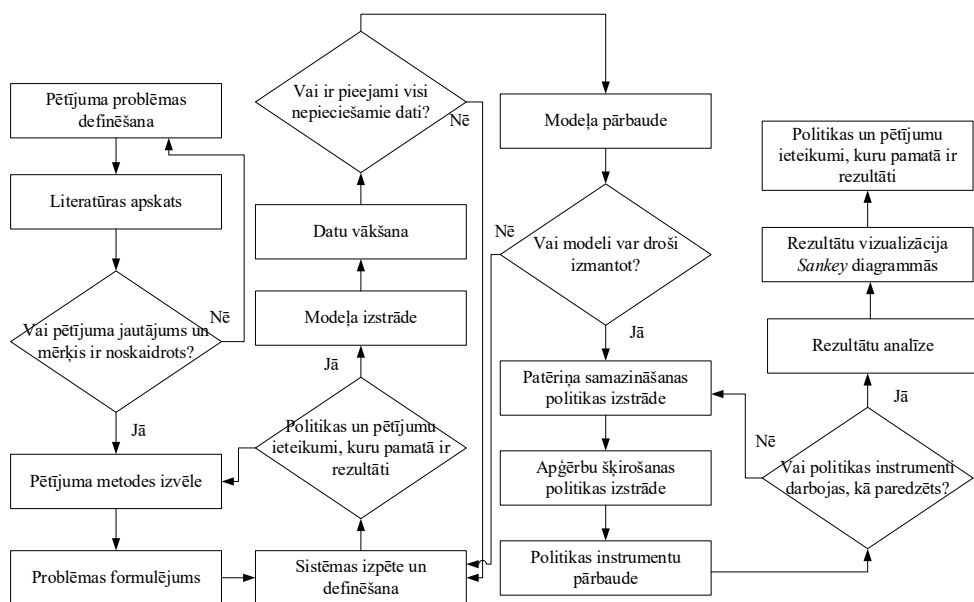
2.3.2. Energoaudita prakšu bibliometriskā analīze

Bibliometriskās analīzes metode lietota arī pētījumā par energoauditiem. Pētījumam par energoaudita praksi atbilstošās literatūras identificēšana ietvēra rezultātu analīzi par dokumentiem un žurnālu rakstiem, kas publicēti laikā no 2009. līdz 2024. gadam. Bibliometriskā analīze veikta pētījumiem, kas publicēti uzticamos zinātnisko publikāciju kopsavilkumos, kas atrodami citēšanas datubāzēs *Scopus* un *MDPI*. Šīs datubāzes ietver plašu tēmu klāstu, sniedz publikāciju metriku un ir brīvi pieejamas, kas atvieglo to izmantošanu. Meklēšana koncentrējās uz energoaudita praksi, energoefektivitātes pasākumiem un saistītajiem tiesību aktiem ES dalībvalstīs.

2.4. Sistēmdinamika

Pamatojoties uz literatūras pārskatu, tika definēti trīs pētījuma jautājumi: (a) kāds apgērbu daudzums tuvākajā nākotnē nonāks poligonos; (b) vai ES šķirošanas kapacitātes palielināšana būs pietiekama, lai sasniegtu aprites ekonomikas mērķus; (c) kas veicina aprites ekonomiku – tekstilizstrādājumu šķirošana vai patēriņa samazināšana. Šī pētījuma mērķis ir analizēt aprites ekonomikas potenciālu modes tekstilizstrādājumu vērtību ķēdē ES līmenī, izmantojot sistēmdinamikas modelēšanu. Tekstilizstrādājumu daudzums, kas nonāk poligonos bāzes scenārijā, tiks izmantots, lai novērtētu aprites ekonomikas potenciālu, jo tas atspoguļo zaudēto vērtību, ko varētu atgūt, ieviešot aprites prakses visā vērtību ķēdē. Rezultāti parādīs ES progresu ceļā uz aprites ekonomiku un ilgtspējību, kā arī to, vai ES politikas mērķi tekstilizstrādājumiem var tikt sasniegti līdz 2030. gadam. Tas arī atbildēs uz jautājumu, kas virza aprites ekonomiku tekstila sistēmā.

Sistēmdinamika ir pētniecības metode, kas pēta sarežģītu sistēmu uzvedību un to radītos izaicinājumus. Mērķis ir analizēt sistēmu struktūru, lai iegūtu dziļāku izpratni par to uzvedību un tās cēloņiem. Šo metodi parasti izmanto akadēmiskajā vidē, lielie uzņēmumi, konsultāciju uzņēmumi un valdības, lai uzlabotu stratēģijas formulēšanu, politikas izstrādi un lēmumu pieņemšanu sarežģītās un dinamiskās jomās. Tai ir matemātiskās modelēšanas pieeja. Sistēmdinamikas modelēšana ir plaši izmantota, lai pētītu vērtību/piegādes ķēdes un aprites ekonomikas ceļus, piemēram, reverso loģistiku, slēgtā cikla piegādes ķēdi, otrreizējās pārstrādes sistēmu, materiālu plūsmas, aprites ekonomiku vairākos mērogos. Sistēmdinamikas modelēšanas pieeja šim pētījumam tika izvēlēta, lai izpētītu modes tekstilizstrādājumu vērtību ķēdi, jo tā ir piemērota sistēmas struktūras, uzvedības, elementu mijiedarbības apskatei un iespējams izveidot slēgtā cikla sistēmas. Modeļi var simulēt laika gaitā, lai sniegtu priekšstatu par nākotnes situāciju. Turklāt, izmantojot politikas instrumentus, var izstrādāt un pārbaudīt vērtību ķēdes problēmu risinājumus. 2.2. attēlā redzami visa pētījuma soļi un to secība.

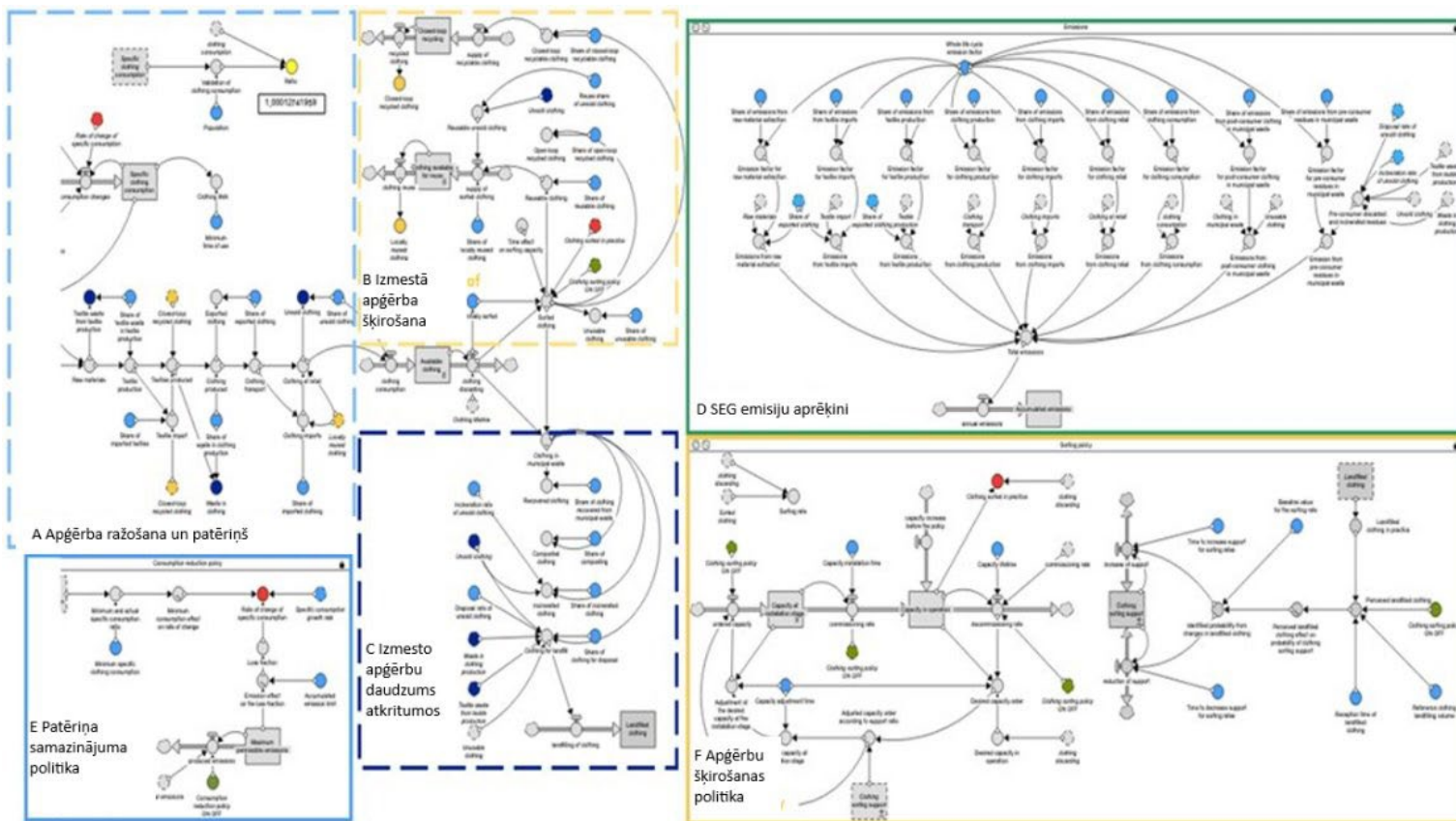


2.2. att. Pētījuma metodoloģijas algoritms.

Sistēmdinamikas modelēšana

Pētījuma piemērā [*What Drives the Circular Economy? Textile Sorting or Consumption Reduction*] tika izvēlēta sistēmdinamikas modelēšana. Tam izmantots *Stella Architect*. Šī programmatūra ļauj izveidot sistēmas struktūru un modelēt sistēmu laika gaitā. Modeļa galvenie elementi ir krājumi, plūsmas un parametri, kas ir savstarpēji saistīti. Saites un mijiedarbība starp komponentiem veido atgriezeniskās saites. Ir divas atgriezeniskās saites – pozitīvas virzības un negatīvas balansēšanas saites.

