

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte
Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

Jānis VILGERTS
Doktora studiju programmas “Vides zinātne” doktorants

**TRĪSKĀRŠĀS SPIRĀLES PIEEJA BĪSTAMO ATKRITUMU
APSAIMNIEKOŠANAS SISTĒMĀ**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskā vadītāja
Profesore *Dr. habil. sc. ing.*
DAGNIJA BLUMBERGA

RTU Izdevniecība
Rīga 2016

Vilgerts J. Trīskāršās spirāles pieeja
bīstamo atkritumu apsaimniekošanas
sistēmā. – R.: RTU Izdevniecība,
2016. – 42 lpp.

Publicēts saskaņā ar Vides
aizsardzības un siltuma sistēmu
institūta 2016. gada 4. marta
lēmumu, protokols Nr. 62/2016.

**PROMOCIJAS DARBS SAGATAVOTS DOKTORA
GRĀDA IEGŪŠANAI VIDES INŽENIERZINĀTNĒ
RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ.**

Promocijas darbs vides inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiks aizstāvēts 2016. gada 8. septembrī plkst. 14 Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Āzenes ielā 12/1, 607. aud.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Dr. sc. ing. Gatis Bažbauers
Rīgas Tehniskā universitāte

Dr. sc. ing. Oļģerts Nikodemus
Latvijas Universitāte

Dr. sc. ing. Sauļius Vasarevičius
Viļņas Ģedimīna Tehniskā universitāte, Lietuva

APLIECINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Jānis Vilgerts (paraksts)

Datums: 08.07.2016.

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 33 zīmējumi un ilustrācijas, 9 tabulas – kopā 110 lappuses un pielikumi. Literatūras sarakstā ir 150 nosaukumu.

SATURS

Promocijas darba aktualitāte.....	6
Promocijas darba mērķi un uzdevumi	6
Promocijas darba hipotēze.....	6
Pētījuma metodika	7
Promocijas darba zinātniskā nozīme	8
Promocijas darba praktiskā nozīme	8
Promocijas darba struktūra un apraksts	9
Promocijas darba autora pētījumu apskats par trīskāršās spirāles pieeju bīstamo atkritumu apsaimniekošanas sistēmām	10
Pētījumu apskata ievads.....	10
Lai sasniegtu mērķus un apmierinātu sabiedrības vajadzības ilgtspējīgā veidā, šīm iesaistītajām organizācijām ir aktīvi jāsadarbojas	12
Īss izmantoto sadarbības risinājumu apraksts	12
Augstskolu un valsts iestāžu sasaiste, izmantojot statistiskos modeļus..	13
Augstskolu un nozares sasaiste ar eksperimentu metodi	14
Valsts iestāžu un nozares sasaiste ar <i>IPAT</i> identitāti	14
Visu iesaistīto pušu sasaiste ar sistēmdinamiku	15
Pētījuma aprobācija	15
Referāti starptautiskās zinātniskās konferencēs.....	15
Autora publikācijas.....	17
 1. IZPĒTES METODES	19
1.1. Augstskolu un valsts iestāžu sasaiste ar statistiskiem modeļiem.....	19
1.1.1. Bīstamo atkritumu plūsmu prognozēšanas metodikas algoritms	19
1.1.2. Bīstamo atkritumu plūsmu apjoma noteikšanas metodika.....	19
1.2. Augstskolu un nozares sasaiste ar eksperimentu metodi	20
1.2.1. Materiāli un metodes eksperimentiem ar mākslīgi piesārņotu augsni	20
1.2.2. Materiāli un metodes eksperimentiem ar vēsturisko piesārņojumu	21
1.3. Valsts iestāžu un nozares sasaiste ar <i>IPAT</i> identitāti	22
1.4. Visu iesaistīto pušu sasaiste ar sistēmdinamiku.....	22
 2. REZULTĀTI UN PĒTĪJUMA ANALĪZE	24
2.1. Prognozēšanas modelis kā mijiedarbība starp augstskolu un valsts iestādēm.....	24
2.1.1. Bīstamo atkritumu plūsmu prognozēšanas modeļa rezultāti.....	24

2.1.2. Kvantificēšanas modeļa kopsavilkums	25
2.2. Virsmas atbildes metode sasaistei starp augstskolu un nozari	26
2.2.1. Eksperimenta ar mākslīgi piesārņotu augsnes mazgāšanu rezultāti	26
2.2.2. Eksperimentu ar vēsturiski piesārņotu augsni rezultāti	27
2.3. <i>IPAT</i> identitāte starp valsts iestādēm un nozari	28
2.4. Sistēmdinamikas modelis, kas sasaista visas iesaistītās institūcijas	31
2.4.1. Bateriju un akumulatoru modeļa rezultāti	31
2.4.2. Svina–skābes akumulatoru modeļa rezultāti.....	33
Secinājumi	36
Mijiedarbības izpēte starp augstskolām un valsts iestādēm.....	36
Mijiedarbības izpēte starp augstskolām un nozari	37
Mijiedarbības izpēte starp valsts iestādēm un nozari.....	38
Mijiedarbības izpēte starp visām pusēm.....	39

Promocijas darba aktualitāte

Pēdējās desmitgadēs sabiedrības un reģionu ilgtspējīga attīstība ir bijusi ļoti aktuāla. Bīstamo vielu nekontrolēta apsaimniekošana var izraisīt ekosistēmu piesārņošanu un kaitēt cilvēka veselībai. Tāpēc autors vēlas pierādīt, ka atbilstoša bīstamo atkritumu apsaimniekošanas stratēģija ir viena no galvenajām ilgtspējīgas attīstības komponentēm.

Bīstamo atkritumu apsaimniekošanā ir iesaistītas dažādas puses: uzņēmumi, valsts un pašvaldības iestādes un pētniecības organizācijas. Tie visi ir vienas sistēmas elementi, kas veic dažādas funkcijas, lai gan ir arī neizbēgami savstarpēji saistīti.

Tas nozīmē, ka šo dažādo pušu rīcība un savstarpējā mijiedarbība var pozitīvi ietekmēt visu sistēmu vai arī izveidot tādu sistēmu, kur labākajai praksei un inovācijām nav iespējas attīstīties. Dažādo pušu mijiedarbība var dot pozitīvu rezultātu, bet savstarpējās saiknes trūkums var izraisīt stagnāciju, jo inovācijas nerealizējas institucionālā vakuumā.

Valsts un pašvaldības iestāžu, pētniecības organizāciju un ražošanas nozaru mijiedarbības teorija ir zināma kā trīskāršās spirāles pieeja. Šī pieeja nosaka trīspusējas augstskolu, nozares un valdības attiecības, lai virzītos uz zināšanu sabiedrību un inovācijām.

Promocijas darba mērķi un uzdevumi

Šā darba mērķis ir pārnest un aprobēt trīskāršās spirāles pieeju bīstamo atkritumu apsaimniekošanas jomā Latvijā.

Lai sasniegtu mērķi, ir noteikti šādi uzdevumi:

1. sasaistīt augstskolas un valsts iestādes, izveidojot jaunu prognozēšanas un apjoma noteikšanas modeli bīstamo atkritumu plūsmām;
2. sasaistīt augstskolas un nozari, izmantojot gadījumu izpēti un eksperimentu metodi;
3. sasaistīt valsts iestādes un nozari, izmantojot jaunu metodi, kas balstīta uz *IPAT* identitāti;
4. izmantot visaptverošu pieeju, lai pētītu integrētu augstskolas, nozares un valdības mijiedarbību, izmantojot sistēmdinamikas modelēšanas rīku.

Promocijas darba hipotēze

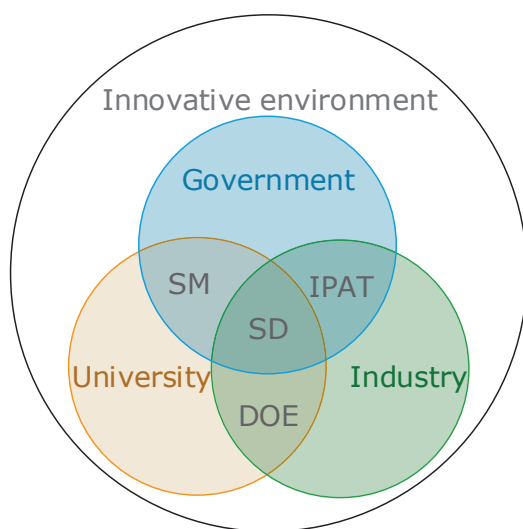
Autors piedāvā hipotēzi, ka trīskāršās spirāles pieeja var uzlabot apsaimniekošanas prakses un institucionālo un pētniecības kapacitāti, kā arī veicināt inovāciju izplatību bīstamo atkritumu apsaimniekošanas nozarē.

Zinātniskais pētījums ir veltīts vienota mērķa sasniegšanas ierosmes, kuru iniciē atšķirīgi avoti, izpētei. Mērķis ir mazināt vides piesārņojumu ar videi kaitīgām bīstamo atkritumu emisijām. Ierosmes avoti ir trīs:

- valdība, kas nosaka normatīvos lielumus konkrētai vides piesārņojuma komponentei noteiktā laika periodā;
- bīstamo atkritumu apsaimniekotājs, kurš cenšas samazināt vides piesārņojuma komponenti noteiktā laika periodā;
- zinātniskās institūcijas, kas sadarbojas gan ar bīstamo atkritumu apsaimniekotāju, lai rastu tehnoloģiskos risinājumus konkrētā mērķa sasniegšanai, gan arī ar valdības institūcijām, lai attīstītos atbilstoši inovāciju attīstības līmenim.

Pētījuma metodika

Lai pārbaudītu hipotēzi, tika izmantotas dažādas pētniecības metodes. Iespējams nodalīt divas šādas metodes: statisko un dinamisko. Izmantoto būtiskāko un svarīgāko metožu sadalījums trīskāršās spirāles pieejā ir parādīts 1. attēlā.



1. att. Trīskāršās spirāles izmantošanas metodes bīstamo atkritumu apsaimniekošanas sistēmā.

Izpētes rezultātu ilustrācijai izvēlētas šādas metodes: (1) statistiski modeļi (SM) pētījumiem augstskolu un valdības sasaistīšanai; (2) eksperimenti (DOE) pētījumiem augstskolu un nozares sasaistīšanai; (3) IPAT identitāte pētījumiem valdības un nozares sasaistīšanai, lietojot (4) sistēmdinamiku (SD) pētījumiem visu iesaistīto pušu sasaistīšanai. Atbilstošā rīka izvēle bija atkarīga no izpētes mērķa, uzdevuma sarežģītības, pieejamajiem datiem un izpētes robežām, kā arī īpašiem, no esošās situācijas atkarīgiem ierobežojumiem.

Lai precīzāk ilustrētu trīskāršās spirāles lietojuma nepieciešamību, promocijas darba izstrādes laikā tika pārbaudītas visu trīs līmeņu institūciju savstarpējā

mijiedarbība, kas ietver atšķirīgu pētījumu metožu lietojumu plašākā diapazonā, arī – datu monitoringa (DM) izmantošanu.

1. tabula

Izpētes metodikas lietojuma paplašinātā matrica

Institūciju saite	Metodikas				
	SM	DOE	DM	IPAT	SD
Valdība–uzņēmums	×		×	×	×
Valdība–zinātniskā institūcija	×		×		
Zinātniskā institūcija–uzņēmums	×	×	×		
Vadība–zinātniskā institūcija–uzņēmums	×				×

Metožu izvēle balstās uz to būtiskuma vērtējumu, ko identificē ar iegūto rezultātu palīdzību.

Promocijas darba zinātniskā nozīme

Tika veikts komplekss pētījums par iespēju uzlabot bīstamo atkritumu apsaimniekošanas praksi un institucionālo un pētniecības kapacitāti, kā arī par inovāciju izplatības veicināšanu bīstamo atkritumu apsaimniekošanas nozarē.

Šis pētījums ir balstīts uz trīskāršās spirāles pieejas izmantošanu bīstamo atkritumu apsaimniekošanas sistēmā Latvijā. Tika identificētas jaunas bīstamo atkritumu apsaimniekošanas prakses metodes.

Šīs metodes tika pārbaudītas, izmantojot trīskāršās spirāles pieeju un izveidojot četras atšķirīgas izpētes jomas: augstskolu un valsts un pašvaldību iestāžu mijiedarbība tika pētīta, izstrādājot jaunus bīstamo atkritumu plūsmu prognozēšanas un kvantificēšanas modeļus; augstskolu un nozares mijiedarbība tika pētīta, veicot gadījumu pētījumus un izmantojot eksperimentu metodi; valsts un pašvaldības iestāžu un nozares mijiedarbība tika pētīta, piedāvājot jaunu rīku, kas balstās uz *IPAT* identitāti; visu pušu mijiedarbīb tika aprakstīta un modelēta, izmantojot sistēmdinamikas metodi. Norādītās metodes ir validētas dažādos praktiskos pētījumos Latvijā un aprakstītas šajā darbā.

Promocijas darba praktiskā nozīme

Efektīvāku bīstamo atkritumu apsaimniekošanas praksi pētījumi ir būtisks solis uz priekšu, lai nodrošinātu ilgtspējīgu attīstību, uzlabotu ekosistēmu kvalitāti un novērstu riskus cilvēka veselībai. Trīskāršās spirāles pieejas izmantošanai bīstamo atkritumu apsaimniekošanas nozarē Latvijā ir praktiska nozīme gan valsts, gan reģionālā un vietējā līmenī. Izstrādātās metodes un iegūtie rezultāti var tikt pārnesti, lai uzlabotu bīstamo atkritumu apsaimniekošanas sistēmu darba rezultātus.

Bīstamo atkritumu plūsmu prognozēšanas un kvantificēšanas modeļus jo īpaši uzlabo pētījumi par augstskolu un valsts un pašvaldību iestāžu mijiedarbību, ļaujot izvairīties no pārlietu lielas bīstamo atkritumu apsaimniekošanas kapacitātes īstenošanas.

Augstskolu un nozares mijiedarbībā piedāvātie modeļi ļauj uzlabot zināšanu pārnesi un palielina jauno produktu konkurētspēju.

