



RĪGAS TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Dace Lauka

ATJAUNOJAMO ENERGORESURSU ILGTSPĒJAS ANALĪZE

Promocijas darba kopsavilkums



RTU Izdevniecība
Rīga 2018

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

Dace LAUKA

Doktora studiju programmas “Vides zinātne” doktorante

**ATJAUNOJAMO ENERGORESURSU
ILGTSPĒJAS ANALĪZE**

Promocijas darba kopsavilkums

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

D. Lauka. Atjaunojamo energoresursu ilgtspējas analīze. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU, 2018. 40 lpp.

Iespiests saskaņā ar Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūta 2018. gada 11. janvāra lēmumu, protokols Nr. 92.

ISBN 978-9934-22-112-5 (print)
ISBN 978-9934-22-113-2 (pdf)

**PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA VIDES
ZINĀTNĒ IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda (*Dr. sc. ing.*) vides zinātnē iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2018. gada 28. augustā, plkst. 14:00 Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Āzenes ielā 12/1, 115. auditorijā.

Oficiālie recenzenti

Profesors *Dr. sc. ing.* Ritvars Sudārs,
Latvijas Lauksaimniecības universitāte

Pētnieks *Dr. geogr.* Oskars Purmalis,
Latvijas Universitāte

Profesors *Dr. Erik O. Ahlgren,*
Chalmers University of Technology

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājusi šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda vides zinātnē iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Dace Lauka (paraksts)

Datums

Promocijas darbs ir izstrādāts angļu valodā, tajā, ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 30 attēlu, deviņas tabulas, kopā 146 lappuses. Literatūras sarakstā ir 60 nosaukumu.

SATURA RĀDĪTĀJS

Ievads	5
Darba mērķis un uzdevumi	5
Darba aktualitāte un hipotēze	6
Darba zinātniskā novitāte.....	8
Darba zinātniskā nozīme.....	8
Darba praktiskā nozīme	9
Zinātniskā darba aprobācija	9
Darba struktūra un apjoms.....	13
1. Literatūras apskats	14
1.1. Vides un klimata aspekti.....	14
1.2. Inženiertehniskie aspekti.....	14
1.3. Ekonomiskie aspekti	15
1.3.1. Pieprasījuma reakcijas analīze	15
1.3.2. Investīciju analīze	16
1.4. Atjaunojamās enerģijas avotu novērtējums	16
2. Pētījuma metodika	17
2.1. Vides un klimata aspekti, izmantojot sistēmdinamikas modelēšanu	17
2.2. Inženiertehniskie aprēķini.....	21
2.3. Enerģijas ietaupījuma ekonomiski aprēķini.....	23
2.3.1. Pieprasījuma reakcijas analīze	23
2.3.2. Investīciju analīze	25
2.4. Atjaunojamās enerģijas avotu integrēšanas aprēķini	26
3. Rezultāti un diskusija.....	28
3.1. Vides un klimata aspekti.....	28
3.2. Inženiertehniskie aspekti.....	31
3.3. Ekonomiskie aspekti	33
3.3.1. Pieprasījuma analīze	33
3.3.2. Investīciju analīze	34
3.4. Atjaunojamo enerģijas avotu izpēte.....	36
Secinājumi	38

IEVADS

Klimata pārmaiņas ir viens no vispretrunīgāk vērtētajiem jautājumiem. Ir daļa sabiedrības, kas uzskata, ka tās ir cilvēku ekonomiskās darbības rezultātā radušās pārmaiņas, savukārt otra daļa pamatojas uz to, ka miljonu gadu laikā Zemes atmosfēras temperatūra cikliski ir mainījusies. Lai uz kuru pusi nosvērtos taisnības svāri, pēdējās desmitgadēs arvien aktīvāk tiek domāts par klimata pārmaiņām un ietekmes uz vidi samazināšanas iespējām. Viens no veidiem, kā mazināt ietekmi uz vidi, ir pāreja no fosilo uz atjaunojamo energoresursu (AER) izmantošanu, kas nozīmīgi samazinātu siltumnīcefektu izraisošo gāzu apjomu atmosfērā. Atjaunojamo energoresursu izmantošanas veicināšana ļoti veiksmīgi sasaucas ar Eiropas Savienības definētajiem mērķiem nākamajām desmitgadēm.

Viens no Eiropas Savienības (ES) galvenajiem mērķiem ir siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisiju samazināšana. Katra no dalībvalstīm apņēmusies samazināt SEG emisijas tā, lai sasniegtu noteiktas mērķa līmeņatzīmes 2020. un 2030. gadā. “Enerģētikas stratēģija 2020” nosaka, ka primārās enerģijas patēriņu nepieciešams samazināt par 20 % (salīdzinot ar prognozēto attīstības tendenci), atjaunojamo energoresursu daļai no kopējā enerģijas patēriņa būtu jāpieaug par 20 %, un SEG emisijas jāsamazina par 20 % salīdzinājumā ar 1990. gada līmeni.

Eiropas Savienība ir definējusi mērķus saistībā ar atjaunojamo energoresursu īpatsvara palielināšanu gala patēriņā, minot konkrētus mērķa lielumus. Darba autore uzskata, ka, lai atjaunojamo energoresursu ieviešana atbilstu direktīvā noteiktajiem mērķiem, tai ir jābūt ilgtspējīgai. Ar ilgtspējību saprot faktorus, kas ir saistīti ar ekonomiku, inovācijām, klimata un vides draudzīgumu un klimata pārmaiņu mazināšanu.

Pamatojoties uz ilgtspējības faktoriem, autore promocijas darbā izvirza četrus aspektus, parādot, ka atjaunojamo energoresursu izvēle nav vienpusīga, bet ir saistīta un novērtēta no dažādiem aspektiem.

Darba mērķis un uzdevumi

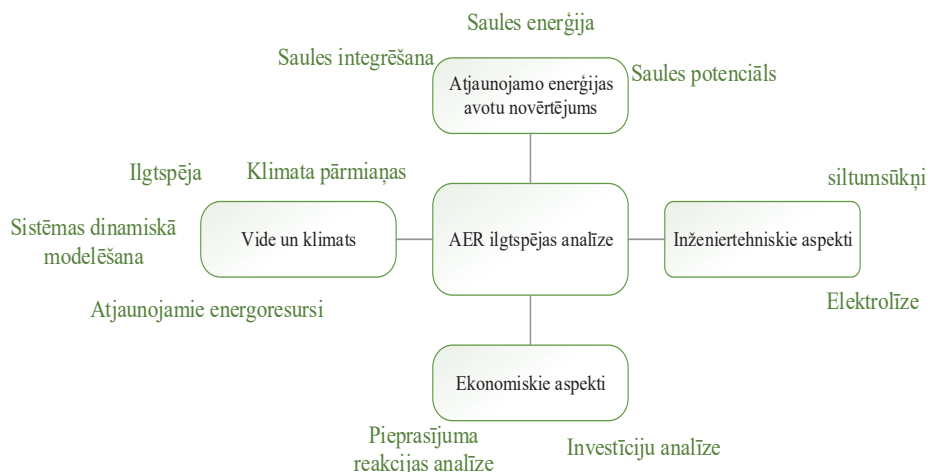
Promocijas darba mērķis ir analizēt atjaunojamo energoresursu izmantošanas iespējas no ilgtspējības viedokļa puses. Lai sasniegtu šo mērķi, ir izvirzīti uzdevumi:

- izpētīt atjaunojamo energoresursu izmantošanas potenciālu nākamo 10, 20 un 30 gadu periodā vides un klimata aspektā, izmantojot sistēmas dinamisko modelēšanu;
- izpētīt, kā ekonomiskie aspekti – pieprasījuma reakcijas analīze un investīciju analīze ļauj analizēt un prognozēt atjaunojamo energoresursu potenciālu nozarēs;
- izmantojot daudzkritēriju un scenāriju analīzi, pētīt atjaunojamo energoresursu perspektīvu inženiertehniskā aspektā;
- izpētīt un novērtēt atjaunojamo energoresursu potenciālu, izmantojot regresijas, laika rindu un scenāriju analīzi.

Darba aktualitāte un hipotēze

Promocijas darbā izvirzītā hipotēze: atjaunojamo energoresursu ilgtspējas analīzi un resursu izmantošanu ilgtermiņā raksturo aspekti, kas saistīti ar vidi un klimatu, inženiertehniskie un ekonomiskie aspekti un aspekts atjaunojamo enerģijas avotu novērtējumam.

Sabiedrība arvien vairāk sāk interesēties par jautājumiem, kas ir saistīti ar vidi, atjaunojamo enerģiju, vides piesārņojumu gan tiešā, gan netiešā veidā, kā arī citiem ar vidi saistītiem jautājumiem. Tie ir dažādi virzītājspēki, kas nosaka, kam pievērst lielāku uzmanību. Virzību uz ilgtspējīgu resursu apsaimniekošanu, enerģijas ieguvu un tās izmantošanu galvenokārt nosaka valsts un Eiropas Savienības izstrādātās direktīvas un plānošanas dokumenti.



1.1. att. Atjaunojamo enerģijas avotu ilgtspējas analīzes būtība.

Direktīvās un plānošanas dokumentos iekļautie mērķa lielumi galvenokārt ir attiecināmi uz atjaunojamo resursu īpatsvaru enerģijas gala patēriņā. Lai virzītos uz ilgtspējīgu atjaunojamo energoresursu izmantošanas attīstību, nepietiek izpildīt Eiropas Savienības definētos mērķus, bet jāanalizē ietekmējošie faktori kopumā. Atjaunojamo energoresursu ilgtspējas analīzes būtība ir attēlota 1.1. attēlā. Pēc autores domām, ilgtspējīga atjaunojamo energoresursu izmantošanas analīze sastāv un ietver sevī aspektus, kas ir, saistīti ar inženiertehniskiem un ekonomiskiem aspektiem, kā arī vidi un klimatu. Promocijas darbā atjaunojamo energoresursu jautājums tiek pētīts un analizēts vides un klimata, tehnoloģiskā un ekonomiskā aspektā. Lai noskaidrotu, kas ir ilgtspējības analīzes pamatā attiecībā uz atjaunojamo energoresursu izmantošanu, nepieciešams apskatīt, kādi faktori ietekmē to izmantošanas iespējas. Sākotnēji tiek pievērsta uzmanība aspektam, kas vistiešāk attiecas uz atjaunojamo energoresursu izmantošanu – vides un klimata aspektam. Videi un klimatam pēdējo desmitu gadu laikā tiek pievērsta vislielākā uzmanība. Zinātnieki veic arvien vairāk pētījumu, kas ir saistīti ar ietekmes uz vidi samazināšanu un pievēršanos atjaunojamo energoresursu izmantošanai dažādos tautsaimniecības sektoros. Problēma galvenokārt ir saistīta ar siltumnīcefekta gāzu emisiju samazināšanas iespējām, tās iespējams samazināt, pārejot uz atjaunojamiem energoresursiem (skatīt publikāciju Nr. 1). Eiropas Savienības un Latvijas līmenī ietekmes uz vidi samazināšana notiek, pārejot uz atjaunojamiem energoresursiem (skatīt publikācijas Nr. 2 un 3), kur to

Īpatsvars enerģijas gala patēriņā tiek noteikts ES direktīvās un vietēja mēroga plānošanas dokumentos.

Pāreja uz atjaunojamiem energoresursiem ir cieši saistīta ar esošo tehnoloģiju pielāgošanu vai jaunu tehnoloģiju ieviešanu enerģijas ražošanas sistēmā (skatīt publikācijas Nr. 4 un 5). Tehnoloģiju nomaiņa vai tās pielāgošana pārejai uz atjaunojamo energoresursu izmantošanu sasauca gan ar vides un klimata aspektiem, gan ar ekonomiskajiem aspektiem.

Ieviešos “zaļākas” tehnoloģijas, tiek domāts par jautājumiem, kas ir saistīti ar tehnoloģiju ieviešanas ekonomisko pusi un iespēju ietaupīt, izmantojot ekonomiskos paņēmienus un analīzi (skatīt publikācijas Nr. 6, 7 un 8) ekonomiskie aspekti ir ļoti cieši saistīti ar inženiertehniskajiem aspektiem, kā arī ar aspektiem, kas ir saistīti ar vidi un klimatu.