Sistēmdinamikas modeļa izstrāde ietver piecus galvenos soļus. Tie ir: problēmu formulēšana; dinamikas hipotēžu izvirzīšana; modeļa formulēšana un simulācija; modeļu pārbaude; politikas izstrāde; novērtēšana. Pilns modelis redzams 2.3. attēlā.



2.3. att. Apģērba vērtību ķēdes sistēmdinamikas modeļa struktūra.

2.5. Izplūdušī kognitīvā karte (*FCM*)

Kvalitatīvo sistēmu analīze jeb kvalitatīvā modelēšana arvien vairāk tiek izmantota, lai analizētu sarežģītu sistēmdinamiku. B. Kosko ieviesa izplūdušās kognitīvās kartes (*FCM*) kā rīku dinamiskai kvalitatīvo sistēmu uzvedības uztverei un skaidrošanai. *FCM* arvien vairāk tiek izmantota, lai modelētu un analizētu kvalitatīvo sistēmu uzvedību. Pēdējo 30 gadu laikā šī pieeja ir kļuvusi arvien populārāka, pateicoties vienkāršajam dizainam un zemajām skaitļošanas prasībām. Lai modelētu sociālo sistēmdinamiku, galvenokārt tiek izmantotas divas pieejas – deduktīvā un induktīvā. Deduktīvajā pieejā tiek izmantotas zināšanas, kas iegūtas, intervējot attiecīgās jomas ekspertus, savukārt induktīvā pieeja ir automatizēta un daļēji automatizēta pieeja, kas paredzēta *FCM* noteikumu izpētei, pamatojoties uz vēsturiskajiem datiem.

Kopumā *FCM* ir vairākas priekšrocības, salīdzinot ar tradicionālajām kvantitatīvās modelēšanas pieejām. *FCM* priekšrocības ietver, piemēram, spēju modelēt datus ierobežotās vidēs, izmantojot dabisko valodu, izteikt zināšanas, uztveri, pieredzi vai uzskatus, kā tos formulējis eksperts vai ieinteresētā persona, bieži ar neskaidru informāciju. Turklāt *FCM* rezultātus ir viegli interpretēt gan speciālistiem, gan sabiedrībai.

Metodes lietošana bioproduktu novērtēšanai

FCM modelēšanas metode pētījumā izmantota, lai salīdzinātu dažādas ražošanas procesu metodes. Tā palīdzēs saprast, kura no metodēm vislabāk atbilst ilgtspējības kritērijiem, identificēt potenciālos šķēršļus, lai iegūtu uzticamus un objektīvus rezultātus, un noskaidrot, vai šāda veida integrētās analīzes izmantošana ir piemērota, lai salīdzinātu dažādas pētījumā aplūkotās ražošanas procesu alternatīvas. *FCM* modelēšana ir secīgs darbību kopums, kas nodrošinās to, ka pētījuma mērķis tiek sasniegts caurspīdīgā un saprotamā veidā, lai analizētu 16 ražošanas procesus.

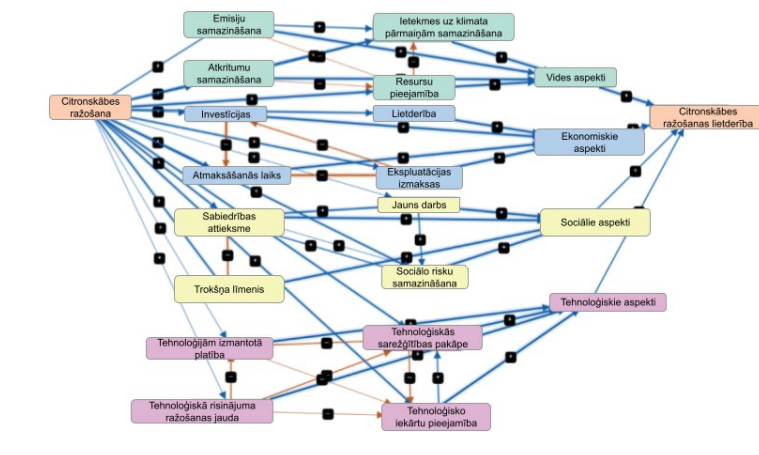
Lai salīdzinātu visus aprakstītos ražošanas procesus, ir jādefinē vissvarīgākie kritēriji. Šajā procesā tiek izmantoti vairāki kritēriji, padarot izvēles efektīvākas, racionālākas un skaidrākas. Analīzes mērķis ir strukturēt procesus, lai definētu mērķus, novērtētu iespējamās alternatīvas un salīdzinātu tās no dažādām perspektīvām. Izvērtējot prioritāros kritērijus, tika izvēlēti šādi kritēriji: vides aspekti; tehnoloģiskie aspekti; ekonomiskie aspekti; sociālie aspekti.

Visi izvēlētie kritēriji un apakškritēriji ir kvalitatīvi, tāpēc tiem jāpiešķir skaitliskās vērtības, pamatojoties uz pētījumā veikto ražošanas procesu analīzi. Kvalitatīvā raksturojuma pieeja, atšķirībā no kvantitatīvo rezultātu pieejas, padara metodoloģijas apstiprināšanas daļā iegūtos rezultātus subjektīvākus. Tomēr, ja būtu pieejami precīzi kvantitatīvie dati par procesiem, skatījums uz lietderības veikspēju būtu ierobežots.

Katrs apakškritērijs tiks novērtēts ar vērtību no –1 līdz 1, kur 1 liecina par stiprāko saiti un norāda labāko, stiprāko iespējamo saiti no bioekonomikas un lietderības skatupunkta. Apakškritērijā iegūtā vērtējuma saite ir salīdzināma ar augstāko ieviešanas efektivitāti. Savukārt zemākais vērtējums –1 liecina par vājāko saiti vai rezultātu no bioekonomikas un lietderības skatupunkta.

Metodoloģijas aprobācija citronskābes ražošanas procesam

Visi 16 ražošanas procesi ir analizēti un modelēti pētījumā [*Bioeconomy Towards Green Deal. Case Study of Citric Acid Production through Fuzzy Cognitive Maps*], viens no ražošanas procesiem tiks detalizēti parādīts šajā pētījumā, bet pārējo 15 ražošanas procesu rezultāti tiks novērtēti arī rezultātu un diskusiju sadaļā, jo struktūra un pieeja ir analogiska visiem ražošanas procesu modeļiem.



2.4. att. Uzlabots citronskābes ražošanas procesu vizualizācijas modelis.

Katram ražošanas procesam izveidotas saites katram no apakškritērijiem, norādot saites stiprumu diapazonā no -1 līdz 1 , pamatojoties uz ekspertu vērtējumu. Piemēram, citronskābes ražošanas atmaksāšanās laiks ir salīdzinoši īss, tāpēc šai saitei ir pozitīva vērtība $0,7$. Tehnoloģijai nepieciešamā platība ir aptuveni 1 ha, kas tiek novērtēta ar $0,1$ pozitīvu vērtību.

Pabeidzot modeļa vizualizācijas daļu, katrai modeļa pozīcijai var iegūt kvantitatīvu rezultātu. Iegūtās vērtības apkopotas 2.5. tabulā.

2.5. tabula

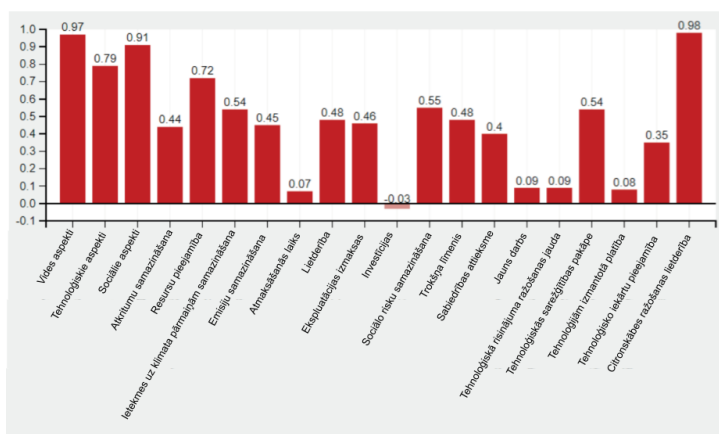
Citronskābes ražošanas procesa kvantitatīvās vērtības

Komponents	Iekšējais leņķis	Ārējais leņķis	Centralitāte
Citronskābe	0	6,949	6,949
Vides aspekti	4	1	5
Tehnoloģiskie aspekti	4	0,48	4,48
Sociālie aspekti	4	0,2	4,2
Ekonomiskie aspekti	4	0,81	4,810
Atkritumi samazināšana	0,47	1400	1,87
Resursu pieejamība	1,23	1,19	2,42
Ietekmes uz klimata pārmaiņām samazināšana	1,21	1	2,21

2.5. tabulas turpinājums

Emisiju samazināšana	0,48	1,339	1,819
Atmaksāšanās laiks	2,5	1	3,5
Lietderība	0,52	1	3,5
Ekspluatācijas izmaksas	0,5	2,31	2,81
Investīcijas	0,42	2	2,42
Sociālo risku samazināšana	1,02	1,25	2,27
Trokšņa līmenis	0,52	1,58	2,1
Sabiedrības attieksme	2,08	1,16	3,24
Jaunu darba vietu daudzums	0,09	2,09	2,179
Tehnoloģiskā risinājuma ražošanas jauda	0,09	1,680	1,770
Tehnoloģiskās sarežģītības pakāpe	1,44	1,28	2,7199
Tehnoloģijām izmantotā platība	0,42	1,28	1,7
Tehnoloģisko iekārtu pieejamība	0,960	1,44	2,4
Citronskābes ražošanas lietderība	2,49	0	2,49

Kad katram apakškritērijam ir iegūtas kvantitatīvās vērtības, *Mental Modeler* rīkam ir iespēja pāriet uz rezultātu sadaļu. Galvenais mērķis ir iegūt efektīvus ražošanas procesa rezultātus, kas būs diapazonā no 0 līdz 1.



