

Alīna Safronova

**INTEGRĒTA PIEEJA
PASAŽIERU AUTOTRANSporta
DEKARBONIZĀCIJAS VIRZIENU NOVĒRTĒŠANAI**

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Dabaszinātņu un tehnoloģiju fakultāte
Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

Alīna Safronova

Doktora studiju programmas “Vides inženierija” doktorante

**INTEGRĒTA PIEEJA PASAŽIERU
AUTOTRANSPORTA DEKARBONIZĀCIJAS
VIRZIENU NOVĒRTĒŠANAI**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji

asociētā profesore *Dr. sc. ing.*
AIGA BARISA

asociētais profesors *Dr. sc. ing.*
VLADIMIRS KIRSANOVŠ

RTU Izdevniecība
Rīga 2026

Safronova, A. Integrēta pieeja pasažieru autotransporta dekarbonizācijas virzienu novērtēšanai. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2026. – 56 lpp.

Publicēts saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-19” 2026. gada 7. jūlija lēmumu Nr. 246.

Promocijas darbs un tajā iekļautās publikācijas ir izstrādātas ar vairāku pētniecības projektu atbalstu. Promocijas darbs ir izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda projektā Nr. 8.2.2.0/20/1/008 “Rīgas Tehniskās universitātes un Banku augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās” atbalstu darbības programmas “Izaugsme un nodarbinātība” 8.2.2. specifiskā atbalsta mērķa “Stiprināt augstākās izglītības institūciju akadēmisko personālu stratēģiskās specializācijas jomās”. Daļa promocijas darbā iekļauto pētījumu ir izstrādāta ar Latvijas Republikas Ekonomikas ministrijas projekta “Ilgtspējīga un atjaunīga transporta politikas formulēšana Latvijā (4muLATE)” atbalstu, projekta Nr. VPP-EM-2018/AER_2_0003. Daļa promocijas darbā iekļauto pētījumu ir izstrādāta ar *Interreg* Baltijas jūras reģiona programmas projekta *CommitClimate* atbalstu, projekta Nr. #C026.

Vāka attēls: *Bernd Dittrich / Unsplash*

<https://doi.org/10.7250/9789934373572>
ISBN 978-9934-37-357-2 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2026. gada 29. oktobrī plkst. 14.00 Rīgas Tehniskās universitātes Dabaszinātņu un tehnoloģiju fakultātē, Āzenes ielā 12-1, 607. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Ph. D. Ilze Vamža

Rīgas Tehniskā universitāte

Emeritētais profesors *D. Sc. (Tech.) Peter Lund*,

Ālto Universitāte, Somija

Profesors *Dr. Raimondas Grubliauskas*,

Vilņas Ģedimina tehniskā universitāte (*VILNIUS TECH*), Lietuva

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.

Alīna Safronova (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas (literatūras apskats, metodoloģija un rezultāti), secinājumi, rekomendācijas, literatūras saraksts, 14 attēli, trīs tabulas; kopā 56 lappuses. Literatūras sarakstā ir 102 nosaukumi.

SATURS

SATURS.....	4
IEVADS	5
1. LITERATŪRAS ANALĪZE	13
2. METODOLOĢIJA	17
2.1. Daudzkritēriju lēmumu analīze.....	18
2.2. Izmaksu un ieguvumu analīze.....	19
2.3. Bibliometriskā analīze	19
2.4. Cēloņsakarību cilpu diagramma	20
2.5. Sistēmdinamikas modelēšana	21
2.5.1. Biometāna izmantošanas potenciāla novērtējums.....	22
2.5.2. Valsts politikas novērtēšanas modelis.....	23
2.5.3. Lietotāju uzvedības modelēšana, izmantojot sistēmdinamiku	24
2.5.4. Scenāriju balstīta pašvaldības emisiju modeļa izstrāde, izmantojot sistēmdinamikas principus.....	25
2.6. Iedzīvotāju aptaujas metodika par mobilitātes paradumiem un atbalstu politikai	27
3. REZULTĀTI.....	29
3.1. Politikas un tehnoloģiju prioritāšu integrētais novērtējums.....	29
3.1.1. Politikas instrumentu novērtējums.....	29
3.1.2. Degvielas un tehnoloģiju risinājumu novērtējums.....	32
3.2. Tehnoloģisko risinājumu novērtējums transporta dekarbonizācijai	33
3.2.1. Elektromobiļu izmaksu novērtējums.....	34
3.2.2. Biometāna ražošanas potenciāla un izmantošanas transportā modelēšana	36
3.2.3. Ūdeņraža attīstības iespējas, šķēršļi un pētniecības tendences	37
3.3. Transporta emisiju scenāriju modelēšana valsts un pašvaldību līmenī.....	41
3.3.1. Valsts līmeņa politikas scenāriju modelēšana Latvijā.....	41
3.3.2. Īstenošana pašvaldību līmenī un Rīgas gadījuma izpēte.....	42
3.4. Sabiedrības atbalsts un uzvedības faktori transporta dekarbonizācijā	46
3.4.1. Aptaujas rezultāti: sabiedrības atbalsts un mobilitātes preferences vietējā līmenī	46
3.4.2. Uzvedības faktori transporta veida izvēles modelēšanā.....	47
SECINĀJUMI	49
REKOMENDĀCIJAS.....	50
IZMANTOTĀ LITERATŪRA	52

IEVADS

Cilvēka darbība, galvenokārt fosilā kurināmā dedzināšana enerģijas iegūšanai, ir lielākais klimata pārmaiņu veicinātājs. Šīs problēmas nozīmīgums ir saistīts ar klimata pārmaiņu plašo ietekmi uz ekosistēmu ilgtspējību, pārtikas un ūdens nodrošinājumu, ekonomisko stabilitāti, sociālajiem apstākļiem un cilvēku veselību. Neskatoties uz pieaugošo globālo izpratni par fosilā kurināmā dedzināšanas negatīvajām sekām, kas saistītas ar siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisiju piesārņojumu un tā ietekmi uz klimata pārmaiņām, pieprasījums pēc fosilā kurināmā joprojām saglabājas augsts.

Transporta nozare joprojām ir nozīmīgs emisiju avots, kas veido aptuveni 23 % no pasaules ar enerģiju saistītajām CO₂ emisijām un aptuveni 15 % no kopējām pasaules SEG emisijām. Šī nozare ir viena no trim lielākajiem emisiju avotiem pasaulē [1].

Eiropas Savienības (ES) mērķis līdz 2050. gadam sasniegt klimatneitralitāti ņem vērā arī transporta nozares prasības. Transports veido 31 % no ES enerģijas patēriņa [2]. ES transporta nozarei ir īpaši būtiska nozīme, jo, neraugoties uz nelielu emisiju samazinājumu kopš 2005. gada, degvielas sadedzināšana transporta sektorā joprojām ir viens no galvenajiem emisiju avotiem. 2023. gadā transporta nozarē radīto emisiju apjoms veidoja vairāk nekā 27 % no kopējām ES emisijām [3]. Ievērojama transporta sektora emisiju samazināšana ES līmenī tika apspriesta jau 2011. gada Baltajā grāmatā, un jau ir ieviesti vairāki regulatīvie politikas instrumenti attiecībā uz alternatīvajām degvielām un to uzpildes/uzlādes infrastruktūru [4]. Tomēr šīs problēmas joprojām ir aktuālas un līdz galam neatrisinātas.

Par primāro izaicinājumu transporta sektorā šobrīd tiek uzskatīta liela atkarība no fosilajiem energoresursiem. ES pieredze ar 2020. gada atjaunojamās enerģijas mērķi transporta nozarē liecina, ka kvantitatīvu mērķu noteikšana pati par sevi negarantē to sasniegšanu. Lai gan dalībvalstīm bija jāpanāk 10 % atjaunojamās enerģijas īpatsvars transportā, 2020. gadā 15 dalībvalstis, tostarp Latvija, nerasniedza šo mērķi [5]. Citu izaicinājumu vidū bieži tiek minēta lielā atkarība no privātā autotransporta, kas tikai pastiprina nepieciešamību attīstīt alternatīvus pārvietošanās veidus un ietekmēt uzvedības maiņu. Bez šīs dimensijas pat vismodernākās tehnoloģiskās un politiskās iniciatīvas nespēj panākt būtisku emisiju samazinājumu. Uzvedības faktori tieši nosaka gan pieprasījumu un pārvietošanās veidu, gan tehnoloģisko un politisko iniciatīvu efektivitāti. Ieviesto politiku panākumi lielā mērā ir atkarīgi no sabiedrības atbalsta, kas kombinācijā ar tehnoloģiskām un infrastruktūras intervencēm nodrošina vislabākos rezultātus. Ņemot vērā to nozīmīgumu, šajā darbā tiek pētīti arī uzvedības faktori.

Autotransports, kas ietver divriteņu un trīsriteņu transportlīdzekļus, pasažieru, vieglos un smagos transportlīdzekļus, veido ievērojamu daļu no transporta sektora emisijām. To nosaka ceļu transporta dominante emisiju struktūrā, ko ietekmē lielais transportlīdzekļu skaits, atkarība no fosilajām degvielām, kā arī pasažieru un kravu pārvadājumu apjoms [6]. Ņemot vērā autotransporta dominējošo lomu ar transportu saistītajās emisijās un pasažieru mobilitātes nozīmi šajā sektorā, šis promocijas darbs īpaši koncentrējas uz pasažieru autotransporta dekarbonizāciju.

Pasažieru autotransporta dekarbonizācija ir viena no pasaules lielākajām problēmām, jo tā aptver plašu problēmu loku – no zaļo tehnoloģiju augstajām izmaksām līdz infrastruktūras nepilnībām [7]. Infrastruktūras nepilnības raksturo nepietiekami uzlādes/deģvielas uzpildes tīkli un to integrācija, kas kavē elektriskā/ūdeņraža transporta ieviešanu [7], [8]. Turklāt politikas un institucionālie šķēršļi, kā arī resursu ierobežojumi tiek uzskatīti par galvenajiem transporta dekarbonizācijas izaicinājumiem [9], [10]. Uzvedības un pieprasījuma faktori, tostarp pieaugošais ceļošanas pieprasījums, automašīnu īpašumtiesības un pretestība modālajai pārejai no privātajām automašīnām uz sabiedrisko transportu vai aktīvu mobilitāti, vēl vairāk sarežģīt pāreju uz ilgtspējīgām transporta sistēmām [9], [11]. Turklāt ekonomiskās un sociālās vienlīdzības problēmas, piemēram, pārejas izmaksas, finansējuma nepilnības un risks izslēgt maznodrošināto grupu pārstāvjus, var ierobežot dekarbonizācijas pasākumu īstenojamību un sabiedrības atbalstu [10], [11].

Šādi pierādījumi liecina, ka transporta sektora dekarbonizācijas sarežģītība prasa precīzi definētu analītisko ietvaru. Plaši izmantota pieeja, lai strukturētu esošās transporta sistēmas pāreju uz ilgtspējību, ir *avoid-shift-improve (ASI)* pieeja. Tā apvieno trīs savstarpēji papildinošus rīcības virzienus: (A) pārvietošanās nepieciešamības, braucienu skaita un attāluma mazināšanu; (S) pāreju uz ilgtspējīgākiem pārvietošanās veidiem; (I) transportlīdzekļu energoefektivitātes uzlabošanu un mazemisiņu tehnoloģiju ieviešanu. Šī pieeja apvieno braucienu nepieciešamības samazināšanu, pāreju uz ilgtspējīgākiem transporta veidiem un transportlīdzekļu efektivitātes un tehnoloģiju uzlabošanu. Šis ietvars ir nozīmīgs, jo tas parāda, ka transporta dekarbonizāciju nevar panākt tikai ar tehnoloģiskiem uzlabojumiem; tai nepieciešama pieprasījuma puses pasākumu, pārvietošanās veida maiņas un tehnoloģisko risinājumu kombinācija.

Šajā promocijas darbā pasažieru autotransporta dekarbonizācija tiek pētīta, izmantojot trīs savstarpēji saistītas dimensijas – tehnoloģisko pāreju, uzvedības maiņu un politikas īstenošanu. Kopā šīs dimensijas ietekmē transporta aktivitāti, transporta veidu izvēli un deģvielas tehnoloģijas, līdz ar to arī reālistisku SEG emisiju samazināšanas potenciālu. Tehnoloģiskā dimensija ietver mazemisiņu transportlīdzekļu, alternatīvo deģvielu un nepieciešamās infrastruktūras ieviešanu. Uzvedības dimensija attiecas uz transporta paradumiem, ceļošanas veida izvēli, sabiedrības atbalstu un iedzīvotāju vēlmi mainīt savus ikdienas mobilitātes paradumus. Politikas dimensija apvieno augšupējas un lejupējas pieejas, sasaistot stratēģisko plānošanu un regulējumu valsts līmenī ar pasākumu praktisku īstenošanu vietējā līmenī un to iedzīvotāju reakciju, uz kuriem šie pasākumi ir vērsti.

Pētījuma aktualitāte

Pētījuma aktualitāte īpaši izpaužas Latvijas kontekstā, kur transporta sektora emisijas joprojām ir augstas, neraugoties uz ilgtermiņa klimatneitralitātes mērķiem. Latvijas gadījumā transporta sektors 2023. gadā radīja 31,4 % no visām valstī radītajām emisijām (izņemot zemes izmantošanu, zemes izmantošanas maiņu un mežsaimniecību, ieskaitot netiešās oglekļa dioksīda (CO₂) emisijas) un bija otrais lielākais emisiju avots valstī aiz enerģētikas sektora. Turklāt Latvijā ir vērojama satraucoša tendence – tā vietā, lai samazinātu emisijas, valsts līdz 2023. gadam tās ir palielinājusi par 3 %, salīdzinot ar 1990. gadu, kas neatbilst Zaļā kursa mērķu

sasniegšanai [12]. Tas norāda, ka pašreizējais iniciatīvu līmenis ir nepietiekams un tas steidzami jāpilnveido. Kopumā Latviju var raksturot kā valsti ar augstu fosilo energoresursu izmantošanu, zemu atjaunojamo energoresursu izmantošanu transporta sektorā, augošu autoparku uz 1000 iedzīvotājiem un novecojušu autoparku.

Bez papildu dekarbonizācijas pasākumiem Latvija riskē ne tikai nesasniegt esošos mērķus, bet arī saskarties ar pieaugošām vides, ekonomiskajām un sociālajām izmaksām, kas saistītas ar aizkavētu tehnoloģisko pāreju, atkarību no fosilā kurināmā un neefektīviem mobilitātes modeļiem. Turklāt Latvijai var pieaugt izdevumi, kas saistīti ar sodiem, degvielas cenām un tehnoloģisko atpalicību, un tas viss ietekmē arī sabiedrības vispārējo labklājību.

Iepriekšējos pētījumos par Latvijas transporta nozari ir pētīta dabasgāzes un biometāna izmantošanas iespējamība Latvijā [13]. Pēc pārmaiņām Eiropas politiskajā situācijā 2022. gadā dabasgāzes izmantošanas potenciāls transportā galvenokārt tiek vērtēts kā pārejas risinājums ceļā uz atjaunīgajiem energoresursiem [14]. Ir analizētas arī elektrifikācijas iespējas pasažieru un kravu pārvadājumos gan autotransportā, gan dzelzceļa transportā [15]–[17], kas pašlaik ir Latvijas centrālā stratēģija dekarbonizācijas sasniegšanai. Pētījumos ir vērtēta arī vides nodokļu ietekme [18] un dažādas politikas pasākumu kombinācijas, identificējot sabiedrisko transportu, alternatīvo degvielu integrāciju un transportlīdzekļu efektivitātes uzlabošanu kā risinājumus, kas spēj būtiski samazināt pašreizējās emisijas [19]. Savukārt jaunākajos pētījumos ir pētīts Latvijas potenciāls integrēt ūdeņradi un sintētiskās degvielas [20]–[22].

Šie pētījumi veido būtisku pamatu konkrētu tehnoloģiju, politikas instrumentu un emisiju samazināšanas pasākumu izpratnei. Tomēr joprojām trūkst integrētas metodoloģijas, kas vienlaikus novērtētu pasažieru autotransporta dekarbonizāciju, ietverot tehnoloģisko pāreju, uzvedības maiņu un politikas īstenošanu. Tas veido pētniecības plaisu izpratnē par šo dimensiju mijiedarbību un nosacījumiem, kuros tās reālistiski var veicināt SEG emisiju samazināšanu.

Latvijas Nacionālais inventarizācijas ziņojums jeb Nacionālais inventarizācijas dokuments (NID) parāda, ka lielākie emisiju avoti transporta sektorā ir autotransports, kam seko dzelzceļa transports [12]. Kopā šie divi sektori ietver gan pasažieru, gan kravu pārvadājumus, un to kopējā ietekme veido 99,7 % no kopējām ziņotajām Latvijas transporta sektora emisijām [12]. Tāpēc šajā promocijas darbā uzmanība tiek pievērsta pasažieru autotransportam, savukārt sabiedriskais transports un dzelzceļš galvenokārt tiek aplūkoti pārvietošanās veida maiņas un politikas scenāriju kontekstā.

Mērķis un uzdevumi

Mērķis

Šī promocijas darba mērķis ir izstrādāt un lietot integrētu pieeju, lai novērtētu autotransporta pasažieru pārvadājumu dekarbonizācijas iespējas, sasaistot tehnoloģisko pāreju, uzvedības maiņu un koordinētu politikas īstenošanu.

Pētījuma jautājumi

1. Kādi faktori un šķēršļi ietekmē autotransporta pasažieru pārvadājumu tehnoloģisko pāreju uz mazemisiju alternatīvām?
2. Kā var savstarpēji savienot valsts un pašvaldību politikas pasākumus, lai veicinātu autotransporta pasažieru pārvadājumu dekarbonizāciju?

3. Kādi faktori ietekmē mobilitātes paradumus, sabiedrības atbalstu un vēlmi pāriet no privātajām automašīnām uz ilgtspējīgākiem transporta veidiem?

Pētījuma uzdevumi

1. Novērtēt autotransporta pasažieru pārvadājumu dekarbonizācijas teorētisko un politisko kontekstu, identificējot galvenās tehnoloģiskās, uzvedības un politikas īstenošanas problēmas.
2. Novērtēt mazemisiņu transporta tehnoloģiju un politikas pasākumu potenciālu, izmantojot daudzkritēriju, izmaksu un ieguvumu un sistēmas dinamikas analīzes metodes.
3. Analizēt valsts un pašvaldību politikas pasākumu mijiedarbību autotransporta pasažieru pārvadājumu dekarbonizācijas kontekstā Latvijā.
4. Izpētīt iedzīvotāju mobilitātes paradumus, sabiedrības atbalstu un uzvedības maiņas nozīmi transporta dekarbonizācijas pasākumu īstenošanā.
5. Izstrādāt un pārbaudīt integrētu analītisku pieeju, kas saista tehnoloģisko pāreju, uzvedības maiņu un koordinētu politikas īstenošanu, lai novērtētu risinājumus pasažieru autotransporta dekarbonizācijai.

Hipotēze

Integrēta analītiskā pieeja, kas ietver tehnoloģiskos, uzvedības un daudzlīmeņu politikas īstenošanas faktorus, nodrošina visaptverošāku un reālistiskāku pasažieru autotransporta dekarbonizācijas virzienu novērtējumu nekā tikai tehnoloģijās balstīts novērtējums.

Zinātniskā novitāte

Zinātniskā novitāte ir integrētas analītiskas pieejas izstrāde pasažieru autotransporta dekarbonizācijas risinājumu novērtēšanai, kurā tehnoloģiskā pāreja, uzvedības maiņa un koordinēta politikas ieviešana tiek analizētas kā savstarpēji saistītas dimensijas. Atšķirībā no pētījumiem, kas aplūko katru dimensiju atsevišķi, šis pētījums integrē visas trīs dimensijas vienotā analītiskā loģikā, lai novērtētu reālistisku SEG emisiju samazināšanas potenciālu pasažieru autotransportā.

Vairāku pētniecības metožu sistemātiska integrācija, tostarp daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas analīze, izmaksu un ieguvumu analīze, bibliometriskā analīze, cēloņsakarību cilpu analīze, sistēmdinamikas modelēšana un empīrisko uzvedības datu izmantošana, ir viens no būtiskiem šī promocijas darba ieguldījumiem. Lai gan katra no šīm metodoloģijām tiek plaši izmantota atsevišķi, šī apvienotā pieeja sniedz visaptverošu dekarbonizācijas iespēju novērtējumu, integrējot tehnoloģisko iespējamību, politikas atbilstību, ieviešanas apstākļus un sabiedrības pieņemšanu.

Promocijas darbs papildina transporta dekarbonizācijas modelēšanas pieeju, sistēmdinamikā balstītā novērtējumā iekļaujot uzvedības faktorus, tostarp pārvietošanās paradumus, uztvertās izmaksas, pārvietošanās veida izvēles preferences un gatavību mainīt ikdienas mobilitātes paradumus. Šāda pieeja ļauj novērtēt ne tikai tehniski iespējamo emisiju samazināšanas potenciālu, bet arī reālistiskāku pārejas potenciālu, ko ietekmē lietotāju uzvedība un politikas atbalsts.

Vēl viens promocijas darba ieguldījums ir daudzlīmeņu politikas īstenošanas perspektīvas piemērošana Latvijas situācijas analīzei. Darbā tiek sasaistīta valsts līmeņa politikas plānošana, pasākumu īstenošana pašvaldību līmenī un iedzīvotāju reakcija, parādot, ka pasažieru autotransporta dekarbonizācija ir atkarīga gan no politikas instrumentu koordinācijas dažādos pārvaldības līmeņos, gan no tehnoloģisko, uzvedības un institucionālo faktoru mijiedarbības.

Praktiskā nozīme

Promocijas darba praktiskā nozīme ir saistīta ar tā potenciālu veicināt efektīvu pasažieru autotransporta dekarbonizācijas politiku izvēli, salīdzināšanu un īstenošanu. Izstrādātais ietvars ļauj prioritizēt tehnoloģijas un politikas instrumentus, novērtēt atsevišķu un kombinētu politikas scenāriju ietekmi, kā arī sasaistīt valsts, pašvaldību un iedzīvotāju līmeņa rīcību transporta emisiju samazināšanai.

Darba rezultātus var izmantot dažādu tehnoloģiju un politikas pasākumu salīdzināšanai pasažieru autotransporta dekarbonizācijas kontekstā, ņemot vērā ne tikai emisiju samazināšanas potenciālu, bet arī izmaksas, ieviešanas sarežģītību, infrastruktūras vajadzības un sabiedrības atbalstu.

Izstrādātā pieeja ļauj novērtēt gan atsevišķu politikas pasākumu, gan to kombināciju potenciālo ietekmi uz SEG emisiju samazināšanu. Tas ir īpaši būtiski, jo transporta dekarbonizācijai nepieciešams koordinēts pasākumu kopums, nevis viena atsevišķa politikas instrumenta ieviešana.

Darba rezultāti palīdz parādīt, kā valsts līmeņa politikas mērķus un regulējumu iespējams sasaistīt ar vietējā līmeņa īstenošanas iespējām un iedzīvotāju mobilitātes izvēlēm. Tas var palīdzēt mazināt plaisu starp stratēģiskajiem mērķiem un praktiski sasniedzamiem emisiju samazinājumiem.

Uzvedības faktoru un sabiedrības atbalsta iekļaušana ļauj novērtēt, kuri pasākumi ir ne tikai teorētiski efektīvi, bet arī praktiski īstenojami un iedzīvotājiem pieņemami un atbalstāmi.

Pētījuma rezultātu aprobācija

Promocijas darba rezultāti ir aprobēti, tos prezentējot sešās starptautiskās zinātniskās konferencēs.

1. Kirsanovs, V., Barisa, A., **Safronova, A.** Cost-Benefit Assessment of Electric Vehicles vs Internal Combustion Engines in Latvia. *IEEE 61st International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2020)*, Nov. 5-7, **2020**.
2. Barisa, A., Kirsanovs, V., **Safronova, A.** Renewable Transport Challenge: A Comprehensive Policy Assessment Model. *International Conference on Applied Energy*, Thailand/virtual, Nov. 29 – Dec 5, **2021**.
3. **Safronova, A.**, Barisa, A., Kirsanovs, V. Linking Sustainable Mobility Criteria to Policymaking: Results of Multi-Criteria Analysis. *EAI Mobility IoT 2021 – 8th EAI International Conference on Mobility, IoT and Smart Cities*, Dec. 10, **2021**.
4. **Safronova, A.**, Barisa, A., Kirsanovs, V. Incorporating User Behaviour into System Dynamics Modelling: A Case Study of Private vs Public Transport in Latvia.

International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies (CONNECT2022), Riga, Latvia, May 11–13, **2022**.

5. **Safronova, A.**, Barisa, A. Realizing a Green Hydrogen Economy: An Examination of Influencing Factors. *International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies (CONNECT2023)*, Riga, Latvia, May 10–12, **2023**.
6. **Safronova, A.**, Barisa, A., Volkova, A., Lepiksaar, K., Laht, J. Local-Level Challenges in Sustainable Mobility: Survey Results from the Baltic Sea Region. *International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies CONNECT2025*, Riga, Latvia, May 14–16, **2025**.

Promocijas darba rezultāti ir publicēti deviņās saistītās zinātniskās publikācijās, kas indeksētas *Scopus* datubāzē.

1. Barisa, A., Kirsanovs, V., **Safronova, A.** Future Transport Policy Designs for Biomethane Promotion: A System Dynamics Model. *Journal of Environmental Management*, **2020**, Vol. 269, pp. 110842. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110842>.
2. Kirsanovs, V. Barisa, A., **Safronova, A.** Cost-Benefit Assessment of Electric Vehicles vs. Internal Combustion Engines in Latvia. *IEEE 61st International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2020)*, **2020**, pp. 9316610. <https://doi.org/10.1109/RTUCON51174.2020.9316610>.
3. **Safronova, A.**, Barisa, A., Kirsanovs, V. Linking Sustainable Mobility Criteria to Policymaking: Results of Multi-Criteria Analysis. *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*, **2022**, Vol. 9 (39): e7 <https://doi.org/10.4108/ew.v9i39.1549>.
4. Barisa, A., Kirsanovs, V., **Safronova, A.** Renewable Transport Challenge: A Comprehensive Policy Assessment Model. *Energy Proceedings*, **2021**, Vol. 20, paper id 858. <https://doi.org/10.46855/energy-proceedings-9315>.
5. **Safronova, A.**, Barisa, A., Kirsanovs, V. (2022). Incorporating User Behaviour into System Dynamics Modelling: A Case Study of Private vs Public Transport in Latvia. *Environmental and Climate Technologies*, **2022**, Vol. 26, pp. 294–305. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2022-0022>.
6. **Safronova, A.**, Barisa, A. Hydrogen Horizons: A Bibliometric Review of Trends in Diverse Emission Sectors. *Sustainability*, **2023**, Vol. 15 (19), pp. 14355. <https://doi.org/10.3390/su151914355>.
7. **Safronova, A.**, Barisa, A. Realizing a Green Hydrogen Economy: An Examination of Influencing Factors. *Environmental and Climate Technologies*, **2023**, Vol. 27, pp. 928–949. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2023-0068>.
8. **Safronova, A.**, Barisa, A., Volkova, A., Lepiksaar, K., Laht, J. Local-Level Challenges in Sustainable Mobility: Survey Results from the Baltic Sea Region. *Environmental and Climate Technologies*, **2025**, Vol. 29 (1), pp. 987–1004. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2025-0066>.

