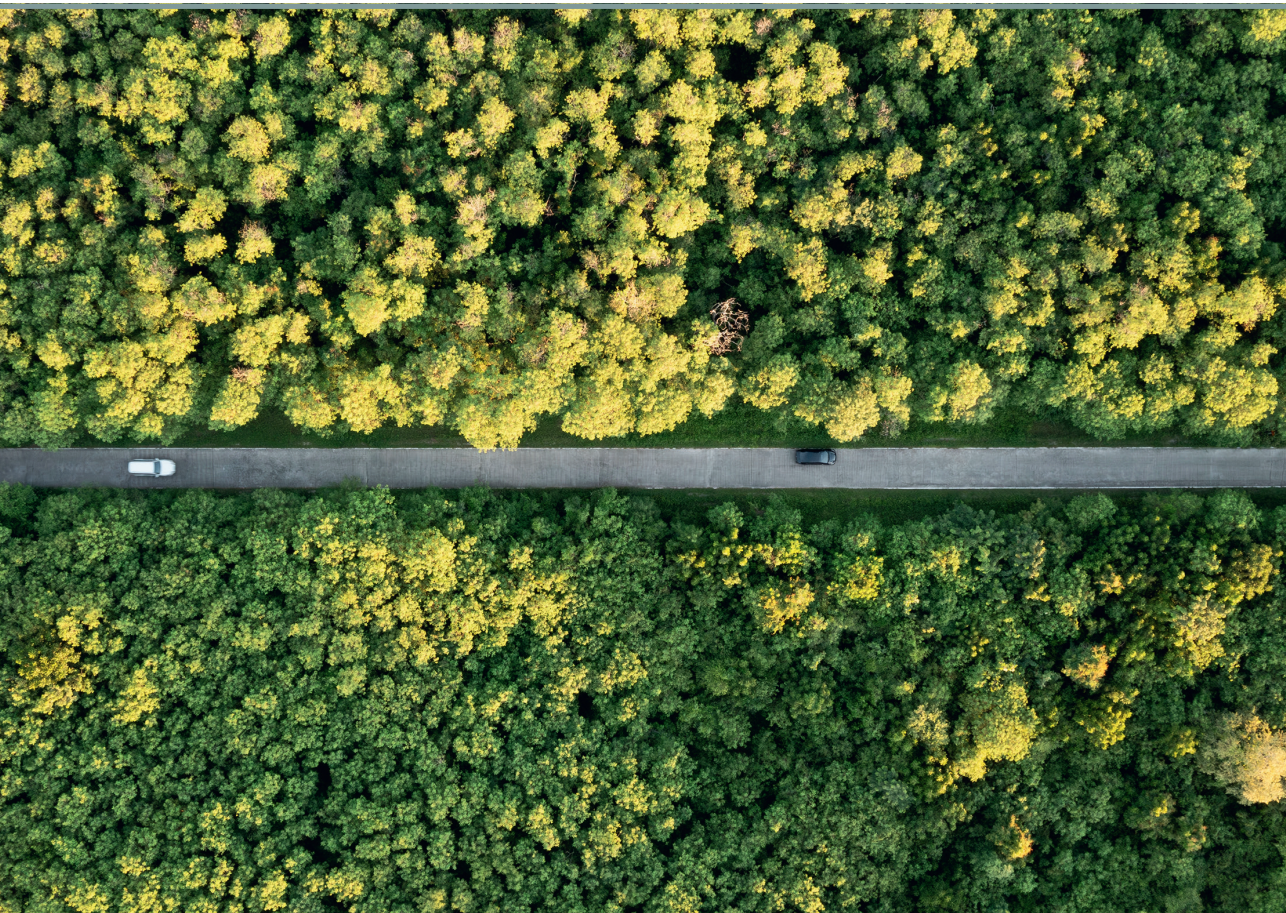


Signe Allena-Ozoliņa

OPTIMĀLAIS CEĻŠ UZ KLIMATNEITRĀLU ENERĢĒTIKAS SEKTORU LATVIJĀ

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Dabaszinātņu un tehnoloģiju fakultāte
Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

Signe Allena-Ozoliņa

Studiju programmas “Vides inženierija” doktorante

OPTIMĀLAIS CEĻŠ UZ KLIMATNEITRĀLU ENERĢĒTIKAS SEKTORU LATVIJĀ

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji

profesors *Dr. sc. ing.*
GATIS BAŽBAUERS

asociētā profesore *Ph. D.*
IEVA PAKERE

RTU Izdevniecība
Rīga 2025

Allena-Ozoliņa S. Optimālais ceļš uz klimatneitrālu enerģētikas sektoru Latvijā. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2025. 44 lpp.

Publicēts saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-19” 2024. gada 13. decembra lēmumu Nr. 215.

Vāka attēls no *www.shutterstock.com*.

<https://doi.org/10.7250/9789934371721>
ISBN 978-9934-37-172-1 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2025. gada 5. jūnijā plkst. 14 Rīgas Tehniskās universitātes Dabaszinātņu un tehnoloģiju fakultātē, Āzenes ielā 12/1, 607. telpā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Asociētais profesors *Dr. sc. ing.* Vladimirs Kirsanovs,
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesore *Dr. sc. ing.* Anna Volkova,
Tallinas Tehnoloģiju universitāte, Igaunija

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

APSTIPRINĀJUMS

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

Signe Allena-Ozoliņa (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir izstrādāts angļu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 59 attēli, septiņas tabulas, kopā 153 lappuses. Literatūras sarakstā ir 129 nosaukumi.

SATURS

Ievads	5
1. Literatūras apskats.....	9
1.1. Vairāku sektoru energosistēmu analīze	9
1.2. Energosistēmu attīstība specifiskos sektoros un apakšsektoros.....	10
Mājsaimniecību sektors	10
Enerģijas pārveides sektors.....	10
Rūpniecības sektors	11
Transporta sektors.....	12
2. Metodoloģija	13
2.1. TIMES – optimizācijas rīks energosistēmu modelēšanai.....	13
2.2. TIMES modeļa izstrāde valsts līmeņa energosistēmai.....	14
2.2.1. Specifisku sektoru un apakšsektoru modelēšana.....	15
2.2.2. Ievades dati no citiem modelēšanas rīkiem.....	23
2.2.3. Scenāriju izstrāde.....	24
2.2.4. Modeļa validācijas un jutīguma analīze.....	24
3. Rezultāti.....	26
3.1. Energopakalpojumu sniegšanas attēlojums dažādos detalizācijas līmeņos.....	26
3.1.1. Transporta veidu maiņa pasažieru transportā un atjaunojamās tehnoloģijas enerģijas pārveides sektorā	26
3.1.2. Resursu piegādes struktūra centralizētajā siltumapgādē (2.līmenis)	28
3.1.3. Resursu izmantošanas maiņa specifiskos apakšsektoros un sektoros (3. un 4. līmenis)	29
3.1.4. Energosektora resursu izmantošanas izmaiņas (5. līmenis).....	31
3.2. Sektoru un apakšsektoru ieguldījums klimatneitralitātes sasniegšanā	32
3.3. Specifisku izmaksu un nepieciešamo ieguldījumu novērtējums	34
Secinājumi.....	36
Izmantotā literatūra.....	39

IEVADS

Globālās sasilšanas sekas kļūst arvien spēcīgākas un pamanāmākas visos pasaules reģionos. Tāpēc politikas veidotāji izstrādā dažādus likumus, noteikumus, pasākumus un citus normatīvos regulējumus, lai ierobežotu globālās vidējās temperatūras pieaugumu. Enerģijas ražošana un patēriņš ir viens no galvenajiem globālās sasilšanas virzītājspēkiem, kas ir cieši saistīts ar pārējo nozaru attīstību.

Pētījuma aktualitāte un hipotēze

Pētījuma hipotēze ir šāda: ar spēkā esošajiem politikas instrumentiem un pasākumiem ir nepietiekami, lai sasniegtu Latvijas 2030. gada klimata mērķus. Lai līdz 2050. gadam sasniegtu nepieciešamo siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisiju samazinājumu klimatneitralitātes nodrošināšanai, ir nepieciešams papildus ieviest zinātniski pamatotus politikas instrumentus un pasākumus, kuru efektivitāte ir izvērtēta ilgtermiņā.

Enerģijas ražošana, eksports, imports, izmantošana un pārvaldība ir viens no stratēģiski svarīgākajiem jautājumiem jebkurā valstī. Tikpat nozīmīgs ir arī enerģētikas sektora radītais vides piesārņojums un energoapgādes drošības nozīme, jo īpaši pēdējos gados. Tas ir īpaši aktuāli Eiropā, tostarp Latvijā.

Neraugoties uz to, ka enerģētikas sektors ir balstīts liela mēroga būvniecībā, transporta tīklos un loģistikā, tas joprojām ir trausls un jutīgs pret politiskajām norisēm un ekonomiskajām pārmaiņām. Efektīvai pārvaldībai nepieciešama precīza un niansēta izpēte. Pēdējās desmitgadēs veiktie pētījumi enerģētikas jomā liecina par nepieciešamību attīstīt atjaunojamās vides tehnoloģijas, tomēr ieguldījumi joprojām tiek veikti tehnoloģijās, kas izmanto fosilo kurināmo.

2019. gadā visā pasaulē, salīdzinot ar 2010. gadu, neto SEG emisijas ir palielinājušās visās galvenajās nozarēs, un aptuveni 34 % no neto SEG emisijām radīja enerģētikas sektors. Lai gan SEG emisiju pieauguma temps no 2010. līdz 2019. gadam bija 1,3 % gadā, salīdzinot ar 2,1 % iepriekšējā desmitgadē, vidējais SEG emisiju apjoms gadā bija lielāks nekā jebkurā iepriekšējā desmitgadē (IPCC, 2023).

Ir nepieciešams attīstīt spēju pieņemt ilgtermiņa lēmumus, kas balstīti zinātniskos pētījumos jebkuras valsts, pašvaldības, uzņēmuma un pat mājsaimniecību līmenī.

Latvija ir bagāta ar atjaunojamiem resursiem, kam jāatrod optimāls lietojums, sadarbojoties uzņēmējdarbības sektoram, pašvaldībām, ministrijām un zinātniskajiem institūtiem. Būtiska ir tādu tehnoloģiju un risinājumu ieviešana, kas ir gan ekonomiski izdevīga, gan spēj sasniegt energoefektivitātes un vides aizsardzības mērķus. Enerģijas pieprasījums ir jānodrošina saprātīgi, lai saglabātu un uzlabotu apkārtējo vidi.

Lai gan katrs no mums ir atbildīgs par savu izvēli, valstij un pašvaldībām ir jārada piemērs, pieņemot stratēģiskus, zinātniski pamatotus lēmumus un atbalstot inovatīvus risinājumus atjaunojamo energoresursu izmantojošu tehnoloģiju ieviešanai.

Mērķis un uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir novērtēt politikas instrumentus un pasākumus (piemēram, fosilā kurināmā nodokļa palielināšanu, subsīdijas ēku siltināšanai un pāreju uz elektrotransportu)

klimatneitralitātes sasniegšanā 2050. gadā, modelējot un analizējot valsts enerģētikas sektoru kopumā, kā arī tautsaimniecības sektorus atsevišķi.

Galvenie uzdevumi mērķa sasniegšanai ir šādi:

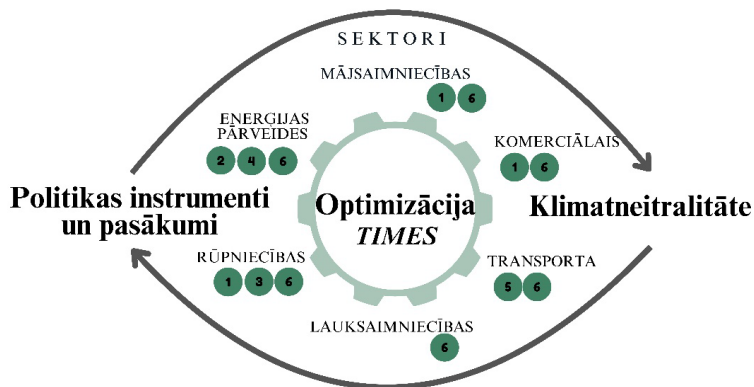
- pielāgot *TIMES* modelēšanas rīku Latvijas enerģētikas sektoram, lai atbalstītu zinātniski pamatotu lēmumu pieņemšanu gan valsts, gan uzņēmumu līmenī;
- iekļaut jaunāko tehnoloģiju datubāzi un citus parametrus modelēšanas struktūrā;
- analizēt dažādu politikas instrumentu un pasākumu ietekmi klimatneitralitātes sasniegšanā;
- veikt optimizāciju, lai atrastu izmaksu ziņā efektīvākos risinājumus klimata mērķu sasniegšanai;
- noteikt tādu enerģētikas sektora resursu sadalījumu, kas nodrošina Latvijas klimatneitralitātes mērķu sasniegšanu ar iespējami zemākām kopējām izmaksām.

Zinātniskā novitāte

Ir izstrādāta jauna *TIMES* modelēšanas pieeja, kas ietver inovatīvus risinājumus (komforta līmeņa faktora ieviešana transporta sektorā, pieprasījums pēc apsildāmiem m² dzīvojamā un komerciālajā sektorā, rūpnieciskā siltuma atgūšana rūpniecības sektorā u. c.), kas sniedz plašākas iespējas analizēt politikas instrumentu un pasākumu klāstu un veikt optimizācijas uzdevumus, lai noteiktu, kā sasniegt klimata mērķus ar minimālām kopējām izmaksām, un noteiktu nepieciešamo ieguldījumu apjomu klimatneitralitātes sasniegšanai 2050. gadā.

Zinātniskais darbs balstās trīs pīlāros: politikas instrumenti un pasākumi, klimatneitralitāte, kā arī optimizācija, izmantojot *TIMES* modelēšanas rīku (1. att.).

TIMES modelēšanas rīks ļauj, no vienas puses, novērtēt iepriekš definētu politikas instrumentu un pasākumu spēju sasniegt klimatneitralitāti. No otras puses, nosakot klimatneitralitāti kā optimizācijas uzdevumu, modelis palīdz atrast jomas, kurās izstrādāt politikas instrumentus un pasākumus ar zemākām kopējām izmaksām.



1. attēls. Pētniecības algoritma trīs galvenie pīlāri.
Skaitļi norāda zinātniskos rakstus (1. tab.), kuros analizēti sektori.

Optimizācija ietver visu tautsaimniecības sektoru analīzi: enerģijas pārveides, mājsaimniecības, komerciālo sektoru, transporta, lauksaimniecības un rūpniecības sektorus, kas detalizētāk izklāstīts 1. tabulā iekļautajos zinātniskajos rakstos.

1. tabula

Promocijas darbā izmantotie zinātniskie raksti

N. p. k.	Zinātniskā raksta nosaukums	Analizētais sektors
1.	<i>Adaptation of TIMES model structure to industrial, commercial and residential sectors</i>	Rūpniecības Komerciālais Mājsaimniecību
2.	<i>Integrated MARKAL-EFOM System (TIMES) Model for Energy Sector Modelling</i>	Enerģijas pārveides
3.	<i>Decarbonisation Pathways of Industry in TIMES Model</i>	Rūpniecības
4.	<i>Can energy sector reach carbon neutrality with biomass limitations?</i>	Enerģijas pārveides
5.	<i>Passenger transport shift to green mobility - assessment using TIMES model</i>	Transporta
6.	<i>Cost-Optimal Policy Strategies for Reaching Energy Efficiency Targets and Carbon Neutrality</i>	Viss energosektors

Lai noteiktu izmaksu ziņā efektīvus politikas instrumentus un pasākumus klimatneitralitātes sasniegšanai, kas ļauj sasniegt konkrētus energoefektivitātes un klimata mērķus, modeļi ir veiktas jaunas modifikācijas, tostarp:

- izveidotas sektoru sasaistes energosistēmas optimizācijai;
- iekļauta detalizēta, sektoriem specifiska tehnoloģiju datubāze;
- iekļauta siltuma atgūšana no rūpnieciskām iekārtām;
- izveidota transporta veidu pāreja dažādām pārvietošanās distancēm, iekļaujot sociālo aspektu;
- iekļauts pieprasījums pēc apsildāmiem un dzesējamiem m² mājsaimniecību un komerciālajā sektorā, lai nodrošinātu iespēju iekļaut modelēšanā pasākumus, kas vērsti uz energoefektivitātes paaugstināšanu.

Praktiskā nozīmība

Nodrošina zinātniski pamatotu politikas instrumentu un pasākumu izstrādi un ilgtermiņā izsvērtu lēmumu pieņemšanu klimatneitralitātes mērķa sasniegšanā:

- valsts pārvaldei – nodrošina pamatu nacionālo lēmumu pieņemšanai un politikas instrumentu un pasākumu izstrādei;
- pašvaldībām – kalpo par pamatu vietējās politikas lēmumu pieņemšanai, jo īpaši siltumapgādes sistēmu attīstībā;
- dažādu nozaru pārstāvjiem – palīdz izvērtēt investīcijas.

Pētījumu rezultātu aprobācija

1. Dzintars Jaunzems, Ieva Pakere, Signe Allena-Ozoliņa, Rītvards Freimanis, Andra Blumberga, Gatis Bažbauers **Adaptation of TIMES model structure to industrial, commercial and residential sectors** Environmental and Climate Technologies, 2020, Vol. 24, No. 1, 392–405 pp. ISSN 1691-5208. e-ISSN 2255-8837. doi:10.2478/rtuct-2020-0023.

2. Signe Allena-Ozoliņa, Ieva Pakere, Dzintars Jaunzems, Andra Blumberga, Gatis Bažbauers **Integrated MARKAL-EFOM System (TIMES) Model for Energy Sector Modelling** 2020 IEEE 61st International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2020): Conference Proceedings, Latvia, Riga, 5–7 November, 2020. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020, 456–462 pp. ISBN 978-1-7281-9511-7. e-ISBN 978-1-7281-9510-0. doi:10.1109/RTUCON51174.2020.9316623.
3. Signe Allena-Ozoliņa, Dzintars Jaunzems, Ieva Pakere, Andra Blumberga, Gatis Bažbauers **Decarbonisation Pathways of Industry in TIMES Model** Environmental and Climate Technologies, 2021, Vol. 25, No. 1, 318.–330. lpp. ISSN 1691-5208. e-ISSN 2255-8837. Available from: doi:10.2478/rtuct-2021-0023.
4. Signe Allena-Ozoliņa, Ieva Pakere, Dzintars Jaunzems, Andra Blumberga, Armands Grāvelsiņš, Dagnis Dubrovskis, Salvis Daģis **Can energy sector reach carbon neutrality with biomass limitations?** Energy, 2022, Vol. 249, Article number 123797. ISSN 0360-5442. Available from: doi:10.1016/j.energy.2022.123797.
5. Signe Allena-Ozoliņa, Ieva Pakere, Dzintars Jaunzems, Ritvars Freimanis, Andra Blumberga, Gatis Bažbauers **Passenger transport shift to green mobility – assessment using TIMES model** Environmental and Climate Technologies, 2022, Vol. 26, No. 1, pp. 341–356. ISSN 1691-5208. e-ISSN 2255-8837. Available from: doi:10.2478/rtuct-2022-0026.
6. Ieva Pakere, Ritvars Freimanis, Signe Allena-Ozoliņa, Pauls Asaris, Andrea Demurtas, Marine Gorner, Jessica Yearwood **Cost-Optimal Policy Strategies for Reaching Energy Efficiency Targets and Carbon Neutrality** Environmental and Climate Technologies, 2023, Vol. 27, No. 1, pp. 999–1014. ISSN 1691-5208. e-ISSN 2255-8837. Available from: doi:10.2478/rtuct-2023-0073.

