



RĪGAS TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Gunārs Valdmanis

TRANSPORTA DEKARBONIZĀCIJA, IZMANTOJOT ELEKTRIFIKĀCIJU UN SINTĒTISKĀS DEGVIELAS

Promocijas darba kopsavilkums



RTU Izdevniecība
Rīga 2024

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Dabaszinātņu un tehnoloģiju fakultāte
Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

Gunārs Valdmanis

Doktora studiju programmas "Vides inženierija" doktorants

TRANSPORTA DEKARBONIZĀCIJA, IZMANTOJOT ELEKTRIFIKĀCIJU UN SINTĒTISKĀS DEGVIELAS

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
profesors *Dr. sc. ing.*
GATIS BAŽBAUERS

RTU Izdevniecība
Rīga 2024

Valdmanis G. Transporta dekarbonizācija, izmantojot elektrifikāciju un sintētiskās degvielas. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2024. – 70 lpp.

Publicēts saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-19” 2024. gada 3. oktobra lēmumu, protokols Nr. 206.

Vāka attēls – akciju sabiedrība "Augstsprieguma Tīkls"

<https://doi.org/10.7250/9789934371356>

ISBN 978-9934-37-135-6 (pdf)

PATEICĪBAS

Sirsnīgs paldies manam darba vadītājam profesoram *Dr. sc. ing.* Gatim Bažbaueram un Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūta direktorei profesorei *Dr. habil. sc. ing.* Dagnijai Blumbergai par ļoti aktīvu, apjomīgu un neaizstājamu atbalstu un iesaisti promocijas darba tapšanā, morālu atbalstu un būtiskiem priekšlikumiem darba uzlabošanā!

Paldies par sniegto atbalstu darba kolēģiem RTU Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūtā un Industriālās elektronikas, elektrotehnikas un enerģētikas institūtā, Klimata un enerģētikas ministrijā, Latvijas Elektroenerģētiķu un energobūvnieku asociācijā, kā arī sadarbības partneriem uzņēmumos AS “Latvenergo”, AS “Sadales Tīkls” un AS “Augstsprieguma Tīkls”, kuru padoms, vērtējumi, dati un ieteikumi būtiski palīdzēja darba izstrādē!

Īpaša pateicība pāragri aizsaulē aizgājušajam AS “Augstsprieguma Tīkls” padomes priekšsēdētājam, ilggadējam energosistēmu dispečervadības uzņēmuma SIA “DC Baltija” un Latvijas Elektroenerģētiķu un energobūvnieku asociācijas valdes priekšsēdētājam Vilnim Krēsliņam, kura plašās zināšanas, atbalsts un koleģialitāte bija nozīmīgs iedvesmas avots darba izstrādē!

Sirsnīga pateicība par ieguldījumu un idejām visiem publikāciju un zinātnisko rakstu līdzautoriem!

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2024. gada 19. decembrī plkst. 14.00 Rīgas Tehniskās universitātes Dabaszinātņu un tehnoloģiju fakultātē, Āzenes ielā 12/1, 607. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. habil. sc. ing.* Ivars Veidenbergs,
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors *Dr. sc. (tech.)* Peter D. Lund,
Ālto Universitāte, Somija

Profesors *Ph. D. Alar Konist,*
Tallinas Tehnoloģiju universitāte, Somija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis 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.

Gunārs Valdmanis _____ (paraksts)

Datums: 20.11.2024.

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 50 attēli, 16 tabulas, deviņi pielikumi, kopā 143 lappuses, neieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 140 nosaukumi.

SATURS

IEVADS	6
1. IEPRIEKŠĒJO PĒTĪJUMU APSKATS	14
1.1. Viegļā ETL skaita pieauguma dinamika un CO ₂ emisiju izmaiņas atkarībā no to tehnoloģiskās attīstības un atbalsta instrumentiem	15
1.2. Viegļā ETL uzlādes infrastruktūras attīstības scenāriju ietekme uz elektriskās slodzes profilu elektrotīklos to efektivitāti	16
1.3. Saules un vēja elektrostaciju saražotās elektroenerģijas izmantošanas potenciāls vieglo ETL sektorā	17
1.4. Tehniskās un ekonomiskās perspektīvas smagā transporta dekarbonizācijai ar sintētisko degvielu palīdzību	20
1.5. Mainīgo elektroenerģijas ražošanas avotu ietekme uz elektroenerģijas tirgus attīstības tendencēm un mijiedarbība ar transporta sektoru	21
2. PĒTĪJUMA METODOLOĢIJA	24
2.1. ETL skaita pieauguma dinamika vieglā autotransporta sektorā atkarībā no tehnoloģiskās attīstības un atbalsta instrumentiem un saistīto CO ₂ emisiju izmaiņas	25
2.2. Viegļā ETL un dažādu uzlādes infrastruktūras attīstības scenāriju iespējamās ietekmes elektrotīklu darbību novērtējums	27
2.3. Smagā transporta elektrifikācijas ar ar sintētisko degvielu palīdzību modelēšana, ņemot vērā AER jaudu attīstību un ietekmi uz tīklu	33
2.4. AER ietekmes uz elektroenerģijas tirgu un mijiedarbības ar transporta sektoru modelēšana	40
3. REZULTĀTI	43
3.1. ETL skaita pieauguma un CO ₂ emisiju dinamika atkarībā no tehnoloģiskās attīstības un atbalsta instrumentiem	43
3.2. Smagā transporta dekarbonizācijas perspektīvas ar sintētisko degvielu palīdzību	50
3.3. AER ražošanas avotu ietekmes uz elektroenerģijas tirgus attīstības tendencēm un transporta dekarbonizāciju analīze	53
4. SECINĀJUMI	57
5. ATSAUCES	61

IEVADS

Eiropas Savienības (ES) enerģētikas un klimata politika pēdējās desmitgadēs ir bijusi viena no galvenajām prioritātēm ES darba kārtībā. Lai gan ES dalībvalstis cenšas īstenot ES līmeņa dokumentos noteiktos mērķus un noteikumus, joprojām nāk klajā jauni tiesību aktu priekšlikumi, un dalībvalstīm ir jāizstrādā jauni politikas priekšlikumi, lai izpildītu kopīgos ES plānus, tai skaitā – samazinot siltumnīcas efektu veicinošo gāzu (SEG) emisijas, kā arī citu vides piesārņojumu, kas ir saistīts ar energoresursu lietošanu.

Viena no problemātiskākajām nozarēm SEG emisiju ierobežošanas jomā ir transporta nozare. ES iekšzemes transporta SEG emisijas laikposmā no 2013. līdz 2019. gadam pastāvīgi palielinājās, jo palielinājās pasažieru un iekšzemes kravu pārvadājumu apjoms (kas ir cieši saistīts ar ekonomikas izaugsmes tendencēm) [1].

Promocijas darba mērķis ir izpētīt iespējamus vieglā un smagā transporta (t. sk. kuģu un aviācijas) dekarbonizācijas risinājumus, kas balstīti no atjaunojamiem energoresursiem ražotā elektroenerģijā, novērtējot to tehnisko un ekonomisko potenciālu.

Pētījuma aktualitāte izriet ne tikai no ES klimata mērķiem, bet arī no pieaugošās elektroenerģijas cenas 2021./2022. gadā, kas ir mudinājusi daudzus elektroenerģijas patērētājus pāriet uz elektroenerģijas ražošanu pašpatēriņam un kopumā ir stiprinājusi atjaunojamās enerģijas tehnoloģiju konkurētspēju arī komerciālā līmenī. Ņemot vērā dažādu tehnoloģiju attīstību un ar to saistītos ierobežojumus, ir pamatoti aplūkot gan tādu elektrifikāciju, ko var saukt par primāro transporta elektrifikāciju, proti, scenārijus, kas paredz elektriskās piedziņas lietojumu transportā, gan arī tādu elektrifikāciju, ko var raksturot kā sekundāru, proti, tehnoloģijas, kurās elektroenerģija tiek izmantota kā resurss gāzveida vai šķidro sintētisko degvielu ražošanai no atjaunojamām izejvielām.

Promocijas darba mērķa sasniegšanai tika noteikti vairāki uzdevumi.

1. Izvērtēt vieglā un smagā transporta elektrifikācijas risinājumus, analizējot tehnoloģiskos un ekonomiskos aspektus, kā arī ietekmi uz klimatu, izvērtēt elektrisko transporta līdzekļu (ETL) skaita pieauguma dinamiku vieglā autotransporta sektorā atkarībā no to tehnoloģiskās attīstības un atbalsta instrumentiem, kā arī šīs dinamikas ietekmi uz CO₂ emisijām.

2. Izanalizēt vieglā ETL attīstības iespējamo ietekmi uz elektriskās slodzes profilu dažādiem uzlādes infrastruktūras attīstības scenārijiem, kā arī ietekmi uz elektrisko tīklu tehniski ekonomiskajiem rādītājiem.
3. Noteikt saules paneļu (*PV*) un vēja elektrostaciju (*VES*) saražotās elektroenerģijas izmantošanas potenciālu vieglā ETL sektorā.
4. Izvērtēt ekonomiskās un tehniskās perspektīvas smagā transporta dekarbonizāciju ar no atjaunojamas izcelsmes elektroenerģijas ražotu sintētisko degvielu palīdzību, ņemot vērā paredzamo atjaunojamo energoresursu tehnoloģiju elektrisko jaudu, kā arī sintētisko degvielu ražošanas jaudu attīstību, infrastruktūras tehnoloģiskās iespējas un institucionālos aspektus.
5. Izvērtēt elektroenerģijas tirgus cenas iespējamās attīstības tendences *VES* saražotās elektroenerģijas pieauguma rezultātā, tādējādi raksturojot primārās un sekundārās elektrifikācijas iespējamo ekonomisko izdevīgumu un ietekmi uz elektroenerģijas tirgus darbību.
6. Piedāvāt jaunu transporta elektrifikācijas politikas pasākumu priekšlikumus un metodiku to vērtēšanai, ko var lietot Latvijas enerģētikas politikas plānošanas dokumentos, ieskaitot Nacionālo enerģētikas un klimata plānu, vienlaikus sniedzot kvantitatīvus pieņēmumus par šo pasākumu ietekmi.

Izvirzītā hipotēze

Ieviešot atbilstošus politikas pasākumus no atjaunojamiem energoresursiem ražotās elektroenerģijas un sintētisko degvielu attīstības veicināšanai, Latvijā līdz 2050. gadam ir iespējama vieglā un smagā autotransporta dekarbonizācija ar vieglā transporta elektrifikācijas un sintētisko degvielu smagā transporta sektorā palīdzību.

Promocijas darba zinātniskā nozīme

Pētījumam ir zinātniska nozīme, jo darbs visaptveroši un sistemātiski analizē tehnoloģiski aktuālākos transporta un elektroenerģijas politikas pasākumus, aptverot tehnoloģijas, kas ir lietojamas visos transporta sektoros. Darba zinātnisko nozīmīgumu pamato arī apstāklis, ka tas ir īstenots ar savstarpēji papildinošām dažādām metodoloģiskām pieejām, nonākot līdz galīgajai teorijā balstītajai pieejai, lai integrētu visas pētījuma daļas.

Kopējais pētījums balstīts vairākās metodoloģijās, lai novērtētu elektroenerģijas un transporta politiku no dažādiem aspektiem. Promocijas darbā izmantotas šādas pētniecības metodes: sistēmdinamikas modelis; matemātiskā un statistiskā analīze; energosistēmas darbības simulācija; tehniski ekonomiskie aprēķini. Sistēmdinamikas modelis darbā galvenokārt izmantots, lai novērtētu dažādu politikas pasākumu cēloņsakarības un mijiedarbību un attīstības tendences laika gaitā. Energosistēmas simulācijas rīks darbā lietots ar mērķi prognozēt transporta elektrifikācijas pasākumu ietekmi uz elektroenerģijas sistēmas tehnoloģiskajiem un ekonomiskajiem rādītājiem. Matemātiskā un statistiskā analīze darbā izmantota, lai veiktu aprēķinus par elektromobilitātes izmaksām uz vienu galalietotāju, kā arī vēsturiskās tendences korelācijā starp atjaunojamās enerģijas ražošanas apjomiem un vairumtirdzniecības cenām, uz kā pamata var prognozēt sagaidāmo elektroenerģijas cenu svārstību dinamiku nākotnē un papildu pieprasījuma avotu ietekmi uz cenu veidošanos. Tehniski ekonomiskā analīze darbā izmantota, lai salīdzinātu, pirmkārt, elektroenerģijas lietotāju izmaksas un ieguvumus atkarībā no atjaunojamās enerģijas ražošanas iekārtu un elektrotransporta lietojuma mobilitātes un energoapgādes vajadzību nodrošināšanai, un, otrkārt, lai veiktu elektroenerģijas sadales sistēmas izmaksu prognozējamo dinamiku atkarībā no tīkla noslodzes svārstībām.

Promocijas darba praktiskā nozīme

Promocijas darba praktiskā nozīmi pamato darbā sniegtais novērtējums par vairāku transporta elektrifikācijas un sintētisko degvielu tehnoloģiju ilgtspēju Latvijas apstākļos, vienlaikus ņemot vērā arī ierobežojumus, ko nosaka Latvijas elektroenerģijas pārvades sistēmas darbība, infrastruktūras prognozējamā kapacitāte, elektroenerģijas tirgus cenu ekonomiskā pamatotība un ilgtspēja. Pētījums prognozē arī paredzamo izmaksu ietekmi galalietotāju līmenī. Pētījuma gaitā izstrādāts praktisks pētniecības modelis, ko var izmantot kā instrumentu, lai novērtētu vairāku no elektroenerģijas ražotu sintētisko degvielu un elektrifikācijas tehnoloģiju izmaksas, ietekmi uz emisijām un ietekmi uz energoapgādes kopējo bilanci. Būtisks darba pētniecības aspekts ir arī tas, ka darbā ir vērtēta ne tikai politikas pasākumu ieviešanas iespējamā dinamika laikā, bet arī nepieciešamie institucionālie faktori, kas var atstāt iespaidu uz politikas pasākumu ieviešanas sekmēm un ātrumu.

Pētījumam ir tieša lietojuma iespēja Latvijas politikas uzlabošanai elektroenerģijas un transporta nozarēs ne tikai tāpēc, lai veicinātu esošo klimata mērķu sasniegšanu, bet arī tāpēc, lai izvirzītu jaunus, ambiciozākus mērķus, sekmējot gan transporta, gan elektroenerģētikas sektoru attīstību un ilgtspēju.

Pētījuma rezultātu aprobācija

Pētījuma rezultāti aprobēti deviņās starptautiskās zinātniskās konferencēs un astoņos zinātniskajos rakstos, seši raksti publicēti *SCOPUS* datubāzē, divi – iesniegti recenzēšanai.

Publikācijas

1. **G. Valdmanis, G. Bažbauers, “Application of EnergyPLAN Modelling Tool for comparative Analysis of Selected Energy Policies in Case of Latvia** (2019) IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON); <https://doi.org/10.1109/RTUCON48111.2019.898233>.

2. **G. Valdmanis, G. Bažbauers, R. Vītols, “Impact of Electric Vehicle Charging Infrastructure on the Electric Load Profile of Power System: The Case of Latvia”** (2023) CONECT 2023: XVI International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies: Book of Abstracts 2023; <https://doi.org/10.7250/conect.2023.041>.

3. **G. Valdmanis, G. Bažbauers, M. Drobins, “Use of Synthetic Fuels Derived from Green Hydrogen and CO₂ in Heavy-duty and Long-range Transport: The Case of Latvia”** (2023) CONECT International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies May 2023; <https://doi.org/10.7250/CONNECT.2023.053>.

4. **G. Valdmanis, G. Bažbauers, M. Bataitis, G. Bohvalovs, J. Lilo, A. Blumberga, D. Blumberga “CO₂-to-Fuel – Business and Institutional Aspects of Implementation Dynamics”** (2022) Environmental and Climate Technologies 2022, vol. 26, no. 1, pp. 1182–1195; <https://doi.org/10.2478/rtuect-2022-0089>.

5. **G. Valdmanis, G. Bažbauers, M. Rieksta, I. Luksta, “Solar Energy Based Charging for Electric Vehicles at Fuel Stations”** (2022) Environmental and Climate Technologies Volume 26 (2022): Issue 1 (January 2022); <https://doi.org/10.2478/rtuect-2022-0088>.

6. **G. Valdmanis, G. Bažbauers, “Relation between Electric Vehicles and Operation Performance of Power Grid“** (2021) Environmental And Climate Technologies Volume 25 (2021): Issue 1 (January 2021); <https://doi.org/10.2478/rtuect-2021-0086>.

7. **G. Valdmanis, G. Bažbauers, “Synergy between Solar Energy and Electric Transport”** (2021) 2021 IEEE 62nd International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON); <https://doi.org/10.2478/rtuect-2022-0088>.

8. **G. Valdmanis, G. Bažbauers, Influence of Wind Power Production on Electricity Market Price** (2020) Environmental and Climate Technologies 2020, vol. 24, no. 1, pp. 472–482; <https://doi.org/10.2478/rtuect-2020-0029>.

Priekšlasījumi zinātniskajās konferencēs

1. **Application of EnergyPLAN Modelling Tool for comparative Analysis of Selected Energy Policies in Case of Latvia.** Presentation at the IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 2019.
2. **Influence of Wind Power Production on Electricity Market Price.** Presentation at the CONECT 2020: International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies.
3. **Synergy Between Solar Energy and Electric Transport;** Presentation at the IEEE 62nd International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 2012.
4. **Impact of Electric Vehicle Charging Infrastructure on the Electric Load Profile of Power System: The Case of Latvia.** Presentation at the conference CONECT 2023: International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies.
5. **Use of Synthetic Fuels Derived from Green Hydrogen and CO₂ in Heavy-duty and Long-range Transport: the Case of Latvia;** Presentation at the CONECT 2023: International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies.

6. Role of Institutional Capacity in Green Energy Transition. Gunārs Valdmanis, Gatis Bažbauers, Presentation at the 2nd European Culture and Technology Lab+ Annual Conference, Technological University Dublin, 2023.

Promocijas darba struktūra un apraksts




Promocijas darba pamatā ir astoņas tematiski saistītas zinātniskās publikācijas, kas publicētas vai iesniegtas publicēšanai starptautiskos zinātniskos žurnālos, kas indeksēti *SCOPUS* datubāzē un ir brīvi pieejami, kā arī viena pētījuma prezentācija starptautiskā zinātniskā konferencē. Septiņās publikācijās veikta dažāda transporta dekarbonizācijas un atjaunojamās enerģijas ražošanas un patēriņa aspektu analīze, savukārt astotajā sniegts ieskats par institucionālo un ekonomisko aspektu ietekmi uz transporta un enerģētikas dekarbonizācijas pasākumu īstenošanas dinamiku. Promocijas darbs ietver ievadu un trīs nodaļas.

1. Iepriekš veikto pētījumu apskats.
2. Pētniecības metodoloģijas.
3. Rezultāti un diskusija.
4. Secinājumi un rekomendācijas.

Ievadā sniegts promocijas darba mērķis un uzdevumi tā sasniegšanai, kā arī hipotēze un promocijas darba zinātniskā un praktiskā nozīmi. Tam seko informācija par pētījumu rezultātu aprobāciju, piedaloties starptautiskās zinātniskās konferencēs, un publicētās zinātniskās publikācijas.

Līdzšinējo pētījumu apskats 1. nodaļā ietver pārskatu par pētniecības jomu, t. i., atjaunojamās enerģijas un transporta dekarbonizācijas jomu un attiecīgajiem autora publikācijās aplūkotojājiem politikas pasākumiem. 2. nodaļā aprakstīta metodoloģija, kas tika izmantota visās publikācijās, lai izvērtētu dažādos transporta dekarbonizācijas un atjaunojamās enerģijas ieviešanas tehnoloģiskos pasākumus, kas ir vērtējami kā perspektīvi Latvijas enerģētikas un transporta politikā. 3. nodaļā sniegti pētījuma rezultāti, balstoties iepriekš minētajā metodoloģijā, kas ļauj autoram pabeigt promocijas darbu ar secinājumiem. Promocijas darba pētījuma struktūra parādīta 1. attēlā, atspoguļojot,

pirmkārt, darbā izvērtētos mērķus, izpētes, kas tiek risinātas pētījumu gaitā un ar to izpildi saistītās autora zinātniskās publikācijas.

Transporta sektors	Metodes	Rezultāti
 <ul style="list-style-type: none"> • Vieglais transports • Kravas sauszemes transports • Jūras transports • Gaisa transports 	 <ul style="list-style-type: none"> • Sistēmdinamikas modelēšana • Tehniski ekonomiskā analīze • Statistiskā analīze • Energosistēmu imitācijas modelēšana 	 <ul style="list-style-type: none"> • Apstiprināts oglekļa emisiju samazinājuma potenciāls transportā • Novērtēta elektrotransporta ietekme uz infrastruktūras un ražotņu darbību • Veikts enerģijas ražošanas apjomu un transporta patēriņa atbilstības novērtējums • Veikts sintētisko degvielu ražošanas apjomu novērtējums

1. att. Promocijas darba struktūra.

1. IEPRIEKŠĒJO PĒTĪJUMU APSKATS

Promocijas darba izstrādes gaitā, vērtējot pieejamās tehnoloģijas, ko var izmantot transporta radīto tiešo (ar transportlīdzekļu izplūdes gāzēm izdalīto) un netiešo (transportlīdzekļu un degvielas ražošanas procesā radīto) emisiju samazināšanai, tika identificēti vairāki būtiski izpētes aspekti.

Pirmkārt, par perspektīvāko tehnoloģiju vieglā pasažieru transporta dekarbonizācijai var uzskatīt elektromobiļu tehnoloģiju, kas balstīta elektroenerģijas akumulatora un elektrodzinēja tehnoloģijās (*IEA (2024), Global EV Outlook 2024, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>, Licence: CC BY 4.0*). To galvenokārt nosaka tādi aspekti kā paredzamā transportlīdzekļu lietošanas intensitāte, lietotāju paredzamais uzlādes pakalpojuma lietošanas biežums, kā arī izmaksu priekšrocības ilgtermiņa ekspluatācijas laikā, salīdzinot ar iekšdedzes dzinēju transportlīdzekļu ilgtermiņa lietošanas izmaksām.

Otrkārt, promocijas darba izstrādes gaitā veiktajos pētījumos ir aplūkotas arī smagā kravas un pasažieru sauszemes transporta, kā arī jūras transporta dekarbonizācijas perspektīvākās tehnoloģijas, un, pamatojoties uz šī transporta sektora tehnoloģiskajām un lietošanas īpatnībām, par kurām var uzskatīt no atjaunojamas elektroenerģijas ražotas sintētiskās degvielas, proti, degvielas, kuru primārā izejviela ir elektroenerģija un kas ir ražotas, izmantojot hidrolizē ražotu ūdeņradi un oglekļa dioksīdu (CO₂).

Treškārt, pētījuma gaitā pievērsta uzmanība arī aspektiem, kas ir saistīti ar transporta sektora netiešo emisiju samazināšanu. Tostarp pētījums pievēršas arī atjaunojamās enerģijas tehnoloģiju attīstības paredzamajai trajektorijai elektroenerģijas ražošanas sektorā, jo tieši elektroenerģijas sektora ražošanas tehnoloģijas noteiks arī transporta emisiju samazināšanās dinamiku. Pētījumā aplūkota arī transporta sektora radītā netiešā un tiešā ietekme uz elektroenerģijas apgādes infrastruktūru un tās lietošanas izmaksām. Darbā vērtēts arī transporta sektora potenciāls uzlabot kopējo elektroenerģijas tirgus ekonomisko un tehnisko funkcionēšanu, veicinot iespējas elektroenerģijas tirgū sekmīgi integrēt AER elektroenerģiju, kurai ir raksturīga mainīga un nepastāvīga izstrāde.

Ceturtkārt, ir veikts novērtējums arī par iespēju attīstīt AER elektroenerģijas ražošanu apjomā, kas sedz prognozējamo elektroenerģijas pieprasījumu, ieskaitot arī transporta sektora paredzamo pieprasījumu. Turklāt pētījumā tika izvirzīts mērķis noteikt atjaunojamo energoresursu, energotaupības pasākumu un elastības risinājumu vispārējo ietekmi uz valsts energosistēmas darbību un izmaksām, kā arī uz enerģētikas nozares radīto oglekļa emisiju līmeni. Pētījumā gaitā ir salīdzināti arī pieci dažādi enerģētikas politikas attīstības scenāriji ar atjaunojamo energoresursu un elastīguma tehnoloģiju, kā arī ēku energoefektivitātes rādītāju mērķvērtībām, kas tika izstrādātas laikposmam no 2017. līdz 2050. gadam.