9. **Safronova, A.,** & Barisa, A. Climate Neutrality through Scenario Analysis: A Local Authority Perspective. *Journal of Environmental Management*, **2025**, Vol. 383, pp. 125365. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125365>.

Citas publikācijas

1. Kirsanovs, V., Romagnoli, F., Piščika, A., **Safronova, A.,** Feofilovs, M. Transportation Biofuels in Latvia: A Life Cycle Thinking Approach. *Environmental and Climate Technologies*, **2023**, Vol. 27, pp. 40–55. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2023-0004>.

Papildus tam promocijas darba izstrādes gaitā tika sagatavota viena zinātniskā monogrāfija.

1. D. Blumberga, J. Pubule, D. Lauka, V. Kosteviča, A. Kubule, I. Vamža, I. Luksta, Ģ. Bohvalovs, A. Safronova, A. Blumberga, K. Laktuka, D. Paule, R. Freimanis, and K. Roša, Klimatneitralitātes dimensijas. Rīga, Latvija: RTU Izdevniecība, 2026. doi: 10.7250/9789934372681.

Darba struktūra

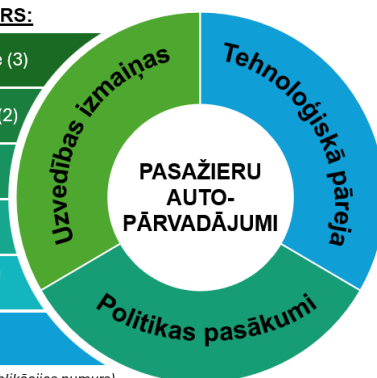
Promocijas darbā uzmanība pievērsta pasažieru autotransportam, ko būtiski ietekmē ievadā raksturotie izaicinājumi – privāto automašīnu dominance, novecojis autoparks un atkarība no fosilajām degvielām. Šajā pētījumā tiek analizēti iespējamie risinājumi šo izaicinājumu mazināšanai, vērtējot pasažieru autotransporta dekarbonizāciju trīs savstarpēji saistītās dimensijās – tehnoloģiskā pāreja, uzvedības maiņa un politikas pasākumi. Kopā šīs dimensijas veido pamatu transporta sektora SEG emisiju samazināšanas potenciāla novērtēšanai.

Promocijas darba analītiskais ietvars redzams 1. attēlā. Attēla centrā ir pētījuma galvenais objekts – pasažieru autotransports. To aptverošās dimensijas raksturo galvenos dekarbonizācijas analīzes aspektus – tehnoloģisko pāreju, uzvedības maiņu un politikas intervences, kas kopā vērstas uz SEG emisiju samazināšanu.

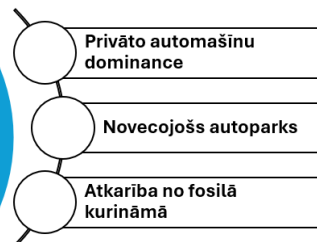
METODOLOĢISKAIS IETVARS:

Daudzkritēriju lēmumu analīze (3)
Izmaksu un ieguvumu analīze (2)
Bibliometriskā analīze (6)
Cēloņsakarību cilpu diagrammas (7)
Sistēmdinamikas modelēšana (1, 4, 5, 9)
Empīriskā aptauja (5, 8)

*(publikācijas numurs)



GALVENIE IZAIČINĀJUMI:



1. att. Analītiskā sistēma pasažieru autotransporta dekarbonizācijas novērtēšanai (autore izstrādāts).

Pētījumā izmantotās metodes ir uzskaitītas attēla kreisajā pusē, un atbilstošie publikāciju numuri norāda, kur konkrētās pieejas tiek izmantotas. Metodes ietver daudzkritēriju lēmumu analīzi, izmaksu un ieguvumu analīzi, bibliometrisko analīzi, cēloņsakarību cilpu diagrammas, sistēmdinamikas modelēšanu un empīriskas aptaujas. Publikāciju numuri iekavās atbilst

aprobācijas sadaļas numuriem, tādējādi sasaistot promocijas darba struktūru ar izmantotajām metodēm un zinātniskajiem rezultātiem. Kopumā 1. attēlā parādīts, kā promocijas darbs saista pasažieru autotransporta dekarbonizācijas izaicinājumus, galvenos analītiskos aspektus un izmantotās pētniecības metodes.

Promocijas darbs balstīts deviņās tematiski saistītās publikācijās. Tas ietver ievadu un piecas nodaļas:

- Literatūras analīze;
- Metodoloģija;
- Rezultāti;
- Secinājumi;
- Ieteikumi.

Literatūras analīzes sniedz ieskatu klimatneitralitātes koncepcijā transporta nozarē, pašreizējos ES un Latvijas transporta nozares mērķos, *ASI* pieejā, tehnoloģiskajos risinājumos klimatneitrālam transportam, kā arī pašvaldību lomā un iedzīvotāju uzvedības nozīmē dekarbonizācijā. Papildus tajā ir sniegta literatūras analīze par scenāriju analīzes pieeju.

Metodoloģijas nodaļā apkopotas visas pētījuma veikšanā izmantotās metodes un rādītāji. Tajā ir aplūkotas pētījuma pieejas, datu ieguves un analīzes metodes, kā arī modeļa izstrādes un validācijas procesi, pamatotas izmantotās pieejas un aprakstīts, kā tās palīdz sasniegt promocijas darba mērķi. Rezultātu nodaļā apkopoti pētījuma galvenie rezultāti, un tie ir sakārtoti pa tematiskajām jomām. Tajā ir parādīts, kā iegūtie rezultāti sniedz atbildes uz pētījuma jautājumiem un palīdz labāk izprast efektīvus emisiju samazināšanas pasākumus pasažieru autotransporta sektorā.

1. LITERATŪRAS ANALĪZE

Literatūras analīzē apkopots teorētiskais un politikas konteksts, kas veido pamatu pasažieru autotransporta dekarbonizācijas izpētei. Tajā aplūkoti galvenie transporta klimatneitralitātes aspekti, ilgtspējīgas mobilitātes pieejas, tehnoloģiskie risinājumi, pašvaldību loma, iedzīvotāju uzvedība un daudzlīmeņu pārvaldības nozīme emisiju samazināšanas pasākumu īstenošanā.

Klimatneitralitātes jēdziens un nozīme transporta sektorā

Klimatneitralitātes jēdziens paredz, ka kopējais siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisiju apjoms, ko rada noteikts subjekts, piemēram, valsts, pilsēta, uzņēmums vai indivīds, tiek līdzsvarots ar no atmosfēras piesaistīto emisiju apjomu, tādējādi nodrošinot neto nulles ietekmi uz klimatu [23]. Tas ietver gan radīto emisiju samazināšanu, gan oglekļa piesaistes mehānismu izmantošanu, kas ļauj absorbēt atlikušās emisijas.

Transporta sektors ir otrs lielākais galapatēriņa enerģijas patērētājs un nozīmīgs emisiju avots, veidojot vairāk nekā 23 % no kopējām pasaules ar enerģiju saistītajām CO₂ emisijām [1]. Autotransports ir lielākais piesārņotājs transporta sektorā – vieglās automašīnas, kravas automobiļi, autobusi, kā arī divriteņu un trīsriteņu transportlīdzekļi kopā rada gandrīz trīs ceturtdaļas no globālajām transporta CO₂ emisijām [6].

Eiropas Klimata likums nosaka starpposma mērķi līdz 2030. gadam samazināt neto SEG emisijas vismaz par 55 %, salīdzinot ar 1990. gada līmeni, savukārt Eiropas Zaļā kursa mērķis ir līdz 2050. gadam samazināt transporta emisijas par 90 %, nodrošinot viedu, konkurētspējīgu, drošu, pieejamu un cenas ziņā pieejamu transporta sistēmu [24], [25]. Jaunākie mērķi paredz līdz 2030. gadam palielināt atjaunīgās enerģijas īpatsvaru transportā līdz 29 % no transporta sektora galapatēriņa enerģijas [26].

Transporta dekarbonizācija Latvijai ir īpaši aktuāla, jo nozare saskaras ar vairākiem strukturāliem šķēršļiem. Saskaņā ar 2023. gada datiem autotransports Latvijā veido 97 % no kopējām transporta sektora emisijām [12]. Augstais emisiju īpatsvars ir saistīts ar novecojušu, fosilajās degvielās balstītu autoparku, augstu atkarību no privātajām automašīnām un zemu atjaunīgo energoresursu īpatsvaru [27]. Tādējādi problēma nav saistīta tikai ar augstu emisiju līmeni, bet arī ar esošās transporta sistēmas struktūras inerci, kas kavē nozares dekarbonizāciju. Kopumā Latvijas piemērs parāda nepieciešamību pēc pieejas, kas ļauj novērtēt, kuri pasākumi var sniegt reālu ieguldījumu emisiju samazināšanā, ņemot vērā gan tehnoloģiju ieviešanas nosacījumus, gan mobilitātes alternatīvu attīstību.

Avoid–Shift–Improve (ASI) pieeja

ASI pieeja tiek plaši izmantota, lai strukturētu politikas pasākumus, kas vērsti uz tādu emisiju samazināšanu, kas saistītas ar transportu, un ilgtspējīga transporta attīstību. Tā ietver trīs galvenās stratēģijas – nevajadzīgu pārvietošanās nepieciešamību samazināšanu, pārejas veicināšanu uz videi draudzīgākiem transporta veidiem un esošo transporta sistēmu efektivitātes uzlabošanu. Pētījumi liecina, ka šo stratēģiju kombinēšana palielina to efektivitāti [28], [29]. Vienlaikus literatūrā uzsvērts, ka efektīvai politikas izstrādei ir jāņem vērā vietējais konteksts.

Lai gan visas trīs stratēģijas ir būtiskas, pašreizējās enerģētikas un transporta politikas bieži vien nepietiekami atspoguļo “*avoid*” jeb pārvietošanās pieprasījuma mazināšanas pasākumus, neraugoties uz to potenciālu [30]. Tas ir saistīts ar ieviešanas sarežģītību, sabiedrības pretestību un ierobežotu pašvaldību kontroli pār zemes izmantošanas plānošanu [31]. “*Avoid*” pasākumu mērķis ir samazināt pārvietošanās pieprasījumu. Tie ietver izmaiņas pilsētplānošanā, kas veicina kompaktāku pilsētu attīstību un pakalpojumu pieejamību tuvāk dzīvesvietai. Literatūrā norādīts, ka e-pakalpojumi, attālinātais darbs un citi pārvietošanās pieprasījuma mazināšanas pasākumi būtu jāuzskata par papildinošiem risinājumiem, nevis atsevišķiem transporta dekarbonizācijas instrumentiem.

“*Shift*” jeb pārvietošanās veida maiņas pasākumi ir vērsti uz iedzīvotāju pāreju uz ilgtspējīgākām transporta alternatīvām, tostarp aktīvās mobilitātes veicināšanu un plašāku sabiedriskā transporta izmantošanu. Šie pasākumi ir nozīmīgi, jo tie samazina emisijas, nevis pilnībā izslēdzot pārvietošanos, kā to paredz “*avoid*” pasākumi, bet mainot pārvietošanās veidu, kā tiek nodrošinātas ikdienas mobilitātes vajadzības. Tomēr šo pasākumu efektivitāti nosaka vietējā vide, tostarp attālumi, iedzīvotāju blīvums, laikapstākļi, infrastruktūras uzturēšanas kvalitāte un iedzīvotāju drošības sajūta [32]. Literatūras analīze parāda arī to, ka aktīvās mobilitātes un mikromobilitātes iniciatīvas ir efektīvākas tad, ja tās tiek īstenotas kopā ar sabiedriskā transporta modernizāciju un multimodālu savienojumu izveidi, nevis kā atsevišķi risinājumi.

Tas uzsver sabiedriskā transporta modernizāciju kā būtisku transporta dekarbonizācijas elementu, jo tā apvieno gan tehnoloģiskos uzlabojumus, gan pāreju uz ilgtspējīgākiem transporta veidiem [33], [34]. Tāpēc sabiedriskā transporta modernizācija nav skatāma tikai kā autoparka nomaiņa. Tā ietver arī pakalpojumu kvalitātes uzlabošanu, maršrutu un kustības sarakstu optimizāciju, pieejamības palielināšanu, multimodālu savienojumu veidošanu un digitālo risinājumu izmantošanu [35]. Tomēr šādu pasākumu ietekme uz emisiju samazināšanu ir atkarīga ne tikai no izmantotās tehnoloģijas, bet arī no pakalpojuma kvalitātes, infrastruktūras pieejamības, finansējuma stabilitātes un iedzīvotāju gatavības mainīt pārvietošanās paradumus.

Pilnīga atteikšanās no motorizētiem transportlīdzekļiem nav iespējama, tāpēc tehnoloģiskie risinājumi ir būtiska “*Improve*” jeb transporta sistēmas uzlabošanas stratēģijas daļa klimatneitralitātes sasniegšanai transporta sektorā [28]. Vienlaikus jāuzsver, ka tehnoloģisko risinājumu efektivitāte lielā mērā ir atkarīga no to integrācijas ar politikas pasākumiem un uzvedības maiņu [36]. Bez politikas atbalsta tirgus nespēj ieviest jaunas tehnoloģijas pietiekami plašā mērogā [36]. Savukārt bez uzvedības maiņas, kas ietver cilvēku gatavību mainīt paradumus un atbalstīt inovācijas, pat labākās tehnoloģijas nevar sasniegt paredzēto efektu [37].

Tehnoloģiskie risinājumi ir būtiska transporta dekarbonizācijas daļa, tomēr katram alternatīvās enerģijas veidam ir atšķirīga loma un piemērotība. Elektrotransportam ir būtisks potenciāls samazināt transporta emisijas, taču tas nav pietiekams risinājums pats par sevi, jo tā ietekme ir atkarīga no elektroenerģijas ražošanas struktūras, uzlādes infrastruktūras pieejamības, transportlīdzekļu izmaksām un politikas atbalsta [38], [39]. Savukārt ūdeņraža potenciāls Latvijā pašreizējā attīstības posmā galvenokārt ir saistāms ar tiem transporta segmentiem, kuros tiešā elektrifikācija ir sarežģītāka, piemēram, sabiedrisko transportu, smago transportu, ostu vai dzelzceļa lietojumiem [40], [41]. Biometānu un citas modernās atjaunīgās

degvielas var uzskatīt par pārejas risinājumiem, jo tās ļauj samazināt SEG emisijas un izmantot esošo infrastruktūru laikā, kad tiek attīstīta plašāka elektrifikācija un zaļā ūdeņraža izmantošana [42], [43].

Pāreja uz alternatīvajām degvielām ir būtiska klimatneitralitātes sasniegšanai transporta sektorā; tomēr saskaņā ar *ASI* pieeju tikpat nozīmīgi ir strādāt pie pārvietošanās pieprasījuma samazināšanas, kas vienlaikus mazina nepieciešamību pēc jebkura veida degvielas. Digitalizācija un citi viedās mobilitātes risinājumi var palīdzēt optimizēt esošos procesus, tādējādi uzlabojot efektivitāti un samazinot emisijas. Turklāt šādi risinājumi var veicināt arī uzvedības maiņu.

Pašvaldību rīcības un iedzīvotāju uzvedības loma transporta dekarbonizācijā

Lielākā daļa pētījumu par transporta nozares dekarbonizāciju ir vērsti vai nu uz valsts līmeni, kur tiek pētītas vispārējās stratēģijas un tehnoloģiju attīstība, vai arī uz atsevišķām politikas jomām vai tehnoloģiju attīstības iespējām [36], [44], [45]. Tomēr patiesībā ļoti svarīgs darbs tiek veikts pašvaldību līmenī, jo tieši šajā līmenī tiek pieņemti lēmumi par infrastruktūru, mobilitātes paradumu maiņu, kā arī par citiem atbalsta mehānismiem iedzīvotājiem. Pašvaldībām ir izteikta priekšrocība, jo tās spēj operatīvi risināt jautājumu par siltumnīcefekta gāzu emisiju samazināšanu, jo tām ir ievērojama ietekme uz lēmumiem par zemes izmantošanu, ēkām, vietējo transportu un atkritumu apsaimniekošanu vietējā līmenī [46].

Ilgspējīga transporta sistēma ir tāda, kas līdz minimumam samazina negatīvo ietekmi uz vidi un veicina sociālo un ekonomisko labklājību, vienlaikus nodrošinot pamata piekļuvi transportam un darbojoties taisnīgi, droši un ekonomiski [47], [48]. Tas liecina, ka politikas veidotājiem, izstrādājot politikas pamatnostādnes, būtu jāņem vērā ekonomiskie, vides un sociālie faktori. Pašvaldību potenciāls liecina, ka, lai sasniegtu klimata neitralitātes mērķus, ir nepieciešama divvirzienu pieeja: “no augšas uz leju”, kur mērķi tiek noteikti valsts līmenī un tiek izstrādāti atbalsta instrumenti, un “no lejas uz augšu”, kur pašvaldības ar savu rīcību un vietējiem risinājumiem nodrošina šo mērķu praktisku īstenošanu. Šāda pieeja var nodrošināt politikas saskaņotību starp valsts un vietējo līmeni, identificējot sinerģijas un atšķirības starp līmeņiem, kas rezultātā paaugstina efektivitāti.

Vienas universālas atbildes nav, un politikas pasākumi ir jāpielāgo vietējām vajadzībām, tāpēc, lai panāktu pozitīvus rezultātus, ir ļoti svarīgi ņemt vērā unikālās vietējās īpatnības, piemēram, ģeogrāfiju, demogrāfiju un sociālekonomiskos apstākļus [49], [50]. Ilgtspējīgas mobilitātes politikas efektivitāti nosaka ne tikai izvēlētais pasākums, bet arī vietējais konteksts, kurā tas tiek īstenots. Praksē šīs atšķirības bieži izpaužas kā atšķirības starp pilsētu, piepilsētu un lauku apgabaliem iedzīvotāju blīvuma, piekļuves pakalpojumiem, transporta infrastruktūras un mobilitātes vajadzību ziņā. Šie secinājumi ir īpaši aktuāli Latvijā, kur atšķirības starp lauku un pilsētu apgabaliem līdzīgi ietekmē ilgtspējīgas mobilitātes alternatīvu ieviešanu.

Vairāki šķēršļi var ierobežot pašvaldību spēju īstenot ilgtspējīgas mobilitātes pasākumus. Finanšu resursiem ir būtiska ietekme uz pašvaldību lēmumiem, savukārt valsts finansējums bieži vien nenodrošina pietiekamu atbalstu reģionālā līmeņa ilgtspējīgiem transporta projektiem [51]. Var pastāvēt arī kultūras un politiskie šķēršļi, jo īpaši gadījumos, kad noteiktas sabiedrības grupas pretojas jaunu politikas pasākumu ieviešanai [52]. Tāpēc ilgtspējīgu pilsētas transporta stratēģiju izstrādē un īstenošanā ir ārkārtīgi svarīga koordinācija starp ieinteresētajām pusēm,

iedzīvotājiem, dažādiem lēmumu pieņemšanas līmeņiem, nozarēm un valsts iestādēm [53]. Institucionālā kapacitāte un kompetence arī ir nozīmīgi šķēršļi. Divu citu būtisku šķēršļu vidū ir sistēmas trūkums ilgtermiņa kvantitatīvu vides novērtējumu veikšanai, kā arī nepietiekama prasme identificēt un raksturot pasākumus un mērķus [54], [52]. Pašvaldībām bieži vien ir grūti noteikt sākotnējos rādītājus, modelēt potenciālo politiku ietekmi un sekot līdzi progresam, jo pašvaldībām trūkst precīzu, detalizētu datu par enerģijas patēriņu, emisijām un vietējiem apstākļiem [55]. Šī problēma ir aktuāla arī Latvijas pašvaldībās, kurām raksturīga ierobežota datu pieejamība un nepietiekamas tehniskās iespējas.

Šie ierobežojumi norāda, ka pašvaldību kapacitāte, datu pieejamība un plānošanas rīki ir būtiski priekšnoteikumi efektīvai transporta dekarbonizācijas pasākumu izstrādei. Tomēr pasākumu praktiskā īstenošana ir atkarīga ne tikai no pašvaldību spējas tos plānot, bet arī no iedzīvotāju zināšanām, izpratnes un gatavības mainīt esošos mobilitātes paradumus.

Papildus zināšanām ir vairāki citi faktori, kas jāņem vērā, lai mainītu pašreizējās uzvedības tendences. Transporta veida izvēli ietekmē izmaksas, ceļošanas laiks, satiksmes sastrēgumi, attālums, komforts, pieejamība, veselība un fiziskā forma, laika apstākļi un gadalaiks, drošība, vides apziņa, kā arī valdības politika un iniciatīvas [56].

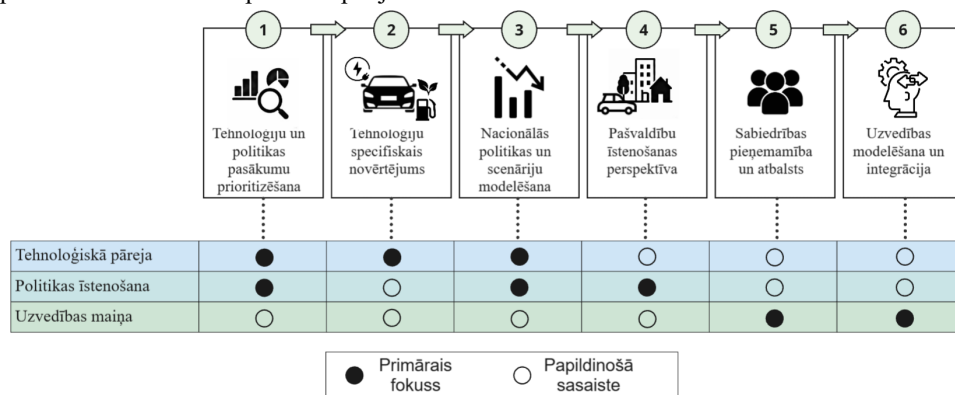
Kopumā pašvaldībām ir izšķiroša loma, lai sasaistītu valsts klimata mērķus ar to praktisko īstenošanu vietējā līmenī. Tomēr pašvaldību ieguldījums transporta dekarbonizācijā ir atkarīgs no vietējiem apstākļiem, pieejamajiem finanšu resursiem, institucionālajām spējām, datu pieejamības, ieinteresēto pušu sadarbības un sabiedrības atbalsta. Tas pamato nepieciešamību pēc scenāriju novērtēšanas rīkiem vietējā līmenī, kas ļautu salīdzināt dažādas politikas kombinācijas un noteikt vispiemērotākos transporta dekarbonizācijas attīstības virzienus, ņemot vērā vietējos apstākļus.

Ieinteresēto pušu lomas un daudzlīmeņu mijiedarbība transporta dekarbonizācijā

Transporta dekarbonizācija ir daudzlīmeņu pārvaldības izaicinājums, kas prasa daudzu ieinteresēto pušu saskaņotu rīcību. “Trīskāršās spirāles” pieeja ir noderīgs sākumpunkts, lai analizētu mijiedarbību starp valdību, rūpniecību un akadēmisko vidi, savukārt tās vēlākie paplašinājumi uzsver arī sabiedrības un uz ilgtspējību vērstu inovāciju nozīmi [57]–[59]. Saistībā ar pasažieru autotransporta dekarbonizāciju valsts līmenis nodrošina stratēģisko virzienu, regulējumu un atbalsta instrumentus; pašvaldības šos pasākumus pielāgo un īsteno vietējā līmenī, sabiedrība nosaka to atbalstu un praktisko īstenošanu, izdarot ikdienas mobilitātes izvēles, savukārt rūpniecība un pētniecība nodrošina īstenošanai nepieciešamās tehnoloģijas, pakalpojumus, datus un zināšanas [60]–[62].

2. METODOLOĢIJA

Lai pārbaudītu šo hipotēzi, promocijas darbā tika izmantota pētniecības metožu kombinācija, kas ļauj aptvert tehnoloģiskos, uzvedības un daudzlīmeņu politikas īstenošanas faktorus. Metodoloģiskajā ietvarā apvienota politikas un tehnoloģiju prioritāšu noteikšana, ekonomiskais novērtējums, bibliometriskā un sistēmu analīze, sistēmdinamikas modelēšana, pašvaldību scenāriju modelēšana un empīriskā iedzīvotāju aptauja. Pētījuma struktūra tika izstrādāta kā integrēta daudzlīmeņu pieeja, kurā autotransporta dekarbonizācija tiek analizēta, savienojot valsts līmeņa politiku, pašvaldību īstenošanas spējas un iedzīvotāju mobilitātes paradumus. 2.1. attēlā aprakstīta pētījuma norise.



2.1. att. Integrētās novērtēšanas sistēmas metodoloģiskā struktūra.

Izmantotās metodes tika izvēlētas tā, lai būtu iespējams novērtēt savstarpēji saistītus pārejas aspektus – tehnoloģisko attīstību, politikas efektivitāti, īstenošanu vietējā līmenī un sabiedrības atbalstu. Pētījuma process tika strukturēts sešos secīgos posmos. Pirmajā posmā, izmantojot daudzkritēriju lēmumu analīzi, tika identificētas transporta dekarbonizācijas politikas un tehnoloģiju prioritātes. Otrajā posmā tika padziļināti novērtētas atsevišķas tehnoloģijas, izmantojot izmaksu un ieguvumu analīzi, bibliometrisko analīzi un cēloņsakarību diagrammas. Trešajā posmā, izmantojot sistēmas dinamikas modeli, tika analizēti valsts līmeņa politikas scenāriji. Ceturtajā posmā analīze tika paplašināta līdz pašvaldību līmenim, izstrādājot scenārijos balstītu transporta emisiju novērtēšanas modeli. Piektajā posmā, izmantojot starptautisku iedzīvotāju aptauju, tika analizēti mobilitātes paradumi un atbalsts transporta politikas pasākumiem. Visbeidzot, sistēmdinamikas modelēšanā tika iekļauti uzvedības faktori, lai novērtētu, kā ceļošanas laika un izmaksu izmaiņas var ietekmēt pāreju no privātajiem automobiļiem uz sabiedrisko transportu.