Piedāvātais rīks, lai uzlabotu valsts un pašvaldību iestāžu un nozares mijiedarbību, ļauj virzīties uz industriālo simbiozi un bezatkritumu prakses ieviešanu.

Sistēmdinamikas modeļi, kas piedāvāti attiecībā uz visu trīs pušu mijiedarbību, ļauj aplūkot bīstamo atkritumu nozari visaptverošā veidā un modelēt dažādu iekšējo un ārējo faktoru un politikas rīku ietekmi. Izmantojot šos modeļus un trīskāršās spirāles konceptu, ir iespējams stiprināt virzību uz ilgtspējīgas bīstamo atkritumu apsaimniekošanas prakses izmantošanu.

Promocijas darba struktūra un apraksts

Promocijas darbs ir balstīts uz astoņām tematiski vienotām zinātniskām publikācijām. Šie raksti ir publicēti dažādos zinātniskos periodiskos izdevumos un ir pieejami zinātniskās informācijas krātuvēs un starptautiskās citēšanas informācijas datubāzēs. Publikāciju mērķis ir paplašināt pētījumu diapazonu par bīstamo atkritumu apsaimniekošanu.

Promocijas darbā ir ievads un trīs nodaļas:

1. literatūras avotu pārskats;
2. pētniecības metodes;
3. to rezultāti un diskusija.

Ievadā tiek definēti pētījuma mērķi un uzdevumi, izskaidrota tā struktūra un sniegts īss autora pētījumu apraksts, kas ietver informāciju gan par autora galvenajām publikācijām, gan par citām publikācijām par bīstamo atkritumu apsaimniekošanas analīzi.

1. nodaļā tiek sniegts literatūras avotu pārskats, un tas pievēršas nepieciešamajiem pētījumiem par bīstamo atkritumu apsaimniekošanas sistēmas aspektiem un to uzlabošanu, kā apskatīts pamatpublicācijās. 2. nodaļā aprakstīta galvenajās publikācijās pētīto jautājumu metodika. Pētījumā iegūtie rezultāti un to analīze apskatīti 3. nodaļā. Darba nobeigumā tiek piedāvāti secinājumi.

Promocijas darba autora pētījumu apskats par trīskāršās spirāles pieeju bīstamo atkritumu apsaimniekošanas sistēmām

Pētījumu apskata ievads

Bīstamo atkritumu apsaimniekošanas sistēma ir neatņemama vides aizsardzības un ekonomikas/sabiedrības infrastruktūras un atkritumu apsaimniekošanas daļa.

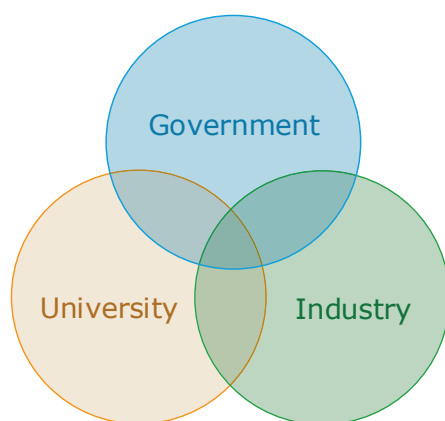
Pārejas ekonomikās bīstamo atkritumu apsaimniekošana parasti bija tikai valdības problēma. Tas bija dabiski, jo bīstamo atkritumu problemātika, pirmkārt, bija sabiedrības iniciatīva un tikai valdības rīcībā bija visi nepieciešamie politikas instrumenti, lai izveidotu atbilstošu sistēmu.

Izveides laikā valdībai ir galvenā institucionālā loma – tā nosaka likumdošanas satvaru bīstamo atkritumu apsaimniekošanas jomā un nodrošina galvenās infrastruktūras izveidošanu. Atbilstoši likumdošanas prasībām šajos procesos tika iesaistīta sabiedrība, it īpaši – augstskolu un nozares pārstāvji. Iesaistīto institūciju mijiedarbība ir statisks modelis.

Personāla atkārtota aprīte starp valsts pārvaldi, nozares uzņēmumiem un universitātēm ir plaši izplatīta. Visam procesam jābūt inovatīvam – tiesiskā satvara izveide atkritumu apsaimniekošanai, t. i., *PPP* (piesārņotājs maksā) principa ieviešana, *PRS* (ražotāja atbildības sistēmas) un galvenās bīstamo atkritumu apsaimniekošanas infrastruktūras izveide un sociāli ekonomisko apstākļu nodrošināšana bīstamo atkritumu apsaimniekošanas nozarei un saistītajām organizācijām, piemēram, nozares asociācija, pētniecības iestādes utt.

Pēdējās desmitgades laikā nozare ir kļuvusi neatkarīgāka no valsts iestādēm, augstskolas ir kļuvušas patstāvīgākas un darbību ir sākuši daudzi jauni nevalstiskie uzņēmumi. Visi šie faktori arī ir ietekmējuši institucionālo mijiedarbību, un statistiskais modelis ir pārveidojies par tā saukto *laissez-faire* modeli. Šajā modelī visas institūcijas (iestādes) ir neatkarīgas, un tām ir skaidri definētas funkcijas: valdībai jānodrošina ilgtspējīga sabiedrības attīstība, izmantojot politiku instrumentus, pētniecības iestādēm jāveic pamatpētījumi un jānodrošina cilvēkresursi, un nozarei jāveido uzņēmumi, kas darbojas tirgū, lai radītu ekonomisku labumu saviem īpašniekiem un sabiedrībai kopumā.

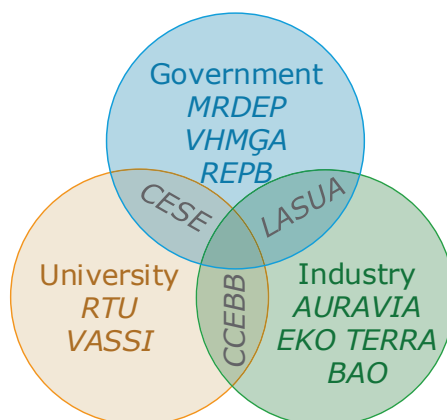
Trīskāršā spirāle ir platforma «institūciju veidošanai» un jaunu organizāciju formātu izveidei, lai institūciju sadarbība kļūtu efektīvāka un tiktu veicinātas inovācijas kā trīskāršās spirāles elementu sintēze (skat. 2. attēlu).



2. att. Iesaistīto institūciju mijiedarbība trīskāršās spirāles modelī.

Trīskāršā spirāle uztver šo lomu un attiecību transformāciju, katrai spirāles daļai savijoties dažādās attiecībās vienai pret otru. *Laissez-faire* trīskāršās spirāles gadījumā nozare darbojas kā virzītājspēks, bet pārējās divas spirāles daļas ir kā atbalsta struktūras; statiskajā režīmā valdībai ir vadošā loma, un tā nosaka darba kārtību akadēmiskajām aprindām un nozarei. Spirāles reti kad ir vienlīdzīgas; viena parasti kalpo par motivējošo faktoru citām.

Pašlaik bīstamo atkritumu apsaimniekošanas sistēmā iesaistītās organizācijas var tikt iekļautas trīskāršās spirāles modelī, kā parādīts 3. attēlā.



3. att. Trīskāršās spirāles modelis bīstamo atkritumu apsaimniekošanas sistēmā iesaistītajām institūcijām Latvijā.

Valsts iestādes: VARAM – Vides aizsardzības un reģionālās attīstības ministrija, RVP – Reģionālā vides pārvalde, LVĢMC – Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģija centrs

Augstskolas: RTU – Rīgas Tehniskā universitāte, VASSI – Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

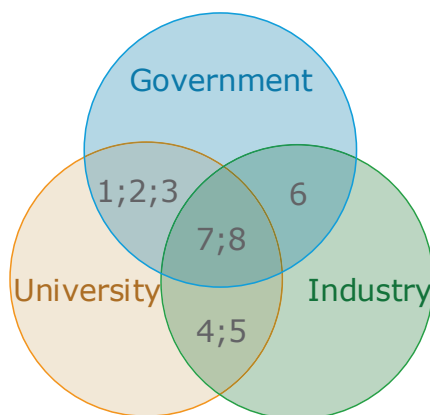
Nozare: SIA *AURAVIA LATVIA*, SIA *EKO TERRA*, AS *BAO*

Atvasinātās organizācijas: VZIP – Vides zinātnes un izglītības padome, VBBKC – Vides, biotehnoloģiju un bioenerģijas kompetences centrs, LASUA – Latvijas Atkritumu saimniecības uzņēmumu asociācija

Lai sasniegtu mērķus un apmierinātu sabiedrības vajadzības ilgtspējīgā veidā, šīm iesaistītajām organizācijām ir aktīvi jāsadarbojas.

Īss izmantoto sadarbības risinājumu apraksts

Promocijas darbā piedāvātais sadarbības risinājums ir balstīts astoņās zinātniskās publikācijās; šo publikāciju aktualitāte ir shematiski atainota 6. attēlā.



4. att. Trīskāršās spirāles modelis zinātniskajām publikācijām, kas izstrādātas bīstamo atkritumu apsaimniekošanai Latvijā (numurs atbilst zinātniskās publikācijas numuram 2. tabulā).

2. tabula

Promocijas darbā izmantotās zinātniskās publikācijas, kas sagatavotas bīstamo atkritumu apsaimniekošanai Latvijā, lai pētītu trīskāršās spirāles pieeju

Pētītā mijiedarbība	Nr.	Publikācijas nosaukums
Augstskola un valsts iestāde	1	Bīstamo atkritumu plūsmu prognozēšanas metodika
	2	Bīstamo atkritumu daudzuma plānošanas prognozēšanas modelis
	3	Bīstamo atkritumu plūsmu apjoma noteikšanas metodika: gadījuma izpēte Baltijas valstīs (Igaunija, Latvija, Lietuva)

Augstskola un nozare	4	Hidrofobu vielu augsnē sanācības ar bioloģiskas izcelsmes virsmaktīvām vielām skrīninga eksperimentu pilna faktoriālā plānošana.
	5	Vēsturiski piesārņotas daudzfrakciju augsnes sanācija ar bioloģiskas izcelsmes virsmaktīvām vielām.
Valsts iestāde un nozare	6	Uz <i>IPAT</i> un <i>Kaya</i> identitāti balstīta sadalīšanās analīze bīstamo atkritumu plūsmas izvērtēšanai uzņēmumā
Augstskola, valsts iestāde un nozare	7	Sistēmdinamikas modelis bīstamo atkritumu apsaimniekošanas sistēmas izvērtēšanai. Gadījuma pētījums: izlietotās baterijas un akumulatori
	8	Svina–skābes akumulatoru ilgtspējīgas savākšanas un pārstrādes izvērtējums sistēmdinamikas modelēšanas perspektīvā

Promocijas darba turpinājumā autors atsaucas uz šiem astoņiem pamatpētījumiem – 1., 2., 3., 4., 5., 6., 7 un 8. publikāciju atbilstoši 2. tabulā norādītajam.

Augstskolu un valsts iestāžu sasaiste, izmantojot statistiskos modeļus

Bīstamo atkritumu plūsmu prognozēšanas metodikas algoritms

Ir izstrādāts jauna veida indikators, kas balstīts uz bīstamo atkritumu rašanās intensitāti *NACE* 2. red. nozarēs un mājāsaimniecībās (1. publikācija). Šis indikators ļauj novērtēt bīstamo atkritumu rašanās intensitāti, ņemot vērā to, ka šādu atkritumu ražošanas ātruma pieaugums rada lielāku kopējo bīstamo atkritumu daudzumu. Piedāvāto indikatoru iespējams izmantot, lai prognozētu bīstamo atkritumu intensitātes attīstību nākotnē vienā nozarē vai valstī kopumā. Indikatoru iespējams izmantot atsevišķu ražotāju, viena profila uzņēmumu un dažādu valstu vienu un to pašu nozaru salīdzinošai analīzei. Turklāt šis indikators ļauj novērtēt bīstamo atkritumu apsaimniekošanas sistēmas pasākumus un kontrolēt bīstamo atkritumu ražošanas intensitātes attīstību.

Izstrādātā bīstamo atkritumu plūsmu prognozēšanas metodikai ir seši moduļi: vēsturiskie dati, pieņēmumi, indikatoru izvēle, datu apstrāde un datu analīze. Datu analīze tika veikta (2. publikācija) ar *STATGRAPHICS* rīkiem – ieejas dati bija balstīti uz bīstamo atkritumu intensitāti Saimniecisko darbību statistiskās klasifikācijas Eiropas Kopienā (*NACE* 2. red.) nozarēs un mājāsaimniecībās.

Bīstamo atkritumu plūsmu apjoma noteikšanas metodika

Izmantojot izstrādāto prognozēšanas modeli, tika noteikta un aprakstīta bīstamo atkritumu daudzuma atkarība no IKP vērtībām (3. publikācija). Apjoma noteikšanas modeļa rezultāti rāda, ka daudzfaktoru lineārās regresijas analīzi iespējams izmantot neatkarīgu mainīgo, kas ietekmē bīstamo atkritumu daudzumu, analīzei. Balstoties uz datu analīzi un literatūras avotu apskatu, regresijas analīzei tika izvēlēti pieci neatkarīgi mainīgie: IKP, kas izteikts miljonos pirkjspējas līmeņa (*PPS*), primārais energopatēriņš, kas izteikts tonnās naftas ekvivalenta (*TOE*), kopējais valsts iedzīvotāju skaits, uzņēmējdarbības sektora izdevumi izpētei un attīstībai (*R&D*) un kā dzīves līmeņa indikators valstī – pirkjspējas līmenis uz vienu iedzīvotāju. Nākotnē piedāvātos neatkarīgos mainīgos ir iespējams izmantot analīzei un bīstamo atkritumu daudzuma prognozēšanas rīka izstrādei.