1.1. Viegļā ETL skaita pieauguma dinamika un CO₂ emisiju izmaiņas atkarībā no to tehnoloģiskās attīstības un atbalsta instrumentiem

Atšķirībā no fosilās degvielas transporta līdzekļiem (FTL) ETL izmaksas, kas saistītas ar infrastruktūras uzstādīšanu un izmantošanu, veido ļoti būtisku daļu no galaizmantošanas izmaksām. Tāpēc daudzi iepriekšējie pētījumi, kas skar elektromobilitātes attīstību, ir koncentrējušies uz uzdevumiem, kas saistīti ar ETL uzlādes infrastruktūras ekonomisko un tehnisko optimizāciju, kā arī ETL un *PV* ražotās elektroenerģijas integrāciju. Portugālē veikts pētījums par "*park-and-ride*" infrastruktūras integrāciju ar *PV* ražošanu un ETL uzlādes pakalpojumiem apstiprināja, ka 2017. gadā prognozētais sākotnējo ieguldījumu atdeves periods sasniedza aptuveni 14 gadus, tādējādi apstiprinot šāda uzņēmējdarbības modeļa iespējamību [4]. Šādus apstiprinošus rezultātus var attiecināt arī uz scenāriju, kad *PV* un ETL uzlādes pakalpojums tiek izmantots sinerģijā ar degvielas uzpildes stacijām, uzlādes operatoram nodrošinot papildu ienākumus no mazumtirdzniecības saimnieciskās darbības. Pētījumi uzsver arī būtiskas priekšrocības no ETL uzlādes un *PV* sinerģijas no tīkla slodzes svārstību viedokļa [5], [6]. Tie konstatē, ka, izmantojot atbilstošu cenu noteikšanas politiku uzlādes pakalpojumiem, ir liels potenciāls samazināt nepieciešamību pēc tīkla izmantošanas un enerģijas uzkrāšanas iekārtām, kas papildus ļauj samazināt ETL kopējās emisijas to dzīves ciklā. Pētījumi liecina, ka, ņemot vērā pašreizējo vispārējo ETL izplatību transporta sistēmā un FTL un ETL iegādes cenu atšķirību, publiskajiem uzlādes pakalpojumiem ir vēlamas valsts subsīdijas to ātrākai attīstībai [4], [7], [8].

Kā iespējams būtisks ekonomisks un tehnoloģisks ierobežojums iespējamajai ETL attīstībai tiek minētas elektrotīkla attīstībai nepieciešamās investīcijas, ko var izraisīt

pieprasījuma pieauguma kāpums elektrotīklos. Tomēr, ja tīkla infrastruktūras noslodze ir zema un pietiekama ar transporta sektora saistītā pieprasījuma nodrošināšanai, ETL ietekme uz tīkla ekonomisko un tehnisko darbību saistīta ar tīkla efektīvāku noslodzi var būt arī pozitīva – efektīvāk noslogojot gan tīklu, gan arī intensīvāk izmantojot ETL uzlādes iekārtas, ar tām saistītās ETL izmaksas samazināsies. Turklāt elektrifikācijas pasākumi var pozitīvi ietekmēt arī *PV* konkurētspēju, jo, piemēram, *PV* iekārtu uzstādīšana ETL uzlādes stacijās ļauj *PV* saražoto elektroenerģiju pārdot galalietotājam, samazinot nepieciešamību saražoto elektroenerģiju pārvadīt tīklā.

Arvien vairāk politikas veidotāju veic pasākumus, lai atvieglotu ETL izmantošanu, tāpēc kļūst svarīgāk izmantot pieejamos politikas instrumentus, lai panāktu vislielāko oglekļa emisiju samazinājumu un vienlaikus nodrošinātu mobilitātes pakalpojumu vislielāko pieejamību sabiedrībai. Vienlaikus pētījumi, kuri ir veikti par *PV* un ETL uzlādes tehnoloģisko [7] un ekonomisko [9], mijiedarbību norāda uz to ka lokālu faktoru iespaidā plānotajiem un ieviešamajiem politikas pasākumiem un instrumentiem var būt būtiski atšķirīga ietekme uz sasniedzamo rezultātu. Līdzīgu pasākumu ieviešana dažādos ģeogrāfiskajos reģionos var radīt ievērojami atšķirīgus rezultātus, piemēram, Eiropas valstīs, ņemot vērā iedzīvotāju transporta izmantošanas ieradumus un tiem raksturīgo enerģijas patēriņu, šādas sinerģijas pozitīvā ietekme var būt lielāka nekā daudzos citos reģionos [10]. Pētnieki uzsver, ka, ir jāveic dažādu ETL veicināšanas instrumentu salīdzinājums konkrētai valstij vai reģionam, izmantojot specifiskus parametrus, kas raksturo transporta izmantošanas un elektrisko tīklu noslodzes atšķirības valstī, *PV* iekārtu efektivitātes atšķirības utt. Šajā pētījumā izmantoti ekonomiskie parametri un tehniskie pieņēmumi, kas raksturo tādas valstis vai reģionus kā Latvija, bet izstrādāto sistēmdinamikas modeli, veicot tam nepieciešamos pielāgojumus, var izmantot arī citu valstu vai reģionu analīzei.

1.2. Viegļā ETL uzlādes infrastruktūras attīstības scenāriju ietekme uz elektriskās slodzes profilu elektrotīklos un elektrotīklu darbības efektivitāti

Slēpts šķērslis transporta elektrifikācijai ir tas, ka sabiedrībā valda neizpratne par to, kāda ir elektrifikācijas ietekme uz kopējām elektroenerģijas lietošanas izmaksām, infrastruktūru un ražošanas izmaksām [11]. Pieprasījums pēc ETL uzlādes var būtiski mainīt energosistēmas slodzes profilu [12], kas apvienojumā ar tādiem mainīgas izstrādes

elektroenerģijas ražošanas avotiem kā vēja elektrostacijas (VES) vai *PV* var radīt pieprasījumu pēc jaunas infrastruktūras. Lai droši plānotu elektrotīklu un ETL uzlādes infrastruktūras attīstību, ir jāveic atbilstoša dažādu energosistēmas attīstības scenāriju modelēšana. Iepriekšējie pētījumi apstiprina, ka viens no modelēšanas rīkiem, ko var veiksmīgi pielāgot šādai analīzei, ir “*EnergyPLAN*” modelēšanas rīks [13]. Šī pētījuma mērķis ir izmantot “*EnergyPlan*” modelēšanas rīku, lai novērtētu ETL uzlādes ietekmi uz elektriskās slodzes profilu atkarībā no diviem būtiskākajiem faktoriem – pirmkārt, ETL skaita, un, otrkārt, uzlādes infrastruktūras darbības īpatnībām atkarībā no tā, kādā apjomā uzlādes infrastruktūra nodrošina ātru, vidēji ātru vai lēnu uzlādi. Turklāt pētījumā tiek novērtēts, cik lielu daļu no kopējā ETL enerģijas pieprasījuma var nodrošināt ar atjaunojamiem energoresursiem, t. i., vēja un *PV* enerģijas. Iepriekšējo pētījumu salīdzinājums apstiprina, ka “*EnergyPlan*” var novērtēt kā ļoti pielāgojamu un elastīgu enerģijas plānošanas instrumentu, ko var izmantot gan lielāku un integrētu energosistēmu modelēšanai [16], [17], gan mazākām un izolētām energosistēmām, piemēram, salām vai mazākiem reģioniem [18]–[20]. Šis rīks ir veiksmīgi izmantots gan dažādu enerģētikas politikas scenāriju [8] salīdzināšanai **Error! Reference source not found.**[20]–[24], gan atjaunojamo energoresursu, potenciāla novērtējumam par valstu energosistēmu primāro piegādes avotu un fosilā kurināmā enerģijas avotu aizstāšanu [25], [26].

1.3. Saules un vēja elektrostaciju saražotās elektroenerģijas izmantošanas potenciāls vieglo ETL sektorā

Saules enerģijas un ETL uzlādes sinerģijas matemātisko modelēšanu ir veikuši daudzi pētnieki, tomēr vairumā gadījumu modelēšana tika veikta, koncentrējoties uz ekonomisko perspektīvu [66] vai tīkla darbības perspektīvu [28]. Tomēr, vērtējot sinerģijas ietekmes uz vidi aspektus, pētnieki norāda, ka līdzīga uzņēmējdarbības modeļa izmantošana dažādos ģeogrāfiskajos reģionos var radīt ievērojami atšķirīgus rezultātus, piemēram, Eiropas valstīs šādas sinerģijas ietekme var būt lielāka nekā daudzos citos reģionos [67], [68]. Tāpēc, lai iegūtu vislabākos rezultātus, ir jāveic dažādu ETL veicināšanas instrumentu salīdzinājums konkrētai valstij vai reģionam, izmantojot specifiskus parametrus, kas raksturo transporta izmantošanas atšķirības konkrēta valstī, *PV* iekārtu efektivitātes atšķirības, izstrādes īpatnības utt. Šajā pētījumā izmantoti ekonomiskie parametri un tehniskie pieņēmumi, kas raksturo Latviju un tai līdzīgas valstis vai reģionus. Tomēr

jāpievērš uzmanība, ka izstrādāto sistēmdinamikas modeli, mainot atbilstošos tehnisko pieņēmumus un parametrus, var izmantot arī citu valstu vai reģionu analīzei.

Elektroenerģijas tīklos veikto investīciju faktiskās slodzes un struktūras analīze liecina, ka elektromobilitātes ietekme uz tīkla darbības izmaksām, pretēji bažām, daudzos gadījumos var būt pozitīva [28], [112]. ETL var veicināt tīkla efektivitāti gadījumos, ja faktiskā tīkla noslodze ir zema, tāpēc šī pētījuma jautājums ir noteikt ETL iespējamās dinamikas ietekmi uz nepieciešamajiem ieguldījumiem elektroenerģijas tīklos. ETL uzlādes infrastruktūras tehnisko ietekmi uz elektroenerģijas sadales tīklu ir plaši pētījuši daudzi pētnieki [112], [142], [37], [38]; tomēr plaši pētījumi par to, kā ETL skaita pieaugums ietekmēs elektroenerģijas tīkla darbību no to darbības ekonomiskuma viedokļa, ir veikti salīdzinoši nelielā apjomā, turklāt tie daudzos gadījumos ir piemērojami tikai individuāla tīkla ekonomisko rādītāju novērtēšanai. Tikmēr esošie pētījumi, kas koncentrējas uz elektromobilitātes tehniskajiem efektiem, sniedz vairākus svarīgus faktus saistītajai ekonomiskajai analīzei. Piemēram, modelēšanas rezultāti pierāda, ka koordinēta uzlādes jaudu piešķiršanas stratēģija un pietiekami pārvaldīta uzlādes stratēģija var palielināt pieļaujamo teorētisko ETL skaitu sistēmā līdz pat sešām reizēm [27]. Pētījums Vācijā apstiprina, ka ETL uzlādes tehniskā ietekme ir ļoti atkarīga no vietējās topoloģijas un jaudas izmantošanas elektrotīklā [28]. Tādējādi pētījumi apstiprina, ka gadījumos, kad pieejamajām tīkla jaudām ir zems vispārējais izmantošanas līmenis, piemēram, līdz 30 %, ETL uzlādes papildu slodzei ir tāda pati ietekme uz tīkla darbību kā jebkuram citam papildu pieprasījumam pēc elektroenerģijas [29]. Tas nozīmē, ka nepietiekami izmantota tīkla uzlādes gadījumā elektrisko transportu var izmantot kā stratēģiju, lai uzlabotu tīkla vispārējo izmantošanu un veiktu tīkla ekonomisko optimizāciju [30], [31]. Vairāki citi pētījumi parāda arī ciešu saikni starp optimizētu un adaptīvu elektrotransporta uzlādes infrastruktūras attīstības stratēģiju un to potenciālu ietekmi uz vidi saistībā ar enerģijas zudumiem un oglekļa emisijām [32], [33].

Nozares ekspertu aplēses Latvijā liecina, ka ETL attīstība no elektroenerģijas tīkla infrastruktūras attīstības skatpunkta vienlaikus ir saistīta ar divām tendencēm. Pirmā būtiskā tendence saskaņā ar elektroenerģijas tīklu operatoru sniegto novērtējumu ir paredzamo investīciju pieprasījuma pieaugums elektroenerģijas sadales sistēmās, lai nodrošinātu drošu ETL uzlādes punktu pieslēgšanu tīklam un nepieciešamās jaudas

nodrošināšanu tā turpmākai darbībai. Vēl viena svarīga tendence ir izmaiņas kopējā elektrotīklu noslogojumā. Latvijas elektroenerģijas pārvades un sadales sistēmu operatoru sniegtie dati liecina, ka kopējā sistēmas jauda ir ievērojami lielāka par elektroenerģijas sistēmas lietotāju faktisko slodzi un daudzos gadījumos slodzi ir iespējams palielināt pat vairākas reizes [34], [123]. Tāpēc šī izpētes mērķis ir noteikt ETL ietekmi uz elektrotīkla ekonomiskajiem un ekspluatācijas rādītājiem, ņemot vērā faktisko elektrotīkla uzstādīto jaudu un potenciālo ETL pieprasījumu. Analīze ietver elektrotīkla lietotāju izmaksu un ieguvumu novērtējumu, mainoties tīkla jaudas izmantojumam. Tiek novērtēti arī ieguvumi, kas izteikti naudas izteiksmē un ko visai sabiedrībai sniedz novērstās oglekļa emisijas, ko rada fosilās degvielas aizvietošana vieglo transportlīdzekļu sektorā ar ETL.

Aplūkojot līdz šim veiktos pētījumus, var secināt, ka saules enerģijas un elektromobilitātes sinerģijas, integrācijas un potenciālās problēmas no tehniskā viedokļa ir bijušas pētnieku uzmanības centrā, un pētījumi apstiprina, ka elektromobilitātei var būt būtiska pozitīva ietekme uz *PV* saražotās elektroenerģijas īpatsvara veiksmīgu pieaugumu enerģosistēmās. Tā var kalpot arī kā tehnoloģija īstermiņa patēriņa līdzsvarošanai no enerģosistēmas vadības viedokļa, kā arī nodrošināt elektroenerģijas pārpalikuma uzkrāšanos no *PV* [35], [36].

Tajā pašā laikā var secināt, ka pētījumu klāsts, kuros novērtēts elektromobilitātes un saules enerģijas ekonomiskās sinerģijas potenciāls, un to salīdzinājums ar alternatīviem scenārijiem, ir ievērojami mazāks un to rezultāti ir piemērojami lokāli. Šajā darbā tiek aplūkoti Latvijai raksturīgie lokālie parametri un apstākļi, un tie tiek piemēroti Latvijas gadījuma izpētei [106], [108]. Iepriekšējie pētījumi liecina, ka vairāki ekonomiskie parametri, kas raksturo sinerģiju starp *PV* un ETL uzlādes tehnoloģijām, lielā mērā izriet no tā, cik sekmīgi šīs tehnoloģijas tiek tehniski integrētas enerģosistēmā un kāda ir to ietekmes uz elektroenerģijas tīklu sistēmu darbību, un, piemēram, no tehniskā viedokļa pētnieki uzskata, ka gan *PV*, gan ETL uzlādes tehnoloģijas ir savstarpēji papildinošas, bet savā ziņā arī pretrunīgas [37], [38]. Savukārt nepietiekami plānota ETL uzlādes iekārtu ienākšana sistēmā, varētu būtiski ietekmēt sistēmas uzturēšanas izmaksu turpmāku pieaugumu [35]. Vienlaikus elektromobiļu uzlādei ir potenciāls kļūt par tehnoloģiju, kas var pozitīvi ietekmēt arī citu tehnoloģiju *PV* tehnoloģiju veiksmīgu integrāciju elektroenerģijas tirgū, jo elektroenerģijas ražošana no *PV* diennakts griezumā cieši korelē

ar kopējo ekonomisko aktivitāti un enerģijas patēriņu [39]. Stimulējot elektromobiļu īpašniekus uzlādēt transportlīdzekļus periodos, kad elektroenerģijas ražošana no *PV* ražošana ir visaugstākā, ir iespējams samazināt neatbilstību starp elektroenerģijas patēriņu un ražošanu sistēmā [40], un tiek samazināta iespēja, ka būtiska elektroenerģijas pārpalikuma iespaidā elektroenerģijas cenas var sasniegt negatīvu vērtību [39].

1.4. Tehniskās un ekonomiskās perspektīvas smagā transporta dekarbonizācijai ar sintētisko degvielu palīdzību

Nozares eksperti prognozē, ka tālsatiksmes un lieljaudas mobilitātei, tostarp gaisa un kuģu transportam, arī nākotnē vismaz daļēji būs jāpaļaujas uz šķidro degvielu [41]. Sintētiskās degvielas, kas ir ražotas no elektroenerģijas, t. sk., e-petroleja, metanols, dimetilēteri (DME) un amonjaks, var izmantot līdzīgi kā fosilo degvielu gan gaisakuģu reaktīvajos dzinējos, gan mehānisko transportlīdzekļu un kuģu iekšdedzes dzinējos, aizstājot tradicionālo reaktīvo degvielu, benzīnu un dīzeļdegvielu.

Atbilstoši promocijas darba mērķiem tā izstrādes gaitā bija nepieciešams izvērtēt Latvijas lieljaudas un tālsatiksmes transporta nozares (kravas automobiļi, kuģi un gaisa transports) dekarbonizācijas tehnisko iespējamību ar sintētiskajām degvielām, kas ir iegūtas no ūdeņraža, kas iegūts no atjaunojamiem resursiem un CO₂, vērtējot scenāriju, kurā elektroenerģijas ražošanas avoti ir VES un *PV* tehnoloģijas. Lai novērtētu šī tehnoloģiskā risinājuma iespējamību, ir jānosaka cik daudz zaļā ūdeņraža un CO₂ ir nepieciešams, lai aizstātu fosilās degvielas minētajās transporta nozarēs ar sintētiskajām degvielām. Tāpat ir arī jānovērtē, cik lielu daļu no elektroenerģijas pieprasījuma sintētisko degvielu ražošanai var piegādāt no atjaunojamiem energoresursiem, t. i., *PV* un VES enerģijas, ņemot vērā šo tehnoloģiju uzstādītās jaudas un jaudas pārpalikumu, ko var izmantot hidrolīzes procesā sintētisko degvielu ražošanai. Pētījuma rezultātus var izmantot, lai novērtētu nepieciešamos politiskos un tehniskos pasākumus un to iespējamās izmaksas, kas saistītas ar veiksmīgu dekarbonizāciju lielas noslodzes tālsatiksmes transporta nozarē, tostarp enerģētikas nozares pārveidi. Šajā darbā aplūkoti tehnoloģija – oglekļa uztveršanas un izmantošanas (*carbon capture and utilisation; CCU*) tehnoloģija – jau tiek attīstīta [42], un *CCU* tehnoloģijas papildus energoefektivitātes uzlabojumiem un atjaunojamo enerģijas avotu izmantošanai varētu palīdzēt dekarbonizēt mūsu ekonomiku [42]. Pēc tam uztverto CO₂ var savienot ar ūdeņradi, ko iegūst elektrolīzē un ko darbina AER, lai iegūtu no

elektroenerģijas ražotu sintētisko degvielu [43]. Vienlaikus liela CO₂ uztveršanas procesu energointensitāte, kā arī nepieciešamība pēc turpmākas attīrīšanas ir daži no tehniskajiem izaicinājumiem, un augstās izmaksas rada ekonomiskus izaicinājumus [44]. *CCU* tehnoloģiju, tāpat kā citu tehnoloģiju, ieviešanai ļoti svarīgs ir sabiedrības akcepts, un tas ir saistīts ar tehnoloģijas sociālajiem ieguvumiem [44]. Ražošanas izmaksu, proti, elektrolīzes izmaksu un elektroenerģijas, cenas samazināšana ir galvenais faktors, kas padara šo degvielu par konkurētspējīgu [43] sintētisko degvielu. Ļoti liela nozīme ir arī CO₂ emisiju cenai, un, lai *CCU* būtu iespējama, ir jāpasniegt noteikts minimālais cenas līmenis [45]. Tomēr pēdējā laikā var novērot CO₂ emisiju un fosilo enerģijas avotu cenu pieaugumu, tāpēc var un sagaidīt *CCU* tehnoloģiju tālāku attīstību nākotnē. Zaļā ūdeņraža ražošana nodrošina elastīgu patēriņu nepastāvīgas izstrādes atjaunojamiem enerģijas avotiem [46], kā arī augsta enerģijas blīvuma degvielas uzglabāšanas iespējas [47]. Tāpēc ir svarīgi saprast, kādi ir vides un sociālekonomiskie ieguvumi, ko var sniegt no elektroenerģijas ražotas sintētiskās degvielas risinājums. Papildus jāvērtē arī tas, kāda atbalsta politika varētu būt efektīva tehnoloģijas izmantošanas veicināšanai, ņemot vērā to, ka joprojām trūkst pētījumu, kuros tiktu modelēta noteiktu institucionālu atbalsta mehānismu izmantošanas ietekme uz elektroenerģijas ražotas sintētiskās degvielas tehnoloģiju attīstības dinamiku. Šī pētījuma būtisks uzdevums ir noskaidrot, cik nozīmīgs, salīdzinot ar citiem tehniski ekonomiskiem faktoriem, ir atbalsts sintētisko degvielu ražošanas tehnoloģiju, kurās tiek izmantots CO₂ pētniecībai un izstrādei un kāds ir CO₂ emisiju samazināšanas potenciāls transporta nozarē atkarībā no šiem tehniski ekonomiskajiem faktoriem, kā arī kāda ir modelētās sistēmas jutība pret tehniskajiem, ekonomiskajiem un institucionālajiem faktoriem, kas var būt svarīgi sintētisko degvielu ražošanas uzņēmējdarbības modeļa attīstībai.