2.1. Daudzkritēriju lēmumu analīze

Lai noteiktu transporta politikas instrumentu un alternatīvo degvielu tehnoloģiju analīžu prioritātes, tika izmantota daudzkritēriju analīze (*MCDA*), ņemot vērā ekonomiskos, vides, tehnoloģiskos un sociālos kritērijus. Tika izvēlēta *TOPSIS* metode, jo tā ļauj alternatīvas sarindot atkarībā no to relatīvās tuvības ideālajam risinājumam gan izmaksu, gan citu ieguvumu ziņā [63], [64]. Šī pieeja ir plaši izmantota arī transporta pētījumos, lai novērtētu ilgtspēju, darbības efektivitāti un politikas alternatīvas [65]–[67].

Analīze balstījās aptaujas, kurā piedalījās 19 eksperti, kas pārstāvēja pētniecības iestādes, valsts pārvaldi, pašvaldības, rūpniecību, asociācijas un nevalstiskās organizācijas, rezultātos. Eksperti novērtēja 24 transporta politikas instrumentus un piecas Latvijai nozīmīgas alternatīvās degvielas vai transportlīdzekļu tehnoloģijas – elektriskos transportlīdzekļus, dabasgāzes transportlīdzekļus, biometāna transportlīdzekļus, biodegvielas transportlīdzekļus un ūdeņraža transportlīdzekļus.

Politikas instrumenti tika atlasīti, pamatojoties uz literatūras pārskatu un citu valstu pieredzi. Tika analizētas valstis, kurās transporta nozarē ir liela atjaunojamo energoresursu daļa, tostarp Zviedrija, Norvēģija, Somija, Nīderlande un Austrija, kā arī Baltijas valstu pieredze un plānotie pasākumi Latvijā. Šī promocijas darba nolūkos izvēlētie politikas pasākumi tika iedalīti sešās kategorijās: (1) atbalsts dzelzceļam un sabiedriskajam transportam; (2) atbalsts biodegvielai un biometānam; (3) atbalsts alternatīvās degvielas infrastruktūrai; (4) atbalsts zemu emisiju vai bezemisiju transportlīdzekļu iegādei; (5) nodokļu pasākumi, kas balstās principā “piesārņotājs maksā”; (6) pilsētas mobilitātes pasākumi, kas nodrošina papildu atbalstu zemu emisiju vai bezemisiju transportlīdzekļiem. Politikas instrumenti tika novērtēti atbilstoši četriem kritērijiem – nepieciešamajām investīcijām, uzraudzības sarežģītībai, potenciālam veicināt atjaunojamās enerģijas resursus un sabiedrības atbalstu. Nepieciešamās investīcijas un uzraudzības sarežģītība tika definētas kā izmaksu kritēriji, savukārt potenciāls veicināt atjaunojamās enerģijas resursus un sabiedrības atbalsts tika definēti kā ieguvumu kritēriji.

Degvielas un tehnoloģiju alternatīvas tika novērtētas, ņemot vērā sociālos, vides, tehnoloģiskos un ekonomiskos aspektus. Degvielas/tehnoloģiju novērtējumā sociālais ieguvums un tehnoloģiskā gatavība tika uzskatīti par ieguvuma kritērijiem, savukārt ietekme uz vidi un ekonomiskās izmaksas – par izmaksu kritērijiem.

Eksperti noteica arī kritēriju svērumus, kā arī politikas instrumentu un degvielu/tehnoloģiju novērtējuma svērumu. Kritēriju svērumu summa bija vienāda ar 1, un šie svērumi tika izmantoti lēmumu matricas svēršanai.

TOPSIS aprēķins tika veikts programmā *MS Excel*. Vispirms, pamatojoties uz ekspertu vidējiem vērtējumiem, tika izveidota lēmumu matrica. Pēc tam matrica tika normalizēta, tai tika piemēroti ekspertu noteiktie kritēriju svāri, tika noteikti ideālie un negatīvie ideālie risinājumi, kā arī aprēķināts katras alternatīvas attālums no šiem risinājumiem. Visbeidzot, tika noteikta alternatīvu relatīvā tuvība, saskaņā ar kuru tās tika sarindotas.

Ekspertu novērtējumu nenoteiktība tika risināta, analizējot tikai norādītos kritērijus, mainot galveno kritēriju svērumus un proporcionāli pārrēķinot pārējo kritēriju svērumus, kuru summa ir 1. Turklāt tika analizēta ekspertu viedokļu izkliede un aprēķināts 95 % ticamības intervāls,

kur plašāks intervāls norāda lielākās atšķirības ekspertu novērtējumos. *MCDA/TOPSIS* analīzes rezultāti sniegti 3.1. apakšnodaļā.

2.2. Izmaksu un ieguvumu analīze

Šajā pētījumā tika izmantota izmaksu un ieguvumu analīze, lai salīdzinātu elektromobiļus un transportlīdzekļus ar iekšdedzes dzinējiem Latvijā no ekonomiskā un sociāli ekoloģiskā viedokļa. Šī metode tika izvēlēta tāpēc, ka tā ļauj novērtējumā iekļaut ne tikai tiešās ekonomiskās izmaksas, bet arī ārējās izmaksas, piemēram, gaisa piesārņojumu, siltumnīcefekta gāzu emisijas un troksni [68], [69]. Pētījuma veikšanas brīdī šāds salīdzinājums bija īpaši aktuāls, ņemot vērā pieaugošo politisko interesi par transportlīdzekļu parka elektrifikāciju un to, ka trūka tieši Latvijai veltītu novērtējumu, kuros tiktu analizētas transportlīdzekļu ekspluatācijas izmaksas kopā ar ārējām vides un sociālajām ietekmēm.

Analīzē tika salīdzināti gan jauni, gan piecus gadus veci benzīna, dīzeļa un elektriskie transportlīdzekļi. Pētījuma mērķis bija noskaidrot, kurš transportlīdzekļu tips ir visizdevīgākais no ekonomiskā un sociāli ekoloģiskā viedokļa. Sistēmas robežas ietvēra transportlīdzekļa ražošanu, iegādi, ekspluatāciju un ekspluatācijas beigas jeb utilizāciju. Lai nodrošinātu salīdzināmību, tika pētīti līdzīgas klases, komforta līmeņa un dzinēja jaudas “*Volkswagen*” modeļi.

Analīzē tika iekļautas šādas izmaksu kategorijas: transportlīdzekļa iegādes cena; degvielas vai elektroenerģijas izmaksas; uzturēšanas un apkopes izmaksas; ekspluatācijas un reģistrācijas nodokļi; autostāvvietas izmaksas; transportlīdzekļa ražošanas emisiju izmaksas; ekspluatācijas beigās radušos emisiju izmaksas; kā arī ārējās izmaksas, kas saistītas ar gaisa piesārņojumu, klimata pārmaiņām un troksni. Kopējās izmaksas tika aprēķinātas 10 gadu ekspluatācijas periodam, pieņemot, ka transportlīdzekļa gada nobraukums ir 13 000 km.

Izmaksu novērtējumā tika iekļautas tiešās un ārējās izmaksas. Tiešās izmaksas ietvēra transportlīdzekļa iegādi, apkopi, degvielas vai elektroenerģijas izdevumus, nodokļus un maksas. Ārējās izmaksas ietvēra gaisa piesārņojumu, siltumnīcefekta gāzu emisijas un troksni. Šīs izmaksas tika izteiktas naudas izteiksmē, izmantojot emisiju koeficientus, transportlīdzekļa darbības datus un ārējo izmaksu vērtības attiecībā uz gaisa piesārņojumu, klimata pārmaiņu ietekmi un troksni. Lai gan elektriskie transportlīdzekļi ekspluatācijas laikā nerada tiešas izplūdes emisijas, novērtējumā tika iekļautas emisijas, kas saistītas ar elektroenerģijas ražošanu.

Tika veikta jutīguma analīze, lai novērtētu, kā izmaiņas gada nobraukumā, degvielas un elektroenerģijas cenās, kā arī CO₂ cenā ietekmē analizēto transportlīdzekļu kopējās kumulatīvās izmaksas. Šī pētījuma rezultāti izklāstīti 3.2.1. apakšnodaļā.

2.3. Bibliometriskā analīze

Pētot jebkuru inovatīvu tehnoloģiju, ir lietderīgi izprast šajā jomā pastāvošās pētniecības tendences. Tas palīdz identificēt zināšanu trūkumu, izvairīties no jau veikto pētījumu dublēšanās un labāk izprast, kādas tēmas šajā jomā piesaista vislielāko uzmanību. Viena no

pieejām, kas palīdz izvērtēt lielu zinātnisko publikāciju apjomu, lai kartētu pētniecības aktivitāti, sadarbības tīklus, ietekmīgus autorus un jaunās tēmas, ir bibliometriskā analīze

Lai nodrošinātu plašāku izpratni par inovāciju dinamiku un pētniecības virzieniem, kas veido pamatu transporta nozares dekarbonizācijas risinājumiem, tika izmantota udeņraža tehnoloģiju attīstības bibliometriskā analīze. Šī metode tika izvēlēta, jo tā ļauj analizēt lielu zinātnisko publikāciju apjomu, lai identificētu publikāciju dinamiku, tematiskos klasterus un jaunus pētniecības virzienus [70], [71].

Pētījuma mērķis bija noskaidrot, kā udeņraža izmantošana dažādās nozarēs ir saistīta ar Ilgtspējīgas attīstības mērķu (*SDG*) sasniegšanu un kā dažādās nozarēs tiek apspriesta ilgtspējība. Analīzei tika izmantota datubāze *Scopus*. Datu atlase tika veikta 2023. gada 15. augustā. Tika analizēti tikai angļu valodā rakstīti raksti, pārskata raksti un konferenču materiāli, un sākotnējā vispārējā meklēšana aptvēra publikācijas no 1975. līdz 2023. gadam. Dati tika analizēti, izmantojot bibliometriskos rādītājus (publikāciju dinamika, citējumi) un tematisko kartēšanu ar programmatūru *VOSviewer* [72], [73].

Pētījumā tika izvērtētas ar udeņradi saistītās publikācijas sešās nozarēs, proti, enerģētikā, rūpniecībā, transportā, lauksaimniecībā, komercsektorā un mājokļu sektorā. Publikācijas tika manuāli klasificētas atbilstoši nozarēm, novērtējot ar ilgtspējīgas attīstības mērķiem un jēdzieniem, piemēram, zaļais udeņradis, aprites ekonomika un klimata neitralitāte, saistīto pētījumu par udeņradi biežumu. Salīdzinājums ar citām nozarēm tika izmantots, lai raksturotu udeņraža transporta pētījumu tematisko fokusu un attīstības briedumu, savukārt promocijas darbā uzmanība pievērsta tieši transporta nozarei.

Bibliometriskā analīze kalpoja kā pamatnovērtējums udeņraža tehnoloģiju attīstībai un papildināja plašāku novērtējumu par udeņradi kā vienu no iespējamajiem risinājumiem transporta dekarbonizācijai. Šī pētījuma rezultāti sniegti 3.2.3. apakšnodaļā.

2.4. Cēloņsakarību cilpu diagramma

Cēloņsakarību cilpu diagrammas (CLD) ir vizuāli rīki, kas paredzēti sarežģītu sistēmu atgriezeniskās saites struktūras attēlošanai un izpētei [74]. Šo diagrammu galvenais mērķis ir attēlot cēloņsakarības saiknes starp sistēmas mainīgajiem, uzsverot, kā atgriezeniskās saites ietekmē sistēmas uzvedību laika gaitā. Cēloņsakarību cilpu diagrammās tiek izmantoti ar bultiņām savienoti mainīgie, iekļaujot polaritātes un kavējumus, lai veidotu atgriezeniskās saites, kas ilustrē sarežģītas cēloņsakarības. Katrai cēloņsakarībai var būt pozitīva vai negatīva polaritāte. No šo saišu kombinācijām veidojas pastiprinošas un līdzsvarujošas atgriezeniskās saites. Šī metode ļauj labāk izprast sarežģītas sistēmas un to parametru mijiedarbību, kā arī novērtēt vairāku mainīgo ietekmi uz sistēmu laika gaitā, ko tipiski lineārie modeļi dažkārt neņem vērā [75]–[77].

Šajā pētījumā *CLD* pieeja tika izmantota, lai izprastu udeņraža ekonomikas dinamiskās, daudzu faktoru mijiedarbības un atgriezeniskās saites, kā arī lai identificētu iespējas un riskus, kas vēlāk palīdzētu veiksmīgi ieviest tehnoloģijas. Metodoloģija ietvēra vairākas daļas. Pirmkārt, tika veikta literatūras analīze un dokumentārā izpēte par udeņraža ekonomikas attīstības faktoriem. Literatūras analīzes laikā tika identificēti faktori, kas literatūrā atkārtoti

minēti kā tādi, kas veicina vai kavē udeņraža ieviešanu, piemēram, tehnoloģiju izmaksas, infrastruktūras pieejamība, politikas atbalsta intensitāte, ieguldījumi, sabiedrības atbalsts, pētniecības un attīstības darbības, kā arī pieprasījums pēc zaļā udeņraža.

Tika identificētas piecas galvenās faktoru grupas, t. i.: (1) pieprasījums pēc udeņraža; (2) politikas iniciatīvas; (3) pētniecība un attīstība; (4) ekonomiskie faktori; (5) sociālā komponente. Šāda grupēšana ļāva strukturēt udeņraža ekonomikas attīstību kā vairāku savstarpēji saistītu apakšsistēmu mijiedarbību. Pirmajā daļā tika identificētas arī ieinteresētās puses, kas iesaistītas udeņraža vērtības ķēdes attīstības procesā, kā arī to uztvertie šķēršļi un vajadzības. Literatūras atlase aptvēra laika posmu no 2003. līdz 2023. gadam; tomēr vairāk nekā 66 % materiālu tika publicēti pēdējo piecu gadu laikā, liecinot, ka pētījumi šajā jomā kļūst arvien aktuālāki.

Tālāk tika definētas cēloņsakarības starp identificētajiem faktoriem. Izstrādātā cēloņsakarību diagramma nav kvantitatīvs sistēmas dinamikas modelis, bet gan konceptuāls modelis, kas parāda galvenos atgriezeniskās saites mehānismus, kas ietekmē zaļā udeņraža ekonomikas attīstību. Šī metode sniedza visaptverošu redzējumu par to, kā uzlabot udeņraža pozīciju enerģētikas pārejā. Saikne starp diviem mainīgajiem tika iekļauta diagrammā tikai tad, ja literatūrā vai politikas dokumentos bija pamats uzskatīt, ka izmaiņas vienā faktorā ietekmē izmaiņas otrā faktorā. Katrai saiknei tika piešķirta polaritāte. Pozitīva saikne nozīmēja, ka viena mainīgā palielināšanās izraisa otra mainīgā palielināšanos vai – samazināšanos gadījumā – samazināšanos. Negatīva saikne nozīmēja, ka viena mainīgā lieluma pieaugums izraisa otra mainīgā lieluma samazināšanos un otrādi.

Trešajā posmā tika analizēta izveidotā cēloņsakarību struktūra, lai identificētu pastiprinošas un līdzsvarojošas atgriezeniskās saites. Pastiprinošas saites tika interpretētas kā mehānismi, kas var paātrināt udeņraža ekonomikas attīstību, piemēram, pieprasījuma, investīciju, uzstādītās jaudas un izmaksu samazināšanos mijiedarbība. Savukārt līdzsvarojošās cilpas tika interpretētas kā mehānismi, kas var ierobežot vai stabilizēt sistēmas attīstību, piemēram, politiskā spiediena, īstenošanas grūtību un sabiedrības pretestības mijiedarbība.

Pēdējā posmā izstrādātā cēloņsakarību cilpu diagramma tika novērtēta no loģiskās konsekvences viedokļa, izvērtējot, vai saiknes starp mainīgajiem atbilst literatūrā aprakstītajām attiecībām un vai identificētās cilpas var interpretēt udeņraža ekonomikas attīstības kontekstā. Izstrādātā cēloņsakarību cilpu diagramma ir konceptuāls modelis, tāpēc tā netika kalibrēta ar kvantitatīviem datiem. Tās galvenais uzdevums bija atklāt sistēmiskās mijiedarbības, iespējamās attīstības virzītājspēkus un riskus, kas jāņem vērā, plānojot udeņraža tehnoloģiju ieviešanu. Šā pētījuma rezultāti izklāstīti 3.2.3. apakšnodaļā.

2.5. Sistēmdinamikas modelēšana

Sistēmdinamika (SD) ir zinātniska pieeja, kurā, izmantojot datorizētu modelēšanu un simulāciju, tiek pārsniegta sistēmas struktūra un pētīts, kā un kāpēc sarežģītas sistēmas attīstās laika gaitā [78]. Modeļa struktūrai ir jāatspoguļo reālās sistēmas saskaņots apraksts. Katra slēgta cēloņsakarību ķēde veido atgriezenisko saiti; daudzas šādas saites mijiedarbojas, veidojot SD modeļus [79].

Sistēmas struktūra un cēloņsakarības tiek attēlotas ar mainīgo lielumu, krājumu un plūsmu palīdzību. Krājumi atspoguļo kāda materiāla vai informācijas, piemēram, emisiju vai iedzīvotāju skaita, uzkrāšanos laika gaitā, savukārt plūsmas raksturo, kā mainās krājumi. Sistēmas dinamikas modelēšana ir cieši saistīta ar cēloņsakarību cilpu diagrammu pieeju, jo *CLD* ļauj identificēt sākotnējās sistēmas mijiedarbības, ko vēlāk var pārvērst SD modeļos, lai veiktu dažādu nozaru un procesu simulāciju un analīzi [80].

Transporta nozare ir bieži pētīta SD pētījumu joma, jo šī metode ļauj dinamiski analizēt ilgtermiņa politikas ietekmi, tehnoloģiju izplatību, transporta pieprasījumu un emisiju izmaiņas [81]–[84]. Šajā promocijas darbā sistēmdinamikas modelēšana tika izmantota četros atsevišķos pētījumos, no kuriem katrs bija vērsts uz konkrētu problēmas aspektu: biometāna izmantošanas potenciāla novērtēšanā; valsts līmeņa politikas scenāriju modelēšanā; uzvedības faktoru ietekmes uz transporta veida izvēli analizē; pašvaldību līmeņa transporta emisiju scenāriju modelēšanā. Metodoloģijas 2.5.1.–2.5.4. apakšnodaļā sniegts detalizēts katra lietojuma apraksts.

2.5.1. BIOMETĀNA IZMANTOŠANAS POTENCIĀLA NOVĒRTĒJUMS

Pētījuma posmā tika izstrādāts SD modelis, lai izvērtētu transporta politikas ietekmi uz biometāna izmantošanas veicināšanu transporta nozarē. Lai gan Eiropā biometāns transportā tiek izmantots jau ilgu laiku, Latvijā šī tehnoloģija vēl nav plaši ieviesta. Kad 2020. gadā tika publicēts pētījums, Latvijā biometāns transportā netika izmantots, un arī dabasgāzes izmantošana bija ļoti ierobežota. To varēja skaidrot ar politiskajiem noteikumiem, kas regulēja biogāzes izmantošanu elektroenerģijas ražošanā, pieprasījuma trūkumu un tehnoloģiskajiem ierobežojumiem. Valstī trūka visaptveroša biogāzes potenciāla novērtējuma un politikas instrumentu, kuru mērķis ir palielināt biometāna ražošanu un izmantošanu transportā. Tāpēc šis pētījums risināja nepieciešamību novērtēt biogāzes potenciālu un izvērtēt politikas instrumentus, kuru mērķis ir palielināt biometāna ražošanu un izmantošanu transportā.

Pētījuma metodoloģija balstās SD modelēšanas principos un ietver transporta degvielas tirgus attīstību, subsīdiu politikas scenārijus un emisiju mērķus. Modelis ietvēra vairākas savstarpēji saistītas sastāvdaļas: biometāna ražošanas jaudas attīstību; transporta degvielas pieprasījuma dinamiku (fosilās degvielas pret biometānu); subsīdiu un cenu ietekmi uz tirgus attīstību; kā arī CO₂ emisiju samazinājuma modelēšanu.

Modelis tika izstrādāts, piemērojot emisiju aprēķināšanas metodes, Latvijas statistikas sekundāros datus un citas modelēšanas iniciatīvas. Modelis tika izveidots, izmantojot modelēšanas rīku *Powersim Studio 10*, ar viena gada modelēšanas laika soli.

Izstrādātā modeļa dinamiskā hipotēze ir tāda, ka politika ietekmē biogāzes izmantošanas virzienu rentabilitāti un var novirzīt biogāzi uz biometāna izmantošanu transportā. Modelis balstījās trīs galvenajās nozarēs: resursu piegāde; biogāzes un biometāna ražošana; kā arī transporta pieprasījums. Tika ņemtas vērā izejvielas no lauksaimniecības, atkritumu apsaimniekošanas un notekūdeņu attīrīšanas, savukārt izejvielu pieejamība tika uzskatīta par ierobežojošu faktoru biogāzes un biometāna ražošanā. Modelī tika iekļautas arī kapitāla izmaksas, ekspluatācijas izmaksas, izejvielu izmaksas un atbalsta mehānismi, kas varētu ietekmēt dažādu biogāzes izmantošanas variantu ekonomisko pievilcību.

Biogāzes un biometāna ražošanas nozare ietvēra trīs iespējamās biogāzes izmantošanas virzienus: biogāzes izmantošana kombinētajai siltuma un elektroenerģijas ražošanai; biogāzes izmantošana tiešai siltuma ražošanai; biogāzes pārstrāde biometānā. Izvēle starp šīm alternatīvām tika modelēta, izmantojot *logit* funkciju, kas balstījās katras alternatīvas novērtētajā rentabilitātē. Izmaiņas izmaksās, ieņēmumos un atbalsta shēmās ietekmēja investīciju sadalījumu, uzstādīto jaudu un saražotās siltumenerģijas, elektroenerģijas un biometāna daudzumu. Biometāna piedāvājuma un pieprasījuma salīdzinājums transporta nozarē tika veikts, izmantojot empīriskas vienādojumu sistēmas, kas balstījās vēsturiskajos datos un Latvijas Republikas Finanšu ministrijas IKP prognozēs [85].

Modelis tika validēts, salīdzinot tirgus attīstības prognozes ar vēsturiskajām tendencēm un emisiju aplēses ar Latvijas Nacionālā inventarizācijas dokumenta datiem. Pēc validācijas tika pārbaudīta virkne politikas instrumentu un to kopējā ietekme. Piemērotās politikas un modelēšanas rezultāti izklāstīti 3.2.2. apakšnodaļā.

2.5.2. VALSTS POLITIKAS NOVĒRTĒŠANAS MODELIS

Šajā pētījuma posmā tika izstrādāts visaptverošs sistēmas dinamikas modelis, lai novērtētu dažādu politikas pasākumu kombināciju ietekmi uz atjaunojamo degvielu ieviešanu transporta nozarē. Modelis tika izstrādāts, pamatojoties uz iepriekš izstrādāto *DTRem-LV* modeli (*Dynamic TRansport emission Model for Latvia*), kas prognozē oglekļa dioksīda emisiju tendences Latvijas transporta nozarē līdz 2030. gadam un novērtē plaša politikas pasākumu kopuma emisiju samazināšanas potenciālu [86].

Jaunais modelis tika izstrādāts, izmantojot simulācijas risinājumu *Stella Architect*, un to veido vairāki savstarpēji saistīti apakšmodeļi, tostarp degvielas pieprasījuma, atjaunojamo degvielu ražošanas, tehnoloģiju izplatības un siltumnīcefekta gāzu emisiju modeļi. Pētījuma dinamiskā hipotēze ir tāda, ka kombinēta *ASI* politikas pieeja var nodrošināt lielāku emisiju samazinājumu, jo tā samazina transporta pieprasījumu, vienlaikus veicinot pāreju uz ilgtspējīgākiem transporta veidiem un palielinot alternatīvo degvielu un efektīvāku tehnoloģiju īpatnību, salīdzinot ar situāciju, kad politikas pasākumi tiek īstenoti atsevišķi.

Pētījuma pieeja tika sadalīta trīs posmos. Pirmkārt, tika apkopoti un klasificēti transporta dekarbonizācijas politikas instrumenti Latvijas un ES līmenī, pamatojoties uz to veidu (regulējošie, ekonomiskie, informatīvie) un mērķi. Otrkārt, izmantojot literatūru, ekspertu novērtējumus un pieejamos statistikas datus, tika izstrādātas cēloņu un sekas diagrammas un modeļa struktūra. Modelī tika ņemti vērā pieejamie biodegvielas apjomi, pamatojoties uz iekšzemes izejvielu potenciālu, diferencēto pasažieru un kravas transporta pieprasījumu, kā arī novērtēta septiņu degvielu veidu – h dīzeļdegvielas, benzīna, sašķidrinātās naftas gāzes (LPG), dabasgāzes, biodegvielas, elektroenerģijas un ūdeņraža – potenciālā izmantošana. Treškārt, izmantojot modeli, tika novērtēti 10 atsevišķi politikas scenāriji un politikas kombinācijas, lai novērtētu to efektivitāti un savstarpējo sinerģiju ES un Latvijas klimata mērķu sasniegšanā līdz 2030. gadam. Scenāriju izpēlē tika ņemti vērā trīs galvenie samazināšanas virzieni, ievērojot ilgtspējīgas mobilitātes koncepciju “*Avoid-Shift-Improve*” (izvairīties, pāriet uz citu transporta veidu, uzlabot).

Politikas scenāriji tika strukturēti kā 10 politikas instrumenti: P1 – Alternatīvās degvielas uzpildes politika; P2 – Alternatīvās degvielas transportlīdzekļu iegādes politika; P3 – Informācijas kampaņas par alternatīvo degvielu politika; P4 – Dzelzceļa elektrifikācijas politika; P5 – Transporta veidu maiņas politika (pasažieri); P6 – Transporta veidu maiņas politika (kravas); P7 – Atbalsta politika biogāzes ražošanai un pārstrādei; P8 – Attālinātā darba un pakalpojumu politika; P9 – Politika attiecībā uz vecu transportlīdzekļu nodošanu metāllūžņos; P10 – Politika attiecībā uz nodokli fosilajiem kurināmajiem.