Promocijas darba struktūra

Promocijas darba pamatā ir seši tematiski saistīti zinātniskie raksti, kas prezentēti un atzinīgi novērtēti dažādās zinātniskās konferencēs. Visi raksti ir pieejami starptautiskās citēšanas datubāzēs. Zinātniskajos rakstos aprakstīta modelēšanas pieeja politikas instrumentu un pasākumu identificēšanai un novērtēšanai, lai sasniegtu klimatneitralitāti enerģētikas sektorā.

Promocijas darbā ir ievads un četras nodaļas:

- literatūras apskats;
- pētījuma metodoloģija;
- rezultāti;
- secinājumi.

Darba pirmajā nodaļā iekļauts literatūras apskats par enerģētikas sistēmas transformācijas aktualitāti ceļā uz klimatneitralitāti. Otrajā nodaļā aprakstīta pētījumu metodoloģija politikas instrumentu un pasākumu ieviešanai un novērtēšanai dažādos sektoros. Trešajā nodaļā aprakstīta energoresursu izmantošanas maiņa dažādos līmeņos – tehnoloģiskajā, procesu, apakšsektoru, sektoru un, visbeidzot, kopējā enerģētikas sektorā. Pēdējā nodaļā definēti galvenie secinājumi.

1. LITERATŪRAS APSKATS

Eiropas Savienības (ES) Zaļā kursa galvenie mērķi ir līdz 2030. gadam samazināt siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisijas par 55 %, salīdzinot ar 1990. gadu, un līdz 2050. gadam panākt klimatneitralitāti (EK, 2019). Iepriekš veiktie pētījumi par ES Zaļā kursa mērķiem aptver dažādus aspektus, tostarp pienākumu sadales regulējuma un vispārēji saistošas politikas efektivitāti (*Veum un Bauknecht*, 2019), taisnīgumu un vēlamu mērķu līmeni (*Hof et al.*, 2016) un to, kā šie mērķi iezīmē pāreju uz tehnoloģiski neitrālu ES klimata politiku (*Fitch-Roy et al.*, 2019).

Pētījumi liecina, ka ir nepieciešama pārvaldības sistēma, kas nodrošinātu to, ka dalībvalstis dod ieguldījumu ES līmeņa mērķa sasniegšanā (*Resch et al.*, 2019). Klimata pasākumu īstenošanai un noteikto ES mērķu sasniegšanai ir būtiska ietekme uz kopējo energosistēmas darbību (*Rafiee et al.*, 2021; *Simoes et al.*, 2017), vidi (*Meessen*, 2020) un ekonomiku (*Temursho et al.*, 2020), kā arī uz konkrētiem apakšsektoriem (*Li et al.*, 2020; *Runge-Metzger un Wehrheim*, 2019; *Siddi*, 2021), kas ir jāņem vērā.

Lai īstenotu ES klimata mērķus, pētnieki ir pārbaudījuši dažādus politikas virzienus un scenārijus, izstrādājot vadlīnijas politikas veidotājiem un meklējot izmaksu ziņā efektīvus atjaunojamās enerģijas risinājumus (*Papadogeorgos et al.*, 2017). *OECD* ziņojumā (*OECD*, 2019) norādīts, ka, lai gan Latvija ir sasniegusi augstu atjaunojamo energoresursu īpatsvaru, vēl ir tāls ceļš līdz ilgtspējīgākajai pieejamo resursu izmantošanai. Arī cits pētījums (*Dolge un Blumberga*, 2021) apstiprināja, ka esošā klimata politika nav pietiekama, lai sasniegtu Zaļā kursa mērķus Latvijā.

Lai gan *TIMES* ir spēcīgs modelēšanas rīks, dažos rakstos tiek apspriesta nepieciešamība ņemt vērā ne tikai tehnoloģiju attīstību, bet arī atgriezeniskās saites, sociālās uzvedības izmaiņas un citus faktorus (*Bolwig et al.*, 2018). Daži *TIMES* modeļi ir uzlaboti, optimizācijas modeļi pievienojot patērētāju uzvedību, izmantojot sociālās aptaujas (*Li et al.*, 2018; *Reveiu et al.*, 2015; *Cayla un N. Maži*, 2014).

1.1. Vairāku sektoru energosistēmu analīze

Francijā pētnieki ir izstrādājuši integrēto *MARKAL-EFOM* sistēmas (*TIMES*) modeļi, lai novērtētu iespēju panākt negatīvu emisiju līmeni enerģētikas nozarē, izmantojot augus oglekļa uztveršanai un uzglabāšanai. Pētījums liecina, ka šīs tehnoloģijas būs nozīmīgas, lai sasniegtu Eiropas emisiju mērķus (*Selosse un O. Ricci*, 2014). Lai analizētu nozaru sasaistes potenciālu Eiropā, ir veikta divu modeļu – *Dispa-SET* un *JRC-EU-TIMES* – mīkstā sasaiste (*soft-linkage*) (*Pavičević et al.*, 2020).

Ķīnas pētnieki ir izveidojuši daudznazaru enerģētikas modeļi, kurā apvienoti elektroenerģijas, transporta, siltumapgādes un rūpniecības sektori, lai modelētu energosistēmas dekarbonizāciju (*Burandt et al.*, 2019). Bieži pētnieki apvieno dažādu veidu modeļus, piemēram, tehniski detalizētus augšupvērstus un lejupvērstus modeļus, kas simulē pieprasījumu un cenas enerģijai (*Andersen et al.*, 2019; *Wu et al.*, 2018). Sistēmdinamikas pieeja ir izmantota, lai modelētu pāreju no fosilā kurināmā uz atjaunojamiem energoresursiem, ņemot vērā dažādus

tehniski ekonomiskos parametrus, politiskos un sociālos aspektus, kā arī cilvēku uzvedību un ieradumus (Grāvelsiņš u. c., 2018).

Vācijā pētnieki ir izstrādājuši *TIMES* modeli, lai uzlabotu lēmumu pieņemšanu saistībā ar investīcijām (Tash et al., 2019). Enerģijas sistēmas modelis ir izveidots arī Dānijai (Balyk et al., 2017).

2016. gadā veiktajā pētījumā tika publicēts scenārijs, kas paredz līdz 2050. gadam sasniegt 100 % atjaunojamās enerģijas īpatsvaru ES (Connolly et al., 2016), parādot, ka biomasas izmantošana enerģijas ražošanai nav galvenais pamats ES pārejai uz atjaunojamajiem energoresursiem, kā tas tika norādīts iepriekšējos pētījumos (JRC, 2015). Arī attiecībā uz Latviju dekarbonizācija ir iespējama ar ierobežotu biomasas izmantošanu (Allena-Ozoliņa u. c., 2022). Iepriekšējos pētījumos secināts, ka Latvijā ir augsts atjaunojamo energoresursu (AER) integrācijas potenciāls un ka mērķtiecīga politika var samazināt CO₂ emisijas par 70 % līdz 2050. gadam (Blumberga u. c., 2016). Turklāt efektīvas politikas īstenošana ceļā uz bioekonomiku sniedz iespēju izmantot vietēji pieejamos zemas kvalitātes bioresursus augstākas pievienotās vērtības produktu ražošanai (Allena-Ozoliņa u. c., 2017).

Integrētās *MARKAL-EFOM* sistēmas (*TIMES*) lineārās optimizācijas rīks tiek plaši izmantots, lai simulētu enerģētikas sistēmu nākotnes transformācijas iespējas (Zhu un Ming, 2022; Allena-Ozoliņa u. c., 2022; Salvucci et al., 2018). Tajā ievadītajiem datiem, tādiem kā cenai un tehniskajiem parametriem, ir liela ietekme uz modelēšanas rezultātiem; tādēļ ir ļoti nozīmīgi modelēšanas rīkus padarīt pārskatāmus un visus ievades datus publiski pieejamus, jo lielākā daļa ievades datu ir pieņēmumi, un tie būtu jāturpina pilnveidot zinātniskās diskusijās (Connolly et al., 2016; Lima, 2019).

1.2. Energosistēmu attīstība specifiskos sektoros un apakšsektoros

Mājsaimniecību sektors

Daudzās valstīs ir izstrādāti specifiski sektoru enerģijas modeļi, piemēram, mājsaimniecību sektora modelis, kas analizē un novērtē atjaunojamās enerģijas sistēmu ieviešanu reģionālajam pieprasījumam (Han un Kim, 2017). Apvienotajā Karalistē ir veiktas daudzas simulācijas, lai noteiktu siltumenerģijas pieprasījumu un simulētu nākotnes pieprasījumu, grupējot dzīvojamo sektoru (McCallum et al., 2019). Arī Kvebekā (Kanāda) mājsaimniecību elektroapgāde, kas jau tagad ir zemā oglekļa dioksīda emisiju līmenī, ir modelēta, izmantojot kombinētās ēku modeļu simulācijas, lai izpētītu siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisiju samazināšanas iespējas (Astudillo et al., 2017).

Lielbritānijas pētnieki Apvienotajā Karalistē ir izstrādājuši *TIMES* modeļa sistēmu dzīvojamo ēku sektoram, lai analizētu mājokļu īpašnieku izvēles attiecībā uz apkures tehnoloģijām (Li et al., 2018).

Enerģijas pārveides sektors

Ir daudzi pētījumi, kuros analizētas dažādas enerģētikas sektora daļas, piemēram, elektroenerģijas ražošana. Vairākas Eiropas valstis ir definējušas mērķi 2050. gadā sasniegt oglekļa neitralitāti. Vienu no pirmajiem konceptuālajiem pētījumiem, kurā analizēta 100 % atjaunojamās enerģijas sistēma, 2010. gadā Lund et al. veica Dānijai (Lund et al., 2009).

Citas Ziemeļvalstis ir izstrādājušas plānu oglekļa neitralitātes sasniegšanai, paātrinot dekarbonizācijas procesu energoietilpīgajās nozarēs, izmantojot rūpnieciska mēroga tehnoloģijas, stimulus alternatīvām tehnoloģijām un paaugstinātas emisiju samazināšanas prasības (CE, 2020). Turklāt Somijas valdība ir noteikusi ļoti vērienīgu mērķi virzīties uz oglekļa neitralitāti līdz 2035. gadam (Khosravi et al., 2020).

Elektroenerģijas uzglabāšanas nozīmi atjaunojamās enerģijas lielāka īpatsvara nodrošināšanā Eiropā ir analizējuši F. Cebulla u. c. (Cebulla et al., 2017). Cits pētījums analizē nepieciešamo enerģijas rezervi gadījumā, ja Eiropā 100 % apmērā tiek izmantota atjaunojamā enerģija, ņemot vērā dažādus saslēgumus elektrotīklam un uzglabāšanas iespējas (Steinke et al., 2013). Pētījumi par 100 % atjaunojamo energoresursu energosistēmu Eiropā, koncentrējoties uz Nīderlandi (Zappa et al., 2019), liecina, ka, lai sasniegtu šo mērķi, ir nepieciešams palielināt atjaunojamo energoresursu (AER) un pārrobežu pārvades jaudu, kā arī izmantot tehnoloģijas ar augstāku efektivitāti.

Vācijas enerģētikas pārejas (*Energiewende*) mērķis ir līdz 2050. gadam izveidot konkurētspējīgu ekonomiku ar zemu oglekļa dioksīda emisiju līmeni, līdz 2022. gadam no enerģijas bilances izslēdzot kodolenerģiju (Schmid et al., 2016). Wiese et al. (Wiese et al., 2022) ir salīdzinājuši iepriekšējo pētījumu rezultātus par dekarbonizācijas stratēģijām Vācijai.

Pētījumu rezultāti par Apvienotās Karalistes siltumapgādes dekarbonizāciju liecina, ka tai ir nepieciešams, lai ar siltumapgādi saistītās CO₂ emisijas no ēkām līdz 2050. gadam sasniegtu gandrīz nulles līmeni, kā arī par 70 % jāsamazina emisijas no rūpniecības (Chaudry et al., 2015).

Dekarbonizācijas modelis Itālijai liecina, ka emisijas var samazināt par 79–97 %, salīdzinot ar 1990. gada līmeni, palielinot atjaunojamo energoresursu īpatsvaru, ievērojamam elektrifikācijas palielinājumam un enerģijas tehnoloģiju ražošanai (Borasio un Moret, 2022).

Rūpniecības sektors

Lai analizētu rūpniecības sektora dekarbonizācijas scenārijus, tika izveidots augšupejošās simulācijas modelis *FORECAST* (Fleiter et al., 2018). Cits modelis tika izmantots 18 Latvijas galveno rūpniecības apakšsektoru energoefektivitātes rādītāju izpētei, kur energoefektivitātes indeksa izveidei tika izmantota salikto indeksu metodoloģija (Dolže u. c., 2020). Lai pētītu 11 Eiropas Savienības valstu energoefektivitātes un ekonomiskās izaugsmes saistību, tika izmantots nelineārs autoregresijas modelis ar sadalīto nobīdi (Marques et al., 2019).

Global TIMES modelis ir izmantots analīzei par Ķīnas, Indijas un Rietumeiropas rūpniecības sektoru darbības pāreju saskaņā ar Parīzes nolīguma 2 grādu mērķi. (Wang un Chen, 2019).

TIMES balstīts tehniski ekonomiskais modelis ir izveidots arī cementa nozarei Šveicē (Obrist et al., 2020). Citā pētījumā tika izveidota detalizēta tehnoloģiskā datubāze pieciem energoietilpīgākajiem rūpniecības apakšsektoriem – dzelzs un tērauda, krāsaino metālu, nemetālisko minerālu, ķīmisko vielu, celulozes un papīra ražošanai (Lerede et al., 2021).

Spānijā tika novērtēta Eiropas Rūpniecisko emisiju direktīvas ietekme uz gaisā izplūstošo emisiju vērtībām (Calvo et al., 2021). Cits pētījums par cementa rūpniecību tika veikts Francijā, kur tika izveidots energomodelis, lai novērtētu nākotnes enerģijas ražošanu cementa rūpniecībā starptautiskā un reģionālā mērogā (Hache et al., 2020). Tika izveidoti energosistēmas modeļi

un materiālu plūsmas modelis, lai novērtētu ietekmi uz cementa rūpniecības darbību globālās sasilšanas ierobežošanai (*Dhar et al.*, 2020). Enerģijas taupīšanas un CO₂ samazināšanas potenciāls tika analizēts Vācijas cementa rūpniecībā (*Brunke un Blesl*, 2014), un globāli integrētajam novērtējuma modelim tika pievienoti specifiski cementa rūpniecības raksturlielumi, lai analizētu enerģijas patēriņu un SEG emisijas (*Kermeli et al.*, 2019).

Daudz mazāk pētījumu ir veltīti nozarēm, kas nav energoietilpīgas, piemēram, pārtikas rūpniecībai. ASV pārtikas rūpniecībā tika izveidots sistēmdinamikas modelis enerģijas ietaupījumu novērtēšanai (*Xu un Szmerekovsky*, 2017), savukārt Francijas pārtikas un dzērienu rūpniecībai tika izveidots detalizēts augšupejošs enerģijas modelis, lai analizētu energoefektivitāti un CO₂ emisiju apjomu (*Seck et al.*, 2013). Resursu efektivitāte pārtikas rūpniecībā novērtēta, izmantojot optimizācijas modeli citā pētījumā (*Jonkma et al.*, 2020).

Transporta sektors

Transporta sektora modelēšanā plaši izmanto sistēmdinamikas modelēšanas pieeju. Latvijas gadījumā sistēmu dinamikas modeļi ir izstrādāti, lai analizētu CO₂ emisiju samazināšanas potenciālu autotransportā (*Barisa un Rošā*, 2018; *Barisa un Rošā*, 2018) un izpētītu iespējamo biometāna izmantošanas veicināšanu (*Barisa u. c.*, 2020). Sistēmdinamikas modelis ir izveidots, lai palīdzētu politikas veidotājiem testēt dažādus politikas scenārijus ceļu satiksmes drošības uzlabošanai ASV (*Alirezaei et al.*, 2017). Pāreja uz alternatīvām degvielām (*Shafiei et al.*, 2015) un biodegvielu potenciāls (*Shafiei et al.*, 2015) tika modelēts integrētā sistēmas dinamikas modelī Islandei.

Lineārās optimizācijas *TIMES* modelis iepriekš tika izmantots, lai novērtētu Eiropas autotransporta nozares jutīgumu, ņemot vērā dažādas ieguldījumu izmaksu un transportlīdzekļu efektivitātes variācijas (*Lerede et al.*, 2021). Papildus tiek izmantota stohastiskā daudzkritēriju analīze, lai novērtētu modelēšanas rezultātus saskaņā ar ekonomiskajiem un vides kritērijiem, kas papildina izmaksu minimizācijas pieeju. Citā pētījumā sniegta patērētāju uzvedības aspekta ieviešana *TIMES* optimizācijas modelī (*Ramea et al.*, 2018).

Skandināvijas transporta nozare ir novērtēta, izmantojot *TIMES* modeli (*Salvucci et al.*, 2019). Arī citos darbos ir atspoguļota modālās pārejas nozīme, lai sasniegtu oglekļa neitralitāti transporta nozarē (*Tattin et al.*, 2018; *Salvucci et al.*, 2018).

Lai mazinātu klimata pārmaiņas, transporta sektorā nepietiek tikai ar tehnoloģiju izmaiņām un degvielas maiņu, politikai jākoncentrējas uz uzvedības izmaiņām transporta izmantošanā (*Green et al.*, 2012). Parasti *TIMES* modelis kā optimizācijas rīks neietver dažādu pārvietošanās veidu konkurenci, taču, ieviešot tādos elementus kā ceļojuma laika budžets, ceļošanas ātrums, komforts u. c., to var izmantot plašākas politikas modelēšanai (*Brown et al.*, 2018; *Ollier et al.*, 2022; *Dalla Longa et al.*, 2018).

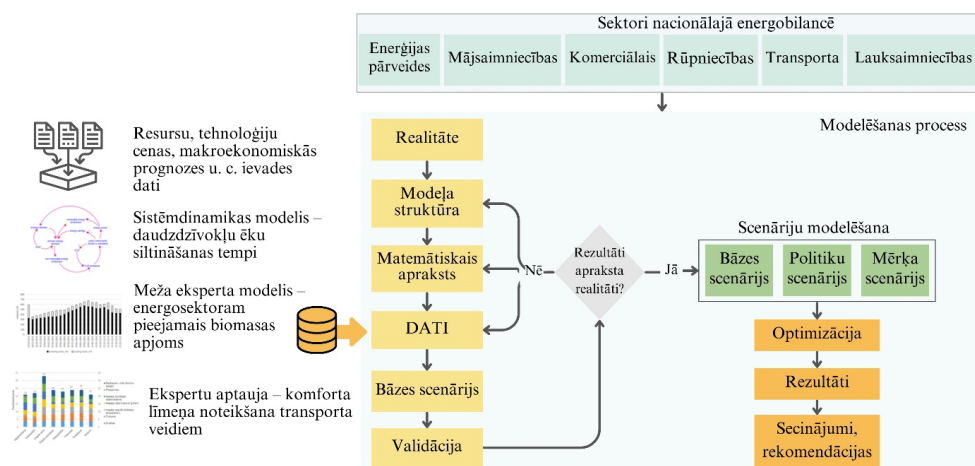
Veiktie pētījumi liecina, ka ar enerģētikas sektora attīstību saistītie jautājumi ir nozīmīgi reģionu, valstu un sektoru kontekstā. Turklāt spēcīgu modelēšanas rīku izstrāde ir svarīga arī dažāda līmeņa lēmumu pieņemšanai. Arī Latvijā ir nepieciešams izstrādāt metodoloģiju, kas spētu atrast enerģētikas sektora attīstības virzienu, lai nodrošinātu Eiropas Klimata likumā noteikto saistību izpildi – līdz 2050. gadam sasniegt klimatneitralitāti. Mazai ekonomikai, kāda ir Latvijai, ir īpaši svarīgi rast risinājumus, kā šo mērķi sasniegt ar minimālām kopējām izmaksām. Un tas tiek piedāvāts šī promocijas darba pētījumā.