Noslēdzošais un, pēc autores domām, būtiskākais faktors, kas ietekmē virzību uz ilgtspējīgas atjaunojamo energoresursu izmantošanas iespējām, ir saistīts ar padziļinātu konkrēta resursa izpēti (skatīt publikācijas Nr. 9 un 10). Pētījumos atšķiras rezultāti par to, ar kuru atjaunojamo enerģijas resursu aizstāt fosilos resursus enerģijas ražošanai. Autores publikācijās, kas ir saistītas ar vides un klimata aspektiem, iezīmējas, ka liels potenciāls enerģijas ražošanai ir no biomasas, kā arī saules enerģijas. Līdz ar to autores pēdējie pētījumi pierāda to, ka saules enerģijai ir liels potenciāls Latvijas klimatiskajos apstākļos.

Promocijas darbā ir apskatīti četri aspekti – (1) vide un klimats, (2) inženiertehniskie, (3) ekonomiskie un (4) atjaunojamo enerģijas avotu novērtējums – un analizēta to mijiedarbība. Turpmāk promocijās darbā autore atsauca uz 10 galvenajām publikācijām, kas turpmāk tiek apzīmētas kā publikācija Nr. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 un 10, un kas atbilst 1.1. tabulā minētajām zinātniskajām publikācijām.

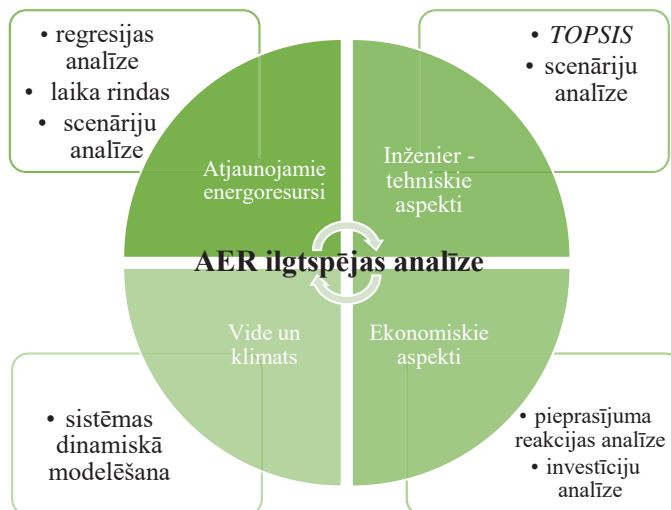
1.1. tabula

Zinātniskās publikācijas, kas izmantotas promocijas darbā, lai izpētītu atjaunojamo energoresursu ilgtspēju

Izpētes joma	Nr.	Publikācijas nosaukums
Vide un klimats	1	<i>Analysis of GHG reduction in non-ETS Energy Sector</i>
	2	<i>Modelling the Baltic power system till 2050</i>
	3	<i>Modelling the Latvian power market to evaluate its environmental long-term performance</i>
Inženiertehniskais aspekts	4	<i>Analysis of use of bioenergy production by-products to enhance electrolysis process</i>
	5	<i>Heat Pumps Integration Trends in District Heating Networks of the Baltic States</i>
	6	<i>Demand response analysis methodology in DH system</i>
Ekonomiskie aspekti	7	<i>Analysis of Industrial Electricity Consumption Flexibility. Assessment of Saving Potentials in Latvia and Kazakhstan</i>
	8	<i>Results of Investment Analysis in Power Transmission in Latvia and Lithuania</i>
Atjaunojamo energoresursu novērtējums	9	<i>Solar power and heat production via photovoltaic thermal panels for district heating and industrial plant</i>
	10	<i>First solar power plant in Latvia. Analysis of operational data</i>

Darba zinātniskā novitātē

Lai pārbaudītu hipotēzi, tika izmantotas dažādas pētījumu metodes. Izmantoto metožu sadalījums atjaunojamo energoresursu ilgtspējas analīzei ir parādīts 1.2. attēlā.



1.2. att. Darbā izmantotās metodes atjaunojamo energoresursu ilgtspējas analīzei.

Promocijas darbs ir balstīts uz atjaunojamo energoresursu ilgtspējas analīzi, lietojot četrus aspektus, kas norāda uz atjaunojamo energoresursu ilgtspējīgām izmantošanas iespējām. Atjaunojamo energoresursu izvēli un sasaisti ar izvēlētajiem faktoriem raksturo darbā izvēlētās metodes, kas ir gan kvalitatīvās, gan kvantitatīvās zinātniskās pētniecības metodes: literatūras analīze, datu vākšana un analīze, eksperimenta plānošana un veikšana, datu statistiskā analīze un matemātiskā modelēšana.

Izpratnei par siltumnīcefekta gāzu apjomu un prognozējamām tendencēm izmantota sistēmas dinamiskā modelēšana (SD). SD modelēšana, lietojot dažādus scenārijus, prognozē atjaunojamo energoresursu īpatsvara palielināšanos enerģijas gala patēriņā. Izvērtējot resursu izmantošanas potenciālu ekonomiskā aspektā, izmantota pieprasījuma reakcijas analīze un investīciju analīze. Atjaunojamo energoresursu izmantošana inženiertehniskā aspektā tiek izvērtēta, izmantojot daudzkritēriju analīzes (*multi criteria analysis*) TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) metodi un scenāriju analīzi. Atjaunojamo energoresursu potenciāla noteikšanai izmantota korelācijas un regresijas analīze, laika rindu metode un scenāriju analīze.

Darba zinātniskā nozīme

Promocijas darbam ir augsta zinātniskā vērtība gan Latvijas, gan starptautiskā līmenī, jo darbā izstrādātas un testētas metodes, kas demonstrē atjaunojamo energoresursu lietojuma analīzi ilgtspējības aspektā:

- sistēmdinamikas modeļa izveide, iekļaujot atšķirīgus attīstības scenārijus, prognozējot siltumnīcefekta gāzu samazinājumu un atjaunojamo energoresursu īpatsvara palielinājumu;
- atjaunojamo energoresursu potenciāla izvērtējums nozarē caur ekonomisko – pieprasījuma reakcijas analīzes un investīciju analīzes puses;
- atjaunojamo energoresursu inženiertehnisko faktoru izvērtējums, izmantojot scenāriju analīzi un vairākkritēriju analīzi;
- saules enerģijas potenciāla un perspektīvas starp atjaunojamo energoresursu izmantošanas iespējām analīze, lietojot scenāriju analīzi, laika rindas apstrādes metodi un regresijas analīzi.

Darba praktiskā nozīme

Atjaunojamo energoresursu izmantošanai ir būtiska nozīme, lai nodrošinātu siltumnīcefekta gāzu emisijas samazināšanu. Pāreja no fosiliem resursiem uz atjaunojamiem energoresursiem veicina enerģētiskā sektora neatkarību valstiskā līmenī.

Eiropas Savienība ir noteikusi ambiciozus mērķus attiecībā uz atjaunojamo energoresursu izmantošanas iespējām gala patēriņā, līdz ar to veiktais atjaunojamo energoresursu ilgtspējības izvērtējums ļauj pamatotāk veikt atjaunojamo energoresursu integrēšanu enerģijas ražošanai.

Atjaunojamo energoresursu izmantošanas iespēju izvērtējums no vides un klimata, ekonomiskiem, inženiertehniskiem un padziļinātas atjaunojamo energoresursu izpētes puses ļauj apskatīt resursu izmantošanas potenciālu ilgtspējības aspektā. Atjaunojamo energoresursu ieviešanai nav viennozīmīgas pieejas, to ieviešana ir saistīta ar dažādām pārejas metodoloģijām.

Darbā iegūtie rezultāti sniedz gan zinātnisku, gan praktisku pamatojumu atjaunojamo energoresursu izmantošanas iespējām. Promocijas darba rezultāti var tikt izmantoti nacionālās un arī starptautiskās politikas pilnveidošanai. Promocijas darba rezultāti ir aktuāli ne tikai zinātniekiem un nozares profesionāļiem, bet arī tautsaimniecības sektora attīstībā iesaistītajiem cilvēkiem.

Zinātniskā darba aprobācija

Zinātniskās publikācijas par tēmu

1. Lauka, D., Haine, K., Gusca, J., Blumberga, D. Solar energy integration in future urban plans of the South and Nordic cities. *Energy Procedia*, 2018 (*will be indexed in Scopus*).
2. Lauka, D., Barisa, A., Blumberga, D. Assessment of the availability and utilization potential of low-quality biomass in Latvia// *Energy Procedia*, 2018, (*will be indexed in Scopus*)
3. Rozentale L., Lauka D., Blumberga D. Accelerating power generation with solar panels. Case in Latvia// *Energy Procedia*, 2018, (*will be indexed in Scopus*)
4. Lauka, D., Blumberga, D. First solar power plant in Latvia. Analysis of operational data. *Energy Procedia*, 2018 (*will be indexed in Scopus*).
5. Pakere, I., Lauka, D., Blumberga, D. Solar power and heat production via photovoltaic thermal panels for district heating and industrial plant. *Energy* 154 (2018) 424–432.

6. Khabdullin, A., Khabdullina, Z., Khabdullina, G., Lauka, D., Blumberga, D. Demand response analysis methodology in DH system. *Energy Procedia*, Volume 128, 2017, 539–543, Scopus.
7. Khabdullin, A., Khabdullina, Z., Khabdullin, A., Khabdullina, G., Lauka, D., Blumberga, D., Analysis of Industrial Electricity Consumption Flexibility. Assessment of Saving Potentials in Latvia and Kazakhstan. *Energy Procedia*, Volume 113, 2017, 450–453, Scopus, times cited – 2.
8. Lauka, D., Blumberga, D., Grabaak, I., Amundsen, J. S. Results of Investment Analysis in Power Transmission in Latvia and Lithuania. *Energy Procedia*, Volume 95, 2016, 243–248, Scopus, times cited – 1.
9. Lauka, D., Gusca, J., Kalnins, S.N., Vigants, E., Blumberga, D. Analysis of use of bioenergy production by-products to enhance electrolysis process. *ECOS 2015 Proceedings*, Scopus.
10. Lauka, D., Gusca, J., Blumberga, D. Heat Pumps Integration Trends in District Heating Networks of the Baltic States. *Procedia Computer Science*, Volume 52, Issue 1, 2015, 835–842, Scopus, times cited – 8.
11. Lauka, D., Blumberga, A., Blumberga, D., Timma, L. Analysis of GHG reduction in non-ETS Energy Sector. *Energy Procedia*, Volume 75, 2015, 2534–2540, Scopus, times cited – 5.
12. Blumberga, A., Lauka, D., Barisa, A., Blumberga, D. Modelling the Baltic power system till 2050. *Energy Conversion and Management*, 2016, 107, 67–75, Scopus, time cited – 8.
13. Blumberga, D., Blumberga, A., Barisa, A., Rosa, M., Lauka, D. Modelling the Latvian power market to evaluate its environmental long-term performance. *Applied Energy*, Volume 162, 15 2016, 1593–1600, Scopus, time cited – 10.
14. Blumberga, A., Timma, L., Lauka, D., Dāce, E., Barisa, A., Blumberga, D. Achieving sustainability in nonETS sectors using system dynamics modelling practice. *Chemical Engineering Transactions*, 45, 2015, 871–876, Scopus, times cited – 3.
15. Lauka, D., Blumberga, D. Electrolysis Process Analysis by Using Low Carbon Content Additives: a Batch Test Study. *Energy Procedia*, Volume 72, June 2015, 196–201, Scopus, times cited – 1.

Citas zinātniskās publikācijas

1. Kalnbalkite, D. Lauka, D. Blumberga, Urban Planning Needs. Clustering of Energy End Users// *Energy Procedia*, Volume 113, 2017, 297–303, Scopus.
2. Pastare, L., Aleksandrovs, I., Lauka, D., Romagnoli, F. Mechanical pre-treatment effect on biological methane potential from marine macro algae: results from batch tests of *Fucus vesiculosus*. *Energy Procedia* 95 (2016) 351–357.
3. Bazbauers, G., Bariss, U., Timma, L., Lauka, D., Blumberga, A., Blumberga, D. Electricity saving in households due to the market liberalization and change in the consumer behaviour. *Energetika* 2015, 61(3–4), 108–118.
4. Vigants, E., Vigants, G., Veidenbergs, I., Lauka, D., Kļaviņa, K., Blumberga, D. Analysis of Energy Consumption for Biomass Drying Process. Volume II, 2015, 317–322, Scopus.