2.5. att. Citronskābes ražošanas procesa rezultāti.

2.5. attēlā redzams galvenais secinājums par citronskābes ražošanas procesu, proti, citronskābes ražošanas efektivitāte ir 0,97. Visi darbā aprakstītie ražošanas procesi tiks salīdzināti ar šo galapunktu. Kā redzams 2.5. attēla grafikā, citronskābes ražošanas process vislielāko ieguldījumu sniedz vides un sociālajos aspektos, bet vajākās vietas šādas rūpnīcas izveidē būtu saistītas ar investīcijām un atmaksāšanos. Ņemot vērā to, ka pētījums ir vērsts uz ilgtspējību, lai sasniegtu ES Zaļā kursa mērķus, citronskābes ražošanas procesa lietderība ir ļoti

augsta – 0,97. Ja modelēšanas fokuss būtu tikai uz ekonomiskajiem aspektiem, šī ražošanas procesa rezultāts būtu mazāk pozitīvs. Tāpēc tika meklēts veids, kā modelēt arī prioritāšu izmaiņas.

3. REZULTĀTU APKOPOJUMS

3.1. Daudzkriteriju lēmumu pieņemšanas metode (MCDA)

3.1.1. Tekstilmateriālu aprites potenciāla analīzes piemērs

Ievaddati

Visi no literatūras apskata iegūtie ievaddati apkopoti 3.1. tabulā.

3.1. tabula

TOPSIS analīzes ievaddati

Kritēriji	Alternatīvas		
	Modes tekstils	Mājas tekstils	Tehniskais tekstils
Ietekme uz vidi, kg CO ₂ ekv kg ⁻¹	30,42	5,06	81,45
Mazgāšana, laiki	30	68	63
Paredzamais kalpošanas laiks, gadi	3,13	4,06	6,13
Poligonos apglabātie atkritumi, %	70	68	78
Pārstrādātie atkritumi, %	13	16	5
Auduma izcelsme, %	60	70	80
Tirgus pieprasījums, miljardi EUR	511,39	103,31	177,53
Ražošanas apjoms, %	41	14	17
Starptautiskā tirdzniecība, %	59	2	14
Darba ražīgums, tūkstoši EUR	22	29	47
Pievienotā vērtība, %	1,01	0,28	0,37
Ražošanas tehnoloģiju energoefektivitāte, %	54	70	59
Inovācijas spēja, patenti	5001	127	3440
Nodarbinātība, %	72	16	12
Uzņēmumi, %	75	16	9

Ietekme uz vidi

Galvenais informācijas avots par modes tekstilizstrādājumiem bija *Gonçalves A.* un *Silva C.* pārskata pētījums. Viņi apkopoja dažādu apģērbu ietekmi uz vidi. Analīzei tika izvēlēta jaka, T kreklis un četru veidu džemperī. Tika ņemts vērā tikai lietošanas posms un aprites cikla beigas. Jakas svars ir 0,9 kg, un tās globālās sasilšanas potenciāls (GSP) ir 25,3 kg CO₂ ekv. uz

funkcionālo vienību. Tādējādi 1 kg jaku GSP ir 28,1 kg CO₂ ekv. T kreklu kategorijai GSP ir 5,3 kg CO₂ eq kg⁻¹ T kreklu. Tika izmantoti dati par četrus veidus džemperiem – vilnas, kokvilnas, maisījuma un akrila. Vidējais GSP ir 57,9 kg CO₂ ekv kg⁻¹ džemperu.

3.1.2. Jauktā tekstila atkritumu pārstrādes analīzes piemērs

Produktu saraksts, kas iegūts no rakstiem, redzams 3.2. tabulā. Astoņos rakstos tekstila atkritumu izcelsme bija industriāla, kas nav atbilstoši turpmākajai analīzei, jo šie tekstilmateriāli nav bijuši pakļauti lietotāja izmantojumam. Lielākā daļa rakstu koncentrējās uz noteikta veida tekstilmateriāliem vai to grupām; dažos gadījumos analizēti pat ļoti specifiski tekstilmateriāli, piemēram, zīds, džinss, liocels un āda.

Kā redzams 3.2. tabulā, tikai četri raksti atbilda abu kritēriju kopumam un attiecās uz jauktu pēcpatēriņa tekstilmateriālu pārstrādi. Atlasītajos pētījumos iegūtie produkti bija: (1) bioeļļa un tereftalskābe; (2) ar tekstilu pastiprināts kompozītmateriāls būvniecības vajadzībām; (3) tekstilšķiedras (kokvilna un neilons), spandeksa monomēri un bis(2-hidroksietil)tereftalāts; (4) uz micēlija bāzēts kompozītmateriāls siltumizolācijai.

3.2. tabula

Tekstila pārstrādē iegūstamie produkti

Tekstila veids	Industriālais tekstils	Pēcpatēriņa tekstils
Poliesters	Poliuretāna putas	Tereftalskābe (TPA), monomēri, tādi kā bis(2-hidroksietil)tereftalāts (BHET) un bis(2-hidroksietil)tereftalamīds, TPA un etilēnglikols
Kokvilna	Siltumizolācija	Kompozītmateriāli rūpnieciskiem mērķiem, glikozes šķīdums, modes aksesuāri, vermikomposts mēslojumam
Neilons	–	Smalki šķiedraina membrāna
Džinss	Skaņu absorbējošs materiāls	Ugunsizturīga kompozītplātne
Zīds	–	Luminiscējoši oglekļa punkti
Liocels	Smago metālu adsorbents	–
Āda	Ādai līdzīgi dzijas pavedieni	–
Kokvilna/poliesters	–	Celulozes šķiedras, celulozes un PET plēves, 3D drukas diegs, sēnīšu celulāze un poliesters
Viskoze/poliesters un viskoze/poliamīds	–	Sintētiskās šķiedras un pienskābe
Akrils un vilna	Siltumizolācija	–
Kokvilna, kokvilna/poliesters un akrils	Bioogles kā auduma piedeva	–

Jauktie tekstili

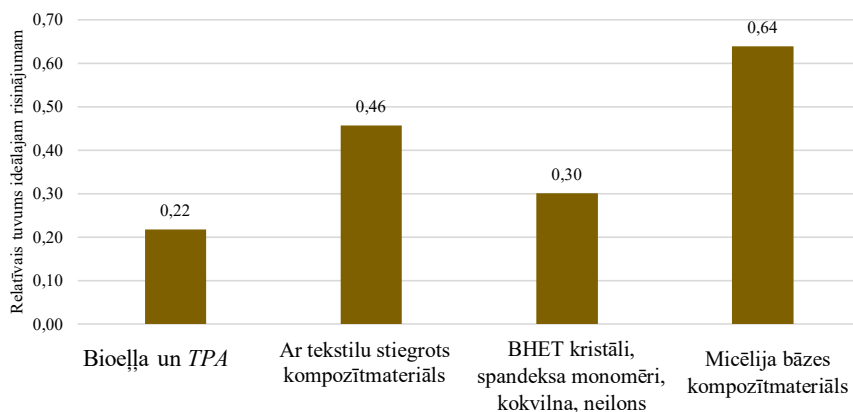
–

Bioeļļa un TPA, tekstila stiegrojuma kompozīti
būvniecībai, BHET kristāli, spandeksa monomēri,
kokvilna un neilons, uz micēlija bāzēts
kompozītmateriāls siltumizolācijai

TOPSIS metode

Pēc ievaddatu noteikšanas veikti aprēķini, izmantojot *TOPSIS* metodi. Rezultāti redzami 3.1. attēlā. Atbilstoši daudzkritēriju izvērtējumam visaugstāko rezultātu (0,64) sasniedza micēlija bāzes materiāls, tāpēc tas novērtēts kā vispiemērotākais risinājums. Šī alternatīva atbilda ideālajām vērtībām četros kritērijos un vienlaikus sasniedza trīs antiideālās vērtības.

Pārējām alternatīvām antiideālo vērtību bija vairāk: bioeļļa un *TPA* – četras, *TRC* – trīs, bet *BHET* kristāli, spandeksa monomēri un kokvilnas/neilona maisījums – piecas. Bioeļļa un *TPA* nesaņēma nevienu ideālo vērtību un kopvērtējumā ieguva viszemāko rezultātu.



3.1. att. *TOPSIS* analīzes rezultātā iegūtais alternatīvu vērtējums.

Kā redzams, vislielākais attīstības potenciāls ir materiālam, kura pamatā ir micēlijs, jo tas ir salīdzinoši labi izpētīts un tam ir vienkāršs ražošanas process. Tā ekonomiskā dzīvotspēja un tirgus potenciāls ir ļoti augsts. Materiālam ir arī nozīmīgas vides priekšrocības, kā arī to iespējams ražot no plaša spektra atkritumiem un blakusproduktiem. Šī produkta vājā puse ir tā īpašības salīdzinājumā ar tirgū pieejamajiem produktiem. Tomēr šajā pētījumā tika salīdzināts tikai siltumvadītspējas rādītājs. Katrā ziņā nepieciešami turpmāki pētījumi, lai optimizētu produkta īpašības un izpētītu citas lietojuma iespējas.