1.5. Mainīgo elektroenerģijas ražošanas avotu ietekme uz elektroenerģijas tirgus attīstības tendencēm un mijiedarbība ar transporta sektoru




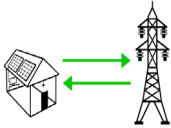
Atjaunojamās enerģija, jo īpaši elektroenerģija, kas ražota ar vēja un saules enerģijas tehnoloģijām, kļūst par arvien nozīmīgāku energoapgādes avotu gan Eiropas valstīs, gan citos pasaules reģionos, un noteiktos periodos vēja enerģija ilgstoši var kļūt par lielāko elektroenerģijas ražošanas avotu Ziemeļvalstu un Baltijas reģionā. Kopumā pastāv vienprātība, ka vēja un saules enerģija, visticamāk, radīs lejuvērstu spiedienu uz

elektroenerģijas cenām [58]. Tomēr elektroenerģijas cenu līmeņa pazemināšanās stipra vēja periodos var apdraudēt stimulus veikt papildu ieguldījumus atjaunojamos enerģijas ražošanas avotos [48], [49]. Tādējādi nākotnes elektroenerģijas cenu attīstības prognozēšana saistībā ar vēja un saules enerģijas plašāku izplatību kļūst par arvien svarīgāku uzdevumu, jo nozarē nostiprinās viedoklis par vēja un saules enerģijas plašāku izmantošanu kā neizbēgamu virzienu, kurā enerģētikas nozarei būtu jāattīstās [50]–[52]. Tomēr pašreizējie pētījumi un prognozes nesniedz skaidru atbildi par šādu attīstības tendenci un vēja un saules enerģijas atbalsta politikas ekonomisko ietekmi [50]–[55], savukārt vairākas līdzšinējās publikācijas un analīze [56], [57] galvenokārt balstījās dienas vai mēneša statistikā, savukārt faktiskie “*Nord Pool*” biržas dati skaidri parāda, ka cenu un ražošanas svārstības ir daudz nozīmīgākas stundas griezumā. Intensīvu pētniecības darbu par vēja enerģijas ražošanas ietekmi uz enerģijas tirgu uzvedību jau vairāk nekā 10 gadus veic vairāki pētnieki, un vairākas publikācijas liecina, ka vēja enerģijas ražošanas pieaugumam un tam sekojošam vēja enerģijas īpatsvara pieaugumam kopējā enerģijas bilancē vajadzētu radīt pakāpenisku elektroenerģijas vairumtirdzniecības cenu kritumu [49], [56]–[59]. Zviedrijā veiktais pētījums par laikposmu no 2000. līdz 2016. gadam apstiprināja, ka, palielinoties vēja enerģijas ražošanai par 1 %, elektroenerģijas vairumtirdzniecības cena samazinājās par aptuveni 0,08 % un ilgākā laikposmā šī samazinājuma vērtība var pieaugt līdz aptuveni 0,1 % [60]. Lai gan ir ievērojams skaits publikāciju, kurās analizēta vēja enerģijas ražošanas un vēja elektrostaciju uzstādītās jaudas pieauguma ietekme uz elektroenerģijas vairumtirdzniecības tirgu, daudzos gadījumos pētnieki savu analīzi ir koncentrējuši uz jautājumiem, kas, iespējams, ierobežo to lietojamību ilgtermiņa energosistēmas modelēšanā. Pētījumi par vēja enerģijas ietekmi uz elektroenerģijas tirgus cenām saistībā ar pārrobežu jaudu pieejamību Dānijā un Īrijā liecina, ka augsta vēja enerģijas ražošana apvienojumā ar labu pārrobežu jaudu pieejamību veicina elektroenerģijas cenu samazināšanos un cenu konverģenci starp dažādiem reģioniem [61]–[63]. Tomēr šie rezultāti parāda arī to, ka no vēja enerģijas ražošanas nozares viedokļa elektroenerģijas cenu samazināšanos vairumtirdzniecības tirgū ne vienmēr var uzskatīt par vēlamu tirgus attīstības tendenci, jo tā samazina investoru ekonomisko motivāciju veikt investīcijas jaunos ražošanas aktīvos, kā arī dažos gadījumos nodara zaudējumus tirgus dalībniekiem. Pētījums nesniedz arī pietiekamus datus, lai

novērtētu korelāciju starp vēja enerģijas ražošanu un cenām tirgos ar ļoti augstu ekonomiskās un tehniskās integrācijas pakāpi ar kaimiņu teritorijām, piemēram, Baltijas valstīs, Dānijā, Norvēģijā, Zviedrijā un Vācijā. Vienlaikus vairāki autori atzīst, ka gadījumā, ja prognozes par vēja un saules enerģijas ietekmi uz elektroenerģijas cenām piepildīsies, nozares ekspertiem būs jāapsver jaunu tirgus mehānismu ieviešana, lai ilgtermiņā saglabātu elektroenerģijas ražotāju ekonomisko ilgtspēju, piemēram, ar jaudas maksājumu palīdzību [48], [64], [65]. Tādēļ promocijas darba viens no uzdevumiem ir izpētīt un analizēt faktisko korelāciju starp vēja elektroenerģijas ražošanu un tās īpatsvaru faktiskajā elektroenerģijas pieprasījumā ar elektroenerģijas vairumtirdzniecības cenām Baltijas valstīs un atsevišķās Ziemeļvalstīs 2019. gadā. Iegūtos korelācijas datus var izmantot, lai sagatavotu turpmākās metodoloģiskās pieejas energosistēmu modelēšanā, īpaši ilgtermiņa modelēšanā 20 gadu vai ilgākam periodam, turklāt elektroenerģijas cenas būtiski ietekmē elektrotransporta lietošanu un sintētisko degvielu ražošanas izmaksas un izmaksu prognozējamību ilgtermiņā. Pētījuma papildu rezultāts ir sniegtā iespēja noteikt, vai tādu vairumtirdzniecības tirgu kā “*Nord Pool*” esošie darbības principi ir pietiekami elastīgi, lai tos varētu pielāgot arī tādu elektroenerģijas ražošanas, neapdraudot stimulus veikt papildu ieguldījumus atjaunojamās enerģijas ražošanas avotos.

2. PĒTĪJUMA METODOLOĢIJA

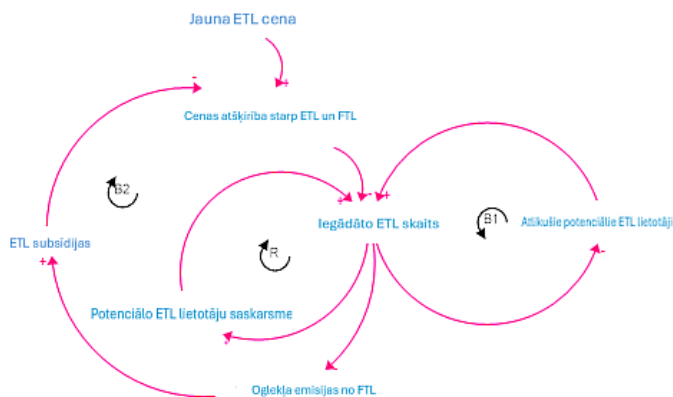
Promocijas darba uzdevumu izpildei tiek izmantotas četras dažādas metodes, kas redzamas 2. attēlā. Vairāku metožu lietojums ļauj piemērot teorijā balstītu integrētu metodoloģiju, lai novērtētu šo promocijas darbā aplūkoto transporta klimata neitralitātes veicināšanas pasākumu ieviešanas iespējas, kā arī ekonomisko un tehnisko pamatotību. Lietotās metodes, ilustrējot ar katru no tām sasniedzamos pētniecības uzdevumus un sasniedzamos rezultātus, redzamas 2. attēlā.

<p>Transporta un enerģētikas sistēmas modelēšana ar energosistēmu imitācijas modelēšanas rīku “EnergyPlan”</p> 	<p>Sistēmdinamikas analīze ar modelēšanas rīku “Stella Architect”</p> 	<p>Statistiskā un ekonomiskā izmaksu-ieguvumu analīze</p> 	<p>Tehniski ekonomiskā analīze</p> 
<p>AER elektroenerģijas un transporta sektora mijiedarbības un izmaksu un radīto emisiju analīze, ņemot vērā sezonālās svārstības, infrastruktūras kapacitāti.</p>	<p>Novērtējums par institucionālo aspektu un uzņēmējdarbības ietekmes uz transporta un atjaunojamās enerģijas politikas pasākumu ieviešanas dinamiku, savstarpējām sakarībām un dažādu faktoru nozīmīguma analīze.</p>	<p>AER izstrādes un elektroenerģijas vairumtirdzniecības cenu korelācijas analīze.</p>	<p>Transporta sektora radītā elektroenerģijas patēriņa un uzlādes pakalpojuma attīstības scenāriju ietekme uz tīklu tehnisko un ekonomisko darbību un galalietotāju izmaksām.</p>

2. att. Promocijas darba metodoloģiskā struktūra.

2.1. ETL skaita pieauguma dinamika vieglā autotransporta sektorā atkarībā no tehnoloģiskās attīstības un atbalsta instrumentiem un saistīto CO₂ emisiju izmaiņas

Lai pētītu vieglo pasažieru elektrotransporta attīstību, kā pētījuma metode tika izmantota matemātiskā modelēšana, izmantojot sistēmdinamikas pieeju, t. i., sistēmu modelēšana, to izveidojot kā struktūru, kas sastāv no krājumiem un plūsmām. Sistēmdinamikas modelis tika izveidots “*Stella Architect*” programmā [69]. Modelēšanas laika periods ir no 2021. līdz 2050. gadam ar laika soli (dt) 1/4 no gada, jo mazākā laika konstante modelī ir viens gads. Tika izmantoti statistikas datubāzu, publikāciju un ziņojumu dati. Atsevišķiem datiem, ko nebija iespējams atrast informācijas avotos, tika izmantotas pieņemtās vērtības. Modeļa struktūra ir parādīta cēloņsakarības cilpas diagrammas veidā (*CLD*; 3. att.), kas atspoguļo modeļa galvenos elementus un to savstarpējo saistību. *CLD* ļauj izveidot dinamisku hipotēzi par sistēmas iespējamo uzvedību, savukārt hipotēzi var pārbaudīt tikai kvantitatīvajā modelī, izmantojot krājumus un plūsmas.



3. att. Modeļa cēloņsakarības cilpas diagramma (*CLD*).

Skaidrojums. “+” diagrammā nozīmē, ka cēloņa palielināšanās/samazināšanās izraisa efekta palielināšanos/samazināšanos attiecībā pret stāvokli, kāds citādi būtu bijis, ja visi pārējie faktori paliktu nemainīgi. “-” nozīmē, ka cēloņa palielināšanās/samazināšanās izraisa ietekmes samazināšanos/palielināšanos attiecībā pret stāvokli, kāds citādi būtu bijis, ja visi pārējie faktori paliktu nemainīgi.

ETL kopums, ko atspoguļo krājums "Iegādāto ETL skaits" (4. att.), ir svarīgākais parametrs modelī, kas ietekmē vieglo transportlīdzekļu kopējās CO₂ emisijas. Šo krājumu kontrolē plūsma "Iegādāto ETL skaits" (4. att.). Palielinoties "Iegādāto ETL skaitam", palielinās arī kontaktu biežums starp ETL lietotājiem un potenciālajiem lietotājiem, un informācijas apmaiņas efektu dēļ nākotnē tiek iegādāts vēl vairāk ETL. Šī ir pastiprinošā (pozitīvā) atgriezeniskā saite R (4. att.), kurai būtiskākā ietekme ir ETL krājuma augšanas sākumposmā. Palielinoties "Iegādāto ETL skaitam", "Atlikušo potenciālo elektrisko transportlīdzekļu lietotāju" krājums tiek izsmelts, un "Iegādāto ETL skaita" rādītāja pieauguma ātrums sāk samazināties, kad balansējošā (negatīvā) atgriezeniskā saite B1 kļūst spēcīgāka par pastiprinošo efektu R. "Iegādāto ETL skaitu" spēcīgi ietekmē "Fosilās degvielas un elektrisko transportlīdzekļu cenu starpība" (4. att.). Savukārt cenu starpība ir atkarīga no "Subsīdijas ETL" un "Jaunu ETL cena". "Subsīdijas ETL" ir endogēns parametrs, jo to var ietekmēt parametrs "CO₂ emisijas no fosilās degvielas transportlīdzekļiem". Politisko lēmumu var ietekmēt starpība starp faktiskajām CO₂ emisijām transporta nozarē un CO₂ emisiju mērķi. Jo lielāka plaisa, jo vairāk politiķu ir gatavi piešķirt subsīdijas ETL iegādei, un pretēji. Tā ir līdzsvarojošā atgriezeniskā saite B2, jo palielināts "Iegādāto ETL skaits" samazina "CO₂ emisijas no fosilās degvielas transportlīdzekļiem" un samazina "Subsīdijas elektriskajiem transportlīdzekļiem" (samazinātas politiskās gribas dēļ), kā rezultātā rodas lielāka cenu atšķirība, nekā tas būtu tādā gadījumā, ja nosacījumi ir citi. Lielāka cenu starpība nozīmē "Iegādāto ETL skaita" samazinājumu. Modelī tiek ņemti vērā tikai jaunu ETL pirkumi. "Cenu starpību starp fosilo degvielu un elektriskajiem transportlīdzekļiem" ietekmē arī "Jauna elektriskā transportlīdzekļa cena", kas ir eksogēns parametrs modelī.

Modelis ietver krājumu un plūsmu apakšmodeļus (5. att.) ETL skaita aprēķināšanai, uzlādes iekārtu un *PV* uzstādīšanas dinamikai degvielas uzpildes stacijās, *PV* saražotās enerģijas daļai un no tā izrietošajam CO₂ emisiju samazinājumam. Modelī tiek ņemti vērā arī ekonomiskie faktori, piemēram, subsīdijas ETL iegādei, ieguldījumi ETL uzlādes infrastruktūrā un *PV*, kā arī uzlādes izmaksas.

Iegādāto ETL skaita pieauguma dinamika ir atkarīga gan no kopējā subsīdiju apjoma, kas atspoguļots kā krājums, gan no subsīdijām uz vienu jaunu ETL, kas tiek parādīts kā

parametrs. ETL iegādes samazina subsīdiju fondu, un, kad tas ir izsmelts, krājumā tiek ievadīts jauns daudzums ar piecu gadu intervālu.

Naudas ieplūde subsīdiju fondā ir atkarīga no starpības starp faktiskajām un mērķa CO₂ emisijām, cenu starpības starp ETL un FTL. Cena ir izšķirošs faktors lēmumam par ETL iegādi. Samazinoties jaunā ETL cenai, palielināsies subsīdiju daļa par jaunu ETL, un, nemainoties citiem nosacījumiem, tas palielinās motivāciju iegādāties jaunu ETL. ETL skaits valstī nosaka patērētās elektroenerģijas daudzumu ETL uzlādēšanai, uzlādes infrastruktūras izbūvi degvielas uzpildes stacijās, kā arī PV attīstību.

Atsevišķs modulis (5. att.) tiek izmantots, lai noteiktu ātrumu, kādā ETL uzlādes vienības jāuzstāda degvielas uzpildes stacijās. Tiek ņemts vērā jau esošo degvielas uzpildes staciju skaits un uzlādes infrastruktūra. Tiek pieņemts, ka maksimālais ETL uzlādes vienību skaits degvielas uzpildes stacijās ir sešas, tāpēc tika apsvērta arī uzlādes vienību uzstādīšana ārpus degvielas uzpildes stacijām. Lēmums par ieguldījumiem PV sistēmas uzstādīšanai tiek pieņemts tikai tad, ja pašreizējā neto vērtība šim ieguldījumam ir vienāda vai lielāka par nulli. Tas nozīmē, ka tīkla elektroenerģijas cenai ir jābūt pietiekami augstai, lai radītu nepieciešamo enerģijas izmaksu ietaupījumu naudas plūsmu.

Modeļa galvenais rezultāts ir CO₂ emisiju samazinājums, kas tiek panākts, aizstājot fosilās degvielas transportlīdzekļus ar ETL transportlīdzekļiem. Tiek pieņemts, ka transportlīdzekļu parka kopējais lielums saglabāsies nemainīgs, un pētījumā netika ņemta vērā FTL transportlīdzekļu parka dinamika saistībā ar izmantoto degvielu kombināciju, vecumu un no tā izrietošajām CO₂ emisijām uz km. Netika ņemtas vērā arī izmaiņas elektroenerģijas ražošanas struktūrā attiecībā uz tīkla elektroenerģiju. Tāpēc tika pieņemts, ka CO₂ emisijas faktori FTL un tīkla elektroenerģijai ir nemainīgi.

2.2. Viegļā ETL un dažādu uzlādes infrastruktūras attīstības scenāriju iespējamās ietekmes elektrotīklu darbību novērtējums

Lai novērtētu vieglā ETL un dažādu uzlādes infrastruktūras attīstības scenāriju iespējamo ietekmi uz elektriskās slodzes profilu elektrotīklos un tīklu tehnisko un ekonomisko efektivitāti, pētījumā tika izmantota Latvijas enerģosistēmas modelēšana pa stundām visam 2050. gadam. Kā rīks tika izmantota uzlabotā enerģosistēmu analīzes modelēšanas programmatūra “*EnergyPLAN*”. Galvenā uzmanība tiek pievērsta AER avotu

izmantošanai, aplūkojot scenāriju, kurā AER saražotais elektroenerģijas daudzums varētu pilnībā segt visu ETL nepieciešamo elektroenerģiju. Modeļa funkcionalitāte paredz iespēju analizēt iekļaut elektroenerģiju, kas ražota, izmantojot vēja, saules enerģiju un hidroenerģiju. Transporta nozares sadaļā ir iespējams modelēt transporta nozares ietekmi uz kopējo valsts elektrotīklu. Attiecībā uz 2050. gadu pētījums apskata scenāriju, kas paredz pilnībā pārtraukt fosilo degvielu izmantošanu un autoparku, kas sastāv tikai no ETL. Šis pieņēmums ir būtisks, lai ar rīka palīdzību būtu iespējam noteikt prognozējamo maksimālo elektrisko slodzi.

Atbilstoši prognozei 2050. gadā vieglo transportlīdzekļu skaits Latvijā jau varētu pārsniegt 1,1 miljonu. Lai iegūtu ETL kopējo elektroenerģijas patēriņu 2050. gadā, svarīgi noteikt kopējo ETL lietotāju skaitu (EV_n), (kopējais transportlīdzekļu skaits 2050. gadā no 6. att.), auto vidējo nobraukumu (am , (13 000 km [82])) un vidējo elektroenerģijas patēriņu, kas noteikts kā 199 Wh/km (aw) [83]. Aprēķins tiek veikts, reizinot trīs iepriekš minētos parametrus un izmantojot zemāk esošo vienādojumu (Vien. 1.):

$$tec = evn \cdot am \cdot aw, \quad (1.)$$

kur

am vidējais automašīnu nobraukums, km/(gab x gadā);

aw vidējais ETL elektroenerģijas patēriņš, Wh/km;

tec kopējais elektroenerģijas patēriņš, kas saistīts ar elektromobiļiem, Wh/gadā.

Pētījuma gaitā tika izstrādāti arī koeficienti, kas ļauj atspoguļot dažādu ETL uzlādes pakalpojuma izmantošanas paradumu ietekmi uz elektroenerģijas sistēmas darbību, prognozējot patēriņa slodzi atkarībā no tā, kāda tipa uzlāde (pēc tās ātruma) tiek izmantota ETL patēriņa nodrošināšanai. Koeficientu vērtības ir balstītas reālos datos, kas raksturo ETL lietotāju paradumus uzlādēt savus transportlīdzekļus noteiktā laika periodā, tādējādi koeficientu vērtības iegūstot ik stundu, gadu, [85], kur īpašas koeficientu vērtības tika izveidotas, iegūstot elektroenerģijas skaitītāju datus no vairākiem uzlādes punktiem (t. sk. mājāsaimniecībām), kā arī aprakstot ETL lietotāju uzlādes staciju lietošanas paradumus.

Šim pētījumam ievades datu koeficienti tiks summēti no izmantošanas koeficientiem, kas iepriekš minētajā darbā tika sadalīti pa mājas, publiskajiem un ātrās uzlādes veidiem. Lai varētu noteikt maksimālo iespējamo kopējo koeficientu starp šiem trim koeficientu veidiem, ir jāparedz procentuālais atbalsts, pēc kura var noteikt katra veida ETL uzlādes stacijas proporciju. Tomēr procenti norādīti kā fiksēts lielums visa gada garumā, un atšķirībā no stundas koeficientiem tie nemainīsies. Iegūtie rezultāti uzskatāmi atspoguļo arī ETL uzlādes kopējo ietekmi uz energosistēmas darbību Latvijā. Tie ņem vērā pieejamos datus par to, kāds ir elektroenerģijas patēriņš mājas ETL uzlādēm, publiskajai lēnajai ETL uzlādei un ātrajai uzlādei.

Vērtējot iespēju nodrošināt transporta sektora radīto energoresursu pieprasījumu, tika ņemtas vērā arī modelēšanas prognozes par paredzamo atjaunojamo energoresursu ražošanas jaudu attīstību (galvenokārt VES un *PV*) elektroenerģijas sektorā. Lai izstrādātu prognozes, tika ņemts vērā kopējais atjaunojamo energoresursu jaudu attīstības potenciāls, ko pamato sistēmas operatora novērtējums par *PV* un VES faktisko potenciālu Latvijas teritorijā, elektropārvades infrastruktūras iespējas. Prognozēs ņemti vērā arī ražošanas projektu un infrastruktūras attīstībai nepieciešamie termiņi, kā arī paredzamo pārrobežu infrastruktūras attīstībai nepieciešamais laiks.

Energosistēmas simulācijā tika pārbaudīts arī scenārijs, kurā 2050. gadā Latvijas elektroenerģijas pieprasījums tiek segts tikai ar atjaunīgu enerģiju, kā primāros avotus izmantojot VES, *PV* un hidroelektrostaciju ražoto elektroenerģiju.

Pētījuma gaitā aplūkoti vairāki iespējamie uzlādes infrastruktūras attīstības scenāriji un to mijiedarbība ar energoapgādes bilanci.

Scenārijs ar prioritāro mājas “70-5-25” uzlādes profilu. Kopējie koeficienti ir aprēķināti un saistīti ar pirmo modelēto scenāriju 2050. gadam, kurā mājokļa uzlāde tiek noteikta par prioritāti un svāri atbilst mūsdienām (2021). Tas nozīmē 70 % svaru mājas uzlādei, 5 % svaru publiskai un 25 % svaru ātrās uzlādes iespējai.

Scenārijs ar prioritāru ātrās uzlādes profilu “35-10-55”. Otrajā scenārijā 2050. gadam tiek izskatīta ātrās uzlādes staciju prioritāte un tās ietekme uz kopējo elektrotīklu. Šajā scenārijā svaru izvēle balstās pieņēmumos, ka nākotnē, pieaugot ETL lietotāju skaitam, pie daudzdzīvokļu mājām trūks uzlādes staciju. Tas nozīmētu, ka vairāk

lietotāju meklētu iespējas izmantot ātrās uzlādes stacijas. Svārs tiek piešķirts atbilstoši – 35 % mājas uzlādei, 10 % publiskai un 55 % ātrās uzlādes stacijām.

Aplūkojot ar ETL uzlādi saistīto ietekmi uz elektrotīkla maksimuma slodzēm scenārijā, kas paredz lielāku ātrās uzlādes prioritāti, ir secināms, ka uzlādes scenārija izmaiņām ir identificējama ietekme uz patēriņa slodzēm pa stundām, tomēr maksimumslodžu stundās nav vērojamas nozīmīgas atšķirības. Savukārt, aplūkojot scenārija ietekmi uz energosistēmas darbību nedēļas griezumā, secināms, ka izmaiņas, salīdzinot ar iepriekšējo scenāriju, vērojamas maksimumslodžu stundās. Ja mājas uzlādei šīs maksimālā patēriņa slodzes stundas bija daudz izteiktākas, tad ātrai uzlādei tās ir vienmērīgākas. Analizētās nedēļas vidū attēls neuzrāda nebija izteiktu maksimumu, un viss dienas periods turpinājās ar vienādu pieprasījumu.

Lai salīdzinātu abu scenāriju uzlādes slodzes variācijas un to ietekmi uz elektrotīklu, tika modelēti slodzes grafiki katrai gada sezonai, un secināms, ka abu scenāriju līkņu veids ziemas mēnešos ir relatīvi līdzīgs. Mājas “70-5-25” uzlādes scenārijam ir lielākas virsotnes vakara stundās, taču kopējie maksimumi abiem grafikiem ir līdzīgi. Ātrās uzlādes scenārijs “35-10-55” atstāj lielāku ietekmi uz dienas stundām. Lai gan visas vērtības ir līdzīgas, scenārijā, kas paredz lielāku mājas uzlādes īpatsvaru, tiek novēroti lielāki jaudas maksimumi. To var redzēt arī pēc gada maksimālās jaudas pieprasījuma vērtības. Šī vērtība ir gandrīz par 200 MW augstāka scenārijā, kas paredz lielāku mājas uzlādes īpatsvaru, un tas nozīmē, ka elektroenerģijas ražošanas tehnoloģijas, kas spēj nodrošināt šādu jaudu, būs nepieciešamas noteiktā stundā.

ETL ietekmes uz tīkla slodzi modelēšana tika veikta, izmantojot Latvijas datus par kopējo elektroenerģijas pieprasījumu vajadzībām, kas nav saistītas ar elektromobilitāti, kā arī kopējo tīkla uzstādīto jaudu. Šajā pētījuma daļā tika izdarīti vairāki pieņēmumi par ETL un no fosilā kurināmā iegūtu pasažieru transportlīdzekļu raksturlielumiem, kā arī īpatnējām CO₂ emisijām un izmaksām. Aprēķini veikti, pieņemot, ka ikgadējais investīciju skaits elektroenerģijas sadales sistēmā tiek saglabāts esošajā līmenī. Tas ir balstīts pieņēmumā, ka ETL skaita pieaugums visos gadījumos nav saistīts ar nepieciešamību ieguldīt elektrotīklā. Dažu pētījumu rezultāti liecina, ka, integrējot ETL uzlādes infrastruktūru tīklā, tīkla operatoriem ir plašs iespēju klāsts tīkla slodzes optimizācijai. Tādējādi tīklos plānoto

ieguldījumu apjoms būtu jāuzskata par lēmumu, kas galvenokārt ir saistīts ar tīkla vispārējo ieguldījumu un regulatīvo politiku vai pat politiskiem lēmumiem, nevis par parametru, kas ir tieši saistīts ar patērētāju pieprasījumu. Tomēr modelis ietver arī iespēju salīdzināt scenārijus ar papildu ieguldījumiem tīklā. Veiktā analīze palīdz novērtēt, kā ETL attīstība var uzlabot esošās elektrotīkla infrastruktūras ekonomiskos rādītājus. To var izmantot arī tāpēc, lai modelētu alternatīvu attīstības scenāriju rezultātus ar tādiem mainīgiem parametriem kā papildu investīcijas tīklā, elektroenerģijas tarifu struktūras izmaiņas vai tarifa izmaiņas.