5. Muizniece, I., Lauka, D., Blumberga, D. Thermal Conductivity of Freely Patterned Pine and Spruce Needles. *Energy Procedia*, Volume 72, June 2015, 256–262.
6. Muizniece, I., Lauka, D., Blumberga, D. Thermal Conductivity of Freely Patterned Pine and Spruce Needles. No: Konference "Vides zinātne un izglītība Latvijā un Eiropā": tēžu krājums, Latvija, Rīga, 24.–24. oktobris, 2014. Rīga: Vides zinātnes un izglītības padome, 2014, 34.–36. lpp. ISBN 97899341433111.
7. Lauka, D., Blumberga, D. Ekoloģisko pētījumu maģistra programmas studiju kurss. No: Konference "Vides zinātne un izglītība Latvijā un Eiropā": tēžu krājums, Latvija, Rīga, 24.–24. oktobris, 2014. Rīga: Vides zinātnes un izglītības padome, 2014, 25.–26. lpp. ISBN 97899341433111.
8. Pastare, L., Romagnoli, F., Lauka, D., Dzene, I., Kuzņecova, T. Sustainable Use of Macro-Algae for Biogas Production in Latvian Conditions: a Preliminary Study through an Integrated MCA and LCA Approach. *Environmental and Climate Technologies*. No. 13, 2014, 44–56, ISSN 1691-5208. e-ISSN 2255-8837. Available: doi:10.2478/rtuct-2014-0006 (Scopus).

Zinātniskās konferences

1. Lauka, D., Haine, K., Gusca, J., Blumberga, D. Solar energy integration in future urban plans of the South and Nordic cities. *Applied Energy Symposium and Forum 2018: Low carbon cities and urban energy systems*, CUE2018, 5–7 June 2018, Shanghai, China.
2. Lauka, D., Barisa, A., Blumberga, D. Assessment of the availability and utilization potential of low-quality biomass in Latvia// International Scientific Conference “Environmental and Climate Technologies”, CONECT 2018, 16–18 May 2018, Riga, Latvia
3. Rozentale, L., Lauka, D., Blumberga, D. Accelerating power generation with solar panels. Case in Latvia// International Scientific Conference “Environmental and Climate Technologies”, CONECT 2018, 16–18 May 2018, Riga, Latvia
4. Lauka, D., Blumberga, D. First solar power plant in Latvia. Analysis of operational data// International Scientific Conference “Environmental and Climate Technologies”, CONECT 2018, 16–18 May 2018, Riga, Latvia.
5. Pakere, I., Lauka, D., Blumberga, D. Solar power and heat production via photovoltaic thermal panels for district heating and industrial plant. 3rd International Conference on Smart Energy Systems and 4th Generation District Heating, The National Museum of Denmark – Copenhagen, 12.09.2017 – 13.09.2017.
6. Khabdullin, A., Khabdullina, Z., Khabdullina, G., Lauka, D., Blumberga, D. Demand response analysis methodology in DH system. International Scientific Conference “Environmental and Climate Technologies”, CONECT 2017, 10–12 May 2017, Riga, Latvia.
7. Kalnbalkite, D. Lauka, D. Blumberga, Urban Planning Needs. Clustering of Energy End Users// International Scientific Conference Environmental and Climate Technologies, CONECT 2016, Riga, Latvia, 12–14 October 2016.
8. Khabdullin, A., Khabdullina, Z., Khabdullin, A., Khabdullina, G., Lauka, D., Blumberga, D. Analysis of Industrial Electricity Consumption Flexibility. Assessment of Saving

Potentials in Latvia and Kazakhstan. International Scientific Conference “Environmental and Climate Technologies – CONECT 2016”.

9. Lauka, D., Blumberga, D., Grabaak, I., Amundsen, J. S. Results of Investment Analysis in Power Transmission in Latvia and Lithuania. International Scientific Conference Environmental and Climate Technologies, CONECT 2015, Riga Technical University, Riga, Latvia, 14–16 October 2015.
10. Vigants, E., Vigants, G., Veidenbergs, I., Lauka, D., Klavina, K., Blumberga, D. Analysis of Energy Consumption for Biomass Drying Process. Environment. Technology. Resources, Rezekne, Latvia, Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference
11. Lauka, D., Gusca, J., Kalnins, S.N., Vigants, E., Blumberga, D. Analysis of use of bioenergy production by-products to enhance electrolysis process. The 28th ECOS conference, 30 June – 3 July 2015, Pau, France.
12. Lauka, D., Gusca, J., Blumberga, D. Heat Pumps Integration Trends in District Heating Networks of the Baltic States. The 5th International Conference on Sustainable Energy Information Technology (SEIT-2015), 2–5 June 2015, London, United Kingdom.
13. Lauka, D., Blumberga, A., Blumberga, D., Timma, L. Analysis of GHG reduction in non-ETS Energy Sector. 7th International Conference on Applied Energy, ICAE 2015, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 28–31 March 2015.
14. Blumberga, A., Timma, L., Lauka, D., Dāce, E., Barisa, A., Blumberga, D. Achieving sustainability in nonETS sectors using system dynamics modelling practice. PRES'15 Conference Process Integration, Modelling & Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction, 22–27 August 2015.
15. Lauka, D., Blumberga, D. Electrolysis Process Analysis by Using Low Carbon Content Additives: a Batch Test Study. International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies, CONECT 2014, Riga, Latvia, 14–16 October 2014, Code 121577.

Monogrāfijas un patenti

1. Barisa, A., Blumberga, A., Blumberga, D., Gravelins, A., Gusca, J., Lauka, D., Karklina, I., Muizniece, I., Pakere, I., Priedniece, V., Romagnoli, F., Rosa, M., Selivanovs, J., Soloha, R., Veidenbergs, I., Vigants, E., Vigants, G., Ziemele, J. Energy system analysis and modeling. Scientific monography. Riga, RTU Press, 2018, 144 p., edited by D. Lauka.
2. Zogla, L., Rosa, M., Kubule, A., Vigants, H., Blumberga, D., Veidenbergs, I. Analysis of Industrial Energy Policy. Scientific monograph. Riga, RTU Press, 2017, 144 p., scientific editor D. Lauka.
3. Blumberga, D., Gedrovics, M., Kirsanovs, V., Timma, L., Klavina, K., Kubule, A., Klavins, J., Muizniece, I., Kauls, O., Barisa, A., Balina, K., Lauka, D., Ziemele, J., Karklina, I. Laboratory Works for Students of Environmental Engineering. Vol. 3. Riga: RTU Press, 2016. 92 p. ISBN 978-9934-10-747-4.
4. Blumberga, D., Barisa, A., Kubule, A., Klavina, K., Lauka, D., Muizniece, I., Blumberga, A., Timma, L. Biotechnomy. Riga: RTU Press, 2016. 338 p. ISBN 978-9934-10-789-4.
5. Blumberga, D., Veidenbergs, I., Blumberga, A., Dace, E., Gusca, J., Rosa, M., Romagnoli, F., Pubule, J., Barisa, A., Timma, L., Balina, K., Klavina, K., Kubule, A., Lauka, D.,

- Muizniece, I., Kalnbalkite, A., Karklina, I., Prodanuks, T. Biotechonomy: Methodological material. Riga: Riga Technical University Institute of Energy Systems and Environment, 2016, 84 p.
- Blumberga, D., Veidenbergs, I., Valtere, S., Gedrovics, M., Bazbauers, G., Blumberga, A., Zandekis, A., Zogla, G., Kalnins, S., Burmistre, I., Beloborodko, A., Kirsanovs, V., Timma, L., Muizniece, I., Klavina, K., Lauka, D. Laboratory Works for Students of Environmental Engineering. Vol. 2. Riga: RTU Press, 2015, 118 p. ISBN 978-9934-10-595-1.
 - Blumberga, D., Lauka, D., Gusca, J., Veidenbergs, I. Biomethanation device, Patent number 15164, date of application 20.05.2015, date of publication 20.08.2017.
 - Lauka, D., Blumberga, D., Muizniece, I. Material to stimulate fermentation process in biogas production, Patent number 15161, date of application 20.05.2015, date of publication 20.03.2017.
 - Muizniece, I., Blumberga, D., Lauka, D., Blumberga A. Thermal insulation material from granulated sawdust, Patent number 15124, date of application 19.11.2014, date of publication 20.01.2017.

Darba struktūra un apjoms

Promocijas darba pamatā ir desmit tematiski vienotas zinātniskās publikācijas. Šīs publikācijas ir prezentētas, kā arī darba rezultāti ir aprobēti vairākās starptautiskās zinātniskās konferencēs. Publikācijas ir pieejamas zinātniskajās informācijas datubāzes un starptautiski indeksētās datubāzēs. Šo publikāciju mērķis ir raksturot saikni starp dažādiem aspektiem atjaunojamo energoresursu ilgtspējas analīzei.

Promocijas darbā ir ievads un trīs nodaļas:

- literatūras apskats;
- pētījumu metodoloģija;
- rezultāti un diskusija.

Promocijas darba ievadā norādīts tā mērķis, darba zinātniskā un praktiskā nozīme, kā arī īss pārskats par publicēto pētījumu rezultātu aprobāciju dažādās zinātniskajās konferencēs. Darba ievaddaļā uzskaitītas arī citas publikācijas, monogrāfijas un patenti, kas attiecas uz darba autores veikumu citās pētniecības jomās.

Darba pirmajā nodaļā sniegts literatūras apskats par pētāmo tēmu. Darba otrajā nodaļā aprakstītas pētījumu metodes, kas saistītas ar atjaunojamo energoresursu ilgtspējīgas izmantošanas pētījumiem. Promocijas darba noslēgumā tiek analizēti darba rezultāti, sniegtas diskusijas par paveikto darbu un atbildēts uz atjaunojamo resursu ilgtspējīgas izmantošanas jautājumu.

Promocijas darba literatūras sarakstā ir 60 nosaukumu, taču, ņemot vērā, ka promocijas darbs ir tematiski vienota zinātnisko publikāciju kopa, kas ietver 10 zinātniskās publikācijas, kopējais promocijas darba literatūras saraksts ietver 209 avotu nosaukumus.

1. LITERATŪRAS APSKATS

1.1. Vides un klimata aspekti

Atjaunojamo energoresursu ieviešanas novērtējumu autore savā darbā veic četros izvēlētos aspektos. Pirmais aspekts atjaunojamo energoresursu izmantošanas ilgspējības analizē saistīts ar vidi un klimatu. Vides un klimata analīze un saikne ar atjaunojamiem energoresursiem ir aprakstītas publikācijās Nr. 1, 2 un 3 (skat. Tabula 1.1).

Visas ES dalībvalstis ir apņēmušās samazināt siltumnīcefektu izraisošo gāzu (SEG) emisijas, un sasniegt mērķus, kas izvirzīti 2020. un 2030. gadam. Enerģētikas stratēģija 2020. gadam nosaka, ka primārās enerģijas patēriņš jāsamazina par 20 % (salīdzinājumā ar prognozēto attīstības tendenci), patērēto atjaunojamo energoresursu daļu palielinot par 20 % un siltumnīcefekta gāzes jāsamazina par 20 %, salīdzinot ar 1990. gada līmeni. Enerģētikas nozarei (lielākais oglekļa dioksīda emisiju radītājs ES) ir galvenā loma klimata pārmaiņu samazināšanā. Saskaņā ar Eiropas Savienības statistikas datiem (*Eurostat Energy statistics*, 2015), elektroenerģijas ražošana no atjaunojamajiem energoresursiem ES–28 dalībvalstīs ir pieaugusi no 14,8 % 2005. gadā līdz 25,4 % 2013. gadā. Atjaunojamās enerģijas daļas pieaugums ES ir izskaidrojams ar augstāku atjaunojamo energoresursu patēriņa pieaugumu un kopējā bruto enerģijas patēriņa samazinājumu, salīdzinot ar 2010. gadu. Autores pētījums veltīts diviem galvenajiem jautājumiem, kas ir aktuāli ne tikai Latvijā, bet arī citās ES valstīs: (1) cik lielā mērā enerģētikas nozare var sasniegt ambiciozos ES izvirzītos ilgtermiņa mērķus; (2) kādi ir galvenie priekšnoteikumi, lai sasniegtu ES klimata un enerģijas mērķus.