Šie politikas instrumenti modelī tika izmantoti kā scenāriju pieņēmumi trīs *ASI* politikas virzienos. Katrs politikas virziens ietekmēja konkrētus modeļa parametrus – transporta pieprasījumu, transporta veidu sadalījumu, autoparka tehnoloģisko struktūru, atjaunojamo degvielu izmantošanu un transportlīdzekļu energoefektivitāti.

A virziena jeb pārvietošanās pieprasījuma mazināšanas politikas pasākumu kopums (P8, P10) ietvēra attālinātā darba un e-pakalpojumu attīstību, kā arī fosilā kurināmā izmaksu politiku. S virziens jeb pāreja uz ilgtspējīgākiem pārvietošanās veidiem (P5, P6) ietvēra izmaiņas pasažieru un kravu pārvadājumu transporta veidu sadalījumā. Pasažieru pārvadājumu (P5) gadījumā scenārijs tika interpretēts kā sabiedriskā transporta īpatsvara palielināšana no 21 % līdz 53 % no pasažierkilometriem un velosipēdu īpatsvara palielināšana no 1 % līdz 5 %. Kravu pārvadājumu (P6) gadījumā tika modelēta pāreja no autotransporta uz dzelzceļu. Transportlīdzekļu virziena un degvielas patēriņa efektivitātes uzlabošana (I virziens) ietvēra politikas P1, P2, P3, P4, P7, P9. Šī pakete tika modelēta, galvenokārt palielinot alternatīvās degvielas transportlīdzekļu īpatsvaru autoparkā līdz aptuveni 10 % un uzlabojot degvielas ekonomiju par aptuveni 1 % gadā. Dzelzceļa elektrifikācijas un efektivitātes uzlabojumu gadījumā tika testēta elektrovilcienu īpatsvara palielināšana un ritošā sastāva energoefektivitātes uzlabošana, savukārt autoparka atjaunošanas pasākumi tika modelēti, palielinot jaunu transportlīdzekļu īpatsvaru pirmreizējās reģistrācijās. Rezultāti tika interpretēti politikas paketes līmenī turpmākajā analizē.

3.3.1. apakšnodaļā aprakstīti pētītie politikas scenāriji un simulācijas rezultāti.

2.5.3. LIETOTĀJU UZVEDĪBAS MODELĒŠANA, IZMANTOJOT SISTĒMDINAMIKU

Šajā pētījuma posmā tika izstrādāts sistēmdinamikas modelis, kurā iekļautas individuālās uzvedības īpatnības, izvēloties transporta veidu starp privāto un sabiedrisko transportu. Valsts politikas novērtēšanas modelis attēloja iedzīvotāju uzvedību vienkāršotā veidā, neiedziļinoties faktorus, kas tieši ietekmē izmaiņas transporta veida izvēlē. Tādējādi tika izstrādāts uzvedības modelēšanas modulis, lai paplašinātu esošo *DTRem-LV* modeli ar parametrizētu lēmumu pieņemšanas logiku.

Izstrādātā modeļa dinamiskā hipotēze ir tāda, ka pāreja no privātajiem automobiļiem uz sabiedrisko transportu nav atkarīga tikai no viena faktora; izolētu faktoru ietekme var pārvērtēt faktisko pārejas potenciālu. Pētījums ietvēra trīs posmus.

Pirmajā (sagatavošanas) posmā tika veikta literatūras analīze, kuras galvenais mērķis bija noteikt faktorus, kas ietekmē transporta veida izvēli, kā arī tika izstrādāta SD modeļa sākotnējā koncepcija. Tika identificēti 11 faktori: transporta veida prestižs; vides apsvērumi; automašīnas

nepieciešamība darba pienākumu veikšanai; braukšanas ātrums; drošība; izmaksas; iespēja pārvadāt pasažierus un bagāžu; infrastruktūras pieejamība; lietošanas ērtums; brauciena komforts; brauciena ilgums. Identificētie faktori tika izmantoti kā pamats aptaujas jautājumu izstrādei un uzvedības mainīgo lielumu definēšanai, ko vēlāk varētu attēlot sistēmdinamikas modeli.

Otrajā (testēšanas) posmā tika sagatavota aptauja, un 2021. gada aprīlī–maijā tika aptaujāti 350 respondenti, lai noteiktu katra no iepriekš minētajiem 11 faktoriem nozīmi. Aptauja tika izplatīta tiešsaistē sociālajos tīklos un bija pieejama latviešu un krievu valodā, lai sasniegtu gan latviešu, gan krievvalodīgos respondentu. Aptaujas mērķis bija iegūt informāciju no autovadītājiem par viņu gatavību pāriet uz sabiedrisko transportu. Aptaujā bija iekļauti vairāki tematiski bloki: pašreizējie pārvietošanās paradumi; faktori, kas ietekmē transporta veida izvēli; ceļā pavadītais laiks; ceļošanas izmaksas; sabiedriskā transporta komforts; infrastruktūras pieejamība; sociālās un vides attieksmes; kā arī respondentu sociodemogrāfiskie raksturlielumi.

Trešajā (integrācijas) posmā iegūtie rezultāti tika interpretēti, izveidojot jaunu uzvedības modelēšanas moduli, kas vēlāk tika integrēts vispārējā Latvijas transporta sistēmas modelī *DTRem-LV* [86]. Izstrādātajā modelī tika turpināta divu no pieciem galvenajiem pētījumā identificētajiem transporta veida izvēli ietekmējošajiem faktoriem izpēte, proti, pārvietošanās laika un izmaksu faktoriem. Lai labāk atspoguļotu dažādu iedzīvotāju grupu uzvedības tendences, laika un cenas faktoru svāri tika pētīti trīs ienākumu grupās – līdz 750 EUR uz vienu mājsaimniecības locekli; 750–1500 EUR uz vienu mājsaimniecības locekli un virs 1500 EUR uz vienu mājsaimniecības locekli. Turklāt tika iekļautas tendences atkarībā no dzīvesvietas, neatkarīgi modelējot lauku un pilsētu reģionu respondentu atbildes.

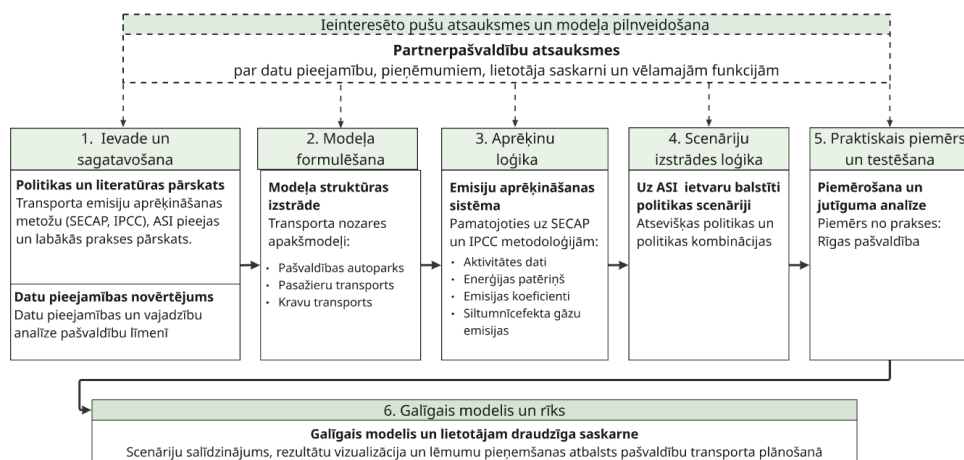
Aptaujas rezultāti tika izmantoti ne tikai kā aprakstoša informācija, bet arī kā empīrisks pamats modeļa pieņēmumu izstrādei, tostarp grafisko funkciju izveidei, kas raksturo brauciena laika un izmaksu ietekmi uz potenciālo pāreju no privātajiem automobiļiem uz sabiedrisko transportu. Aptauja tika izplatīta tiešsaistē un netika veidota kā statistiski reprezentatīva Latvijas iedzīvotāju izlase, tāpēc tās rezultāti jāinterpretē kā empīriski pamatoti modelēšanas pieņēmumi, nevis kā reprezentatīvs novērtējums par visu Latvijas sabiedrību. Modelēšanas rezultāti aprakstīti 3.4.2. apakšnodaļā.

2.5.4. SCENĀRIJU BALSTĪTA PAŠVALDĪBAS EMISIJU MODEĻA IZSTRĀDE, IZMANTOJOT SISTĒMDINAMIKAS PRINCIPUS

Viens no izstrādātā promocijas darba jauninājumiem ir mēģinājums izvērtēt siltumnīcefekta gāzu emisiju samazināšanas potenciālu transporta nozarē no vietējās plānošanas perspektīvas. Šim nolūkam tika izstrādāts jauns aprēķinu un analīzes modelis scenāriju modelēšanai, kas balstās sistēmdinamikas principos un krājumu-plūsmu struktūrā. Modelis tika izstrādāts programmā *Stella Architect* un paredzēts tam, lai novērtētu transporta lomu kopējā pašvaldības siltumnīcefekta gāzu emisiju bilancē, salīdzinātu politikas scenārijus un atbalstītu lēmumu pieņemšanu līdz 2050. gadam. Transporta modelis ir daļa no plašāka rīka pašvaldības emisiju novērtēšanai (ieskaitot enerģijas patēriņu ēkās, transportā un sabiedriskajā infrastruktūrā; atkritumu un notekūdeņu apsaimniekošanu; vietējo enerģijas ražošanu).

Modeļa izstrādes sākotnējā posmā tika formulēta dinamiska hipotēze, kas nosaka, ka emisijas pašvaldības transporta nozarē nosaka vairāku savstarpēji saistītu faktoru mijiedarbība – transporta pieprasījums, iedzīvotāju skaita un mobilitātes paradumu izmaiņas, transportlīdzekļu parka struktūra, enerģijas patēriņš un politikas īstenošanas temps. Tika pieņemts, ka atsevišķi politikas instrumenti samazina emisijas; tomēr to efektivitāte laika gaitā mainās un ir atkarīga no tā, vai tie samazina pārvietošanās pieprasījumu, veicina pāreju uz ilgtspējīgākiem transporta veidiem vai uzlabo transportlīdzekļu un enerģijas efektivitāti. Rezultātā pašvaldības emisiju samazināšanas potenciāls tika novērtēts kā dinamiska attīstības trajektorija līdz 2050. gadam, ko ietekmē gan sākotnējie ievades dati, gan politikas scenāriju kombinācijas.

Modeļa izstrādes process aprakstīts 2.2. attēlā. Tajā parādīts, kā literatūras un politikas instrumentu analīze, pašvaldības datu pieejamības novērtējums, modeļa formulēšana, emisiju aprēķināšanas loģikas izstrāde, scenāriju veidošana un gadījumu izpēte tika saistīti ar mērķgrupu sniegto atgriezenisko saiti.



2.2. att. Pašvaldību transporta emisiju scenāriju modelēšanas rīka izstrādes process.

Modeļa izstrādē un pilnveidošanā tika iesaistītas mērķgrupas. Pētījumā piedalījās Latvijas pašvaldības – Cēsis un Rīga, Polijas pašvaldības – *Palecznica* un *Raciechowice*, kā arī Zviedrijas Lapzemes pašvaldību asociācija, kas pārstāvēja *Gällivare*, *Kiruna*, *Jokkmokk* un *Pajala* pašvaldības. Pašvaldību pārstāvji sniedza komentārus par ievades datu pieejamību, modeļa pieņēmumiem, lietotāja saskarni, vēlamajām funkcijām un rezultātu attēlošanas veidu. Šī atgriezeniskā saite tika izmantota, lai pilnveidotu modeļa struktūru un, ja iespējams, vienkāršotu ievades datu prasības.

Modeļa izstrādes pirmajā posmā tika veikts plašs esošo transporta emisiju un politikas instrumentu pārskats, lai noteiktu nepieciešamās sistēmas robežas, parametrus un to mijiedarbību. Lai novērtētu pašvaldībām pieejamo ievaddatu struktūru, tika apspriesti pašvaldību pārstāvju viedokļi un analizēti atklātie dati. Šis posms bija izšķirošs, jo modelis bija paredzēts kā praktisks rīks, ko var pielāgot pašvaldību faktiskajai datu pieejamībai. Pēc tam modelis tika izstrādāts saskaņā ar pašvaldību norādītajām prasībām, identificējot trīs atšķirīgas

transporta grupas: (1) pašvaldības autoparks – kur pašvaldība var sniegt precīzākus statistikas datus par nobraukto attālumu, degvielas patēriņu un autoparka struktūru; (2) pasažieru transports – kas ir atkarīgs no iedzīvotāju pārvietošanās paradumiem, mobilitātes pieprasījuma un transportlīdzekļu izvēles sadalījuma; (3) kravu transports – prognozējams ar lielāku nenoteiktību sakarā ar ierobežotu datu pieejamību, taču iekļauts, lai nodrošinātu visaptverošāku emisiju uzskaiti.

Lēmumu pieņemšanas atbalsta modelī iekļautie aprēķini balstās *SECAP* un Starpvaldību klimata pārmaiņu komisijas (*IPCC*) metodoloģijās, kas pielāgotas pašvaldību ievadītajiem datiem. Transporta emisijas tika aprēķinātas, saistot transporta aktivitāti un degvielas vai enerģijas patēriņu ar atbilstošiem emisiju koeficientiem. Emisiju koeficienti, enerģijas saturs un degvielas blīvums tika uzskatīti par aprēķinu parametriem, nevis obligātiem pašvaldību ievades datiem. Ja vietējie rādītāji nebija pieejami, varēja izmantot standarta vērtības, kas balstītas *IPCC*, *SECAP* vai valstu siltumnīcefekta gāzu inventarizācijas metodoloģijās.

Tad politikas efektivitāti var novērtēt, izmantojot *ASI* pieeju. Tika atlasītas un definētas vairākas politikas (vairāk informācijas 3.3.2. apakšnodaļā), tostarp: izvairīšanās (A) stratēģijas, kas veicina attālo darbu un e-pakalpojumus, optimizējot pašvaldības autoparku; pārejas (S) stratēģijas, kas nosaka optimistisku un mēreni ambiciozu privāto automašīnu aizstāšanu ar sabiedrisko transportu vai aktīvo mobilitāti; uzlabošanas (I) stratēģijas, kas veicina pāreju uz efektīvākiem transportlīdzekļiem, palielina atjaunojamo enerģijas avotu izmantošanu un aizliedz iekšdedzes dzinējus. Tika izstrādāti vairāki scenāriji (viens katrai *ASI* pieejas grupai, kā arī kombinēts scenārijs), un tika novērtēta to ietekme uz emisijām.

Modelis tika izstrādāts kā vispārējs scenāriju analīzes rīks pašvaldības līmenī, savukārt Rīgas pašvaldības dati tika izmantoti, lai pārbaudītu modeļa piemērojamību. Modeļa aprēķini balstījās Rīgas pašvaldības demogrāfiskajos un migrācijas datos. Tika veikta arī jutīguma analīze, lai noteiktu konkrētu ievades parametru (piemēram, mobilitātes intensitātes, migrācijas izmaiņu un pasažieru skaita automašīnās) ietekmi uz modelētajiem emisiju rezultātiem.

2.6. Iedzīvotāju aptaujas metodika par mobilitātes paradumiem un atbalstu politikai

Šajā pētījumā aptauja tika izmantota, lai transporta politikas analīzē iekļautu iedzīvotāju viedokli un novērtētu, kā mobilitātes paradumi, viedoklis par pašvaldību rīcību un politikas atbalsts var ietekmēt ilgtspējīgu transporta risinājumu īstenošanu.

Starptautiska aptauja tika veikta četrās valstīs – Latvijā, Igaunijā, Polijā un Zviedrijā. Aptauja aptvēra gan valsts, gan pašvaldību līmeni. Latvijā aptauja tika veikta Rīgā, Cēsīs un valsts līmenī, Igaunijā – valsts līmenī, Zviedrijā – četrās pašvaldībās, Polijā – *Palecznica* pašvaldībā. Kopumā tika saņemta 1151 atbilde – 258 no Zviedrijas, 500 no Igaunijas, 308 no Latvijas un 85 no Polijas. Aptauja tika veikta no 2023. gada decembra līdz 2024. gada janvārim.

Aptaujas mērķis bija noskaidrot iedzīvotāju pašreizējo vērtējumu par pašvaldību darbību transporta nozarē, viņu pārvietošanās paradumus un galvenos faktorus, kas ietekmē viņu izvēli. Turklāt tika noteikts atbalsta līmenis dažādām politikām, kas atbilst *ASI* pieejai, nosakot prioritāros virzienus.

Aptauja tika izplatīta gan tiešsaistē, gan drukātā formātā. Tai bija vairākas sadaļas, no kurām analīzē tika izmantotas pirmās trīs: (1) sociodemogrāfiskie dati; (2) pārvietošanās paradumi; (3) pašvaldības darbības novērtējums transporta nozarē un politikas novērtējums. Aptaujā tika izmantoti vairāku veidu jautājumi – jautājumi ar vienu atbildes variantu, jautājumi ar vairākiem atbildes variantiem, jautājumi ar vērtēšanas skalu un atvērtie jautājumi.

Aptaujas datu analīzē tika izmantota deskriptīvā statistika. Analīzē tika aprēķināts atbilžu sadalījums pa daļām katram jautājumam un veikts salīdzinājums starp valstīm, vecuma grupām un dzīvesvietas veidu. Analīzē tika iekļauti pārvietošanās paradumi, faktori, kas ietekmē transporta veida izvēli, vietējās transporta politikas novērtējums un iedzīvotāju atbalsts dažādiem politikas instrumentiem. Jautājumos par politikas atbalstu katrs politikas pasākums tika klasificēts saskaņā ar *ASI* piecju, un tika aprēķināta to respondentu daļa, kuri atbalstīja konkrēto pasākumu.

Rezultāti netika uzskatīti par statistiski reprezentatīviem katrai valstij, ņemot vērā nevienmērīgo teritoriālo pārklājumu, dažādos aptaujas izplatīšanas kanālus un salīdzinoši nelielo respondentu skaitu dažos reģionos. Taču tie sniedz salīdzinošu skatījumu uz izvēlēto reģionu iedzīvotāju mobilitātes modeļiem, viņu vērtējumu par pašvaldības centieniem un sabiedrības atbalstu dažādām transporta politikas iniciatīvām. Pilnīga aptaujas struktūra un detalizētāki rezultāti sniegti iedzīvotāju aptaujas ziņojumā [87]. Aptaujas analīzes rezultāti aprakstīti 3.4.1. apakšnodaļā.

3. REZULTĀTI

Pētījuma attīstības posmi, kā redzams 2.1. attēlā, nodrošināja loģisku secību metožu izvēlē un piemērošanā. Šajā promocijas darbā iegūtie rezultāti ir strukturēti tematiskās grupās, lai uzsvērtu katras publikācijas ieguldījumu konkrētas problēmas izpētē.

3.1. Politikas un tehnoloģiju prioritāšu integrētais novērtējums

Šajā apakšnodaļā aprakstīts veiktais pētījums, kas publicēts rakstā “*Linking Sustainable Mobility Criteria to Policymaking: Results of Multi-Criteria Analysis*” un kura metodika ir aprakstīta 2.1. apakšnodaļā. Daudzkritēriju analīzes (MCDA) pētījums kalpo kā pirmais solis, nosakot turpmāko rīcības virzienu prioritātes. Tas palīdz saprast, kurus politikas instrumentus un tehnoloģijas eksperti uzskata par visdaudzsološākajām turpmākai padziļinātai analīzei.

3.1.1. POLITIKAS INSTRUMENTU NOVĒRTĒJUMS

Literatūras pārskata un labas prakses piemēru izvērtēšanas rezultātā tika atlasītas 24 politikas iniciatīvas no astoņām dažādām valstīm. Promocija darba vajadzībām šie instrumenti tika sagrupēti sešās tematiskās kategorijās, lai atvieglotu daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas (MCDA) rezultātu interpretāciju. 3.1. tabulā apkopoti pētījumā novērtētie politikas instrumenti un to iedalījums tematiskajās grupās.

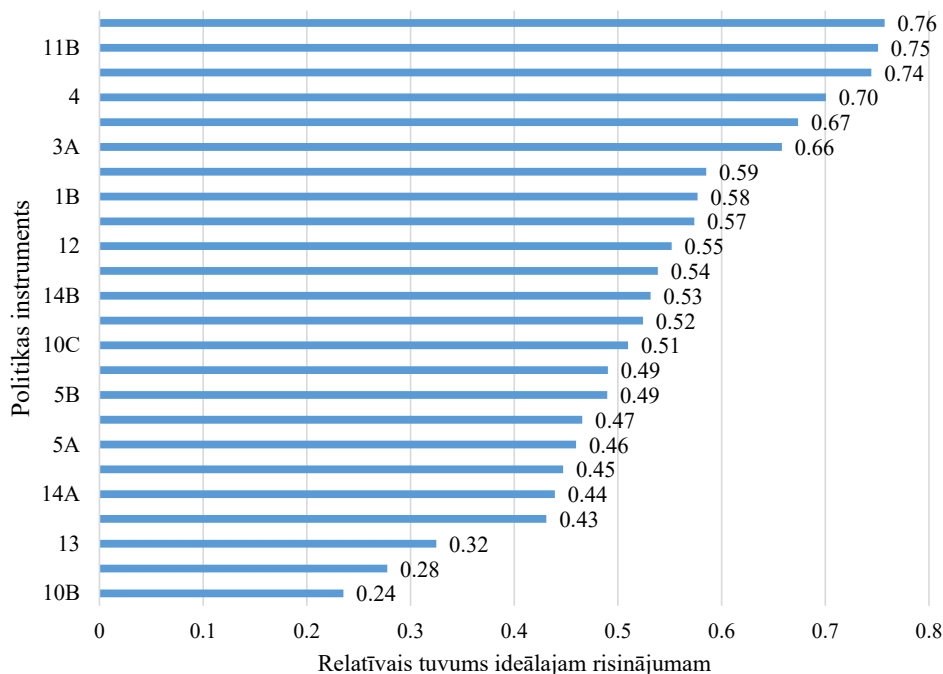
3.1. tabula

Politikas instrumentu grupēšana	
Politikas grupa	Politikas instruments
Nodokļu atvieglojumi un atbrīvojumi	1A. Atbrīvojums no reģistrācijas nodokļa bezemisiju un zemu emisiju transportlīdzekļiem.
	1B. Reģistrācijas nodokļa palielināšana transportlīdzekļiem, kas darbojas ar fosilajiem kurināmajiem.
	2A. Atbrīvojums no ekspluatācijas nodokļa bezemisiju un zemu emisiju transportlīdzekļiem.
	2B. Ekspluatācijas nodokļa palielināšana transportlīdzekļiem, kas darbojas ar fosilajiem kurināmajiem.
	3A. Akcīzes nodokļa samazināšana alternatīvajām degvielām.
	3B. Akcīzes nodokļa palielināšana fosilajām degvielām
	4. Nodokļu atvieglojumi uzņēmumiem piederošiem transportlīdzekļiem ar nulles un zemu emisiju līmeni.
Atbalsts iegādei	5A. Atbalsts jaunu transportlīdzekļu ar nulles un zemu emisiju līmeni iegādei.
	5B. Atbalsts lietotu (līdz 8 gadiem vecu) transportlīdzekļu ar nulles un zemu emisiju līmeni iegādei.
	5C. Atbalsts zemu emisiju un bezemisiju transportlīdzekļu iegādei publiskajos iepirkumos.
Infrastruktūras atbalsts	6. Alternatīvo degvielu uzpildes/uzlādes staciju infrastruktūras izveide.
	7. Atbalsts transportlīdzekļu tehniskai pielāgošanai alternatīvo degvielu izmantošanai.

3.1. tabulas turpinājums

	8. Velosatiksmes infrastruktūras attīstība.
	9. Obligātās biodegvielas piejaukuma palielināšana.
Atbalsts biodegvielai / biometānam	10A. Subsīdijas biodegvielas ražošanai, ieskaitot biometānu.
	10B. Subsīdijas biodegvielas ražotņu kapitāla izmaksām, ieskaitot biometānu.
	10C. Atviegloti nosacījumi biometāna ievadīšanai dabasgāzes tīklā.
	10D. Biometāna izcelsmes apliecinājumi.
Pilsētas mobilitātes pasākumi	11A. Bez maksas autostāvvietu bezemisiju un zemu emisiju transportlīdzekļiem.
	11B. Atļauja bezemisiju un zemu emisiju transportlīdzekļiem izmantot sabiedriskā transporta joslas.
	12. Zemu emisiju zonu ieviešana pilsētās, lai samazinātu autotransporta satiksmi.
Sabiedriskā transporta un dzelzceļa pasākumi	13. Dzelzceļa tīkla elektrifikācija.
	14A. Sabiedriskā transporta autoparka atjaunošana.
	14B. Sabiedriskā transporta biļešu cenu samazināšana.

Politikas instrumentu novērtēšanā tika izmantoti četri kritēriji ar ekspertu piešķirtajiem svāriem: nepieciešamās investīcijas – 0,33; atjaunojamo energoresursu veicināšanas potenciāls – 0,25; sabiedrības atbalsts – 0,23; uzraudzības mehānisma sarežģītība – 0,19. Tādējādi rezultāts atspoguļo ne tikai pasākuma potenciālu veicināt atjaunojamo energoresursu izmantošanu transportā, bet arī tā izmaksas, īstenošanas un uzraudzības sarežģītību, kā arī sagaidāmo sabiedrības atbalstu. 3.1. attēlā parādīti rezultāti, kas raksturo visu politikas instrumentu relatīvo atbilstību ideālajam risinājumam.



3.1. att. Politikas instrumentu relatīvā atbilstība ideālajam risinājumam.

Augstākie *TOPSIS* tuvināšanās rādītāji tika iegūti attiecībā uz reģistrācijas nodokļa atbrīvojumu transportlīdzekļiem ar zemu un nulles emisiju līmeni (1A; 0,76), atļauju transportlīdzekļiem ar zemu un nulles emisiju līmeni izmantot sabiedriskā transporta joslas (11B; 0,75), ekspluatācijas nodokļa atbrīvojumu transportlīdzekļiem ar zemu un nulles emisiju līmeni (2A; 0,74), nodokļu atvieglojumi uzņēmumiem piederošiem transportlīdzekļiem ar zemu un nulles emisiju līmeni (4; 0,70), bezmaksas autostāvvietu transportlīdzekļiem ar zemu un nulles emisiju līmeni (11A; 0,67), kā arī akcīzes nodokļa samazinājums alternatīvajām degvielām (3A; 0,66).