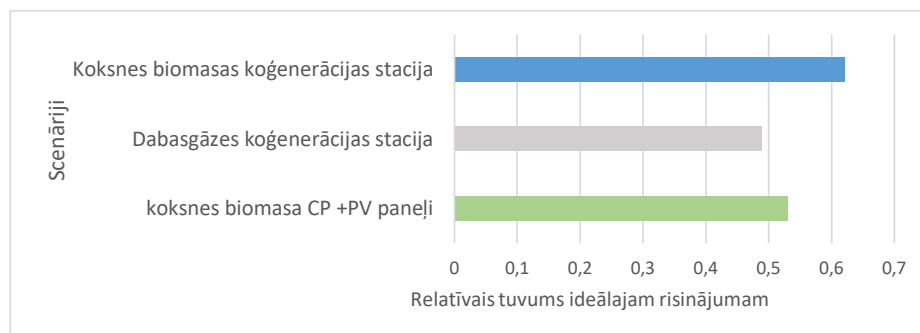
3.1.3. CO₂ uzglabāšanas mežizstrādes atlikumos analīzes piemērs

Trīs dažādu enerģijas ražošanas scenāriju daudzkritēriju analīzei aprēķinātās kritēriju vērtības un svarīgums apkopots 3.3. tabulā.

3.3. tabula

Kritēriju vērtības un svarīgums				
	Koksnes biomasas koģenerācija	Dabāsgāzes koģenerācija	Koksnes biomasas CP + PV paneļi	Kritēriju svars
Kurināmā enerģētiskais saturs, GJ/m ³	1,56	2,26	1,10	0,079
Kapitāla izmaksas, EUR/m ³	12,68	38,01	8,45	0,210
Degvielas izmaksas, EUR/m ³	55,17	37,75	47,80	0,288
O&M izmaksas, EUR/m ³	1,10	0,94	0,89	0,152
Pirkta/pārdotā elektroenerģija, EUR/m ³	3,84	-9,45	19,77	0,110
NO _x emisijas, g/m ³	3,14	4,95	2,36	0,028
CO emisijas, g/m ³	0,86	5,78	0,64	0,016
GOS emisijas, g/m ³	0	4,95	0	0,020
PM emisijas, g/m ³	4,7	0	3,5	0,040
CO ₂ emisijas, kg/m ³	0	90	0	0,057

Trīs dažādu enerģijas ražošanas scenāriju daudzkritēriju analīzes rezultāti parādīti 3.2. attēlā.



3.2. att. Daudzkritēriju lēmumpieņemšanas analīzes rezultāti.

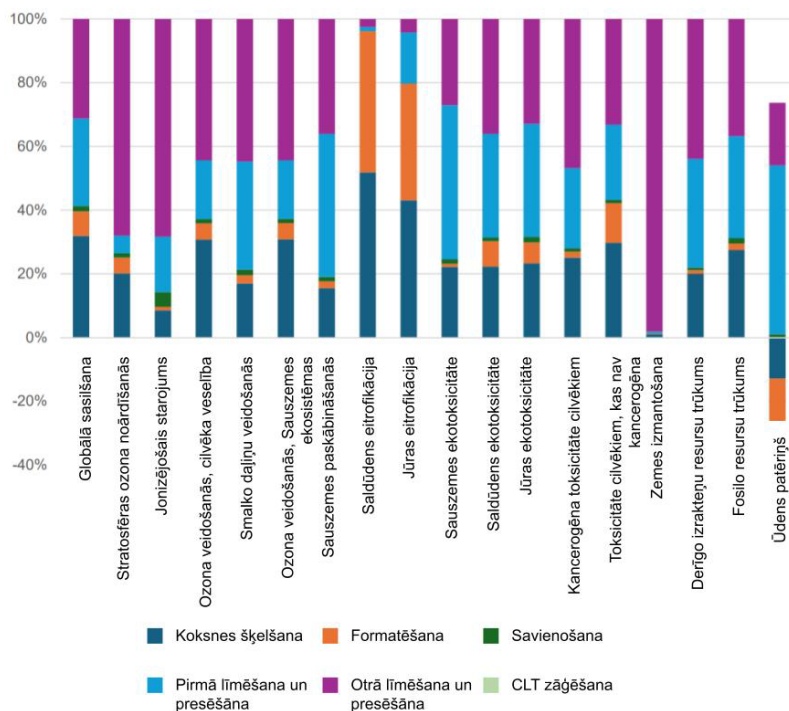
Daudzkritēriju analīzes rezultāti liecina, ka labākais enerģijas ražošanas scenārijs ir koksnes biomasas koģenerācijas stacija (0,622). Otrajā vietā ir koksnes biomasas sadedzināšanas iekārtas un saules fotoelementu paneļu scenārijs (0,531), kas tikai nedaudz apsteidz dabāsgāzes koģenerācijas stacijas scenāriju (0,490), lai gan pašlaik daudzkritēriju analīze liecina, ka dabāsgāzes fosilo resursu izmantošanas scenārijs ir salīdzinoši tuvu vērtējumam, salīdzinot ar dabāsgāzes izmantošanas scenāriju.

3.2. Aprites cikla novērtējums (ACN)

3.2.1. Pārstrādāti šķērsām līmēti kokmateriāli kā zemas ietekmes uz vidi neapstrādāta materiāla alternatīva. Latvijas gadījuma izpēte

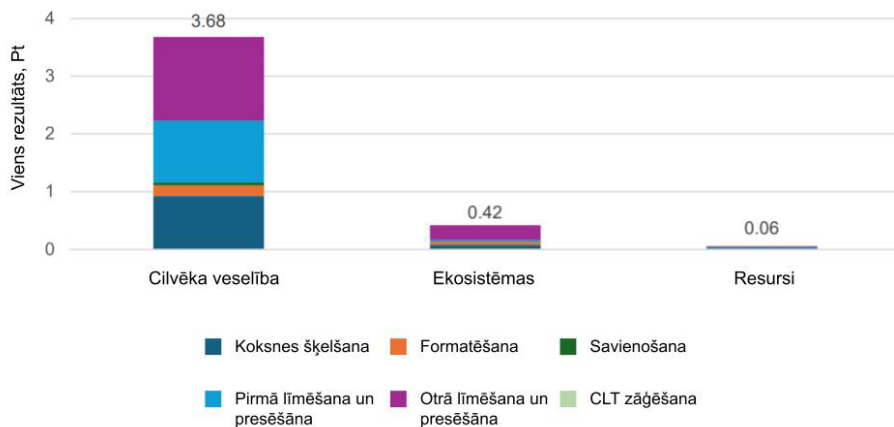
Pārstrādātā *CLT* starpposma un beigu posma ietekme

Attiecībā uz pārstrādāto *CLT* vislielākā ietekme lielākajā daļā kategoriju ir abiem līmēšanas procesiem. Abos procesos tiek izmantotas naftas produktu pārstrādes līmes. Trešā lielākā ietekme ir koksnes šķelšanai, kas uzrāda vislielāko ietekmi uz saldūdens un jūras eitrofikāciju. Šajā procesā tiek patērēts visvairāk enerģijas uz vienu funkcionālo vienību (FV). Ietekme zemes izmantošanas kategorijā liecina, ka gandrīz visa pārstrādātā *CLT* ietekme ir saistīta ar otro līmēšanu un presēšanu (3.3. att.). Tas ir saistīts ar neapstrādāta materiāla izmantošanu, jo šajā gadījumā ārējā slāņa ražošanai tika iegūtas primārās izejvielas, nodrošinot identisku vizuālo kvalitāti kā jaunam *CLT*.



3.3. att. Iespējamā ietekme uz 1 m³ šķērsām līmētas koksnes potenciāla rezultātu viduspunktu.

Attiecībā uz galīgo ietekmi (3.4. att.), izmantojot *ReCiPe* metodoloģiju, tika novērtētas trīs kategorijas – cilvēku veselība, ekosistēma un resursi.



3.4. att. Pārstrādātas šķērsām līmētas koksnes 1 m³ ietekme uz galīgo vienoto rādītāju.

Pārstrādātā CLT un CLT viduspunkta un beigu posma ietekmes salīdzinājums

Lai patiesi novērtētu otrreizējās pārstrādes tehnoloģijas izmantošanas ieguvumus, pārstrādātais CLT tika salīdzināts ar CLT, izmantojot viduspunkta un beigu posma rādītājus, kas parāda katra produkta ietekmi, ļaujot veikt salīdzinājumu. Salīdzinot starpposma rādītājus, gandrīz visās ietekmes kategorijās pārstrādātā CLTFV ietekme ir mazāka. Vienīgais izņēmums, kur pārstrādātais CLT uzrāda lielāku negatīvo ietekmi, ir eitrofikācijas kategorijas, kas saldūdens eitrofikācijai rada 0,48 kg fosfora ekvivalentu un 0,36 kg slāpekļa ekvivalentu. Šī ietekme ir saistīta ar nepareizu biomasas atlieku apglabāšanu, tāpēc dažas no šajā pētījumā minētajām ietekmēm varētu būt saistītas ar zāģskaidu apglabāšanu. Ievērojamākie uzlabojumi ir globālās sasilšanas, zemes izmantošanas un sauszemes ekotoksicitātes ietekmes kategorijās.