Pētījumi par ETL uzlādes infrastruktūras attīstību līdz šim liecina, ka būtiska ietekme uz pieprasījumu pēc dažāda veida ETL uzlādes iekārtām var attīstīties vairākos iespējamajos scenārijos, no kuriem katram ir raksturīga atšķirīga potenciālā ietekme uz tīkla slodzi, kā arī lietotāju uzvedību. Ir konstatēts, ka ETL lietotāji parasti dod priekšroku uzlādei mājāsaimniecībā (aptuveni 50 % līdz 80 % gadījumu), kā arī darbavietās (no 15 % līdz 25 % gadījumu) un tikai aptuveni 10 % uzlādes notiek sabiedriskās, publiski pieejamās uzlādes vietās [94]. Jāatzīmē, ka atšķirībā no daudziem citiem sabiedrības enerģijas patēriņa paradumiem elektromobilitātei nav vienas kopīgas un izteiktas patēriņa tendences, kas precīzi atspoguļotu tās ietekmi uz tīkla veiktspēju.

No elektromobilitātes pētījuma var secināt, ka elektriskās uzlādes staciju vispārējā plānošana parasti ir optimizēta, kas nodrošina uzlādes pakalpojuma pieejamību atkarībā no reģiona mobilitātes paradumiem (piemēram, vidējais pārvietošanās attālums, mobilitāte pilsētā vai ārpus pilsētas). Optimizēta plānošana ievērojami samazina ETL kopējo uzlādes blīvumu noteiktā apgabalā, kā arī šo uzlādes staciju nepieciešamo elektrisko jaudu [107]. Pētījumu rezultāti liecina, ka gan nepieciešamība pēc īpaša uzlādes staciju blīvuma konkrētā teritorijā, gan no tā izrietošā ietekme uz tīklu lielā mērā ir atkarīga no iedzīvotāju blīvuma, kā arī no esošā tīkla tehniskajām īpašībām un stāvokļa. Tīkla jaudas novērtējums liecina, ka Latvijas elektrotīkls potenciāli spēj nodrošināt teorētisko pieprasījuma slodzi, kas pārsniedz esošo slodzi pat četras reizes. Pētījumi arī liecina, ka kopējais ETL uzlādes vienlaicības koeficients būtiski neatšķiras no kopējā faktora citiem patēriņa veidiem, jo katru dienu tiek izmantoti tikai aptuveni 78 % transporta, un vienlaicības koeficients ETL uzlādei sasniedz tikai aptuveni 50 % ekstremālākajos scenārijos [112]. Novērtējums apstiprināja, ka tīkla kopējā jauda joprojām ir pietiekama, lai nodrošinātu visu reģistrēto

un aktīvi izmantoto transportlīdzekļu (tostarp kravas automobiļu un pasažieru autobusu) pilnīgu nomaiņu Latvijā, kas atbilst aptuveni 1 miljonam transportlīdzekļu.

Pētījumā, kurā vērtēta elektrotransporta lietošanas ietekme uz tīkla pakalpojumu izmaksām un kopējiem izdevumiem par mobilitāti individuāla lietotāja līmenī, modelēšana tika veikta, izmantojot spēkā esošos publiskos sadales tarifus, publiski pieejamās elektroenerģijas un degvielas cenas, kā arī publiski pieejamo informāciju par konkrētu auto modeļu cenām. Modelēšana tika veikta, izmantojot modeli, kas izveidots programmā *Microsoft Excel*, un, pamatojoties uz formulām, kurās tika ņemti vērā šādi lielumi: mainīgās un fiksētās izmaksas saistībā ar tīkla pakalpojumiem, to svārstības atbilstoši dažādiem scenārijiem; izmaksas, kas saistītas ar enerģijas piegādi (dīzeļdegvielas vai elektrības veidā); izmaksas par elektroenerģijas izmantošanu mērķiem, kas nav saistītas ar mobilitāti. Analīze veikta katram scenārijam, kas aprakstīts tālāk pētījumā.

Vairāki pieņēmumi par ekonomiskajiem faktoriem parametriem un ar tiem saistīto ietekmi tika izdarīti vai iegūti no nozares statistikas, un tas ir balstīts scenārijā, ka ETL uzlāde pieņemtajām mobilitātes vajadzībām tiek nodrošināta ar mājsaimniecības elektroenerģijas pieslēgumu. Ir pamats uzskatīt, ka saules enerģijas ražošanas iekārtu un ETL uzlādes tehnoloģiju ekonomiskās sinerģijas efekts Latvijas apstākļos primāri ir svarīgs scenārijam, kurā gan saules enerģijas ražošanas iekārtas, gan ETL uzlādes iekārtas pieder lietotājam un tiek pieslēgtas publiskajam tīklam ar vienu pieslēgumu. Lai novērtētu sinerģiju ekonomisko ietekmi, ir lietderīgi salīdzināt ekonomiskos ieguvumus un izmaksas lietotājam vairāku alternatīvu scenāriju kontekstā (1. tab.).

1. tabula

Modelēšanā izmantotie lietotāja mobilitātes un energoapgādes scenāriji

	1. scenārijs		2. scenārijs	3. scenārijs	4. scenārijs
Elektroapgāde no tīkla	Izmanto		Izmanto	Izmanto	Izmanto
Elektroapgāde no PV	Neizmanto		Neizmanto	Izmanto	Izmanto
ETL	Neizmanto		Izmanto	Neizmanto	Izmanto

1. tabulas turpinājums

Iekšdedzes transportlīdzeklis	Izmanto		Neizmanto	Izmanto	Neizmanto
------------------------------------------	---------	--	-----------	---------	-----------

Lai nodrošinātu pēc iespējas pilnīgāku saules un ETL uzlādes sinerģijas scenārija salīdzinājumu ar dažādiem alternatīviem ekonomikas scenārijiem, tika veikts galaizmaksu uz vienu enerģijas vienību (kWh) kopējam enerģijas patēriņam un enerģijas patēriņa galaizmaksu salīdzinājums, ņemot vērā gan enerģijas patēriņu transporta vajadzībām, gan citām vajadzībām. Šāds salīdzinājums būtu pamatots ar to, ka atbilstoši Latvijas elektroenerģijas sadales tarifu struktūrai elektroenerģijas patēriņa izmaksas galalietotājam papildus dažādiem enerģijas izmantošanas scenārijiem ietekmē ne tikai patērētā elektroenerģija, bet arī virkne citu faktoru, piemēram, pieslēguma slodzes efektivitāte un intensitāte, attiecināmās nodokļu likmes, kā arī lietotāja ieradumi [113], [114].

2.3. Smagā transporta elektrifikācijas ar sintētisko degvielu palīdzību modelēšana, ņemot vērā AER jaudu attīstību un ietekmi uz tīklu

Pētījuma gaitā ir secināts, ka vieglā pasažieru transporta dekarbonizācija, pārejot uz ETL, ir ekonomiski pamatota un arī tehniski iespējama, tomēr kravas transporta elektrifikāciju būtiski ierobežo fakts, ka kravas auto lietošanas intensitāte kopumā ir ievērojami augstāka nekā vieglajam transportam. Šajā pētījumā kā ticamākais scenārijs tika izvērtēts scenārijs, kas paredz smagā transporta dekarbonizāciju ar sintētisko degvielu, kas ražota, izmantojot elektroenerģiju. Šajā pētījumā, kura mērķis ir noteikt tehniskās perspektīvas smagā transporta dekarbonizācijai ar sintētiskajām degvielām, tika veikta Latvijas energosistēmas modelēšana, izmantojot rīku “*EnergyPlan*” [18], ņemot vērā arī paredzamo atjaunojamās elektroenerģijas ražošanas jaudu attīstību. Modeļa piemērošana Latvijai balstījās pārvades sistēmas operatora un citu par enerģētikas nozari atbildīgo institūciju sniegtajās attīstības prognozēs. Lai pamatotu modeļa izmantošanu, tika veikta tā validācija, kas ietvēra Latvijas energosistēmas ekonomisko un energobilances modelēšanu 2017. gadam un iegūto rezultātu ar faktiskajiem šī gada rādītājiem salīdzinājumu. Modeļa ievade bija tādi sistēmas parametri kā dažādu enerģijas avotu jauda, ražošana un ieguldījums. Šos parametrus atsevišķi piemēro konkrētiem, iepriekš definētiem scenārijiem, kas atspoguļo konkrētu ieguldījumu lēmumu un politikas

pasākumu ietekmi. Lai novērtētu Latvijas enerģosistēmas attīstības perspektīvas un noteiktu paredzamo AER elektroenerģijas ražošanas jaudu attīstību, kā arī to ietekmi uz oglekļa emisiju samazinājumu, tika izmantoti pieci dažādi scenāriji. Detalizēts parametru apraksts katram scenārijam sniegts 2. tabulā, paredzot, ka vēja enerģijas jaudas ierobežojums aptuveni 1200 MW apmērā tiek noteikts atbilstoši esošajai augstsprieguma tīkla jaudai un energoresursu pieejamībai vēja enerģijas balansēšanai

2. tabula

Galvenie ievades parametri un pieņēmumi modelētiem scenārijiem

Ievades parametri scenārijiem un pieņemtās vērtības	Ierastās darbības scenārijs	AER scenārijs	Energoefektīvi tātes scenārijs	Kombinētais scenārijs	Elastības scenārijs
1. Elektroenerģijas patēriņš gadā (TWh)	13,85	13,85	9,87	9,87	16,46
2. Uzstādītās PV jaudas (MW)	41	300	41	300	129
3. Uzstādītās VES jaudas (MW)	678	1200	678	1200	978
4. Vidējais siltumenerģijas patēriņš (KWh/m ²)	95	95	43	43	95
5. ETL skaits (tūkst.)	300	350	350	350	550
6. Vidējais investīciju apjoms mājokļu renovācijai (EUR/m ²)	70	100	200	200	100

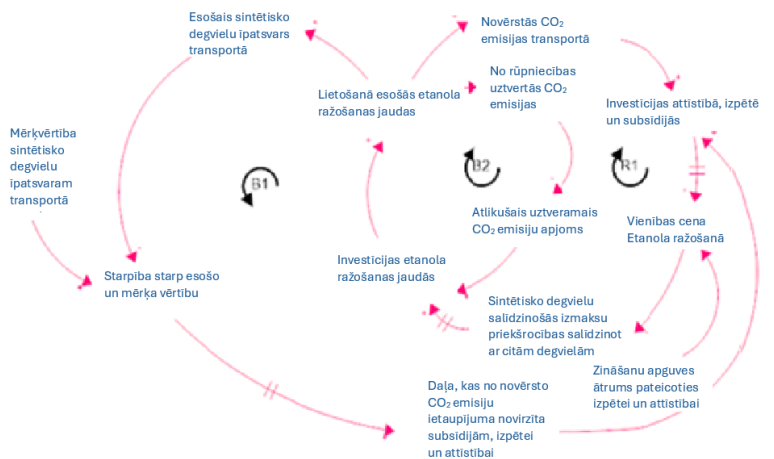
Scenāriju modelēšanas rezultātu analīze apliecināja, ka kopumā gan no tehniskā, gan ekonomisko apsvērumu viedokļa Latvijas elektroapgāde ar atjaunojamiem energoresursiem ir tehnoloģiski un ekonomiski principiāli iespējama un to apjoms ir pietiekams, lai nodrošinātu arī transporta sektora iespējamo pieprasījumu. Ņemot to vērā,

papildus tika turpināta papildu scenāriju modelēšana un analīze, lai tajā ņemtu vērā arī transporta sektora iespējamo ietekmi uz energoapgādes sistēmas darbību, papildinot arī ar atjauninātiem datiem un veicot modelēšanu, pamatojoties uz jaunākiem pieejamiem datiem. Nākotnes scenāriju modelēšana 2050. gadam noteica nepieciešamās vēja turbīnu jaudas, lai apmierinātu enerģijas pieprasījumu ūdeņraža un tālāk sintētisko degvielu ražošanai, kas apmierina kravas automašīnu, kuģu un gaisa transportlīdzekļu pieprasījumu. Tika izveidots un validēts esošās sistēmas modelis, kas balstīts Latvijas energoresursu bilancē 2021. gadam. Pēc tam šis modelis tika izmantots, lai izveidotu trīs nākotnes scenārijus.

Vērtējot **sintētiskās degvielas pieprasījumu**, pētījumā ņemts vērā, ka 2019. gadā Latvijā reģistrēti gandrīz 830 tūkstoši sauszemes transportlīdzekļu, no kuriem aptuveni 12 % bija lieljaudas kravas automašīnas [119]. Lai gan transportlīdzekļu skaits katru gadu palielinās, kopējais lieljaudas kravas automašīnu īpatsvars joprojām ir aptuveni 12 %. Lai prognozētu lieljaudas kravas automašīnu skaitu nākotnē, tika izmantota statistika no 2010. līdz 2019. gadam [119], un nākotnes prognozes tika veiktas ar lineāru tendenci. Dati par jūras un gaisa transportlīdzekļu degvielas patēriņu tika iegūti no enerģijas bilances [120]. Tomēr tika ņemts vērā, ka lieljaudas kravas automašīnu degvielas patēriņš enerģijas bilancē nav atdalīts no sauszemes pasažieru transportlīdzekļiem, tāpēc datu ieguvei tika veikti papildu aprēķini. Avoti [121], [122] tika izmantoti, lai noskaidrotu vieglo transportlīdzekļu skaitu, viena transportlīdzekļa vidējo gada nobraukumu kilometros un vidējo degvielas patēriņu uz 100 km pasažieru un kravas transportlīdzekļiem atsevišķi. Izmantojot Latvijas elektropārvades tīkla operatora prognozes [123], tika veikta arī prognoze par elektroenerģijas patēriņu, elektrostaciju jaudām un pārrobežu pārvades tīklu jaudām 2050. gadam. Lai pilnībā dekarbonizētu lielas noslodzes un tālsatiksmes transportlīdzekļu nozares, 8,2 TWh fosilā kurināmā ir jāaizstāj ar sintētiskajām degvielām. Bet, lai varētu ražot šo sintētisko degvielu apjomu laikā, kad ir atjaunojamās elektroenerģijas pārpalikums, nevis laikā, kad transporta nozare to pieprasa, ir jāizveido degvielas uzglabāšanas tvertnes. Aprēķini liecina, ka, lai saražotu 8,2 TWh sintētisko degvielu, kopā ir vajadzīgas 10,64 TWh ūdeņraža – 6,02 TWh DME, 4,59 TWh e-petroļejai un 0,03 TWh amonjakam.

Lai vērtētu sintētiskās degvielas tehnoloģiju īstenošanas dinamiku

uzņēmējdarbības un institucionālos aspektu, modeļa aprobācijai, izmantojot etanolu, tika izmantota sistēmdinamikas modelēšana. Modelis tika veidots un ir aprobēts sintētiskās degvielas etanola ražošanai, tomēr tas ir piemērojams arī citām sintētisko degvielu ražošanas tehnoloģijām. Svarīga atgriezeniskā saite ir saite starp novērstajām CO₂ emisijām un sintētisko degvielu īpatsvaru transporta nozarē uz ieguldījumiem etanola ražošanas jaudā.



4. att. Modeļa cēloņsakarības cilpas diagramma (CLD).

(R&D – pētniecība un attīstība; RE – atjaunojamā enerģija; R1 – pastiprinošā jeb pozitīvā cilpa Nr. 1; B1 – balansējošā jeb negatīvā cilpa Nr. 1; B2 – balansējošā jeb negatīvā cilpa Nr. 2). “+” nozīmē, ka cēloņa palielināšanās/samazināšanās rezultātā palielinās/samazinās efekts attiecībā pret to, kas citādi būtu bijis, ja viss pārējais paliktu nemainīgs. “-” nozīmē, ka cēloņa palielināšanās/samazināšanās izraisa ietekmes samazināšanos/palielināšanos attiecībā pret to, kas citādi būtu bijis, ja viss pārējais paliktu nemainīgs. Divas vertikālas līnijas uz bultiņām norāda, ka laika sprādis starp cēloni un sekām var būt salīdzinoši garš.

Atgriezenisko saiti ietekmē starpība starp sintētisko degvielu faktisko īpatsvaru transportā un sasniedzamo mērķa vērtību. Modelēšanas galvenais mērķis ir izstrādāt modeli, ko var piemērot tālākiem pētījumiem, izmantojot dažādus iespējamus attīstības scenārijus [131], kas ļauj salīdzināt dažādu politikas pasākumu paredzamo aptuveno ietekmi, nevis sniedz precīzas prognozes. Modeļa mērķis ir atbalstīt izziņas procesu,

scenāriju analīzi, ekspertu grupu mijiedarbību, politikas izstrādi un sistēmas, kuru mērķis ir sniegt datus problēmu risināšanai. Modelis tika izveidots, izmantojot ekspertu grupu darbseminārus, un tas ir integrēts interaktīvā simulatorā, ko var izmantot politikas scenāriju testēšanai. Etanols tika izvēlēts par CO₂ hidrogenēšanas galaproduktu, jo to plaši izmanto transportā [132]. Pētījumā aplūkotā etanola termokīmiskā sintēze no CO₂, izmantojot dimetilētera (DME) sintēzi, tika izvēlēta salīdzinoši augstās kopējās energoefektivitātes un CO₂ konversijas pakāpes dēļ [43]. Pētījumā izvēlēta CO₂ uztveršanas tehnoloģija bija ķīmiskā absorbcija ar amīna attīrīšanu skruberī. Šī tehnoloģija pētījumā tika izvēlēta, ņemot vērā tās augsto tehnoloģiskās gatavības līmeni [43]. Sārmainā elektrolīze tika izvēlēta par H₂ ražošanas tehnoloģiju, ņemot vērā tehnoloģijas briedumu liela apjoma ūdeņraža ražošanai [43] un labu energoefektivitāti [133]. Kapitālieguldījumi etanola ražošanas jaudā var būt ievērojami pārvērtēti, salīdzinot ar [47] avotā izmantotajiem datiem, tomēr ieguldījumi ir atkarīgi no rūpnīcas lieluma, ģeogrāfiskās atrašanās vietas, pieejamās infrastruktūras, būvniecības gada utt. Modeļa struktūra ir parādīta cēloņsakarības cilpas diagrammas (CLD) veidā, kas atspoguļo modeļa galvenos elementus un to savstarpējo saistību. CLD ļauj izveidot dinamisku hipotēzi par sistēmas uzvedību, savukārt hipotēzi var pārbaudīt tikai kvantitatīvā modelī, izmantojot krājumus un plūsmas.

Etanola ražošanas jauda ir galvenais krājums modelī, jo tikai reāli ieguldījumi fiziskajos ražošanas aktīvos var rezultēties atjaunojamo energoresursu izmantošanā. Etanola ražošanas jaudā ieguldījumi tiek veikti, ja etanola vienības ražošanas izmaksas ir konkurētspējīgas ar alternatīvās biodegvielas ražošanas vienības izmaksām. Kapitālieguldījumu daļu etanola ražošanas jaudā nosaka, salīdzinot etanola vienības ražošanas izmaksas ar alternatīvās biodegvielas vienības ražošanas izmaksām LOGIT funkcijā.

Sabiedrība var nolemt atbalstīt sintētisko degvielu tehnoloģiju attīstību, finansējot pētniecību un attīstību, kā arī subsidējot etanola ražošanu. Pētniecības, attīstības un subsīdiju finansējuma avots varētu būt ienākumi, ko var gūt, samazinot CO₂ emisijas transporta nozarē, tad, ja fosilais kurināmais tiek aizstāts ar etanolu. Finansējuma avots varētu būt CO₂ emisijas kvotas, ko varētu pārdot, vai finansējums, kas nav iztērēts emisiju kvotu iegādei. Pētniecības un attīstības finansējums un subsīdijas padara etanolu vēl konkurētspējīgāku, kas ļauj palielināt etanola ražošanas jaudas vēl vairāk. Tā rezultātā tiek

novērsts vēl lielāks CO₂ emisiju apjoms, kas savukārt ļauj piešķirt vēl vairāk finansējuma pētniecībai un attīstībai, kā arī subsīdijām. Tādējādi tiek izveidota pastipriņošā cilpa R1. Tas ir modeļa galvenais institucionālais aspekts. Varētu iebilst, ka šo mehānismu būtu grūti vai neiespējami īstenot, jo īpaši, ja transporta nozare nav daļa no emisiju tirdzniecības sistēmas. Tomēr ir iespējams tā vai citādi izteikt novērstās CO₂ emisijas naudas izteiksmē (piemēram, izmantojot ārējo izmaksu pieeju) un nolemt, ka daļa no novērstajām CO₂ emisiju izmaksām tiek ieguldīta pētniecībā un attīstībā vai subsīdijās, kas nākotnē vēl vairāk palielinātu ieguvumus. Tas ir politisks lēmums, kas būtu jāpieņem, un modelis ilustrē šāda politiska lēmuma sekas. Modelī tiek pieņemts, ka lēmums par novērsto CO₂ emisiju daļu, kas tiek izmantota pētniecības, attīstības un subsīdiju finansēšanai (19. att.), pamatojoties uz starpību starp faktisko sistēmas stāvokli un klimata mērķi noteiktā transporta nozarē. Ja starpība starp mērķi un sintētisko degvielu faktisko īpatsvaru transporta nozarē samazinās, var mazināties arī stimuls finansēt pētniecību un attīstību vai subsīdēt etanola ražošanu, un ar zināmu laika nobīdi finansējums tiek samazināts. Tādējādi veidojas balansējošā cilpa B1 (19. att.). Šis līdzsvarujošais efekts, ko rada stimulu samazināšanās, tuvojoties mērķim, ir raksturīga “tiekšanās uz mērķi” sistēmu uzvedībai, t. sk. sistēmām, kas apraksta klimata un enerģētikas politikas īstenošanu. Starpību starp sintētisko degvielu īpatsvaru transportā un īpatsvara mērķi mēra kā attiecību starp faktisko īpatsvaru un mērķi, kas mainās no 0 uz 1 (20. att.). Kad mērķis ir pilnībā sasniegts, attiecība kļūst 1 un finansējums pētniecībai, attīstībai un etanola ražošanas subsīdijām netiek piešķirts. Ja attiecība ir mazāka par 1, finansējums tiek nelineāri palielināts, līdz tas sasniedz 1 (4. att.), proti, viss finansējums, kas ir pieejams no novērstajām CO₂ emisiju izmaksām, tiek piešķirts pētniecībai, attīstībai un subsīdijām etanola ražošanai.

Palielinoties etanola ražošanas jaudai, palielinās arī sintētisko degvielu īpatsvara un mērķa attiecība transportā (pieņemot, ka kopējais degvielas patēriņš transportā nepalielinās), un finansējums, kas ieguldīts pētniecībā, attīstībā un subsīdijās (19. att.) samazinās. Tiek pieņemts, ka sintētisko degvielu mērķis transportā ir 2,6 %, kas atbilst Latvijā apspriestajai 2030. gada vērtībai saistībā ar mērķiem transporta nozarē atbilstoši ES klimata iniciatīvai “Gatavi mērķrādītājam 55 %”. Mērķis var tikt palielināts pēc 2030. gada, taču patlaban nav informācijas par iespējamo vērtību. Turklāt sintētiskās degvielas segs tikai daļu no transporta nozares vajadzībām, jo daļa tiks elektrificēta un,

visticamāk, tiks izmantotas citas degvielas, piemēram, biodegviela, biometāns utt. Ņemot vērā šos apsvērumus, mērķis par sintētisko degvielu īpatsvaru transportā tiek uzskatīts par ārēju (neatkarīgu no modeļa aprēķiniem) parametru modelī.