Augstāko novērtējumu saņēmušie politikas instrumenti galvenokārt ietilpst nodokļu atvieglojumu un pilsētas mobilitātes pasākumu grupās. Šo rezultātu var izskaidrot ar to, ka šīs politikas nodrošina tiešus ieguvumus zemu emisiju vai bezemisiju transportlīdzekļu lietotājiem. Šādu pasākumu īstenošana prasa arī mazākus ieguldījumus nekā infrastruktūras attīstība, sabiedriskā transporta modernizācija vai atbalsts liela mēroga degvielas ražošanai. Tāpēc augstāko vērtējumu *TOPSIS* analizē nevajadzētu interpretēt kā tiešu emisiju samazināšanas potenciāla novērtējumu, bet drīzāk kā pasākumu īstenojamības, atbalsta un rentabilitātes kombinētu rādītāju.

Salīdzinājums grupu līmenī apstiprina, ka augstākais vidējais *TOPSIS* tuvuma rādītājs tika iegūts pilsētas mobilitātes pasākumiem un nodokļu stimulu pasākumiem. Zemāki vidējie rādītāji tika iegūti iegādes atbalsta, infrastruktūras atbalsta, biodegvielas un biometāna atbalsta, kā arī sabiedriskā transporta un dzelzceļa pasākumu grupām. Tomēr šie rezultāti nenozīmē, ka

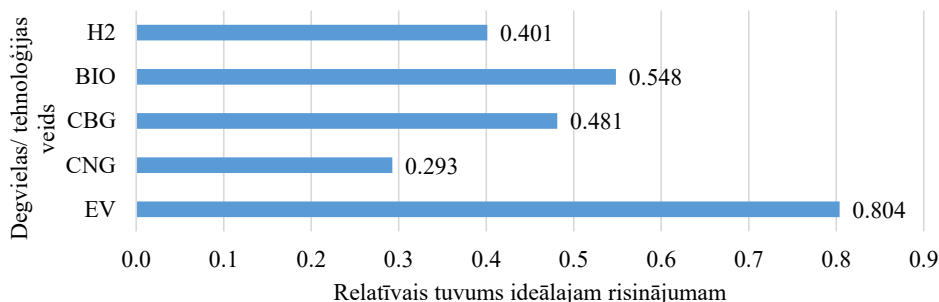
zemāk novērtētās grupas ir mazāk nozīmīgas transporta dekarbonizācijai. Drīzāk to zemākie rādītāji atspoguļo lielākas investīciju vajadzības, sarežģītāku īstenošanu vai lielāku uzraudzības slogu.

Jutīguma analīze parādīja, ka politikas virzienu novērtējumi ievērojami atšķiras atkarībā no piešķirtajiem svāriem. Palielinoties nepieciešamo investīciju nozīmei, izdevīgāki kļuva politikas instrumenti ar zemākām īstenošanas izmaksām, piemēram, nodokļu stimuli un pilsētas mobilitātes pasākumi. Turpretim, piešķirot lielāku nozīmi atjaunojamo energoresursu veicināšanas potenciālam, relatīvi svarīgāki kļuva pasākumi, kas saistīti ar transportlīdzekļu iegādes atbalstu, infrastruktūras attīstību un degvielas atbalstu. Tādējādi tika novērots, ka daži kritēriji ietekmē politikas instrumentu rangu pretēji. Rezultātā secinājumus nevajadzētu interpretēt kā nemainīgu politikas nozīmības hierarhiju, bet drīzāk kā strukturētu dažādu politikas instrumentu efektivitātes novērtējumu, pamatojoties uz ekspertu definētiem kritērijiem.

Turklāt, izmantojot 95 % uzticamības intervālus, tika analizēta arī ekspertu piešķirto svērumu izkliede. Plašāki uzticamības intervāli liecina par lielākām atšķirībām ekspertu viedokļos par attiecīgā kritērija nozīmīgumu. Lielākais svēruma tika piešķirts nepieciešamajām investīcijām, savukārt vislielākā izkliede tika novērota kritērijam “uzraudzības mehānisms”. Tas vēlreiz apstiprina, ka iegūtie rezultāti ir jāinterpretē kā ekspertu viedoklī balstīts prioritāšu noteikšanas instruments, nevis kā absolūts politikas efektivitātes novērtējums. Tādējādi rezultāti liecina par kompromisu starp vides potenciālu, ieguldījumu vajadzībām, uzraudzības īstenojamību un sabiedrības atbalstu. Politikas prioritāšu noteikšana šajā gadījumā nav vienkārši jautājums par to, kuram pasākumam ir vislielākais teorētiskais emisiju samazināšanas potenciāls, bet drīzāk par to, kuri pasākumi vienlaikus ir īstenojami, sociāli atbalstāmi un pietiekami efektīvi, lai tos virzītu tālākai padziļinātai analīzei.

3.1.2. DEGVIELAS UN TEHNOLOĢIJU RISINĀJUMU NOVĒRTĒJUMS

Pēc politikas instrumentu novērtēšanas *MCDA* otrajā daļā tika analizētas alternatīvās degvielas un transportlīdzekļu tehnoloģijas, lai noteiktu, kuri tehnoloģiskie virzieni, pēc ekspertu domām, ir visdaudzsološākie Latvijas transporta dekarbonizācijas kontekstā. Šiem pašiem ekspertiem bija jānovērtē piecas alternatīvās degvielas un transportlīdzekļu tehnoloģijas (ūdeņradis (H₂), biodegviela (BIO), biometāns (CBG), dabasgāze (CNG), elektrība (EV)), izvērtējot katru no piecām ierosinātajām degvielām atbilstoši sociālajiem, vides, ekonomiskajiem un tehnoloģiskajiem aspektiem. Alternatīvo degvielu un transportlīdzekļu tehnoloģiju novērtēšanā tika izmantoti četri kritēriji ar ekspertu piešķirtajām svara koeficientiem: sociālais (ietekme uz nodarbinātību, labklājību, veselību) – 0,22; ekonomiskais (kopējās izmaksas) – 0,31; vides (ietekme uz vidi) – 0,25; tehnoloģiskais (tehnoloģijas attīstības potenciāls) – 0,21. Ekspertu novērtējums redzams 3.2. attēlā.



3.2. att. Katra izvēlētā degvielas /tehnoloģijas veida relatīvā atbilstība ideālajam risinājumam.

Visaugstāko novērtējumu saņēma elektromobiļi, jo īpaši saistībā ar ekonomiskajiem un vides ieguvumiem. Nākamie sekoja biodegvielas un biometāns, savukārt dabasgāze saņēma viszemāko novērtējumu tās negatīvās ietekmes uz vidi dēļ. Tajā pašā laikā vērtējums par ūdeņradi jāinterpretē ar piesardzību. Ekspertu novērtējumā ūdeņradis saņēma salīdzinoši labvēlīgu vērtējumu ekonomiskajā aspektā. Šāds novērtējums šķiet pretrunā ar tirgus situāciju, kurā ūdeņraža tehnoloģijas parasti raksturo augstas izmaksas un ierobežota infrastruktūra. Tas var liecināt par atšķirībām tajā, kā eksperti interpretēja ekonomisko kritēriju, iespējams, atspoguļojot gaidas par izmaksu samazināšanos nākotnē, nevis pašreizējos tirgus apstākļus.

Jutīguma analīze parādīja, ka tehnoloģiju novērtējums ir atkarīgs no tā, kuram kritērijam tiek piešķirta lielāka nozīme. Palielinoties vides un tehnoloģisko kritēriju nozīmei, elektriskie transportlīdzekļi saglabāja augstu novērtējumu, savukārt ūdeņradis kļuva izdevīgāks. Mainot ekonomiskā kritērija svērumu, mainījās arī atsevišķo alternatīvu relatīvās pozīcijas, norādot, ka izmaksu pieņemumiem bija nozīmīga loma tehnoloģiju novērtējumā. Tomēr kopējā tendence palika nemainīga – elektriskie transportlīdzekļi saņēma visaugstāko novērtējumu, savukārt dabasgāze saglabāja zemāko pozīciju.

Turklāt, izmantojot 95 % uzticamības intervālus, tika analizēta arī ekspertu piešķirto svara koeficientu izkliede. Plašāki uzticamības intervāli liecina par lielākām atšķirībām ekspertu viedokļos par attiecīgā kritērija nozīmīgumu. Lielākais svars tika piešķirts ekonomiskajam aspektam, savukārt vislielākā izkliede tika novērota sociālajam un tehnoloģiskajam aspektam. Tādējādi tehnoloģiju novērtējums liecina, ka transporta dekarbonizācijai nav universāla risinājuma. Eksperti elektriskos transportlīdzekļus novērtēja kā visdaudzsološākos, taču biodegvielai, biometānam un, iespējams, ūdeņradim var būt nozīme konkrētos segmentos vai pārejas posmos. Tajā pašā laikā iegūtie rezultāti jāinterpretē kā ekspertu noteiktas prioritātes, nevis kā pilnīgs tehnoloģiju ekonomiskās vai klimata efektivitātes novērtējums.

3.2. Tehnoloģisko risinājumu novērtējums transporta dekarbonizācijai

Šajā apakšnodaļā sīkāk aprakstīti pētījumi, kas saistīti ar jauno tehnoloģiju ieviešanu valsts līmenī, t. i., 3.2.1. apakšnodaļā aprakstīti elektromobiļu izmaksu un ieguvumu analīzes rezultāti,

3.2.2. apakšnodaļā – biometāna potenciāls Latvijā, kas noteikts, izmantojot SD modeli, savukārt 3.2.3. apakšnodaļā aprakstīti rezultāti, kas saistīti ar bibliometrisko pētījumu par ūdeņradi un attiecīgo cēloņsakarību diagrammu.

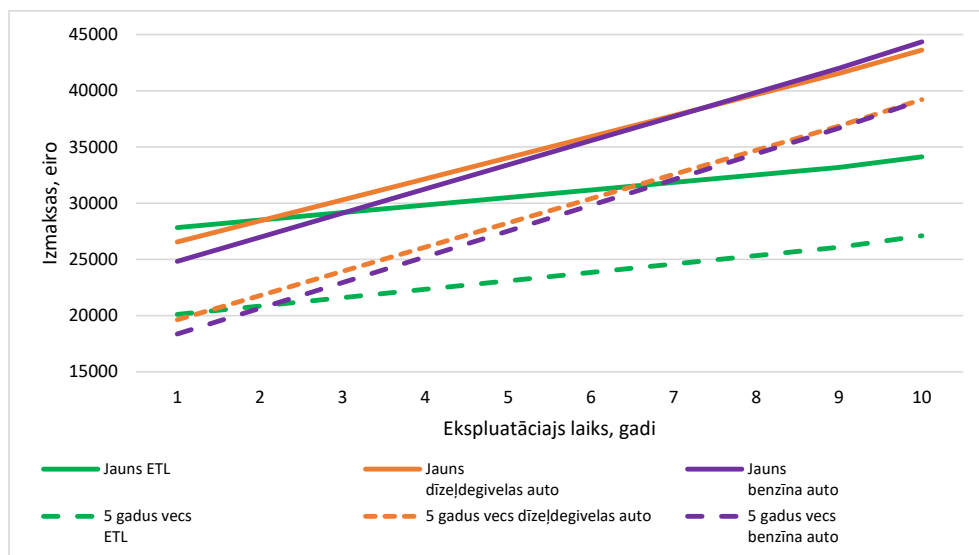
3.2.1. ELEKTROMOBIĻU IZMAKSU NOVĒRTĒJUMS

Šajā apakšnodaļā aprakstīts veiktais pētījums, kas publicēts rakstā “*Cost-benefit assessment of electric vehicle vs internal combustion engine in Latvia*” un kura metodika izklāstīta 2.2. apakšnodaļā.

Lai gan elektromobiļu nozares attīstība ir atzīta par vienu no prioritārajiem virzieniem transporta nozares dekarbonizācijā, neskatoties uz tās straujo attīstību, pētījuma veikšanas brīdī joprojām pastāvēja neskaidrība par šādu transportlīdzekļu patiesajiem ekonomiskajiem ieguvumiem, ņemot vērā to pilno dzīves ciklu. Veiktajā izmaksu un ieguvumu analīzē tika izvērtētas gan jauno, gan lietoto elektromobiļu izmaksas, tās salīdzinot ar iekšdedzes dzinēju transportlīdzekļiem, ņemot vērā ne tikai ekonomiskos, bet arī sociālos un vides aspektus.

Visos analizētajos transportlīdzekļos iegādes izmaksas veidoja ievērojamu daļu no kopējām izmaksām; tomēr atšķirības starp elektromobiļiem un transportlīdzekļiem ar iekšdedzes dzinēju bija visvairāk pamanāmas ekspluatācijas posmā. Elektromobiļiem ekspluatācijas izmaksas bija ievērojami zemākas, pateicoties zemākām enerģijas izmaksām, nodokļiem un autostāvvietas maksām, kā arī zemākām sociālajām un vides izmaksām. Ekspluatācijas izmaksu salīdzinājums atklāja ievērojamu atšķirību starp elektromobiļiem un iekšdedzes dzinēja transportlīdzekļiem. Jauna elektromobiļa gada ekspluatācijas izmaksas bija apmēram 669 eiro, savukārt jauna dīzeļdegvielas un benzīna automobiļa – attiecīgi apmēram 1874 eiro un 2147 eiro. Līdzīga tendence tika novērota arī attiecībā uz piecu gadu veciem transportlīdzekļiem – elektromobiļa gada ekspluatācijas izmaksas bija apmēram 747 eiro, savukārt dīzeļdegvielas un benzīna transportlīdzekļiem – attiecīgi apmēram 2154 eiro un 2289 eiro. Rezultātā tika secināts, ka elektromobiļa galvenā priekšrocība izpaužas ekspluatācijas posmā, nevis sākotnējās iegādes brīdī.

Tajā pašā laikā pētījuma rezultāti liecina, ka elektromobiļa priekšrocība nav saistīta ar zemākām sākotnējām izmaksām. Turpretim jauna elektromobiļa iegādes cena un monetizētās emisiju izmaksas, kas saistītas ar ražošanu un utilizāciju, bija augstākas nekā iekšdedzes dzinēja transportlīdzekļiem. Tas nozīmē, ka elektromobiļu izmaksu priekšrocība tiek realizēta tikai pēc ilgāka lietošanas perioda, kad zemākas ekspluatācijas izmaksas kompensē augstāko sākotnējo iegādes cenu un augstākās ražošanas/utilizācijas izmaksas. To apliecina arī 3.3. attēlā parādītie kumulatīvie rezultāti par 10 gadu periodu.



3.3. att. Dažādu tehnoloģiju kopējo aprēķināto kumulatīvo izmaksu salīdzinājums.

Lai gan jauno, gan piecus gadus vecu transportlīdzekļu izmaksas liecina, ka elektromobiļi sākotnēji ir dārgāki, aprēķini rāda, ka laika gaitā situācija mainās. Kopumā elektromobiļu izmaksas visā dzīves ciklā bija zemākas, pat ņemot vērā ievērojami augstākas utilizācijas izmaksas. Tādējādi piecus gadus vecs elektromobilis izmaksā par 22,3 % mazāk nekā piecus gadus vecs dīzeļdegvielas automobilis un par 19,2 % mazāk nekā piecus gadus vecs benzīna automobilis. Savukārt 10 gadu periodā jauns elektromobilis izmaksā par 27,8 % mazāk nekā jauns dīzeļdegvielas automobilis un par 30 % mazāk nekā jauns benzīna automobilis. Tas apstiprina, ka elektromobiļa augstāka iegādes cena tiek kompensēta ekspluatācijas posmā.

Jutīguma analizē tika izvērtēta tādu parametru kā nobraukuma, degvielas cenas un CO₂ cenas izmaiņu ietekme uz rezultātiem. Visos gadījumos šī parametra nozīmes palielināšana veicināja kopējo izmaksu pieaugumu, taču tika konstatēts, ka gada nobraukums ir visjutīgākais faktors, kas ietekmē galīgās izmaksas. Tika noteikts, ka elektromobiļu priekšrocības, salīdzinot ar iekšdedzes dzinēja transportlīdzekļiem, palielinās līdz ar nobraukuma pieaugumu. Tikmēr degvielas un CO₂ izmaksu pieaugums ietekmē iekšdedzes dzinēja transportlīdzekļus vairāk nekā elektromobiļus, tāpēc šādos scenārijos elektromobiļu relatīvās priekšrocības palielinās. Tādējādi, pieaugot fosilās degvielas un CO₂ izmaksām, iekšdedzes dzinēja transportlīdzekļu kopējās izmaksas pieauga straujāk nekā elektromobiļu izmaksas. Tas padara elektromobiļus vēl izdevīgākus scenārijos ar augstākām degvielas vai oglekļa izmaksām.

Kopumā iegūtie rezultāti atbilst literatūras analīzei un veido pamatu integrētiem politikas novērtēšanas modeļiem. Tie ne tikai liecina par elektromobiļu izmantošanas potenciālu un dzīvotspēju transporta nozarē, bet arī par nepieciešamību izplatīt iegūtos rezultātus, lai kļiedētu sabiedrības stereotipus, ka elektromobiļi ir dārgs risinājums. Ir jāuzsver gan izmaksu atšķirība, gan citi elektromobiļu ieguvumi, piemēram, zemāks trokšņa līmenis un mazākas gaisa emisijas.

Šie rezultāti papildina arī daudzkritēriju lēmumu analīzes rezultātus, kuros elektromobiļi tika novērtēti kā visdaudzpusīgākais tehnoloģiskais virziens. Izmaksu un ieguvumu analīze

liecina, ka elektromobiļu priekšrocības nav saistītas tikai ar vides apsvērumiem, bet tās var pamatot arī ekonomiski, ja ekspluatācijas izmaksas un ārējās izmaksas tiek izvērtētas ilgākā laika posmā. Tādēļ elektromobiļu atbalsta pasākumi, piemēram, iegādes subsīdijas, nodokļu atvieglojumi un uzlādes infrastruktūras attīstība, var tikt pamatoti kā pārejas posma politikas instrumenti, kas palīdz pārvarēt augstās sākotnējās iegādes izmaksas.

3.2.2. BIOMETĀNA RAŽOŠANAS POTENCIĀLA UN IZMANTOŠANAS TRANSPORTĀ MODEĻĒŠANA

Šajā apakšnodaļā aprakstīti veiktie pētījumi, kas publicēti rakstā “*Future transport policy designs for biomethane promotion: A system Dynamics model*” un kura metodika izklāstīta 2.5.1. apakšnodaļā.

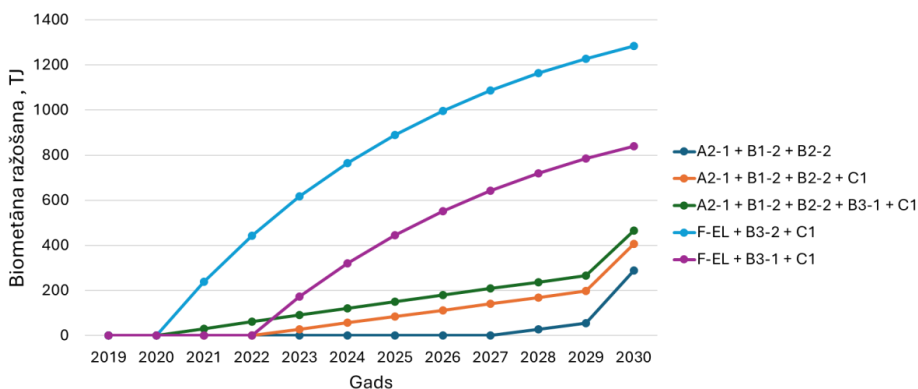
Bāzes scenārijs atspoguļo biogāzes nozares attīstību gadījumā, ja netiek īstenoti papildu politikas pasākumi biometāna ražošanas veicināšanai. Alternatīvie scenāriji tika definēti, lai atbildētu uz jautājumu, kuri politikas pasākumi ir visefektīvākie biogāzes izmantošanas palielināšanai tās pārstrādei. Modelis prognozē pārejas ātrumu no biogāzes izmantošanas koģenerācijas stacijās (pašreizējā situācija) uz biogāzes pārstrādi (vēlamā situācija) līdz 2030. gadam, ņemot vērā ierosinātos politikas pasākumus.

Politikas instrumenti tika iedalīti trīs apakškategorijās: (A) politikas pasākumi, kas ietekmē biogāzes ražošanas izmaksas; (B) politikas pasākumi, kas ietekmē biometāna ražošanas cenu; (C) politikas pasākumi, kas ietekmē biometāna vai dabasgāzes galīgo cenu (3.4. att.). Katrs no politikas pasākumiem tika pārbaudīts atsevišķi un kombinācijā ar citiem instrumentiem, lai novērtētu tā ietekmi uz biometāna ražošanas cenu un biometāna galīgo tirgus cenu.

A: Biogāzes veicināšana	B: Biometāna veicināšana	C: Degvielas cena
A1: Kapitāla izmaksu subsīdija biogāzes ražotnēm A1-1: 20 % apmērā A1-2: 40 % apmērā A2: Izejvielu subsīdija A2-1: 20 % apmērā A2-2: 40 % apmērā	B1: Kapitāla izmaksu subsīdija biometāna ražotnēm B1-1: 20 % apmērā B1-2: 40 % apmērā B2: Uzpildes infrastruktūras subsīdija B2-1: 20 % apmērā B2-2: 40 % apmērā B3: Piemaksas tarifs B3-1: 15 EUR/MWh B3-2: 30 EUR/MWh	C1: CNG akcīzes nodokļa ikgadējs pieaugums par 10 % C2: Akcīzes nodokļa samazinājums biometānam par 100 % C3: PVN samazinājums biometānam no 21 % līdz 12 %

3.4. att. Modelī pārbaudīto politikas instrumentu kopsavilkums.

Papildus 3.4. attēlā aprakstītajām politikām tika pārbaudīta arī F-EL politika (elektroenerģijas iepirkuma tarifu pārtraukšana). Modelēšanas rezultāti liecina, ka, izmantojot dažādas politikas instrumentu kombinācijas, ir iespējams sasniegt atšķirīgas attīstības trajektorijas (3.5. att.).



3.5. att. Izvēlēto kombinēto politikas pasākumu ietekme uz biometāna ražošanu (Politikas instrumentu sadalījums – 3.4. attēlā).

Viens no modeļa scenārijiem, F-EL + B3-1 + C1, paredz vienlaikus attīstīt biometāna ražošanas tehnoloģijas un ieviest mērķtiecīgus atbalsta instrumentus, tostarp atcelt elektroenerģijas iepirkuma tarifu, noteikt piemaksu par biometānu un paaugstināt akcīzes nodokli dabasgāzei. Šis scenārijs ļauj ievērojami palielināt modernu biodegvielu un biogāzes izmantošanu transporta nozares enerģijas patēriņā. Ņemot vērā to, ka šādas biodegvielas tiek divkārti iekļautas mērķa sasniegšanā, modeļa scenārijs – F-EL + B3-1 + C1 – ļautu Latvijai izpildīt savas *RED II* saistības, vienlaikus samazinot siltumnīcefekta gāzu emisijas un veicinot biometāna tirgus konkurētspēju.

Rezultāti liecina arī par to, ka bioloģisko resursu pieejamība pārsniedz pašreizējo pieprasījumu, tādējādi ir iespējams palielināt biometāna ražošanas jaudu, ja tiek uzstādītas jaunas biogāzes ražotnes, un, izmantojot esošos bioloģiskos resursus, ir iespējams saražot apmēram 250 mil. m³ biogāzes. Atbalsta mehānismiem ir svarīga loma biometāna attīstībā, tieši ietekmējot tā cenu konkurētspēju, salīdzinot ar fosilajiem kurināmajiem. Bez nozīmīga likumdošanas atbalsta biometāna tirgus potenciāls ir ierobežots. Cenu subsīdijas ļaus biometānam kļūt konkurētspējīgam apmēram 2030. gadā, ja fosilā kurināmā izmaksas paliks nemainīgas. Apvienojot cenu subsīdijas un emisiju nodokli, varētu panākt straujāku biometāna izplatības pieaugumu, vienlaikus līdz 2030. gadam ievērojami samazinot emisijas.

Kopumā modelēšanas rezultāti liecina, ka biometāna izmantošanas attīstību transporta nozarē neierobežo tikai bioloģisko resursu pieejamība, bet tā galvenokārt ir atkarīga no politikas virziena, tirgus konkurētspējas un atbalsta instrumentu kombinācijas.

3.2.3. ŪDEŅRAŽA ATTĪSTĪBAS IESPĒJAS, ŠĶĒRSĻI UN PĒTNIECĪBAS TENDENCES

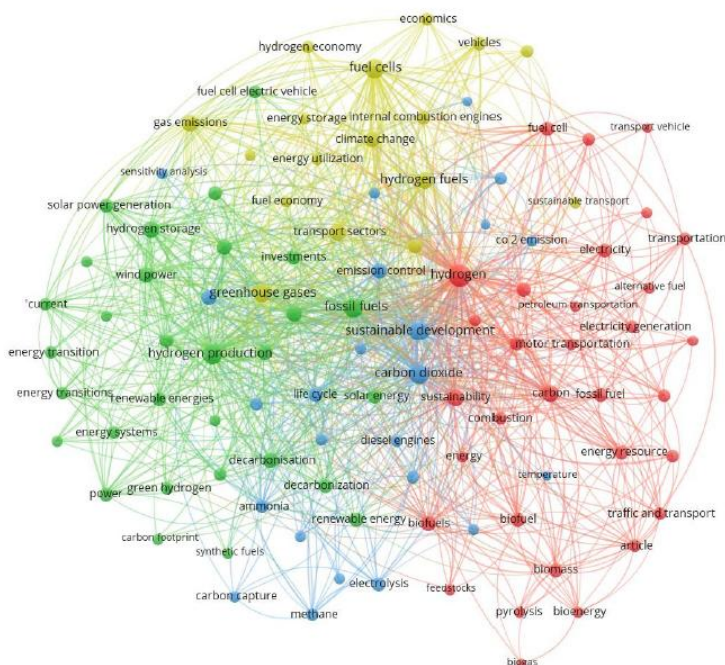
Šajā apakšnodaļā apkopoti divu publikāciju rezultāti, kurās izvērtēts ūdeņraža potenciāls. ES ir atzinusi ūdeņradi par svarīgu risinājumu ES transporta nozares dekarbonizācijai, jo īpaši tajās transporta nozarēs, kas bieži tiek uzskatītas par grūti dekarbonizējāmām, piemēram, aviācijā un smagajā autotransportā.