1.2. Inženiertehniskie aspekti

Otrs aspekts attiecināms uz atjaunojamo energoresursu inženiertehniskajiem risinājumiem. Autore veikusi pētījumus, kas saistīti ar tādiem atjaunojamiem energoresursiem kā siltumsūkņi un biomasas atlikumu izmantošana pētīta ar mērķi veicināt ūdeņraža ražošanu elektrolīzes procesā. Pētījumi par atjaunojamo energoresursu tehnoloģiskajiem risinājumiem aplūkoti publikācijā Nr. 4. un 5 (skat. Tabula 1.1).

Atjaunojamo energoresursu tehnoloģijas kļūst arvien nozīmīgākas klimata pārmaiņu dēļ un – dažos gadījumos – nacionālās energoapgādes drošības jautājumu dēļ. Līdzās pozitīviem atjaunojamo energoresursu tehnoloģiju vides aspektiem pastāv ražošanas jaudas neregularitāte (jo īpaši saules un vēja enerģijai), kas atbilstoši pieprasījumam veicina jaunu enerģijas uzkrāšanas tehnoloģiju izstrādi. Šobrīd papildus esošajām enerģijas tīkla līdzsvarošanas aktivitātēm bieži tiek pētītas saspiesta gaisa enerģijas uzglabāšanas un kombinētās ūdeņraža uzglabāšanas tehnoloģijas, lai nodrošinātu efektīvus risinājumus no vēja un saules iegūtai elektroenerģijai (*Zoss, et al.*, 2014) (*Hedegaard & Meibom*, 2012) Siltumsūkņu integrēšana centralizētās siltumapgādes sistēmās (CSS) tiek apsvērta kā viena no metodēm, lai palielinātu no atjaunojamiem energoresursiem iegūtās elektroenerģijas īpatsvaru.

Ūdeņradis tiek uzskatīts par tūras enerģijas risinājumu nākotnes enerģijas pieprasījumam. Neskatoties uz to, ka elektrolīzi uzskata par tūru enerģijas ražošanas procesu, liela nozīme sistēmas vides sniegunā ir efektīvai elektrolītu un ūdens izmantošanai. Līdz šim lielākā daļa

ūdens elektrolīzes balstās uz sārma elektrolītiem vai protonu apmaiņas membrānu vienībām, kas primāri tiek ražoti elektrolītisko procesu vajadzībām (Barbir, 2005) (Carmo & Fritz, 2013). Cēlmetālu un dažādu sakausējumu izmantošana elektrokatalizatoru ražošanā rada slodzi videi resursu patēriņa kategorijā un ierobežotās ģeogrāfiskās pieejamības dēļ – transporta kategorijā. Enerģijas ražošanas blakusproduktu izmantošana elektrolītiem var uzlabot integrētās sistēmas vispārējo vides un ekonomisko sniegumu. Pētījumā piedāvāta “zaļa”, lokāli pieejama un ilgtspējīga alternatīva, proti, biomasas pelni, ko iespējams izmantot kā elektrokatalizatorus ūdeņraža ražošanai.

1.3. Ekonomiskie aspekti

Pastāv vairākas metodes, kā sasniegt ilgtermiņa mērķus un rezultātus attiecībā uz atjaunojamo energoresursu ieviešanu rūpniecības un citos sektoros. Pieprasījuma reakcijas un investīciju analīze ļauj analizēt un prognozēt atjaunojamo energoresursu potenciālu nozarē. Pētījumi par pieprasījuma reakcijas analīzi un investīciju analīzi tiek analizēti publikācijās Nr. 6 un 7 (skat. Tabula 1.1).

1.3.1. Pieprasījuma reakcijas analīze

Lai runātu par zema oglekļa sabiedrību, ir nepieciešamas pārmaiņas enerģētikas nozares tehnoloģiju un vadības līmenī. Viena no iespējām ir saistīta ar pieprasījuma reakcijas (*demand response – DR*) analīzes ieviešanu (Gils, 2014) (Khabdullin, et al., 2017). Pieprasījuma reakcijas analīze ir zināma kopš 20. gadsimta 80. gadiem un ietver: enerģijas taupīšanu un efektivitāti, slodzes pārvaldību u. c. (Balijepalli, et al., 2011) (Shoreh, et al., 2016) Elektroenerģijas un centralizētās siltumapgādes sistēmās intervences enerģijas gala lietotāju slodzē var uzlabot koģenerācijas staciju ekonomisko izdevīgumu un palīdzēt izvairīties no ieguldījumiem papildu ražošanas jaudās un pārvades tīklu kapacitātē (Bradley, et al., 2013). Pielāgojot pieprasījumu pašreizējai svārstīgajai resursu pieejamībai, iztrūkumi var tikt samazināti un kopējais atjaunojamās enerģijas īpatsvars var tikt palielināts (Miezis, et al., 2016) (Schuchardt, 2017) (Albatayneh, et al., 2017) (Latosov, et al., 2017) (Alam, et al., 2016).

Pieprasījuma reakcijas rūpnieciskais potenciāls nav pilnībā izprasts, jo īpaši attiecībā uz mūsdienu tehnoloģijām viedajā tīklā. Latvijā un Kazahstānā patērētāju puses elastība nav plaši pētīta. Ir faktori, kas rada potenciāla rūpnieciskā pieprasījuma reakcijas pieaugumu (Shoreh, et al., 2016) (Söder, et al., 2017). Visi faktori ir vajadzīgi rūpniecības nozarei, kā arī tie ir savstarpēji saistīti un cits citu ietekmē: viedo skaitītāju tehnoloģiju attīstība, kas ļauj kontrolēt un monitorēt reakcijas slodzes gandrīz reāllaika skalā; tādu apkopotāju parādīšanās, kas spēj vadīt mazākas slodzes, piedaloties elektroenerģijas tirgū; vides problēmas, kas saistītas ar kurināmā patēriņa pieaugumu; uzticamības apsvērumi, lai novērstu strāvas padeves pārtraukšanu, un *Auto-DR* daudzsološā tehnoloģija (Shoreh, et al., 2016).

Vēl viena energoietilpīga nozare ir enerģijas ražotāji – siltumapgādes uzņēmumi. Rūpniecības nozarē, izmantojot inovatīvas tehnoloģijas, valdības regulējumu, piemēram, nodokļus, subsīdijas un enerģijas cenu izmaiņas, pakāpeniski iespējams pāriet no esošās centralizētās siltumapgādes sistēmas uz ceturtais paaudzes centralizētās siltumapgādes sistēmu. Siltumnīcefekta gāzu emisiju apjomu var samazināt katrā siltumapgādes sistēmas elementā,

izmantojot dažādas metodes. (Ziemele, et al., 2014). Samazinājumu var īstenot vienā vai visos centralizētās siltumapgādes sistēmas elementos: siltumenerģijas avotā, siltuma pārvades sistēmā vai pie siltuma patērētāja. Pieprasījuma reakcija ir viena no metodēm, ko var izmantot, lai samazinātu CO₂ emisijas visos sistēmas posmos, kur ieguvēji ir enerģijas patērētāji, sabiedrība un valsts.

1.3.2. Investīciju analīze

Vēl viens veids, kā veicināt ilgtspējīgu atjaunojamo energoresursu integrāciju sistēmā, ir saistīts ar investīciju analīzi. Autores pētījums (publikācija Nr. 8 (skat. Tabula 1.1)) parāda scenārija analīzes rezultātus, kur katrs scenārijs sastāv no nākotnes analīzes un parāda, kā reaģēt nākotnē. *EMPS (multi area power-market simulator)* modelī tika izmantoti četri galvenie investīciju algoritmu scenāriji.

Izmantojot šāda veida metodoloģiju, tika izvērtētas divas Baltijas valstu energosistēmas, kas tiecas uz nulles siltumnīcefekta gāzu emisiju apjomu. Ievaddati galvenokārt balstās uz Latvijas un Lietuvas statistikas datiem un informāciju par izveidotajiem un plānotajiem atjaunojamās enerģijas ražošanas projektiem Baltijas reģionā. Modelis un algoritms tika izmantots, lai analizētu energosistēmu līdz 2050. gadam.

1.4. Atjaunojamās enerģijas avotu novērtējums

Pirmajā nodaļā autore minēja, ka viens no vissvarīgākajiem ilgtspējības faktoriem ir atjaunojamie energoresursi. Autore vēlas orientēties uz saules enerģiju kā ilgtspējīgu energoresursu nākamajiem 10, 20 un 30 gadiem. Pētījumi par saules enerģijas potenciālu un saules enerģiju kā ilgtspējīgu energoresursu analizēti publikācijās Nr. 9 un 10 (skat. Tabula 1.1).

Enerģija ir katras darbības priekšnoteikums. Tā ir nepieciešama, lai nodrošinātu ikdienišķo darbību dažādām sistēmām un procesiem. Saules enerģijas tehnoloģiju ieviešana ievērojami mazinātu un atvieglotu mērķus, kas saistīti ar klimata pārmaiņām, enerģētikas drošību, bezdarbu utt. Tāpēc aizvien vairāk tiek izmantotas tehnoloģijas, lai elektrību ražotu izmantojot saules enerģiju (Seshie, et al., 2018) (Kabira, et al., 2018) (Sampaio & Gonzalez, 2017) (Peng, et al., 2013) (Tyagi, et al., 2013).

Savstarpēji salīdzinot atjaunojamo energoresursu tehnoloģijas, saules enerģijas tehnoloģijas – saules paneļi, saules kolektori, saules hibrīdās sistēmas – ir salīdzinoši jaunas (Shahmazari & Lari, 2017). Saules enerģiju var izmantot gan telpu apsildei, gan karstā ūdens uzsildīšanai. Solohas u. c. pētījumā pierādīts, ka pilsētās, piemēram, Dānijā un Vācijā, ar līdzīgiem klimata apstākļiem kā Latvijā ir vadošās valstis saules enerģijas integrēšanā dažādās sistēmās. Iespējas izmantot saules enerģiju tiek veicinātas ne tikai no politiskā viedokļa puses – ES izvirzītie mērķi, bet arī no tehnoloģiskās puses. Saules enerģijas integrēšanai centralizētajā siltumapgādes sistēmā ir attīstības iespējas (Pakere, et al., 2017) (Lund, et al., 2010) (Truong & Gustavsson, 2014). Paredzams, ka saules enerģija, jo īpaši tā saules enerģija, kuras pamatā ir saules paneļu (PV) tehnoloģija, palielinās atjaunojamo energoresursu daļu apmēram līdz 20 % no visas atjaunojamo energoresursu daļas siltumapgādē līdz 2030. gadam (Zervos, et al., 2010) (Pakere, et al., 2018) (Soloha, et al., 2017).

2. PĒTĪJUMA METODIKA

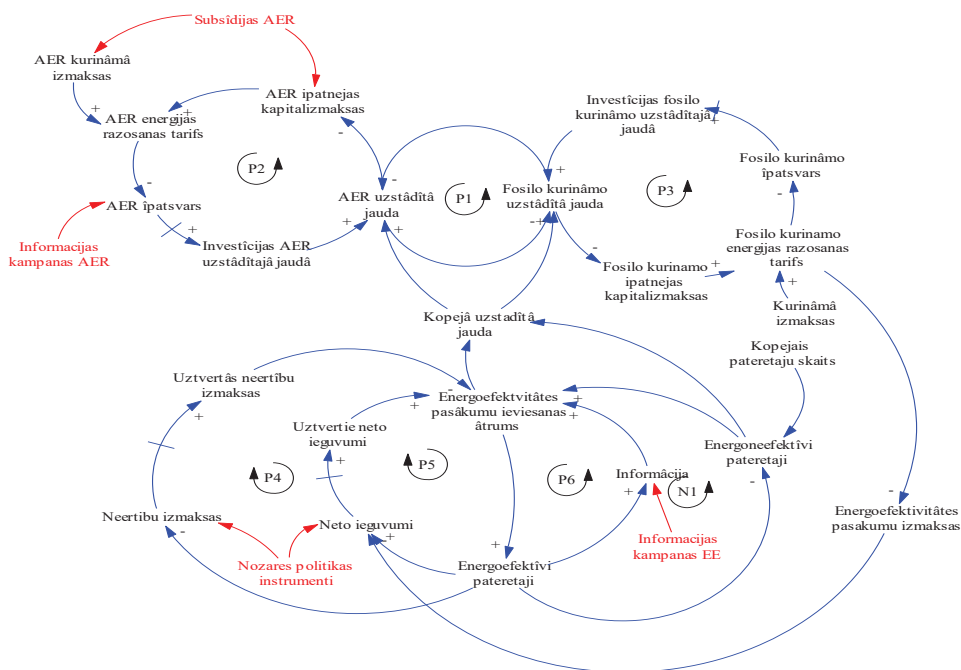
Lai pārbaudītu izvirzīto hipotēzi, tika izmantotas dažādas pētījumu metodoloģijas – sistēmdinamikas (SD) modelēšana, pieprasījuma reakcijas analīze un investīciju analīze, vairākkritēriju analīze, *TOPSIS* metode, scenāriju analīze, korelācijas un regresijas analīze, kā arī laika rindu metode.