Augstskolu un nozares sasaiste ar eksperimentu metodi

Materiāli un metodes eksperimentiem ar mākslīgi piesārņotu augsni

4. publikācijā aprakstītie eksperimentālie testi parādīja, ka mazgāšanas novērtējumam ir augsts ticamības līmenis, tāpēc tie ir īpaši piemēroti dažādu virsmaktīvo vielu un to maisījumu izpētei un optimizācijai. Izstrādātā skrīninga metodika tika izmantota, lai izvērtētu mijiedarbību starp atbildes reakcijas mainīgo un procesa mainīgo. Rezultāti liecināja, ka visiem mainīgajiem bija būtiska ietekme uz attīrīšanas efektivitāti ar ticamības līmeni 95 %.

Materiāli un metodes eksperimentiem ar vēsturisko piesārņojumu

Tika veikta vēsturiski piesārņotu augšņu bioloģiskā sanācija (5. publikācija), augsnes paraugiem ar nelielu un vidēju naftas piesārņojumu izmantojot bioloģiskas izcelsmes anjonu glikolipīdu virsmaktīvo vielu maisījumu. Pētījuma rezultāti liecināja, ka «plāksnīšu» testu izmantošanai, lai izveidotu jaunus augsnes attīrīšanas līdzekļus un izvēlētos atbilstošas bioloģiskas izcelsmes virsmaktīvās vielas pētījuma problēmas risināšanai, ir augsts potenciāls. «Plāksnīšu» testi varētu dot iespēju inženieriem strādāt ātrāk un vienkāršāk. Tālākos pētījumos varētu izmantot arī citus bioloģiskas izcelsmes virsmaktīvo vielu šķīdumus ar mērķi atdalīt būtisku naftas piesārņojumu.

Valsts iestāžu un nozares sasaiste ar IPAT identitāti

Kopējās bīstamo atkritumu plūsmas izmaiņas, ko rada pētāmo faktoru relatīvā ietekme, novērtēšanas metodika uzņēmumu līmenī tiek piedāvāta 6. publikācijā, un šie faktori ir bīstamo atkritumu intensitāte, izmantoto materiālu intensitāte un uzņēmumā izlietoto izejmateriālu daudzums. Bīstamo atkritumu plūsma tiek tālāk

sadalīta vēl detalizētāk, balstoties uz atkārtoti izmantoto, pārstrādāto, reģenerēto un apglabāto bīstamo atkritumu plūsmu definīciju hierarhiju. Izmantojot piedāvāto metodoloģiju, iespējams veikt gadījumu pētījumus uzņēmumu līmenī, lai pētītu kopējo izmaiņu cēloņus, piedāvātu prognozēšanas modeli nākotnes tendencēm un noteiktu politiku rīku izmantošanas punktus intervences veikšanai ar mērķi samazināt radīto bīstamo atkritumu daudzumu.

Visu iesaistīto pušu sasaiste ar sistēmdinamiku

Pētāmajai nozarei ir izveidots sistēmdinamikas modelis ar trīs atgriezeniskās saites cīlpām. Lai nodrošinātu modeļa atbilstību, tika veikti strukturāli validācijas testi. Šis darbs demonstrē, ka inovāciju izplatības modeļu ieviešana izlietoto bateriju un akumulatoru jomā var samazināt vides piesārņojumu. Tomēr atbilstoši izstrādātajam sistēmdinamikas modelim ir jāmodelē, jāizvērtē un jāapspriež arī scenāriji, kuros iespējama arī cita politika.

Izstrādātais svina-skābes akumulatoru apsaimniekošanas modelis rāda, kā notiek pāreja no neformālas savākšanas sistēmas prakses uz formālu; tas arī izgaismo struktūru, dinamisko uzvedību, atgriezenisko saiti, aizkavēšanos un virzītājspēkus, kas pārveido šo modeli. Politikas veidotāji var izmantot šo modeli kā lēmumu atbalsta sistēmu un zinātnieki – kā platformu tālākai izpētei par dažādu neformālu atkritumu apsaimniekošanas praksi dinamiku. Modeli ir iespējams paplašināt tālāk, iekļaujot papildu gadījumu pētījumus. Turpmāk pētījumus iespējams veikt par izmaksām, kas saistītas ar specifisku politiku pasākumu ieviešanu nozarē.

Pētījuma aprobācija

Promocijas darbs ir aprobēts 11 starptautiskās zinātniskās konferencēs, publicēts 10 nesaīsinātu zinātnisku rakstu un četri kopsavilkumi starptautiskos zinātniskos žurnālos un konferenču materiālu krājumos.

Referāti starptautiskās zinātniskās konferencēs

1. Rīgas Tehniskās universitātes 150 gadu jubilejai veltītā 53. starptautiskā zinātniskā konference un 1. pasaules inženieru un RPI/RTU absolventu kongresa Enerģētikas un elektrotehnikas sekcijas Vides un klimata tehnoloģiju apakšsekcija, 10-11.10.2012, Rīga, Latvija.
2. Vilgerts J., Timma L., Blumberga D. A Methodology for Forecasting Hazardous Waste Flows // 7th International Conference on the Impact of Environmental Factors on Health «Environmental Health Risk VII» 23–25.04.2013, Budapest, Hungary.

3. Vilgerts J., Timma L., Blumberga D. Application of System Dynamic Model for the Composting of Petroleum Contaminated Soil under Various Policies // 4th International Conference «Biosystems Engineering 2013» 9–10.05.2013, Tartu, Estonia.
4. Vilgerts J., Timma L., Blumberga D. A Forecast Model for Projecting the Amount of Hazardous Waste // International Conference on Waste Management (ICWM 2013) –13.–14.05.2013, Copenhagen, Denmark.
5. Timma L., Sams K., Valtere S., Vilgerts J., Blumberga D. Full Factorial Design on Screening Experiments for Biosurfactant Enhanced Remediation of Hydrophobic Substances in Soil // 4th International Conference on Environmental Engineering and Applications – 24.–25.08.2013., Singapore, Republic of Singapore.
6. Vilgerts J., Timma L., Blumberga D. A methodology for quantification of hazardous waste flows: case study for the Baltic states (Estonia, Latvia, Lithuania) // 13th The International Conference on Environmental, 05.–07.09.2013, Athens, Greece.
7. Timma L., Sams K., Valtere S., Vilgerts J., Blumberga D. Biosurfactant-enhanced remediation of historically contaminated, multiple fraction soil // 2nd Edition of the International Conference and Exhibition WASTES: Solutions, Treatments and Opportunities, 11.–13.09.2013, Braga, Portugal.
8. Vilgerts J., Timma L., Romagnoli F., Blumberga A., Blumberga D. A System Dynamics Model for the Assessment of Hazardous Waste Management System. Case Study: Waste Batteries and Accumulators // 8th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, 22.–27.09.2013, Dubrovnik, Croatia.
9. Timma L., Blumberga D., Vilgerts J. Index decomposition analysis of energy sector in Latvia // 6th International Conference on Applied Energy, 30.05.–02.06.2014, Taipei, Taiwan.
10. Timma L., Vilgerts J., Vanaga R., Kļavenieks K., Blumberga D. Decomposition analysis based on IPAT and Kaya identity for assessment of hazardous waste flow within enterprise // 27th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy systems, 15.–19.06.2014. Turku, Finland.
11. Blumberga A., Timma L., Vilgerts J., Blumberga D. Assessment of sustainable collection and recycling policy of lead-acid accumulators from the perspective of system dynamics modelling// 17th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction PRES 2014, 23.–27.08.2014., Prague, Czech Republic.

Autora publikācijas

1. Vilgerts J., Timma L., Blumberga D. Management Strategy for Hazardous Waste // Riga Technical University 53rd International Scientific Conference dedicated to the 150th anniversary and The 1st Congress of World Engineers and Riga Polytechnical Institute/RTU Alumni Section Power and Electrical Engineering Subsection Environmental and Climate Technologies Book of Abstracts (ISBN:9789934103605)– 2012. g. – 11.–12. oktobris. – 179. lpp.
2. Vilgerts J., Timma L., Blumberga D. A Methodology for Forecasting Hazardous Waste Flows // 7th International Conference on the Impact of Environmental Factors on Health «Environmental Health Risk VII»: WIT transactions (ISSN: 1747-4485) – 2013. g. – 227.–236. lpp. DOI: 10.2495/EHR130191
3. Vilgerts J., Timma L., Blumberga D. A Forecast Model for Projecting the Amount of Hazardous Waste // World Academy of Science, Engineering and Technology (ISSN: 2010-376X) – 2013. g. – 502.–505. lpp.
4. Vilgerts J., Timma L., Blumberga D. Application of System Dynamic Model for the Composting of Petroleum Contaminated Soil under Various Policies // Agronomy Research (ISSN: 1406-894X) – 2013. g. – 11. sēj. – 391.–404. lpp.
5. Vilgerts J., Timma L., Blumberga D. A methodology for quantification of hazardous waste flows: case study for the Baltic states (Estonia, Latvia, Lithuania) // Proceedings of the 13th International Conference on Environmental Science and Technology 5–7 September 2013, Athens, Greece (ISBN 9789607475510) – 2013. g. – 371. lpp.
6. Vilgerts J., Timma L., Blumberga D. A methodology for quantification of hazardous waste flows: case study for the Baltic States (Estonia, Latvia, Lithuania) // Proceedings of the International Conference on Environmental Science and Technology (ISSN: 1106-5516) – 2013. g. – paper Nr. 0537 – 8. lpp.
7. Vilgerts J., Timma L., Romagnoli F., Blumberga A., Blumberga D. A System Dynamics Model for the Assessment of Hazardous Waste Management System. Case Study: Waste Batteries and Accumulators // Book of Abstracts of 8th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (ISSN: 1847-7178) – 2013.g. – Paper ID: SDEWES2013.0467 – 1. lpp.

8. Vilgerts J., Timma L., Romagnoli F., Blumberga A., Blumberga D. A System Dynamics Model for the Assessment of Hazardous Waste Management System. Case Study: Waste Batteries and Accumulators // Digital Proceedings of 8th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (ISSN: 1847-7178) – 2013. g. – paper ID: 0508 – 12. lpp.
9. Timma L., Sams K., Valtere S., Vilgerts J., Blumberga D. Biosurfactant-enhanced remediation of historically contaminated, multiple fraction soil // Book of Abstracts of the International Conference and Exhibition WASTES: Solutions, Treatments and Opportunities (ISBN: 9789899742949) – 2013.g. – 403.–404. lpp.
10. Timma L., Sams K., Valtere S., Vilgerts J., Blumberga D. Biosurfactant-enhanced remediation of historically contaminated, multiple fraction soil // International Conference and Exhibition WASTES «Solutions, Treatments and Opportunities»: Book of Proceedings (ISSN: 2183-0568) – 2013. g. – 2.sēj. – 721.–726. lpp.
11. Timma L., Sams K., Valtere S., Vilgerts J., Blumberga D. Full Factorial Design on Screening Experiments for Biosurfactant Enhanced Remediation of Hydrophobic Substances in Soil // Journal of Clean Technologies (ISSN: 1793-821X) – 2014. g. – 51.–56. lpp. DOI: 10.7763/JOCET.2014.V2.90.
12. Timma L., Blumberga D., Vilgerts J. Index decomposition analysis of energy sector in Latvia // Energy Procedia (ISSN: 1876-6102) – 2014.g. – 61.sēj. – 2180.–2183. lpp. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.12.104.
13. Blumberga A., Timma L., Vilgerts J., Blumberga D. Assessment of sustainable collection and recycling policy of lead-acid accumulators from the perspective of system dynamics modelling// Chemical Engineering Transactions (ISBN: 978-88-95608-30-3, ISSN: 2283-9216) – 2014. – 39. sēj. – 649.–654. lpp. DOI: 10.3303/CET1439109.
14. Timma L., Vilgerts J., Vanaga R., Kļavenieks K., Blumberga D. Decomposition analysis based on IPAT and Kaya identity for assessment of hazardous waste flow within enterprise // 27th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy systems, Turku, Finland – 6. lpp.

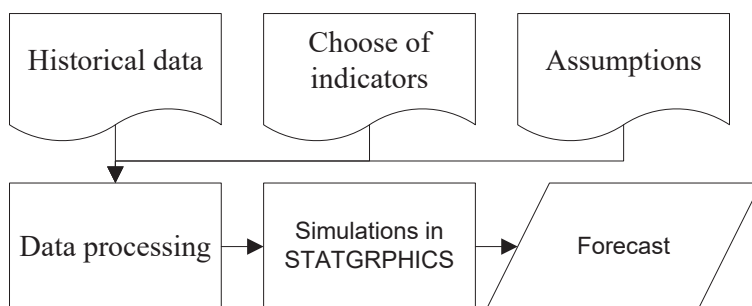
1. IZPĒTES METODES

1.1. Augstskolu un valsts iestāžu sasaiste ar statistiskiem modeļiem

Šajā nodaļā ir iekļauts bīstamo atkritumu plūsmu prognozēšanas un apjoma noteikšanas metožu apskats, un tā atbilst 1., 2. un 3. publikācijas metodikas sadaļai.

1.1.1. Bīstamo atkritumu plūsmu prognozēšanas metodikas algoritms

Izstrādātajai bīstamo atkritumu plūsmu prognozēšanas metodikai ir seši moduļi: vēsturiskie dati, pieņēmumi, indikatoru izvēle, datu apstrāde un datu analīze. Piedāvātajā algoritmā, izmantojot vēsturiskos datus, ir iespējams paredzēt bīstamo atkritumu plūsmas dažādās nozarēs (skat. 7. attēlu).



7. att. Metodikas algoritms.

Datu analīze tika veikta ar *STATGRAPHICS* rīkiem – ieejas dati bija balstīti uz bīstamo atkritumu intensitāti Saimniecisko darbību statistiskās klasifikācijas Eiropas Kopienā (*NACE* 2. red.) nozarēs un mājāsaimniecībās.

1.1.2. Bīstamo atkritumu plūsmu apjoma noteikšanas metodika

Kā atkarīgais mainīgais viena gada laikā no 1999. līdz 2009. gadam tika apskatīts saražotais bīstamo atkritumu daudzums. Eiropas Komisijas [2] ziņojuma 1. daļa tika izmantota kā datu avots saražotā bīstamo atkritumu daudzuma noteikšanai.