Tomēr spēja pielāgot mērķi, kad tas tiek sasniegts, ir svarīgs pierādījums institucionālajai spējai noteikt klimata mērķus, tāpēc šo mērķi varētu iekļaut kā iekšēju (atkarīgu no modeļa aprēķiniem) parametru turpmākajos pētījumos. Pētniecībai, attīstībai un subsīdijām piešķirtā finansējuma izmaiņu dinamika ir parādīta kā attiecība starp faktisko piešķirto finansējumu (katrā laika posmā) un piešķirtā finansējuma maksimālo vērtību (19. att.). Sākotnēji finansējums ir neliels, jo etanola ražošanas jauda ir maza un nav uzkrāts finansējums no novērstajām CO₂ emisijām. Pakāpeniski, palielinoties etanola ražošanas jaudai, palielinās arī piešķirtais finansējums, sasniedzot maksimumu tieši tad, kad faktiskā sintētisko degvielu īpatsvara attiecība transportā un mērķis sasniedz 1 (20. att.). Pēc tam piešķirtais finansējums sāk samazināties. Tomēr līdz tam laikam pētniecība un attīstība jau ir padarījusi etanola ražošanas izmaksas konkurētspējīgas ar alternatīvo degvielu, tāpēc etanola ražošanas jauda turpina palielināties, sasniedzot robežvērtību, kad CO₂ daudzums, kas uztverts rūpnieciskos procesos, sasniedz maksimālo robežu. No šī rezultāta var secināt, ka līdzsvarojošais efekts B1 nav galvenā izaugsmes robeža un galvenā balansējošā cilpa varētu būt B2, t. i., izejviela etanola ražošanai. Jāatzīmē, ka modelī tiek pieņemts, ka 50 % no kopējā finansējuma, kas piešķirts pētniecībai un attīstībai, un tāda pati daļa etanola ražošanas subsīdijām vienības ražošanas izmaksu samazināšanai.

Mācīšanās ātruma izmantošanas koncepcija ir aizgūta no enerģētikas jomas, kur to izmanto, lai raksturotu īpatnējo kapitālieguldījumu samazināšanos dažādu enerģijas ražošanas jaudās, dubultojot globālo uzstādīto jaudu [138]. Mācīšanās ātrums tiek uzskatīts par ārēju parametru modelī. Analizētajā sistēmā var identificēt vēl vienu līdzsvaršanas efektu. Proti, palielinoties etanola ražošanas jaudai (19. att.), palielinās arī CO₂ emisiju apjoms, kas tiek uztverts no rūpniecības. Palielinoties uztverto CO₂ emisiju apjomam, samazinās CO₂ emisiju uztveršanas potenciāls nākotnē, jo CO₂ emisiju daudzums, ko ir praktiski uztvert no rūpnieciskiem procesiem, ir ierobežots. Tuvojoties šai robežai, no šiem procesiem var uztvert arvien mazāk un mazāk, jo atlikušo emisiju uztveršana kļūst pārāk dārga vai tehniski sarežģīta. Samazinoties CO₂ uztveršanas potenciālam, samazinās arī investīcijas jaunā etanola ražošanas jaudā.

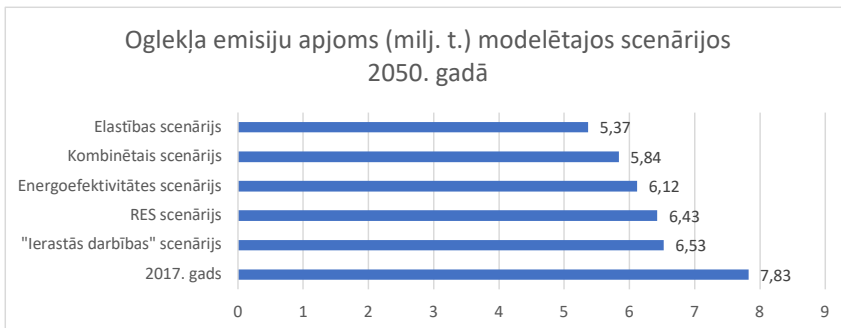
2.4. AER ietekmes uz elektroenerģijas tirgu un mijiedarbības ar transporta sektoru modelēšana

Analīze par mainīgo elektroenerģijas ražošanas avotu ietekmi uz elektroenerģijas tirgus attīstības tendencēm balstīta 2019. gada faktisko cenu un elektroenerģijas izstrādes datu statistiskajā analīzē, tostarp “*Nord Pool*” enerģijas biržas stundas cenām konkrētām valstīm, vēja enerģijas fizisko ražošanu katrā konkrētajā stundā un vēja saražotās elektroenerģijas īpatsvaru kopējā elektroenerģijas patēriņā konkrētajā stundā. Dati tika apkopoti un apstrādāti *Microsoft Excel* programmā, lai noskaidrotu, vai pastāv būtiska korelācija starp vēja ražošanu un elektroenerģijas cenām, t. i., vai augstākas elektroenerģijas vairumtirdzniecības cenas veidojas pie mazāka vēja ražošanas īpatsvara, un otrādi – vai vēja elektrostaciju izstrādes pieaugums veicina cenu kritumu. Lai precīzāk varētu raksturot iegūtos datus, papildus tika veikta arī korelācijas koeficienta aprēķināšana. Ņemot vērā “*Nord Pool*” biržas un nacionālo tīklu operatoru stundas datu pieejamību par konkrētām valstīm, analīze tika veikta diviem reģioniem – Dānijai, kas ietver divas tirdzniecības zonas, kā arī Baltijas reģionam, ietverot Latvijas, Lietuvas un Igaunijas tirdzniecības zonas. Stundas cena katram reģionam tika aprēķināta kā vidējā cena par apgabala cenām, savukārt vēja enerģijas ražošana katram reģionam tika aprēķināta kā vēja enerģijas ražošanas summa attiecīgajos apgabalos. Vēja enerģijas īpatsvars elektroenerģijas bilancē tika aprēķināts procentos kā vēja enerģijas ražošanas attiecīgajās teritorijās īpatsvars kopējā elektroenerģijas pieprasījumā šajās teritorijās. Turklāt, lai salīdzinātu iespējamās korelācijas atšķirības starp stundas un dienas tirgus cenām un attiecīgo produkciju, tika veikta analīze plašākam reģionam, tostarp Dānijai, Somijai un Baltijas valstīm. Šajā gadījumā vēja enerģijas ražošanas apjomu veidoja vēja enerģijas ražošanas summa visās valstīs, savukārt dienas cena bija dienas vidējā sistēmas cena “*Nord Pool*” biržā, kurā ietilpst arī Norvēģijas un Zviedrijas tirdzniecības zonas. Zviedrijas un Norvēģijas vēja enerģijas ražošanas statistika analīzē netika iekļauta, jo nebija pieejami šo valstu dienas vai stundas dati. Tomēr gan “*Nord Pool*”, gan Norvēģijas tīkla operatora “*Statnett*” dati liecina, ka Ziemeļvalstu un Baltijas reģions ir salīdzinoši viendabīgs no vēja enerģijas ražošanas viedokļa. Ikdienā augstie vēja enerģijas ražošanas apjomi kādā no valstīm liecina par augstiem vai vidēji augstiem vēja enerģijas ražošanas apjomiem visās “*Nord Pool*” teritorijās.

Papildus tika veikta divu īsāku laika periodu analīze Baltijas valstu, Dānijas un Somijas teritorijās, lai salīdzinātu vairumtirdzniecības cenas situācijā, kad vienīgais būtiskais mainīgais parametrs bija vēja enerģijas ražošana, bet citi svarīgi faktori, piemēram, elektroenerģijas pieprasījums, hidroenerģijas resursu pieejamība, ko raksturo krātuves Somijā, Norvēģijā un Zviedrijā, kā arī apkārtējā gaisa temperatūra bija līdzīga.

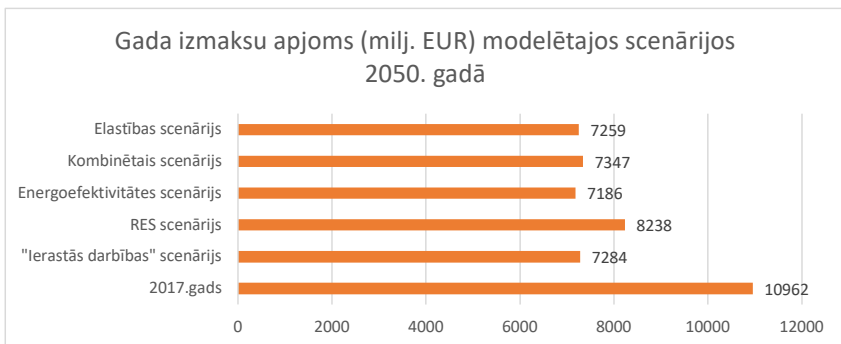
Lai, veicot prognožu izstrādi par atjaunojamās enerģijas attīstības tendencēm un ar to saistīto ekonomisko ietekmi, tai skaitā ietekmi uz tirgus darbību un kopējām lietotāju izmaksām, nodrošinātu pieņemtās pētniecības metodes pietiekamu uzticamību, *EnergyPlan* modelēšanas rīkā tika izstrādāts modelis un veikta izstrādātā modeļa validācija. Lai noteiktu modelēšanas precizitāti, faktiskie 2017. gada statistikas dati tika salīdzināti ar "EnergyPLAN" modelēšanas rīka iznākuma datiem. Modelis nodrošināja pietiekami precīzu elektroenerģijas un siltumapgādes sezonālo sadalījumu atbilstoši hidroloģiskajiem apstākļiem un tipiskajam siltuma pieprasījumam, kā arī uzrādīja precīzas aplēses par vidējo pieprasījumu pēc elektriskās slodzes un siltumslodzes katram gada mēnesim. Turklāt validācijā iegūtas arī ļoti reālistiskas aplēses par vēja un hidroenerģijas pieejamību dažādos gada mēnešos. Turpmākajos pētījuma posmos tika veikts katra scenārija rezultātu salīdzinājums pēc vairākiem parametriem – oglekļa dioksīda emisijas, energoapgādes gada izmaksas (kas ietver gan mainīgās izmaksas, gan tādas fiksētās izmaksas kā kapitālizmaksas enerģētikas nozarē), kopējais primāro energoresursu pieprasījums, kā arī elektroenerģijas importa vai eksporta apjoms. Tomēr, lai lielāku uzmanību pievērstu rezultātiem, kas raksturo energosistēmas ekonomisko un vides ilgtspēju, turpmākā analīze koncentrējas uz diviem nozīmīgākajiem parametriem – oglekļa dioksīda emisijām un energoapgādes kopējām gada izmaksām.

Salīdzinot modelēšanas rezultātus no oglekļa dioksīda emisiju viedokļa, visi iepriekš aprakstītie attīstības scenāriji, tostarp Ierastās darbības scenārijs paredz ievērojamu oglekļa emisiju samazinājumu analizētajā periodā. Savukārt Elastības scenārijs, neskatoties uz to, ka tas paredz vislielāko kopējo enerģijas patēriņu, uzrāda vismazāko oglekļa dioksīda emisiju daudzumu. Rezultāti apliecina, ka transports joprojām ir viens no nozīmīgākajiem oglekļa emisiju avotiem Latvijā un fosilā kurināmā aizstāšana ar tādiem enerģijas avotiem kā elektrība var radīt ļoti ievērojamu rezultātu oglekļa emisiju samazināšanā [118].



5. att. Modelēto scenāriju salīdzinājums no gada oglekļa dioksīda emisiju viedokļa.

Tikmēr gada izmaksu salīdzinājums liecina, ka Energoefektivitātes scenārijs, Elastības scenārijs un Kombinētais scenārijs piedāvā visievērojamākos finanšu ietaupījumus vispārējai ekonomikai.



6. att. Modelēto scenāriju salīdzinājums
no kopējo energoapgādes gada izmaksu viedokļa.

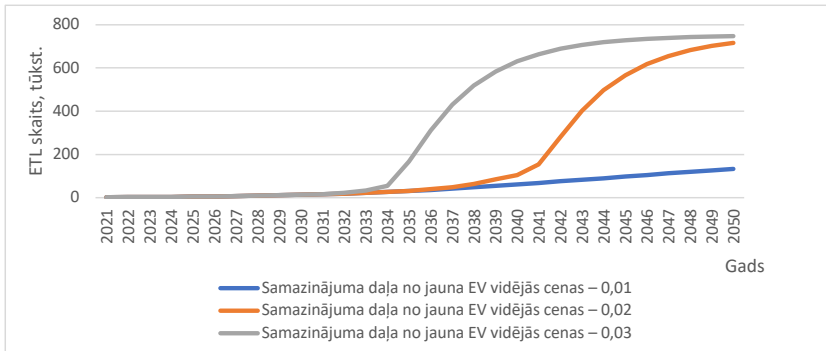
Analīzes scenāriju salīdzinājums liecina arī par to, ka tādu parametru kā primārās enerģijas patēriņš tradicionālo izmantošanu kā būtiska indikatora energosistēmas un politikas ilgtspējas novērtēšanai pielietošana nākotnē var nebūt pamatota, jo primārās enerģijas patēriņš nekorelē ar tādu būtisku rādītāju kā oglekļa emisijas.

3. REZULTĀTI

3.1. ETL skaita pieauguma un CO₂ emisiju dinamika atkarībā no tehnoloģiskās attīstības un atbalsta instrumentiem

Būtiskākais mērķis ETL ieviešanai un *PV* balstītas uzlādes infrastruktūras attīstībai degvielas uzpildes stacijās ir siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisiju samazināšana. Atbilstoši darbā definētajiem pētniecības pieņēmumiem, pakāpeniskai uz fosilo degvielu balstītu transportlīdzekļu (FTL) aizstāšanai ar ETL un *PV* uzstādīšanai vajadzētu samazināt CO₂ emisijas. Rezultāti rāda, ka notiek FTL radīto emisiju samazināšana un modelēšanas perioda beigās paliek tikai ar tīkla elektroenerģiju saistītās CO₂ emisijas. Tomēr CO₂ emisiju samazinājums ir neliels līdz 2040. gadam, kad pārmaiņas sāk notikt ļoti strauji. Tas ir saistīts ar lielo cenu atšķirību starp ETL un FTL pat ar subsīdijām, kas sākās 2022. gadā. Modeļa pieņēmums ir, ka, ja starpība starp subsīdēto ETL un FTL pārsniedz 5000 EUR, ETL iegādājas tikai tie iedzīvotāji, kuriem nav nepieciešamas subsīdijas, un tiek pieņemts, ka šī iedzīvotāju daļa ir aptuveni 20 %. Kad cenu starpība sasniedz 5000 EUR un ir mazāka, iesaistās arī iedzīvotāji, kuriem nepieciešamas subsīdijas ETL iegādei. Pirkuma lēmuma S veida grafiks parāda to iedzīvotāju daļu, kuriem nepieciešamas subsīdijas, pieņemot lēmumu par ETL iegādi, ja cenu starpība samazinās. Tomēr pat tad, ja liela daļa šo iedzīvotāju ir gatavi iegādāties ETL, salīdzinoši nelielu ETL daudzumu var subsidēt ETL subsīdijām atvēlētā ierobežotā kopējā budžeta dēļ. Ievērojams ETL skaita pieaugums sākas (22. att.) tikai tajā brīdī (ap 2040. gadu), kad cenu starpība sasniedz 4500 EUR/transportlīdzekli, un no šī brīža nekādas subsīdijas nav nepieciešamas. Pieaugot ETL skaitam, sāk palielināties arī elektrotīkla elektroenerģijas patēriņš un CO₂ izmeši, kas saistīti ar elektroenerģijas ražošanu. Tomēr šīs emisiju daudzums ir ievērojami mazāks nekā FTL radītais daudzums.

Cenu atšķirība starp ETL un fosilās degvielas transportlīdzekļi samazinās, pateicoties ETL ražošanas tehnoloģiju attīstībai, t. i. "mācīšanās efekta" rezultātā. Efekts modelēts kā pieņemtā cenu samazinājuma daļa gada griezumā.

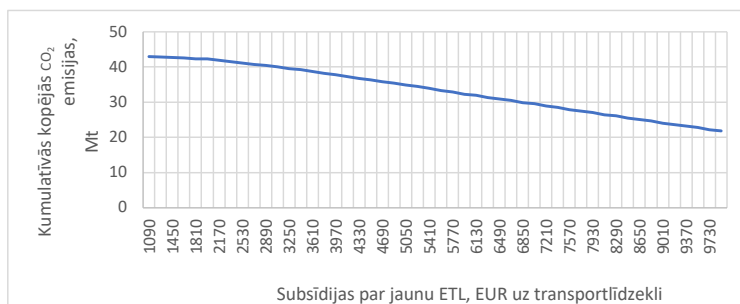


7. att. Elektrisko transportlīdzekļu pieauguma dinamika atkarībā no jauno ETL vidējo cenu samazinājuma tempa. Vidējais cenu samazinājums bāzes scenārijā ir 0,02 gadā, pārējos divos scenārijos attiecīgi 0,01 un 0,03.

PV paneļi degvielas uzpildes stacijās, kurās tiek izbūvētas ETL uzlādes elektroiekārtas, tiek uzstādīti salīdzinoši ātri un sasniedz maksimālo jaudu piektajā gadā (23. att.), jo elektroenerģijas ražošanas izmaksas ir konkurētspējīgas ar tīkla elektroenerģiju jau no aprēķinu perioda sākuma. Degvielas uzpildes stacijās saražotās elektroenerģijas daudzums, izmantojot *PV*, kas novietoti uz degvielas uzpildes staciju ēku jumtiem, ir aptuveni 2 % no kopējās elektroenerģijas, kas nepieciešama ETL uzlādei. Elektroenerģijas apjoms, kas saražots no degvielas uzpildes stacijās uzstādītajiem *PV* paneļiem, ir salīdzinoši mazs, tāpēc tiek apsvērta iespēja uzstādīt *PV* citos uzlādes punktos, kas atrodas ārpus degvielas uzpildes stacijām, lai iegūtu lielāku atjaunojamās enerģijas īpatsvaru. Rezultāti liecina, ka *PV* paneļi, kas atrodas ārpus degvielas uzpildes stacijām, var nodrošināt aptuveni 14 % no kopējā elektroenerģijas daudzuma, kas nepieciešams ETL uzlādei.

Šī saules enerģijas izmantošanas nelielā ietekme uz elektrotransporta uzlādi ir saistīta ar faktu, ka galvenais pirkuma lēmuma virzītājspēks ir cenu starpība starp ETL un FTL un lielākā daļa ETL iegādes notiek pēc tam, kad starpība starp subsidēto ETL cenu un FTL cenu ETL atīstības dēļ izzūd (22. att.). Tāpēc subsīdijām uz vienu ETL ir svarīga nozīme pirkuma lēmumā, un, ja šīs subsīdijas uz vienu ETL tiek dubultotas, tad ievērojams ETL skaita pieaugums sākas daudz agrāk, un līdz 2050. gadam viss FTL krājums tiek aizstāts ar ETL. Ātrāks FTL aizstāšanas ātrums ar ETL nosaka arī zemākas kumulatīvās

CO₂ emisijas aprēķinu periodā, lai gan aprēķinu perioda beigās kopējās gada CO₂ emisijas joprojām būs līdzvērtīgas. Kumulatīvo kopējo CO₂ emisiju jutības analīze (8. att.) rāda, ka subsīdiju palielināšana no 1000 līdz 10 000 EUR par transportlīdzekli samazina kopējās kumulatīvās CO₂ emisijas par vairāk nekā 50 %, ar nosacījumu, ka citi parametri netiek mainīti.



8. att. Kumulatīvās kopējās CO₂ emisijas atkarībā no subsīdijām par jaunu ETL.

3.2. ETL attīstības ietekme uz elektriskās slodzes profiliem un elektroenerģijas infrastruktūras tehniskajiem un ekonomiskajiem rādītājiem

Pētījumā izmantotais elektroenerģijas sistēmas darbības simulācijas modelis ļauj novērtēt arī dažāda veida atjaunojamu energoresursu attīstības scenāriju un transportlīdzekļu elektroenerģijas patēriņa scenāriju ietekmi uz elektroenerģijas bilanci, ieskaitot arī šo ražošanas un patēriņa savstarpējo attiecību. Pētījumā kā optimālākais tika vērtēts scenārijs, ka elektroenerģijas patēriņš un ražošanas apjoms valsts energosistēmas ietvaros ir pēc iespējas līdzsvarots, samazinot nepieciešamību energoapgādei izmantot pārrobežu infrastruktūru, kā arī sekmējot elektroenerģijas būtiska pārpalikuma vai iztrūkuma ietekmes uz cenām samazināšanos.

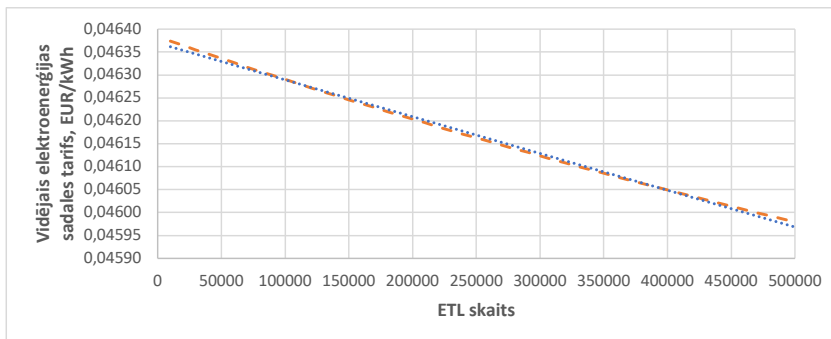
Modelēšanas scenārijā, kas paredz, ka EV primāri tiek uzlādēti mājokļos, lielākās maksimumslodzes tiek novērotas vakara stundās, tāpēc šajās stundās ir nepieciešams imports, savukārt ātrās uzlādes scenārijam uzlādes slodzes ir vērojamas diennakts vidū, ievērojami vairāk korelējot arī ar elektroenerģijas izstrādi. Kā redzams grafikā, arī citu atjaunojamu energoresursu ražošana sedz būtisku pieprasījuma daļu.

Ziemā un rudenī hidroelektrostaciju ietekme uz saražotās elektroenerģijas apjomu ir neliela, salīdzinot ar pavasara mēnešiem. Tas ir augstāks nekā vasarā, bet ražošana joprojām nevar apmierināt pieprasījumu pēc elektriskajiem transportlīdzekļiem vakara stundās un pat ne dienas laikā. Kopumā no hidroelektrostacijām gadā saražotās elektroenerģijas apjoms sasniedz aptuveni 2,70 TWh/gadā, kas gandrīz atbilst nepieciešamajam ETL pieprasījumam – 2,85 TWh/gadā. Hidroelektrostaciju ražošanas grafiks mainās atkarībā no elektromobiļu uzlādes profilu grafikiem, tāpēc to korelācija ir ļoti minimāla.

Būtisks modelēšanā prognozētais atjaunojamo energoresursu veids ir *PV* ražotā elektroenerģija. Aprēķinos tiek plānots, ka to jauda 2050. gadā būs aptuveni 500 MW. 29. attēlā var redzēt prognozētā elektroenerģijas daudzuma apjomus, kas iegūstami no *PV*. Dienas laikā saražotais elektroenerģijas apjoms spēj nodrošināt ETL lietotāju elektroenerģijas pieprasījumu. Vakara stundās, kad mājas uzlādes profilam tiek novērots lielākais maksimuma pieprasījums, ir nepieciešams elektroenerģijas imports. Balstoties modelēšanā, ir secināms, ka *PV* ir būtisks enerģijas avots transporta sektora radītā enerģijas pieprasījuma segšanai vasaras periodā, ziemas mēnešos par būtiskāko avotu uzskatāmas VES, savukārt pavasara un rudens periodā ir raksturīga situācija, ka palielināsies *PV* ražotās elektroenerģijas pieejamība, nedaudz samazinot pieprasījumu pēc enerģijas, kas nepieciešama no VES un HES.

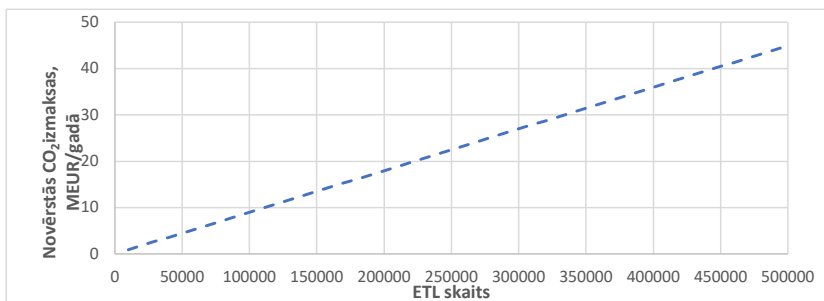
Savukārt rezultāti par elektroenerģijas sadales vidējo kopējo izmaksu iespējamo samazinājumu un novērstajām CO₂ emisijām tika iegūti, pieņemot, ka ETL skaits pieaug no pašreizējiem 1000 līdz 500 000 transportlīdzekļiem 2050. gadā, kas balstīts prognozē par vieglā autotransporta ar iekšdedzes dzinēju aizstāšanu ar elektrotransportu. Ar šādu ETL attīstības dinamiku kopējais elektroenerģijas patēriņš sistēmā palielinātos par aptuveni 1,248 TWh/gadā, kas ir aptuveni 20 % no pašreizējā elektroenerģijas patēriņa. Šāds elektroenerģijas patēriņa pieaugums veicina papildu ieņēmumus tīkla operatoram, kas savukārt pēc attiecināmo izmaksu atskaitīšanas (galvenokārt tās, kas saistītas ar elektroenerģijas zudumu pieaugumu) var tikt izmantots vidējā sadales tarifa (EUR/kWh) samazināšanai par aptuveni 0,2 % gadā. Tas atbilst visu elektroenerģijas patērētāju ekonomiskajam ieguvumam aptuveni 0,7 milj. EUR/gadā. Rezultāti rāda (9. att.), ka tarifa samazinājums (vidējās kopējās elektroenerģijas sadales izmaksas) ir salīdzinoši neliels,

t. i., 0,9 % kopā, ja ETL skaits palielinās no 1000 līdz 500 000. Ja ETL skaits dubultojas, tarifs samazinās par 0,017 %.