2.1. Vides un klimata aspekti, izmantojot sistēmdinamikas modelēšanu

Šajā sadaļā, izmantojot sistēmdinamikas metodiku, tiek prognozēta atjaunojamo enerģijas avotu izmantošanas attīstība pēc 10, 20 un 30 gadiem. Sadaļā sniegts pārskats par metodoloģiju, kas izmantota, lai analizētu siltumnīcefekta gāzu emisijas un atjaunojamo enerģijas avotu iespējas nākamajā desmitgadē, un tā atbilst metodikas nodaļām publikācijās Nr. 1, 2 un 3 (skat. Tabula 1.1).

Sistēmdinamikas metode ir datorizēta modelēšanas pieeja, kas palīdz saprast sarežģītu sistēmu uzvedību un attīstību laikā. Par būtiskākajiem iemesliem šīs pētījumu pieejas izvēlei tika uzskatīta tās „atvērta” struktūra un SD modeļu sniegtā iespēja analizēt galveno mainīgo lielumu uzvedību laika gaitā, un izcelt galvenos virzošos spēkus, kas ietekmē sistēmas veiktspēju.

Siltumnīcefekta gāzu emisiju prognozēšanai tika izstrādāts sistēmdinamikas modelis. Pieci galvenie sistēmdinamikas modeļa izveides soļi ir: problēmas definēšana, dinamiskās hipotēzes noteikšana, modeļa formulēšana un simulācija, modeļa testēšana un politikas izstrāde un testēšana. Modelēšanas laika intervāls ir viens gads, modelēšanas periods ir no 2005. līdz 2030. gadam. Modeļa validācijai tika izmantoti vēsturiskie dati par laika posmu no 2005. līdz 2012. gadam.



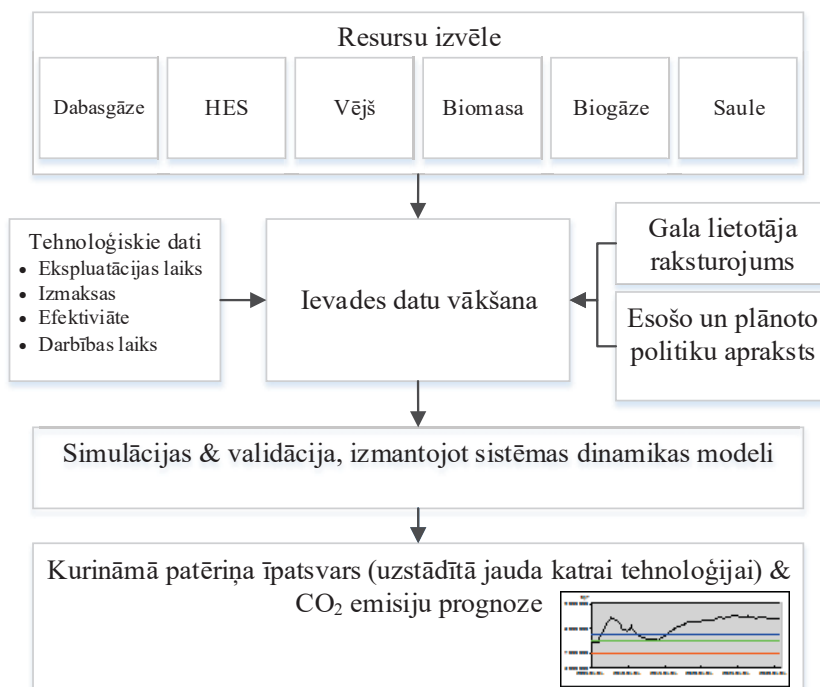
2.1. att. Galveno cēloņsakarību shēma enerģētikas nozarei.

Izveidotā ne-ETS enerģētikas sektora sistēmdinamikas modeļa pamatstruktūra ir izskaidrota 2.1. attēlā parādītajā cēloņsakarību shēmā.

Šajā modelī ir sešas galvenās pozitīvās jeb pastiprinošās cilpas un viena negatīvā jeb līdzsvarojošā cilpa. P1 cilpa parāda, kā savstarpēji mijiedarbojas AER uzstādītā jauda un fosilā kurināmā jauda – jo augstāka ir AER jauda, jo zemāka ir fosilā kurināmā jauda, un otrādi. Cilpas P2 un P3 izskaidro katras energoresursu grupas iekšējo dinamiku. Negatīvā cilpa N1 ar kavējumu traucē visām trim pozitīvajām cilpām P4, P5 un P6.

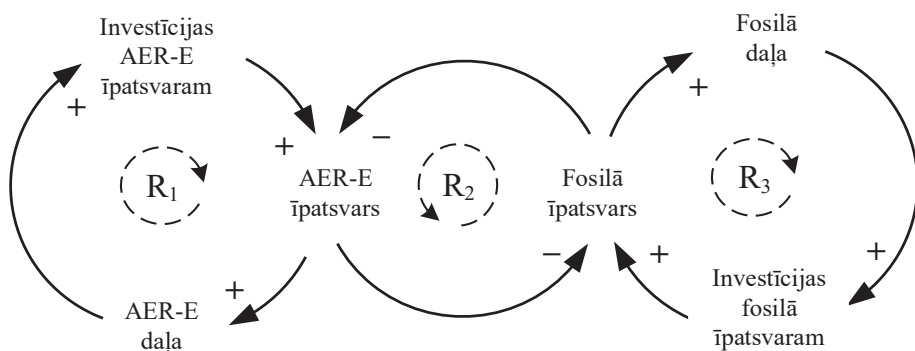
Diagrammā sarkanā krāsā attēloti sistēmas spiediena punkti vai politikas instrumenti, kas nepieciešami, lai samazinātu enerģētikas nozares ietekmi uz vidi un SEG emisijas.

Pētījumi par CO₂ izmešu prognozi un elektroenerģijas ražošanu no AER ietver šādus četrus posmus: 1) tehnoloģiju izvēle; (2) dažādu spēkstaciju tehnisko un ekonomisko ievades datu noteikšana, ieskaitot esošos, atbalsta pasākumus; (3) sistēmas dinamikas modeļa formulēšana un simulācija; (4) uzstādītās jaudas un CO₂ emisiju prognoze saskaņā ar prognozes periodu. Izstrādātajā modelī ietvertas sešas energotehnoloģijas (2.2. att.). Modelis tika izstrādāts un validēts, pamatojoties uz Latvijas gadījuma piemēra pētījumu.



2.2. att. Vienkāršota pētniecības pieejas shēma.

Dinamiskā hipotēze pieņem, ka tehnoloģijas tiek savstarpēji aizstātas atkarībā no sistēmas stāvokļa katrā modelēšanas posmā. Tādējādi, ja viena kurināmā īpatsvars palielinās, otra energoresursa daļa samazināsies. 2.3. attēlā kā ilustratīvs piemērs ir sniegta cēloņsakarības shēma, kurā parādīts atjaunojamās enerģijas tehnoloģiju un fosilās enerģijas tehnoloģiju uzstādīto jaudu savstarpējās mijiedarbības veids.



2.3. att. Cēloņsakarību diagramma, kas atspoguļo tehnoloģiju krājumu dinamiku.

Pastiprinošā cilpa R1, kas atspoguļo no atjaunojamās enerģijas avotiem ražotās elektroenerģijas (AER-E) uzstādīto jaudu, norāda – jo lielākas investīcijas paredzētas, lai palielinātu AER-E jaudu, jo lielāks ir atjaunojamo enerģijas avotu īpatsvars kopējā energoresursu sadalījumā. Tajā pašā laikā – jo lielāks ir AER-E īpatsvars, jo lielākas ir investīcijas, kuru mērķis ir palielināt uzstādīto AER-E jaudu. Pastiprinošā cilpa R2 atspoguļo AER-E tehnoloģiju un fosilā kurināmā iekārtu uzstādīto jaudu savstarpējo mijiedarbību. R2 norāda – jo lielāka ir AER-E iekārtu jauda, jo mazāka ir uzstādīto fosilā kurināmā iekārtu jauda un otrādi. Pastiprinošā cilpa R3, kas raksturo no fosiliem energoresursiem ražotas elektroenerģijas uzstādīto jaudu, norāda – jo zemāka fosilā kurināmā uzstādītā jauda, jo zemāks ir fosilā kurināmā īpatsvars kopējā energoresursu sadalījumā. Tajā pašā laikā – jo zemāka ir fosilā kurināmā daļa kopējā energoresursu struktūrā, jo mazāki ieguldījumi paredzēti fosilās jaudas palielināšanai. Un – jo mazāki ieguldījumi ir paredzēti, jo mazāka ir fosilo tehnoloģiju uzstādītā jauda.

Ierosinātā sistēmdinamikas modeļa galvenie krājumi un plūsmas ir parādīti 2.4. attēlā. Vienkāršības labad tiek parādītas tikai divas resursu plūsmas, attiecīgi – atjaunojamo un fosilo energoresursu plūsmas. Tomēr reālais modelis sastāv no vairākām resursu plūsmām, kas atbilst kopējam energoresursu sadalījumam elektroenerģijas ražošanai Latvijā.

Uzstādītās jaudas krājumi (MW) ar tiem atbilstošajām ieguldījumu ieejošajām plūsmām un amortizācijas izejošajām plūsmām veido modeļa pamatstruktūru. Turpmākie investīciju lēmumi par visām pieejamajām tehnoloģijām tiek veikti, balstoties uz elektroenerģijas ražošanas izmaksām. Kopumā šis ir līdzsvara modelis, tādējādi – jo lielāka investīciju daļa tiek viena veida tehnoloģijām (piemēram, atjaunojamiem energoresursiem), jo mazāka daļa visu investīciju sasniedz pārējās tehnoloģijas (piemēram, uz fosiliem energoresursiem balstītās). Kopējie ikgadējie ieguldījumi (MW/gadā) ir vienādi ar kopējo gada nolietojumu, ko ietekmē tehnoloģiju kalpošanas laiks. Ikgadējo elektroenerģijas ražošanu no katra resursa veida nosaka, ņemot vērā uzstādītās jaudas un tehnoloģijām specifiskās pilnas slodzes stundas.