Balstoties uz datu analīzi un literatūras avotu apskatu, regresijas analīzei tika izvēlēti pieci neatkarīgie mainīgie:

- IKP izteikts miljonos pirktspējas līmeņa (*PPS*);
- primārais energopatēriņš izteikts tonnās naftas ekvivalenta (*TOE*);
- kopējais valsts iedzīvotāju skaits;
- uzņēmējdarbības sektora izdevumi izpētei un attīstībai (*R&D*);
- kā valsts dzīves līmeņa indikators – pirktspējas līmenis uz vienu iedzīvotāju.

Lai iegūtu empīrisku sakarību modeli starp izvēlētajiem neatkarīgajiem un atkarīgajiem mainīgajiem, tika piemērota regresijas analīzes metode. Regresijas analīze ir statistiska metode attiecību pētīšanai starp vienu vai vairākiem atbildes reakcijas mainīgajiem (parasti saukti par atkarīgajiem mainīgajiem) un prediktoriem (saukti arī par neatkarīgajiem mainīgajiem). Analīzes veikšanai tika izmantota daudzfaktoru lineārās regresijas analīze, jo šī metode ļauj modelī iekļaut vairāk nekā vienu neatkarīgo mainīgo.

Daudzfaktoru lineārās regresijas vispārējā formula:

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \dots + \alpha_n x_n + \varepsilon, \quad (1)$$

kur y ir atkarīgais mainīgais, $x_1, \dots, x_n$ ir neatkarīgie mainīgie, $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n$ ir regresijas vienādojuma koeficienti un ε – kļūdas lielums, kas atbilst normālā sadalījuma likumam. Daudzfaktoru lineārās regresijas analīzes priekšrocības ietver kolinearitāti, dispersijas inflāciju, galējo vērtību un nozīmīgu galējo vērtību noteikšanu; tā arī ļauj grafiski parādīt regresijas analīzes diagnozi.

1.2. Augstskolu un nozares sasaiste ar eksperimentu metodi

Šī nodaļa sniedz ieskatu eksperimentos ar bioloģiskas izcelsmes virsmaktīvajām vielām izmantotajās metodēs, un tā atbilst 4. un 5. publikācijas metodoloģiskajai sadaļai.

1.2.1. Materiāli un metodes eksperimentiem ar mākslīgi piesārņotu augsni

Pētījumā tika analizēta mijiedarbība starp trīs neatkarīgiem mainīgajiem: vides temperatūra ($^{\circ}\text{C}$), kontaklaiks ar bioloģiskas izcelsmes virsmaktīvās vielas atšķaidījumu (minūtēs) un šīs vielas koncentrācija mazgāšanas šķīdumā (masas procenti ($\text{wt}\%$)). Vairākos laboratorijas testos tika eksperimentāli iegūta tīrīšanas efektivitāte (%) kā atbildes reakcija (atkarīgais mainīgais).

Pētījuma nolūkiem darbam ar eksperimentu datiem tika izvēlēta faktoriālā analīze, jo tā ļauj noteikt faktorus ar vislielāko ietekmi uz procesu. Skrīningam tika izvēlēta pilna faktoriāla analīze ar $2^k + k$ atkārtojumiem, kur k ir mainīgo skaits. Pilns faktoriāls skrīnings ietver atkārtojumus, izmantojot visas iespējamās katra mainīgā kombinācijas, ņemot vērā tā noteiktās augšējās un apakšējās robežas (skat. 3. tabulu). Matricai tika pievienoti papildu viduspunkti (trīs eksperimenti vienādos apstākļos) – skat. 3. tabulu.

3. tabula

Eksperimenta matrica

Parametrs	Augšējā robeža	Apakšējā robeža	Viduspunkts
Temperatūra, °C	+35	+30	+32
Kontaktslaiks, min	15	5	10
Biovirsmaktīvās vielas koncentrācija, % (masas)	0,3	0,1	0,2

Modeļa validitāti apliecina vērtību analīze *ANOVA* tabulā. Prognozes līmenis ir noteikts kā 95,0 %. Tika izmantots interaktīvais statistikas datu analīzes rīks *STATGRAPHICS Centurion 16.1.15*, lai izveidotu faktoriālā skrīninga modeli.

1.2.2. Materiāli un metodes eksperimentiem ar vēsturisko piesārņojumu

Galvenais optimizācijas uzdevums bija paredzēt atbildes reakcijas vērtību (tīrīšanas efektivitāte) visām procesa mainīgo kombinācijām eksperimenta apgabalā un noteikt optimālo eksperimenta punktu.

Optimizācijas laikā tika izmantota virsmas atbildes metode. Definētie procesa mainīgie un eksperimenta apgabals ir norādīti 4. tabulā.

4. tabula

Eksperimenta matrica

Parametrs	Augšējā robeža	Apakšējā robeža	Viduspunkts
Temperatūra, °C	+25	+15	+20
Hidrofili-lipofīlais līdzsvars	16	11	14
Biovirsmaktīvās vielas koncentrācija, % (masas)	0,6	0,1	0,3

Modeļa validitāti apliecina vērtību analīze *ANOVA* tabulā. Prognozes līmenis ir noteikts kā 95,0 %. Tika izmantots interaktīvais statistikas datu analīzes rīks *STATGRAPHICS Centurion 16.1.15*, lai izveidotu virsmas atbildes modeli. Vispārējā kvadrātiskā modeļa formula ir norādīta vienādojumā (2).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \dots + \varepsilon, \quad (2)$$

kur y ir prognozētā reakcija, β_0 ir konstante, β_1, β_2 ir lineārie koeficienti, β_{11}, β_{22} ir otrās kārtas koeficienti, β_{12} ir mijiedarbības koeficients, x_1, x_2 ir mainīgie un ε ir statistiskā trokšņa konstante.

1.3. Valsts iestāžu un nozares sasaiste ar *IPAT* identitāti

Šajā nodaļā ir iekļauts *IPAT* identitātes izveidei izmantotās metodikas apskats, lai ņemtu vērā resursu izmantošanas efektivitāti, un tā atbilst 6. publikācijas metodikas sadaļai.

IPAT piedāvātā identitāte (3) izsaka attiecību starp savstarpēji atkarīgiem mainīgajiem un spiedienu uz vidi, kur:

$$\text{Impact} = \text{Population} \cdot \text{Affluence} \cdot \text{Technology} . \quad (3)$$

Vienādojuma (3) rezultātā spiedienu uz vidi I vai «Ietekmi» var izteikt ar trīs mainīgo funkciju: iedzīvotāju skaits P , intensitāte A , ko izsaka kā patēriņu, īpašumus vai IKP uz iedzīvotāju, un tehnoloģija T , kas ir spiediens uz vidi, uz patēriņa apjomu vai spiediens uz vidi noteiktā ekonomiskās aktivitātes līmenī.

Lai gan *IPAT* identitāte nosaka vispārējo ietekmi uz vidi, Kaijas (*Kaya*) identitāte vairāk pievēršas ietekmei uz vidi tieši oglekļa dioksīda emisiju dēļ, ko var izteikt kā:

$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEC} \cdot \frac{TEC}{GDP} \cdot \frac{GDP}{P} \cdot P . \quad (4)$$

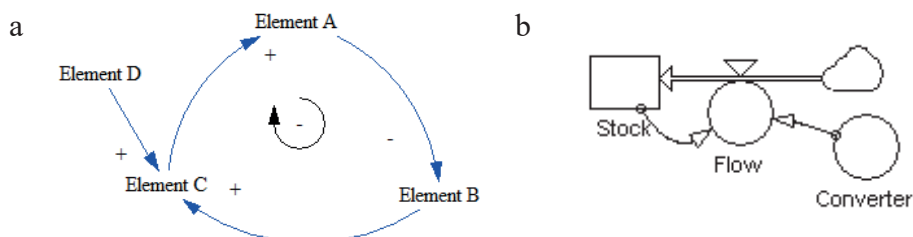
Kaijas identitāti var uzskatīt par *IPAT* identitātes atvasinājumu, tāpēc vienādojumā (4) ir analogija ar vienādojumu (3) – abos vienādojumos tiek izmantoti termini «Iedzīvotāji», «Intensitāte» un «Tehnoloģija». Kaijas identitātes gadījumā termins «Tehnoloģija» tiek tālāk sadalīts oglekļa intensitātē un primārās enerģijas intensitātē.

Lai nodrošinātu pētāmo faktoru relatīvās ietekmes kvantitatīvās vērtības alternācijai kopējā indikatorā, tiek izmantota rādītāju dekompozīcijas analīze. *LMDI* metodes izmantošana ir pamatota saskaņā ar Anga norādītajiem ieguvumiem: perfekts sadalījums (pierādījumi Anga un Liu [12] publikācijā) starp multiplikatīvās un aditīvās dekompozīcijas rezultātiem ir vienkārša attiecība, agregācijas laikā novērojama *LMDI* konsekvence.

1.4. Visu iesaistīto pušu sasaiste ar sistēmdinamiku

Šī nodaļa sniedz ieskatu izlietoto bateriju un akumulatoru savākšanas sistēmas modelēšanas metodoloģijā, un tā atbilst 7. un 8. publikācijas metodoloģiskajai sadaļai.

1958. gadā Forrester ieviesa sistēmdinamikas (SD) metodi, un pašlaik šī metode tiek plaši izmantota. SD ļauj iegūt cēloņsakarības sarežģītās un dinamiskās sistēmās ar aizturi, atgriezenisko saiti un nelinearitātēm. SD laikā tiek izmantots datormodelēšanas modelis, kas ir izstrādāts šai sistēmai. SD modeļa struktūra balstās uz cēloņu cilpu diagrammām, kas nosaka galvenos sistēmas atgriezeniskās saites mehānismus (*Forrester, 1961; Sterman, 2000*) (skat. 8.a) attēlu).



8. att. a) cēloņu cilpu diagramma un b) krājumu un plūsmu diagramma.

Cēloņu cilpu diagramma sastāv no elementiem (A, B un C) un cēloņu saitēm (norādītas kā bultas) starp šiem elementiem. Cēloņu saite ir «+», ja A papildina B vai izmaiņas A rada izmaiņas B tajā pašā virzienā. Cēloņu saite ir «-», ja A samazina B vai izmaiņas A rada izmaiņas B pretējā virzienā. Cēloņu cilpu diagramma ļauj pētīt cēloņa cēloņsakarības.

Cēloņu cilpu diagramma tiek pārvērsta krājumu un plūsmu diagrammā, lai iegūtu kvantitatīvu modeli. Krājumu un plūsmu diagrammai ir četri galvenie elementi: krājumiem, plūsmām, pārveidotāja un savienotāja (skat. 8. b) attēlu).

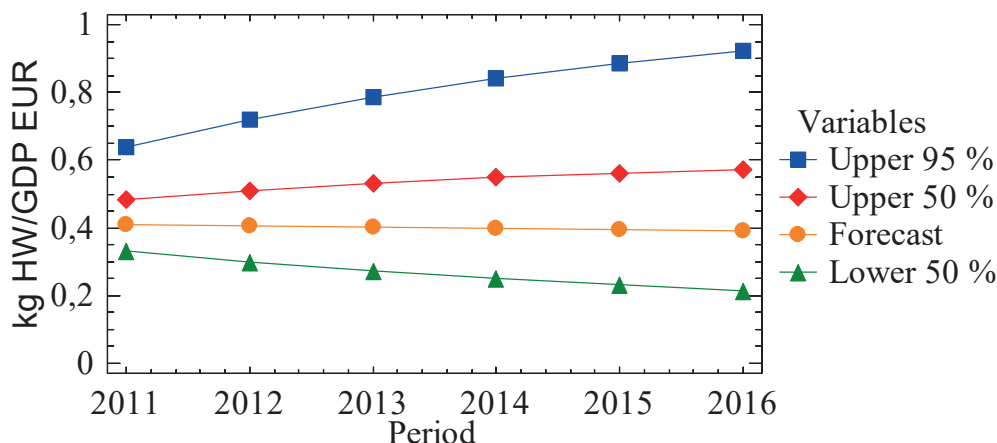
2. REZULTĀTI UN PĒTĪJUMA ANALĪZE

2.1. Prognozēšanas modelis kā mijiedarbība starp augstskolu un valsts iestādēm

Šajā nodaļā ir iekļauti bīstamo atkritumu plūsmu prognozēšanas un apjoma noteikšanas modeļu rezultāti un apraksts, un tā atbilst 1., 2. un 3. publikācijas metodikas sadaļai.

2.1.1. Bīstamo atkritumu plūsmu prognozēšanas modeļa rezultāti

9. attēlā ir parādīts prognozēšanas modeļa aprēķinu rezultāts visām pētītajām *NACE* nozarēm un mājsaimniecībām Latvijā. 9. attēlā ir parādītas arī augšējās robežas pie 95 % ticamības līmeņa un augšējās un apakšējās robežas pie 50 % ticamības līmeņa.

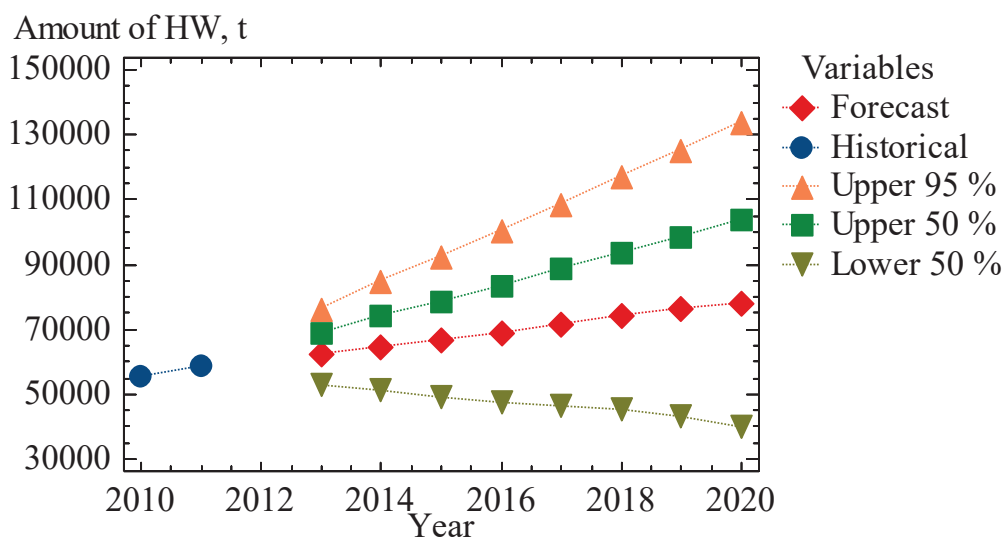


9. att. Prognozēšanas modeļa kopsavilkums visām *NACE* nozarēm un mājsaimniecībām.