9. att. Vidējais sadales tarifs atkarībā no ETL skaita Latvijā.

Nozīmīgāks vides un sociālekonomiskais efekts tiek panākts no potenciālās CO₂ emisiju samazināšanas, kad ETL aizstāj iekšdedzes dzinējus, kas izmanto fosilo kurināmo. Kad ETL skaits sasniedz 500 000, novērstās CO₂ emisiju izmaksas (izmaksas, kas rastos, ja šo CO₂ emisiju kvotas vajadzētu iegādāties emisiju tirgū ETS), pieņemot, ka CO₂ cena ir 43 EUR/t (šāds līmenis tika sasniegts līdz 2021. gada marta beigām) sasniedza aptuveni 45 miljonus EUR/gadā (10. att.).

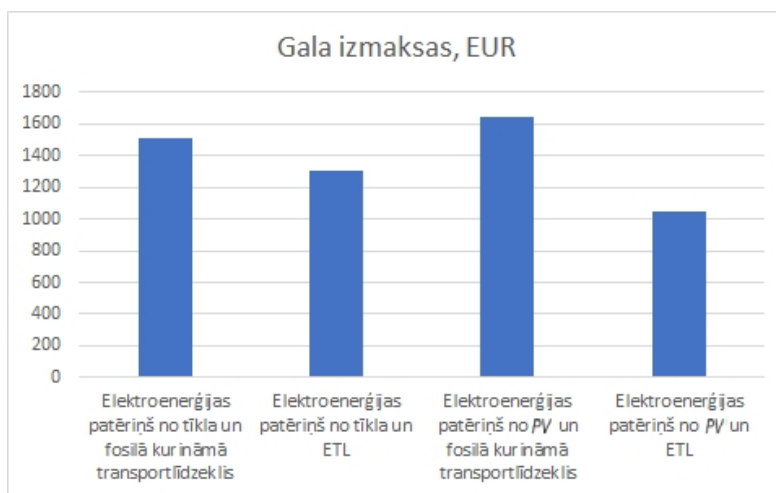


10. att. Novērstās CO₂ emisiju izmaksas atkarībā no ETL skaita Latvijā.

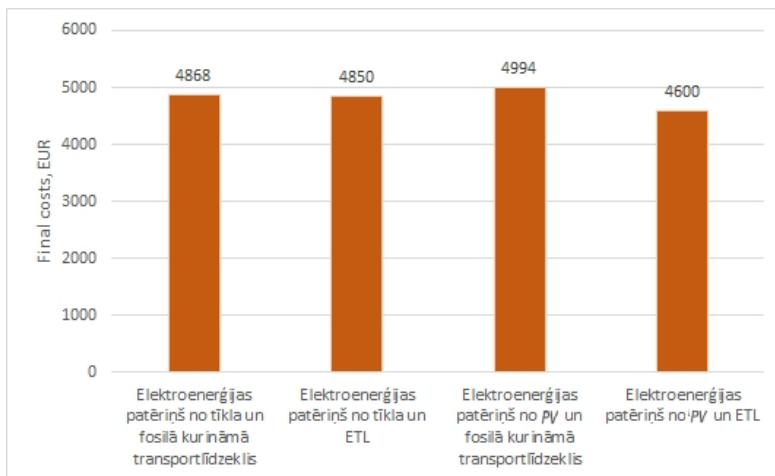
Proti, katrs ETL rada aptuveni 90 EUR/gadā novērstās CO₂ emisiju izmaksas ar pieņemto CO₂ cenu vai 2 t novērstās CO₂ emisijas gadā. Jāatzīmē arī tas, ka šādu aplēšu pamatā ir pieeja, ka CO₂ emisijas no automašīnām, kas lieto fosilo degvielu, ir 200 g/km,

tādējādi atspoguļojot emisijas visā iekšdedzes dzinēju lietošanas ciklā. Attiecībā uz ETL aprēķins ir balstīts emisijās, kas saistītas ar patērētās elektroenerģijas ražošanu, un Latvijas vidējās CO₂ emisijās uz kWh elektroenerģijas, t. i., aptuveni 200 g/kWh. Šis skaitlis atspoguļo salīdzinoši konservatīvu scenāriju, saskaņā ar kuru aptuveni 40 % no elektroenerģijas pieprasījuma tiek apmierināti, izmantojot fosilos ražošanas avotus, un par aptuveni 65 % pārsniedz vēsturisko vidējo aprēķināto CO₂ intensitāti Latvijai.

Analīze, kas veikta par individuālu ETL lietotāju ieguvumiem, transporta dekarbonizācijai lietojot PV, rezultāti atklāj (37. att.), ka no elektroenerģijas izmaksu viedokļa, kas ietver tīkla pieslēguma un elektroenerģijas izmaksas, kā arī degvielas izmaksas, ETL nodrošina ievērojamus ietaupījumus, salīdzinot ar iekšdedzes dzinēja automašīnām. No PV saražotās elektroenerģijas izmantošana uzlādei saskaņā ar esošo tarifu sistēmu nodrošina mobilitātes izmaksu papildu samazinājumu. Tomēr, iekļaujot izmaksas, kas saistītas ar transportlīdzekļa iegādi, kā arī ar saistītajām uzturēšanas izmaksām un nodokļiem, tiek samazināti ietaupījumi, kas saistīti ar ETL un PV izmantošanu (37. att.).



11. att. Scenāriju kopējās ikgadējās enerģijas izmaksas.



12. att. Gada kopējās izmaksas dažādos scenārijos, ietverot transportlīdzekļu iegādes izmaksas (sākotnējie ieguldījumi transportlīdzeklī tiek amortizēti septiņu gadu periodā ar gada procentu likmi 1,49 %) un nodokļus.

Analīze atklāj, ka galvenie faktori, kas nosaka potenciālos ieguvumus, ir saistīti ar augstākām ETL iegādes izmaksām, ko daļēji kompensē zemāki nodokļi, izdevīgāki finansēšanas nosacījumi, kā arī zemākas uzturēšanas un lietošanas izmaksas. Analīze arī atklāj, ka, lai gan galvenās izmaksu priekšrocības ir saistītas ar ETL vispārējo efektivitāti, scenārijā ar PV saražotās elektroenerģijas izmantošanu ETL uzlādēšanai elektriskās mobilitātes izmaksu priekšrocības ir saistītas arī ar tīkla norēķinu sistēmu. Tarifu veidošanas faktiskā struktūra nosaka, ka ekonomiski izdevīgākais PV īpašniekiem ir scenārijs, kurā lietotājs ar PV palīdzību spēj saražot pēc iespējas vairāk elektroenerģijas savam patēriņam, to nepārsniedzot. Šajā gadījumā galvenie ekonomiskie ieguvumi saules enerģijas lietotājam ir no tā, ka lietotājs izvairās no nepamatoti augstām ieguldījumu izmaksām, kas saistītas ar iekārtu sākotnējo iegādi, un samazina mainīgās izmaksas, kas saistītas ar elektroenerģijas iegādi no tīkla. Salīdzinot divus scenārijus ar līdzīgu PV uzstādīto jaudu, atklājas, ka scenārijs, kad māsājniecība patērē visu saražoto elektroenerģiju savām mobilitātes vajadzībām, nevis daļu no tās nodod atpakaļ tīklam, ir ekonomiski izdevīgāks lietotājam un uzlabo arī PV ekonomiskos rādītājus. Tikmēr, kā

redzams 38. attēlā, *PV* ar uzstādīto jaudu, kas nodrošina ražošanas apjomu, kas būtiski pārsniedz lietotāja pašpatēriņu, ekonomiskie rādītāji saskaņā ar esošo tarifu un nodokļu regulējumu var pasliktināt *PV* ekonomiskos rādītājus (kā redzams scenārijā “*PV* un fosilā kurināmā transportlīdzeklis”), un tas saistīts ar tīkla pakalpojumu izmaksu pieaugumu.

No sākotnējās analīzes par ekonomisko sinerģiju starp *PV* un elektriskajiem automobiļiem ir iespējams noteikt vairākus svarīgus apstākļus, kas potenciāli varētu būtiski ietekmēt vispārējos ieguvumus vai izmaksas. Kopumā mājāsaimniecību elektrības pieslēgumiem ir salīdzinoši maza slodze, tāpēc elektroenerģijas patēriņa palielināšana konkrētajā pieslēgumā vairumā gadījumu nodrošina lielāku ekonomiju, samazinot izmaksas uz vienu patērētās enerģijas vienību. Var secināt arī to, ka elektroenerģijas patēriņa pieaugumam, pateicoties ETL uzlādei konkrētā mājāsaimniecībā, vienlaikus saglabājot nemainīgu elektroenerģijas pieslēguma jaudu, ir pozitīva ekonomiskā ietekme uz patērētās elektroenerģijas vienības izmaksām. Vienlaikus, ņemot vērā *PV* uzstādīšanas scenāriju lietotāja objektā, tiek samazināta slodze un salīdzinoši palielinās ar sadales pieslēguma jaudas uzturēšanu saistīto izmaksu īpatsvars atbilstoši tarifu struktūrai. Tomēr, ja *PV* iekārtas aizstāj no tīkla iepirktais elektroenerģijas apjomu, tiek samazinātas vairākas citas elektroenerģijas gala izmaksu komponentes, tostarp izmaksas, kas saistītas ar sadales pakalpojumu.

3.2. Smagā transporta dekarbonizācijas perspektīvas ar sintētisko degvielu palīdzību

Veicot smagā transporta dekarbonizācijas ar sintētisko degvielu palīdzību, tiek ņemts vērā AER un sintētisko degvielu ražošanas tehnoloģiju jaudas pieaugums, infrastruktūras tehnoloģiskās iespējas un institucionālos aspektus. Etanola, kas pētījumā vērtēts kā viena no iespējamajām sintētiskajām degvielām, ražošanas jaudu nosaka divi galvenie faktori – uztverto CO₂ emisiju apjoms un etanola vienības ražošanas izmaksu ekonomiskā konkurētspēja, salīdzinot ar alternatīvās degvielas vienības ražošanas izmaksām. Abi šie faktori nosaka ieguldījumus etanola ražošanas jaudā. Pētniecības un attīstības finansēšana un tiešās subsīdijas etanola ražošanai palielina etanola ražošanas ekonomisko konkurētspēju. Ja uztverto CO₂ emisiju daļa tiek palielināta no 15 % līdz 100 %, tad etanola ražošanas jauda palielinās par tādu pašu attiecību, aptuveni 6,5 reizes, ko varētu sagaidīt. Pārsteidzoši ir tas, ka finansējumam pētniecībai, attīstībai un subsīdijām ir relatīvi neliela ietekme uz etanola ražošanas jaudu pamatscenārijā. Izskaidrojums ir tāds, ka

pētniecībai un attīstībai piešķirtais finansējums pārsniedz bāzes līmeņa finansējumu un samazina pētniecībai un attīstībai nepieciešamo laiku, salīdzinot ar to, kāds būtu bez šī finansējuma, t. i., bāzes līmeņa laiku. Ja pētniecības un attīstības bāzes līmeņa laiks ir pietiekami mazs, etanola ražošana pietiekami ātri kļūst ekonomiski konkurētspējīga ar alternatīvu un attiecīgajā laika posmā sasniedz gandrīz tādu pašu ražošanas jaudu bez papildu finansējuma pētniecībai, kāds tiek sasniegts ar papildu finansējumu. Šo skaidrojumu var pārbaudīt, ja “Izpētes laiks vienības izmaksu samazināšanai” un “Izstrādes laiks vienības izmaksu samazināšanai” modelī tiek dubultots attiecīgi līdz 10 un sešiem gadiem. Šīs izmaiņas rada lielāku atšķirību etanola ražošanas jaudas dinamikā, kad tiek noņemts finansējums pētniecībai, attīstībai un subsīdijām. Jāatzīmē, ka, ja vispār nenotiek pētniecība un attīstība (pētniecības un attīstības laiks modelī ir ļoti liels), etanola ražošanas tehnoloģija nav konkurētspējīga ar alternatīvu un netiek investēts ražošanas jaudā.

Palielinoties etanola ražošanas jaudai, palielinās arī saražotais etanols, kas aizstāj fosilo degvielu transporta nozarē. Ja fosilās degvielas zemākais sadegšanas siltums (ZKS) ir aptuveni 12 MWh/t un etanola ZKS ir 7,42 MWh/t, tad 1 t etanola aizvieto 0,62 tonnas fosilā kurināmā. Ja pieņem, ka sintētiskais etanols ir oglekļneitrāls (jo izgatavots no uztvertā CO₂ un H₂, kas ražots no atjaunojamiem enerģijas avotiem) un ka fosilā kurināmā CO₂ emisijas faktors ir aptuveni 3,03 t CO₂/t degvielas, tad katra etanola tonna transporta nozarē novērš aptuveni 1,9 tonnas CO₂. Rezultāti rāda, ka novērsto CO₂ emisiju īpatsvars, t. i., novērsto CO₂ emisiju attiecība, aizstājot fosilo degvielu ar etanolu, pret kopējām CO₂ emisijām transporta sektorā, kāds bija 2020. gadā, atbilst tādām pašām S veida pieaugumam kā etanola ražošanas jauda. Varētu panākt pat 80 % transporta radīto CO₂ emisiju samazinājumu, ja sintētiskās degvielas ražošanai varētu izmantot 100 % rūpniecisko CO₂ emisiju, bet atsaucēs scenārijā tiktu sasniegts aptuveni 12 % samazinājums. Sintētiskās degvielas īpatsvars kopējā enerģijas gala patēriņā transportā (ja patēriņš saglabātos 2020. gada līmenī) šajos divos scenārijos būtu attiecīgi 74 % un 11 %.

Jūtības analīzes rezultāti rāda, ka novērsto CO₂ emisiju īpatsvaru transportā visvairāk ietekmē H₂ ražošanas izmaksas un īpatsvars samazinās, palielinoties H₂ izmaksām. Šis rezultāts sakrīt ar daudziem citiem pētījumiem, kas norāda, ka spirtu ražošana, hidrogenējot CO₂, ir ekonomiski dzīvotspējīga tikai pie noteikta H₂ izmaksu līmeņa. Tas ir apstiprināts

pētījumā, kurā aplūkota CoMoS katalizatora izmantošana reakcijai [140] [21], [141], [8], kā arī pētījumā, kurā aplūkota termokatalītiskās CO₂ hidrogenēšanas tehniski ekonomiskais pamatojums metanola un etanola ražošanai [47], [43]. Lai novērtētu smagajam autotransportam paredzētās sintētiskās degvielas ražošanas perspektīvas dažādos atjaunojamās enerģijas ražošanas jaudu scenārijos, veikta pētījumā izmantoto trīs scenāriju analīze.

1. scenārijs – “Visticamākais” (“Iespējamākais”)

Lai ražotu 8,2 TWh sintētiskās degvielas, kas ir modelēšanā identificētais degvielas pieprasījuma apjoms, elektrolīzei ir nepieciešama 14,02 TWh elektroenerģijas. Tam būtu nepieciešams elektroenerģijas neto imports (starpība starp importu un eksportu) 8,835 TWh apmērā gadā. Modelēšana apliecina, ka marta nedēļā importētās elektroenerģijas apjoms ir lielāks nekā eksportētās un tikai dažas stundas šajā nedēļā elektroenerģijas ražošana apmierina pieprasījumu, lai gan ir zināms, ka marts ir ļoti labs mēnesis elektroenerģijas ražošanai, jo vējš ir diezgan spēcīgs un upēs ir liels ūdens daudzums, kas izplūst caur hidroelektrostacijām. Ja ņemam vērā elektroenerģijas importa cenas 2021. gadā (~ 80 EUR/MWh_e), tad importa izmaksas būtu aptuveni 707 milj. EUR/gadā. Salīdzinājumam – elektroenerģijas neto imports Latvijā 2021. gadā bija 1,77 TWh_e.

Tāpēc šim scenārijam tika izveidots otrs variants, kurā tika novērtēts, kāds ir sintētiskās degvielas daudzums, ko var saražot, ja elektroenerģijas neto imports saglabājas tādā pašā līmenī kā 2021. gadā, t. i., 1,77 TWh_e gadā. Rezultāti liecina, ka ar šādu elektroenerģijas neto importu var saražot 3,6 TWh jeb 44 % no nepieciešamā sintētisko degvielu daudzuma un tam elektrolīzei būtu nepieciešami 6,19 TWh_e elektroenerģijas. Atlikušās 4,6 TWh degvielas enerģijas smagā transporta nozarē tiktu nodrošinātas ar fosilo degvielu, kas būtu tāda pati kā 2021. gadā, radot tādas pašas CO₂ emisijas kā 2021. gadā. Tas ļauj secināt, ka atjaunojamās enerģijas pieaugumu šajā scenārijā atsvēr degvielas patēriņa pieaugums lielas noslodzes transportā. Tas novērš CO₂ gada emisiju līmeņa pieaugumu, bet nepalīdz to samazināt.

2. scenārijs – “Maksimālā atkrastes vēja enerģija”

Lai samazinātu CO₂ emisijas, ir nepieciešams palielināt atjaunojamo energoresursu ražošanas jaudu, lai sistēma varētu papildus saražot 8,835 TWh_e elektrolīzei un nodrošinātu

8,2 TWh sintētiskās degvielas ražošanu. Mainot atkrastes VES jaudu, tika konstatēts, ka jauda būtu jāpalielina par 4765 MW. Šādā scenārijā neto elektroenerģijas imports būtu nulle. Tomēr saglabājas salīdzinoši lieli eksporta un importa apjomi – aptuveni 5,72 abos virzienos. Tas var nebūt ekonomiski izdevīgi, jo importa cena bieži vien varētu būt augstāka par eksporta cenu. Modelī sākotnēji izvēlētais ūdeņraža uzglabāšanas tvertņu tilpums ir neliels, un modelis izmanto elektrību elektrolīzei tikai tik daudz, cik nepieciešams transporta vajadzībām konkrētajā brīdī, pārveidojot saražoto ūdeņradi sintētiskajā degvielā un patērējot to transporta vajadzībām. Ja tiktu palielināts ūdeņraža uzglabāšanas tvertņu tilpums un elektrolīzes jauda, visa eksporta jauda tiktu novirzīta ūdeņraža ražošanai, novēršot elektroenerģijas neto importu. Tomēr ūdeņraža uzglabāšana lielos daudzumos ir sarežģīta un dārga, un šīs izmaksas varētu pārsniegt elektroenerģijas importa un eksporta cenas starpību, tādēļ izdevīgāk būtu veidot sintētiskās degvielas uzglabāšanas tvertnes. Šāds risinājums tiek pārbaudīts 3. scenārijā.

3. scenārijs – “Sintētiskās degvielas uzglabāšana”

Par pamatu ņemot 1. scenārija elektroenerģijas ražošanas jaudas, būtu jāspēj uzglabāt 10,64 TWh ūdeņraža, jo šāds apjoms ir nepieciešams 8,2 TWh sintētiskās degvielas ražošanai. No šī apjoma 4,18 TWh veido dimetilēteris (DME)), kas aizvieto dīzeļdegvielu glabāšanai un tā uzglabāšanai nepieciešams tilpums 789 tūkst. m³, 3,99 TWh aviācijas e-petrolejas uzglabāšanai – 433 tūkst. m³, savukārt amonjakam, ko izmanto kuģu transportā – 9,5 tūkst. m³.

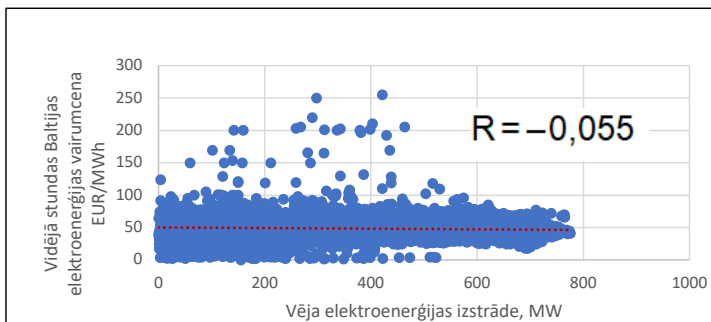
Šādā scenārijā imports un eksports būtu vienāds – 0,73 TWh gadā. Pievienotās sintētiskās degvielas uzglabāšanas tvertnes ļauj samazināt elektroenerģijas pārrobežu plūsmu apjomu, paredzot, ka elektrolīzes iekārtas tiek darbinātas tikai brīžos, kad rodas VES elektroenerģijas izstrādes pārpalikumi, kas bija viens no galvenajiem nosacījumiem sintētisko degvielu ražošanā.

3.3. AER ražošanas avotu ietekmes uz elektroenerģijas tirgus attīstības tendencēm un transporta dekarbonizāciju analīze

Elektroenerģija cenas ir viens no būtiskākajiem izmaksu posteņiem gan ETL ekspluatācijā, gan arī sintētisko degvielu ražošanā, tāpēc cenu ilgtermiņa prognozējamība ir būtisks faktors, lai identificētu šajās aktivitātēs veicamās investīcijas un nodrošinātu to

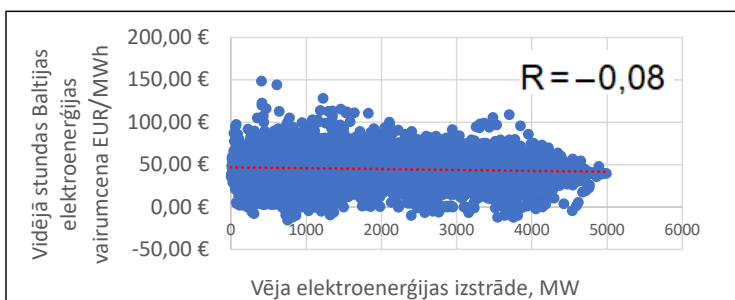
prognozējamību, vienlaikus pamatojot arī investīcijas elektroenerģijas ražošanas jaudās. “Nord Pool” biržā iegūto statistikas datu salīdzinājums liecina, ka īstermiņā, kas ilgst vienu nedēļu, pastāv ievērojama korelācija starp vēja elektrostaciju elektroenerģijas ražošanu un cenām. Analīzei salīdzināšanai tika izvēlēti divi septiņu dienu periodi 2019. gadā – no 1. novembra līdz 7. novembrim un no 3. decembra līdz 9. decembrim – šādu apsvērumu dēļ: kopējais elektroenerģijas patēriņš; darbdienu skaits; apkārtējā gaisa temperatūra (ar ražošanas iekārtu pieejamību saistīto ierobežojumu skaits abos periodos lielākoties bija līdzīgs); hidroresursu rezerves pieejamība (ko raksturo fakts, ka abos periodos tā pārsniedza ilgtermiņa mediānas vērtību attiecīgajā gada nedēļā un attiecīgajā analīzes periodā bija augsta). Savukārt saskaņā ar aprēķiniem vēja elektroenerģijas ražošanas apjoma starpība starp scenārijiem pārsniedza 100 %. Tādējādi vienīgais nozīmīgais mainīgais parametrs abos analīzes periodos bija vēja elektroenerģijas ražošanas apjoms. Aprēķins apstiprināja, ka vidējo cenu starpība starp scenārijiem bija aptuveni 13 %, ko var uzskatīt par būtisku. Tomēr tas liek domāt, ka ilgākos analīzes periodos vēja elektrostaciju saražotajai elektroenerģijai ir daudz mazāka ietekme uz elektroenerģijas cenu svārstībām nekā īsākos periodos, kas reizēm piedzīvoja cenu atšķirības līdz pat 100 % 24 stundu periodos vienā konkrētā dienā un pastāvīgas atšķirības līdz pat 25 % 24 stundu periodos.