Vidējās elektroenerģijas ražošanas izmaksas katram energoresursu veidam nosaka, izmantojot (2.2) formulu:

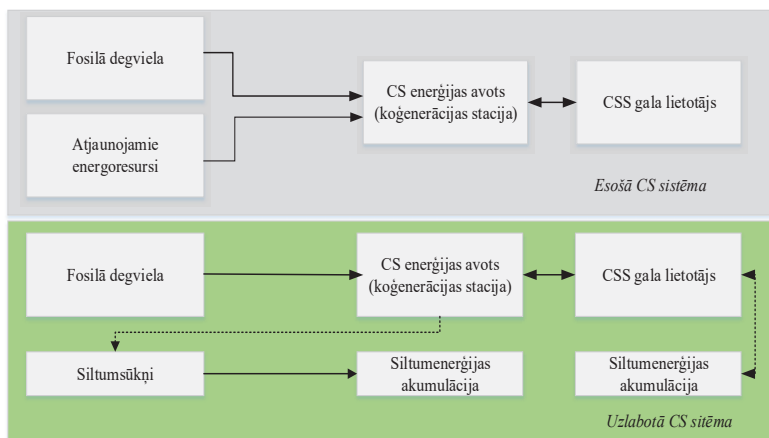
$$P = C_{\text{fuel}} / \eta + C_{\text{capital}} + C_{\text{O\&M}} + C_{\text{tax}} + R - S \quad (2.2)$$

Tiek pieņemts, ka, ja attiecīgajā modelēšanas posmā ir nepietiekamas jaudas, tad tiks palielināts imports; pretējā gadījumā lēmumu nepieciešams balstīt uz salīdzinājumu starp importa cenām un iekšzemes ražošanas izmaksām, līdzīgi kā tas tika darīts (*Hasani-Marzooni & Hosseini*, 2013) darbā. Elektroenerģijas importa cena tiek modelēta kā ārējs mainīgais lielums, kas balstīts uz vidējo elektroenerģijas cenu *Nord Pool Spot* (32 EUR/MWh 2012. gadā (*Spot*, 2013)). Gada elektroenerģijas cenu pieaugums nākamajiem gadiem tiek pieņemts 3 %. Modelī nav ņemti vērā ierobežojumi, kas saistīti ar pārvades sistēmas jaudām starp dažādiem *Nord Pool Spot* elektroenerģijas tirgus reģioniem.

2.2. Inženiertehniskie aprēķini

Šajā sadaļā sniegts pārskats par metodēm, ko izmanto siltumsūkņu integrācijai, un no biomasas atkritumiem veidotajām piedevām, kas var veicināt ūdeņraža ražošanu elektrolīzes procesā, un tā atbilst metodikas nodaļām publikācijās Nr. 4. un 5 (skat. Tabula 1.1).

Pētījuma hipotēze ir: siltumsūkņu iekļaušana centralizētās siltumapgādes sistēmās var izraisīt pieprasījuma palielināšanos pēc no AER ražotās elektroenerģijas. Lai pierādītu šo hipotēzi, ir jānosaka atjaunojamās enerģijas īpatsvars centralizētās siltumapgādes sistēmā; jānosaka siltumsūkņu izmantošanas potenciāls Baltijas valstīs un siltumsūkņu *COP* ietekme uz AER siltumenerģijas ražošanas tendencēm.



2.5. att. Siltumsūkņu integrēšanas shēma centralizētās siltumapgādes sistēmās.

Pētījumā tika pieņemts, ka siltumsūkņi tiek integrēti esošajās Latvijas, Igaunijas un Lietuvas centralizētās siltumapgādes sistēmās, lai aizstātu daļu no fosilā kurināmā energoresursiem. Piedāvātā metodoloģija ir piemērota izmantošanai Latvijas, Igaunijas un Lietuvas enerģētikas

sistēmu analizē. Centralizētās siltumapgādes sistēmas modeli veido enerģijas avots, siltumtīkli un gala lietotājs. Ja centralizētās siltumapgādes sistēmas enerģijas avots ietver kombinētu siltuma un enerģijas ražošanu, tad viens no svarīgākajiem ilgtspējīgas attīstības jautājumiem ir energoresurss, ko izmanto koģenerācijas stacijās.

Viens no tehnoloģiskajiem risinājumiem, kas ļautu novērst vai ievērojami mazināt ietekmi uz klimata pārmaiņām, ir fosilā kurināmā aizstāšana ar atjaunojamās elektroenerģijas ražošanas resursiem. 2.5. attēlā parādīta esošās centralizētās siltumapgādes shēma un uzlabotā integrētas sistēmas shēma.

Lai analizētu kokneses pelnu kā katalizatora piemēroību, tika lietota daudzkritēriju – *TOPSIS* – analīzes metode. Pētījumā izmantotie paraugi tika novērtēti atbilstoši trīs kritērijiem: pH vērtība; katalizatoru diametrs; parauga virsmas īpašības. Kritēriju svars tika noteikts, pamatojoties uz ekspertu pieņēmumiem.

TOPSIS analīzes pirmais solis ietver vērtību normalizēšanu. Normalizācijas matricu var iegūt ar dažādiem normalizācijas modeļiem: vektora; lineāru; nelineāru; logaritmisku (*Zenonas, et al., 2009*). Šajā pētījumā izmantots *Witendorf* lineārās normalizācijas modelis (skat. 2.3 un 2.4 formulas).

$$b_{ij} = \frac{\max a_{ij} - a_{ij}}{\max a_{ij} - \min a_{ij}}, \quad \text{ja } \max a_{ij} \text{ ir vēlams;} \quad (2.3)$$

$$b_{ij} = \frac{a_{ij} - \min a_{ij}}{\max a_{ij} - \min a_{ij}}, \quad \text{ja } \min a_{ij} \text{ ir vēlams.} \quad (2.4)$$

Otrais *TOPSIS* analīzes posms ir normalizētās un svērtās matricas izveide, reizinot kritēriju svaru (w_i) ar normalizētajām kritēriju vērtībām (b_{ij}) (skat. 2.5 formulu).

$$v_{ij} = b_{ij} \cdot w_i \quad (2.5)$$

Trešais vairākkritēriju analīzes solis ir pozitīvu-ideālu (skat. 2.6 formulu) un negatīvu-ideālu risinājumu (skat. 2.7 formulu).

$$A^+ = \text{Max}_i v_{ij} \quad (2.6)$$

$$A^- = \text{min}_i v_{ij} \quad (2.7)$$

Tad jāaprēķina ideāli-pozitīvais sadalījums (skat. 2.8 formulu) un negatīvi-ideālais sadalījums (skat. 2.9 formulu).

$$S^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2.8)$$

$$S^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2.9)$$

Vairākkritēriju analīzes noslēgumā tiek aprēķināts relatīvais tuvums ideālajam risinājumam:

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{(s_i^+ + s_i^-)}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2.10)$$

Ja $C_i^* = 1$, alternatīva ir ideālais risinājums, ja $C_i^* = 0$, alternatīva ir negatīvais-ideālais risinājums. Alternatīvu vērtēšanai tiek izmantots tuvuma koeficients, un tās tiek sakārtotas preferenču samazinājuma secībā. Alternatīva ar maksimālo vērtību ir visvēlamākais risinājums (Dace, et al., 2014) (Xi, et al., 2010).

2.3. Enerģijas ietaupījuma ekonomiski aprēķini

Šajā sadaļā sniegts pārskats par metodoloģiju, kas izmantota enerģētikas sektora analīzē, izmantojot pieprasījuma reakcijas un investīciju analīzi, un tā atbilst metodikas nodaļām publikācijās Nr. 6, 7 un 8 (skat. Tabula 1.1).

2.3.1. Pieprasījuma reakcijas analīze

Šis pētījums ietver analīzi par iespējām izmantot elektroenerģiju kā pašvaldību siltumapgādes sistēmas avotu. Vēsturiski centralizētās siltumapgādes sistēmās dominējuši tādi energoresursi kā naftas produkti un dabasgāze, un praktiski nav izmantoti atjaunojamie enerģijas avoti. Pēdējos 10 gados populāra kļuvusi biomasu un biogāzi. Siltumenerģijas ražošana no neatjaunojamiem enerģijas avotiem ir daudz dārgāka, nekā atjaunojamo enerģijas avotu izmantošana.

Atjaunojamo resursu izmantošana ir cieši saistīta ar jaunām tehnoloģijām un citām ārējām izmaksām. Pēdējos piecos gados un turpmāk atjaunojamie enerģijas avoti kļūst arvien populārāki (European Commission, 2010). Analīzes metodoloģija ir parādīta algoritma veidā (skat. 2.6 att.).



2.6. att. Metodoloģijas algoritms pieprasījuma reakcijas iespēju analīzei.

Nākamajos gados centralizētās siltumapgādes sistēma mainīsies, un viens no centralizētās siltumapgādes siltuma avotiem var būt elektrība. Ir vairāki ierobežojumi un priekšnoteikumi, kad un kāpēc elektroenerģiju izmantot kā avotu centralizētās siltumapgādes sistēmās. Pašlaik siltuma un elektrības tarifu dēļ elektrību nav racionāli izmantot siltuma ražošanai. Elektroenerģijas cena ir augstāka nekā siltumenerģijas cena. Lai izmantotu elektroenerģiju kā avotu centralizētās siltumapgādes sistēmā, ir nepieciešami inovatīvi tehnoloģiskie risinājumi, kas ietver pieprasījuma reakcijas analīzes elementu integrāciju, lai radītu apstākļus, kad enerģijas galapatērētājs pakāpeniski iegūst izpratni, par to, kādos gadījumos izmantot elektroenerģiju un kā palielināt energoefektivitāti gala lietotāju pusē. Centralizētās

siltumapgādes sistēmas darbība ir atkarīga no klimata apstākļiem – vēja, temperatūras, saules starojuma u. c. Centralizētās siltumapgādes sistēmas siltuma patēriņa korekciju atbilstoši iekštelpu un āra temperatūrām iespējams aprēķināt pēc (2.11) un (2.12) formulas:

$$k_t = \frac{t_t - t_{\text{outdoor1}}}{t_t - t_{\text{outdoor2}}} \quad (2.11)$$

$$Q_t = Q_{\text{yearly}} \cdot k_t \quad (2.12)$$

Cita siltuma slodzes elastība ir saistīta ar apkures stundu skaitu, kas galvenokārt ir atkarīgs no āra temperatūras. Apkures stundu skaits tiek noteikts, izmantojot meteoroloģiskos datus no klimata rokasgrāmatām vai statistikas datu informācijas avotiem, piemēram, Statistikas teritoriālo vienību nomenklatūras (*Nuts-2*). Apkures stundu korekcija, kas ietekmē pieprasījuma reakciju, tiek parādīta kā ikstundas korekcijas koeficients:

$$k_h = \frac{n_t}{n_{\text{max}}} \quad (2.13)$$

Abi korekcijas koeficienti ļauj noteikt centralizētās siltumapgādes sistēmas sūkņiem, ventilatoriem un citām elektriskajām iekārtām patērētās elektroenerģijas pieprasījuma reakcijas potenciālu pa stundām un diennaktīm, kā arī iespēju integrēt no atjaunojamiem resursiem ražotu elektroenerģiju centralizētās siltumapgādes sistēmā.

Pārtikas rūpniecībā dzesēšana un ventilācija ir lielākie elektroenerģijas patērētāji. Elastīgas slodzes paralēli izmantojamu dzesēšanas un ventilācijas tehnoloģiju novērtējumam tiek balstītas uz ikgadējo elektroenerģijas pieprasījumu. Šis pieprasījums tiek noteikts, izmantojot dažādu ekspertu sniegtos datus un pieņēmumus. Gada elektroenerģijas pieprasījumu sadalot ar pilnas slodzes stundu skaitu, iegūst uzstādīto jaudu (skat. (2.14) formulu). Atšķirībā no energoietilpīgu procesu gadījuma uzstādīto elektrisko jaudu aprēķināšanai netiek ņemti vērā pārtraukumi.

$$P_{\text{installed};j} = \frac{E_i}{n_{\text{FLH};i}}, \text{ MW} \quad (2.14)$$

Novērtējot potenciālo slodzes samazinājumu un palielinājumu, tiek pieņemtas fiksētās pašreizējās slodzes un neizmantotās jaudas, kas pieejama pieprasījuma reakcijai, sadalījums. Ņemot vērā pašreizējo un nākamo stundu slodzi, iespējams aprēķināt piemērotas slodzes atbilstoši vienādojumiem (2.15) un (2.16).

$$P_{\text{reduction};i(\tau,t)} = E_i \cdot r_{\text{load},i(\tau,t)\tau} \cdot r_{\text{reduction},i}, \text{ MW} \quad (2.15)$$

Slodzes pieauguma gadījumā var paaugstināt visu nākamā maksimālā laika (stundu) pieprasījumu, kamēr nobīdītā slodze ir līdzsvarota.

$$P_{\text{increase};i(\tau)} = [P_{\text{installed};i} \cdot (1 - r_{\text{revision},i}) - r_{\text{load},i(\tau)} \cdot E_i] \cdot r_{\text{increase},i}, \text{ MW} \quad (2.16)$$

Tās augšējo robežu nosaka uzstādītā jauda. Aprēķinātās rūpniecisko, paralēli izmantojamo tehnoloģiju enerģijas pieprasījums, izmantošanas līmeņi un pieprasījuma reakcijas īpatsvars ir apkopoti 2.1 tabulā.