Pētījuma rezultāti rāda, ka prognozētā BA rašanās intensitāte Latvijā lēnām samazināsies par 3,8 % tuvāko sešu gadu laikā. Saskaņā ar pesimistisko prognozi (augšējie 95 %) BA rašanās intensitāte pieaugs par 44,5 %, bet saskaņā ar vidējo (augšējie un apakšējie 50 %) tiek piedāvāts koridors starp +18,4 % un -36,1 %. Pētījuma laikā ir izstrādāts jauna veida BA rašanās intensitātes indikators. Piedāvātā indikatīvā vērtība ļauj prognozēt BA rašanās intensitātes izmaiņas atsevišķās nozarēs. Indikatorā tiek ņemtas vērā ne tikai pieprasījuma un piedāvājuma tendences, bet arī fakts, ka pieaugoša ražošanas apjoma rezultātā palielināsies kopējais BA daudzums. Nozares ietvaros indikatīvajai vērtībai jābūt nemainīgai vai labākajā gadījumā jāsamazinās. Ieviesto indikatoru ir iespējams izmantot atkritumu

apsaimniekošanas stratēģiju izstrādei un nozares indikatīvo trajektoriju noteikšanai. To iespējams arī izmantot salīdzinošajai analīzei nozaru vai uzņēmumu līmenī.

10. attēlā ir parādīti prognozēšanas modeļa rezultāti un vēsturiskie dati par BA daudzumu.



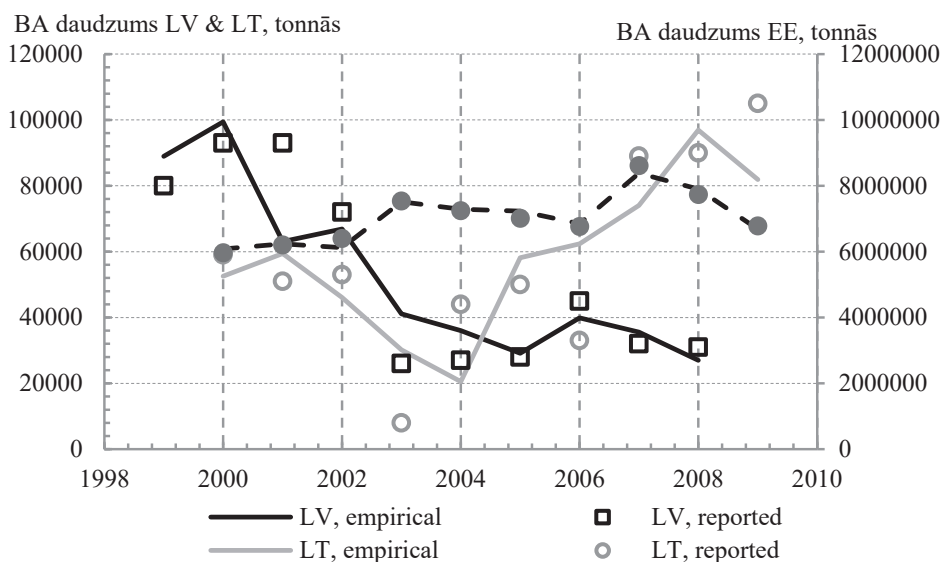
10. att. Prognozēšanas modeļa rezultāti un vēsturiskie dati par BA daudzumu.

Tiek paredzēts, ka laika posmā no 2010. līdz 2020. gadam BA daudzums pieaugs par 41,2 %, kas ir vairāk nekā prognozēts Latvijas Atkritumu apsaimniekošana plānā 2013.–2020. gadam. Ticamības līmeņa apakšējiem 50,0 % (skat. 10. attēlu), ko var saukt par optimistisko scenāriju, prognozētais BA apjoma samazinājums laika posmā no 2010. līdz 2020. gadam ir 27,7 %. Ticamības līmeņa augšējiem 50,0 % (pesimistiskais scenārijs), BA apjoma pieaugums ir 87,8 %.

2.1.2. Kvantificēšanas modeļa kopsavilkums

Pētījuma rezultātā tika iegūti trīs empīriski vienādojumi, kas apraksta to, kā pieci neatkarīgi mainīgie ietekmē BA daudzumu Baltijas valstīs (Igaunijā, Latvijā un Lietuvā) (skat. 11. attēlu).

«Empīriskie» dati 11. attēlā attiecas uz BA daudzumu, kas aprēķināts, izmantojot tālāk minētos empīriskos vienādojumus, bet šajā attēlā norādītie «paziņotie» dati attiecas uz BA daudzumu, par ko informējusi Eiropas Komisija [2].



11. att. BA daudzums Baltijas valstīs iegūts ar empīriskiem vienādojumiem un Eiropas Komisijas norādītā informācija [2].

2.2. Virsmas atbildes metode sasaistei starp augstskolu un nozari

Šajā nodaļā ir iekļauta informācija par eksperimentiem izmantoto modeļu rezultātiem, kā arī to apraksts, un tā atbilst 4. un 5. publikācijas metodikas sadaļai.

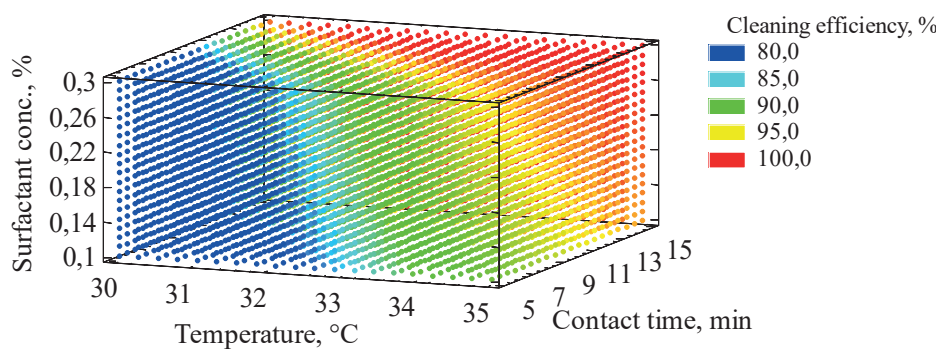
2.2.1. Eksperimenta ar mākslīgi piesārņotu augsnes mazgāšanu rezultāti

Modeļa pēdējai versijai tika iegūts šāds tīrīšanas efektivitātes empīriskais vienādojums:

$$\eta_{cl} = -1013,94 + 57,6467t + 20,3275\tau + 18,487c - 0,74825t^2 - 0,5659t\tau, \quad (5)$$

kur η_{cl} ir tīrīšanas efektivitāte %, t ir temperatūra °C, τ ir kontaklaiks minūtēs un c ir bioloģiskās izcelsmes virsmaktīvās vielas koncentrācija, % (masas).

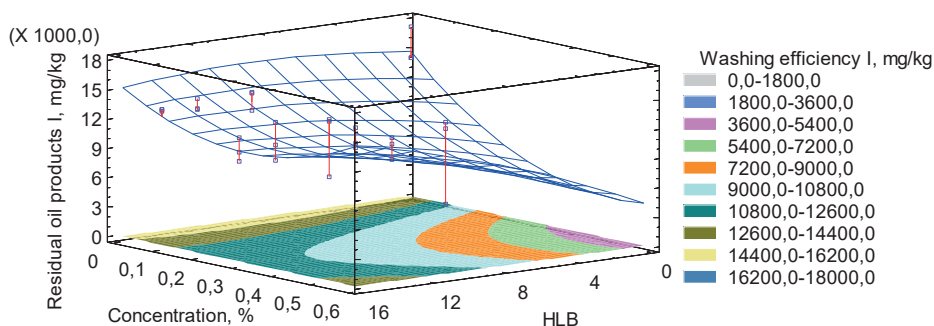
Pie augšējās mainīgo robežas (temperatūra 35 °C, 15 minūšu kontaklaiks un 0,3 % (masas) bioloģiskās izcelsmes virsmaktīvās vielas koncentrācija) eksperimentāli iegūtā tīrīšanas efektivitāte bija 99,32 %. Empīriskais vienādojums (5) telpiski ir parādīts 12. attēlā.



12. att. Mazgāšanas efektivitātes atbildes reakcijas telpiskais grafiks.

2.2.2. Eksperimentu ar vēsturiski piesārņotu augsni rezultāti

R kvadrāta vērtība parauga I statistiskajam modelim bija 49,75 %, parauga II modelim – 74,89 %. Modeļa lēstie virsmas atbildes apgabali ir parādīti 13. attēlā.



13. att. Paredzētās virsmas atbildes grafiks 20 °C temperatūrā augsnes paraugam I.

Relatīvi sliktos statistikas modeļa determinācijas koeficienta datus varētu skaidrot ar vēsturiski piesārņoto augsņu paraugu izmantošanu. Piesārņojums laika gaitā mainās, kas rada sākotnējās vielas sastāva izmaiņas.

Turklāt, varētu būt novērojama arī «iespējama molekulu absorbcija augsnes matricā, neūdens fāžu veidošanās, mijiedarbība ar organiskām vielām un bioloģiska pārveide» [26]. Tāpēc statistikas modelī ir datu punkti ar izteiktu dispersiju. Pētījums [9] rādīja, ka pieaugošam piesārņojuma vecumam ir negatīva ietekme uz iespējamu augsnes attīrīšanu no ogļūdeņražiem. Saskaņā ar Paria [16] un Maliganu [17] rezultātu atšķirība var būt arī saistīta ar mainīgo augsnes sastāvu, kas rada sliktu augsnes caurlaidību, heterogenitāti un nešķīstošu piesārņojuma formu veidošanos.

Eksperimentu laikā tika novērots, ka mazgāšanas laikā izmantotie tehnoloģiskie procesi arī būtiski ietekmēja mazgāšanas efektivitāti, kas atbilst pētījuma rezultātiem [9]. Tālākā izpētē jāņem vērā vēl viens procesu mainīgais – izmantotās tehnoloģijas.

2.3. IPAT identitāte starp valsts iestādēm un nozari

Šī nodaļa sniedz pārskatu par IPAT identitātes izstrādes rezultātiem, un tā atbilst 6. publikācijas rezultātu sadaļai.

Metodikas sadaļā norādītie kombinētie metodikas rīki tika izmantoti, lai sadalītu bīstamo atkritumu plūsmu uzņēmumā. Šeit piedāvātie rezultāti pēc savas dabas ir empīriski.

Uzņēmuma radīto bīstamo atkritumu daudzumu var izteikt ar vienādojumu $I = PAT$ un ar *Kaya* tipa dekompozīcijas vienādojumu (6):

$$HW_i = \frac{HW_i}{CG} \cdot \frac{CG}{M} \cdot \frac{M}{E} \cdot E, \quad (6)$$

kur CG ir patēriņa preces vai pakalpojumi, M – izejmateriālu patēriņš uzņēmumā, E – energopatēriņš uzņēmumā. Tāpēc BA/CG ir bīstamo atkritumu intensitāte saražotajās patēriņa precēs. Var apgalvot, ka $I = PAT$ vienādojumā M parāda iedzīvotāju skaitu, BA/CG – ietekmi uz vidi un CG/M – tehnoloģijas. Lai samazinātu bīstamo atkritumu daudzumu, ir jāsamazina vismaz viens no labajā pusē esošajiem faktoriem.

Pārveidojot (6) naturālajā logaritmā un veicot diferencēšanu (7), tiek iegūts:

$$\begin{aligned} \frac{d[\ln(HW_i)]}{dt} &= \frac{d[\ln(HW_i / CG)]}{dt} + \frac{d[\ln(CG / M)]}{dt} + \\ &+ \frac{d[\ln(M / E)]}{dt} + \frac{d(\ln E)}{dt}. \end{aligned} \quad (7)$$

(7) vienādojums rāda, ka bīstamo atkritumu procentuālās izmaiņas ir iespējams parādīt noteiktā laika punktā, izmantojot izmaiņu bīstamo atkritumu intensitātē, materiālu intensitātē un uzņēmuma izejmateriālu daudzumā vērtību summu.