3.4. tabula

Pārstrādāta šķērsām līmētas koksnes (pārstrādātā CLT) un šķērsām līmētu kokmateriālu 1 m³ garuma potenciālā ietekme uz vidusposmu

Ietekmes kategorija	Vienība	ReCLT	CLT
Globālā sasilšana	kg CO ₂ ekv.	82,76	151,24
Stratosfēras ozona noārdīšanās	kg CFC11 ekv.	0,00006	0,00017
Jonizējošais starojums	kBq Co-60 ekv.	3,96	16,73
Ozona veidošanās, cilvēka veselība	kg NO _x ekv.	0,23	0,87
Smalko daļiņu veidošanās	kg PM2,5 ekv.	0,11	0,38
Ozona veidošanās, sauszemes ekosistēmas	kg NO ekv.,	0,24	0,92
Sauszemes paskābināšanās	kg SO ₂ ekv.	0,26	0,56
Saldūdens eitrofikācija	kg P eq	0,54	0,06
Jūras eitrofikācija	kg N ekv.	0,049	0,013
Sauszemes ekotoksicitāte	kg 1,4-DCB	2302,88	4243,63
Saldūdens ekotoksicitāte	kg 1,4-DCB	3,80	6,11
Jūras ekotoksicitāte	kg 1,4-DCB	6,82	12,93

		3.4. tabulas turpinājums	
Kancerogēna toksicitāte cilvēkiem	kg 1,4-DCB	15,35	36,44
Toksicitāte cilvēkiem, kas nav kancerogēna	kg 1,4-DCB	94,98	153,25
Zemes izmantošana	m ² kultūraugu ekvivalents	94,08	861,79
Derīgo izrakteņu resursu trūkums	kg Cu ekv.	0,26	0,48
Fosilo resursu trūkums	kg naftas ekv.	23,33	46,78
Ūdens patēriņš	m ³	0,63	1,81

Pārstrādātā *CLT* uzrāda ievērojamāku negatīvu ietekmi uz saldūdens un jūras eutrofikācijas kategorijām, un tas var būt saistīts ar līmēšanas procesā izvēlēto amonija sulfāta cietinātāju.

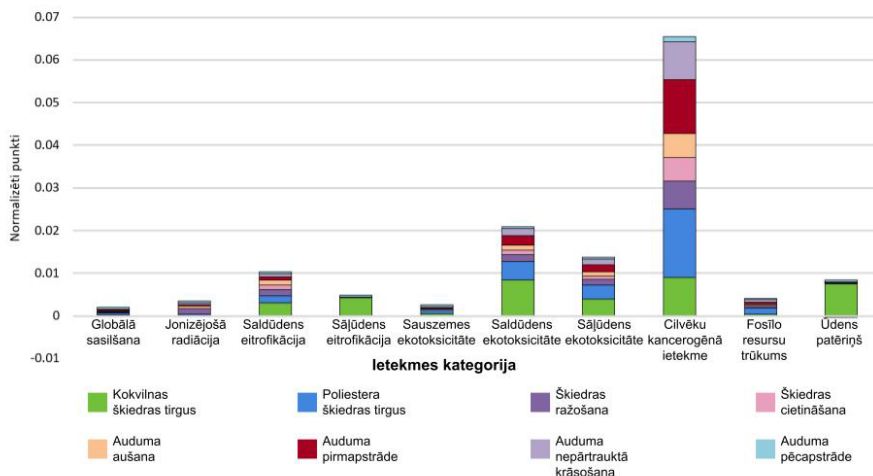
3.2.2. Jaukto tekstilizstrādājumu pilnīgas dzīves cikla analīzes trūkums

Otrs ACN piemērs kalpoja, lai aprakstītu ierobežojumus un pieņēmumus, kas ir izmantoti kokvilnas un poliestera maisījumu vides novērtējumos. Šajā piemērā tika izmantotas divas metodes – gan bibliometriskā metode ar literatūras analīzi, gan aprites cikla novērtējums.

Lai izmantotu aprites cikla novērtējumu kā bāzes modeli, izmantots ACN pētījums par medicīnisko darba apģērbu, kam bija visdetalizētākā aprites cikla inventarizācija. Tas ir arī vienīgais pētījums, kurā iekļauti visi ražošanas procesi. Scenāriji veidoti bez ūdens emisijām, lai samazinātu nenoteiktību, jo tas būtu papildu nezināmais mainīgais. Turklāt tika izveidots scenārijs, izmantojot iebūvētos *Ecoinvent* procesus – sintētisko šķiedru aušanu, nepārtrauktu kokvilnas šķiedru krāsošanu un kokvilnas audumu apdari. Lai scenārijs būtu salīdzināms ar pārējiem, pārējie procesi tika izmantoti bez ūdens emisijām, taču jāpatur prātā, ka *Ecoinvent* procesos ir iekļautas emisijas.

Ietekmes kategorijas un ražošanas procesi

Pirmkārt, analizēts bāzes scenārijs, īpaši aplūkojot ražošanas procesu ietekmes sadalījumu. Aprites cikla ietekmes novērtējums sniedz rezultātus vairākām ietekmes kategorijām. Izvēlētajai metodei ir 18 ietekmes kategorijas, katrai no tām ir atbilstoša mērvienība. Tomēr, lai salīdzinātu kategorijas, ir jāpāriet uz kopēju mērvienību. To panāk normalizējot. Tas ir process, kurā tiek normalizētas ietekmes kategorijas vienā dimensijā un parādīti rezultāti plašākā kontekstā, kas norāda katras kategorijas ietekmi attiecībā pret kopējo ietekmi uz vidi. Bāzes scenārija normalizētās vērtības redzamas 3.5. attēlā. Grafikā iekļautas visas kategorijas, kuru normalizētās vērtības ir lielākas par 0,0020, izņemot globālo sasilšanu (0,0016), kas arī tika iekļauta kā plaši izmantota kategorija ietekmes uz vidi novērtējumos. Jāpiebilst, ka rezultāti nav oriģināli, jo modeļa pamatā ir esošs pētījums. Tomēr rezultāti netiek prezentēti un analizēti šādā veidā, tāpēc šādi novērojumi ir oriģināli.



3.5. att. Normalizēti rezultāti pēc ietekmes kategorijām kokvilnas un poliestera maisījumu ražošanas bāzes scenārijam.

Var novērot, ka galvenās ietekmes kategorijas ir saistītas ar toksicitāti (cilvēka kancerogēnā toksicitāte, jūras ekotoksicitāte un saldūdens ekotoksicitāte), tāpēc ir svarīgi nodrošināt pilnīgu aprites cikla inventarizāciju, iekļaujot ķīmikālijas, jo tās ir galvenais toksicitātes avots. No ievadītajām ķīmiskajām vielām vislielākā ietekme bija nātrija hidroksīdam, kas izskaidrojams ar izmantoto daudzumu, jo nātrija ditionītam ir vislielākā ietekme ceturtajā scenārijā, kas balstīts publikācijā ietvertajos uzņēmuma B05 datos. Ir arī jāatzīmē, ka globālās sasiļšanas kategorijai ir salīdzinoši neliela ietekme uz kopējo ietekmi uz vidi. Tas būtu jāņem vērā, analizējot tekstilizstrādājumu ekoloģiskos raksturlielumus. Aplūkojot iesaistīto procesu sadalījumu, vislielākā ietekme uz vidi ir izejvielu – kokvilnas un poliestera šķiedru – ieguvei, kam seko priekšapstrāde. Jāņem vērā, ka tas attiecas uz bāzes scenāriju, jo ietekmes sadalījums mainās, aplūkojot citus scenārijus. Atsauces pētījums uzrāda līdzīgus rezultātus, jo otra lielākā ietekme bija saistīta ar izejvielu ieguvu, savukārt pirmā – ar izmantošanas fāzi, kas neietilpst šī pētījuma ietvaros.

3.3. Bibliometriskā analīze

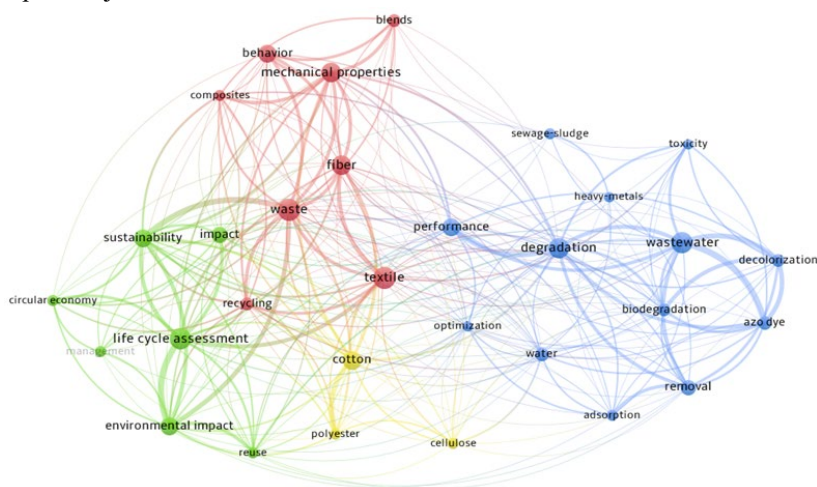
3.3.1. Jaukto tekstilizstrādājumu bibliometriskās analīzes piemērs

ACN metodes piemērā tika aprakstīti ierobežojumi un pieņēmumi, kas ir izmantoti kokvilnas un poliestera maisījumu vides novērtējumos. Šajā gadījumā dati tika iegūti ar bibliometriskās analīzes palīdzību.

Rezultātā tika identificēts 31 atslēgvārds, kas tika lietots 12 vai vairākas reizes. Atslēgvārdi bija saistīti ar 278 saitēm un veidoja četras kopas. Atslēgvārdi un to saites redzamas 3.6. attēlā. Populārākais atslēgvārds bija atkritumi (36 gadījumi), kam sekoja tekstilizstrādājumi (35 gadījumi), pēc tam – aprites cikla novērtējums un notekūdeņi (34 gadījumi). Aplūkojot

kopējo saites stiprumu, secība bija līdzīga, izņemot otro spēcīgāko saikni, ko parāda ilgspējība, kas liecina par augstu korelāciju ar citiem vārdiem, lai gan sastopama mazāk nekā citi vārdi.

Svarīgs atklājums ir tas, ka aprites cikla novērtējums nav cieši saistīts ar notekūdeņiem, jo tas nav saistīts ar tādiem terminiem kā notekūdeņi, toksicitāte un smagie metāli. Tas liek domāt, ka esošajos ACN pētījumos par jaukiem tekstilizstrādājumiem, visticamāk, maz uzmanības tiks pievērsts notekūdeņiem un to toksiskajai iedarbībai. Tāpat neparādās ar siltumnīcefekta gāzēm saistīti atslēgvārdi, kas nozīmē, ka šis aspekts nav pietiekami izpētīts vai var nebūt būtisks, apsverot jaukta tekstila ietekmi uz vidi.