2.1. tabula. Parametri pieprasījuma reakcijas potenciāla aprēķināšanai

Rūpnieciskais process	n_{FLH}	$r_{samazināt}$	$R_{palielināt}$
	h/a	%	%
Dzesēšana pārtikas rūpniecībā	6000	50	90
Ventilācija pārtikas rūpniecībā	7000	50	0

Uzstādītās elektriskās jaudas aprēķina pēc (2.17) formulas:

$$P_{installed;i} = \frac{E_i}{[N_{hours} \cdot r_{use,i} \cdot (1 - r_{revision,i})]}, \text{ MW} \quad (2.17)$$

2.3.2. Investīciju analīze

Lai novērtētu elektroenerģijas sistēmu 2050. gadā, izmantojot *EMPS* modeli un investīciju algoritmu pārvades posmu paplašināšanas rentabilitātes novērtējumu izmantota scenāriju analīzes metodoloģija (*Graabak, et al., 2015*). *EMPS (multi area power-market simulator)* modeli var apvienot ar algoritmu rentablo pārvades un ražošanas jaudu investīciju analīzei (*Wolfgang, 2008*). Tā ir vienpakāpes investīciju analīze, kurā tiek noteikti izdevīgi ieguldījumi, sākot no konkrēta atskaites gada, kad jaudas ir zināmas, piemēram, 2010. gada, līdz noteiktam laikam nākotnē, piemēram, 2050. gadam. Pirmkārt, šis modelis tiek atrisināts nākotnes laikam (gadam), neņemot vērā jebkādas jaunas investīcijas, t. i., nākamajā gadā izmantotās jaudas ir tās, kas eksistēja gadā, no kura tika sākts aprēķins. Pēc tam modelis pārbauda, kuras investīcijas ir rentablas simulētās cenās. Šis aprēķins ietver salīdzinājumu starp gada vidējo darbības peļņu simulētajos klimata gados, attiecinot pret gada investīciju izmaksām. Visām investīcijām, kas simulētajās cenās ir rentablas, pirms nākamās simulācijas tiek iekļautas jaunas papildu jaudas.

Tad *EMPS* modelis atkal tiek atrisināts, izmantojot nākamajā gadā pielāgotās jaudas, un investīciju rentabilitāte tiek pārbaudīta pie jaunajām elektroenerģijas cenām, jaudas tiek vēlreiz koriģētas. Algoritms konverģē, kad visi īstenotie ieguldījumi ir rentabli un papildu ieguldījumi nav izdevīgi.

Šī pieeja sniedz racionālus ieteikumus līdzsvarotai jaudu attīstībai, un nākamajiem gadiem simulētās cenas ietvers gan investīcijas, gan darbības izmaksas. Tomēr nav garantiju, ka modelis atradīs globāli optimālo ieguldījumu kopumu, kādi būtu jāveic.

Marginālo peļņu par papildu 1 MW pārvades jaudas investīcijām aprēķina pēc (2.18) formulas (*Graabak, et al., 2015*):

$$\pi_k = \frac{\sum_{t \in T, i \in I, l \in L} \max\{0; [p_{i,t,l,m_k}(1 - t_{m_k n_k}) - p_{i,t,l,m_k}]; [p_{i,t,l,m_k}(1 - t_{m_k n_k}) - p_{i,t,l,m_k}]\} h_l \times 10}{\# \text{ numb}} - c_k^{inv}, \forall k \in K^{Trans} \quad (2.18)$$

Investīciju alternatīva k paredzēta pārvadei starp apgabaliem m^k no n^k . Ja, piemēram, konkrētajā nedēļā cena apgabalā m^k ir augstāka un cenu starpība ir pietiekami liela, lai kompensētu pārvades zudumus, marginālo peļņu aprēķina kā:

$$p_{i,j,m^k}(1 - t_{m^k m^n}) - p_{i,j,n^k} > 0 \quad (2.19)$$

Ja cena ir augstāka apgabalā n^k , tiek izmantota pretēja atšķirība, skat. (2.18) formulu.

Katram laika solim tiek pārbaudīti ieguvumi no 1 MW papildu jaudas pievienošanas. *EMPS* modelī vienmēr tiks izmantota visa pārvades jauda, lai pārvadītu enerģiju uz augstas cenas apgabaliem, ja cenu starpība ir pietiekami liela, lai segtu zudumus. Tāpēc ikgadējā vidējā darbības peļņa pārvades līnijām var tikt aprēķināta, izmantojot (2.21) vienādojumu. Kad darbības peļņa ir aprēķināta visām investīciju alternatīvām, ieguvumi no papildu jaudas pievienošanas tiek salīdzināti ar ieguldījumu izmaksām. Simulētā vidējās ikgadējās darbības peļņa tiek interpretēta kā sagaidāmā ikgadējā darbības peļņa, ņemot vērā nenoteiktus klimata mainīgos lielumus. Tad paredzamā gada peļņa, ieguldot 1 MW papildu jaudā, attiecībā uz investīcijām k ir (Graabak, et al., 2015):

$$\pi_k^{tot} = \pi_k^{op} - c_k^{inv}, \quad \forall k \in K \quad (2.20)$$

Katrā investīciju algoritma ciklā tiek apsvērts, vai jauda konkrētai ieguldījumu alternatīvai ir jāpalielina, jāsamazina vai tā nemainās. Jauda tiek palielināta, ja ir izpildīts šāds nosacījums (Graabak, et al., 2015):

$$\frac{\pi_k^{tot}}{c_k^{inv}} > z_k \quad (2.21)$$

EMPS modelī tika izmantoti četri galvenie investīciju algoritma scenāriji. Divi no tiem ir balstīti uz AER izmantošanu Baltijas valstīs, un tajos nav atļautas turpmākas investīcijas Krievijā un Baltkrievijā. Šie divi scenāriji atšķiras ar to, ka scenārijs A1 balstās uz mūsdienu savienojumu ar Krieviju un Baltkrieviju, bet scenārijā A2 nepastāv šāds savienojums. Pārējie divi scenāriji atšķiras ar to, ka tajos nav AER, bet ir *Susplan* scenāriji.

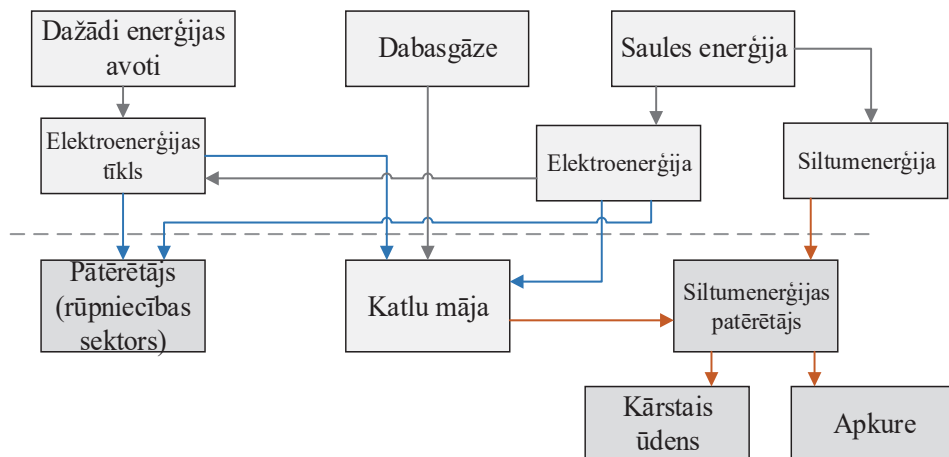
2.4. Atjaunojamās enerģijas avotu integrēšanas aprēķini

Straujā tehnoloģiju attīstība un to cenu līmeņa samazinājums, kā arī pēdējo gadu laikā uzstādīto saules enerģijas tehnoloģiju skaita pieaugums, norāda, ka saules enerģijas izmantošana kļūst arvien pieejamāka.

Promocijas darba autore veikusi pētījumu (publikācija Nr. 10, (skat. Tabula 1.1)) par lielāko saules enerģijas spēkstaciju Baltijas valstīs, kas ļauj aptvert saules enerģijas potenciālu. Pētījumā izmantotie laika sērijas tipa dati un mērījumi iegūti no saules parka Latvijā. Šajā saules enerģijas parkā elektroenerģijas ražošanai uzstādīti 216 saules paneļi ar kopējo platību 850 m² (ieskaitot starppaneļu platību) ar kopējo uzstādīto jaudu 40 kW. Mērījumi tika veikti 24 stundu

laikā no 2016. gada janvāra līdz decembrim. Laika sērijas datu apstrāde un datu korelācija tika veikta ar *MINITAB 18*. Regresijas analizē izmantoti dati par sarazotās elektroenerģijas un globālā saules starojumu.

Kā minēts literatūras apskata daļā, saules enerģija arvien vairāk tiek integrēta enerģosistēmās, un viena no iespējām ir integrēt to centralizētās siltumapgādes sistēmā (publikācija Nr. 9).



2.7. att. Enerģijas plūsmas analizētajā sistēmā.

Gadījuma piemēra izpētē analizēta centralizētās siltumapgādes sistēmas katlumāja, kas piegādā siltumu apkures sistēmai un karstā ūdens sagatavošanai. Katlu mājā par energoavotu siltumenerģijas ražošanai izmanto dabaszgāzi, un tā ir tieši saistīta ar rūpniecisko patērētāju specifisku siltuma un elektroenerģijas patēriņu. Centralizētās siltumapgādes uzņēmums apsver iespēju izmantot saules enerģiju dabaszgāzes vietā, lai samazinātu enerģijas cenas un kopējo ietekmi uz vidi. Veiktajā izpētē analizēta *PVT* tehnoloģiju uzstādīšana un integrācija esošajā centralizētās siltumapgādes sistēmā, jo tajā ir gan siltuma, gan elektroenerģijas patērētāji. 2.7. attēlā parādītas analizētās sistēmas robežas un enerģijas plūsmas savienojumi.

Publikācijā Nr. 9 (skat. Tabula 1.1). salīdzināti vairāki dažādi scenāriji, lai atrastu optimālo saules enerģosistēmas dizainu konkrētajam gadījuma piemēram. Scenāriji atšķiras pēc uzstādītās *PVT* platības un elektroenerģijas pārpalikuma izmantošanas iestatījumiem.

Pētījuma galvenie ievaddati ir faktiskā ikstundas elektriskā jauda un siltuma patēriņš. Elektroenerģijas patēriņš ir konkrētās katlu mājas un rūpnieciskā patērētāja elektroenerģijas patēriņa summa. Gada elektroenerģijas patēriņš ir aptuveni 750 MWh, siltuma patēriņš ir 20 142 MWh.

Saules enerģijas apjoma aprēķināšanai tiek izmantoti ikstundas dati par klimatiskajiem apstākļiem Rīgā, Latvijā (apkārtējā temperatūra un globālā horizontālā starojums). Dati iegūti no SIA „Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs”. Gada vidējā āra gaisa temperatūra konkrētajai teritorijai 2016. gadā bija 9 °C, saules starojums – 991 kWh/m². Lai izveidotu matemātisko modeli, tika izmantoti vairāki tehniskie parametri un pieņēmumi. Aprēķinos izmantotie pieņēmumi detalizēti aprakstīti publikācijā Nr. 9.