Tomēr ir svarīgi klasificēt darbības ar bīstamajiem atkritumiem uzņēmumā. Atkritumu hierarhija nosaka šādus soļus: atkritumu rašanās novēršana, atkārtota izmantošana ($HW_{reu.}$), pārstrādāšana ($HW_{recy.}$), reģenerācija ($HW_{recov.}$) un apglabāšana ($HW_{d.}$). Ir nepieciešams veikt tālākus pētījumus, lai iekļautu vienādojumā arī šo mainīgo, tāpēc šie četri nosacījumi tiks uzskatīti par atsevišķiem nosacījumiem HW_i nolūkiem.

$$HW_i = \sum_i HW_{reu.,i} + HW_{recy.,i} + HW_{recov.,i} + HW_{d.,i}. \quad (8)$$

Lai aprēķinātu katra (7) un (8) nosacījuma kopējo relatīvo ietekmi uz bīstamo atkritumu rašanās tendenci, jāpievērš uzmanība mainīgo izmaiņām konkrētā laika periodā nevis tūlītējo izmaiņu lielumam. Bīstamo atkritumu rādītāju starp 0 un T

gadu iespējams iegūt, aprēķinos izmantojot atkritumu intensitātes, materiālu intensitātes un izejmateriālu daudzuma uzņēmumā vērtības. Tas nozīmē, ka uzņēmuma bīstamo atkritumu rašanās izmaiņu determinantes starp 0 un T gadu no sākuma iespējams noteikt, pētot izmaiņas šajos kompozītfaktorus noteiktā laika periodā. Multiplikatīvās dekompozīcijas piemērošanai:

$$D_{HW} = \frac{HW_i^T}{HW_i^0} = \left[\frac{(HW_{\text{reu},i} / CG)^T}{(HW_{\text{reu},i} / CG)^0} + \frac{(HW_{\text{recy},i} / CG)^T}{(HW_{\text{recy},i} / CG)^0} + \frac{(HW_{\text{recov},i} / CG)^T}{(HW_{\text{recov},i} / CG)^0} + \frac{(HW_{\text{d},i} / CG)^T}{(HW_{\text{d},i} / CG)^0} \right] \cdot \frac{(CG / M)^T (M / E)^T E^T}{(CG / M)^0 (M / E)^0 E^0}. \quad (9)$$

Aditīvajai dekompozīcijai:

$$\begin{aligned} \Delta V_{HW} = HW_i^T - HW_i^0 = & (HW_{\text{reu},i} / CG)^T - \\ & -(HW_{\text{reu},i} / CG)^0 + (HW_{\text{recy},i} / CG)^T - \\ & -(HW_{\text{recy},i} / CG)^0 + (HW_{\text{recov},i} / CG)^T - \\ & -(HW_{\text{recov},i} / CG)^0 + (HW_{\text{d},i} / CG)^T - \\ & -(HW_{\text{d},i} / CG)^0 + (CG / M)^T - (CG / M)^0 \\ & + (M / E)^T - (M / E)^0 + E^T - E^0. \end{aligned} \quad (10)$$

LMDI dekompozīcijas metodes, ko piedāvā Angs un Liu [12], piemērošana (10) rezultātiem šādās identitātēs:

$$\frac{(HW_{\text{reu},i} / CG)^T}{(HW_{\text{reu},i} / CG)^0} = \exp \left[\sum_i \frac{(HW_i^T - HW_i^0) / (\ln HW_i^T - \ln HW_i^0)}{(HW^T - HW^0) / (\ln HW^T - \ln HW^0)} \ln \left(\frac{(HW_{\text{reu},i} / CG)^T}{(HW_{\text{reu},i} / CG)^0} \right) \right]; \quad (11)$$

$$\frac{(HW_{\text{recy},i} / CG)^T}{(HW_{\text{recy},i} / CG)^0} = \exp \left[\sum_i \frac{(HW_i^T - HW_i^0) / (\ln HW_i^T - \ln HW_i^0)}{(HW^T - HW^0) / (\ln HW^T - \ln HW^0)} \ln \left(\frac{(HW_{\text{recy},i} / CG)^T}{(HW_{\text{recy},i} / CG)^0} \right) \right]; \quad (12)$$

$$\frac{(HW_{\text{recov},i} / CG)^T}{(HW_{\text{recov},i} / CG)^0} = \exp \left[\sum_i \frac{(HW_i^T - HW_i^0) / (\ln HW_i^T - \ln HW_i^0)}{(HW^T - HW^0) / (\ln HW^T - \ln HW^0)} \ln \left(\frac{(HW_{\text{recov},i} / CG)^T}{(HW_{\text{recov},i} / CG)^0} \right) \right]; \quad (13)$$

$$\frac{(HW_{d,i}/CG)^T}{(HW_{d,i}/CG)^0} = \exp \left[\sum_i \frac{(HW_i^T - HW_i^0)/(\ln HW_i^T - \ln HW_i^0)}{(HW^T - HW^0)/(\ln HW^T - \ln HW^0)} \ln \left(\frac{(HW_{d,i}/CG)^T}{(HW_{d,i}/CG)^0} \right) \right]; \quad (14)$$

$$\frac{(CG/M)^T}{(CG/M)^0} = \exp \left[\sum_i \frac{(HW_i^T - HW_i^0)/(\ln HW_i^T - \ln HW_i^0)}{(HW^T - HW^0)/(\ln HW^T - \ln HW^0)} \ln \left(\frac{(CG/M)^T}{(CG/M)^0} \right) \right]; \quad (15)$$

$$\frac{(M/E)^T}{(M/E)^0} = \exp \left[\sum_i \frac{(HW_i^T - HW_i^0)/(\ln HW_i^T - \ln HW_i^0)}{(HW^T - HW^0)/(\ln HW^T - \ln HW^0)} \ln \left(\frac{(M/E)^T}{(M/E)^0} \right) \right]; \quad (16)$$

$$\frac{E^T}{E^0} = \exp \left[\sum_i \frac{(HW_i^T - HW_i^0)/(\ln HW_i^T - \ln HW_i^0)}{(HW^T - HW^0)/(\ln HW^T - \ln HW^0)} \ln \left(\frac{E^T}{E^0} \right) \right]. \quad (17)$$

LMDI dekompozīcijas metodes piemērošana (10) rezultātiem šādās identitātēs:

$$\left(HW_{\text{reu},i}/CG \right)^T - \left(HW_{\text{reu},i}/CG \right)^0 = \sum_i \frac{HW_i^T - HW_i^0}{\ln HW_i^T - \ln HW_i^0} \ln \left[\frac{(HW_{\text{reu},i}/CG)^T}{(HW_{\text{reu},i}/CG)^0} \right]; \quad (18)$$

$$\left(HW_{\text{recy},i}/CG \right)^T - \left(HW_{\text{recy},i}/CG \right)^0 = \sum_i \frac{HW_i^T - HW_i^0}{\ln HW_i^T - \ln HW_i^0} \ln \left[\frac{(HW_{\text{recy},i}/CG)^T}{(HW_{\text{recy},i}/CG)^0} \right]; \quad (19)$$

$$\left(HW_{\text{recov},i}/CG \right)^T - \left(HW_{\text{recov},i}/CG \right)^0 = \sum_i \frac{HW_i^T - HW_i^0}{\ln HW_i^T - \ln HW_i^0} \ln \left[\frac{(HW_{\text{recov},i}/CG)^T}{(HW_{\text{recov},i}/CG)^0} \right]; \quad (20)$$

$$\left(HW_{d,i}/CG \right)^T - \left(HW_{d,i}/CG \right)^0 = \sum_i \frac{HW_i^T - HW_i^0}{\ln HW_i^T - \ln HW_i^0} \ln \left[\frac{(HW_{d,i}/CG)^T}{(HW_{d,i}/CG)^0} \right]; \quad (21)$$

$$(CG / M)^T - (CG / M)^0 = \sum_i \frac{HW_i^T - HW_i^0}{\ln HW_i^T - \ln HW_i^0} \ln \left[\frac{(CG/M)^T}{(CG/M)^0} \right]; \quad (22)$$

$$(M / E)^T - (M / E)^0 = \sum_i \frac{HW_i^T - HW_i^0}{\ln HW_i^T - \ln HW_i^0} \ln \left[\frac{(M/E)^T}{(M/E)^0} \right]; \quad (23)$$

$$E^T - E^0 = \sum_i \frac{HW_i^T - HW_i^0}{\ln HW_i^T - \ln HW_i^0} \ln \left(\frac{E^T}{E^0} \right). \quad (24)$$

Vienādojumi (11)–(24) parāda, ka bīstamo atkritumu rādītāju var izteikt, izmantojot atkritumu intensitātes rādītāja, materiālu intensitātes un izejmateriālu daudzuma logaritmiskā svara funkcijas rezultātu.

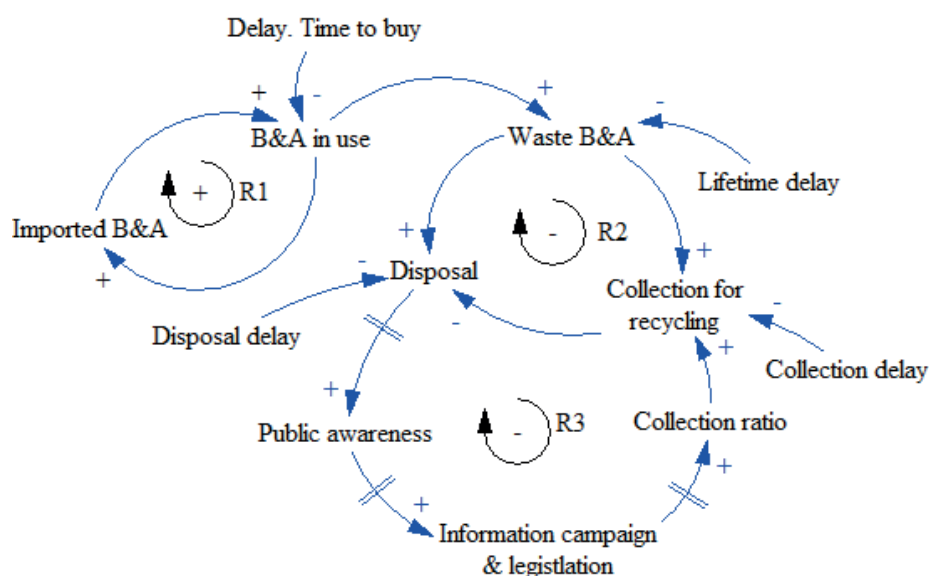
2.4. Sistēmdinamikas modelis, kas sasaista visas iesaistītās institūcijas

Šī nodaļa piedāvā ieskatu izlieto to bateriju un akumulatoru savākšanas sistēmas sistēmdinamikas modeļa rezultātos, kā arī tiem sekojošu diskusiju, un tā atbilst 7. un 8. publikācijai.

2.4.1. Bateriju un akumulatoru modeļa rezultāti

Izstrādātajam modelim ir četras atgriezeniskās saites cilpas: divas negatīvās un divas pozitīvās. 14. attēlā ir parādītas modeļa cēloņu cilpu diagrammas.

Izmantoto bateriju un akumulatoru (BuA) daudzuma pieaugums pozitīvajā atgriezeniskās saites cilpā R1 rada ievesto BuA daudzuma pieaugumu, pieprasījumam izsaucot piedāvājumu. Gadījumos, kad tirgū kļūst pieejami jauni produkti (elektroierīces, elektromobiļi u.c.), piedāvājums izsauc pieprasījumu.



14. att. Cēloņu cilpu diagramma (BuA – baterijas un akumulatori).

BuA, kas atrodas pie patērētājiem, skaita pieaugums (tiek izmantots) noteikti palielina izlieto to BuA daudzumu. Pirms BuA kļūst par atkritumiem, tiem ir iepriekšnoteikts derīguma periods (parādās kā derīguma termiņa aizkave) un savākšanas aizkave.

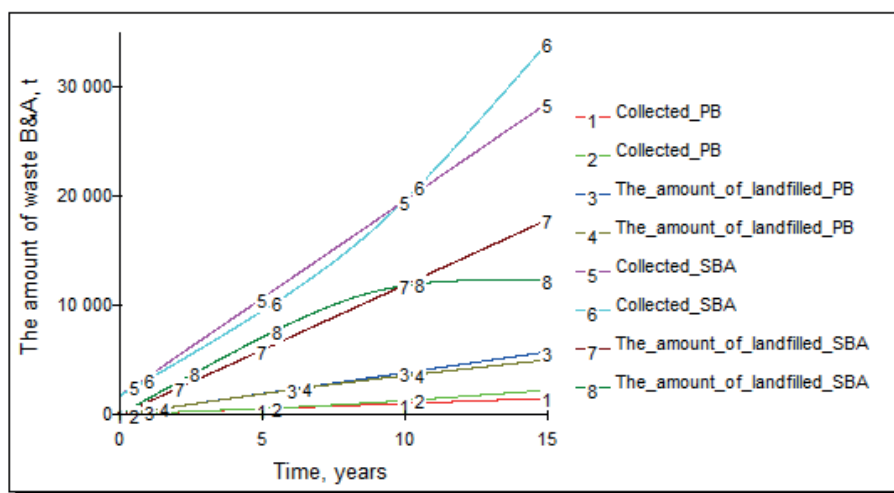
Izlieto tās BuA var nonākt pārstrādes vai apglabāšanas plūsmās, bet tām abām ir aizture – attiecīgi pārstrādes vai apglabāšanas aizture. Negatīvā atgriezeniskās saites

cilpa R2 ilustrē situāciju, kad pārstrādāto BuA daudzums samazina to BuA apjomu, kas nonāk izgāztuvēs.

Negatīvā atgriezeniskās saites cilpa R3 pētījumā parāda inovāciju izplatības modeli. Šeit kopējais apglabātais bīstamo atkritumu daudzums ietekmē sevi pretējā virzienā. Ja atkritumu apglabāšanas apjoms palielinās, pieaug arī sabiedrības informētība par bīstamo atkritumu ietekmi uz ekosistēmām un cilvēka veselību. Sabiedrības informētība iedarbina dažādus informācijas izplatības mehānismus attiecībā uz BuA pārstrādi, un var pieņemt stingrākas likumdošanas prasības. Beigās visas šīs aktivitātes palielina savākšanas koeficientu. Savākšanas koeficienta procentuālā vērtība mainās saskaņā ar s-veida līkni, ko nosaka inovāciju izplatības modelis. Čens un Čangs 2010. gadā apraksta inovāciju izplatības mehānismus atkritumu pārstrādes nozarē.

Ja inovāciju izplatības modelis tiek piemērots, izmantojot informācijas kampaņas un stingrāku likumdošanu, kopējais apglabāto BuA daudzums samazinās salīdzinājumā ar sākotnējo modeli, kurā gadu gaitā ir nemainīgs savākšanas koeficients. 15 gadu laikā references scenārijā tika sasniegts apglabātā BuA apjoma samazinājums par 12,8 % salīdzinājumā ar sākotnējo modeli. SBUA plūsmas gadījumā samazinājums bija vēl lielāks – 30,7 %, jo pēc modelēšanas 10. gada apglabātais SBUA daudzums bija konstants, kas nozīmē, ka, izmantojot inovāciju izplatības modeli, tika sasniegts gandrīz 100 % pārstrādes līmenis.