2. METODOLOĢIJA

2.1. *TIMES* – optimizācijas rīks energosistēmu modelēšanai

Vertikāli integrēts modeļa ģenerators *TIMES* tiek izmantots visā pasaulē, lai modelētu dažādas vietējās, valsts un globālās enerģētikas sistēmas. Tā mērķis ir atrast minimālās kopējās energopakalpojumu izmaksas, ņemot vērā dažādus ievades datus: energopakalpojumu pieprasījumu, esošo enerģijas krājumu aplēses, esošo iekārtu īpašības un nākotnes tehnoloģijas. Turklāt *TIMES* ļauj analizēt dažādus enerģētikas un vides scenārijus un politikas pasākumus (Loulou *et al.*, 2016).

TIMES ir pazīstams arī kā augšupejošs lineārās programmēšanas rīks, ko izmanto ilgtermiņa energosistēmu plānošanai, lai analizētu dažādu scenāriju ietekmi. Tas optimizē visu energosistēmu, tostarp piegādes un pieprasījuma pakalpojumus, minimizējot kopējās izmaksas attiecīgajā modelēšanas periodā (Loulou *et al.*, 2016). Lai sasniegtu promocijas darba mērķi, par modelēšanas rīku tika izvēlēts *TIMES*, pateicoties tā spēcīgajām tehniskajām un ekonomiskajām iespējām, kas ļauj analizēt visu energosistēmu un atrast visekonomiskāko tehnoloģiju un resursu sadalījumu, ļaujot novērtēt plānoto politikas instrumentu un pasākumu ietekmi.



2.1. attēls. Pētījuma algoritms un modelēšanas posmi.

Promocijas darba pētījumā izmantotā metodoloģija ietver vairākus posmus (2.1. att.). Pirmie posmi ir realitātes apraksts, modeļa struktūras izstrāde, matemātiskais apraksts un modeļa ievades datu vākšana. Nākamajā posmā tiek apstrādāts un apstiprināts references scenārijs. Ja validācijas rezultāti pietiekami labi neapraksta reālo situāciju, tiek pārskatīta un uzlabota modeļa struktūra, matemātiskais apraksts un/vai dati. Ja validācijas rezultāti pietiekami labi atbilst reālajai situācijai, var veikt scenāriju optimizāciju. Pēdējā posmā tiek apkopoti rezultāti un apkopoti secinājumi.

2.2. TIMES modeļa izstrāde valsts līmeņa energosistēmāi

Izveidotais *TIMES Latvia* modelis ir lineārās optimizācijas rīks, kas izstrādāts un pilnveidots, lai raksturotu enerģētikas sektoru un attiecīgos apakšsektoros (Zhu un Ming, 2022; Allena-Ozoliņa u c., 2022). *TIMES Latvia* energosistēmas modelī ir attēlota pilna energosistēma no resursu piegādes līdz galapatēriņa energopakalpojumu pieprasījumam, piemēram, telpu apkurei, ražošanas procesiem un personīgajam, un kravu transportam (pasažieru vai tonnkilometros). Modelī attēlots plašs enerģijas un emisiju preču, tehnoloģiju un infrastruktūras kopums (Jaunzems u. c., 2020). Tomēr modelī nav iekļautas detalizētas analīzes un prognozes citiem sektoriem, piemēram, lauksaimniecībai un atkritumu apsaimniekošanai.

Modelēšanas procesā tiek analizēts katrs sektors atsevišķi, veicot uzlabojumus katrā no tiem, tādējādi tuvinot modeli reālajai situācijai, lai iegūtu pilnīgākus rezultātus un iekļautu dažādus politikas instrumentus un pasākumus, piemēram, sektoram specifisku finansējumu, nodokļus, SEG mērķi u. tml. References energosistēma apraksta Latvijas energosistēmas struktūru un enerģijas plūsmas, aptverot primārās enerģijas resursus, pārveides tehnoloģijas (piemēram, elektroenerģijas un siltumenerģijas ražošanas tehnoloģijas), pārvades un sadales infrastruktūru (piemēram, elektrotīklu, siltumtīklu vai gāzes cauruļvadus), galapatēriņa tehnoloģijas (piemēram, katlus, siltumsūkņus, automašīnas) un energopakalpojumu pieprasījumu. Daži ierobežojumi attiecībā uz pieejamajiem enerģijas avotiem ir iegūti kā ievadparametri no iepriekšējos pētījumos izmantotā mežsaimniecības pārvaldības modeļa un lauksaimniecības modeļa (Allena-Ozoliņa u. c., 2022).

TIMES Latvia modelis tika izstrādāts pakāpeniski, analizējot katru sektoru, iekļaujot jaunāko pieejamo tehnoloģiju un citu parametru datubāzes un izveidojot sektoram specifiskus uzlabojumus. Šāda pieeja nodrošina iespēju analizēt dažādu politikas instrumentu un pasākumu ietekmi. Zinātniskie raksti tika rakstīti secīgi pa nozarēm, kā redzams 2.2. attēlā.

	1.	2.	3.	4.	5.	6.
Zinātniskais raksts	Adaptation of <i>TIMES</i> model structure to industrial, commercial and residential sectors	Integrated MARKAL-EFOM System (<i>TIMES</i>) Model for Energy Sector Modelling	Decarbonisation Pathways of Industry in <i>TIMES</i> Model	Can energy sector reach carbon neutrality with biomass limitations?	Passenger transport shift to green mobility assessment using <i>TIMES</i> model	Cost-optimal sector integration and energy balancing strategies for reaching carbon neutrality
Analizētais sektors	RŪPNIECĪBAS KOMERCIĀLAIS MĀJSAIMNIECĪBU	ENERĢIJAS PĀRVEIDES	RŪPNIECĪBAS	ENERĢIJAS PĀRVEIDES	TRANSPORTA	VISS ENERGOSEKTORS
Galvenie modeļa uzlabojumi	- rūpniecības - daļjums apakšsektoros +ETS - komerciālais, mājsaimniecību - daļjums apakšsektoros, siltumenerģijas, dzesēšanas pieprasījums uz platību	- tehnoloģiju datu bāze - daļjums Rīga, Latvija, - izdalīts ETS	- tehnoloģiju datu atjaunināšana - siltuma atgūšanas tehnoloģijas - pieprasījuma prognozes atjauninājums	- dati no SD modeļa (EE, BASE) - dati no <i>Forest Exper</i> (pieejamais biomasas apjoms) - ogļekļa nodokļa palielinājums	- pieprasījums distancēs - koforma parametrs - ceļa infrastruktūra - uzpildes stacijas	- apkures atjauninājums - importa, eksporta atjauninājums - IKP pieauguma atjauninājums - atspīdinātās grantu programmas - nodokļi

2.2. attēls. Modeļa izstrādes secība zinātniskajos rakstos.

Rūpniecības, komerciālais un mājsaimniecību sektors ir aprakstīti pirmajā rakstā, kurā analizēti un iezīmēti galvenie modeļa uzlabojumi, piemēram, sektoru sadalījums apakšsektoros un ES emisijas kvotu tirdzniecības sistēmas (ETS) rūpniecības daļas nodalīšana, kā arī dzesēšanas un apkures parametru pievienošana komerciālajām un mājsaimniecību sektoriem atkarībā no kvadrātmetriem. Otrajā rakstā aplūkots enerģijas pārveides sektors, detalizēti

aprakstot galvenos tehnoloģiskos datus un sadalot ETS un ne ETS apakšsadaļās, kā arī nošķirot Rīgu un pārējo Latviju. Trešajā rakstā uzmanība pievērsta rūpniecības sektoram, izceļot būtiskākos uzlabojumus tehnoloģisko datu atjaunināšanā. Arī ceturtajā rakstā apskatīts enerģijas pārveides sektors, taču tajā iekļauta integrācija ar citiem modelēšanas rīkiem un CO₂ nodokļa un kvotu palielināšana. Strukturālās izmaiņas transporta sektorā ir aprakstītas piektajā rakstā, savukārt sestajā – viss enerģētikas sektors. Modelēšanas pieeja katram sektoram ir detalizēti aprakstīta turpmākajās sadaļās.

2.2.1. Specifisku sektoru un apakšsektoru modelēšana

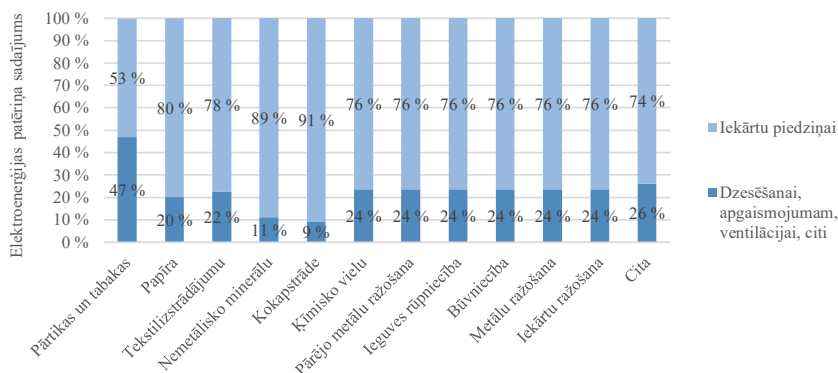
Nākamajās sadaļās ir aprakstīta modelēšanas pieeja un strukturālie uzlabojumi rūpniecības, komerciālajā, mājsaimniecību, enerģijas pārveides un transporta sektorā, īpaši attiecībā uz pasažieru pārvietošanos pa sauszemi.

Rūpniecības sektora modelēšana

Latvija ir daļa no ETS. Līdz ar to gandrīz katras rūpniecības sektora pieprasījums Latvijā ir sadalīts ETS sektora un ne ETS sektora patēriņā. Latvijas ETS sistēma pārsvarā aptver elektrostacijas un citas sadedzināšanas iekārtas ar nominālo siltuma jaudu virs 20 MW. ETS sistēmā ir iekļautas arī specifiskas iekārtas, piemēram, koksa krāsnis, dzelzs un tērauda, cementa klinkera un citas tehnoloģijas (EP, 2015). 2017. gadā ETS sektors sedza aptuveni 15,5 % no kopējā resursu pieprasījuma Latvijā, kas atbilst 5561 TJ. Ne ETS sedza pārējo pieprasījumu, t. i., 84,5 % jeb 30 335 TJ (CSP, 2017).

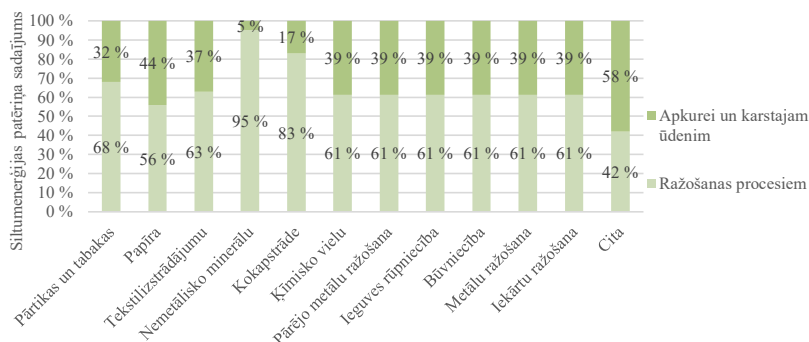
Lai noteiktu katram procesam izmantoto kopējo enerģijas avotu daļu, tika izmantoti rūpniecības uzņēmumu no 2016. līdz 2018. gadam veikto energoauditu dati. Kopumā tika analizētas 122 dažādu uzņēmumu enerģijas bilances, lai noteiktu dažādu enerģijas avotu sadalījumu.

Rūpniecības sektors ir Latvijas trešais lielākais enerģijas patērētājs, kas 2017. gadā veidoja 21 % no kopējās patērētās gala enerģijas, no kuriem 38 % veidoja koksnes biomasa, 18 % elektroenerģija, 14 % naftas produkti un 13 % dabasgāze. Rūpniecības sektors Latvijā ietver 13 apakšsektoros, no kuriem lielākā daļa enerģijas tiek izmantota koksnes un koka izstrādājumu ražošanā.



2.3. attēls. Enerģijas patēriņa struktūra rūpniecības apakšsektoros.

TIMES modelī elektroenerģijas patēriņš rūpniecības sektorā ir sadalīts divās daļās – elektroenerģija, kas tiek izmantota iekārtu piedziņai, lai nodrošinātu ražošanas procesus, un palīgprocesu – dzesēšana, apgaismojums, ventilācija un citi enerģiju patērējoši procesi. Lielākajā daļā rūpniecības apakšsektoru aptuveni 77–81 % jaudas tiek izmantota iekārtu piedziņai (2.3. att.). Lielāks elektroenerģijas patēriņa īpatsvars iekārtu piedziņai ir nemetālisko minerālu un kokapstrādes apakšsektoros. Savukārt mazāks elektroenerģijas īpatsvars iekārtu piedziņai ir pārtikas un tabakas ražošanā – tikai 54 %.



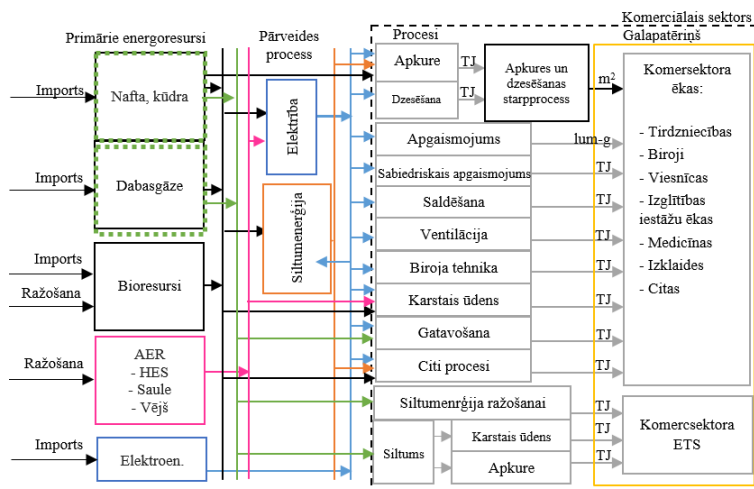
2.4. attēls. Siltuma patēriņa struktūra rūpniecības apakšsektoros.

Siltuma patēriņš *TIMES* modelī ir sadalīts siltumenerģijā, kas tiek izmantota telpu apkurei un karstā ūdens sagatavošanai, un procesa siltumā, kas tiek izmantota ražošanas procesos. Atšķirības siltumenerģijas patēriņa sadalījumā apakšsektoros ir lielākas, salīdzinot ar elektroenerģijas patēriņu (2.4. att.). Dažos apakšsektoros procesa siltumenerģijai (transporta iekārtu ražošanai) tiek izmantota mazāk nekā puse siltuma. Tomēr ir apakšsektori, kuros pat vairāk nekā 90 % siltumenerģijas ir izmantoti ražošanas procesos – nemetālisko minerālu ražošanā un ieguvē. Modeļa rezultātu kvalitāte ir cieši saistīta ar pieņēmumiem, kas definēti ārpus modeļa struktūras. Viens no būtiskākajiem pieņēmumiem rūpniecības sektoram ir apakšsektoru enerģijas pieprasījuma trajektorija līdz 2050. gadam. Enerģijas pieprasījums tautsaimniecības sektoros ir atkarīgs no vairākiem virzītājspēkiem, piemēram, IKP, nozaru ekonomiskā pieauguma, iedzīvotāju skaita, platības u. c. Rūpniecības sektora enerģijas pieprasījuma pamatā ir izmantota sektoru pievienotās vērtības prognoze Latvijai (*Capros et al.*, 2016). Konkrētāks pieprasījums ir sektoros, ko nosaka enerģētikas pakalpojumi, piemēram, enerģija procesa siltumam, iekārtu piedziņai, ēku siltums un karstais ūdens, izejvielas un citas. Saskaņā ar veiktajiem pētījumiem un prognozēm par sektora attīstību kopējais pieprasījums pēc energopakalpojumiem rūpniecības sektorā 2050. gadā, salīdzinot ar 2017. gadu, palielinās par aptuveni 31 %. Pieprasījuma pieaugums pēc energopakalpojumiem koksnes apakšnozarē ir ap 30 %, pārtikas apakšnozarē – ap 21 %, savukārt derīgo izrakteņu apakšnozarē – ap 56 %.

Komerčiālā sektora modelēšana

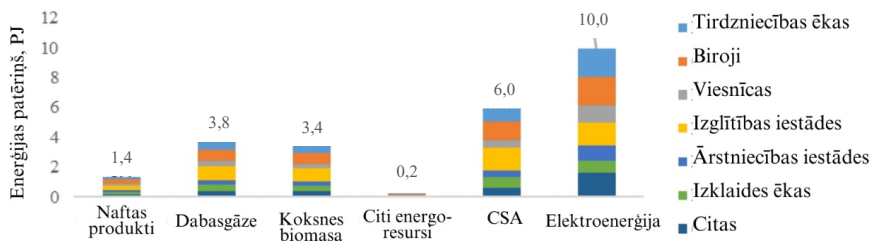
Komerčiālajā sektorā iekļautas dažādu veidu ēkas un no tām izrietošo energoresursu patēriņa līmeņi. Tāpēc, pamatojoties uz ēku klasifikāciju (MK, 2018), tas ir sadalīts septiņās apakšsektoros.

Resursu patēriņš gandrīz visiem komerciālajiem apakšsektoriem ir sadalīts 10 procesos – apkure, dzesēšana, ēdiena gatavošana, apgaismojums, publiskais apgaismojums, saldēšana, ventilācija, ūdens sildīšana, biroja tehnika un citi. Tika izveidots jauns apkures un dzesēšanas pieprasījuma process – apkures un dzesēšanas platība (m^2), lai pievienotu precīzākus pasākumus, kas mērķēti uz ēku energoefektivitāti. Lai nodrošinātu pareizu procesa attīstību *TIMES* modelī, apkures un dzesēšanas procesi ir nodalīti kā pirmsprocesi apkures un dzesēšanas zonām, kas tagad tiek definētas kā galapieprasījums (2.5. att.).



2.5. attēls. Komerciālā sektora procesu shēma.

Tāpat kā citus pieprasījuma procesus, pieprasījumu pēc apkures un dzesēšanas platības (m^2) ietekmē tādi pieprasījuma virzītāji kā IKP pieaugums. Konkrētas ražotnes parādās komerciālajā sektorā kā ETS daļa, kas galvenokārt nodrošina dažādus ražošanas procesus. *TIMES* modelī tie ir izdalīti atsevišķi ar līdzīgiem procesiem kā rūpniecības sektorā – siltumenerģija ražošanas procesam, apkure un karstais ūdens.

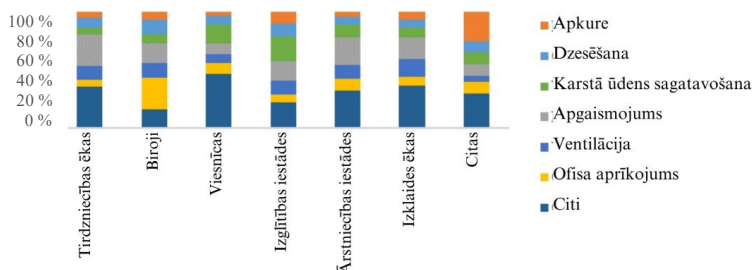


2.6. attēls. Enerģijas patēriņa struktūra komerciālajā sektorā 2017. gadā (CSP, 2021).

Komerčiālais sektors 2017. gadā izmantoja 15 % no kopējās galaenerģijas, kas ir 25 PJ. Komerciālais sektors ir sadalīts septiņās kategorijās, pamatojoties uz ēku klasifikāciju (MK, 2018). Elektroenerģija ir galvenais komerciālajā sektorā izmantotais resurss, sasniedzot gandrīz 10 PJ un veidojot 43 % no kopējā elektroenerģijas galapatēriņa 2017. gadā. 27 % no kopējā

dabaszāzes galapatēriņa, kas vienāds ar 3,8 PJ, tika izlietoti komerciālajā sektorā, kur lielākā daļa tika patērēta izglītības ēkās un birojos (2.6. att.).