6. publikācijā “*Hydrogen Horizons: A Bibliometric Review of Trends in Diverse Emission Sectors*” izklāstītās ūdeņraža pētniecības tendences atbilst 2.3. apakšnodaļā aprakstītajai metodoloģijai. Bibliometriskā analīze liecināja par strauju zinātniskās intereses pieaugumu par ūdeņraža ilgtspējību. Publikāciju skaits no 2011. līdz 2022. gadam pieauga vairāk nekā 12 reizes, savukārt pēdējo piecu gadu laikā tas palielinājās no 54 publikācijām 2019. gadā līdz 213 publikācijām 2022. gadā. Tas apstiprina, ka ūdeņradis arvien vairāk tiek uzskatīts par vienu no virzieniem enerģētikas un transporta dekarbonizācijai.

No visiem rakstiem lielāko pētījumu daļu (57 %) veidoja enerģētikas nozare (piemēram, ūdeņraža ražošana, uzglabāšana un integrācija elektrotīklā), kam sekoja rūpniecības nozare (17 %) un transporta nozare (13 %), ieskaitot ūdeņraža transportlīdzekļus, kuģniecību, aviāciju un citas saistītas jomas. Transporta nozarei bija augstāks citēšanas rādītājs, kas liecina par inovāciju un nozīmīgumu, taču tās daļa pēc apjoma bija mazāka. Laika tendenču analīze parādīja, ka pēdējā laika pētījumu virzieni arvien vairāk saistīti ar dekarbonizāciju, enerģētikas pāreju, zaļo ūdeņradi un ūdeņraža uzglabāšanu. Tas ir būtiski transporta dekarbonizācijas kontekstā, jo ūdeņraža izmantošana transportā ir cieši atkarīga no atjaunojamā ūdeņraža pieejamības, uzglabāšanas iespējām un infrastruktūras attīstības.

Lai iegūtu ieskatu ūdeņraža attīstības stadijā transporta nozarē, tika veikta transporta nozarei specifiska kopējās sastopamības analīze. Transporta nozarē tika identificēta 221 publikācija. Transporta nozares atslēgvārdu kopējās sastopamības analīze parādīja, ka pētījumi par ūdeņradi transportā koncentrējas ap vairākām savstarpēji saistītām tēmām (3.6. att.). Šajās grupās ietilpst ne tikai transportam raksturīgi atslēgvārdi, piemēram, “degvielas elementi”, “transportlīdzekļi”, “transportēšana” un “alternatīvās degvielas”, bet arī plašākas sistēmas tēmas, piemēram, “ūdeņraža ražošana”, “ūdeņraža uzglabāšana”, “atjaunojamā enerģija”, “enerģētikas politika”, “izmaksas”, “dzīves cikls” un “oglekļa dioksīds”. Tas apstiprina, ka ūdeņradis transporta nozarē netiek pētīts izolēti kā atsevišķa transportlīdzekļu tehnoloģija, bet gan kā daļa no plašākas enerģētikas, infrastruktūras un politikas sistēmas.

Turklāt ūdeņraža pētījumos bieži tiek apspriesta ilgtspējība, taču tiešā saikne ar *SDG* ir vāja. Dati liecināja, ka publikācijās visbiežāk tika minēti *SDG* 7 (Pieejama un tīra enerģija), 13 (Klimata rīcība) un 9 (Rūpniecība, inovācija un infrastruktūra), savukārt *SDG* 11 (Ilgtspējīgas pilsētas) un 3 (Veselība un labklājība) tika pieminēti retāk. Tas liecina, ka, lai gan ūdeņradis bieži tiek saistīts ar ilgtspējīgu attīstību, tā ieguldījums konkrētu *SDG* mērķu sasniegšanā transporta nozarē vēl nav sistemātiski novērtēts.



3.6. att. VOSviewer izveidots kopējās sastopamības tīkls.

Kopumā bibliometriskie rezultāti liecina, ka ūdeņradi vajadzētu uztvert kā potenciālu papildu risinājumu konkrētām transporta jomām, nevis kā universālu risinājumu ceļu pasažieru transporta dekarbonizācijai. Šis rezultāts pamato nepieciešamību novērtēt ūdeņradi ne tikai no transporta emisiju samazināšanas potenciāla viedokļa, bet arī no sistēmas gatavības viedokļa. Proti, būtu jānovērtē arī atjaunojamā ūdeņraža pieejamība, uzglabāšanas iespējas, uzpildes infrastruktūra, izmaksas un saskaņots politiskais atbalsts. Tāpēc šajā promocijas darbā ūdeņradis tiek interpretēts kā potenciāls papildu risinājums konkrētiem transporta segmentiem, nevis kā universāla alternatīva ceļu pasažieru transporta dekarbonizācijai.

Tālāk aprakstīti pētījuma “*Realizing a Green Hydrogen Economy: An Examination of Influencing Factors*” rezultāti, kura metodika aprakstīta 2.4. apakšnodaļā. Tie atklāj gan galvenos zaļā ūdeņraža attīstības ierobežojumus, gan galvenos virzītājspēkus. Pētījumā tika izcelti vairāki aspekti, kas ietekmē ūdeņraža ekonomikas attīstību, tostarp izmaksu konkurētspēja, politikas atbalsta intensitāte, pētniecības un attīstības ietekme, kā arī sabiedrības atbalsts.

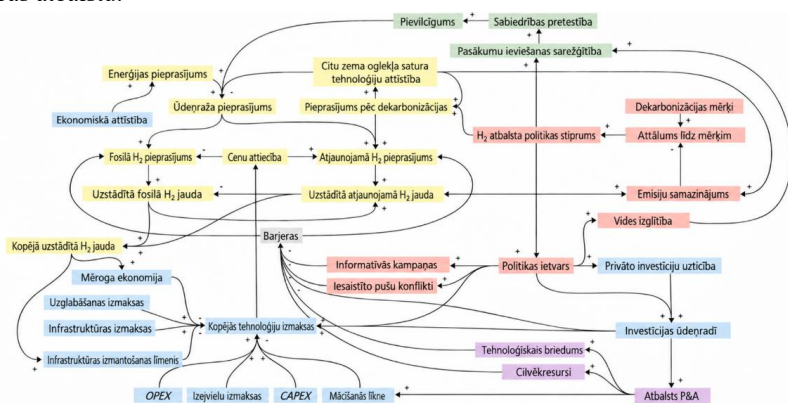
Literatūras analīze liecināja, ka viens no nozīmīgākajiem faktoriem, kas ierobežo ūdeņraža ekonomikas attīstību, ir izmaksu konkurētspēja. Zaļā ūdeņraža izmaksas ietekmē ne tikai ražošanas tehnoloģiju izmaksas, bet arī elektroenerģijas cena, kapitālieguldījumi elektrolizatoros, uzglabāšanas un transportēšanas izmaksas, infrastruktūras pieejamība, kā arī konkurence ar fosilo ūdeņradi un citām zemu emisiju tehnoloģijām [88], [89]. Tāpēc zaļā ūdeņraža izmantošana daudzās nozarēs bez politiskā atbalsta vai mērķtiecīgiem finanšu instrumentiem vēl nav ekonomiski konkurētspējīga [90].

Otrs svarīgs faktors ir politikas atbalsta intensitāte un ilgtermiņa politikas satvars. Literatūrā tiek uzsvērts, ka ūdeņraža tehnoloģiju ieviešanai nepieciešami skaidri valsts mērķi, stratēģijas, standarti, sertifikācijas sistēmas, infrastruktūras attīstības mehānismi un atbalsts pieprasījuma veicināšanai [91], [92]. Stabils politikas satvars samazina investoru nenoteiktību un palīdz izveidot tirgu tehnoloģijām, kas sākotnējā attīstības posmā vēl nav konkurētspējīgas salīdzinājumā ar esošajiem risinājumiem [93], [94].

Trešais faktors ir pētniecības un attīstības ietekme. Ieguldījumi pētniecībā un attīstībā ir būtiski, lai palielinātu tehnoloģiju gatavību, samazinātu izmaksas, īstenotu izmēģinājuma projektus, sagatavotu cilvēkresursus un veidotu sadarbību starp akadēmisko sektoru, uzņēmumiem un valsts iestādēm [95], [96]. Šis faktors ir īpaši svarīgs, jo ūdeņraža ekonomikas attīstība ir atkarīga ne tikai no vienas tehnoloģijas, bet no risinājumu kopuma visā vērtības ķēdē – ražošanā, uzglabāšanā, transportēšanā, infrastruktūrā un galapatēriņa tehnoloģijās [97].

Ceturtais svarīgais faktors ir sabiedrības atbalsts. Ūdeņraža tehnoloģiju ieviešanu var kavēt sabiedrības informētības trūkums, bažas par drošību, uzticības trūkums un pretestība pret politikas pasākumiem, kuru mērķis vai ieguvumi nav pietiekami skaidri [95], [98], [99]. Tāpēc zinātniskajā literatūrā tiek uzsvērtas informācijas kampaņu, riska komunikācijas, drošības standartu un sabiedrības iesaistīšanas nozīme, lai veicinātu uzticēšanos ūdeņraža tehnoloģijām un mazinātu iespējamo sabiedrības pretestību [100]–[102]. Literatūras pārskats liecināja, ka zaļās ūdeņraža ekonomikas attīstību nenosaka viens dominējošs šķērslis, bet gan vairāku savstarpēji saistītu faktoru kopums. Izmaksu samazināšana, stabils politikas satvars, atbalsts pētniecībai un attīstībai, kā arī sabiedrības atbalsta veicināšana ir savstarpēji papildinoši nosacījumi, kas kopā var veicināt ūdeņraža tehnoloģiju attīstību un ieviešanu.

Pamatojoties uz literatūras pārskatu, tika izstrādāta cēloņsakarību shēma. Izstrādātā cēloņsakarību shēma attēlo ūdeņraža pieprasījuma virzītājspēkus un kavējošos faktorus piecos sektoros – ekonomikā, politikā, sabiedrībā, pētniecībā un attīstībā, kā arī pieprasījumā (3.7. att.). Turklāt shēma uzsvēr arī valsts politikas nozīmi kā sistēmas virzītājfaktoru, kas ietekmē gan izmaksu samazināšanu (piemēram, ar nodokļu atvieglojumu palīdzību), gan sabiedrības atbalstu.



3.7. att. Vienkāršota sistēmas dinamiskā modeļa struktūras cēloņsakarību shēma.

(Parametri dzeltenajos, sarkanajos, violetajās, zilajos un zaļajos laukos ir saistīti attiecīgi ar pieprasījumu pēc ūdeņraža, politiku, pētniecību un attīstību, ekonomiku un sociālo komponenti.)

Literatūras pārskata laikā tika identificētas vairākas atgriezeniskās saites. Uzstādītā jauda, apjomradīti ietaupījumi un izmaksu samazināšanas saite liecina, ka atjaunojamā ūdeņraža pieprasījuma pieaugums var veicināt uzstādīto jaudu, apjomradītos ietaupījumus un izmaksu samazināšanu, tādējādi vēl vairāk palielinot pieprasījumu. Politikas atbalsta, investīciju un izmaksu samazināšanas saite liecina, ka spēcīgāks politikas atbalsts var veicināt investīcijas, pētniecību un attīstību, kā arī izmaksu samazināšanu, savukārt emisiju samazināšana saīsina attālumu līdz dekarbonizācijas mērķiem un tādējādi samazina nepieciešamību pēc papildu politiskā spiediena. Sabiedrības pieņemšanas un politikas atgriezeniskās saites cikls ilustrē risku, ka spēcīgs politisks spiediens var izrādīties neefektīvs, ja sabiedrība vai tirgus dalībnieki pasākumu īstenošanu uztver kā pārāk sarežģītu. Savukārt sabiedrības pieņemšanas un izglītošanas cikls liecina, ka informācija un vides izglītība var mazināt sabiedrības pretestību un palielināt ūdeņraža tehnoloģiju pievilcību.

Cēloņsakarību cilpu diagrammas pētījumā tika izvērtēta arī infrastruktūras pieejamības ietekme uz ūdeņraža ekonomikas attīstību. No vienas puses, lielāka uzstādītā ūdeņraža jauda var uzlabot infrastruktūras izmantošanu un veicināt apjomradītus ietaupījumus, samazinot kopējās tehnoloģiju izmaksas. No otras puses, nepieciešamība pēc papildu uzglabāšanas, sadales un uzpildes infrastruktūras var palielināt infrastruktūras izmaksas un palēnināt ieviešanu, ja pieprasījums joprojām ir nepietiekams.

Turklāt rezultāti liecināja, ka ūdeņraža attīstību ierobežo konkurence no citu zemu oglekļa emisiju tehnoloģiju puses. Autopasažieru transportā tas galvenokārt attiecas uz elektromobiļiem, kas var būt lētāki, tehnoloģiski nobriedušāki un vieglāk ieviejami nekā ūdeņraža tehnoloģijas. Tāpēc ūdeņradim, visticamāk, būs nozīmīga vieta konkrētās nišās vai segmentos, ko ir grūti elektrificēt, nevis kā universāls transporta dekarbonizācijas risinājums.

Kopumā secinājumi apstiprina, ka, lai risinātu tehnoloģiskās nenobriedības un ekonomiskās dzīvotspējas jautājumus, ir nepieciešams palielināt politisko atbalstu, jo īpaši izmantojot mērķtiecīgas valsts stratēģijas, ieguldījumus pētniecībā un attīstībā, kā arī starpnozaru sadarbību starp privāto, akadēmisko un publisko sektoru. Tādējādi izstrādātais modelis kalpo par pamatu sistēmdinamikas modelēšanai un lēmumu pieņemšanas atbalstam.

3.3. Transporta emisiju scenāriju modelēšana valsts un pašvaldību līmenī

3.3.1. VALSTS LĪMEŅA POLITIKAS SCENĀRIJU MODELĒŠANA LATVIJĀ

Šajā apakšnodaļā aprakstīts veiktais pētījums, kas publicēts rakstā “*Renewable Transport Challenge: A Comprehensive Policy Assessment Model*” un kura metodika izklāstīta 2.5.2. apakšnodaļā.

Šajā pētījuma daļā tika izstrādāts un pārbaudīts jauns SD modelis, kas paredzēts valsts transporta un enerģētikas politikas ietekmes novērtēšanai, īpašu uzmanību pievēršot atjaunojamās enerģijas integrācijai. Modelis ietver 10 politikas instrumentus, kas atspoguļo ASI pieeju, proti, trīs galvenās stratēģijas – braucienu skaita samazināšanu, transporta veidu maiņu un efektivitātes uzlabošanu. Pēc bāzes scenārija formulēšanas un validēšanas, izmantojot

vēsturiskos datus, tika izvērtētas vairākas politikas. Politikas modelēšanas rezultāti apkopoti 3.2. tabulā.

3.2. tabula

Gada CO₂ ietaupījumu potenciāla modelēšanas rezultāti, salīdzinot ar bāzes scenāriju

Pieeja	CO ₂ ietaupījumi, % salīdzinājumā ar bāzes scenāriju	Politikas pasākumi
Ceļošanas samazināšana	5–8 %	P8, P10
Pāreja uz citiem transporta veidiem	Sabiedriskā transporta īpatsvara palielināšana: < 5 %	P5, P6
	Velosatiksmes īpatsvara palielināšana: < 2 %	
	Pārvadājumu veidu maiņa kravu pārvadājumos: 2–4 %	
Efektivitātes uzlabošana	Alternatīvo degvielu īpatsvara palielināšana līdz 10 % no autoparka: 5–8 %	P1, P2, P3, P4, P7, P9
	Energoefektivitātes uzlabošana: 6 %	

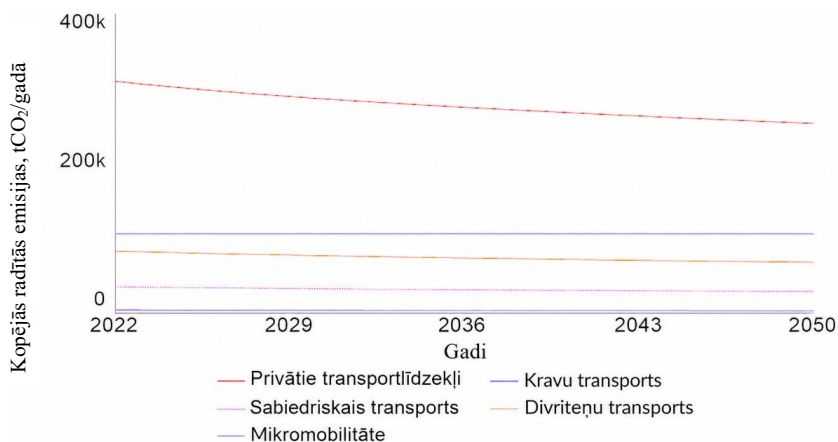
Katra politika tika novērtēta gan atsevišķi, gan kopā ar citām tās pašas stratēģijas politikām. Iegūtie rezultāti liecināja, ka Latvijas gadījumā “*Avoid*” stratēģijas (P8, P10), kas samazina nepieciešamību pārvietoties, nodrošina CO₂ emisiju samazinājumu līdz pat 8 %, salīdzinot ar bāzes scenāriju. Līdzīgus rezultātus sasniedz arī “*Improve*” stratēģijas (P1–P4, P7, P9), kuru mērķis ir uzlabot transporta energoefektivitāti. Salīdzinājumā ar tām “*Shift*” stratēģijas (P5, P6), kuru mērķis ir pāreja uz videi draudzīgākiem transporta veidiem, nodrošina mazāku CO₂ emisiju samazinājumu nekā “*Avoid*” stratēģijas, proti, līdz pat 5 %, salīdzinot ar bāzes scenāriju. Tad tika veikts vairāku stratēģiju kombināciju ietekmes novērtējums, kas parādīja, ka ir iespējams panākt emisiju samazinājumu līdz pat 30 %, salīdzinot ar bāzes scenāriju 2030. gadam.

Izstrādātais modelis ne tikai identificēja iespējamo emisiju samazinājumu, īstenojot dažādas politikas, bet arī papildina esošo zināšanu bāzi ar inovācijām. Tā “*white-box*” (atklātā) uzbūve nodrošina pārredzamību un atgriezenisko saikņu sistēmu atklāšanu, ļaujot modelēt uzvedības aspektus (piemēram, transporta veidu maiņu); aprēķināt dažādu pasākumu neto sociālās izmaksas un ieguvumus, kā arī identificēt sinerģijas un kompromisus starp politikas pasākumiem. Ierosinātais modelis ne tikai apvieno tehnoloģiskos risinājumus ar regulatīvajiem noteikumiem, kuru mērķis ir samazināt izmaksas un palielināt CO₂ emisiju samazinājumu, bet arī integrē uzvedības aspektus tehnoloģiskajā un ekonomiskajā modelēšanā.

3.3.2. ĪSTENOŠANA PAŠVALDĪBU LĪMENĪ UN RĪGAS GADĪJUMA IZPĒTE

Šajā apakšnodaļā aprakstīts veiktais pētījums, kas publicēts rakstā “*Climate Neutrality through Scenario Analysis: A Local Authority Perspective*” un kura metodika izklāstīta 2.5.4. apakšnodaļā.

Šī pētījuma ietvaros tika izstrādāts matemātisks rīks transporta emisiju aprēķināšanai pašvaldībās. Lai validētu izstrādāto rīku, tika veikts Rīgas pilsētas gadījuma pētījums. Sākotnēji tika savākti visi nepieciešamie dati, lai definētu bāzes scenāriju. Iegūtie bāzes scenārija dati redzami 3.8. attēlā.



3.8. att. Radīto emisiju sadalījums pa transporta veidiem bāzes scenārijā ($\text{tCO}_2/\text{gadā}$).

Bāzes scenārijs liecina par emisiju samazinājumu līdz 2050. gadam. Tika konstatēts, ka ar šo rīku līdz 2050. gadam sasniegtais emisiju samazinājums tiek panākts vienīgi demogrāfisko izmaiņu (iedzīvotāju skaita samazināšanās) rezultātā, nevis efektīvas politikas īstenošanas dēļ. Visā modelēšanas periodā privātais transporta sektors turpina radīt vislielāko emisiju daudzumu. Tas apstiprina, ka bez papildu politikas pasākumiem ar demogrāfiskajām izmaiņām vien nepietiek, lai būtiski samazinātu pašvaldību transporta emisijas.

Literatūras analīzes apakšnodalā tika aprakstīta pašvaldību ierobežotā kapacitāte un datu trūkums. Tāpēc tika nolemts veikt jutīguma analīzi, lai atklātu galveno mainīgo lielumu izmaiņu ietekmi. Rezultāti liecināja, ka nelielas izmaiņas galvenajos mainīgajos lielumos (piemēram, braucienu skaitā, migrācijas intensitātē vai pasažieru skaitā automašīnās) varētu būtiski ietekmēt galīgos secinājumus, kas uzsver nepieciešamību pēc augstākas kvalitātes datiem pašvaldību līmenī.

Kravu transports nav šīs analīzes galvenais fokuss, tāpēc Rīgas gadījuma izpētē tiek pieņemts, ka kravu transporta emisijas bāzes scenārijā paliks nemainīgas, ņemot vērā vēsturisko stabilitāti, ierobežotos prognozes datus un nepieciešamību vienkāršot modeli, lai to būtu vieglāk salīdzināt ar politikas scenārijiem. Jutīguma analīze parādīja arī to, ka izmaiņas kravu pārvadājumu pieprasījumā, migrācijas pieņēmumos, braucienu intensitātē un automašīnu noslogojumā var būtiski ietekmēt modelētos emisiju rezultātus. Tā atklāja, ka aplūkotie parametri var būtiski ietekmēt galīgos rezultātus, uzsverot, cik svarīgi ir vākt precīzākus datus un veikt korekcijas, kad kļūst pieejami jaunāki dati.

Lai noteiktu ietekmi uz emisijām no autotransporta pasažieru pārvadājumiem, kopumā tika veiktas 12 atsevišķu politikas pasākumu analīzes simulācijas un piecas politikas pasākumu kombināciju simulācijas. Analizētie politikas pasākumi apkopoti 3.3. tabulā.

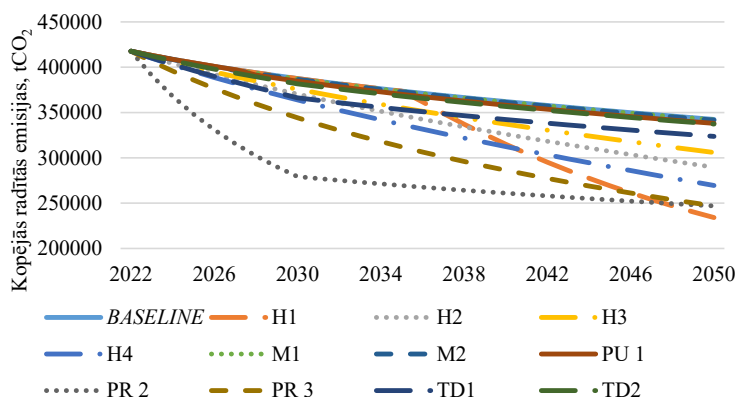
Analizēto politikas pasākumu apraksts

	Politikas pasākumi	Politikas pasākuma apraksts	Politikas pasākuma veids*	Politikas pasākuma sākuma (S) / beigu (E)* gads
Horizontālie politikas pasākumi	H1	Iekšdedzes dzinēju aizliegums	I	S – 2035
	H2	Atjaunojamo degvielu īpatsvara palielināšana	I	S – 2030
	H3	Mērens transporta veidu pārejas politikas scenārijs	S	E – 2050
	H4	Optimistisks transporta veidu pārejas politikas scenārijs	S	E – 2050
Pašvaldības transports	M1	Pašvaldības transporta nobraukuma mērens samazinājums (par 10 %)	A	S – 2027
	M2	Optimistisks pašvaldības transporta nobraukuma samazinājums (par 20 %)	A	S – 2027
Sabiedriskais transports	PU 1	Pāreja uz efektīvākiem transportlīdzekļiem	I	S – 2022
Privātais transports	PR 1	Pāreja uz efektīvākiem transportlīdzekļiem	I	S – 2022
	PR 2	Vidējās automašīnu noslogotības palielināšana līdz 2030. gadam	S	E – 2050
	PR 3	Vidējās automašīnu noslogotības palielināšana līdz 2050. gadam	S	E – 2050
Transporta pieprasījuma politikas	TD1	“Darbs no mājām” politika	A	E – 2050
	TD2	“E-pakalpojumu” politika	A	E – 2050

*A – pārvietošanās pieprasījuma mazināšana (*Avoid*); S – pāreja uz ilgtspējīgākiem pārvietošanās veidiem (*Shift*); I – transportlīdzekļu energoefektivitātes uzlabošana un mazemisiu tehnoloģiju ieviešana (*Improve*).

**S (sākuma gads) – gads, kad modelis sāk izmantot aprakstīto vērtību, E (beigu gads) – gads, kad vērtība ir sasniegusi aprakstīto mērķa vērtību.

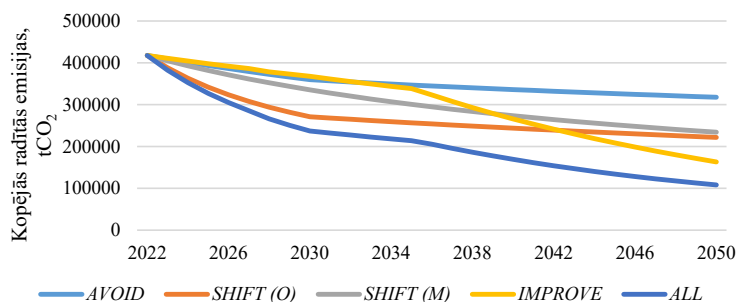
Bāzes scenārijā (*BASELINE*) ir sīki izklāstītas tikai pasažieru transporta radītās emisijas, jo tiek pieņemts, ka pieprasījums pēc kravu pārvadājumiem paliek nemainīgs un ka konkrētas politikas, kas tieši ietekmē kravu pārvadājumus, netiek ņemtas vērā. 3.9. attēlā redzami katras politikas rezultāti.



3.9. att. Izstrādāto politikas pasākumu ietekmes salīdzinājums uz radīto emisiju apjomu.
(Politikas instrumentu apraksts – 3.3. tabulā.)