3.6. att. Atslēgvārdu līdzaspārādīšanās ar vismaz 12 atbilstību sliekšni.

Kokvilnas un poliestera maištījumu ražošanas vides novērtējums

Tika izskatīti daudzi pārskata un oriģinālie pētījumi, pirms bija iespējams apkopot pētījumus par *CO/PES* ražošanas ietekmi uz vidi, kas attiecas uz šo pētījumu. Lielākā daļa no apskatītajiem pētījumiem tieši neattiecas uz *CO/PES* maištījumu ražošanu un izmanto vispārīgus datus vai izmanto iepriekš izveidotus procesus no tādām datu bāzēm kā *Ecoinvent*, vai nesniedz detalizētus ievades datus. Tika apstiprināts, ka literatūrā nav pieejama pilnīga *CO/PES* ražošanas aprites cikla inventarizācija (ACI). Vispilnīgākā inventarizācija par *CO/PES* ražošanu tika iekļauta V. Vāgnera u. c. ACN pētījumā. Tajā ir iekļauti dati par primārajām izejvielām, piemēram, enerģiju un ūdeni, kas ir iekļauti vairākos pārskatītajos pētījumos. Tomēr tajā ir arī detalizēts izmantoto ķīmisko vielu saraksts un katra procesa notekūdeņu īpašības. Lai iegūtu pilnīgus datus, trūkst datu par emisijām gaisā. Tomēr galvenā problēma ir tā, ka visi dati tiek ņemti par kokvilnas ražošanu, jo autori atklāja, ka literatūrā nav pieejami dati par *CO/PES* ražošanu.

Enerģijas un ūdens dati tika apkopoti tāpat kā ķīmiskajām vielām (3.5. tab.). Atkal var novērot, ka ir gadījumi, kad atšķirības ir minimālas, piemēram, ūdens patēriņš apdarē, un ir arī ļoti būtiskas atšķirības, piemēram, ūdens un notekūdeņu priekšattīrīšanā. Vismazāk datu ir pieejami par siltumenerģiju. *Y. Zhang et al.* savā uzskaitē iekļāva izmantoto ogļu daudzumu,

kas, visticamāk, tika izmantots apkurei, taču nepietiekamas informācijas dēļ tas netika iekļauts. *LPTP* ziņojumā sniegti tikai vispārīgi dati par enerģijas un ūdens patēriņu tekstilrūpniecībā, bet nav datu par konkrētiem materiāliem un procesiem, izņemot ūdens patēriņu pirmapstrādes laikā.

3.5. tabula

Datu, kas pārklājas, apkopošana no atlasītajiem pētījumiem un ziņojumiem
(enerģija un ūdens)

	<i>CO</i> (medicīniskais darba apģērbs)	<i>CO</i> un <i>CO/PES</i> (<i>BAT</i>)	<i>CO/PES</i> (slimnīcas forma)	<i>CO/PES</i> (audums, uzņēmums B05)	<i>CO/PES</i> (audums)
Iepriekšēja apstrāde					
Elektrība, kWh kg ⁻¹	0,036	–	–	0,049	4
Ūdens, l kg ⁻¹	–	23	–	23,24	616
Notekūdeņi, l kg ⁻¹	15,10	–	–	20,40	350
Siltums, kWh kg ⁻¹	0,16	–	–	–	–
Krāsošana					
Elektrība, kWh kg ⁻¹	0,19	–	0,70	0,014	0,45
Ūdens, l kg ⁻¹	72,72	–	75	24,80	12
Notekūdeņi, l kg ⁻¹	33,35	–	–	19,50	–
Siltums, kWh kg ⁻¹	1,84	–	8,33	–	–
Apdare					
Elektrība, kWh kg ⁻¹	0,16	–	–	–	0,31
Ūdens, l kg ⁻¹	23,30	–	–	–	22,90
Notekūdeņi, l kg ⁻¹	8,35	–	–	–	19,75
Siltums, kWh kg ⁻¹	0,56	–	–	–	–

Pārskatītajos vides novērtējumos vismazāk iekļautie dati ir emisijas ūdenī un gaisā. Tas atbilst bibliometriskās analīzes secinājumam, ka ACN un notekūdeņi neuzrāda saistību. Tā tam nevajadzētu būt, jo, runājot par tekstilizstrādājumu ražošanas ietekmi uz vidi, liela uzmanība tiek pievērsta notekūdeņu toksicitātei. Tāpēc ACN pētījumos jāiekļauj arī šis aspekts, lai pilnībā novērtētu jauktu tekstilizstrādājumu ietekmi uz vidi. Detalizētu tekstila notekūdeņu sastāvu ietver tikai pētījums par medicīnisko darba apģērbu, bet tas ņemts no kokvilnas ražošanas. Citi pētījumi ietver tikai ķīmisko skābekļa pieprasījumu (KSP), kas ir nozīmīgākā sastāvdaļa pēc svara. Tāpēc viens no turpmākās analīzes mērķiem ir noskaidrot, vai notekūdeņu izslēgšana būtiski ietekmē rezultātus.

Izmantojot literatūras analīzes datus, nav iespējams izstrādāt visaptverošu DCI *CO/PES* maisījuma tekstilizstrādājumiem, jo daži dati nav pieejami, pieejamo datu atšķirības ir pārāk lielas un pieņēmumi par procesiem un tehnoloģijām nav pilnībā skaidri. Tomēr tika veikts ACN, lai noskaidrotu, kā pieejamo datu atšķirības ietekmē *CO/PES* maisījumu ietekmes uz vidi rezultātus.

3.3.2. Energo pārvaldības bibliometriskās analīzes piemērs

Pēc līdzības ar bibliometrisko analīzi tika piemērota analīze arī jaukta tipa tekstilizstrādājumu izpētei, tomēr ar citu fokusu bibliometriskā analīzes lietojums energopārvaldībā izkristalizēja šī sektora rezultātus, kas uzskatāmi parādīti 3.6. tabulā.

3.6. tabula

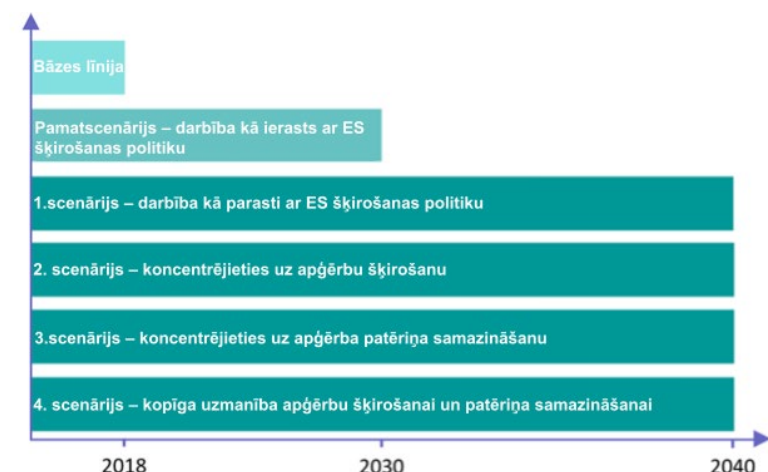
Vaicājumu iestatījumi un atslēgas vārdi.

Nr.	Vaicājuma iestatījums	Atslēgvārdi vaicājumā	Dokumentu skaits
Vaicājums datubāzē SCOPUS			
1.	Paplašināts vaicājums visos laukos, visos publicētajos dokumentos laikposmā no 2009. līdz 2024. gadam	<i>ALL ("energy audit") OR ALL ("energy auditing") AND PUBYEAR > 2008 AND PUBYEAR < 2025</i>	9446
2.	Paplašināts vaicājums virsrakstā, anotācijā un atslēgvārdos, visos dokumentos, kas publicēti laikā no 2009. līdz 2024. gadam	<i>TITLE-ABS-KEY ("Green Deal") OR TITLE-ABS-KEY ("fit for 55") AND PUBYEAR > 2008 AND PUBYEAR < 2025</i>	3441
3.	Paplašināts vaicājums tikai virsrakstā, visos dokumentos, kas publicēti no 2009. līdz 2024. gadam	<i>TITLE ("energy audit") OR TITLE ("energy auditing") AND PUBYEAR > 2008 AND PUBYEAR < 2025</i>	631
4.	Paplašināts vaicājums tikai virsrakstā, visos dokumentos, kas publicēti no 2009. līdz 2024. gadam	<i>TITLE ("energy audit") AND ALL ("energy efficiency") AND PUBYEAR > 2008 AND PUBYEAR < 2025</i>	366
5.	Paplašināts vaicājums virsrakstā, anotācijā un atslēgvārdos, visos dokumentos, kas publicēti laikā no 2009. līdz 2024. gadam	<i>TITLE-ABS-KEY ("Green Deal") OR TITLE-ABS-KEY ("fit for 55") AND PUBYEAR > 2008 AND PUBYEAR < 2025</i>	321
6.	Paplašināts vaicājums tikai virsrakstā, visos dokumentos, kas publicēti no 2009. līdz 2024. gadam	<i>TITLE ("energy efficiency first") OR TITLE ("energy efficiency first principle") AND PUBYEAR > 2008 AND PUBYEAR < 2025</i>	17
Vaicājumi datubāzē MDPI			
7.	Paplašināts vaicājums pilnteksta laukā, visos publicētajos dokumentos laika posmā no 2009. gada līdz 2024. gadam	<i>FULLTEXT ("energy policies") AND FULLTEXT ("energy policy") AND "energy efficiency" With adding search filter for years between 2009–2024</i>	3448
8.	Paplašināts vaicājums visos laukos, visos publicētajos dokumentos laikposmā no 2009. līdz 2024. gadam	<i>ALL ("energy audit") OR ALL ("energy efficiency audit") AND "energy efficiency" With adding search filter for years between 2009–2024</i>	821
9.	Paplašināts vaicājums tikai virsrakstā, visos dokumentos, kas publicēti no 2009. līdz 2024. gadam	<i>TITLE ("energy audit") AND ALL ("energy efficiency") With adding search filter for years between 2009–2024</i>	23

Vaicājumi datubāzē <i>EUROPA SEARCH</i>		
10.	Vaicājums visos laukos un visos formātos (<i>Web, Word, PowerPoint, Excel, PDF</i>)	<i>Energy efficiency</i> 6061

3.4. Sistēmdinamika

Modeļa bāzes gads bija 2018. gads, jo šis bija gads ar visvairāk pieejamajiem datiem. Galvenais mērķis bija noskaidrot, kā tuvākajā nākotnē mainīsies apglabājamo apgērbu apjoms, tāpēc tika modelēts bāzes scenārijs līdz 2030. gadam. Turklāt tika izveidoti četri scenāriji, lai aplūkotu politikas instrumentu ietekmi uz ierasto biznesu pieeju. Scenāriji apkopoti 3.7. attēlā.