Datu analīze gada griezumā apstiprina, ka, neskatoties uz spēcīgām īstermiņa svārstībām, kas saistītas ar vēja enerģijas ražošanas izmaiņām, nav vērā ņemamas korelācijas starp elektroenerģijas cenām un vēja enerģijas ražošanu ilgākā periodā (13. att.). “Nord Pool” tirgi uz ļoti lielajiem saražotās vēja enerģijas apjomiem (MWh) reaģēja ar salīdzinoši mērenām cenu svārstībām, un būtiska ietekme nav novērojama arī periodos ar ļoti zemu vēja enerģijas īpatsvaru. Tikmēr lielākā daļa gadījumu, kad elektroenerģijas vairumtirdzniecības cena būtiski pārsniedza vai bija zemāka par vidējo līmeni, tika reģistrēti periodos, kad vēja enerģijas ražošana bija vidēja – no 40 000 MWh līdz 100 000 MWh dienā – Somijas, Dānijas un Baltijas valstu reģionos. Līdzīgi rezultāti tika novēroti stundas analīzēm Baltijas reģionā un Dānijā (13. un 14. att.).



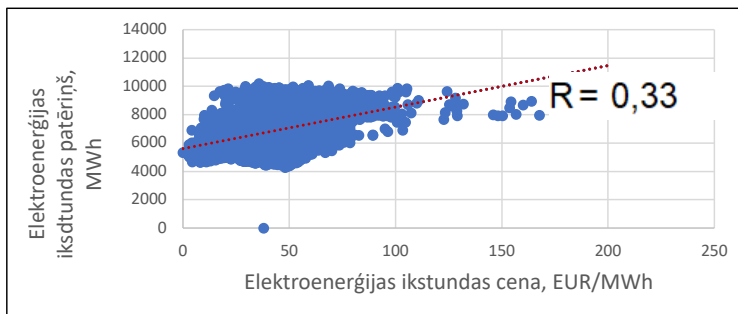
13. att. Korelācija starp vēja enerģijas ražošanu un elektroenerģijas tirgus cenu pēc stundas likmes Baltijas reģionā 2019. gadā (datu avots: “Nord Pool”).

Lai gan dati liecina, ka korelācija starp vēja elektroenerģijas ražošanas apjomu un cenu Dānijā ir augstāka nekā Baltijas valstīs, abos reģionos korelācija ir ļoti zema (14. att.).



14. att. Korelācija starp vēja enerģijas ražošanu un elektroenerģijas tirgus cenu pēc stundas likmes Dānijā 2019. gadā (datu avots: “Nord Pool”).

Identiskus novērojumus var veikt korelācijai starp vēja enerģijas īpatsvaru kopējā elektroenerģijas gala patēriņā un stundas elektroenerģijas cenām gan Dānijā, gan Baltijas valstīs. Abos gadījumos korelācija bija augstāka nekā scenārijā ar vēja enerģijas ražošanu, taču tā joprojām ir ļoti zema. Turklāt elektroenerģijas patēriņa datu analīze parādīja, ka elektroenerģijas vairumtirdzniecības cenai ir daudz spēcīgāka pozitīvā korelācija ar elektroenerģijas patēriņu (15. att.).



15. att. Korelācija starp elektroenerģijas tirgus cenu un ikstundas elektroenerģijas patēriņu 2019. gadā (datu avots: “*Nord Pool*”, 2020).

Lai novērtētu periodiskas vēja enerģijas ražošanas izraisīto elektroenerģijas tirgus cenu svārstību ietekmi uz Dānijas vēja enerģijas ražotāju ekonomiskajiem rādītājiem 2019. gadā, tika aprēķināta un salīdzināta “*Nord Pool*” pārdotās vēja enerģijas vidējā svērtā cena par MWh un vidējā svērtā tirdzniecības cena.

Aprēķini liecina, ka 2019. gadā vēja elektroenerģijas ražotāji VES saražoto elektroenerģiju pārdeva par vidējo svērto cenu 44,27 EUR par MWh, savukārt vidējā svērtā tirgus cena bija 44243,96 EUR par MWh. Tādējādi cenu starpība ir aptuveni 0,7 %, un tas liek domāt, ka vēja enerģijas ražotāju ienākumus tikai nenozīmīgi ietekmē cenu samazinājums periodos ar lielu VES saražotās elektroenerģijas īpatsvaru un, gluži pretēji, kopumā ražotāju ieņēmumi par tirgū pārdoto elektroenerģiju uz vienu MWh ir nedaudz augstāki nekā vidēji tirgū.

4. SECINĀJUMI

- Pētījuma, kurā novērtēts elektroenerģijas daudzums, ko var saražot saules fotoelementi, kas uzstādīti degvielas uzpildes stacijās un paredzēti ETL uzlādei, rezultāti liecina, ka saules fotoelementi degvielas uzpildes stacijās var nodrošināt aptuveni 2 % no kopējās ETL uzlādei nepieciešamās elektroenerģijas Latvijā. Saules fotoelementi, kas uzstādīti citās uzlādes iekārtās ārpus degvielas uzpildes stacijām, t. i., publiskās uzlādes vietās, varētu nodrošināt aptuveni 14 % no ETL uzlādei nepieciešamās elektroenerģijas.
- FTL autoparka aizstāšanas ātrums ar ETL ir izšķirošākais faktors CO₂ emisiju samazināšanā transporta nozarē. Lielākā ietekme uz ETL pieauguma tempu ir starpība starp jaunu ETL un FTL cenām. Divi galvenie mehānismi, kas samazina cenu starpību starp ETL un FTL, ir ETL cenas samazinājums tehnoloģiskās attīstības rezultātā un tiešās subsīdijas ETL iegādei. Tādējādi tiešās subsīdijas ETL iegādei varētu būt visefektīvākais politikas instruments transporta dekarbonizācijas un elektrifikācijas atbalstam. Politikas instrumentiem jāstimulē pāreja no FTL uz ETL pēc iespējas agrāk. ETL uzlādei izmantotajam enerģijas avotam ir otršķirīga nozīme attiecībā pret kumulatīvajām CO₂ emisijām transporta nozarē.
- Analizējot vieglā ETL attīstības iespējamo ietekmi uz elektriskās slodzes profilu, tika secināts, ka ātrās uzlādes scenārijā pīķa stundas bija izteiktākas dienas vidū, savukārt mājas uzlādes scenārijā pīķa stundas bija tikai vakara stundās. Mājas uzlādes scenārijā vakara maksimumi bija daudz lielāki, un dienas uzlādes profils bija nevienmērīgāks. Ātrās uzlādes stacijām profils bija daudz vienmērīgāks dienas laikā, ar mazākiem pīķiem.
- Atbilstoši gadalaikiem lielāks ETL lietotāju elektroenerģijas pieprasījums vērojams gada siltajos mēnešos, kad iedzīvotāji vairāk pārvietojas. VES ražotā elektroenerģija ziemā, HES pavasarī un saules *PV* vasarā palīdz stabili apmierināt pieprasījumu pēc elektroenerģijas no uzlādes stacijām lielākajā daļā laika periodu. Lielākās problēmas ar elektriskā tīkla slodzi ir redzamas vakara stundās, kad nav pietiekama VES izstrāde un vairs nav pieejama *PV* elektroenerģija. ETL uzlādes pīķa stundas bieži ir vakara stundās, tādējādi radot nepieciešamību importēt elektroenerģiju, ko nevar nosegt ar atjaunojamiem enerģijas avotiem.

- Vienlaikus ETL radītās potenciālās slodzes un enerģijas patēriņa novērtējums apstiprina, ka Latvijas elektrotīkla uzstādītā jauda ir pietiekama, lai apmierinātu ETL uzlādes vajadzības arī tad, ja viss fosilo transporta līdzekļu parks tiek aizstāts ar ETL. Tāpēc nav pierādījumu, ka autotransporta elektrifikācijai būtu nepieciešami ievērojami papildu ieguldījumi elektrotīklā. Aprēķini liecina arī par to, ka iespējamais elektroenerģijas pieprasījuma pieaugums nāktu par labu tīkla operatoriem un radītu papildu ienākumu plūsmu, ko var izmantot, lai samazinātu tīkla maksu par piegādātās elektroenerģijas vienību.
- Tiešo ekonomisko ieguvumu, kas saistīts ar intensīvāku elektrotīkla izmantošanu, var raksturot kā relatīvi nenozīmīgu aptuveni 0,2 % vai 0,7 miljonu EUR/gadā, kad ETL izplatība sasniedz aptuveni 500 000 vienību. Savukārt novērsto CO₂ emisiju vērtība ir būtiskāka, un tā var sasniegt aptuveni 45 miljonus EUR/gadā, kad ETL izplatība sasniedz aptuveni 500 000 vienību.
- Elektroauto un mājsaimniecību *PV* sinerģijas analīze norāda, ka izmaksas, kas saistītas gan ar saules enerģijas iekārtu, gan transportlīdzekļu iegādi, ir viens no svarīgākajiem izmaksu noteicošajiem faktoriem abu tehnoloģiju ekonomiskajiem rādītājiem. Papildus tiešajām ekonomiskajām priekšrocībām abu tehnoloģiju sinerģijai ir arī liels potenciāls samazināt enerģijas izmaksu svārstības.
- Apkopojot pētījumos gūtās atziņas par sintētisko degvielu lietojumu smagā transporta dekarbonizācijā, var secināt, ka līdz 2050. gadam ir iespējams dekarbonizēt smagā transporta nozari, izmantojot elektroenerģiju, kas ražota no atjaunojamiem energoresursiem, ražojot sintētiskās degvielas un uzglabājot tās lielos apjomos.
- Ja pasažieru transports tiks dekarbonizēts, izmantojot elektromotorus, kuriem arī nepieciešama no atjaunojamiem energoresursiem ražota elektroenerģija, tad būtu jāuzstāda papildu atjaunojamās elektroenerģijas jauda.
- Iegūtie rezultāti liecina arī par to, ka prognozētā maksimālā elektriskā slodze, visticamāk, ievērojami pārsniedz esošo pārvades un sadales tīklu jaudu, un tādējādi pamato nepieciešamību veikt turpmākus pētījumus, lai novērtētu transporta dekarbonizācijas stratēģijas izmaksas ar sintētisko degvielu palīdzību saistībā ar esošo elektrotīklu paplašināšanu un pielāgošanu.

- Pētījuma par sintētisko degvielu potenciālu smagā transporta sektorā un tā atkarību no institucionālajiem faktoriem rezultāti liecina, ka ūdeņraža ražošanas un CO₂ uztveršanas izmaksas (starpība starp uztveršanas izmaksām un CO₂ emisiju cenu), kā arī īpatnējiem kapitālieguldījumiem sintētisko degvielu (modelēšana veikta etanola ražošanai) ražošanas jaudā (tehnoloģiju izmaksas) ir trīs no svarīgākajiem faktoriem, kas nosaka modelēto sistēmu rezultātu. Ūdeņraža ražošanas izmaksām ir vislielākā ietekme uz etanola ražošanas jaudas dinamiku un no tās izrietošajām novērstajām CO₂ emisijām transporta nozarē. Proti, ūdeņraža ražošanas izmaksu pieaugums par 1 % samazina novērsto CO₂ emisiju apjomu transporta nozarē par 0,32 %.
- Rezultāti rāda, ka, izmantojot naudu, kas tiek ietaupīta, pateicoties novērstajām CO₂ emisijām, lai izstrādātu sintētiskās degvielas ražošanas tehnoloģijas, rodas pastiprinošs efekts, kas ļauj izvairīties no vēl lielākām CO₂ emisijām nākotnē. Kā izriet no rezultātiem, tehnoloģiskā attīstība un pētniecība ir būtisks priekšnosacījums tam, lai attīstītos sintētisko degvielu ražošana no uztvertā CO₂, un bez finansējuma šīm vajadzībām tehnoloģijas attīstība ir maz ticama.

Apkopojot būtiskākos pētījuma par elektroenerģijas jaudu attīstības ietekmi uz tirgu un kopējām patērētāju izmaksām ilgtermiņā rezultātus, jāatzīmē, ka visi modelētie scenāriji apstiprināja uzstādīto atjaunojamo energoresursu jaudas, jo īpaši vēja un *PV* enerģijas avotu, turpmākas palielināšanas ekonomisko un tehnisko iespējamību. Turklāt visos scenārijos gada izmaksas enerģijas patērētājiem prognozējamās ievērojami zemākā līmenī nekā 2017. atsaucē gadā. Scenāriji, kas paredz intensīvāku atbalstu AER attīstības veicināšanai, kā arī stimulus energoefektivitātes uzlabošanai rada salīdzinoši lielāku gada izmaksu slogu, tomēr mazākas izmaksas uz patērētās enerģijas vienību nākotnē nekā atsaucē gadā [118].

- Analīze parādīja arī to, ka, ņemot vērā pieejamo enerģijas uzglabāšanas tehnoloģiju klāstu, no kurām par nozīmīgāko tehnoloģiju ir uzskatāmas hidroakumulācijas elektrostacijas un akumulatoru baterijas, uzglabāšanas jaudas pilnīgai VES un saules *PV* ražotās elektroenerģijas līdzsvarošanai var nebūt pietiekamas. Saistībā ar to jāpēta citas enerģijas uzglabāšanas iespējas, piemēram, pazemes krātuvju izmantošana sintētiskās gāzes vai biometāna uzglabāšanai, kā arī ūdeņraža uzglabāšana, apsverot nepieciešamību saglabāt esošo dabasgāzes infrastruktūru.

- Savukārt, analizējot atjaunojamās enerģijas ražotņu ietekmi uz elektroenerģijas tirgus cenu dinamiku gada un stundu griezumā, rezultāti neuzrādīja korelāciju starp VES saražotās elektroenerģijas īpatsvaru un elektrības tirgus cenu. Šiem mainīgajiem lielumiem R vērtība bija tikai $-0,15$ Dānijai, kas ir valsts ar vislielāko vēja enerģijas izplatību Ziemeļvalstu un Baltijas reģionā, un līdzīgi zema ($R = -0,15$) Baltijas valstīm. Tāpēc nebija iespējams iegūt nekādu funkcionālu sakarību starp vēja enerģijas īpatsvara pieaugumu un no tā izrietošo elektroenerģijas tirgus cenas samazinājumu, ko varētu izmantot energosistēmu turpmākajā modelēšanā. Tomēr šie novērojumi liecināja arī par to, ka nepastāvīgu atjaunojamo enerģijas avotu, piemēram, vēja enerģijas, ietekme uz elektroenerģijas tirgus cenām ilgākā termiņā ir zemāka, nekā tika uzskatīts iepriekš, un kopumā nerada nozīmīgus riskus ilgtermiņa vairumcenu stabilitātei un investoru intereses kritumam.

5. ATSAUCES

- [1] European Environment Agency, “Greenhouse gas emissions from transport in Europe.” Accessed: Feb. 02, 2024. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/ims/greenhouse-gas-emissions-from-transport>
- [2] EUROCONTROL, “EUROCONTROL Forecast Update 2022–2024,” Accessed: Feb. 02, 2024. [Online]. Available: <https://www.euroControl.int/publication/euroControl-forecast-update-2022-2024>
- [3] G. P. Peters, G. Marland, C. Le Quéré, T. Boden, J. G. Canadell, and M. R. Raupach, “Rapid growth in CO₂ emissions after the 2008–2009 global financial crisis,” *Nat. Clim. Chang.*, vol. 2, no. 1, pp. 2–4, Jan. 2012, doi: 10.1038/NCLIMATE1332.
- [4] R. Figueiredo, P. Nunes, and M. C. Brito, “The feasibility of solar parking lots for electric vehicles,” *Energy*, vol. 140, pp. 1182–1197, Dec. 2017, doi: 10.1016/J.ENERGY.2017.09.024.
- [5] P. D. dos Santos, A. C. Zamboni de Souza, B. D. Bonatto, T. P. Mendes, J. A. S. Neto, and A. C. B. Botan, “Analysis of solar and wind energy installations at electric vehicle charging stations in a region in Brazil and their impact on pricing using an optimized sale price model,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 45, no. 5, pp. 6745–6764, Apr. 2021, doi: 10.1002/ER.6269.
- [6] M. T. Turan and E. Gökalp, “Integration Analysis of Electric Vehicle Charging Station Equipped with Solar Power Plant to Distribution Network and Protection System Design,” *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 17, no. 2, pp. 903–912, Mar. 2022, doi: 10.1007/S42835-021-00927-X.
- [7] Nityanishi, T. Mathur, V. A. Tikkiwal, and K. Nigam, “Feasibility analysis of a solar-assisted electric vehicle charging station model considering differential pricing,” *Energy Storage*, vol. 3, no. 4, Aug. 2021, doi: 10.1002/EST2.237.
- [8] D. Yan and C. Ma, “Stochastic planning of electric vehicle charging station integrated with photovoltaic and battery systems,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 14, no. 19, pp. 4217–4224, Oct. 2020, doi: 10.1049/IET-GTD.2019.1737.
- [9] C. Filote, R. A. Felseghi, M. S. Raboaca, and I. Aşchilean, “Environmental impact assessment of green energy systems for power supply of electric vehicle charging station,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 44, no. 13, pp. 10471–10494, Oct. 2020, doi: 10.1002/ER.5678.
- [10] M. A. Tamor and E. B. Stechel, “Electrification of transportation means a lot more than a lot more electric vehicles,” *iScience*, vol. 25, no. 6, p. 104376, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.ISCI.2022.104376.
- [11] Q. Hu, H. Li, and S. Bu, “The Prediction of Electric Vehicles Load Profiles Considering Stochastic Charging and Discharging Behavior and Their Impact Assessment on a Real UK Distribution Network,” *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 6458–6465, Feb. 2019, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2019.01.134.
- [12] M. Yuan, J. Z. Thellufsen, H. Lund, and Y. Liang, “The electrification of transportation in energy transition,” *Energy*, vol. 236, p. 121564, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.ENERGY.2021.121564.
- [13] A. Sadri, M. M. Ardehali, and K. Amirnekoeei, “General procedure for long-term energy-environmental planning for transportation sector of developing countries with limited data based on LEAP (long-range energy alternative planning) and EnergyPLAN,” *Energy*, vol. 77, pp. 831–843, Dec. 2014, doi: 10.1016/J.ENERGY.2014.09.067.

- [14] L. Udrene and G. Bazbauers, "Role of Vehicle-to-grid Systems for Electric Load Shifting and Integration of Intermittent Sources in Latvian Power System," *Energy Procedia*, vol. 72, pp. 156–162, Jun. 2015, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2015.06.022.
- [15] W. You *et al.*, "Technical and economic assessment of RES penetration by modelling China's existing energy system," *Energy*, vol. 165, pp. 900–910, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.ENERGY.2018.10.043.
- [16] W. Liu, H. Lund, B. V. Mathiesen, and X. Zhang, "Potential of renewable energy systems in China," *Appl Energy*, vol. 88, no. 2, pp. 518–525, Feb. 2011, doi: 10.1016/J.APENERGY.2010.07.014.
- [17] H. Lund, J. Z. Thellufsen, P. A. Østergaard, P. Sorknæs, I. R. Skov, and B. V. Mathiesen, "EnergyPLAN – Advanced analysis of smart energy systems," *Smart Energy*, vol. 1, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.segy.2021.100007.
- [18] M. Z. Jacobson *et al.*, "100% Clean and Renewable Wind, Water, and Sunlight All-Sector Energy Roadmaps for 139 Countries of the World," *Joule*, vol. 1, no. 1, pp. 108–121, Sep. 2017, doi: 10.1016/J.JOULE.2017.07.005.
- [19] D. Connolly, H. Lund, B. V. Mathiesen, E. Pican, and M. Leahy, "The technical and economic implications of integrating fluctuating renewable energy using energy storage," *Renew Energy*, vol. 43, pp. 47–60, Jul. 2012, doi: 10.1016/J.RENENE.2011.11.003.
- [20] D. Connolly, "The Integration of Fluctuating Renewable Energy Using Energy Storage," University of Limerick, Limerick, 2010. Accessed: Feb. 19, 2024. [Online]. Available: https://vbn.aau.dk/files/549485799/David_Connolly_PhD_2010_Updated_Journal_Appendices_2012_.pdf
- [21] F. A. Farret and M. Godoy. Simões, "Integration of alternative sources of energy," p. 471, 2006.
- [22] H. Lund *et al.*, "Energy storage and smart energy systems," *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, vol. 11, pp. 3–14, 2016, doi: 10.5278/IJSEPM.2016.11.2.
- [23] S. Djørup, J. Z. Thellufsen, and P. Sorknæs, "The electricity market in a renewable energy system," *Energy*, vol. 162, pp. 148–157, Nov. 2018, doi: 10.1016/J.ENERGY.2018.07.100.
- [24] B. Čosić, G. Krajačić, and N. Duić, "A 100 % renewable energy system in the year 2050: The case of Macedonia," *Energy*, vol. 48, no. 1, pp. 80–87, Dec. 2012, doi: 10.1016/J.ENERGY.2012.06.078.
- [25] J. Porubova and G. Bazbauers, "Analysis of Long-Term Plan for Energy Supply System for Latvia that is 100 % Based on the Use of Local Energy Resources," *Environmental and Climate Technologies*, vol. 4, no. 1, pp. 82–90, 2010, doi: 10.2478/V10145-010-0022-7.
- [26] J. De Hoog *et al.*, "Electric vehicle charging and grid constraints: Comparing distributed and centralized approaches," *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2013, doi: 10.1109/PESMG.2013.6672222.
- [27] L. Held *et al.*, "The influence of electric vehicle charging on low voltage grids with characteristics typical for Germany," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 10, no. 4, Dec. 2019, doi: 10.3390/WEVJ10040088.
- [28] T. Bräunl, D. Harries, M. McHenry, and G. Wager, "Determining the optimal electric vehicle DC-charging infrastructure for Western Australia," *Transp. Res. D. Transp. Environ.*, vol. 84, p. 102250, Jul. 2020, doi: 10.1016/J.TRD.2020.102250.