Saskaņā ar analīzi vismazāko ietekmi rada politika “Darbs no mājām” (TD1), pašvaldības transportlīdzekļu nobraukto kilometru skaita samazināšana (M1 un M2) un pāreja uz efektīvākiem sabiedriskā transporta līdzekļiem (PU1). To var izskaidrot ar to, ka šie pasākumi attiecas tikai uz nelielu daļu no transporta nozares radītajām emisijām. Tika konstatēts, ka vislielākais emisiju samazināšanas potenciāls ir atjaunojamo degvielu īpatsvara palielināšanai (H2), iekšdedzes dzinēju aizliegšanai (H1) un optimistiskas transporta veidu pārejas politikas (H4) īstenošanai, kas attiecas uz visiem mehāniskajiem transporta veidiem. Bāzes scenārijā privātie transportlīdzekļi rada vairāk nekā pusi no visām emisijām, tāpēc arī vidējās automašīnu noslogotības palielināšana (PR2, PR3) radīja ievērojamu emisiju samazinājumu.

Lai salīdzinātu politikas pasākumu ietekmi, pamatojoties uz *ASI* pieeju, tika izstrādāti četri papildu scenāriji: izvairīšanās “*AVOID*” (TD1, TD2, M2); mērena pāreja “*SHIFT (M)*” (H3, PR3); optimistiskā pāreja “*SHIFT (O)*” (H4, PR2); uzlabošana “*IMPROVE*” (H1, H2, PU1, PR1). Tika pētīts arī visu politikas virzienu hibrīds, kas ietvēra visu politikas virzienu kombināciju “*ALL*”, kas ietvēra visus “*AVOID*”, “*SHIFT (O)*” un “*IMPROVE*” politikas pasākumus. Politikas virzienu kombināciju rezultāti parādīti 3.10. attēlā.



3.10. att. Izstrādāto politikas pasākumu kombināciju ietekmes salīdzinājums uz radīto emisiju apjomu.

Iegūtie rezultāti liecina, ka “izvairīšanās” politikas pasākumi nodrošina vismazāko emisiju samazinājumu, salīdzinot ar citām politikas pasākumu kombinācijām. To var izskaidrot ar to, ka, lai gan pārvietošanās pieprasījuma samazināšana nerada emisijas transporta nozarē, braucienu pieprasījuma samazināšanu praksē ir grūti panākt. “Pārejas” politikas nodrošināja labākus emisiju samazinājumus, liecinot, ka, lai gan 2050. gada rezultāti optimistiskajā un mērenajā scenārijā ir gandrīz vienādi, privātā transporta pakāpeniskas izņemšanas paātrināšana var nodrošināt lielāku kumulatīvo emisiju ietaupījumu līdz minētajam gadam. Iekšdedzes dzinēju transportlīdzekļu aizliegums 2035. gadā bija galvenais faktors, kas nodrošināja ievērojamo emisiju samazinājumu, ko panāca “uzlabošanas” politikas.

Kombinētais (visas *ASI* pieejas) scenārijs nodrošina labākos rezultātus, samazinot emisijas līdz pat 68 %, salīdzinot ar 2022. gadu. Tas atbilst literatūras pārskata secinājumiem un liecina, ka, lai sasniegtu labākos rezultātus, lēmumu pieņēmējiem ir jāīsteno plašs politikas pasākumu klāsts. Tomēr sasniegtais emisiju samazinājums nav pietiekams, lai līdz 2050. gadam panāktu pilnīgu klimata neitralitāti, jo īpaši ņemot vērā kravu pārvadājumus.

Kopumā Rīgas gadījuma izpēte liecina, ka pašvaldības transporta dekarbonizācijai ir nepieciešams pasākumu kopums, kas ietver emisiju novēršanu, transporta veidu maiņu un

uzlabošanu, un vislielākais samazinājums tiek panākts, ja uz tehnoloģijām vērstas politikas tiek apvienotas ar pasākumiem, kas ietekmē mobilitātes paradumus. Tajā pašā laikā rezultāti liecina, ka scenāriju modelēšana pašvaldības līmenī ir ļoti atkarīga no datu kvalitātes, jo īpaši attiecībā uz pieņēmumiem par pārvietošanās pieprasījumu, migrāciju, transportlīdzekļu noslogotību un kravas transportu.

3.4. Sabiedrības atbalsts un uzvedības faktori transporta dekarbonizācijā

3.4.1. APTAUJAS REZULTĀTI: SABIEDRĪBAS ATBALSTS UN MOBILITĀTES PREFERENCES VIETĒJĀ LĪMENĪ

Šajā apakšnodaļā aprakstīts veiktais pētījums, kas publicēts rakstā “*Local-Level Challenges in Sustainable Mobility: Survey Results from the Baltic Sea Region*” un kura metodika izklāstīta 2.6. apakšnodaļā.

Četrās Baltijas jūras valstīs (Latvijā, Igaunijā, Zviedrijā un Polijā) tika veikts starptautisks pētījums, lai analizētu sabiedrības uzvedību, mobilitātes modeļus un atbalstu dažādām ilgtspējīgas mobilitātes iniciatīvām. Aptaujā piedalījās 1151 respondents, un tās rezultāti liecināja par vairākiem ievērojamiem secinājumiem.

Attiecībā uz esošajiem pārvietošanās ieradiem tika konstatēts, ka privātie automobiļi joprojām ir visizplatītākais transporta veids visās valstīs, savukārt sabiedriskais transports lauku apgabalos tiek izmantots retāk. To var izskaidrot ar zemāku iedzīvotāju blīvumu un ar to saistītajām augstākajām izmaksām uz vienu lietotāju, kas izraisa piedāvājuma samazināšanos. Respondenti kā galvenos faktorus, kas ietekmē transporta veida izvēli, minēja arī ceļošanas laiku, attālumu, komfortu un infrastruktūras pieejamību. Savukārt ietekme uz vidi un valdības politika tika novērtēta kā nenožīmīgs ietekmējošais faktors. Tas liecina, ka iedzīvotāju mobilitātes izvēlē ikdienas praktiskie apsvērumi joprojām ir svarīgāki nekā vienīgi ar klimatu saistīti argumenti.

Novērtējot pašvaldību darbību transporta nozarē, tika konstatēts, ka iedzīvotāju vērtējumi bija vidēji. Augstākais vidējais vērtējums tika sasniegts Igaunijā un Latvijā (3,97 un 3,96 no 7 attiecīgi), zemākais – Zviedrijā (2,83). Pilsētu iedzīvotāji savu pašvaldību darbu vērtē ievērojami augstāk nekā lauku iedzīvotāji – vidēji 4,17 pret 3,31.

Kritika pašvaldībām galvenokārt bija vērsta uz nepilnīgo sabiedriskā transporta sistēmu, nepietiekamo gājēju un velosipēdistu infrastruktūru, kā arī ātruma ierobežojumu pārkāpumiem. Iedzīvotāji no lauku apgabaliem sniedza sliktākus vērtējumus, kas arī liecina par ērtu privāto automašīnu alternatīvu trūkumu šajos reģionos.

Lai noskaidrotu, ko varētu darīt situācijas uzlabošanai, iedzīvotājiem tika piedāvāts izvēlēties trīs visvēlamākās transporta politikas jomas. Visās valstīs vislielāko atbalstu saņēma šādas politikas: sabiedriskā transporta uzlabošana (34 %); velosatiksmes infrastruktūras attīstība (26 %); gājējiem draudzīga pilsētplānošana (20 %); attālinātā darba iespēju veicināšana (20 %). Kad ierosinātās politikas tika iedalītas saskaņā ar *ASI* sistēmu, tika konstatēts, ka visās valstīs vislielāko atbalstu saņēma “Pārejas” stratēģijas (sabiedriskā transporta un velosatiksmes infrastruktūras uzlabošana). “*Avoid*” tipa iniciatīvas (attālinātais

darbs, gājējiem draudzīga pilsētvides attīstība) guva plašu atbalstu, savukārt “*Improve*” politikas virzieni (viedā satiksmes pārvaldība, emisiju zonas un nodevas) saņēma ievērojami mazāku atbalstu.

Kopumā rezultāti liecina, ka iedzīvotāji vairāk atbalsta pasākumus, kas uzlabo piekļuves pakalpojumiem un mobilitātes iespējām, nekā ierobežojošus politikas instrumentus. Gados jaunākie respondenti dod priekšroku digitāliem un elastīgiem risinājumiem, savukārt vecāka gadagājuma respondenti – pieejamībai, drošībai un pārvietošanās ērtībai. Aptaujas rezultāti tiek apvienoti ar literatūras pārskatu, lai secinātu, ka, īstenojot transporta dekarbonizācijas politiku, ir svarīgi ņemt vērā iedzīvotāju viedokli, izskaidrot ierosināto pasākumu priekšrocības un izvairīties no pārāk stingriem ierobežojumiem bez sabiedrības atbalsta, jo tas var veicināt sabiedrības pretestību un kavēt transporta dekarbonizācijas mērķu sasniegšanu.

3.4.2. UZVEDĪBAS FAKTORI TRANSPORTA VEIDA IZVĒLES MODELĒŠANĀ

Šajā apakšnodaļā aprakstīts veiktais pētījums, kas publicēts rakstā “*Incorporating User Behaviour Into System Dynamics Modelling: A Case Study of Private vs. Public Transport in Latvia*” un kura metodika izklāstīta 2.5.3. apakšnodaļā.

Lai izpētītu privāto automašīnu lietotāju attieksmi pret sabiedrisko transportu Latvijā, tika veikta aptauja par preferencēm, kurā piedalījās 350 respondenti. Šajā pētījumā veiktās sabiedriskās aptaujas rezultāti liecina, ka, līdzīgi kā iepriekšējos pētījumos, transporta veida izmaksas tiek uzskatītas par svarīgām, tomēr daudzi citi faktori tiek novērtēti augstāk, piemēram, brauciena ilgums un komforts, lietošanas ērtums, infrastruktūras pieejamība un iespēja pārvadāt pasažierus un bagāžu. Lai iekļautu tos SD modelī, aptaujā noskaidrotie faktori, kas ietekmē transporta veida izvēli, tika sagrupēti, veidojot piecas galvenās grupas: (i) ceļošanas laiks; (ii) izmaksas; (iii) infrastruktūras pieejamība; (iv) komforts; (v) prestižs.

Lai izpētītu populārākā faktora (ceļošanas laika) ietekmi uz pāreju no privātajiem automobiļiem uz sabiedrisko transportu SD modelī, pamatojoties uz aptaujā iegūtajām atbildēm, tika modelēta laika un ceļošanas izmaksu ietekme uz šo pāreju. Rezultāti liecināja, ka gan laika, gan izmaksu faktori, ja tos aplūkotu atsevišķi, veicinātu sabiedriskā transporta izmantošanas pieaugumu.

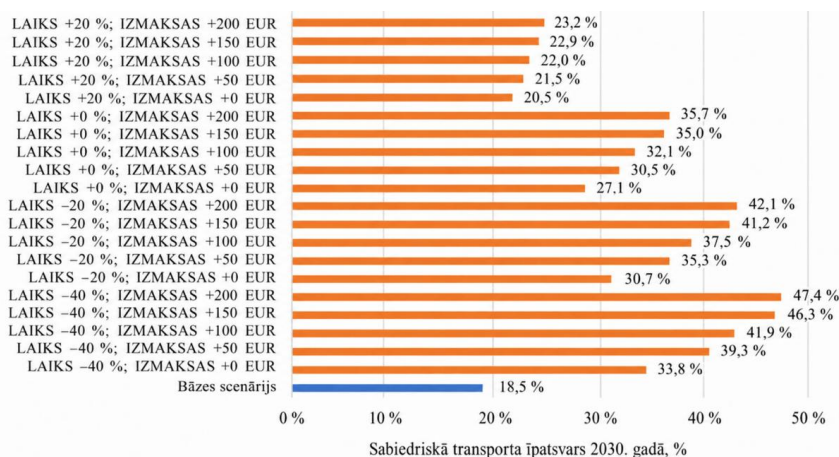
Saskaņā ar bāzes scenārija modelēšanas rezultātiem, ja ceļošanas izmaksas būtu vienīgais nozīmīgais faktors, līdz 2030. gadam ar esošajiem izdevumiem būtu iespējams sasniegt sabiedriskā transporta īpatsvaru 75,3 %. Tas liecina, ka esošās izmaksas lielākajai daļai iedzīvotāju ir pieņemamas, taču cilvēki neizvēlas pāriet uz sabiedrisko transportu citu iemeslu dēļ. Savukārt, ja brauciena ilgums paliktu nemainīgs, bet būtu vienīgais nozīmīgais faktors, sabiedriskā transporta daļa 2030. gadā pieaugtu līdz 24,1 %. Abu faktoru kombinācija (kad vienlaikus tika ņemts vērā ceļojuma laiks un ceļa izmaksas) parādīja, ka cilvēku daļa, kuri ir apmierināti gan ar brauciena ilgumu, gan ar brauciena izmaksām, abos scenārijos būtu tikai 18,6 %.

Tālākā darba izstrādes gaitā tika pārbaudīti scenāriji ar izmaiņām ceļošanas laikā un izmaksās. Attiecībā uz ceļošanas laiku pirmie scenāriji parādīja, ka, ja ceļošanas laiks būtu vienīgais svarīgais aspekts, tad sabiedriskā transporta ceļošanas laika pielīdzināšana privātā transporta ceļošanas laikam palielinātu sabiedriskā transporta daļu līdz pat 76,8 %, savukārt

98,1 % sabiedriskā transporta daļu varētu sasniegt, samazinot sabiedriskā transporta ceļošanas laiku uz pusi, salīdzinot ar privātajiem automobiļiem. Tomēr šāds scenārijs ir jāuzskata par teorētisku jutīguma testu, nevis par praktiski tieši sasniedzamu rezultātu, jo transporta veida izvēli ietekmē ne tikai brauciena ilgums, bet arī izmaksas, pieejamība, komforts, ieradumi un citi faktori.

Pētot scenāriju “Abi faktori ir nozīmīgi”, tika iegūti pieticīgāki rezultāti. Tie liecina, ka, ņemot vērā gan brauciena laiku, gan izmaksas, sabiedriskā transporta brauciena laika samazināšana līdz privāto automašīnu līmenim sabiedriskā transporta īpatsvars sasniegtu 27,1 %, savukārt, samazinot sabiedriskā transporta brauciena laiku uz pusi, tas sasniegtu 40,1 %

Līdzīgi, privātas automašīnas ikmēneša izmaksu palielināšana radīja daudz mazāku pāreju, ņemot vērā abus faktorus, nekā tad, ja izmaksas tika analizētas atsevišķi. 3.11. attēlā parādīta ceļošanas laika un izmaksu kopējā ietekme uz sabiedriskā transporta daļu 2030. gadā.



3.11. att. Kopējā ietekme uz sabiedriskā transporta daļu 2030. gadā, scenārijs “Abi faktori ir nozīmīgi”.

(LAIKS – sabiedriskā un privātā transporta pārvietošanās laika attiecības atšķirība. Pozitīva vērtība nozīmē, ka sabiedriskais transports ir lēnāks par privāto transportu, savukārt negatīva vērtība nozīmē, ka sabiedriskais transports kļūst ātrāks. IZMAKSAS – par cik pieaug privātā vieglā transportlīdzekļa izmaksas.)

Politikas scenāriju pārbaude parādīja, ka līdzīgus rezultātus var sasniegt, izmantojot dažādas politikas pasākumu kombinācijas. Piemēram, sabiedriskā transporta brauciena laika samazināšana un izmaksu palielināšana nodrošina līdzīgu efektu kā tikai izmaksu palielināšana. Šāda rezultātu daudzveidība uzsver nepieciešamību veikt izmaksu efektivitātes analīzi, lai noteiktu optimālo politikas pasākumu kombināciju.

Kopumā secinājumi liecina, ka politikas koncentrēšana uz vienu faktoru ir nepareiza, jo politikas īstenošanas patiesos ieguvumus var gūt tikai citu ietekmējošo faktoru kontekstā. Tas liecina, ka uzvedības maiņa ir daudzdimensionāla problēma, kas jārisina, izmantojot kombinētus politikas pasākumus. Turklāt rezultāti liecina, ka uzvedības maiņas modelēšana, balstoties tikai izolētos pieņēmumos, var pārvērtēt potenciālo pāreju no privātajiem automobiļiem uz sabiedrisko transportu.

SECINĀJUMI

Promocijas darbā tiek apstiprināts, ka autotransporta pasažieru pārvadājumu dekarbonizāciju nevar ticami novērtēt, analizējot tehnoloģijas vai politikas pasākumus atsevišķi. Ir nepieciešama integrēta pieeja, kas vienlaikus ņem vērā tehnoloģisko pāreju, uzvedības faktorus un koordinētu politikas īstenošanu. Promocijas darba rezultātus var apkopot piecos secinājumos.

1. Rezultāti liecināja, ka nav viena vienīga politikas instrumenta, ar kuru varētu panākt autotransporta pasažieru pārvadājumu nozares dekarbonizāciju. Gluži pretēji, Latvijas gadījuma izpēte parādīja, ka labākos rezultātus var iegūt, izmantojot kombinētu *ASI* metodi. Tas liecināja, ka klimata neitralitātes mērķu sasniegšanai ir nepieciešami koordinēti un savstarpēji papildinoši politikas pasākumu kopumi, kas vērsti uz pieprasījuma samazināšanu, transporta veidu maiņu un braucienu efektivitātes uzlabošanu.

2. Alternatīvo degvielu ieviešana tirgū lielā mērā ir atkarīga no valsts apņemšanās un regulatīvā atbalsta. Pētījums parādīja, ka bez papildu politiskiem stimuliem biometāna tirgus izaugsme ir ierobežota un ka ūdeņraža ieviešanai transporta nozarē ir nepieciešams oficiāls atbalsts valsts plašākai ūdeņraža ekonomikai. Alternatīvo degvielu attīstības balstīšana vienīgi uz tirgus mehānismiem bez papildu atbalsta var ievērojami aizkavēt to ieviešanu tirgū.

3. Uzvedības faktori ir ļoti svarīgi un lielā mērā nosaka politikas efektivitāti. Empīriskās modelēšanas rezultāti liecināja, ka vienīgi fiskālie mehānismi nav pietiekami, lai veicinātu transporta veidu maiņu. Tie rāda, ka politikas veidotājiem ir jāapzinās iedzīvotāju vajadzības un jānodrošina, ka, īstenojot ilgtspējīgas transporta politikas, tiek ņemti vērā arī citi svarīgi faktori, kas ietekmē lēmumu pieņemšanu.

4. Rīgas gadījuma izpēte liecināja, ka pašvaldību iniciatīvas var ievērojami samazināt emisijas. Tomēr, lai sasniegtu klimata mērķus, šie centieni varētu būt nepietiekami bez sadarbības un koordinācijas valsts līmenī.

5. Rīgas gadījuma izpētē veiktajā jutīguma analizē norādīts, ka politikas efektivitāte lielā mērā ir atkarīga no sociāliem faktoriem. Pētījumā tika konstatēts, ka izmaiņas demogrāfiskajos un mobilitātes rādītājos, piemēram, migrācijas intensitātē, braucienu biežumā un transportlīdzekļu noslogojumā, ievērojami ietekmēja rezultātus. Šādi secinājumi uzsver datu kvalitātes un starpiestāžu koordinācijas nozīmi.

Pētījums apstiprināja promocijas darba hipotēzi, ka integrēta analītiskā pieeja, kas ietver tehnoloģiskos, uzvedības un daudzlīmeņu politikas īstenošanas faktorus, nodrošina visaptverošāku un realitiskāku pasažieru autotransporta dekarbonizācijas virzienu novērtējumu nekā tikai tehnoloģijās balstīts novērtējums. Šīs pieejas piemērošana transporta nozares plānošanā novirza skatījumu no tehnoloģiju pieejamības uz sistēmas transformācijas perspektīvu. Kopumā pētījums parādīja visu līmeņu nozīmi ilgtspējības sasniegšanā transporta nozarē – valsts līmenis ir galvenais inovāciju virzītājspēks un regulatīvā satvara veidotājs; pašvaldību līmenis ir inovāciju un politikas izmēģinājumu vide; savukārt sociālais līmenis ir izšķirošs, lai veicinātu uzvedības inovācijas, kas ir tikpat svarīgas kā tehnoloģiskās inovācijas un prasa uzticēšanos un sabiedrības līdzdalību lēmumu pieņemšanā.

REKOMENDĀCIJAS

Pamatojoties uz šajā promocijas darbā veikto pētījumu un iegūtajiem rezultātiem, tika izstrādāti ieteikumi politikas veidotājiem. Tie ir izklāstīti tālāk un strukturēti atbilstoši trim galvenajām dimensijām – tehnoloģiskajai pārejai, uzvedības izmaiņām un koordinētai politikas īstenošanai –, vienlaikus ņemot vērā sadarbības vajadzības starp valsts valdību, pašvaldībām un iedzīvotājiem.

Ieteikumi tehnoloģiskās pārejas veicināšanai

1. Elektromobilitātes attīstība jāatbalsta kā vidēja termiņa prioritāte, nodrošinot gan atbalstu transportlīdzekļu iegādei, gan uzlādes infrastruktūras paplašināšanai. Lai gan elektromobiļiem ir augstākas sākotnējās izmaksas, rezultāti liecina, ka to izmantošana ilgtermiņā ir ekonomiski pamatota.

2. Biometāna izmantošana transportā jāveicina ar ilgtermiņa un prognozējamām atbalsta mehānismiem, tostarp ražošanas atbalstu, nodokļu atvieglojumiem un investīciju subsīdijām. Atbalsts būtu īpaši jāvirza uz tiem transporta segmentiem, ko ir grūtāk elektrificēt, piemēram, sabiedrisko transportu, pašvaldību autoparkus un loģistiku.

3. Ūdeņradi būtu jāuzskata par ilgtermiņa papildu risinājumu konkrētiem transporta segmentiem, nevis par universālu alternatīvu pasažieru autotransporta dekarbonizācijai. Būtu jāizstrādā valsts ūdeņraža attīstības ceļvedis, kurā noteikti skaidri mērķi, izmēģinājuma projekti, infrastruktūras prioritātes un atbalsta mehānismi.

4. Atbalsts ūdeņraža attīstībai būtu jāietver pētniecības un attīstības finansējumā, publiskā un privātā sektora partnerības un izmēģinājuma projektos. Vienlaikus ir nepieciešamas sabiedrības informēšanas aktivitātes, lai mazinātu iespējamo pretestību un uzlabotu izpratni par ūdeņraža tehnoloģijām.

Ieteikumi uzvedības izmaiņu veicināšanai

5. Politikai, kuras mērķis ir pāreja no privātajiem automobiļiem uz sabiedrisko transportu, nevajadzētu balstīties vienīgi cenu instrumentos. Lai veicinātu pārvietošanās paradumu maiņu, būtu jāuzlabo sabiedriskā transporta brauciena laiki, komforts, pakalpojumu kvalitāte, drošība, pieejamība un infrastruktūra.

6. Prioritāte būtu jāpiešķir tādiem pasākumiem, kas vērsti uz “pāreju”, piemēram, sabiedriskā transporta un velosatiksmes infrastruktūras uzlabošana, jo tie bauda vislielāko sabiedrības atbalstu. Vienlaikus būtu jāveicina arī “izvairīšanās” tipa pasākumi, tostarp attālinātais darbs un e-pakalpojumi, ja tie var samazināt nevajadzīgo pārvietošanās pieprasījumu.

7. Īpaša uzmanība jāpievērš lauku apvidiem, kur alternatīvas privātajam automobilim ir ierobežotākas. Šādos apvidos jāapsver pieprasījuma vadīti sabiedriskā transporta risinājumi un labāki savienojumi ar reģionālajiem centriem.

8. Ierobežojoši vai fiskāli pasākumi, piemēram, zemu emisiju zonas, augstāki nodokļi piesārņojošiem transportlīdzekļiem vai sastrēgumu nodevas, jāievieš pakāpeniski un tikai kopā ar sabiedrisko apspriešanu, informācijas kampaņām un praktiskām alternatīvām privātā automobiļa izmantošanai.

Ieteikumi koordinētai politikas īstenošanai

9. Valsts un vietējā līmeņa transporta politika ir labāk jāaskāpo. Valsts klimata un transporta mērķi būtu jāpārvērš vietējās investīciju prioritātēs, vienlaikus iesaistot vietējās pašvaldības to pasākumu izstrādē, ko tām paredzēts īstenot.

10. Lai izvairītos no tehnoloģiskās atkarības un pielāgotu atbalsta instrumentus mainīgajiem tirgus un tehnoloģiskajiem apstākļiem, būtu jāizmanto dinamiska politikas novērtēšana. Daudzkritēriju lēmumu analīze vai līdzīgas novērtēšanas metodes būtu jāatkārto ik pēc 3–5 gadiem, iesaistot valsts un pašvaldību pārstāvjus, nozares pārstāvjus, akadēmiskās aprindas un sabiedrību.

11. Transporta politikas plānošanā būtu jāņem vērā sabiedrības atbalsts. Lai identificētu šķēršļus, izskaidrotu politikas ieguvumus un samazinātu sociālās pretestības risku, būtu jāizmanto iedzīvotāju aptaujas, ieinteresēto pušu apspriešanās un komunikācijas pasākumi.