Komerčiālajos apakšsektoros atšķiras elektroenerģijas patēriņa struktūra (2.7. att.). Mazumtirdzniecības ēkās, kā arī medicīnas iestāžu un izklaides ēkās lielākā daļa elektroenerģijas tiek tērēta apgaismojumam. Biroju ēkās visvairāk enerģijas patērē biroja tehnika, savukārt viesnīcu un izglītības ēkās lielākā daļa tiek izmantota ūdens sildīšanai.

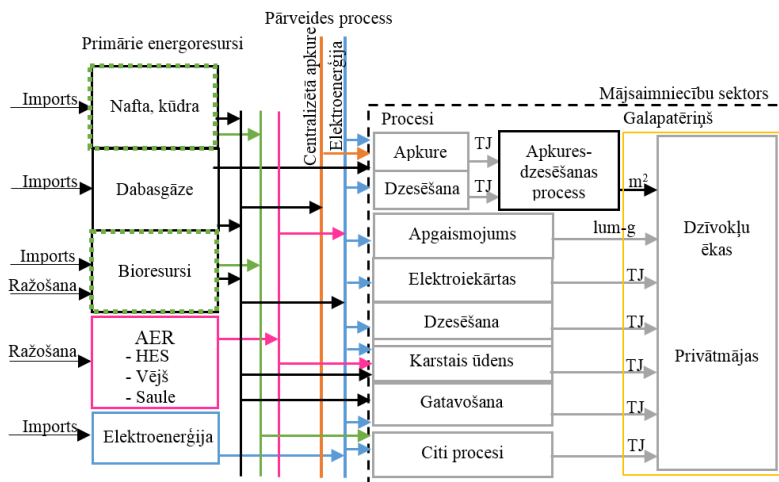


2.7. attēls. Elektroenerģijas patēriņa struktūra komerciālajā sektorā.

Centralizētā siltumapgāde un primārie enerģijas avoti tiek izmantoti trīs procesos: ūdens sildīšanai, telpu apkurei un citiem procesiem, piemēram, ēdiena gatavošanai. Gandrīz visos komerciālajos apakšsektoros apkure galvenokārt izmantota telpu apkurei, savukārt tikai neliela daļa – ūdens sildīšanai.

Mājsaimniecību sektora modelēšana

Mājsaimniecību sektors tika sadalīts divās sadaļās – privātmājas un daudzdzīvokļu ēkas, jo abas izmanto dažādus energoresursus un atšķiras pēc patēriņa veida un daudzuma. Tiek pieļauts, ka privātmājas nav pieslēgtas centralizētajam siltumtīklam, savukārt daļa daudzdzīvokļu māju ir pieslēgtas centralizētajai siltumapgādei.

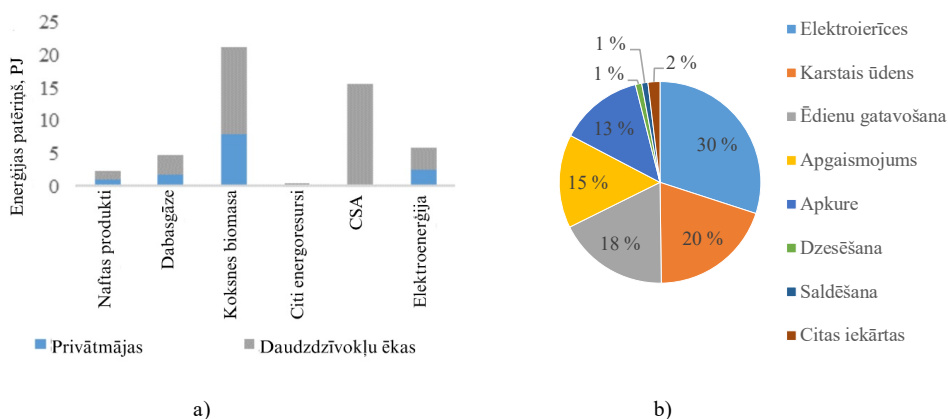


2.8. attēls. Mājsaimniecību sektora procesu shēma.

TIMES modelī mājāsaimniecību sektoram analizētie procesi ir apkure, dzesēšana, ūdens sildīšana, dzesēšana, apgaismojums, ēdiena gatavošana, elektriskās ierīces un citi lietojumi. Jauni apkures un dzesēšanas apakšprocesu tiek veidoti līdzīgi kā komerciālajā sektorā. Tas palīdz pārvarēt tehnoloģiju sasaisti ar konkrētu ēku veidiem un ļauj precīzāk pievienot pasākumus, kas saistīti ar ēku energoefektivitāti. Mājāsaimniecību sektora procesu shēma redzama 2.8. attēlā.

Papildus ir definēti apkures un dzesēšanas procesi kā pirmsprocesi, savukārt pārējie procesi, piemēram, ēdiena gatavošana, apgaismojums un citi, ir atzīmēti kā galīgais pieprasījums un tiks analizēti dažādos scenārijos.

Otra lielākā galapatēriņa daļa tiek patērēta mājāsaimniecību sektorā, sasniedzot 29 %. Lielāko daļu no tā veidoja koksnes biomasas patēriņš, 21 PJ, no kura 38 % tika izmantoti privātmājās, 62 % – daudzdzīvokļu mājās (2.9. a att.).



2.9. attēls. Resursu patēriņa struktūra (a) un enerģijas patēriņa struktūra (b) mājāsaimniecību sektorā 2017. gadā.

Privātmāju un daudzdzīvokļu ēku elektroenerģijas patēriņa struktūra ir līdzīga, jo patērētāju uzvedība nav atkarīga no ēkas veida. Saskaņā ar Eiropas Komisijas (Eurostat, 2019) datubāzi lielākā daļa elektroenerģijas, t. i., 30 %, tiek patērēta dažādām elektroierīcēm (televizoram, radio, mobilo ierīču uzlādei u. c.), 20 % tiek izmantoti ūdens sildīšanai, 18 % – ēdiena gatavošanai, 15 % – apgaismojumam, 13 % – apkurei (2.9. b att.).

Enerģijas pārveides sektora modelēšana

Centralizētā siltumenerģija Latvijā galvenokārt tiek ražota centralizētās katlumājās un koģenerācijas stacijās, kurās tiek ražota arī elektroenerģija.

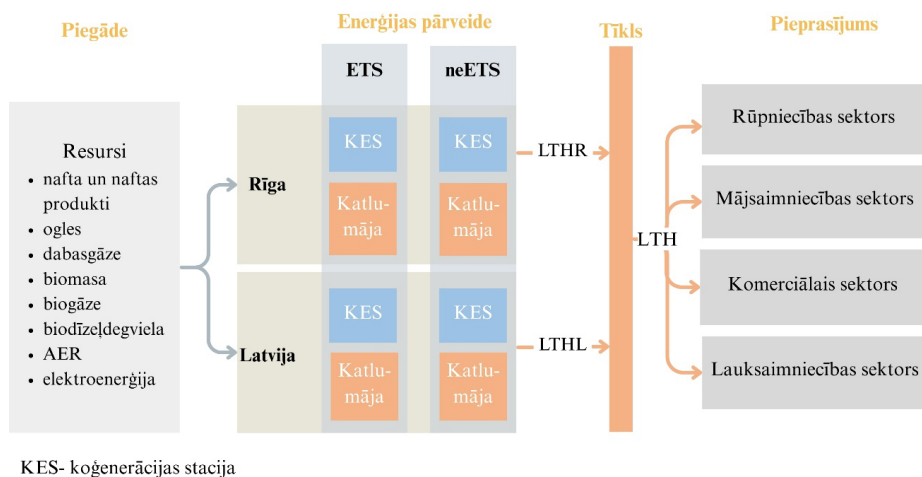
Modelētajā enerģētikas sektorā ietilpst centralizētā siltumapgāde un elektroenerģijas ražošana. Lai labāk modelētu tendences enerģētikas sektorā, tas ir sadalīts divos ģeogrāfiskos apakšreģionos – Rīga un pārējā Latvija.

Primāro energoresursu patēriņa un saražotās siltumenerģijas daudzuma dati iegūti no pārskatiem par gaisa piesārņojumu (2-Gaiss, 2019) un publiski pieejamiem gada pārskatiem (RS, 2017; Latvenergo, 2017). Tehnoloģiju uzstādīto jaudu noteikšanai katlumājās,

hidroelektrostacijās, vēja elektrostacijās un koģenerācijas stacijās tiek izmantoti Centrālās statistikas pārvaldes dati un emisiju atļaujas (VVD, 2019).

Lai gan Latvijas 2017. gada energobilancē, kas ir modeļa atskaites gads, ar saules enerģiju saražotās elektroenerģijas apjoms netiek uzrādīts, saules paneļi tiek izmantoti mājāsaimniecībās, komerciālajā un rūpniecības sektoros galvenokārt pašpatēriņa segšanai. Tāpēc modelī tiek veikti aprēķini par saules paneļu saražotās elektroenerģijas īpatsvaru enerģijas pārveidošanas sektorā. Tā kā trūkst datu par saules paneļos saražoto elektroenerģijas daļu, kas ir patērēta, bet nav uzskaitīta, tika izmantota informācija, kas pieejama Ekonomikas ministrijas izsniegtajās atļaujās jaunu ražošanas jaudu būvniecībai (EM, 2019). Kopējais saražotās saules elektroenerģijas apjoms dažādās nozarēs 2017. gadā tika lēsts aptuveni 5,65 TJ apjomā.

TIMES Latvia modelī centralizētās siltumapgādes (CSA) struktūra ir veidota, balstoties energobilances sadalījumā, iekļaujot koģenerācijas un katlumājas, kā arī emisiju tirdzniecības sistēmu (ETS) un ne ETS stacijas, lai modelētu CO₂ emisijas izmaksas (2.10. att.), jo Latvija ir Eiropas Savienības ETS (EK, 2003). Turklāt struktūra ir sadalīta divos apakšreģionos – Rīgā un pārējā Latvijā, jo Rīga ar divām lielaudas TEC būtiski atšķiras no pārējās Latvijas. Siltumenerģija no rūpniecām Rīgā (*LTHR*) un pārējā Latvijā (*LTHL*) tiek nodota elektrotīklam un, visbeidzot, rūpniecības, mājāsaimniecību, komerciālajam un lauksaimniecības sektoriem.



2.10. attēls. CSA struktūra *TIMES Latvia* modelī.

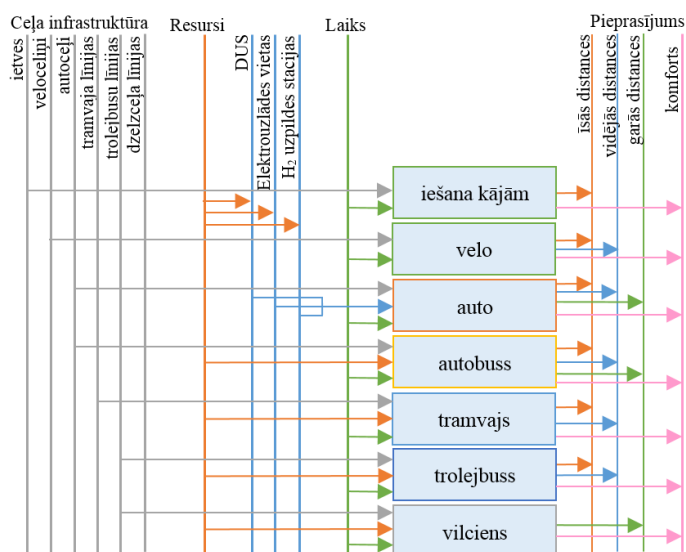
Modelis ņem vērā visas atbilstošās izmaksu plūsmas – investīcijas, izmantotā energoresursa izmaksas, ekspluatācijas izmaksas un nodokļus, lai optimizētu enerģijas ražošanu. Viens no būtiskiem pieņēmumiem ir enerģijas pārveides sektorā pieejamo tehnoloģiju parametri. Tāpēc tehnoloģiju primāro tehnisko datu noteikšanai tika izmantots Dānijas tehnoloģiju katalogs (*DEA*, 2018) – ekspluatācijas ilgums, efektivitātes parametri, kapitāla izmaksas, ekspluatācijas un uzturēšanas izmaksas, mainīgās izmaksas.

Pasažieru transporta veidu pārejas modelēšana

Transporta sektors *TIMES Latvia* modelī sastāv no diviem blokiem – pasažieru pārvietošanās un kravu pārvadājumiem. Promocijas darbā analizēta pasažieru sauszemes

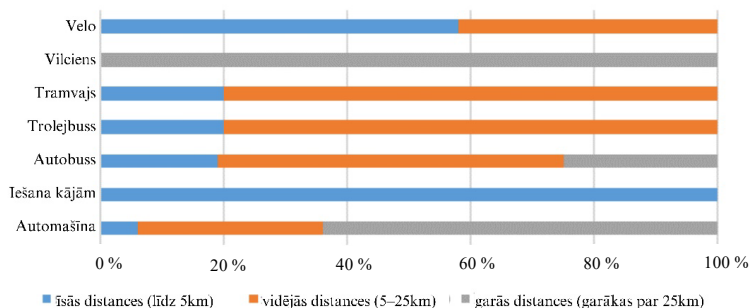
satiksme. Izpēte ietver autotransportu un dzelzceļu, kā arī individuālos pārvietošanās veidus. Autotransports ietver automašīnas, autobusus, vilcienus, tramvajus un trolejbusus, savukārt individuālie pārvietošanās veidi ir iešana kājām un braukšana ar velosipēdu (2.11. att.).

Precīzākai modelēšanai modeli iekļauts pieprasījums pēc trīs dažādām distancēm – īsajām (līdz 5 km), vidējām (5–25 km) un garajām distancēm (virs 25 km). Šī modelēšanas pieeja nodrošina to, ka dažādi transporta veidi, kas veic noteiktu attālumu, var savstarpēji konkurēt, piemēram, nelielos attālos pastaiga, braukšana ar velosipēdu, automašīna, autobuss, tramvajs un trolejbuss var aizstāt cits citu, ja ceļojuma galamērķis sakrīt. Turpretim attālos, kas ir vismaz 25 km gari, var izmantot tikai automašīnas, starpilsētu autobusus un vilcienus. Modelis ietver arī ceļu infrastruktūru un degvielas uzpildes stacijas, kas ir būtisks priekšnosacījums, lai palielinātu konkrētu transportlīdzekļu vai pārvietošanās veida izmantošanas iespēju, piemēram, elektrisko transportlīdzekļu.



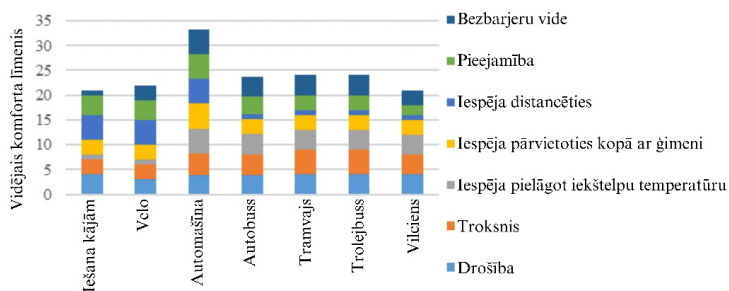
2.11. attēls. Pasažieru sauszemes transporta struktūra modeli.

Attālumu garums *TIMES* modelī tika sadalīts, lai ņemtu vērā esošos mobilitātes modeļus (CSP, 2018) bāzes gadam. Distanču dalījums tika noteikts, iekļaujot nemotorizētos transporta veidus – braukšanu ar velosipēdu un pārvietošanos kājām. 2.12. attēlā redzams īpatsvars transporta veidu izmantošanai katrā no distancēm bāzes gadā. Šie pieņēmumi balstīti Dānijā veiktajā pētījumā (*Tattini*, 2018), kurā veikta transporta sektora modelēšana pielāgojot Latvijas situācijai 2017. gadā.



2.12. attēls. Transporta veidu izmantošana dažādās distancēs.

Modelī ir ieviests vēl viens papildu parametrs – komforta līmenis. *TIMES* ir optimizācijas rīks, kas meklē minimālo izmaksu sistēmas struktūru, tāpēc komforts ir būtisks elements, kas nodrošina precīzākus rezultātus, kad izvērtēšanā iekļauj cilvēku uzvedību un paradumus. Vairāki eksperti novērtēja komforta līmeni skalā no 1 līdz 5 katram transportlīdzekļa veidam, ņemot vērā septiņus faktorus – drošību, trokšņa līmeni un iespēju regulēt iekšējo temperatūru, iespēju ceļot kopā ar ģimeni, iespējas sociāli attālināties, pieejamību, bezbarjeru vidi. Pieejamības koeficients raksturo transportlīdzekļa tūlītējas lietošanas iespēju – vai tas ir pieejams visos apstākļos (piemēram, privātais auto), vai arī jāievēro transportlīdzekļa kustības grafiks (sabiedriskajam transportam). Šis parametrs neietver infrastruktūras pieejamību, piemēram, velosipēdu joslas, jo šis parametrs modelī ir iekļauts atsevišķi (kā ceļu infrastruktūra). Pēc ekspertu vērtējumiem, augstākais komforta līmenis ir automašīnām, ievērojami pārsniedzot citu transporta veidu komforta līmeni (2.13. att.).

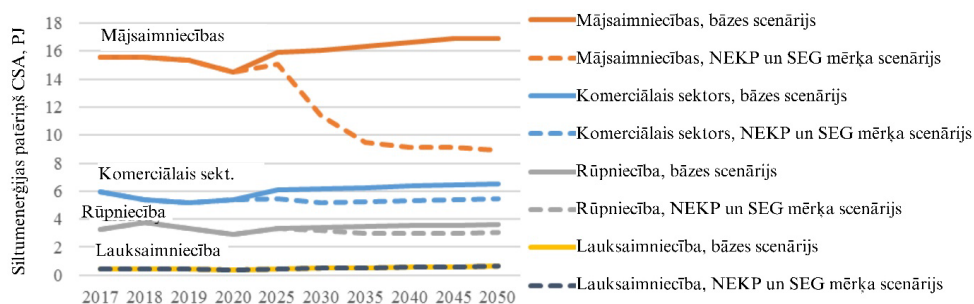


2.13. attēls. Vidējais komforta līmenis dažādiem transporta veidiem, balstoties ekspertu novērtējumā, kas ietver septiņus komforta elementus, katru vērtējot skalā no 1 līdz 5.

Tas ir ne tikai tāpēc, ka automašīna nodrošina ērtāku vidi, bet arī ļauj ceļot kopā ar ģimeni, attālināties, regulēt iekšējo temperatūru un, pats galvenais, vienmēr ir pieejams. Zemākais novērtējums ir iešana kājām un pārvietošanās ar vilcienu, jo tas nav tik sasniedzams visā Latvijas teritorijā dzelzceļa infrastruktūras trūkuma dēļ, kā arī novecojušos vilcienos ir sarežģīti iekāpt ar ratiņkrēsli vai bērnu ratiņiem.