- [29] C. D. White and K. M. Zhang, "Using vehicle-to-grid technology for frequency regulation and peak-load reduction," *J. Power Sources*, vol. 196, no. 8, pp. 3972–3980, Apr. 2011, doi: 10.1016/j.jpowsour.2010.11.010.
- [30] S. Deilami, A. S. Masoum, P. S. Moses, and M. A. S. Masoum, "Real-time coordination of plug-in electric vehicle charging in smart grids to minimize power losses and improve voltage profile," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 2, no. 3, pp. 456–467, Sep. 2011, doi: 10.1109/TSG.2011.2159816.
- [31] G. Cardoso *et al.*, "Optimal investment and scheduling of distributed energy resources with uncertainty in electric vehicle driving schedules," *Energy*, vol. 64, pp. 17–30, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.energy.2013.10.092.
- [32] A. Foley, B. Tyther, P. Calnan, and B. Ó Gallachóir, "Impacts of Electric Vehicle charging under electricity market operations," *Appl. Energy*, vol. 101, pp. 93–102, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.06.052.
- [33] I. Staltmanis, *Latvijas Enerģētika Ceļā Uz Patstāvību*. Rīga: AS "Latvenergo", Latvijas enerģētiku un elektrotehniku zinātniski tehniskā biedrība, 1992.
- [34] P. Nunes, M. C. Brito, and T. Farias, "Synergies between electric vehicles and solar electricity penetrations in Portugal," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 6, no. 4, pp. 1151–1158, 2013, doi: 10.3390/WEVJ6041151.
- [35] H. Tidey and S. Lyden, "Coordination of electric vehicle battery charging with photovoltaic generation," *2017 Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC 2017*, vol. 2017–November, pp. 1–6, Feb. 2018, doi: 10.1109/AUPEC.2017.8282453.
- [36] D. B. Richardson, "Electric vehicles and the electric grid: A review of modeling approaches, Impacts, and renewable energy integration," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 19, pp. 247–254, Mar. 2013, doi: 10.1016/j.rsres.2012.11.042.
- [37] C. Camus and T. Farias, "The electric vehicles as a mean to reduce CO₂ emissions and energy costs in isolated regions. The São Miguel (Azores) case study," *Energy Policy*, vol. 43, pp. 153–165, Apr. 2012, doi: 10.1016/j.enpol.2011.12.046.
- [38] E. S. Amundsen and L. Bergman, "Why has the Nordic electricity market worked so well?" *Util. Policy*, vol. 14, no. 3, pp. 148–157, Sep. 2006, doi: 10.1016/J.JUP.2006.01.001.
- [39] Ministru kabinets, "Atviegloti nosacījumi neto sistēmas lietotājiem." Accessed: Feb. 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.mk.gov.lv/jaunums/atviegloti-nosacijumi-neto-sistemas-lietotajiem>
- [40] S. Hänggi *et al.*, "A review of synthetic fuels for passenger vehicles," *Energy Reports*, vol. 5, pp. 555–569, 2019, doi: 10.1016/j.egy.2019.04.007.
- [41] I. Ghat and T. Al-Ansari, "A review of carbon capture and utilisation as a CO₂ abatement opportunity within the EWF nexus," *Journal of CO₂ Utilization*, vol. 45, no. December 2020, p. 101432, 2021, doi: 10.1016/j.jcou.2020.101432.
- [42] K. Atsonios, K. D. Panopoulos, and E. Kakaras, "Thermocatalytic CO₂ hydrogenation for methanol and ethanol production: Process improvements," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 2, pp. 792–806, 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.12.001.
- [43] K. Arning, A. Linzenich, L. Engelmann, and M. Ziefle, "More green or less black? How benefit perceptions of CO₂ reductions vs. fossil resource savings shape the acceptance of CO₂-based fuels and

- their conversion technology,” *Energy and Climate Change*, vol. 2, no. May 2020, p. 100025, 2021, doi: 10.1016/j.egycc.2021.100025.
- [44] Y. M. Alshammari, “Scenario analysis for energy transition in the chemical industry: An industrial case study in Saudi Arabia,” *Energy Policy*, vol. 150, no. February 2020, p. 112128, 2021, doi: 10.1016/j.enpol.2020.112128.
- [45] X. Chen, X. Wu, and K. Y. Lee, “The mutual benefits of renewables and carbon capture: Achieved by an artificial intelligent scheduling strategy,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 233, p. 113856, 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.113856.
- [46] G. Zang, P. Sun, A. A. Elgowainy, A. Bafana, and M. Wang, “Performance and cost analysis of liquid fuel production from H₂ and CO₂-based on the Fischer-Tropsch process,” *Journal of CO₂ Utilization*, vol. 46, no. February, p. 101459, 2021, doi: 10.1016/j.jcou.2021.101459.
- [47] J. Hu, R. Harmsen, W. Crijns-Graus, E. Worrell, and M. van den Broek, “Identifying barriers to large-scale integration of variable renewable electricity into the electricity market: A literature review of market design,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 2181–2195, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.RSER.2017.06.028.
- [48] D. Newbery, M. G. Pollitt, R. A. Ritz, and W. Strielkowski, “Market design for a high-renewables European electricity system,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 91, pp. 695–707, Aug. 2018, doi: 10.1016/J.RSER.2018.04.025.
- [49] IEA, “Renewables 2019 – Analysis.” Accessed: Feb. 14, 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/renewables-2019#overview>
- [50] Nordic Energy Research, “Baltic Energy Technology Scenarios 2018.” Accessed: Feb. 14, 2024. [Online]. Available: <https://www.nordicenergy.org/project/bente/>
- [51] IEA, “How will the electricity market of the future work? – Analysis ” Accessed: Feb. 14, 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/commentaries/how-will-the-electricity-market-of-the-future-work>
- [52] Clerici, A., Cova, B., & Callegari, G. “Decarbonization of the electrical power sector in Europe: an asset, an opportunity or a problem? .” Accessed: Feb. 14, 2024. [Online]. Available: <https://www.jstor.org/stable/43735343>
- [53] WindEurope, “Wind energy in Europe in 2019” Accessed: Feb. 14, 2024. [Online]. Available: <https://windeurope.org/about-wind/statistics/european/wind-energy-in-europe-in-2019/>
- [54] WindEurope, “Wind in power: 2010 European statistics.” Accessed: Feb. 14, 2024. [Online]. Available: <https://windeurope.org/about-wind/statistics/european/wind-in-power-2010/>
- [55] W. Hu, Z. Chen, and B. Bak-Jensen, “The relationship between electricity price and wind power generation in Danish electricity markets,” *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC*, 2010, doi: 10.1109/APPEEC.2010.5448739.
- [56] S. Pilpola and P. D. Lund, “Different flexibility options for better system integration of wind power,” *Energy Strategy Reviews*, vol. 26, p. 100368, Nov. 2019, doi: 10.1016/J.ESR.2019.100368.
- [57] Y. Li, “Quantifying the impacts of wind power generation in the day-ahead market: The case of Denmark”.

- [58] J. M. Roldan Fernandez, M. Burgos Payan, and J. M. Riquelme Santos, "The Merit-Order Effect of Load-Shifting: An Estimate for the Spanish Market," *Environmental and Climate Technologies*, vol. 24, no. 1, pp. 43–57, Jan. 2020, doi: 10.2478/RTUECT-2020-0003.
- [59] X. Li, "The impact of wind power generation on the wholesale electricity price Evidence from the Swedish electricity market," 2017.
- [60] E. A. Unger, G. F. Ulfarsson, S. M. Gardarsson, and T. Matthiasson, "The effect of wind energy production on cross-border electricity pricing: The case of western Denmark in the Nord Pool market," *Econ. Anal. Policy*, vol. 58, pp. 121–130, Jun. 2018, doi: 10.1016/J.EAP.2018.01.006.
- [61] E. Denny *et al.*, "The impact of increased interconnection on electricity systems with large penetrations of wind generation: A case study of Ireland and Great Britain," *Energy Policy*, vol. 38, no. 11, pp. 6946–6954, Nov. 2010, doi: 10.1016/J.ENPOL.2010.07.011.
- [62] W. You *et al.*, "Technical and economic assessment of RES penetration by modelling China's existing energy system," *Energy*, vol. 165, pp. 900–910, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.ENERGY.2018.10.043.
- [63] C. Byers, T. Levin, and A. Botterud, "Capacity market design and renewable energy: Performance incentives, qualifying capacity, and demand curves," *The Electricity Journal*, vol. 31, no. 1, pp. 65–74, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.TEJ.2018.01.006.
- [64] G. Shrimali, S. Srinivasan, S. Goel, and D. Nelson, "The effectiveness of federal renewable policies in India," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, pp. 538–550, Apr. 2017, doi: 10.1016/J.RSER.2016.10.075.
- [65] D. Yan and C. Ma, "Stochastic planning of electric vehicle charging station integrated with photovoltaic and battery systems," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 14, no. 19, pp. 4217–4224, Oct. 2020, doi: 10.1049/IET-GTD.2019.1737.
- [66] C. Filote, R. A. Felseghi, M. S. Raboaca, and I. Așchilean, "Environmental impact assessment of green energy systems for power supply of electric vehicle charging station," *Int. J. Energy Res.*, vol. 44, no. 13, pp. 10471–10494, Oct. 2020, doi: 10.1002/ER.5678.
- [67] ISEE, "STELLA Architect," *Products*. p. 2021, 2016.
- [68] Vides aizsardzības un reģionālās attīstības ministrija, "Elektromobiļi," 2021.
- [69] Volkswagen, "WW vehicle price.pdf." [Online].
Available: <https://www.volkswagen.co.uk/en/new.html>
- [70] CSDD, "Reģistrēto transportlīdzekļu skaits | Transportlīdzekļi | Statistika | CSDD." 2020.
- [71] The European Parliament and the Council, "EUR-Lex - 32014L0094 - EN - EUR-Lex," *EU Directive Directive 2014/94/EU*. p. 20, 2014.
- [72] IEA, "Projected Costs of Generating Electricity 2020 – Analysis," 2021.
- [73] Danish Energy Agency and Energinet, "Technology Data – Energy Plants for Electricity and District heating generation," no. 36, p. 414, 2020.
- [74] Latvenergo, "Elektroenerģijas cena." [Online].
Available: <https://latvenergo.lv/lv/jaunumi/elektroenerģijas-cena/4>
- [75] Vides aizsardzības un reģionālās attīstības ministrija, "Siltumnīcefekta gāzu emisiju aprēķina metodika."
- [76] D. Bosseboeuf, B. Lapillone, M. Rousselot, and L. Sudries, "Sectoral Profile – Transport," no. 1, pp. 1–8, 2021.

- [77] CSDD, "Reģistrēto transportlīdzekļu sadalījums pēc degvielas veida." [Online]. Available: <https://www.csdd.lv/transportlīdzekli/transportlīdzekli-vizualizacija>
- [78] Ceļu satiksmes drošības direkcija, "Average CO₂ emissions for vehicle."
- [79] CSDD, "Reģistrēto transportlīdzekļu skaits | Transportlīdzekļi | Statistika ." Accessed: Jan. 25, 2023. [Online]. Available: <https://www.csdd.lv/transportlīdzekli/registreto-transportlīdzeklu-skait>
- [80] CSDD, "Tehniskajā apskatē pērn vidēji 13 auto dienā atteica bremzes | Jaunumi." Accessed: Dec. 30, 2022. [Online]. Available: <https://www.csdd.lv/jaunumi/csdd-tehniskaja-apskate-pern-viději-13-auto-diena-atteica-bremzes>
- [81] "Energy consumption of full electric vehicles cheatsheet – EV Database." Accessed: Feb. 07, 2023. [Online]. Available: <https://ev-database.org/cheatsheet/energy-consumption-electric-car>
- [82] V. Siřař, T. Vyslouřil, L. Rakova, and T. Hruřka, "The Power Load Model for Electric Vehicle Charging Modelling and its Utilisation for Voltage Level Studies and Cables Ampacity in Distribution Grid," *Manufacturing Technology*, vol. 21, no. 1, pp. 132–140, 2021, doi: 10.21062/MFT.2021.015.
- [83] F. M. Andersen, H. K. Jacobsen, and P. A. Gunkel, "Hourly charging profiles for electric vehicles and their effect on the aggregated consumption profile in Denmark," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 130, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.IJEPES.2021.106900.
- [84] "Uzlādes staciju tīkls e-mobi." Accessed: Feb. 19, 2024. [Online]. Available: <http://www.e-transports.org/index.php/arhivs/e-mobi-uzlades-tikls>
- [85] "Uzlādes staciju tīkls e-mobi." Accessed: Dec. 30, 2022. [Online]. Available: <http://www.e-transports.org/index.php/arhivs/e-mobi-uzlades-tikls>
- [86] "Latvijā atvērussies Ionity uzlādes stacija – Uzladets." Accessed: Mar. 19, 2023. [Online]. Available: <https://uzlades.lv/latvija-atverusies-ionity-uzlades-stacija/>
- [87] "Medijiem | VIRŠI." Accessed: Mar. 19, 2023. [Online]. Available: <https://www.virsi.lv/lv/par-mums/medijiem/AS-Virsi-A-attistis-elektrouzlades-tiklu-20-stacijas-visa-Latvija>
- [88] "IKEA atklāj bezmaksas uzlādes vietas elektroautomobiļiem | Kursors.lv." Accessed: Mar. 19, 2023. [Online]. Available: <https://kursors.lv/2019/09/05/ikea-atklaj-bezmaksas-uzlades-vietas-elektroautomobiliem/>
- [89] "Volkswagen We Charge serviss – vai tieřam řaja dzīvē ir arī kaut kas lētāks? | Kursors.lv." Accessed: Mar. 19, 2023. [Online]. Available: <https://kursors.lv/2022/11/29/volkswagen-we-charge-serviss-vai-tiesam-saja-dzive-ir-ari-kaut-kas-letaks/>
- [90] "Elektrum." Accessed: Mar. 19, 2023. [Online]. Available: <https://elektrumveikals.lv/lv/uznemumam/elektroauto-uzlade/elektrum-uzlades-stacijas>
- [91] "Par 2021. Gada 4. ceturksnī reģistrētajiem elektrotransportlīdzekļiem." Accessed: Feb. 07, 2023. [Online]. Available: <http://www.e-transports.org/index.php/statistika/33-elektro-transportlīdzekli/333-par-2021-gada-4-ceturksni-registretajiem-elektrotransportlīdzekļiem>
- [92] S. . Funke, F. Sprei, T. Gnann, and P. Plotz, "How much charging infrastructure do electric vehicles need? A review of the evidence and international comparison," *Transp. Res. Part D: Transp. Environ.*, vol. 77, pp. 224–242, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.trd.2019.10.024.
- [93] M. Muratori, D. Greene, E. Kontou, and J. Dong, "The role of infrastructure to enable and support electric drive vehicles: A Transportation Research Part D Special Issue," *Transportation Research Part*

- D: Transport and Environment*, vol. 89. Elsevier Ltd, p. 102609, Dec. 01, 2020. doi: 10.1016/j.trd.2020.102609.
- [94] M. Baresch and S. Moser, "Allocation of e-car charging: Assessing the utilization of charging infrastructures by location," *Transp. Res. Part A: Policy Pract.*, vol. 124, pp. 388–395, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.tra.2019.04.009.
- [95] A. Miele, J. Axsen, M. Wolinetz, E. Maine, and Z. Long, "The role of charging and refuelling infrastructure in supporting zero-emission vehicle sales," *Transp. Res. Part D: Transp. Environ.*, vol. 81, p. 102275, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.trd.2020.102275.
- [96] B. C. Clinton and D. C. Steinberg, "Providing the Spark: Impact of financial incentives on battery electric vehicle adoption," *J. Environ. Econ. Manage.*, vol. 98, p. 102255, Nov. 2019, doi: 10.1016/J.JEEM.2019.102255.
- [97] B. C. Clinton and D. C. Steinberg, "Providing the Spark: Impact of financial incentives on battery electric vehicle adoption," *J. Environ. Econ. Management*, vol. 98, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.jeem.2019.102255.
- [98] C. Herron and J. Wardle, "Technology trajectory and lessons learned from the commercial introduction of electric vehicles in north east England," *Green Energy and Technology*, vol. 203, pp. 161–178, 2015, doi: 10.1007/978-3-319-13194-8_9.
- [99] S. Á. Funke, F. Sprei, T. Gnann, and P. Plötz, "How much charging infrastructure do electric vehicles need? A review of the evidence and international comparison," *Transp. Res. Part D: Transp. Environ.*, vol. 77, pp. 224–242, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.TRD.2019.10.024.
- [100] A. Schroeder and T. Traber, "The economics of fast charging infrastructure for electric vehicles," *Energy Policy*, vol. 43, pp. 136–144, Apr. 2012, doi: 10.1016/j.enpol.2011.12.041.
- [101] M. M. Nejad, L. Mashayekhy, R. B. Chinnam, and D. Grosu, "Online scheduling and pricing for electric vehicle charging," *IIEE Trans*, vol. 49, no. 2, pp. 178–193, 2017, doi: 10.1080/0740817X.2016.1213467.
- [102] S. Bakker, K. Maat, and B. van Wee, "Stakeholders interests, expectations, and strategies regarding the development and implementation of electric vehicles: The case of the Netherlands," *Transp. Res. Part A: Policy Pract.*, vol. 66, no. 1, pp. 52–64, 2014, doi: 10.1016/j.tra.2014.04.018.
- [103] J. Serradilla, J. Wardle, P. Blythe, and J. Gibbon, "An evidence-based approach for investment in rapid-charging infrastructure," *Energy Policy*, vol. 106, pp. 514–524, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.enpol.2017.04.007.
- [104] C. H. Dharmakeerthi, N. Mithulananthan, and T. K. Saha, "Overview of the impacts of plug-in electric vehicles on the power grid," in *2011 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, ISGT Asia 2011 Conference: Smarter Grid for Sustainable and Affordable Energy Future*, 2011. doi: 10.1109/ISGT-Asia.2011.6167115.
- [105] P. Jochem, E. Szimba, and M. Reuter-Oppermann, "How many fast-charging stations do we need along European highways?" *Transp. Res. Part D: Transp. Environ.*, vol. 73, pp. 120–129, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.trd.2019.06.005.
- [106] G. Cardoso *et al.*, "Optimal investment and scheduling of distributed energy resources with uncertainty in electric vehicle driving schedules," *Energy*, vol. 64, pp. 17–30, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.energy.2013.10.092.

- [107] "AS 'SADALES TĪKLS' GADA PĀRSKATS." Accessed: Jan. 27, 2021. [Online]. Available: https://www.sadalestikls.lv/uploads/2020/04/ST_2019_gada-p-rskats_LV.pdf
- [108] "MAJANDUSAASTA ARUANNE." Accessed: Jan. 27, 2021. [Online]. Available: https://www.elektrilevi.ee/-/doc/8644141/ettevottest/tutvustus/failid/ELV2019_MAA_tervik.pdf
- [109] "Par akciju sabiedrības 'Sadales tīkls' elektroenerģijas sadales sistēmas pakalpojuma tarifiem." Accessed: Jan. 27, 2021. [Online]. Available: <https://likumi.lv/ta/id/311033-par-akciju-sabiedribas-sadales-tikls-elektroenerģijas-sadales-sistemas-pakalpojuma-tarifiem>
- [110] L. Held *et al.*, "The Influence of Electric Vehicle Charging on Low Voltage Grids with Characteristics Typical for Germany," 2019, doi: 10.3390/wevj10040088.
- [111] Valsts Ieņēmumu dienests, "Akcīzes nodokļa likmes/Excise tax rates." Accessed: Jun. 19, 2022. [Online]. Available: <https://www.vid.gov.lv/lv/akcizes-nodokla-likmes-0>
- [112] "Elektroenerģijas nodoklis | Valsts ieņēmumu dienests." Accessed: Feb. 14, 2024. [Online]. Available: <https://www.vid.gov.lv/lv/elektroenerģijas-nodoklis>
- [113] M. S. Kany *et al.*, "Energy efficient decarbonisation strategy for the Danish transport sector by 2045," *Smart Energy*, vol. 5, p. 100063, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.SEGY.2022.100063.
- [114] O. Bamisile *et al.*, "A 2030 and 2050 feasible/sustainable decarbonization perusal for China's Sichuan Province: A deep carbon neutrality analysis and EnergyPLAN," *Energy Convers. Manag.*, vol. 261, p. 115605, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2022.115605.
- [115] L. Malka, I. Konomi, P. Bartocci, and E. Rrapaj, 2021, "An Integrated Approach toward a sustainable transport sector using EnergyPLAN model: case of Albania"; *Innovations* Vol. 9 (2021), Issue 4, pg(s) 141-147.
- [116] Valdmanis Gunārs, "Modelling of flexibility and integration of renewable energy sources in energy systems," Master's thesis, Riga Technical University, Riga, 2019.
- [117] "Statistics | Eurostat." Accessed: Jan. 23, 2023. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/explore/all/transp?lang=en&display=list&sort=category>
- [118] Oficiālās statistikas portāls, "Latvijas energobilance 2021. gadā." Accessed: Feb. 04, 2023. [Online]. Available: <https://stat.gov.lv/lv/statistikas-temas/noz/energetika/publikacijas-un-infografikas/11015-latvijas-energobilance-2021>
- [119] CSDD, "Rokasgrāmatas par vidējo degvielas patēriņu un CO₂ izplūdi | Vidējais degvielas patēriņš | Transportlīdzeklis." Accessed: Feb. 18, 2023. [Online]. Available: <https://www.csdd.lv/vidējais-degvielas-paterins/rokasgramatas-par-videjo-degvielas-paterinu-un-co2-izpludi>
- [120] International Council on Clean Transportation, "Comparison of fuel consumption and emissions for representative heavy-duty vehicles in Europe." Accessed: Feb. 18, 2023. [Online]. Available: <https://theicct.org/publication/comparison-of-fuel-consumption-and-emissions-for-representative-heavy-duty-vehicles-in-europe/>
- [121] "Pārvaldes sistēmas operatora ikgadējais novērtējuma ziņojums". Accessed: Feb. 04, 2021. [Online]. Available: https://ast.lv/sites/default/files/editor/PSO_zinojums_2019.pdf
- [123] "European Biofuels Biofuel Fact Sheet Dimethyl ether (DME) Comparison of Fuel Properties," 2011, Accessed: Mar. 19, 2023. [Online]. Available: www.biofuelstp.eu.

- [123] P. Dimitriou and R. Javaid, "A review of ammonia as a compression ignition engine fuel," 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.12.209.
- [124] Y. Deng, K.-K. Cao, and Patrick, "Graphical Abstract E-kerosene production in carbon-neutral power systems-a solution for sustainable aviation in Brazil?".
- [125] "Statistics | Eurostat." Accessed: Feb. 14, 2024. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/explore/all/transp?lang=en&display=list&sort=category>
- [126] R. F. Naill, "A system dynamics model for national energy policy planning," *Syst. Dyn. Rev.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–19, 1992, doi: 10.1002/sdr.4260080102.
- [127] J. D. Sterman, "The Energy Transition and the Economy: A System Dynamics Approach." MIT, Boston, 1981.
- [128] T. S. Fiddaman, "Exploring policy options with a behavioral climate-economy model," *Syst. Dyn. Rev.*, vol. 18, no. 2, pp. 243–267, 2002, doi: 10.1002/sdr.241.
- [129] Y. Barlas, "Formal aspects of model validity and validation in system dynamics," *Syst Dyn Rev*, vol. 12, no. 3, pp. 183–210, 1996, doi: 10.1002/(sici)1099-1727(199623)12:3<183::aid-sdr103>3.0.co;2-4.
- [130] V. Shenbagamuthuraman *et al.*, "State of the art of valorising diverse potential feedstocks for the production of alcohols and ethers: Current changes and perspectives," *Chemosphere*, vol. 286, no. P1, p. 131587, 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131587.
- [131] K. Zeng and D. Zhang, "Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 36, no. 3, pp. 307–326, 2010, doi: 10.1016/j.peccs.2009.11.002.
- [132] "European Energy Exchange," Environmental Markets-Spot Market. Accessed: Dec. 30, 2021. [Online]. Available: <https://www.eex.com/en/market-data/environmental-markets/spot-market>
- [133] "Valsts SIA 'Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs,'" Sadaļa Klimats – SEG emisiju un ETS monitorings – Ziņojums par klimatu – Aptuvenās SEG inventarizācijas par X-1 gadu – excel formāta dokuments: "2021. gada inventarizācija par 2020. gadu." [Online]. Available: <https://videscentrs.lv/gmc.lv/lapas/zinojums-par-klimatu>
- [134] "Latvijas Centrālās statistikas pārvaldes (CSP) Oficiālās statistikas portāls," Nozare – Enerģētika; Energobalance, TJ, tūkst.toe (NACE 2. red.) 2008–2020. [Online]. Available: https://data.stat.gov.lv/pxweb/lv/OSP_PUB/START_NOZ_EN_ENB/ENB060
- [135] "Stella Architect, ISEE SYSTEMS." [Online]. Available: <https://www.iseesystems.com/>
- [136] The European Commission, "Energy Sources, Production Costs and Performance of Technologies for Power Generation, Heating and Transport," SEC (2008) 2872, 2008.
- [137] O. Kraan, E. Chappin, G. J. Kramer, and I. Nikolic, "The influence of the energy transition on the significance of key energy metrics," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 111, pp. 215–223, Sep. 2019, doi: 10.1016/J.RSER.2019.04.032.
- [138] D. L. S. Nieskens, D. Ferrari, Y. Liu, and R. Kolonko, "The conversion of carbon dioxide and hydrogen into methanol and higher alcohols," *Catal. Commun.*, vol. 14, no. 1, pp. 111–113, 2011, doi:10.1016/j.catcom.2011.07.020.
- [139] P. Runge, C. Sölich, J. Albert, P. Wasserscheid, G. Zöttl, and V. Grimm, "Economic comparison of different electric fuels for energy scenarios in 2035," *Appl. Energy*, vol. 233–234, no. September 2018, pp. 1078–1093, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.10.023.

- [140] Nityanshi, T. Mathur, V. A. Tikkiwal, and K. Nigam, "Feasibility analysis of a solar-assisted electric vehicle charging station model considering differential pricing," *Energy Storage*, vol. 3, no. 4, Aug. 2021, doi: 10.1002/EST2.237.



Gunārs Valdmanis dzimis 1979. gadā Aizkrauklē. Rīgas Tehniskās universitātes (RTU) Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultātes ieguvis inženierzinātņu maģistra grādu (2019) vides zinātnē, Latvijas Universitātes Sociālo zinātņu fakultātē – maģistra grādu politikas zinātnē (2016). Kopš 2020. gada ir RTU lektors un pētnieks, kā arī veic Klimata un enerģētikas ministrijas Enerģijas tirgus departamenta direktora amata pienākumus. Zinātniskās intereses saistītas ar elektroenerģijas sistēmu un energoapgādes modelēšanu, kā arī enerģētikas nozares būvniecības normatīvā regulējuma izpēti.