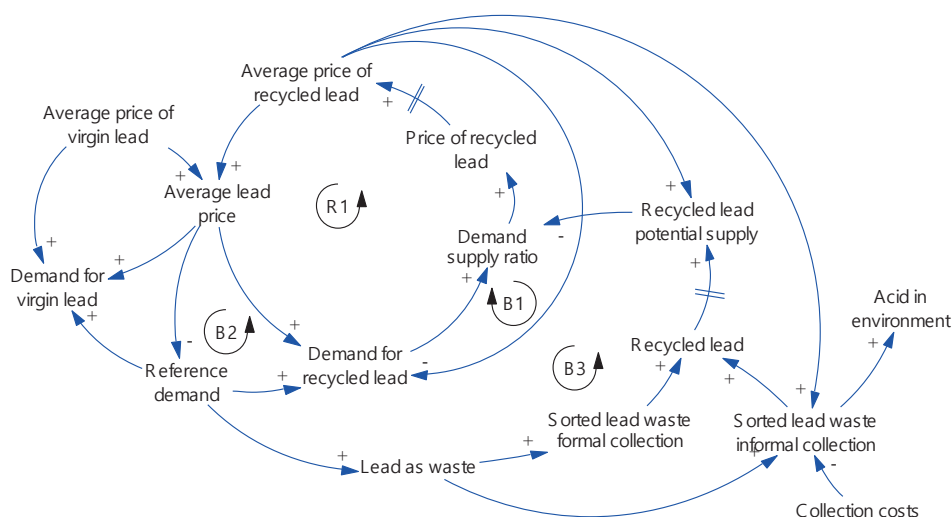
15. attēlā tiek parādīti inovāciju izplatības modeļa ieviešanas rezultāti.



15. att. Inovāciju izplatības modeļa ieviešanas rezultāti (1. līnija: savāktās PB (inovāciju izplatības modelis «neaktīvs»), 2. līnija: savāktās PB (inovāciju izplatības modelis «aktīvs»), 3. līnija: apglabāto PB daudzums (inovāciju izplatības modelis «neaktīvs»), 4. līnija: apglabāto PB daudzums (inovāciju izplatības modelis «aktīvs»), 5. līnija: savāktie SBUA (inovāciju izplatības modelis «neaktīvs»); 6. līnija: savāktie SBUA (inovāciju izplatības modelis «aktīvs»), 7. līnija: apglabāto SBUA daudzums (inovāciju izplatības modelis «neaktīvs»); 8. līnija: apglabāto SBUA daudzums (inovāciju izplatības modelis «aktīvs»)).

Pētījumā nav izvērtētas inovāciju izplatības modeļa ieviešanas izmaksas kādā konkrētā nozarē, bet šim jautājumam var pievērsties nākotnē.

Šis modelis izskaidro, kā pieprasījuma izmaiņas ietekmē svina cenu un kā pieprasījumu apmierina divas plūsmas: pārstrādāta svina un jaunā svina plūsma.



Modelī jaunā svina cena darbojas kā eksogēns mainīgais (ko neietekmē modeļa darbība vai uzvedība), bet pārstrādātā svina cena ir endogēns mainīgais (ko nosaka modeļa mainīgie).

Ja netiek ietekmēts pārstrādātā svina daudzums tirgū un references pieprasījums palielinās, pieprasījuma-pieauguma koeficients pieaug un tirgus reaģē (ar aizturi), palielinoties pārstrādātā svina cenai (skat. pozitīvo cilpu R1). Reakcijas uz tirgus apstākļiem aizkave ir iestrādāta aizturē starp pārstrādātā svina cenu un vidējo pārstrādātā svina cenu (16. attēls kalpo par cēloņu saiknes ar aizturi ilustrāciju), jo ir nepieciešams laiks, lai pēkšņu un/vai vietēju pārstrādātā svina cenu izmaiņu gadījumā kopējā pārstrādātu materiālu tirgus cena pielāgotos.

Pieprasījums pēc pārstrādāta svina nevar pieaugt eksponenciāli, jo priekšrocība (izteikta kā pārstrādātā svina un vidējās svina cenas koeficients), kas piemīt pārstrādātiem materiāliem, samazinās, pieaugot pārstrādātā svina cenai (līdzsvarojošā cilpa B1 kompensē pozitīvo cilpu R1). Tajā pašā laikā vidējās svina cenas pieaugums samazina starpību starp vidējo svina cenu un vidējo jauna svina cenu, palielinot pieprasījumu pēc jauniem materiāliem.

Krājumu un plūsmu modelī pieprasījums pēc pārstrādāta svina D_{RL} ir izteikts kā vienādojums (25).

$$D_{RL} = RD_L \left(\frac{\bar{P}_{RL}}{\bar{P}_L} \right)^{-\sigma}, \quad (25)$$

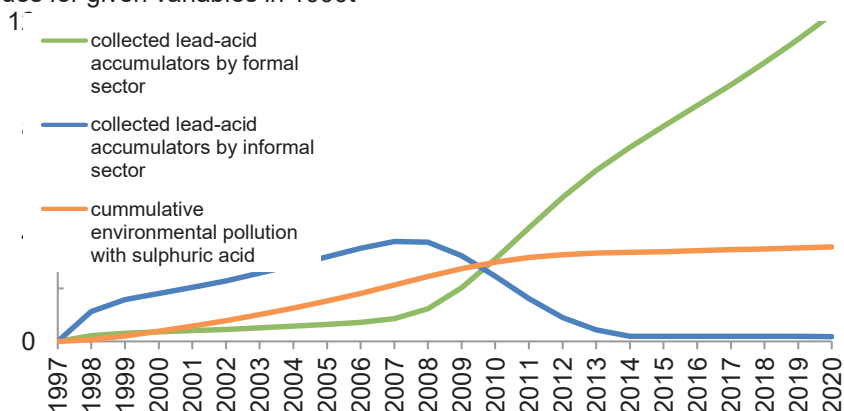
kur RD_L – references pieprasījums pēc svina, $\bar{P}_{RL}$ – vidējā pārstrādāta svina cena, $\bar{P}_L$ – vidējā svina cena, σ – aizvietošanas elastība.

Vidējās svina cenas pieaugums samazina references pieprasījumu, attiecīgi samazinot pieprasījumu gan pēc pārstrādāta, gan jauna materiāla (līdzsvarošanas cilpa B2 kompensē pozitīvo cilpu R1). Tiek sasniegts jauns līdzsvars pie augstākas vidējās svina cenas un zemāka references pieprasījuma nekā sākotnēji.

Palielinoties svina piedāvājumam, pieprasījuma-piedāvājuma koeficients samazinās, kas savukārt ierobežo pārstrādātā svina cenu – līdzsvarojošā cilpa B3 ietekmē cilpu R1, tā koriģējot sistēmas dinamisko uzvedību.

Svina plūsma no atkritumiem tiek savākta divos veidos – kā šķīrotie svina atkritumi formālās vai neformālās savākšanas ietvaros. Ja palielinās savākšanas izmaksas, neformālais sektors saņem mazu peļņu un pamet tirgu – rodas pāreja uz dominējoši formālu savākšanas sistēmu. Pārejas dēļ izvairoties no spiediena uz vidi, tiek ņemta vērā sērskābes piesārņojuma ietekme.

Values for given variables in 1000t



17. att. Pārejas dinamika starp neformālajām un formālajām svina–skābes savākšanas shēmām un kumulatīvais vides piesārņojums ar sērskābi.

Neformāla sektora savāktais svina–skābes akumulatoru daudzums samazinās līdz nullei, jo atkritumu savācējus piesaista pievilcīgākas darba iespējas un peļņas pieaugums, kad atbilstības vides standartiem izmaksas tiek iekļautas uzņēmuma darbības izmaksās. Šie faktori kalpo par dzinējspēku pārejai no neformālām uz formālām svina–skābes savākšanas shēmām (skat. 17. attēlu).

Secinājumi

1. Šajā promocijas darbā trīskāršās spirāles pieeja tika pārnesta un aprobēta izmantošanai bīstamo atkritumu apsaimniekošanas sistēmā Latvijā. Darbā tika pētīta mijiedarbība starp trīs noteiktām bīstamo atkritumu apsaimniekošanas sistēmas daļām: augstskolām, valsts iestādēm un nozari. Veiktie gadījumu pētījumi var tikt iedalīti četrās daļās: (1) augstskolas un valsts iestādes tika sasaistītas, izstrādājot jaunu bīstamo atkritumu plūsmu prognozēšanas un apjoma noteikšanas modeli; (2) augstskolas un nozare tika sasaistīta, izmantojot eksperimentu metodes; (3) valsts iestādes un nozare tika sasaistīta, izmantojot jaunu, uz *IPAT* identitāti balstītu metodoloģiju; (4) integrētā augstskolu, nozares un valdības mijiedarbība tika pētīta, izmantojot sistēmdinamikas modelēšanas rīku.
2. Pētījuma laikā tika gūts apstiprinājums piedāvātajai hipotēzei par to, ka trīskāršās spirāles pieeja var uzlabot apsaimniekošanas praksi un institucionālo un pētniecības kapacitāti, kā arī veicināt inovāciju izplatību bīstamo atkritumu apsaimniekošanas jomā. Gadījumu pētījumi demonstrēja, ka sadarbojoties uzlabojās bīstamo atkritumu plūsmu prognozēšanas un apjoma noteikšanas institucionālā kapacitāte (1., 2. un 3. publikācija), palielinājās jauno produktu konkurētspēja (4. un 5. publikācija), bija iespējams izsaukt pāreju uz industriālo simbiozi (6. publikācija) un uzlabot kopējos bīstamo atkritumu apsaimniekošanas sistēmas rezultātus, tā nodrošinot ieguvumu videi, samazinot potenciālo piesārņojumu (7. un 8. publikācija).

Turpinājumā tiek piedāvāti secinājumi par pētītajiem mijiedarbības veidiem.

Mijiedarbības izpēte starp augstskolām un valsts iestādēm

3. Ir izstrādāts jauna veida indikators, kas balstīts uz bīstamo atkritumu intensitāti *NACE 2*. red. nozarēs un mājstaimniecībās. Šis indikators ļauj novērtēt bīstamo atkritumu izveides intensitāti, ņemot vērā to, ka šādu atkritumu ražošanas ātruma pieaugums rada lielāku kopējo bīstamo atkritumu daudzumu. Piedāvāto indikatoru iespējams izmantot, lai prognozētu bīstamo atkritumu intensitātes attīstību nākotnē vienā nozarē vai valstī kopumā. Indikatoru iespējams izmantot arī atsevišķu ražotāju, viena profila uzņēmumu un dažādu valstu vienu un to pašu nozaru salīdzinošajai analīzei. Turklāt šis indikators ļauj piedāvāt bīstamo atkritumu apsaimniekošanas sistēmas pasākumus un kontrolēt šādu atkritumu ražošanas intensitātes attīstību.
4. Izstrādātā bīstamo atkritumu daudzuma prognozēšanas metodikai ir seši moduļi: vēsturiskie dati, pieņēmumi, indikatoru izvēle, datu apstrāde, datu analīze ar *STATGRAPHICS* un prognozēšanas modeļi. Pētījuma rezultāti rāda,

ka prognozētā BA intensitāte Latvijā lēnām samazināsies par 3,8 % tuvāko sešu gadu laikā. Saskaņā ar pesimistisko prognozi (augšējie 95 %) BA intensitāte pieaugs par 44,5 %, bet saskaņā ar vidējo (augšējie un apakšējie 50 %) tiek piedāvāts koridors starp +18,4 % un -36,1 %.

5. Ekonomiskā izaugsme – šajā gadījumā IKP pieaugums ietekmē kopējo BA daudzumu valstī. Izmantojot izstrādāto prognozēšanas modeli, tika noteikta un aprakstīta bīstamo atkritumu daudzuma atkarība no IKP vērtībām. Tiek paredzēts, ka laika posmā no 2010. līdz 2020. gadam kopējais BA daudzums būs no - 27,7 % optimistiskā scenārija gadījumā līdz +87,8 % pesimistiskā scenārija gadījumā pie 50 % ticamības līmeņa. Pamatscenārijā BA apjoma pieaugums šajā laika posmā tika aprēķināts kā 41,2 % pie ticamības līmeņa 95,0 %. Iegūtais pamata scenārija rezultāts ir augstāks nekā paredzēts Latvijas Atkritumu apsaimniekošanas plānā 2013.–2020. gadam. Optimistiskajam scenārijam bija vismazākā spēja pielāgoties izmaiņām IKP, jo saskaņā ar šo scenāriju BA intensitāte valstī samazinājās.
6. Apjoma noteikšanas modeļa rezultāti rāda, ka daudzfaktoru lineārās regresijas analīzi iespējams izmantot neatkarīgu mainīgo, kas ietekmē bīstamo atkritumu daudzumu, analīzei. Balstoties uz datu analīzi un literatūras avotu apskatu, regresijas analīzei tika izvēlēti pieci neatkarīgie mainīgie: IKP, kas izteikts miljonos pirktspējas līmeņa (*PPS*), primārais energopatēriņš, kas izteikts tonnās naftas ekvivalenta (*TOE*), kopējais valsts iedzīvotāju skaits, uzņēmējdarbības sektora izdevumi izpētei un attīstībai (*R&D*) un kā dzīves līmeņa indikators valstī – pirktspējas līmenis uz vienu iedzīvotāju. *R* kvadrāta regresijas modeļu statistiskie dati rāda, ka ar piemērotajiem modeļiem iespējams izskaidrot 95,74 % variabilitātes atkarīgajā BA mainīgajā Igaunijas gadījumā, 80,70 % – Latvijas un 61,70 % – Lietuvas gadījumā pie 95 % ticamības līmeņa. BA daudzuma empīriski iegūto vienādojumu analīze arī rāda, kādā mērā dažādi faktori ietekmē BA apjomu. Piemēram, investīcijas izpētē un attīstībā visātrāk samazināja BA daudzumu Igaunijā un tad – Latvijā un Lietuvā. Nākotnē piedāvātos neatkarīgos mainīgos ir iespējams izmantot analīzē un bīstamo atkritumu daudzuma prognozēšanas rīka izstrādē.