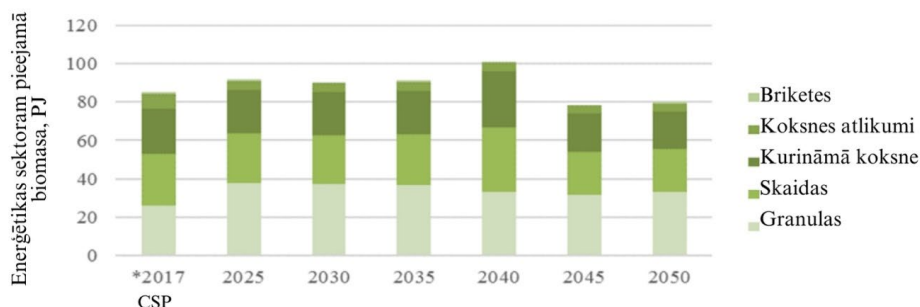
2.2.2. Ievades dati no citiem modelēšanas rīkiem

CSA patēriņa izmaiņu dati sektoros ir iegūti no sistēmdinamikas modeļa. Bāzes scenārijā CSA pieprasījums ir stabils mājstaimniecību sektorā, kur CSA apjoms ir ap 16 PJ, savukārt pārējos sektoros pieprasījums pēc CSA pieaug par 10 % rūpniecībā, par aptuveni 33 % lauksaimniecībā un par aptuveni 9 % komerciālajā sektorā (2.14. att.). Savukārt NEKP un SEG mērķa scenārijā mājstaimniecību sektorā siltumenerģijas patēriņš samazinās par aptuveni 43 % saistībā ar ievērojamiem ēku renovācijas tempiem, komerciālajā sektorā – par aptuveni 8 %, rūpniecības sektorā – par 7 %, kur tiek ņemti vērā arī energoefektivitātes pasākumi.



2.14. attēls. CSA pieprasījums sektoros.

Par *TIMES* modeļa ievades datiem tiek izmantoti Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitātē izstrādātās meža datu apstrādes programmas “*Forest Expert*” rezultāti. Maksimālais enerģētikas sektoram pieejamais biomasas apjoms tiek iegūts, izmantojot “*Forest Expert*” lineārās optimizācijas modeli, kas nodrošina augstākas kvalitātes datus par meža resursu attīstību. Modelis ietver koku augšanas ātruma modeļus, atbilstību saistošajiem normatīvajiem aktiem un standartiem koksnes iznākumu prognozēšanai, koku stumbru algoritmus un sortimenta prognozēšanu. “*Forest expert*” modeļa rezultāti liecina, ka pieaugs enerģētikas sektoram pieejamo granulu apjoms. Tomēr pārējās koksnes biomasas pieejamība 2050. gadā, salīdzinot ar 2017. gadu, samazināsies par aptuveni 30 % (2.15. att.).



2.15. attēls. Maksimāli pieejamais biomasas apjoms enerģētikas sektoram (Dubrovskis un Daģis, 2018).

Biomasa pieejamības maksimums tiks sasniegts 2040. gadā, ko galvenokārt ietekmē baltalkšņa pieejamība, kura ciršanas apjoms ir ievērojami lielāks (īss aprites laiks ~ 31 gads). Ilgtermiņā nav nekādu ierobežojumu izlīdzināt ciršanas apjomus. Šīs sugas sortiments lielos apjomos tiek izmantots kā malka. Tas pats biomasa ierobežojums, kas iegūts, izmantojot “Forest Expert” modeli, tiek izmantots visos *TIMES* scenārijos, neņemot vērā dažādās meža apsaimniekošanas politikas.

2.2.3. Scenāriju izstrāde

Promocijas darba pētījumā tika izstrādāti trīs galvenie scenāriju veidi – bāzes scenāriji (bāzes, *WEM*), kas ietver tikai esošās politikas un tendences, politikas scenāriji (NEKP, *WAM*), kas ietver dažādus politikas instrumentus un pasākumus un mērķa scenārijus (SEG mērķa, *OPT_Solar* un *OPT_EE*), kas ietver SEG samazināšanas mērķi (2.1. tab.).

2.1. tabula.

Disertācijā izstrādātie scenāriji

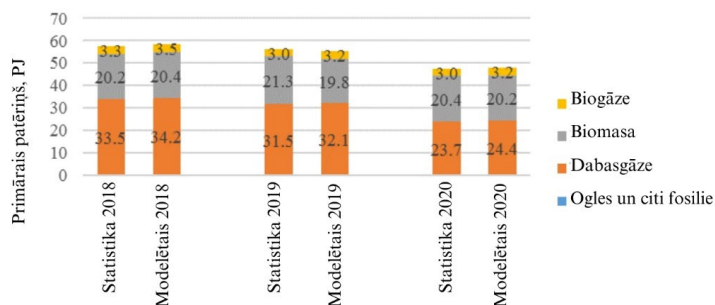
Scenārija nosaukums	Scenārija tips	Zinātniskais raksts	Galvenie papildus parametri
Bāzes	Bāzes	2–5	n/a
<i>WEM</i>	Bāzes	6	• IKP pieaugums ~ 3,2 %/gadā periodā 2020–2050; • Apstiprinātā Grantu programma plānošanas periodam līdz 2027. gadam
NEKP	Politiku	2–5	• Politikas instrumenti un pasākumi, kas norādīti NEKP2030
<i>WAM</i>	Politiku	6	• IKP pieaugums ~ 3,2 %/gadā periodā 2020–2050; • Apstiprinātā grantu programma plānošanas periodam līdz 2027. gadam; • Papildus pasākumi – energoefektivitāte ēkās, rūpnieciskajos procesos, subsīdijas elektrotransportam u. c.
SEG mērķa	Mērķa	4-5	• Kopējais SEG samazinājums 2050. gadā par 70 % • Kopējais SEG samazinājums 2050. gadā par 90 %;
<i>OPT_SOLAR</i>	Mērķa	6	• Primārās un galaenerģijas patēriņa samazinājums par ~ 16 % 2030. gadā, salīdzinot ar 2020. gadu; • Prioritāte privātai saules enerģijas ražošanai
<i>OPT_EE</i>	Mērķa	6	• Kopējais SEG samazinājums 2050. gadā par 90 %; • Primārās un galaenerģijas patēriņa samazinājums par ~ 16 % 2030. gadā, salīdzinot ar 2020. gadu; • Saražotā saules enerģija un tiešais patēriņš tiek uzskaitīts galapatēriņā.

2.2.4. Modeļa validācijas un jutīguma analīze

Kā piemērs modeļa validācijas procesam ir parādīts bāzes scenārija modeļa rezultātu un Latvijas Centrālās statistikas pārvaldes (CSP) oficiālās statistikas datu salīdzinājums enerģijas pārveidošanas sektoram 2018., 2019. un 2020. gadā (2.16. att.).

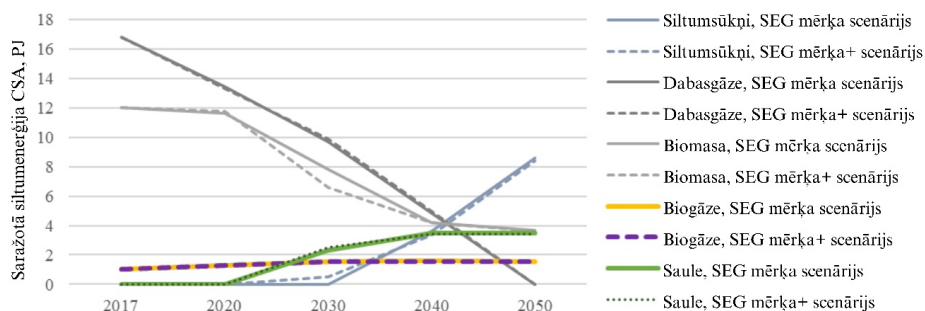
Kopējais resursu patēriņš enerģijas pārveides sektorā statistikas datus nedaudz atšķiras no iegūtajiem modeļa rezultātiem. Kopējais patērētais resursu apjoms enerģijas pārveides sektorā 2018. gadā bija par 949 TJ jeb 1,7 % mazāks, 2019. gadā – par 850 TJ jeb 1,5 % lielāks, savukārt 2020. gadā – par 588 TJ jeb 1,2 % mazāks, salīdzinot ar iegūtajiem modelēšanas rezultātiem.

No modeļa iegūtie siltumapgādes primārie enerģijas avoti (dabaszāze, šķelda un biogāzes patēriņš) neatšķirās no statistikas datiem vairāk par 7 %. Modeļa dabaszāzes patēriņš ir par aptuveni 2 % lielāks nekā statistikā, biomasas patēriņš – par 1 % lielāks 2018. gadā, par 7 % mazāks 2019. gadā un par 1 % mazāks 2020. gadā, savukārt biogāzes patēriņš 2018. un 2020. gadā bija par 6 % lielāks un 2019. gadā par 4 % lielāks, salīdzinot ar statistikas datiem. Līdz ar to var secināt, ka modeļa sniegtie resursu patēriņa rezultāti pārveides sektorā pietiekami precīzi sakrīt ar statistikas datiem.



2.16. attēls. Enerģijas pārveides sektora primāro resursu patēriņa modeļa un statistikas datu rezultāti par 2018., 2019. un 2020. gadu (CSP, 2021).

Jutīguma analīzes piemērs redzams 2.17. attēlā, kurā atspoguļots saražotās siltumenerģijas apjoms CSA pie nosacījuma, ka SEG mērķa scenārijā enerģijas pārveides sektoram pieejamās biomasas apjoms samazinās par 20 % (SEG mērķa+). Šāda situācija varētu īstenoties, ja turpinātu pieaugt biomasas resursu eksports vai stātos spēkā stingrāki biomasas kaskādes principi. Taču, ņemot vērā siltumsūkņu lielo ietekmi CSA sektorā, šāds pieejamās biomasas samazinājums nerada būtisku atšķirību.



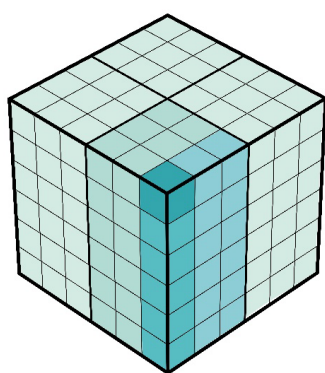
2.17. attēls. Jutīguma analīzes rezultāti – saražotā siltumenerģija CSA pēc resursa tipa SEG mērķa un SEG mērķa+.

Siltumenerģijas ražošanas apmēru rezultāti, salīdzinot abus scenārijus, uzrādīja atšķirības tikai 2030. gadā, kad biomasas patēriņš samazinās par 15 %, aizstājot to ar siltumsūkņu jaudu (2.17. att.). Ja biomasas tiek ierobežota enerģijas pārveidošanas sektorā, siltumsūkņu izmantošana kļūst izdevīga agrākā laika posmā.

3. REZULTĀTI

3.1. Energopakalpojumu sniegšanas attēlojums dažādos detalizācijas līmeņos

Promocijas darba rezultāti tiek attēloti, izmantojot *TIMES* modelēšanas rīka augšupejošu pieeju. Tā ietver datu analīzi, sākot no viszemākās detalizācijas pakāpes – tehnoloģijām –, pēc tam pārejot uz procesiem, apakšsektoriem un sektoriem, visbeidzot nodrošinot rezultātus visam enerģētikas sektoram. Šī pieeja ļauj attēlot dažādus detalizācijas līmeņus atkarībā no paredzētā mērķa (3.1. att.).



Rezultātu līmenis	Rezultātu veids	Aprakstītie rezultāti
1.	Tehnoloģiju	- transporta sektorā – pasažieru transporta veidi (privātais auto, autobuss, vilciens u. c.) - enerģijas pārvides sektorā – vēja turbīnas, siltumsūkņi
2.	Procesu	enerģijas pārvides sektorā – siltumenerģijas nodrošināšana
3.	Apakšsektoru	- rūpniecības sektorā – koksnes un to izstrādājumu, pārtikas un nemetālisko minerālu apakšsektori - transporta sektorā – pasažieru pārvadājumi pa sauszemi
4.	Sektoru	rūpniecības
5.	Kopējā energosektora	kopējā energosektora

3.1. attēls. Rezultātu iegūšanas un attēlošanas līmeņi.

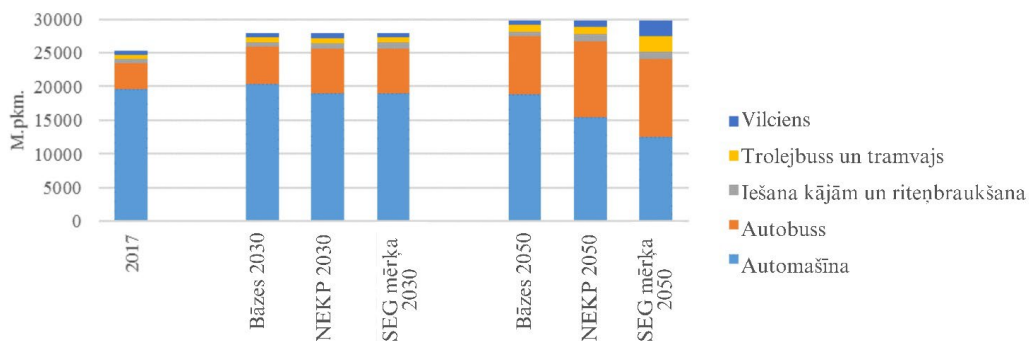
Nākamajās apakšnodaļās aprakstīti vairāki dažādu līmeņu rezultātu piemēri: tehnoloģiskā līmeņa modālās maiņas transporta sektorā un atjaunojamās tehnoloģijas enerģētikas sektorā; procesa līmeņa resursu piegādes kombinācija CSA; apakšsektora un sektora līmeņa resursu pāreja; kopējais energosistēmas primārās un galaenerģijas patēriņš.

3.1.1. Transporta veidu maiņa pasažieru transportā un atjaunojamās tehnoloģijas enerģijas pārveides sektorā

Transporta sektora modeļa pārstrukturēšana ļauj iekļaut un izvērtēt pasākumus, kas saistīti ar modālo maiņu, piemēram, atbalstu sabiedriskā transporta uzlabojumiem un veloceļu izveidei. Transporta sektora tehnoloģijas ietver tādus transportlīdzekļus kā privātās automašīnas, autobusus un vilcienus. Tālāk promocijas darbā aprakstītas tehnoloģiju izmaiņas bāzes, NEKP un SEG mērķa scenārijiem, kā arī sabiedriskā transporta un elektromobiļu īpatsvars *WEM*, *OPT_EE*, *OPT_Solar* un *WAM* scenārijā.

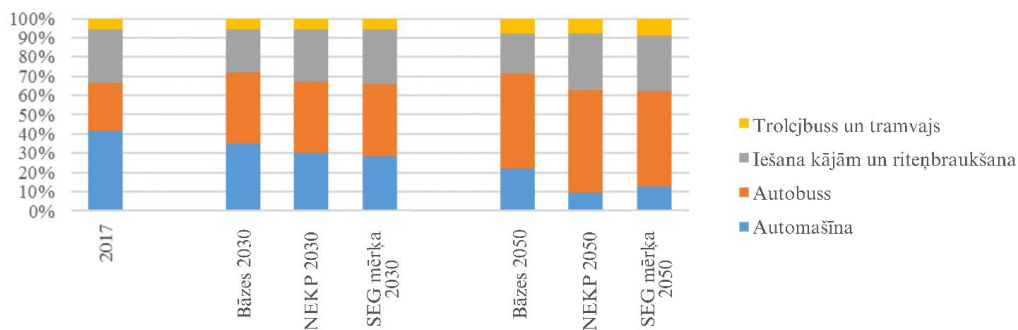
Bāzes gadā 77 % mobilitātes nodrošina privātās automašīnas, 15 % – autobusi, 3 % – iešana kājām un pārvietošanās ar velosipēdu, 2 % – trolejbusi un tramvaji, 2 % – vilcieni (3.2. att.). Autobusu izmantošana pieaug līdz 20 % bāzes, 23 % NEKP un 24 % SEG mērķa scenārijā 2030. gadā. 2050. gadā autobusu izmantošana pieaug vēl vairāk, aptverot 29 % bāzes un aptuveni 39 % NEKP un SEG mērķa scenārijā. Iešana kājām un riteņbraukšana, trolejbusu, tramvaju un vilcienu izmantošana katrā scenārijā 2050. gadā ir aptuveni 3 %, izņemot SEG

mērķa scenāriju, kur trolejbusu, tramvaju un vilcienu izmantošana kopumā palielinās līdz aptuveni 16 %.



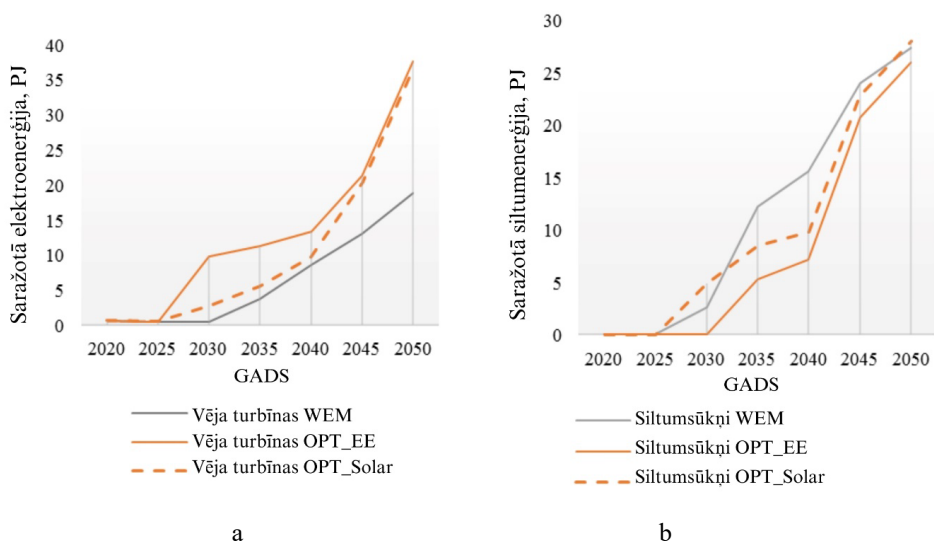
3.2. attēls. Pasažieru transporta veidu izmantošanas prognoze alternatīvajos scenārijos.

Nelielos attālumos, t. i., līdz 5 km, mobilitātei pārsvarā tiek izmantotas privātās automašīnas, bāzes gadā nosedzot ap 41 % (3.3. att.). Daudz tiek izmantoti arī autobusi, kas sedz 25 % no pasažieru braucieniem, savukārt iešana kājām un riteņbraukšana nodrošina 28 %. Autobusu izmantošana pieaug visos scenārijos 2030. gadā, nodrošinot ap 37 % mobilitāti, savukārt aptuveni 50 % 2050. gadā. Riteņbraukšana un iešana kājām kļūst arvien populārāka NEKP un SEG mērķa scenārijos, aptverot aptuveni 27 % 2030. gadā un 29 % 2050. gadā. Tikai 20 % mobilitātes tiks veikta ar individuālajiem transporta veidiem bāzes scenārijā 2050. gadā.



3.3. attēls. Īso distanču pasažieru transporta veidu izmantošanas sadalījums alternatīvos scenārijos.

Tiek prognozēts, ka *OPT_EE* un *OPT_Solar* kopējais enerģijas ražošanas apjoms enerģētikas sektorā uzrādīs mainīgu tendenci līdz 2030. gadam, pēc tam ir sagaidāms būtisks vēja jaudas pieaugums (3.4. a att.). Pēc tam tiek prognozēts stabils elektroenerģijas ražošanas pieaugums līdz 2050. gadam. Pateicoties zemu izmaksu vēja enerģijas pieejamībai, abi optimizācijas scenāriji, kā arī *WEM* scenārijs būtiski palielina lielo siltumsūkņu tehnoloģiju izmantošanu centralizētās siltumapgādes sistēmās (3.4. b att.).