3.7. att. Izstrādātie un modelētie scenāriji un to laika intervāli.

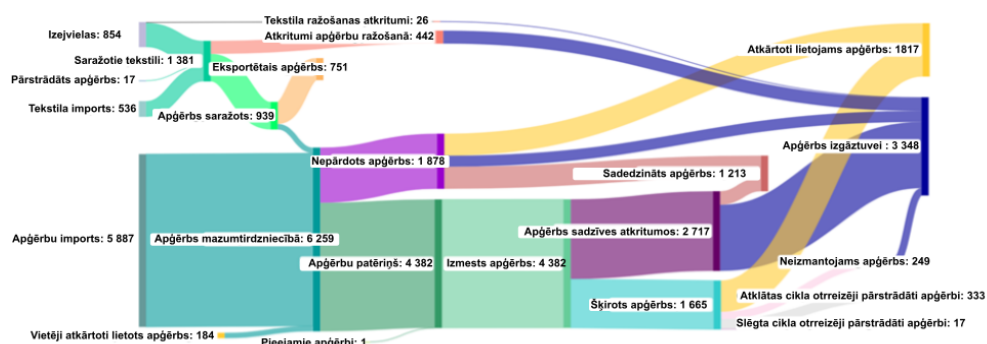
Politikas instrumenti tika apvienoti visos iespējamajos veidos, un tā rezultātā tika izveidoti četri modelēšanas scenāriji. ES teksta atkritumu dalīto vākšanu ir noteikusi par obligātu no 2025. gada, tāpēc politikas instrumenti sāka darboties tikai 2025. gadā un iepriekšējos gadus nevar ietekmēt. Lai politikas instrumenti varētu ietekmēt modeļa uzvedību, simulācija tika pagarināta līdz 2040. gadam. Pirmais scenārijs ir tāds pats kā bāzes scenārijs. Otrajā un trešajā scenārijā tiek aktivizēts tikai viens no politikas instrumentiem, savukārt ceturtajā scenārijā aktīvi ir abi politikas instrumenti. 3.7. tabulā parādītas iegūtās vērtības parametriem, kas sākotnēji tika definēti kā svarīgi aprites ekonomikas rādītāji dažādos scenārijos. Rezultāti ir sīkāk aprakstīti nākamajās apakšnodaļās.

Aprites ekonomikas galveno rādītāju vērtības tekstila nozarē dažādos scenārijos

	Bāze	Bizness kā parasti pēc ~10 gadiem	Bizness kā parasti pēc ~20 gadiem	Ar uzsvāru uz apģērbu šķirošanu	Ar uzsvāru uz patēriņa samazināšanu
Īpatnējais apģērbu patēriņš, kg/iedzīvotājs/gadā	9,8	16,0	24,1	24,1	5,0
Apģērba kalpošanas laiks, gadi	3,3	1,7	0,9	0,9	8,6
Tekstilizstrādājumu šķirošanas koeficients, %	38	33	31	81	100
Apģērbs, kas apglabāts izgāztuvē, miljoni tonnu gadā	3,3	5,8	8,9	5,1	0,7

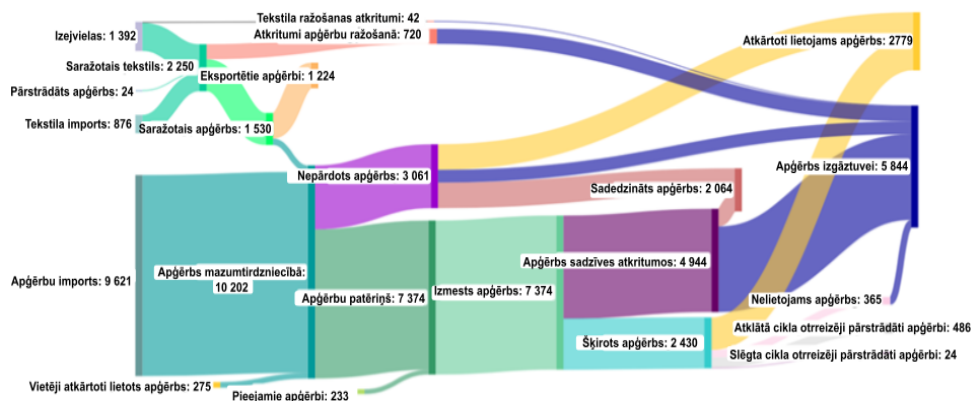
Pamatscenārijs

Pamatscenārijs rāda, ka 2030. gadā izgāztuvēs tiks apglabāti 58 miljoni tonnu ES patērētā un saražotā apģērba. Ne viss no tiem tiek apglabāts ES izgāztuvēs, jo daļa tekstilizstrādājumu atkritumu tiek eksportēta. Modelis parādīja, ka 2030. gadā, izmantojot biznesa “kā ierasts” pieeju, apģērbu patēriņš varētu būt 16 kg uz vienu iedzīvotāju, bet apģērba kalpošanas laiks varētu samazināties līdz 1,66 gadiem. Ikgadējā dzīves cikla SEG emisijas bija no 130 tCO₂ ekv/gadā līdz 212 miljoniem tCO₂ ekv/gadā. Attiecīgajā periodā kopumā tiktu radīti 2,13 miljardi t CO₂ ekv. Aptuvenais ES tekstilizstrādājumu šķirošanas apjoms 2018. gadā bija no 1,7 līdz 2,1 miljoniem tonnu. Sākotnējā apģērbu šķirošana modelī bija 1,67 miljoni tonnu. Rezultāti atbilst ES datiem, ņemot vērā, ka modes tekstilizstrādājumu daļa varētu būt aptuveni 81 %. 3.8. attēlā redzami simulācijas sākuma gada rezultāti un plūsmu sadalījums. Visas plūsmas ir norādītas tūkstošos tonnu gadā. Literatūrā ir piedāvāti dažādi tekstilmateriālu plūsmu varianti ES, taču līdz šim nebija pieejams detalizēts pārskats par apģērbu plūsmām.



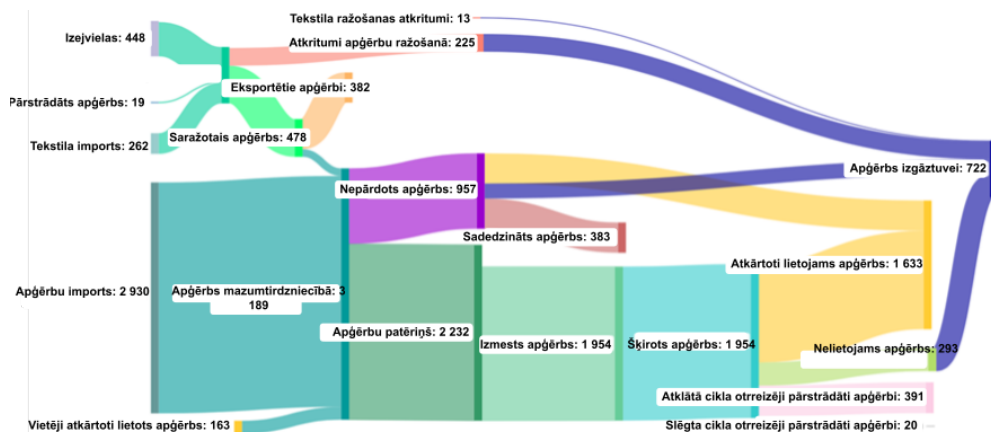
3.8. att. Materiālu plūsmas ES modes tekstilizstrādājumu vērtību ķēdē 2018. gadā (tūkst. tonnu /gadā).

Materiālu plūsmas modes tekstila vērtību ķēdē ES 2030. gadā parādītas 3.9. attēlā. Redzams, ka visu plūsmu vērtības ir pieaugušas, kas atbilst prognozēm. Ņemot vērā to, ka bāzes scenārijā bija iekļauta šķirošanas jaudas palielināšana, tika prognozēts, ka apģērbu šķirošanas īpatsvars palielināsies. Kā redzams 3.8. un 3.9. attēlā, vizuāli plūsmu attiecība nav būtiski mainījusies. To apliecina arī šķirošanas ātruma skaitliskā vērtība. 2018. gadā apģērbu šķirošanas rādītājs bija 38 %, savukārt iegūtais 2030. gada šķirošanas rādītājs bija 33 %. Šķirošanas ātrums ir samazinājies, jo konstatētais šķirošanas jaudas pieaugums ir proporcionāli mazāks nekā patēriņa un izmestā apģērba pieaugums.



3.9. att. Materiālu plūsmas ES modes tekstilizstrādājumu vērtību ķēdē 2030. gadā (tūkst. tonnu /gadā).