Mijiedarbības izpēte starp augstskolām un nozari

7. Eksperimentālie testi demonstrēja augstu ticamības līmeni un ir īpaši piemēroti dažādu virsmaktīvo vielu un to maisījumu izpētei un optimizācijai. Eksperimentālos testus ir iespējams pielāgot, lai risinātu problēmas, ar ko saskaras mazgāšanas un tīrīšanas līdzekļu izstrādātāji. Šie eksperimenti liek uzskatīt, ka bioloģisko virsmaktīvo vielu izmantošana, lai palielinātu blīva organiskā piesārņojuma šķīdību, var būt efektīvs un salīdzinoši lēts veids, kā veikt ar naftas produktiem piesārņotu augšņu un ūdensnesējslāņu *ex situ* sanāciju. Izstrādātā skrīninga metodika tika izmantota, lai izvērtētu

mijiedarbību starp atbildes reakcijas mainīgo un procesa mainīgo. Rezultāti norādīja, ka visiem mainīgajiem bija būtiska ietekme uz attīrīšanas efektivitāti pie ticamības līmeņa 95 %. Izmantojot pilno faktoriālo analīzi un Pareto kopu, kā arī pusnormālās varbūtības apgabala analīzi, tika statistiski atklāti antagoniskie un sinerģiskie interfeisi starp mainīgajiem. Galvenais efekta grafiks rāda, ka vides temperatūras/kontaktlaika un bioloģiskas izcelsmes virsmaktīvās vielas atšķaidījuma gradients ir stāvāks nekā gadījumā ar bioloģiskas izcelsmes virsmaktīvās vielas koncentrāciju mazgāšanas šķīdumā. Galvenā mijiedarbība šajā modelī tika novērota starp vides temperatūru/kontaktlaiku un bioloģiskas izcelsmes virsmaktīvās vielas atšķaidījumu. Interfeiss pēc dabas bija nelineārs. Temperatūras pieaugumam bija lielāka ietekme uz tīrīšanas efektivitāti, ja kontaktlaiks bija īss. Un pretēji – ja kontaktlaiks ir ilgāks, temperatūras līmeņa ietekmei vairs nav tik liela nozīme.

8. Tika veikta vēsturiski piesārņotu augšņu bioloģiskā sanācija, augsnes paraugiem ar nelielu un vidēju naftas piesārņojumu izmantojot bioloģiskas izcelsmes anjonu glikolipīdu virsmaktīvo vielu maisījumu. Pētījuma rezultāti liecināja, ka «plāksnīšu» testu izmantošanai, lai izveidotu jaunus augsnes bioloģiskos attīrīšanas līdzekļus un atlasītu atbilstošas bioloģiskas izcelsmes virsmaktīvās vielas pētījuma problēmas risināšanai, ir potenciāls. «Plāksnīšu» testi varētu dot iespēju biotehnoloģiju inženieriem strādāt ātrāk un vienkāršāk. Kvadrātmijiedarbības modelis parāda, ka visnozīmīgākais procesa parametrs paraugam I un paraugam II pie 95 % ticamības līmeņa bija bioloģiskās izcelsmes virsmaktīvās vielas koncentrācijas mainīgais. Saskaņā ar norādītajiem rezultātiem var secināt, ka HLB vērtības un temperatūras palielinājums nenodrošina būtisku augsnes mazgāšanas rezultāta uzlabojumu. Tālākos pētījumos varētu izmantot citu bioloģiskas izcelsmes virsmaktīvo vielu šķīdumu, lai attīrītu būtisku naftas piesārņojumu.

Mijiedarbības izpēte starp valsts iestādēm un nozari

9. Tika piedāvāta kopējās bīstamo atkritumu plūsmas izmaiņu, ko rada pētāmo faktoru relatīvā ietekme, novērtēšanas metodika uzņēmumu līmenī, un šie faktori ir bīstamo atkritumu intensitāte, materiālu intensitāte un uzņēmumā izlieto to izejmateriālu daudzums. Bīstamo atkritumu plūsma tiek tālāk sadalīta vēl detalizētāk, balstoties uz atkārtoti izmantoto, pārstrādāto, reģenerēto un apglabāto bīstamo atkritumu plūsmu definīciju hierarhiju. Izmantojot piedāvāto metodoloģiju, iespējams veikt gadījumu pētījumus uzņēmumu līmenī, lai pētītu kopējo izmaiņu cēloņus, piedāvātu prognozēšanas modeli nākotnes tendencēm un noteiktu politiku rīku izmantošanas punktus intervences veikšanai, lai samazinātu bīstamo atkritumu daudzumu.
10. Izstrādātajā metodoloģijā tiek ņemts vērā ražošanas apjoms; kopējo bīstamo atkritumu daudzuma samazinājumu, ieviešot efektīvākas ražošanas prakses, ir

iespējams analizēt atsevišķi no kopējā bīstamo atkritumu daudzuma pieauguma lielākas ražošanas izlaides dēļ. Turklāt iespējams analizēt arī atsevišķu faktoru kopējo ietekmi. Piemēram, iespējams rast atbildi uz jautājumu, pie kāda ražošanas apjoma efektīvāku ražošanas praksi ieviešanas rezultātu kompensēs ražošanas izlaides pieaugums. Šis pētījums ir pirmais mēģinājums sasaistīt valdības iniciatīvas un bīstamo atkritumu plūsmu uzņēmumu līmenī, balstoties uz kvantitatīviem indikatoriem.

Mijiedarbības izpēte starp visām pusēm

11. Sistēmdinamikas modeļa izmantošana atkritumu apsaimniekošanas nozarē ir tikusi pētīta tikai dažos konkrētos gadījumos, un tāpēc šis pētījums pievēršas SD modelēšanas piemērošanai izlietoto bateriju un akumulatoru jomā. Pētāmajai nozarei ir izveidots sistēmdinamikas modelis ar trīs atgriezeniskās saites cilpām. Lai nodrošinātu modeļa atbilstību, tika veikti strukturāli validācijas testi. Izstrādātais modelis tika atzīts par veiksmīgu gan uzvedības validitātes, gan sensitivitātes testos. Validācija rādīja, ka modelis spēj ģenerēt «atbilstošu uzvedību atbilstošu iemeslu dēļ». Sensitivitātes analīzes rezultāti rāda, ka izmaiņām savākšanas koeficientā un ievaduma daudzumā ir liela un pretējos virzienus vērsta ietekme uz izgāztuvēs nogādāto BuA daudzumu. Šis darbs demonstrē, ka inovāciju izplatības modeļu ieviešana izlietoto bateriju un akumulatoru jomā var samazināt vides piesārņojumu līdz pat par 30,7 %. Tomēr atbilstoši izstrādātajam sistēmdinamikas modelim ir jāmodelē, jāizvērtē un jāapspriež scenāriji ar citām politikām.
12. Izstrādātais svina–skābes akumulatoru apsaimniekošanas modelis rāda, kā notiek pāreja no neformālas savākšanas sistēmas praksi uz formālu; tas izgaismo arī struktūru, dinamisko uzvedību, atgriezenisko saiti, aizkavi un virzītājspēkus, kas pārveido šo modeli. Politikas veidotāji var izmantot šo modeli kā lēmumu atbalsta sistēmu un zinātnieki – kā platformu tālākai izpētei par dažādu neformālu atkritumu apsaimniekošanas praksi dinamiku. Modeli ir iespējams paplašināt tālāk, iekļaujot papildu gadījumu pētījumus. Turpmāk pētījumus iespējams veikt par izmaksām, kas saistītas ar specifisku politiku pasākumu ieviešanu nozarē.

ANOTĀCIJA

Ilgspējīga sabiedrības un reģionu attīstība ir pēdējās desmitgadēs aktuāls temats. Pārraudzības trūkums bīstamo vielu apsaimniekošanas nozarē var nodarīt kaitējumu ekosistēmām un neatgriezeniski ietekmēt cilvēku veselību. Tāpēc darba autors uzskata, ka efektīva bīstamo atkritumu apsaimniekošana stratēģija ir svarīgs priekšnosacījumiem ilgspējīgai attīstībai. Tomēr praksē bīstamo atkritumu apsaimniekošanā ir iesaistītas dažādas puses: uzņēmumi, valsts un reģionālā pārvalde un pētniecības iestādes. Tādā veidā šo dažādo iesaistīto pušu sadarbība un mijiedarbība var ietekmēt visu sistēmu gan pozitīvi, gan radīt apstākļus, kur labākās prakses piemēri un inovācijas nevar attīstīties.

Teorija par valsts iestāžu, pētniecības iestāžu un uzņēmumu mijiedarbību ir pazīstama kā trīskāršā spirāle (*Triple Helix*). Šī teorija postulē trīs saišu (starp valsts pārvaldi, augstskolām un uzņēmumiem) pastāvīgu stiprināšanu, lai virzītos uz zināšanu ietilpīgu sabiedrību un inovācijām.

Darba mērķis ir aprobežot trīskāršās spirāles pieeju bīstamo atkritumu apsaimniekošanu jomā Latvijā. Lai sasniegtu šo mērķi, ir izvirzīti šādi uzdevumi: saistīt universitāti un valsts pārvaldi, izstrādājot inovatīvu bīstamo atkritumu plūsmas prognozēšanas modeli; saistīt universitāti un uzņēmumus, izmantojot eksperimentu plānošanas metodiku; saistīt valsts pārvaldi un uzņēmumus, izveidojot jaunu metodiku, kuras pamatā ir *IPAT* identitāte; visbeidzot – piemērot visaptverošu pieeju pētījumiem par integrētu universitātes, valsts pārvaldes un uzņēmumu mijiedarbību, izmantojot sistēmdinamikas modelēšanas rīku.

Promocijas darbs ir balstīts astoņās, tematiski vienotās zinātniskās publikācijās. Šie raksti ir publicēti vairākos zinātniskās periodikas izdevumos, un tie ir pieejami zinātniskās informācijas krātuvēs un starptautiskās datubāzes. Izveidoto publikāciju mērķis ir paplašināt pētījumu loku bīstamo atkritumu apsaimniekošanas nozarē.

Ievadā ir publicēti pētījuma mērķi un uzdevumi, izskaidrota disertācijas struktūra, dots īss apraksts par autora veiktajiem pētījumiem, kas aptver gan galvenās publikācijas, gan citus pētījumus, ko autors ir veicis bīstamo atkritumu apsaimniekošanu nozares analīzes ietvaros. Pirmā nodaļa sniedz pārskatu par zinātnisko literatūru un koncentrējas uz turpmākās izpētes aspektiem un nepieciešamajiem uzlabojumiem bīstamo atkritumu apsaimniekošanas sistēmā. Otrā nodaļa izklāsta publikācijās izmantoto metodiku. Pētījumā iegūtie rezultāti un to analīze ir doti trešajā nodaļā. Secinājumi ir sniegti disertācijas nobeigumā.

ABSTRACT

Sustainable development of society and regions has been an important topic over the past decades. Uncontrolled management of hazardous substances may lead to contamination of ecosystems and damage for human health. Therefore, the author argues that a proper management strategy for hazardous waste is one of the key components for sustainable development. However, in the practice of hazardous waste management there are various parties involved: enterprises, governmental organizations and research institutions. They are elements of the one system but performing different functions; nevertheless, they are inevitably linked together. This means that actions and interplay between these various parties can positively affect the whole system or can create place where the best practices and innovations cannot spread.

The theory on interplay among governmental institutions, research facilities and industry branches is known as a Triple Helix approach. This approach postulates a triadic relationship between university-industry-government in order to move towards knowledge society and innovations.

The aim of the present Thesis is to transfer and approbate the Triple Helix approach in the field of hazardous waste management in Latvia. In order to reach the goal the following tasks have been set: to link the university and government by developing a novel forecast and quantification model of hazardous waste streams; to link the university and industry by case studies using the design of experiment methodology; to link the government and industry by the novel methodology based on the IPAT identity; to apply a holistic approach to study an integrated university-industry -government interaction using the system dynamics modelling tool.

The Doctoral Thesis is based on the thematically unified eight scientific publications. Those publications are published in various scientific periodicals and are accessible in scientific information repositories and cited international databases. The goal of the presented publications is to expand the range of studies on hazardous waste management.

In the introduction, the research aims and tasks are defined, the structure of the thesis is explained, and a short description of the author's studies is given that covers both the main publications and other studies by the author regarding the analysis of hazardous waste management. Chapter One provides an overview of the literature and focuses on the necessary studies regarding aspects of hazardous waste management system and the improvement thereof as examined in the main publications. Chapter Two examines the methodologies of the issues studied in the main publications. The results obtained in the study are presented in Chapter Three. Conclusions are presented at the end of the Thesis.

Pateicība

Vislielākā cieņa un pateicība zinātniskā darba vadītājai profesorei *Dr. habil. sc. ing.* Dagnijai Blumbergai, bez kuras lielpratīgās un drošās vadības nebūtu iespējams izklūt cauri brīžiem pārbagātiem, brīžiem ļoti pieticīgiem ideju mežiem un krūmājiem. Paldies par vērtīgajiem padomiem, uzmundrinošu motivāciju un pacietību šajā zinātniskajā ceļā!

Šis zinātniskais ceļa posms nekad nebūtu noiets bez kolēģu un publikāciju līdzautoru atbalsta. Pirmkārt, vēlos pateikties Leldei Timmai par apbrīnojamu talantu zinātnisko publikāciju radīšanā un palīdzību visā doktorantūras studiju laikā. Nedrīkstu nepieminēt arī kolēģus profesori A. Blumbergu, profesori S. Valteri, *F. Ramagnoli*, K. Samu, J. Vanagu, K. Kļavenieku, kuru ieguldījumu nav iespējams pārvērtēt. Paldies jums!

Paldies visam draudzīgajam Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūta kolektīvam par spēju pārvērst brīžiem vienmuļo zinātnes ritējumu aizrautīgā izpētes procesā!

Vēlos pateikties arī saviem darba kolēģiem M. Kalniņam un G. Bērziņai par papildu pienākumu pildīšanu manā zinātniskajā ceļā.

Paldies arī manai ģimenei – Signei un Dāvim – par izturību, sapratni un atbalstu!

Jānis Vilgerts