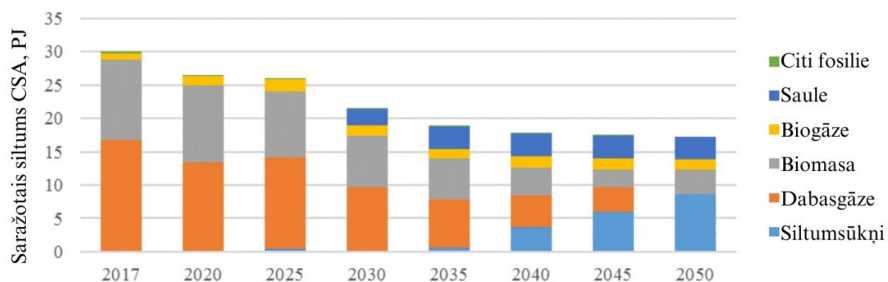


3.4. attēls. Vēja enerģijas ražošanas tempa (a) un siltuma ražošanas ar lieliem, centralizētiem siltumsūkņiem (b) salīdzinājums dažādās optimizācijās.

3.1.2. Resursu piegādes struktūra centralizētajā siltumapgādē (2. līmenis)

Kā 2. līmeņa rezultātu piemērs ir parādīts resursu piedāvājuma kombinācijas izmaiņas, lai nodrošinātu CSA pieprasījumu SEG mērķa scenārijā.

SEG mērķa scenārijā biomasas izmantošana samazinās no aptuveni 12 PJ 2017. gadā līdz 3,7 PJ 2050. gadā, nodrošinot tikai ap 20 % no nepieciešamā siltuma CSA sektorā (3.5. att.). Primārais CSA enerģijas avots šajā scenārijā 2050. gadā ir liela mēroga siltumsūkņi, kas nodrošina līdz pat 47 % no nepieciešamās enerģijas. Modelēšanas rezultāti liecina, ka saules enerģija jau ir kļuvusi rentabla 2030. gada scenārijā un 2050. gadā segs aptuveni 19 % no saražotās CSA. Biogāzes saražotā siltumenerģija nedaudz pieaug no aptuveni 3 % 2017. gadā līdz aptuveni 9 % 2050. gadā.

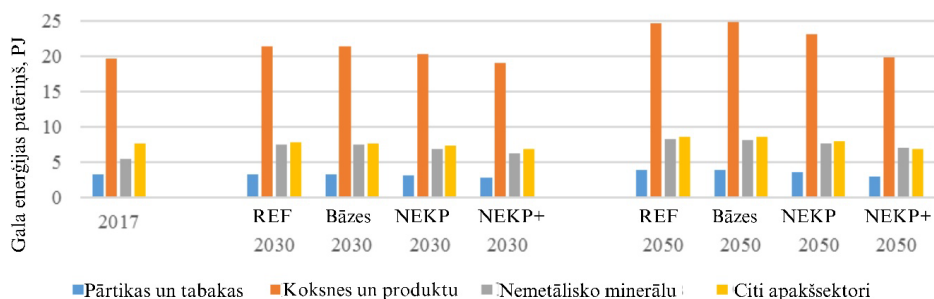


3.5. attēls. Pēc resursa veida un tehnoloģijas (siltumsūkņos) saražotā siltumenerģija CSA SEG mērķa scenārijā.

3.1.3. Resursu izmantošanas maiņa specifiskos apakšsektoros un sektoros (3. un 4. līmenis)

Resursu patēriņa izmaiņas apakšsektoru un sektoru līmenī ir aprakstīti trīs galvenajiem rūpniecības apakšsektoriem – pārtikai un tabakai, koksnei un produktu un nemetālisko minerālu apakšsektorā. Turklāt kopējais enerģijas patēriņš visā rūpniecības sektorā ir detalizēts bāzes, NEKP un NEKP+ scenārijos. Transporta sektorā resursu patēriņa izmaiņas ir aprakstītas apakšsektoram, kas ietver pasažieru pārvadājumus pa sauszemi bāzes, NEKP un SEG mērķa scenārijā.

Rezultāti liecina, ka 2030. gadā enerģijas galapatēriņš pārtikas apakšsektorā samazinās bāzes (3,2 PJ), NEKP (3,1 PJ) un NEKP+ (2,8 PJ) scenārijā, savukārt references (REF) scenārijā, kas ir scenārijs bez jebkādiem pasākumiem, patēriņš saglabājas nemainīgs (3,3 PJ) (3.6. att.).

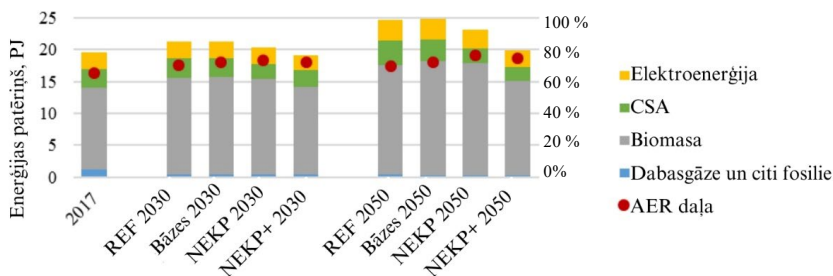


3.6. attēls. Enerģijas galapatēriņš rūpniecības apakšsektorā modelētajos scenārijos.

2050. gadā enerģijas patēriņa apjoms pieaug visos scenārijos – REF un bāzes scenārijos (3,8 PJ), NEKP (3,5 PJ), NEKP+ (3 PJ). 2030. gadā enerģijas patēriņš koksnes apakšsektorā palielinās REF un bāzes (21,3 PJ), NEKP (20,3 PJ), bet samazinās NEKP+ (no 19,6 PJ 2017. gadā līdz 19,1 PJ). 2050. gadā patēriņš pieaug visos scenārijos – REF (24,7 PJ), bāzes (24,9 PJ), NEKP (23,1 PJ) un NEKP+ (19,9 PJ). Enerģijas patēriņš nemetālisko minerālu apakšsektorā 2030. un 2050. gadā pieaug visos četros scenārijos – attiecīgi REF un bāzes (7,5 PJ un 8,2 PJ), NEKP (6,8 PJ un 7,7 PJ), NEKP+ (6,2 PJ un 7 PJ). Citos rūpniecības apakšsektoros kopējais enerģijas galapatēriņš palielinās REF un bāzes (7,7 PJ) un samazinās NEKP (7,3 PJ) un NEKP+ (6,8 PJ), savukārt 2050. gadā patēriņš palielinās visos scenārijos – REF (8,6 PJ), bāzes (8,5 PJ), NEKP (8 PJ) un NEKP+ (8 PJ).

Koksnes apakšsektorā galvenais resurss ir koksnes biomasa, t. i., enerģijas patēriņā dominē koksnes atkritumi un šķelda, kas 2017. gadā ir attiecīgi 7 PJ un 4 PJ (3.7. att.). Koksnes šķeldas patēriņš visos scenārijos pieaug līdz aptuveni 7,5 PJ 2030. gadā un no 11 PJ līdz 12 PJ 2050. gadā, savukārt koksnes atkritumu patēriņš ir no 4,8 PJ līdz 6,2 PJ 2030. gadā un no 3 PJ līdz 7 PJ 2050. gadā.

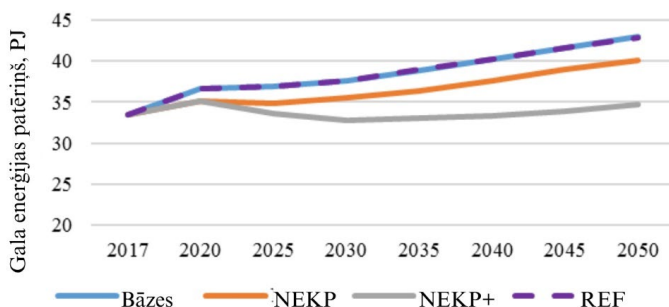
Elektroenerģijas patēriņš saglabājas stabils visu modelēšanas periodu un ir aptuveni 3 PJ. Izmantotais CSA apjoms 2030. un 2050. gadā palielinās REF (3,1 PJ un 3,9 PJ), bāzes (2,8 PJ un 3,4 PJ), savukārt samazinās NEKP (2,4 PJ un 2,3 PJ) un NEKP+ scenārijos (2,5 PJ un 2,2 PJ).



3.7. attēls. Energijas patēriņš koksnes apakšsektorā modelētajos scenārijos.

Atjaunojamās enerģijas īpatsvars 2017. gadā bija gandrīz nulle, savukārt 2030. un 2050. gadā īpatsvars pieaug visos scenārijos, sasniedzot augstāko īpatsvaru NEKP+ scenārijā (24 % un 42 %). Fosilā kurināmā dominēšana visos scenārijos ir saistīta ar nepieciešamību pēc augstas temperatūras rūpniecības procesos, ko nevar pilnībā nodrošināt ar atjaunojamiem resursiem.

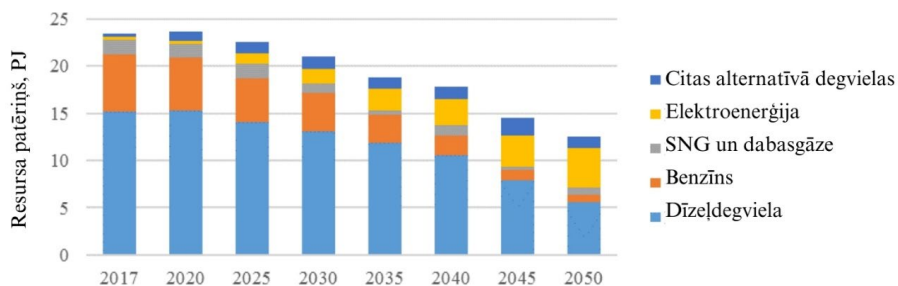
Kopējais enerģijas galapatēriņš rūpniecības sektorā bāzes un REF scenārijos stabili pieaug no 33 PJ 2017. gadā līdz 43 PJ 2050. gadā, un NEKP scenārijā patēriņš pieaug līdz 40 PJ, savukārt NEKP+ līdz 35 PJ 2050. gadā (3.8. att.). Energijas galapatēriņa pieaugums saistīts ar plānoto rūpniecības sektora ekonomisko attīstību Latvijā un esošajiem politikas instrumentiem un pasākumiem energoefektivitātes paaugstināšanai un AER izmantošanas veicināšanai. Ar esošajiem pasākumiem, kas veicina jauno tehnoloģiju augstāku efektivitāti, vien nepietiek, lai kompensētu ekonomiskās izaugsmes radīto enerģijas pieprasījuma pieaugumu.



3.8. attēls. Energijas galapatēriņš rūpniecības sektorā modelētajos scenārijos.

SEG mērķa scenārijs parāda vislielāko resursu patēriņa samazinājumu, jo saskaņā ar šo scenāriju ir jāpanāk klimatneitralitāte. Kopējais resursu apjoms samazinās no 23 PJ bāzes gadā līdz 12 PJ 2050. gadā (3.9. att.).

Šajā scenārijā dīzeļdegviela ir visvairāk izmantotā degviela, kas 2050. gadā sedz aptuveni 45 % no kopējā daudzuma. Benzīna, sašķidrinātas naftas gāzes un dabaspāzes patēriņš samazinās no 8 PJ 2017. gadā līdz 2 PJ 2050. gadā. 34 % no kopējiem resursiem, kas tiek izmantoti 2050. gadā, ir elektrība, savukārt no citām alternatīvajām degvielām lielākā daļa ir ūdeņradis, veidojot 9 %.



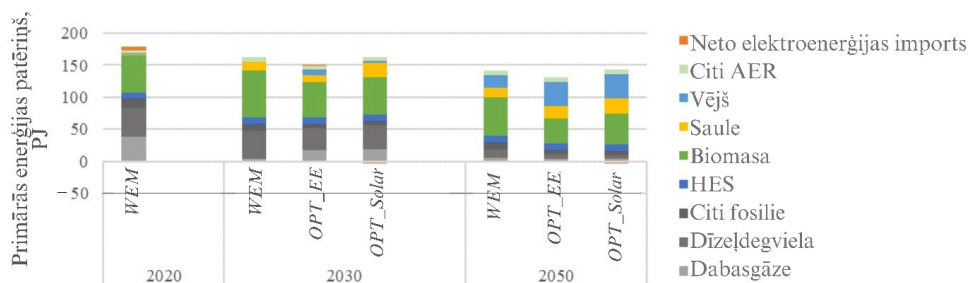
3.9. attēls. Degvielas patēriņš sauszemes pasažieru pārvadājumiem SEG mērķa scenārijā.

3.1.4. Energosektora resursu izmantošanas izmaiņas (5. līmenis)

Primārā un galaenerģijas patēriņa, kā arī resursu pieprasījuma izmaiņas aprakstītas *WAM*, *OPT_EE*, *OPT_Solar* un *WEM* scenārijiem.

3.10. attēlā redzams primārās enerģijas patēriņa salīdzinājums optimizācijas un *WEM* scenārijā. Paredzams, ka līdz 2030. gadam vēja un hidroenerģija sniegs ievērojamu ieguldījumu kopējā elektroenerģijas apgādē. Tāpat kā bāzes scenārijā, paredzams, ka hidroelektrostaciju ražošana paliks nemainīga – 10 PJ gadā. Toties tiek prognozēts, ka biomasas pēc 2040. gada dos tikai nelielu ieguldījumu.

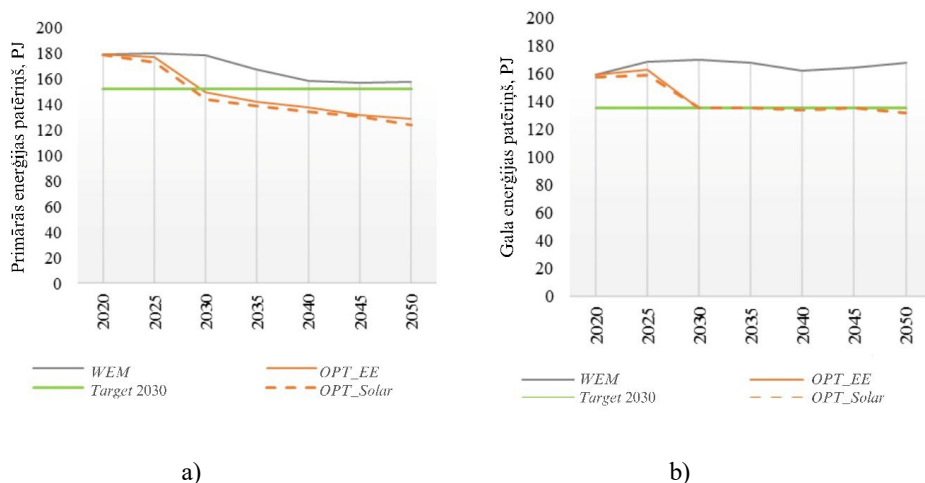
Abi *OPT* scenāriji parāda pieaugošu vēja enerģijas izmantošanu elektroenerģijas ražošanā, kā redzams 3.10. attēlā. Tomēr *OPT_Solar* scenārijs sasniedz augstākus kopējos saules enerģijas ražošanas rādītājus, jo vietējo saules *PV* pašpatēriņš tiek uzskatīts par energoefektivitātes pasākumu, tāpēc galapatēriņa un primārā patēriņa mērķus var sasniegt ar mazāk patēriņa samazināšanas pasākumiem. Tā vietā modelim ir tendence uzstādīt vairāk saules *PV* paneļu, lai nodrošinātu pašpatēriņu. *OPT_EE* scenārijā visnozīmīgākais enerģijas patēriņa samazinājums ēkās rodas no energoefektivitātes palielināšanās uzlabotas izolācijas dēļ, kas samazina siltuma zudumus.



3.10. attēls. Primārās enerģijas patēriņa struktūras salīdzinājums dažādos optimizācijas scenārijos.

Optimizācijas scenāriji ir izstrādāti, lai sasniegtu *REPowerEU* gala un primārā patēriņa mērķus 2030. gadā, taču, ņemot vērā to, ka *TIMES* neietver ikgadēju tehnoloģiju ieviešanas ierobežojumus, tas maina tehnoloģiju pēdējos iespējamajos mērķa sasniegšanas gados.

3.11. attēlā redzami atsaucies scenārija (*WEM*) rezultāti, salīdzinot tos ar diviem dažādiem optimizācijas ceļiem. Rezultāti parāda, ka *WEM* scenārijs ar esošajām politikām ne tuvu nesasniedz 2030. gada mērķus.

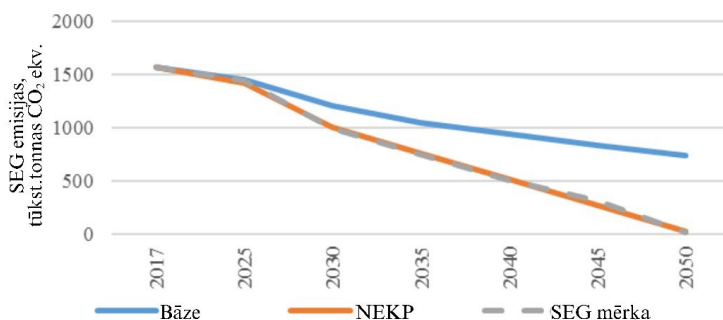


3.11. attēls. Primārās enerģijas (a) un galaenerģijas (b) patēriņš.

3.2. Sektoru un apakšsektoru ieguldījums klimatneitralitātes sasniegšanā

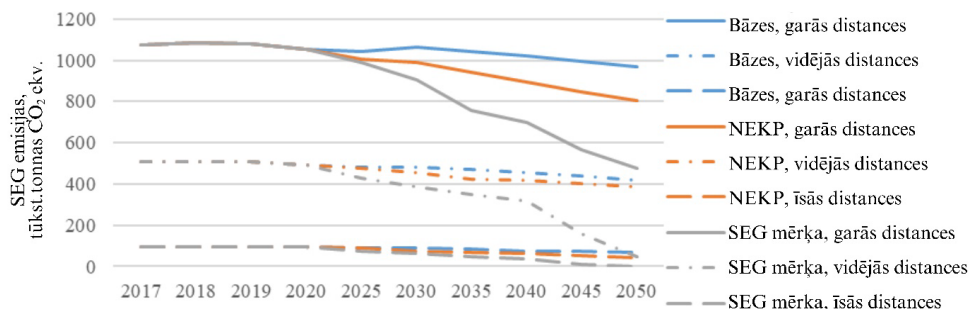
Emisiju apjomu izmaiņas ir aprakstītas enerģijas pārveides sektoram un pasažieru pārvadājumiem pa sauszemi, pamatojoties uz attālumiem bāzes, NEKP un SEG mērķa scenārijā. Turklāt ir detalizēti aprakstītas kopējās rūpniecības sektora emisijas bāzes, NEKP un NEKP+ scenārijā. Tiek sniegts arī emisiju apjoma izmaiņu salīdzinājums katrā sektorā saskaņā ar *WEM*, *OPT_EE*, *OPT_Solar* un *WEM* scenārijiem.

Enerģijas pārveides sektora kopējās SEG emisijas bāzes scenārijā samazinās par aptuveni 53 %, savukārt gan SEG mērķa, gan NEKP scenārijā klimatneitralitāte tiek sasniegta 2050. gadā dabasgāzes izslēgšanas dēļ (3.12. att.).



3.12. attēls. SEG emisijas enerģijas pārveides sektorā alternatīvos scenārijos.

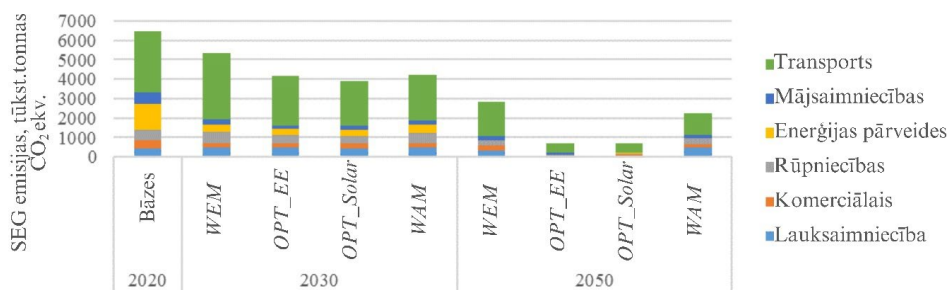
Visos trijos scenārijos SEG emisiju apjoms samazinās (3.13. att.). Bāzes scenārijā kopējās SEG emisijas samazinās par 2 % 2030. gadā un par 14 % 2050. gadā, NEKP – par 10 % un 27 %, SEG mērķa – par 19 % un 69 % tajā pašā periodā.