Ieteikumi datu uzlabošanai, uzraudzībai un turpmākai analīzei

12. Nepieciešams izveidot vienotu transporta datu vākšanas un uzraudzības sistēmu. Tai būtu jāietver ne tikai transportlīdzekļu nobraukums un degvielas patēriņš, bet arī braucienu biežums, mobilitātes paradumi, migrācijas intensitāte, transportlīdzekļu noslogotība un sabiedriskā transporta pieejamība. Pašvaldībām būtu regulāri jāvēc un jāatjaunina mobilitātes dati, un valsts mēroga transporta datu platforma varētu veicināt standartizētu datu apmaiņu un uzticamāku modelēšanu.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

- [1] S. Solaymani and J. Botero, 'Reducing Carbon Emissions from Transport Sector: Experience and Policy Design Considerations', *Sustainability*, vol. 17, no. 9, Art. no. 9, Jan. 2025, doi: 10.3390/su17093762.
- [2] 'Final energy consumption in transport - detailed statistics'. Accessed: Oct. 19, 2025. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Final_energy_consumption_in_transport_-_detailed_statistics.
- [3] 'Greenhouse gas emissions from transport in Europe'. Accessed: Aug. 12, 2025. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emissions-from-transport>.
- [4] *WHITE PAPER Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system*. 2011. Accessed: Oct. 19, 2025. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52011DC0144>.
- [5] 'Share of energy from renewable sources'. Accessed: Sep. 28, 2025. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_ind_ren_custom_15120255/default/table?lang=en.
- [6] I. Henke *et al.*, 'Fit for 2030? Possible scenarios of road transport demand, energy consumption and greenhouse gas emissions for Italy', *Transp. Policy*, vol. 159, pp. 67–82, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.tranpol.2024.10.002.
- [7] N. Adamashvili and A. Thrassou, 'Towards Sustainable Decarbonization: Addressing Challenges in Electric Vehicle Adoption and Infrastructure Development', *Energies*, vol. 17, no. 21, Art. no. 21, Jan. 2024, doi: 10.3390/en17215443.
- [8] 'Sustainability challenges throughout the electric vehicle battery value chain', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 191, p. 114176, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.rser.2023.114176.
- [9] J. Li, L. Jin, H. Deng, and L. Yang, 'Review on Decarbonizing the Transportation Sector in China: Overview, Analysis, and Perspectives', Oct. 01, 2023, *arXiv*: arXiv:2310.00613. doi: 10.48550/arXiv.2310.00613.
- [10] N. V. Emodi, C. Okereke, F. I. Abam, O. E. Diemuodeke, K. Owebor, and U. A. Nnamani, 'Transport sector decarbonisation in the Global South: A systematic literature review', *Energy Strategy Rev.*, vol. 43, p. 100925, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.esr.2022.100925.
- [11] S. Li, B. Wang, and H. Zhou, 'Decarbonizing passenger transportation in developing countries: Lessons and perspectives', *Reg. Sci. Urban Econ.*, vol. 107, p. 103977, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.regsciurbeco.2024.103977.
- [12] Ministry for Climate and Energy of the Republic of Latvia, 'Latvia's National Inventory Document under the UNFCCC and Paris Agreement', Riga, 2025. [Online]. Available: <https://videscentrs.lv/gmc.lv/lapas/information-on-ghg-emissions-in-latvia>.
- [13] 'Natural Gas and Biomethane in the European Road Transport: The Latvian Perspective', *Latv. J. Phys. Tech. Sci.*, vol. 57, no. 3, pp. 57–72, May 2020, doi: 10.2478/lpts-2020-0016.
- [14] I. Kulušić, L. Jukić, I. Smajla, and D. Karasalihović Sedlar, 'The Role of Natural Gas in the Socio-Technical Transition to a Carbon-Neutral Society and a Review of the European Union's Framework', *Sustainability*, vol. 16, no. 9, p. 3791, Jan. 2024, doi: 10.3390/su16093791.
- [15] A. Scedrovs and M. Feofilovs, 'Selection of Criteria for Load Analysis on Electrical Grid in the Context of Transport Electrification in Latvia', *CONNECT Int. Sci. Conf. Environ. Clim. Technol.*, pp. 55–55, May 2025, doi: 10.7250/CONNECT.2025.027.
- [16] L. Rozentale, G. B. Mo, A. Gravelins, C. Rochas, J. Pubule, and D. Blumberga, 'System Dynamics Modelling of Railway Electrification in Latvia', *Environ. Clim. Technol.*, vol. 24, no. 2, pp. 247–257, Sep. 2020, doi: 10.2478/rtuct-2020-0070.
- [17] T. Teoh, O. Kunze, C.-C. Teo, and Y. D. Wong, 'Decarbonisation of Urban Freight Transport Using Electric Vehicles and Opportunity Charging', *Sustainability*, vol. 10, no. 9, p. 3258, Sep. 2018, doi: 10.3390/su10093258.
- [18] J. Brizga, M. Jurušs, and B. Šmite-Roķe, 'Impact of the environmental taxes on reduction of emission from transport in Latvia', *Post-Communist Econ.*, vol. 34, no. 5, pp. 666–683, Jul. 2022, doi: 10.1080/14631377.2021.1965358.
- [19] A. Barisa and M. Rosa, 'Scenario analysis of CO2 emission reduction potential in road transport sector in Latvia', *Energy Procedia*, vol. 147, pp. 86–95, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.egypro.2018.07.036.
- [20] G. Valdmānis, M. Drobins, and G. Bazbauers, 'Use of Synthetic Fuels Derived from Green Hydrogen and CO2 in Heavy-duty and Long-range Transport: the Case of Latvia', *CONNECT Int. Sci. Conf. Environ. Clim. Technol.*, pp. 74–74, May 2023, doi: 10.7250/CONNECT.2023.053.
- [21] 'Towards Sustainable Transport: Evaluating Potencial of Hydrogen Fuel Cell Buses and Trucks in Latvia'. Accessed: Oct. 19, 2025. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10412884>.

- [22] J. Kleperis *et al.*, 'Analysis of the Role of the Latvian Natural Gas Network for the use of Future Energy Systems: Hydrogen from Res', *Latv. J. Phys. Tech. Sci.*, vol. 58, no. 3, pp. 214–226, Jun. 2021, doi: 10.2478/lpts-2021-0027.
- [23] J. M. Chen, 'Carbon neutrality: Toward a sustainable future', *The Innovation*, vol. 2, no. 3, p. 100127, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.xinn.2021.100127.
- [24] 'The European Green Deal'. Accessed: Nov. 03, 2023. [Online]. Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en.
- [25] *Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 ('European Climate Law')*, vol. 243, 2021. Accessed: Aug. 18, 2025. [Online]. Available: <http://data.europa.eu/eli/reg/2021/1119/oj/eng>.
- [26] 'Provisions for transport fuels in the European Union's finalized "Fit for 55" package', International Council on Clean Transportation. Accessed: Sep. 28, 2025. [Online]. Available: <https://theicct.org/publication/fuels-fit-for-55-red-iii-jul23/>.
- [27] 'Aktualizētais Nacionālais enerģētikas un klimata plāns 2021.–2030. gadam', LIKUMI.LV. Accessed: Aug. 18, 2025. [Online]. Available: <https://likumi.lv/doc.php?id=353615>.
- [28] R. Zhang and T. Hanaoka, 'Cross-cutting scenarios and strategies for designing decarbonization pathways in the transport sector toward carbon neutrality', *Nat. Commun.*, vol. 13, no. 1, p. 3629, Jun. 2022, doi: 10.1038/s41467-022-31354-9.
- [29] M. Arnz *et al.*, 'Avoid, Shift or Improve passenger transport? Impacts on the energy system', *Energy Strategy Rev.*, vol. 52, p. 101302, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.esr.2024.101302.
- [30] M. Jarre, M. Noussan, and E. Campisi, 'Avoid-Shift-Improve: Are Demand Reduction Strategies Under-Represented in Current Energy Policies?', *Energies*, vol. 17, no. 19, Art. no. 19, Jan. 2024, doi: 10.3390/en17194955.
- [31] C. Holz-Rau and J. Scheiner, 'Land-use and transport planning – A field of complex cause-impact relationships. Thoughts on transport growth, greenhouse gas emissions and the built environment', *Transp. Policy*, vol. 74, pp. 127–137, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.tranpol.2018.12.004.
- [32] D. Ton, D. C. Duives, O. Cats, S. Hoogendoorn-Lanser, and S. P. Hoogendoorn, 'Cycling or walking? Determinants of mode choice in the Netherlands', *Transp. Res. Part Policy Pract.*, vol. 123, pp. 7–23, May 2019, doi: 10.1016/j.tra.2018.08.023.
- [33] A. Vasconcelos, M. C. Coelho, and J. M. Bandeira, 'A Case Study on Peri-Urban Public Transport Optimisation From an Energy and Environmental Perspective', *IET Intell. Transp. Syst.*, vol. 19, no. 1, p. e70035, 2025, doi: 10.1049/itr2.70035.
- [34] N. Akram, W. Chen, K. Tariq, H. Linjun, and L. Zhaosheng, 'Role of Public Transportation in Reducing Traffic Congestion, Enhancing Connectivity, And Promoting Sustainable Urban Development in Manchester And Shenzhen', *Int. J. Soc. Sci. Humanit. Invent.*, vol. 12, no. 01, pp. 8401–8408, Jan. 2025, doi: 10.18535/ijsshi/v12i01.01.
- [35] E. Sogbe, S. Susilawati, and T. C. Pin, 'Scaling up public transport usage: a systematic literature review of service quality, satisfaction and attitude towards bus transport systems in developing countries', *Public Transp.*, vol. 17, no. 1, pp. 1–44, Mar. 2025, doi: 10.1007/s12469-024-00367-6.
- [36] S. Speizer *et al.*, 'Integrated assessment modeling of a zero-emissions global transportation sector', *Nat. Commun.*, vol. 15, no. 1, p. 4439, May 2024, doi: 10.1038/s41467-024-48424-9.
- [37] A. Dugan, J. Mayer, A. Thaller, G. Bachner, and K. W. Steininger, 'Developing policy packages for low-carbon passenger transport: A mixed methods analysis of trade-offs and synergies', *Ecol. Econ.*, vol. 193, p. 107304, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.ecolecon.2021.107304.
- [38] R. Zaino, V. Ahmed, A. M. Alhammadi, and M. Alghoush, 'Electric Vehicle Adoption: A Comprehensive Systematic Review of Technological, Environmental, Organizational and Policy Impacts', *World Electr. Veh. J.*, vol. 15, no. 8, p. 375, Aug. 2024, doi: 10.3390/wevj15080375.
- [39] J. A. Fuinhas *et al.*, 'Effect of Battery Electric Vehicles on Greenhouse Gas Emissions in 29 European Union Countries', *Sustainability*, vol. 13, no. 24, p. 13611, Jan. 2021, doi: 10.3390/su132413611.
- [40] W. Loengbudnark, K. Khalilpour, G. Bharathy, F. Taghikhah, and A. Voinov, 'Battery and hydrogen-based electric vehicle adoption: A survey of Australian consumers perspective', *Case Stud. Transp. Policy*, vol. 10, no. 4, pp. 2451–2463, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.cstp.2022.11.007.
- [41] D. De Wolf and Y. Smeers, 'Comparison of Battery Electric Vehicles and Fuel Cell Vehicles', *World Electr. Veh. J.*, vol. 14, no. 9, p. 262, Sep. 2023, doi: 10.3390/wevj14090262.
- [42] M. Repele, L. Udrene, and G. Bazbauers, 'Support Mechanisms for Biomethane Production and Supply', *Energy Procedia*, vol. 113, pp. 304–310, May 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.04.070.
- [43] E. S. Maté, C. García, P. M. Ramos, and E. M. Calvo, 'Natural Gas as a Gateway for Renewable Gas in Transport', in *Sustainable Mobility*, IntechOpen, 2020. doi: 10.5772/intechopen.91344.

- [44] Y. Briand *et al.*, 'Passenger transport decarbonization in emerging economies: policy lessons from modelling long-term deep decarbonization pathways', *Clim. Policy*, vol. 0, no. 0, pp. 1–21, doi: 10.1080/14693062.2023.2194859.
- [45] J. Lefèvre *et al.*, 'A pathway design framework for sectoral deep decarbonization: the case of passenger transportation', *Clim. Policy*, vol. 21, no. 1, pp. 93–106, Jan. 2021, doi: 10.1080/14693062.2020.1804817.
- [46] Ocean Eise Reseach Institute, 'Ocean Watch Howe Sound Edition 2020 Executive Summary: Overview and Future Directions'. [Online]. Available: <https://oceanorg.blob.core.windows.net/oceanorg/2023/08/Ocean-Watch-Howe-Sound-Edition-2020.pdf>.
- [47] D. Bamwesigye and P. Hlavackova, 'Analysis of Sustainable Transport for Smart Cities', *Sustainability*, vol. 11, no. 7, Art. no. 7, Jan. 2019, doi: 10.3390/su11072140.
- [48] F. Jelti, Allouhi, Amine, and Aoul, Kheira Anissa Tabet, 'Transition Paths towards a Sustainable Transportation System: A Literature Review', *Sustainability*, vol. 15, no. 21, p. 15457, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/su152115457>.
- [49] T. Bon, M. Bruno, and N. van Oort, 'Three-dimensional transport poverty and its socio-demographic and urban density predictors: Spatial regression analyses of neighborhoods in the Amsterdam metropolitan area', *Transp. Res. Interdiscip. Perspect.*, vol. 29, p. 101340, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.trip.2025.101340.
- [50] M. Thondoo, O. Marquet, S. Márquez, and M. J. Nieuwenhuisen, 'Small cities, big needs: Urban transport planning in cities of developing countries', *J. Transp. Health*, vol. 19, p. 100944, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.jth.2020.100944.
- [51] X. Liu, M. Dijk, and C. Colombo, 'Improving multilevel policy mixes for sustainable urban mobility transition', *Environ. Innov. Soc. Transit.*, vol. 50, p. 100808, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.eist.2023.100808.
- [52] D. M. Papadakis, A. Savvides, A. Michael, and A. Michopoulos, 'Advancing sustainable urban mobility: insights from best practices and case studies', *Fuel Commun.*, vol. 20, p. 100125, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.fuenco.2024.100125.
- [53] J. Carvalho, J. P. de Sousa, and R. Macário, 'Sustainable urban mobility planning at the metropolitan scale: a review of current practices and narratives', *Transp. Res. Procedia*, vol. 72, pp. 4175–4182, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.trpro.2023.11.357.
- [54] J. Baltazar, G. Bouillass, F. Vallet, J. Puchinger, and N. Perry, 'Integrating environmental issues into the design of mobility plans: Insights from French practices', *Transp. Policy*, vol. 155, pp. 1–14, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.tranpol.2024.06.019.
- [55] D. Di Battista *et al.*, 'The Reporting of Sustainable Energy Action Plans of Municipalities: Methodology and Results of Case Studies from the Abruzzo Region', *Energies*, vol. 14, no. 18, p. 5932, Jan. 2021, doi: 10.3390/en14185932.
- [56] A. Javaid, F. Creutzig, and S. Bamberg, 'Determinants of low-carbon transport mode adoption: systematic review of reviews', *Environ. Res. Lett.*, vol. 15, no. 10, p. 103002, Sep. 2020, doi: 10.1088/1748-9326/aba032.
- [57] H. Etzkowitz, 'The Triple Helix of University – Industry – Government', 2002, [Online]. Available: https://www.donorth.co/appurtenancy/pdfs/etzkowitz_triple_helix.pdf.
- [58] S. Cvetanović, A. A. Panić, and S. Vukadinovic, 'Media and culture-based public in the quadruple helix innovation model', *BizInfo Blace*, vol. 16, no. 1, pp. 115–122, Apr. 2025, doi: 10.71159/bizinfo250013C.
- [59] E. G. Carayannis, T. D. Barth, and D. F. Campbell, 'The Quintuple Helix innovation model: global warming as a challenge and driver for innovation', *J. Innov. Entrep.*, vol. 1, no. 1, p. 2, Aug. 2012, doi: 10.1186/2192-5372-1-2.
- [60] L. V. Lerman, W. Gerstlberger, M. Ferreira Lima, and A. G. Frank, 'How governments, universities, and companies contribute to renewable energy development? A municipal innovation policy perspective of the triple helix', *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 71, p. 101854, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.erss.2020.101854.
- [61] E. Eneqvist, J. Algehed, C. Jensen, and A. Karvonen, 'Legitimacy in municipal experimental governance: questioning the public good in urban innovation practices', *Eur. Plan. Stud.*, vol. 30, no. 8, pp. 1596–1614, Aug. 2022, doi: 10.1080/09654313.2021.2015749.
- [62] S. James, Z. Liu, G. R. T. White, and A. Samuel, 'Introducing ethical theory to the triple helix model: Supererogatory acts in crisis innovation', *Technovation*, vol. 126, p. 102832, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.technovation.2023.102832.
- [63] Bystrzanowska, M. and Tobiszewski, M., 'How can analysts use multicriteria decision analysis?', vol. 105, 2018, doi: 10.1016/j.trac.2018.05.003.
- [64] C.-L. Hwang and K. Yoon, *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications : a State-of-the-art Survey*. Springer-Verlag, 1981.
- [65] B. Djordjević and E. Krmac, 'Evaluation of Energy-Environment Efficiency of European Transport Sectors: Non-Radial DEA and TOPSIS Approach', *Energies*, vol. 12, no. 15, p. 2907, Jan. 2019, doi: 10.3390/en12152907.

- [66] I. Siksnyte-Butkiene and D. Streimikiene, 'Sustainable Development of Road Transport in the EU: Multi-Criteria Analysis of Countries' Achievements', *Energies*, vol. 15, no. 21, p. 8291, Jan. 2022, doi: 10.3390/en15218291.
- [67] S. Goyal, S. Agarwal, N. S. S. Singh, T. Mathur, and N. Mathur, 'Analysis of Hybrid MCDM Methods for the Performance Assessment and Ranking Public Transport Sector: A Case Study', *Sustainability*, vol. 14, no. 22, p. 15110, Jan. 2022, doi: 10.3390/su142215110.
- [68] A. Chaianong, C. Pharino, S. Langkau, P. Limthongkul, and N. Kuanusont, 'Pathways for enhancing sustainable mobility in emerging markets: Cost-benefit analysis and policy recommendations for recycling of electric-vehicle batteries in Thailand', *Sustain. Prod. Consum.*, vol. 47, pp. 1–16, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.spc.2024.03.025.
- [69] Q. Qiao *et al.*, 'Life cycle cost and GHG emission benefits of electric vehicles in China', *Transp. Res. Part Transp. Environ.*, vol. 86, p. 102418, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.trd.2020.102418.
- [70] P. Kut, K. Pietrucha-Urbanik, and M. Zelenáková, 'Assessing the Role of Hydrogen in Sustainable Energy Futures: A Comprehensive Bibliometric Analysis of Research and International Collaborations in Energy and Environmental Engineering', *Energies*, vol. 17, no. 8, p. 1862, Jan. 2024, doi: 10.3390/en17081862.
- [71] A. del Bosque, P. Fernández-Arias, and D. Vergara, 'Advancements in Hydrogen Storage Vessels: A Bibliometric Analysis', *Sci*, vol. 7, no. 1, p. 21, Mar. 2025, doi: 10.3390/sci7010021.
- [72] N. J. Van Eck and L. Waltman, 'Bibliometric mapping of the computational intelligence field', *Int. J. Uncertain. Fuzziness Knowl.-Based Syst.*, vol. 15, no. 05, pp. 625–645, Oct. 2007, doi: 10.1142/S02184885070004911.
- [73] N. J. van Eck, L. Waltman, E. C. M. Noyons, and R. K. Buter, 'Automatic term identification for bibliometric mapping', *Scientometrics*, vol. 82, no. 3, pp. 581–596, Mar. 2010, doi: 10.1007/s11192-010-0173-0.
- [74] M. Schaffernicht, 'Causal loop diagrams between structure and behaviour: A critical analysis of the relationship between polarity, behaviour and events', *Syst. Res. Behav. Sci.*, vol. 27, no. 6, pp. 653–666, 2010, doi: 10.1002/sres.1018.
- [75] J. F. Uleman, K. Stronks, H. Rutter, O. A. Arah, and N. H. Rod, 'Mapping complex public health problems with causal loop diagrams', *Int. J. Epidemiol.*, vol. 53, no. 4, p. dyae091, Aug. 2024, doi: 10.1093/ije/dyae091.
- [76] H. Roubik, J. Mazancová, J. Rydval, and R. Kvasnička, 'Uncovering the dynamic complexity of the development of small-scale biogas technology through causal loops', *Renew. Energy*, vol. 149, pp. 235–243, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.12.019.
- [77] F. C. Rust, L. R. Sampson, A. A. Cachia, B. M. Verhaeghe, H. S. Fourie, and M. A. Smit, 'Use of causal loop diagrams to assess future drivers and trends in South African transport', *J. Transp. Supply Chain Manag.*, vol. 17, no. 0, p. 13, Nov. 2023, doi: 10.4102/jtscm.v17i0.958.
- [78] A. Blumberga, *Sistēmdinamika vides inženierzinātņu studentiem*. Rīga: RTU Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts, 2010.
- [79] J. Randers, 'Elements of the System Dynamics Method', *J. Oper. Res. Soc.*, Nov. 1997, doi: 10.1057/PALGRAVE.JORS.2600456.
- [80] Thomas Binder, A. Vox, S. Belyazid, and H. V. Haraldsson, 'Developing System Dynamics Models From Causal Loop Diagrams', Proceedings of the 22nd International Conference of the System Dynamics Society. Accessed: Aug. 03, 2025. [Online]. Available: https://proceedings.systemdynamics.org/2004/SDS_2004/PAPERS/249BINDE.pdf.
- [81] A. Watabe, J. Leaver, H. Ishida, and E. Shafiei, 'Impact of low emissions vehicles on reducing greenhouse gas emissions in Japan', *Energy Policy*, vol. 130, pp. 227–242, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.enpol.2019.03.057.
- [82] J. J. Gómez Vilchez and P. Jochem, 'Simulating vehicle fleet composition: A review of system dynamics models', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 115, p. 109367, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.109367.
- [83] D. Keles, M. Wietschel, D. Möst, and O. Rentz, 'Market penetration of fuel cell vehicles – Analysis based on agent behaviour', *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 33, no. 16, pp. 4444–4455, Aug. 2008, doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.04.061.
- [84] G. Pasaoglu, G. Harrison, L. Jones, A. Hill, A. Beaudet, and C. Thiel, 'A system dynamics based market agent model simulating future powertrain technology transition: Scenarios in the EU light duty vehicle road transport sector', *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 104, pp. 133–146, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.techfore.2015.11.028.
- [85] 'Tautsaimniecības un budžeta izpildes analīze | Finanšu ministrija'. Accessed: Nov. 04, 2025. [Online]. Available: <https://www.fm.gov.lv/tautsaimniecibas-un-budzeta-izpildes-analize>.
- [86] A. Barisa and M. Rosa, 'A system dynamics model for CO2 emission mitigation policy design in road transport sector', *Energy Procedia*, vol. 147, pp. 419–427, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.egypro.2018.07.112.
- [87] Riga Technical University, Institute of Energy Systems and Environment, 'CommitClimate Citizen Survey', Interreg Baltic Sea Region Programme project CommitClimate – Towards Energy Transition and Climate

- Neutrality in the BSR Municipalities, 2024. [Online]. Available: https://br-commitclimate.rtu.lv/wp-content/uploads/CITIZEN_survey_report-1-1.pdf.
- [88] J. A. Gordon, N. Balta-Ozkan, and S. A. Nabavi, 'Socio-technical barriers to domestic hydrogen futures: Repurposing pipelines, policies, and public perceptions', *Appl. Energy*, vol. 336, p. 120850, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.120850.
 - [89] P. Halder *et al.*, 'Advancements in hydrogen production, storage, distribution and refuelling for a sustainable transport sector: Hydrogen fuel cell vehicles', *Int. J. Hydrog. Energy*, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.07.204.
 - [90] Dr. Ad van Wijk, 'Green Hydrogen for a European Green Deal A 2x40 GW Initiative'. [Online]. Available: https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2021/11/Hydrogen-Europe_2x40-GW-Green-H2-Initiative-Paper.pdf.
 - [91] IEA, 'Global Hydrogen Review 2023'. Accessed: Oct. 30, 2023. [Online]. Available: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/8d434960-a85c-4c02-ad96-77794aa175d/GlobalHydrogenReview2023.pdf>.
 - [92] *A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe*. 2020. Accessed: Oct. 26, 2025. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0301>.
 - [93] C. Li, L. Zhang, Z. Ou, and J. Ma, 'Using system dynamics to evaluate the impact of subsidy policies on green hydrogen industry in China', *Energy Policy*, vol. 165, p. 112981, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.enpol.2022.112981.
 - [94] M. Menes, 'Program initiatives of public authorities in the field of hydrogenation of the economy in a global perspective, as of the end of 2020', *Combust. Engines*, vol. 189, no. 2, pp. 18–29, Apr. 2022, doi: 10.19206/CE-142170.
 - [95] C. Chantre *et al.*, 'Hydrogen economy development in Brazil: An analysis of stakeholders' perception', *Sustain. Prod. Consum.*, vol. 34, pp. 26–41, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.spc.2022.08.028.
 - [96] S. Yoo and S. Park, 'South Korea's national pursuit for fuel cell electric vehicle development: The role of government R&D programs over 30 years (1989–2021)', *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 48, no. 26, pp. 9540–9550, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.12.136.
 - [97] J. Cader, R. Koneczna, and P. Olczak, 'The Impact of Economic, Energy, and Environmental Factors on the Development of the Hydrogen Economy', *Energies*, vol. 14, no. 16, Art. no. 16, Jan. 2021, doi: 10.3390/en14164811.
 - [98] D. Astiaso Garcia, 'Analysis of non-economic barriers for the deployment of hydrogen technologies and infrastructures in European countries', *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 42, no. 10, pp. 6435–6447, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.01.201.
 - [99] K. Ono, E. Kato, and K. Tsunemi, 'Does risk information change the acceptance of hydrogen refueling stations in the general Japanese population?', *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 44, no. 31, pp. 16038–16047, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.04.257.
 - [100] W. McDowall and M. Eames, 'Forecasts, scenarios, visions, backcasts and roadmaps to the hydrogen economy: A review of the hydrogen futures literature', *Energy Policy*, vol. 34, no. 11, pp. 1236–1250, Jul. 2006, doi: 10.1016/j.enpol.2005.12.006.
 - [101] R. Freeman, 'Modelling the socio-political feasibility of energy transition with system dynamics', *Environ. Innov. Soc. Transit.*, vol. 40, pp. 486–500, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.eist.2021.10.005.
 - [102] D. L. Edmondson, F. Kern, and K. S. Rogge, 'The co-evolution of policy mixes and socio-technical systems: Towards a conceptual framework of policy mix feedback in sustainability transitions', *Res. Policy*, vol. 48, no. 10, p. 103555, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.respol.2018.03.010.



Alīna Safronova dzimusi 1998. gadā Rīgā. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvusi bakalaura grādu vides zinātnē (2019), maģistra grādu vides zinātnē RTU un maģistra grādu vides inženierzinātnēs Viļņas Ģedimina Tehniskajā universitātē (2021), absolvējot dubultā maģistra studiju programmu. Akadēmisko karjeru RTU sākusi 2019. gadā zinātniskās asistentes amatā, kopš 2021. gada ir RTU pētniece.

Zinātniskās intereses saistītas ar ilgtspējīgu transportu un energosistēmām, īpaši pievēršoties transporta dekarbonizācijai, sistēmdinamikas modelēšanai, kā arī klimata un enerģētikas politikai.