Plūsmas 2040. gadā, kas izriet no ceturtā scenārija, redzamas 3.10. attēlā. Sadzīves atkritumu plūsmas nav, bet apģērbu apglabāšana poligonos joprojām notiek. Nozīmīgākā plūsma vērtību ķēdes beigās ir atkārtoti lietots apģērbs. *Sankey* diagramma norāda arī citus aktuālis jautājumus, kuriem jāpievērš uzmanība, piemēram, lietotu apģērbu eksports un to neizmantošana mājāsaimniecībā, rūpniecisko un komerciālo atkritumu apglabāšana poligonos un joprojām ļoti zema slēgtā cikla otrreizējās pārstrādes īpatsvars. Tāpat kā iepriekš, plūsmas uzrādītas tūkstošos tonnu gadā.

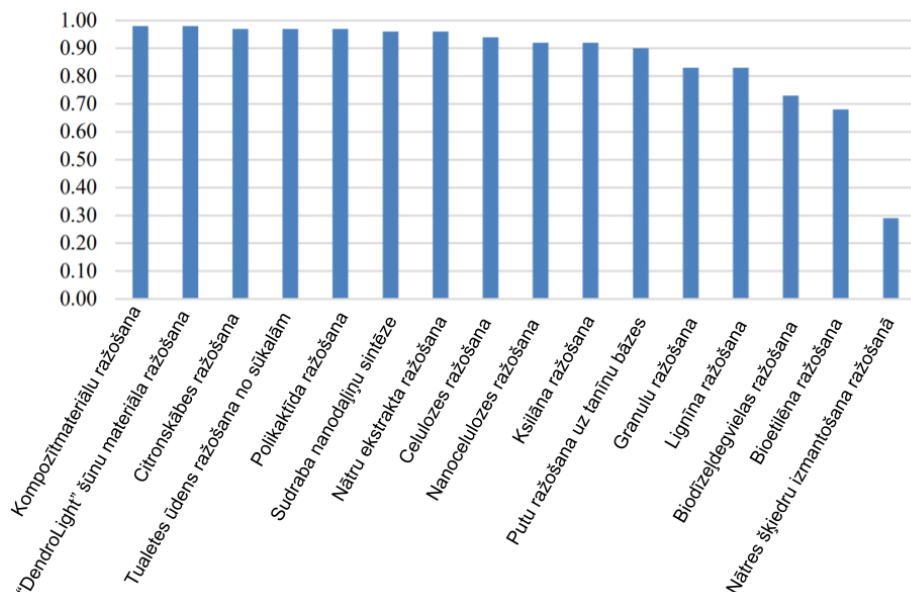


3.10. att. Materiālu plūsmas ES modes tekstila vērtību ķēdē 2040. gadā no trešā un ceturtā scenārija (tūkst. tonnu /gadā).

3.5. Izplūdušī kognitīvā karte (*FCM*)

Pētījumā “*Bioeconomy Towards Green Deal. Case Study of Citric Acid Production Through Fuzzy Cognitive Maps*” tika aprakstīts citronskābes ražošanas procesa modelis un iegūtie rezultāti. Tādā pašā veidā tika analizēti visi 16 ražošanas procesi, lietojot analogisku modelēšanas veidu un identiskus kritērijus. Tomēr, kā minēts iepriekš, pētījuma galvenais mērķis ir iegūt datus, lai izvēlētos no aprakstītajiem ražošanas procesiem primāri izveidotos un tos sarindotu, tādējādi nosakot, kurš no piedāvātajiem risinājumiem ir visefektīvākais un pierāda pievienoto vērtību Zaļā kursa mērķu sasniegšanai un aprites ekonomikas attīstībai bioekonomikas skatījumā. Lai iegūtu šādu rezultātu, katra ražošanas procesa rezultāts sadaļā “Ražošanas procesa efektivitāte” tiek savstarpēji salīdzināts pēc iegūtā kvantitatīvā rezultāta skalā līdz 1. Uzskaitītie rezultāti parādīti stabīņu diagrammā 3.20. attēlā.

Diagramma (3.11. att.) parāda 16 ražošanas procesu iegūtos kvantitatīvos rezultātus lietderības salīdzinājumā. Iegūtie rezultāti rāda, ka visefektīvākais ražošanas process ir kompozītmateriālu ražošana. Šo rezultātu pamato izejvielu pieejamība kompozītmateriāliem, kas galvenokārt ir citu ražošanas procesu blakusprodukti – zemas kvalitātes koksnes atlikumi un pārstrādāta plastmasa. Arī pieprasījums pēc šādiem kompozītmateriāliem tirgū strauji pieaug to fizikālo īpašību dēļ, ražošanas tehnoloģijas ir salīdzinoši vienkāršas un pieejamas bez pārmērīgiem ieguldījumiem. Neiedziļinoties katra ražošanas procesa pozitīvajās īpašībās, kas aprakstīto ražošanas procesu ir pietuvinājušas iegūtajam augstajam rezultātam, autore secina, ka 11 no aprakstītajiem 16 ražošanas procesiem ir sasnieguši ļoti augstas vērtības diapazonā no 0,9 līdz 1 un visi 11 ražošanas procesi atbilst augstai bioekonomikas efektivitātei Zaļā kursa mērķu sasniegšanai, tādējādi šie ražošanas procesi ir ļoti vērtīgi un būtu primāri jāievieš ekonomikā, ieguldot ražošanas iekārtās.



3.11. att. Ražošanas procesu lietderības kopsavilkums.

Pretstatā tam, biodīzeļdegvielas un bioetilēna ražošanas procesi, lai gan ļoti vērtīgi fosilā kurināmā aizstāšanai un naftu neražojošo valstu neatkarības palielināšanai no fosilajiem resursiem, joprojām ir ļoti tehnoloģiski sarežģīti un prasa milzīgus ieguldījumus to ražošanā, kas patlaban samazina to ražošanas ekonomisko dzīvotspēju. Tomēr straujā zinātnes un tehnoloģiju attīstība neizbēgami tuvākajā desmitgadē tuvinās biodīzeļdegvielas un bioetilēna ražošanu.

Vājākais rezultāts (0,29 no 1) tika iegūts dabisko nātru šķiedru ražošanā. Šis rezultāts ir saistīts ar šī ražošanas procesa konkurenci par lauksaimniecības zemi ar pārtikas rūpniecību un iegūtā produkta zemo konkurētspēju tekstilrūpniecībā, jo būtu ļoti grūti pamatot nātru audzēšanu lielās platībās un to pārstrādi tekstilizstrādājumos no vides un ekonomikas viedokļa.

Ņemot vērā pētījuma mērķus, iegūtie rezultāti ir uzticami un objektīvi atspoguļo *FCM* metodes derīgumu, un šāda veida integrētās analīzes izmantošana ir piemērota, lai salīdzinātu dažādus alternatīvos ražošanas procesus, kas apskatīti darbā.

SECINĀJUMI

1. Lai gan promocijas darbā ir izvērtēti ļoti daudz un dažāda veida atkritumu pārstrādes vai produkta ar augstāku pievienoto vērtību ražošanas procesi, tomēr, balstoties vairāku pētījumu rezultātos, sevišķi pētījuma *“What Drives the Circular Economy? Textile Sorting or Consumption Reduction”* rezultātos, secināms, ka nemainīgi pirmais solis ceļā uz aprites ekonomiku ir patēriņa samazināšanas politika, tādējādi apstiprinot promocijas darba hipotēzi.
2. Lēmumu izstrādes un pieņemšanas procesā izmantojot zinātniskās pētniecības metodes, var kompleksi izvērtēt labākos iespējamajos scenārijus un ilgtspējīgas izvēles aprites ekonomikas ieviešanai, jo ne visus aspektus var izvērtēt tikai ar vienu metodi. Veidojot metožu kopumu vai kombināciju kā rīku sistēmu, ir iespējams visaptveroši un datus balstīti izvērtēt katra ražošanas vai pārstrādes procesa potenciālu aprites ekonomikas attīstībai.
3. Pētījuma laikā veiktā sistēmdinamikas analīze, kas nodrošina stratēģijas formulēšanu, politikas izstrādi un lēmumu pieņemšanu sarežģītās un dinamiskās jomās, ļāva secināt, ka šobrīd Latvijas, kā arī citu valstu politikas veidotājiem ir svarīgi veikt esošo vai plānoto aprites ekonomikas stratēģiju efektivitātes novērtējumu, lai izstrādātu īstermiņa un ilgtermiņa rīcības plānus, kas ne tikai veicinātu pāreju uz aprites ekonomikas modeli, bet arī nodrošinātu saprātīgus praktiskus risinājumus, tostarp politikas atbalstu un papildu finanšu instrumentus, tādējādi stimulējot uzņēmumus investēt ilgtspējīgā aprites ekonomikas rūpniecībā.
4. Ņemot vērā pētījuma mērķus, iegūtie rezultāti ir uzticami un objektīvi atspoguļo lietoto zinātnisko metožu kombinēšanas nozīmīgumu. Šāda veida integrētās analīzes izmantošana ir piemērota, lai salīdzinātu dažādus alternatīvus ražošanas procesus, kas apskatīti darbā.
5. Promocijas darbā iegūtie rezultāti apliecina, ka jebkura atkritumu, atlikumu vai blakusproduktu pārstrāde mazina ietekmi uz klimatu, nodrošina ceļu uz ilgtspējīgu attīstību un veicina produktu ar augstāku pievienoto vērtību attīstību.



Terēza Bezručko dzimusi 1982. gadā Rīgā. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvusi augstāko izglītību ekonomikā (2009), bakalaura grādu vides zinātnē (2020) un maģistra grādu vides inženierijā (2022). Kopš 2008. strādā RTU Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūtā, patreiz ieņemot pētnieces un projektu administratīvās vadītājas amatu. Sniegusi ieguldījumu 76 zinātnisko projektu realizācijā un saņēmusi RTU Goda un RTU Atzinības rakstus par lielu personīgo ieguldījumu universitātes attīstībā. Zinātniskās intereses saistītas ar aprites ekonomiku un rūpniecisko procesu analīzi.