3.13. attēls. Pasażieru pārvietošanās radītās SEG emisijas pa distancēm (īsās līdz 5 km, vidējās 2–25 km, garās – virs 25 km).

Lielākā daļa emisiju izdalās, veicot lielus attālumus. Lai gan SEG emisiju apjoms ievērojami samazinās – no aptuveni 1100 kt bāzes gadā līdz 800 kt NEKP un 470 kt SEG mērķa scenārijā, samazinājuma īpatsvars ir mazāks nekā citos attālumos. 2050. gadā tiek sasniegts tikai 10 % samazinājums bāzes, 26 % – NEKP un 56 % – SEG mērķa scenārijā.

SEG emisijas vidējos attāļumos 2050. gadā, salīdzinot ar bāzes gadu, samazinās par 18 % bāzes, 24 % NEKP un 91 % SEG mērķa scenārijā. Savukārt SEG emisijas nelielos attāļumos samazinās par 27 % bāzes, 52 % NEKP un 99 % SEG mērķa scenārijā 2050. gadā.

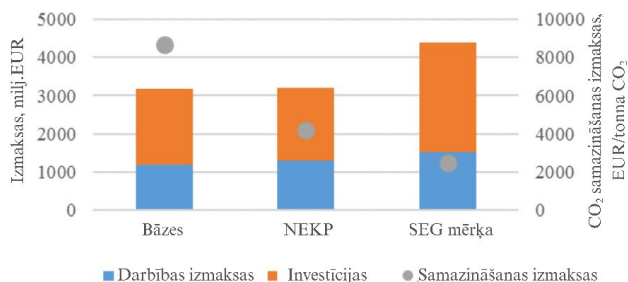


3.14. attēls. Analizēto scenāriju sasniegtās SEG emisijas dažādos galapatēriņa sektoros.

3.14. attēlā redzams sasniegto SEG emisiju samazinājums analizētajos scenārijos dažādos sektoros. Kā redzams, WAM analizēto politiku kopums pilnībā nesasniedz SEG emisiju samazinājumu 2050. gadā, jo transporta un lauksaimniecības nozarēs trūkst papildu politikas pasākumu. Ceļā uz optimizāciju lauksaimniecības sektors tiek dekarbonizēts, integrējot vairāk biometāna un ūdeņraža lietošanu tehnikas mehānismos, savukārt transporta sektorā tiek sasniegti augstāki elektrifikācijas rādītāji kravu pārvadājumiem. Tāpēc būtu jāizstrādā papildu politikas instrumenti un pasākumi, lai šajās nozarēs integrētu oglekļa neitrālus risinājumus.

3.3. Specifisku izmaksu un nepieciešamo ieguldījumu novērtējums

Transporta sektora izmaksas un investīciju apjomi ir iezīmēti bāzes, NEKP un SEG mērķa scenārijiem. Turklāt kopējie ieguldījumi dažādiem pasākumiem ir detalizēti aprakstīti *WEM*, *OPT_EE*, *OPT_Solar* un *WAM* scenārijiem.



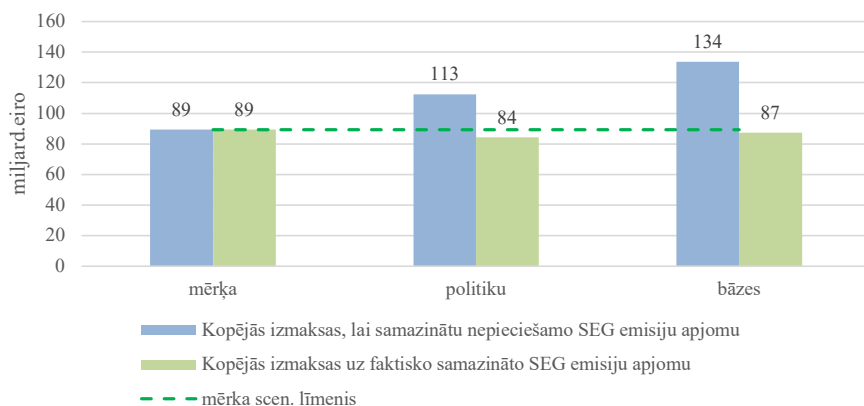
3.15. attēls. Transporta sektora izmaksu projekcija.

Modelēšanas rezultāti liecina, ka transporta dekarbonizācijai SEG mērķa scenārijā nepieciešami aptuveni 2868 miljoni eiro, kas ir par 38 % vairāk nekā bāzes scenārijā (3.15. att.). Tomēr CO₂ samazināšanas izmaksas SEG emisiju samazināšanai šajā scenārijā ir zemākas, jo *TIMES* modelis optimizē sistēmu, lai sasniegtu zemākās SEG emisiju samazināšanas izmaksas.

Modelēšanas uzdevuma mērķis ir nodrošināt nepieciešamo energopakalpojumu pieprasījumu ar viszemākajām iespējamām kopējām izmaksām. Ir skaidrs, ka klimatneitralitātes sasniegšanai ir nepieciešami ievērojami ieguldījumi atjaunojamās energoresursu izmantojošās tehnoloģijās un energoefektivitātes pasākumos, kas veicina enerģijas taupīšanu un pāreju uz atjaunojamiem enerģijas avotiem.

Rezultāti liecina, ka mērķa scenārijs var sasniegt klimatneitralitāti. Taču līdz 2050. gadam tā kopējās izmaksas ir par 5 miljardiem eiro lielākas nekā politikas scenārijā un par 2 miljardiem eiro lielākas nekā bāzes scenārijā, ja ņem vērā katrā scenārijā sasniegto SEG faktisko samazinājumu (3.16. att.). Tomēr ar politiku un bāzes scenārijiem neizdodas panākt klimatneitralitāti, jo tie nenodrošina nepieciešamo SEG emisiju samazinājumu. Mērķa scenārijā nepieciešamo SEG samazinājumu iespējams sasniegt ar 89 miljardiem eiro līdz 2050. gadam, kas ir aptuveni 8,2 % no kopējā prognozētā IKP šajā periodā. Turpretim politikas scenārijā būtu nepieciešami 113 miljardi eiro, lai sasniegtu tādu pašu SEG samazinājuma līmeni, kas ir aptuveni 10,3 % no IKP, savukārt bāzes scenārijā būtu nepieciešami 134 miljardi eiro jeb aptuveni 12,3 % no IKP.

Šī analīze parāda, ka, lai gan mērķa scenārijam ir nepieciešami lielāki ieguldījumi, salīdzinot ar bāzes un politikas scenāriju, ņemot vērā faktisko, nevis vēlamo SEG samazinājumu, tas ļauj sasniegt klimatneitralitāti ekonomiski izdevīgāk – par 26 % zemākām kopējām izmaksām, salīdzinot ar politikas scenāriju, un par 50 % zemākām kopējām izmaksām, salīdzinot ar bāzes scenāriju.



3.16. attēls. Kopējās sistēmas izmaksas CO₂ samazināšanai dažādos scenārijos.

Kopējās investīcijas un šo investīciju subsīdētā daļa dažādiem *WAM* un *WEM* scenāriju pasākumiem apkopota 3.1. tabulā. Visas investīcijas un subsīdijas tiek uzrādītas kā kumulatīvā vērtība no 2020. līdz 2030. gadam. Tā kā energoefektivitātes mērķu sasniegšanai var izmantot vietējos AER, *OPT_Solar* kopējās investīcijas PV paneļos ir lielākas nekā *OPT_EE* scenārijā un mazākas kopējās investīcijas ēku renovācijā.

3.1. tabula

Kumulatīvās investīcijas un subsīdijas no 2020. līdz 2030. gadam

	Kopējās investīcijas, miljardi EUR				Subsīdijas, miljardi EUR		Subsīdijas % no kopsummas, %	
	<i>WEM</i>	<i>OPT_I</i>	<i>OPT_II</i>	<i>WAM</i>	<i>WEM</i>	<i>WAM</i>	<i>WEM</i>	<i>WAM</i>
Ēku renovācija	1,25	8,98	4,13	5,45	0,52	3,59	41,7	65,89
Biometāna ražošana	0,02	0,02	0,02	0,06	0,01	0,03	28,62	41,22
PV paneļi	1,84	1,16	3,35	1,51	0,02	0,02	1,33	1,63
Patērētāju siltumsūkņi	0,16	0,16	0,16	0,15	0,00	0,06	0,00	40,29
Rūpniecības energoefektivitāte	0,65	1,42	0,87	0,63	0,06	0,06	8,66	8,91
Enerģijas pārveides sektors	2,70	4,63	4,44	3,09	0,03	0,03	1,23	1,07
Sabiedriskais transports	0,83	1,85	1,53	1,11	0,01	0,05	1,18	4,07
Elektriskie transportlīdzekļi	1,82	8,98	8,10	3,04	0,01	0,01	0,55	0,33

Gan *OPT_EE*, gan *OPT_Solar* scenārijos investīcijas elektriskajos transportlīdzekļos ir vienlīdz augstas. Salīdzinot *WEM* un *WAM* scenārijus, ir vērojams ēku renovācijas investīciju subsīdētās daļas pieaugums, turklāt ir vērojams būtisks kopējo investīciju pieaugums ēku renovācijā no 1,25 miljardiem eiro *WEM* scenārijā līdz 5,45 miljardiem eiro *WAM* scenārijā, šai kombinācijai nepieciešams būtisks subsīdiju pieaugums no 0,52 līdz 3,5 miljardiem eiro (3.1. tab.).

SECINĀJUMI

Promocijas darbā tiek piedāvāta jauna metodoloģija, kas spēj novērtēt Latvijas enerģētikas sektora virzību uz klimatneitralitāti. Darba gaitā tika izstrādāts modelis un formulēti trīs scenāriju veidi.

- Bāzes scenāriji (bāzes un *WEM*), kuros ir iekļauta pašreizējā stratēģija, spēkā esošā nodokļu politika un citi politikas instrumenti un pasākumi.
- Politikas scenāriji (*NEKP*, *WAM*), kas ietver dažādus politikas instrumentus un pasākumus, piemēram, Nacionālajā enerģētikas un klimata plānā līdz 2030. gadam noteiktos.
- Mērķa scenāriji (*SEG* mērķa, *OPT_EE*, *OTP_Solar*), kuru mērķis ir līdz 2050. gadam sasniegt klimatneitralitāti.

Modelēšana tika veikta, izmantojot lineārās optimizācijas rīku *TIMES*.

Galvenie secinājumi, kas izriet no promocijas darba

- 1) Modeļa rezultāti apstiprina, ka ar šobrīd Latvijā spēkā esošajiem politikas instrumentiem un pasākumiem 2050. gadam izvirzītie klimata mērķi netiks sasniegti. Rezultāti liecina, ka nepieciešamo *SEG* emisiju samazinājumu klimatneitralitātes sasniegšanai var panākt ar ilgtermiņā plānotiem mērķtiecīgiem papildu instrumentiem un pasākumiem.
- 2) Optimizācijas rezultāti izceļ spēcīgu savstarpējo sakarību starp siltumsūkņu izmantošanu un vēja enerģijas ražošanu. Tas liecina, ka vēja enerģijas izmantošanas palielināšana var veicināt siltumsūkņu plašāku izmantošanu un otrādi, tādējādi nodrošinot vēl lielāku *SEG* emisiju samazinājumu.
- 3) Modelis parāda, ka enerģijas galapatēriņš Latvijas rūpniecības sektorā pieaug visos attīstības scenārijos, kas skaidrojams ar prognozēto ekonomikas izaugsmi. Esošie politikas instrumenti un pasākumi nav pietiekami, lai kompensētu šo enerģijas pieprasījuma pieaugumu rūpniecībā.
- 4) Koksnes apakšnozarē biomasas ir nozīmīgākais energoresurss, kas modelēšanas periodā pakāpeniski aizstāj dabasgāzi. Arī pārtikas apakšnozarē dabasgāze arvien vairāk tiek aizstāta ar biomasu. Turpretī nemetālisko minerālu apakšnozarē dabasgāze un citi fosilie kurināmie – kā arī sadzīves atkritumi, riepas un gumijas izstrādājumi – saglabājas nozīmīgi energoresursi līdz pat modelēšanas perioda beigām. Vienlaikus visos analizētajos scenārijos palielinās arī atjaunojamās enerģijas īpatsvars.
- 5) Centralizētās siltumapgādes patēriņš bāzes scenārijā saglabājas stabils. Turpretim politiku un mērķa scenārijos tas samazinās par aptuveni 30 %, pateicoties ēku energoefektivitātes uzlabojumiem, centralizētās siltumapgādes tīklu renovācijai un citiem energoefektivitātes pasākumiem. Bāzes scenārijā centralizētās siltumapgādes ražošanā dominē dabasgāze un biomasas, savukārt politiku un mērķa scenārijos dabasgāzes izmantošana tiek pakāpeniski pārtraukta līdz 2050. gadam. Mērķa scenārijā biomasas patēriņš samazinās līdz aptuveni 20 %, ko veicina ievērojamu siltumenerģijas daļu ražošana liela mēroga siltumsūkņos un saules enerģijas tehnoloģijās. Jūtīguma

analīze liecina, ka stingrāki biomasas pieejamības ierobežojumi paātrina liela mēroga siltumsūkņu ieviešanu.

- 6) Gan politiku, gan mērķa scenāriji parāda, ka Latvijas enerģētikas pārveides sektors var saražot nepieciešamos centralizētās siltumenerģijas un elektroenerģijas apjomus gandrīz bez emisijām, ja tiek veiktas būtiskas investīcijas zemu emisiju tehnoloģijās. Lai to panāktu, līdz 2050. gadam kopumā ir nepieciešamas par 22 % jeb 326 miljoni eiro lielākas investīcijas nekā bāzes scenārijā.
- 7) Lai īstenotu mērķa scenāriju, kas sasniedz klimatneitralitāti, līdz 2050. gadam kopējās izmaksas veido 89 miljardus eiro. Šī summa ir aptuveni 8,2 % no kopējā prognozētā IKP šajā periodā, kas ir par 6 % vairāk nekā nepieciešams politikas scenārija īstenošanai un par 2 % vairāk nekā bāzes scenārija īstenošanai, ja ņem vērā faktisko SEG emisiju samazinājumu katrā no tiem. Tomēr, lai sasniegtu klimatneitralitāti ar nepieciešamo SEG emisiju samazinājumu, politikas scenārija gadījumā kopējās izmaksas būtu par 26 % lielākas, bet bāzes scenārija īstenošanai par 50 % lielākas nekā mērķa scenārijā, kas nodrošina zemākās SEG emisiju samazināšanas izmaksas uz 1 tonnu.
- 8) Rezultāti liecina, ka mērķtiecīgai politikai ir izšķiroša nozīme definēto *REPowerEU* un Zaļā kursa mērķu sasniegšanai, jo bāzes scenārija rezultāti bez papildu instrumentiem un pasākumiem ievērojami atpaliek no vēlamā primārās un galaenerģijas patēriņa līmeņa 2030. un 2050. gadam. Tas nozīmē, ka ir nepietiekami paļauties tikai uz tirgus spēkiem un ir jāīsteno politika, kas īpaši izstrādāta, lai nodrošinātu klimata mērķu sasniegšanu. Šāda politika varētu ietvert pasākumus fosilo izmantojošo tehnoloģiju aizvietošanas veicināšanai, palielināt oglekļa nodokļus un noteikt stingrākus noteikumus tirgus dalībniekiem, lai veicinātu pāreju uz atjaunojamo enerģiju, kā arī veicinātu energoefektivitāti un taupību.
- 9) *TIMES* optimizācijas simulācija, kurā ir atļauti tikai energoefektivitātes pasākumi, lai sasniegtu 2030. gada galapatēriņa mērķus, parāda, ka visrentablākais dekarbonizācijas ceļš lielā mērā ir atkarīgs no ēku renovācijas un elektrifikācijas. Alternatīvā optimizācijas scenārijā, kas ļauj uzstādīt saules paneļus galalietotāja patēriņam, uzsvars uz ēku renovāciju tiek samazināts, jo saules enerģija kļūst par izmaksu ziņā efektīvāku risinājumu. Izmaksu izteiksmē optimālā dekarbonizācijas stratēģija tādējādi ietver mazāk energoefektivitātes pasākumu, bet lielākus ieguldījumus atjaunojamās enerģijas tehnoloģijās. Abas optimizācijas simulācijas liecina par pāreju no fosilā kurināmā uz atjaunojamiem energoresursiem visās nozarēs pēc 2030. gada, kur transporta sektors saglabā lielāko emisiju daļu līdz 2050. gadam.
- 10) Klasiskais *TIMES* modelēšanas rīks ir piemērots vispārīgai tehniski ekonomiskai analīzei. Tomēr inovatīvu risinājumu ieviešana modelī ir vitāli svarīga politikas instrumentu un pasākumu plašākai analīzes nodrošināšanai, kā arī energoresursu patēriņa struktūras precīzākai noteikšanai, kas ir nozīmīgs atbalsts lēmumu pieņemšanā, kas veicina klimata mērķu sasniegšanu ar kopējām zemākām izmaksām, piemēram:
 - rūpniecības un enerģijas pārveides sektora ETS sistēmas nodalīšana modelī ļauj analizēt emisiju kvotu cenu un nodokļu ietekmi, kā arī pasākumu efektu, kas tieši vērsti uz energoietilpīgajiem ražotājiem;

- ieviestais komforta elements transporta sektorā iekļauj cilvēku uzvedību, kas nodrošina to, ka rezultāti nav atkarīgi tikai no ekonomiskā izdevīguma;
- modelī ieviestais pieprasījums pēc apsildāmiem m² mājstāvētniecību un komerciālajā sektorā nodrošina iespēju iekļaut pasākumus, kas vērsti uz energoefektivitātes paaugstināšanu, kas līdz tam nebija tieši iespējams, jo pieprasījums tika balstīts siltināšanas un dzesēšanas apjomā;
- rūpniecības atlikumsiltuma izmantošanas procesa iestrāde rūpniecības sektorā nodrošina iespēju analizēt uz atlikumsiltuma izmantošanu vērsto pasākumu ietekmi.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

- 2-Gaiss ("Pārskats par gaisa aizsardzību 2-Gaiss.") Accessed: 2019
<https://www.meteo.lv/lapas/vide/parskatu-ievadisana/parskatu-ievadisana?id=1039&nid=376>.
- Alirezai M., Onat N., Tatari O., and Abdel-Aty M., "The Climate Change-Road Safety-Economy Nexus: A System Dynamics Approach to Understanding Complex Interdependencies", *Systems*, vol. 5, no. 1, p. 6, 2017, doi: 10.3390/systems5010006.
- Allena Ozoliņa S. et al., "Can energy sector reach carbon neutrality with biomass limitations?", *Energy*, pp. 123797–123797, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.123797.
- Allena-Ozoliņa S., Bažbauers G., "System dynamics model of research, innovation and education system for efficient use of bio-resources", *Energy Procedia*, vol. 128, pp. 350–357.
- Andersen K. S., Termansen L. B., Gargiulo M., and Gallachóirc B. P. Ó, "Bridging the gap using energy services: Demonstrating a novel framework for soft linking top-down and bottom-up models", *Energy*, vol. 169, pp. 277–293, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2018.11.153.
- Astudillo M. F., Vaillancourt K., Pineau P. O., and Amor B., "Can the household sector reduce global warming mitigation costs? sensitivity to key parameters in a TIMES techno-economic energy model", *Appl. Energy*, vol. 205, no. July, pp. 486–498, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.07.130.
- Balyk et al., "TIMES-DK: Technology-rich multi-sectoral optimisation model of the Danish energy system", *Energy Strateg. Rev.*, vol. 23, no. July 2017, pp. 13–22, 2019, doi: 10.1016/j.esr.2018.11.003.
- Barisa A. and M. Rošā, "A system dynamics model for CO2 emission mitigation policy design in road transport sector", *Energy Procedia*, vol. 147, pp. 419–427, 2018, doi: 10.1016/j.egypro.2018.07.112.
- Barisa A. and M. Rošā, "Scenario analysis of CO2 emission reduction potential in road transport sector in Latvia", *Energy Procedia*, vol. 147, pp. 86–95, 2018, doi: 10.1016/j.egypro.2018.07.036.
- Barisa A., Kirsanovs V., and Safronova A., "Future transport policy designs for biomethane promotion: A system Dynamics model", *J. Environ. Manage.*, vol. 269, no. May, p. 110842, 2020, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110842.
- Blumberga D., Blumberga A., Barisa A., Rošā M., and Lauka D., "Modelling the Latvian power market to evaluate its environmental long-term performance", *Appl. Energy*, vol. 162, pp. 1593–1600, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.06.016.
- Bolwig S. et al., "Review of modelling energy transitions pathways with application to energy system flexibility", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 101, no. June 2018, pp. 440–452, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2018.11.019.
- Borasio M. and Moret S., "Deep decarbonisation of regional energy systems: A novel modelling approach and its application to the Italian energy transition", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 153, p. 111730, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111730>.
- Brown T., Schlachtberger D., Kies A., Schramm S., and Greiner M., "Synergies of sector coupling and transmission reinforcement in a cost-optimised, highly renewable European energy system", *Energy*, vol. 160, pp. 720–739, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.06.222.
- Brunke J. C. and Blesl M., "Energy conservation measures for the German cement industry and

- their ability to compensate for rising energy-related production costs”, *J. Clean. Prod.*, vol. 82, pp. 94–111, 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.06.074.
- Burandt T., Xiong B., Löffler K., and Oei P. Y., “Decarbonizing China’s energy system – Modeling the transformation of the electricity, transportation, heat, and industrial sectors”, *Appl. Energy*, vol. 255, no. September, p. 113820, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113820.
- Cayla J. M. and Maïzi N., “Integrating household behavior and heterogeneity into the TIMES-Households model”, *Appl. Energy*, vol. 139, pp. 56–67, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.11.015.
- Calvo L. V., Giner-Santonja G., Alonso-Fariñas B., and Aguado J. M., “The effect of the European Industrial Emissions Directive on the air emission limit values set by competent authorities in the permitting procedure: The case of the Spanish cement industry”, *Sci. Total Environ.*, vol. 773, p. 145491, 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145491.
- Capros P. et al., *EU Reference Scenario 2016*. 2016. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/ref2016_report_final-web.pdf.
- CE (Kopenhāgenas ekonomika), “Decarbonisation of the Nordics,” no. August, 2020.
- Cebulla F., Naegler T., and Pohl M., “Electrical energy storage in highly renewable European energy systems: Capacity requirements, spatial distribution, and storage dispatch”, *J. Energy Storage*, vol. 14, pp. 211–223, 2017, doi: 10.1016/j.est.2017.10.004.
- Chaudry M., Abeysekera M., Hosseini S. H. R., Jenkins N., and Wu J., “Uncertainties in decarbonising heat in the UK”, *Energy Policy*, vol. 87, pp. 623–640, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.07.019>.
- Connolly D., Lund H., and Mathiesen B. V., “Smart Energy Europe: The technical and economic impact of one potential 100 % renewable energy scenario for the European Union”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 60, pp. 1634–1653, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.02.025.
- CSP (Centrālā statistikas pārvalde), “Energy balance, TJ, thsd toe (NACE Rev.2)”. [Online]. Available: http://data1.csb.gov.lv/pxweb/en/vide/vide__energetika__ikgad/ENG020.px/.
- CSP (Centrālā statistikas pārvalde), “Energy balance, TJ, thsd toe (NACE Rev.2) by Indicator, Energy resources, Unit and Time period”. Accessed: 2021
- CSP (Centrālā statistikas pārvalde), “Travel distance and time of population of Latvia”, 2018, [Online]. Available: <https://stat.gov.lv/en/statistics-themes/business-sectors/passenger-traffic/press-releases/1753-latvijas-iedzivotaju>.
- Dalla Longa F. et al., “Wind potentials for EU and neighbouring countries: Input datasets for the JRC-EU-TIMES Model”, Jan. 2018, doi: 10.2760/041705.
- DEA (The Danish Energy Agency), “Catalogue of technology data for energy technologies”. [Online]. Accessed: 2018. Available: <https://ens.dk/en/our-services/projections-and-models/technology-data>.
- Dhar S., Pathak M., and Shukla P. R., “Transformation of India’s steel and cement industry in a sustainable 1.5 °C world”, *Energy Policy*, vol. 137, no. November 2019, 2020, doi: 10.1016/j.enpol.2019.111104.
- Dolge K., A. Kubule, and D. Blumberga, “Composite index for energy efficiency evaluation of industrial sector: sub-sectoral comparison”, *Environ. Sustain. Indic.*, vol. 8, no. May, 2020, doi: 10.1016/j.indic.2020.100062.
- Dolge K., Blumberga D. “Economic growth in contrast to GHG emission reduction measures in Green Deal context”. *Ecological Indicators*, 130, 2021, 108153.
- Dubrovskis D and Daģis S., “Maintenance of the ‘ Forest Expert ’ model, update on data

- availability and parameters. Soft-linkage with the System Dynamics and TIMES models”, pp. 1–27, 2018.
- EK (Eiropas Komisija), “Climate action progress report”. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52015DC0576>.
- EK (Eiropas Komisija), “DIRECTIVE 2003/87/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL establishing a scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community”, Off. J. Eur. Union, vol. 275, pp. 32–46, 2003.
- EK (Eiropas Komisija), “The European Green Deal”, Brussels 2019. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1576150542719&uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN> [Accessed 11.10.2023].
- EM (Ekonomikas ministrija), “Permits for the implementation of new electricity generation facilities”. [Online]. Accessed: 2019 Available: https://www.em.gov.lv/lv/nozares_politika/atjaunojama_enerģija_un_kogenerācija/atlaujas_jaunu_elektroenerģijas_razosanas_iekartu_ieviesana/.
- Eurostat Source: Eurostat (nrg_d_hhq), Accessed: 2019 https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_d_hhq/default/table?lang=en.
- Fitch-Roy O., Benson D., and Mitchell C., “Wipeout? Entrepreneurship, policy interaction and the EU’s 2030 renewable energy target” J. Eur. Integr., vol. 41, no. 1, pp. 87–103, Jan. 2019, doi: 10.1080/07036337.2018.1487961.
- Fleiter T. et al., “A methodology for bottom-up modelling of energy transitions in the industry sector: The FORECAST model”, Energy Strateg. Rev., vol. 22, no. September, pp. 237–254, 2018, doi: 10.1016/j.esr.2018.09.005.
- Gravelsins A. et al., “Modelling energy production flexibility: System dynamics approach”, Energy Procedia, vol. 147, pp. 503–509, 2018, doi: 10.1016/j.egypro.2018.07.060.
- Green K., Green R., and Vasilakos N., “Storing Wind for a Rainy Day: What Kind of Electricity Does Denmark Export?”, Energy J., vol. 33, no. 3, May 2012, doi: 10.5547/01956574.33.3.1.
- Hache E., Simoën M., Seck G. S., Bonnet C., Jabberi A., and Carcanague S., “The impact of future power generation on cement demand: An international and regional assessment Based on climate scenarios”, Int. Econ., vol. 163, no. November 2019, pp. 114–133, 2020, doi: 10.1016/j.inteco.2020.05.002.
- Han S. and Kim J., “An optimization model to design and analysis of renewable energy supply strategies for residential sector,” Renew. Energy, vol. 112, pp. 222–234, 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.05.030.
- Hof F., den Elzen M.G.J., den Elzen M., and Beltran A. M., “The EU 40 % greenhouse gas emission reduction target by 2030 in perspective”, Int. Environ. Agreem.-Polit. Law Econ., vol. 16, no. 3, pp. 375–392, Mar. 2016, doi: 10.1007/s10784-016-9317-x.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2023: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1–34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.
- Jaunzems Dz., Pakere I., Allena-Ozoliņa S., Freimanis R., Blumberga A., Bažbauers G., “Adaptation of TIMES Model Structure to Industrial, Commercial and Residential Sectors” Environmental and Climate Technologies, vol. 24, no. 1, 2020, pp. 392–405. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2020-0023>.
- Jonkman J., Castiglioni A., Akkerman R., and van der Padt A., “Improving resource efficiency

- in the food industry by using non-conventional intermediate products”, *J. Food Eng.*, vol. 287, no. June, p. 110198, 2020, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2020.110198.
- JRC (Joint Research Centre), Institute for Energy and Transport, Elbersen, B., Dalla Longa, F., Ruiz, P., et al., “The JRC-EU-TIMES model : bioenergy potentials for EU and neighbouring countries”, Publications Office, 2015, <https://data.europa.eu/doi/10.2790/39014>.
- Kermeli K. et al., “The scope for better industry representation in long-term energy models: Modeling the cement industry”, *Appl. Energy*, vol. 240, no. February, pp. 964–985, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.252.
- Latvenergo AS, “Latvenergo Group consolidated and Latvenergo AS 2017 Annual report”, 2017, [Online]. Available: https://latvenergo.lv/storage/app/media/investoriem/en/2017/LE_2017y_ENG_Annual_Report.pdf.
- Lerede D., Bustreo C., Gracceva F., Saccone M., and Savoldi L., “Techno-economic and environmental characterization of industrial technologies for transparent bottom-up energy modeling”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 140, no. February, p. 110742, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.110742.
- Li P. H., Keppo I., and Strachan N., “Incorporating homeowners’ preferences of heating technologies in the UK TIMES model”, *Energy*, vol. 148, pp. 716–727, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.01.150.
- Li S., Li L., and Wang L., “2030 Target for Energy Efficiency and Emission Reduction in the EU Paper Industry”, *Energies*, vol. 14, no. 1, p. 40, 2020, doi: 10.3390/en14010040.
- Lima A., “Electricity Storage as a Matching Tool Between Variable Renewable Energy and Load”, *SSRN Electron. J.*, May 2019, doi: 10.2139/ssrn.3389673.
- Loulou L., Goldstein G., Kanudia A., Lettila A., Remme U., and Noble K., “Documentation for the TIMES Model PART I - Concepts and Theory”, no. July, p. 151, 2016.
- Lund H., Möller B., Mathiesen B. V., and Dyrelund A., “The role of district heating in future renewable energy systems”, *Energy*, vol. 35, no. 3, pp. 1381–1390, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.11.023>.
- Marques C., Fuinhas J. A., and Tomás C., “Energy efficiency and sustainable growth in industrial sectors in European Union countries: A nonlinear ARDL approach”, *J. Clean. Prod.*, vol. 239, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118045.
- McCallum P. et al., “A multi-sectoral approach to modelling community energy demand of the built environment”, *Energy Policy*, vol. 132, no. June, pp. 865–875, 2019, doi: 10.1016/j.enpol.2019.06.041.
- Meessen J., Pestiaux J., Schobben Q., Q. Jossen, Martin B., Linden C. V., Lemmens P.W. “Analysing the impact assessment on raising the EU 2030 climate targets” 2020. Available online: https://www.ecologic.eu/sites/default/files/publication/2020/eu2030-ia-analysis_final.pdf.
- MK (Ministru kabinets), “Būvju klasifikācijas noteikumi”, *Latvijas Vestnesis*, vol. 118, no. 118, 2018.
- Obrist M. D., Kannan R., Schmidt T. J., and Kober T., “Decarbonization pathways of the Swiss cement industry towards net zero emissions”, *J. Clean. Prod.*, vol. 288, p. 125413, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125413.
- Ollier L., Metz F., Nuñez-Jimenez A., Späth L., and Lilliestam J., “The European 2030 climate and energy package: do domestic strategy adaptations precede EU policy change?”, *Policy Sci.*, Feb. 2022, doi: 10.1007/s11077-022-09447-5.
- Papadogeorgos I., Papapostolou A., Karakosta C., and Doukas H., “Multicriteria Assessment

- of Alternative Policy Scenarios for Achieving EU RES Target by 2030”, pp. 405–412, Jan. 2017, doi: 10.1007/978-3-319-56288-9_54.
- Pavičević M. et al., “The potential of sector coupling in future European energy systems: Soft linking between the Dispa-SET and JRC-EU-TIMES models”, *Appl. Energy*, vol. 267, no. May, p. 115100, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115100.
- Rafiee A., Karimi M., Safari A., and Abbasi Talabari F., “The Future Impact of Carbon Tax on Electricity Flow between Great Britain and Its Neighbors until 2030”, *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 21, p. 10460, Nov. 2021, doi: 10.3390/app112110460.
- Ramea K., Bunch D. S., Yang C., Yeh S., and Ogden J. M., “Integration of behavioural effects from vehicle choice models into long-term energy systems optimization models”, *Energy Econ.*, vol. 74, pp. 663–676, 2018, doi: 10.1016/j.eneco.2018.06.028.
- Resch et al., “Assessment of Policy Pathways for Reaching the EU Target of (At Least) 27 % Renewable Energies by 2030”, *Eur. Dimens. Ger. Energy Transit.*, pp. 45–65, Jan. 2019, doi: 10.1007/978-3-030-03374-3_4.
- Reveu A., Smeureanu I., Dardala M., and Kanala R., “Modelling domestic lighting energy consumption in Romania by integrating consumers behavior”, *Procedia Comput. Sci.*, vol. 52, no. 1, pp. 812–818, 2015, doi: 10.1016/j.procs.2015.05.137.
- RS (AS Rīgas siltums), “Annual Report 2017”. [Online]. Available: https://www.rs.lv/sites/default/files/page_file/rs_gada_parskats_2017.pdf.
- Runge-Metzger A. and Wehrheim P., “Agriculture and forestry in the EU’s 2030 climate target”, *Clim.-Neutral Eur.*, pp. 165–179, Oct. 2019, doi: 10.4324/9789276082569-8.
- Salvucci R., Gargiulo M., and Karlsson K., “The role of modal shift in decarbonising the Scandinavian transport sector: Applying substitution elasticities in TIMES-Nordic”, *Appl. Energy*, vol. 253, no. February, p. 113593, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113593.
- Salvucci R., Tattini J., Gargiulo M., Lehtilä A., and Karlsson K. B., “Modelling transport modal shift in TIMES models through elasticities of substitution”, *Appl. Energy*, vol. 232, pp. 740–751, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.09.083.
- Schmid E., Knopf B., and Pechan A., “Putting an energy system transformation into practice: The case of the German Energiewende,” *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 11, pp. 263–275, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.11.002>.
- Seck G. S., Guerassimoff G., and Maïzi N., “Heat recovery with heat pumps in non-energy intensive industry: A detailed bottom-up model analysis in the French food & drink industry”, *Appl. Energy*, vol. 111, no. 2013, pp. 489–504, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.05.035.
- Selosse S. and Ricci O., “Achieving negative emissions with BECCS (bioenergy with carbon capture and storage) in the power sector: New insights from the TIAM-FR (TIMES Integrated Assessment Model France) model”, *Energy*, vol. 76, pp. 967–975, 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.09.014.
- Shafiei E., Davidsdottir B., Leaver J., Stefansson H., and Asgeirsson E. I., “Simulation of alternative fuel markets using integrated system dynamics model of energy system”, *Procedia Comput. Sci.*, vol. 51, no. 1, pp. 513–521, 2015, doi: 10.1016/j.procs.2015.05.277.
- Shafiei E., Davidsdottir B., Leaver J., Stefansson H., Asgeirsson E. I., and Keith D. R., “Analysis of supply-push strategies governing the transition to biofuel vehicles in a market-oriented renewable energy system”, *Energy*, vol. 94, pp. 409–421, 2016, doi: 10.1016/j.energy.2015.11.013.
- Siddi M., “Coping With Turbulence: EU Negotiations on the 2030 and 2050 Climate Targets”, *Polit. Gov.*, vol. 9, no. 3, pp. 327–336, Sep. 2021, doi: 10.17645/pag.v9i3.4267.

- Simoes S. et al., “Impact of different levels of geographical disaggregation of wind and PV electricity generation in large energy system models: A case study for Austria”, *Renew. Energy*, vol. 105, pp. 183–198, May 2017, doi: 10.1016/j.renene.2016.12.020.
- Steinke F., Wolfrum P., and Hoffmann C., “Grid vs. storage in a 100% renewable Europe”, *Renew. Energy*, vol. 50, pp. 826–832, 2013, doi: 10.1016/j.renene.2012.07.044.
- Tash, A. Ahanchian M., and Fahl U., “Improved representation of investment decisions in the German energy supply sector: An optimization approach using the TIMES model”, *Energy Strateg. Rev.*, vol. 26, p. 100421, 2019, doi: 10.1016/j.esr.2019.100421.
- Tattini J., Gargiulo M., and Karlsson K., “Reaching carbon neutral transport sector in Denmark – Evidence from the incorporation of modal shift into the TIMES energy system modeling framework”, *Energy Policy*, vol. 113, no. November 2017, pp. 571–583, 2018, doi: 10.1016/j.enpol.2017.11.013.
- Temursho U., Weitzel M. and Vandyck T., “Distributional impacts of reaching ambitious near-term climate targets across households with heterogeneous consumption patterns: A quantitative macro-micro assessment for the 2030 Climate Target Plan of the EU Green Deal”, 2020, doi: 10.2760/89463.
- Veum K. and Bauknecht D., “How to reach the EU renewables target by 2030? An analysis of the governance framework”, *Energy Policy*, vol. 127, pp. 299–307, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.enpol.2018.12.013.
- VVD (Valsts vides dienests), “GHG permits”, Accessed: 2019 [Online]. Available: http://www.vvd.gov.lv/izsniegtas-atlaujas-un-licences/seg-atlaujas/?company_name=Olaines&org_id=&perm_date_from=&perm_date_to=&s=1.
- Wang H. and Chen W., “Modelling deep decarbonization of industrial energy consumption under 2-degree target: Comparing China, India and Western Europe”, *Appl. Energy*, vol. 238, no. January, pp. 1563–1572, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.131.
- Wiese F., Thema J., and Cordroch L., “Strategies for climate neutrality. Lessons from a meta-analysis of German energy scenarios”, *Renew. Sustain. Energy Transit.*, vol. 2, no. October 2021, p. 100015, 2022, doi: 10.1016/j.rset.2021.100015.
- Xu Y. and Szmerekovsky J., “System dynamic modeling of energy savings in the US food industry”, *J. Clean. Prod.*, vol. 165, pp. 13–26, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.07.093.
- Zappa W., Junginger M., and van den Broek M., “Is a 100% renewable European power system feasible by 2050?”, *Appl. Energy*, vol. 233–234, no. January 2018, pp. 1027–1050, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.08.109.
- Zhu Y. and Ming J., “Lagrangian decomposition for stochastic TIMES energy system optimization model”, *AIMS Math.*, vol. 7, no. 5, pp. 7964–7996, Jan. 2022, doi: 10.3934/math.2022445.



Signe Allena-Ozoliņa dzimusi 1989. gadā. Latvijas Universitātē ieguvusi sociālo zinātņu bakalaura grādu (2012) un maģistra grādu (2014) vadībzinātnē (programma "Vide un uzņēmējdarbības vadība") un Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) – maģistra grādu vides zinātnēs (2016). No 2019. līdz 2023. gadam bijusi pētniece RTU Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūtā. Patlaban ir Latvijas Republikas Klimata un enerģētikas ministrijas Klimata politikas departamenta vecākā eksperte. Zinātniskās intereses saistītas ar energosistēmu modelēšanu, atjaunojamiem energoresursiem un siltumnīcefekta gāzu emisiju samazināšanu.