3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA

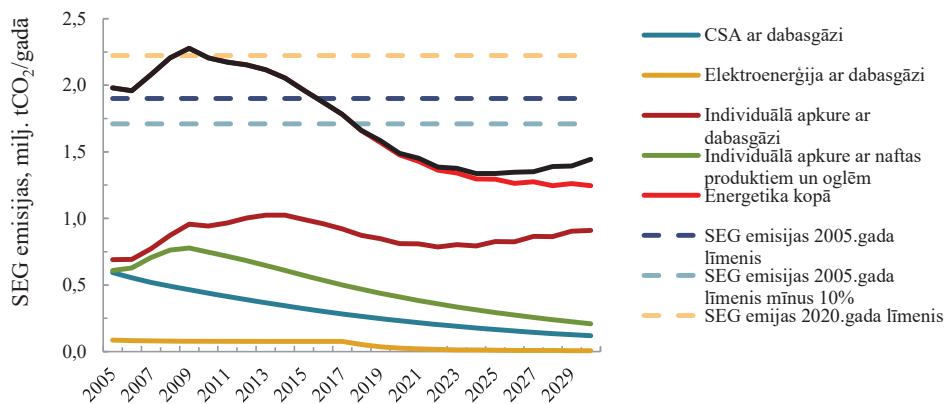
Šajā nodaļā ir atspoguļoti atjaunojamo energoresursu ilgtspējības analīzes pētījumu rezultāti. Tajā iekļauti rezultāti, kas izriet no autores promocijas darbā apkopotajām publikācijām. Rezultāti izklāstīti publikācijās no Nr. 1–10 (skat. Tabula 1.1).

3.1. Vides un klimata aspekti

Siltumnīcefekta gāzu emisijas un to samazināšanas pasākumi ir tieši saistīti ar resursu izmantošanu. Pamatojoties uz vēsturiskiem datiem un dažādu attīstības scenāriju pārņemšanu, iespējams izstrādāt prognozes par emisiju turpmāko attīstību. Izveidotais SD modelis tiek pārbaudīts ne-ETS enerģijas nozarē Latvijā. Analizēti trīs scenāriji siltumnīcefekta gāzu emisiju mērķiem (skat. robežlīnijas 3.1. un 3.2. attēlā):

1. 2020. gadā SEG emisijas pārsniedz 2005. gada līmeni par 17 %;
2. 2030. gadā SEG emisijas saglabāsies 2005. gada līmenī;
3. 2030. gadā SEG emisijas būs par 10 % zemākas par 2005. gada līmeni.

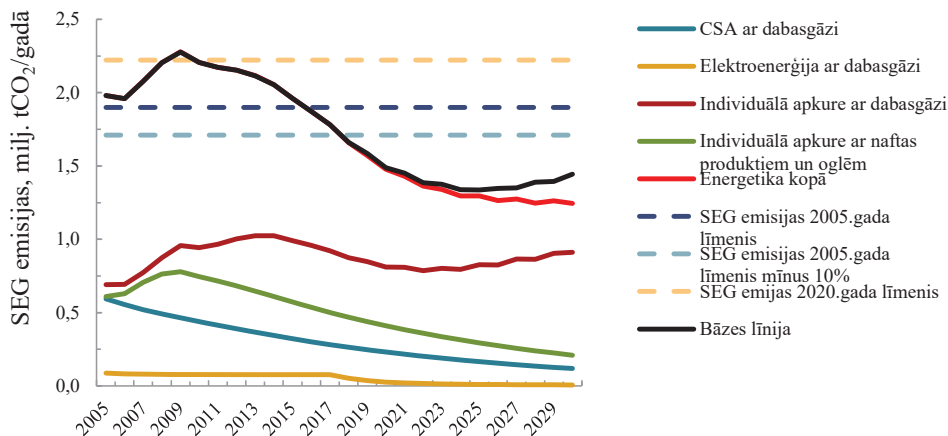
Atsauces jeb bāzes scenārijs raksturo situāciju, kad sistēma attīstās, neveicot nekādus papildu politikas pasākumus. Gadījumā, ja ne-ETS nozarē netiek ieviesti nekādi politikas instrumenti papildus tiem, kas jau eksistē vai ir ieplānoti, siltumnīcefekta gāzu emisijas 2030. gadā nedaudz pārsniedz mērķi „SEG emisijas kā 2005. gadā”, sasniedzot 1,99 miljonus tonnu CO₂ gadā. SEG emisiju samazinājums novērojams elektroenerģijas ražošanā, naftas produktu un ogļu izmantošanā individuālos siltuma avotos, kā arī dabasgāzes patēriņa centralizētajā siltumapgādē dēļ. Tomēr palielinās dabasgāzes patēriņš individuālos siltuma avotos. Izmantojot modelēšanu, simulēti astoņi politikas scenāriji. 3.1. un 3.2. attēlā ir atspoguļoti atsauces scenārija rezultāti, un tie ir salīdzināti ar pārējo divu scenāriju rezultātiem.



3.1. att. SEG emisiju samazinājums 1. scenārijā.

1. scenārijs: energoefektivitātes pasākumi gala patērētājiem visās nozarēs tiek subsidēti, un tiek īstenota informatīvā kampaņa par energoefektivitātes pasākumiem. 3.1. attēlā redzams, ka SEG emisijas, salīdzinot ar bāzes scenāriju, samazinās par 0,1 GgCO₂.

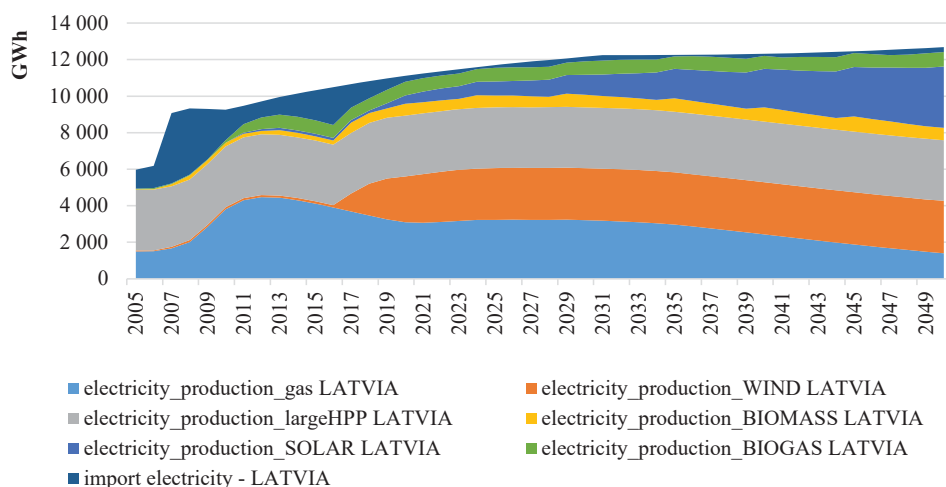
2. scenārijs: energoefektivitātes pasākumi gala patērētājiem visās nozarēs tiek subsidēti, tiek īstenota informatīvā kampaņa par energoefektivitātes pasākumiem, tiek subsidētas kapitālizmaksas atjaunojamo enerģijas avotu ieviešanai, tiek īstenota informācijas kampaņa par atjaunojamās enerģijas izmantošanu un tiek subsidētas atjaunojamo energoresursu degvielas izmaksas. 3.2. attēls liecina, ka SEG emisijas, salīdzinot ar bāzes scenāriju, samazinās par 0,51 GgCO₂.



3.2. att. SEG emisiju samazinājums 2. scenārijā.

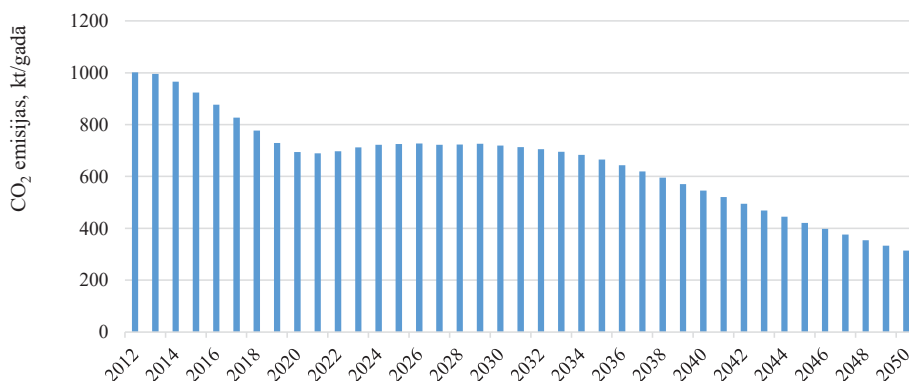
Ieviešot 1. scenāriju, kumulatīvais SEG emisiju samazinājums ir 0,25 miljoni tonnu CO₂, salīdzinot ar bāzes scenāriju. Lai īstenotu šo scenāriju, laika posmā no 2016. līdz 2030. gadam būtu vajadzīgs valsts atbalsts 500 miljonu EUR apmērā. Saskaņā ar 2. scenāriju kumulatīvais SEG emisiju samazinājums ir 1,2 miljoni tonnu CO₂, salīdzinot ar bāzes scenāriju. Lai īstenotu šo scenāriju laikposmā no 2016. līdz 2030. gadam, būtu nepieciešams valsts atbalsts 930 miljonu EUR apmērā. SEG samazināšanas pasākumus var tikt īstenoti arī pa vienam, vienlaikus neveicot citus pasākumus.

3.3. attēlā parādīti elektroenerģijas ražošanas jaudas modelēšanas rezultāti Latvijā līdz 2050. gadam. Pieaugot dabasgāzes cenai, citu resursu izmantošana kļūst arvien pievilcīgāka. Paredzams, ka līdzās plaši izmantotajai hidroenerģijai – jo īpaši vēja un saules enerģija – konkurēs ar elektroenerģijas ražošanu no dabasgāzes. Saules un vēja enerģijas īpatsvars palielināsies no 2016. gada vidus, jo tiks atcelta pašreizējā kvotu iesaldēšana jaunām iekārtām, t. i., jaunas iekārtas atkal varēs saņemt valsts atbalstu saražotās elektroenerģijas ievades tarifa veidā. Otrs iemesls AER izmantošanas pieaugumam ir investīciju izmaksu samazinājums, ko prognozē ražotāji (*Criqui, et al., 2015*). Tādā veidā atjaunojamo energoresursu tehnoloģijas kļūst arvien konkurētspējīgākas, ņemot vērā pieaugošo dabasgāzes cenu.



3.3. att. Elektroenerģijas ražošanas prognoze Latvijā līdz 2050. gadam.

Rezultāti liecina, ka nākamajās desmitgadēs dabasgāzes patēriņš elektroenerģijas ražošanai Latvijā samazināsies. Vidējā termiņā (līdz 2030. gadam) aptuveni 64 % no patērētās enerģijas varētu tikt iegūti no AER. Tikmēr līdz 2050. gadam fosilā kurināmā īpatsvars vairs nepārsniegs 10 % no kopējās elektroenerģijas ražošanas jaudas.



3.4. att. Elektroenerģijas ražošanas radīto CO₂ emisiju prognoze no Latvijā līdz 2050. gadam.

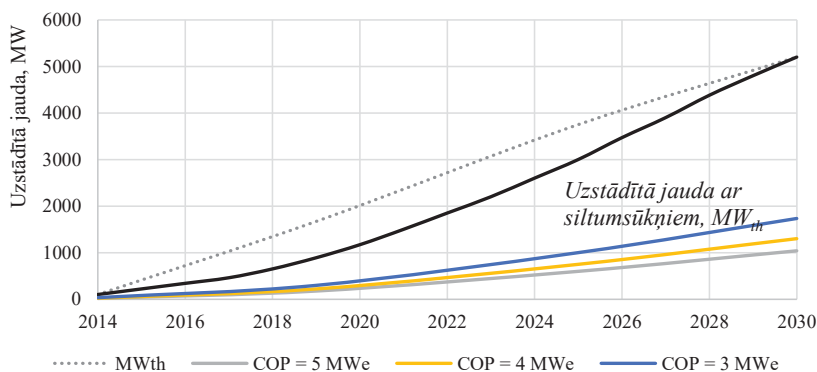
Elektroenerģijas nozares vides snieguma rādītāji tika novērtēti, pamatojoties uz oglekļa intensitāti. 3.4. attēlā parādīti CO₂ emisiju prognozes rezultāti Latvijai līdz 2050. gadam. Modelēšanas rezultāti parāda, ka dabasgāzes īpatsvara samazināšanās elektroenerģijas ražošanā ļaus ievērojami samazināt elektroenerģijas CO₂ emisijas. Līdz 2050. gadam būtu iespējams sasniegt elektroenerģijas nozares emisiju samazināšanos gandrīz par 70 %, salīdzinot ar 2012. gada līmeni. Tomēr šis samazinājums neļaus sasniegt nulles emisiju līmeni, kā plāno Eiropas Komisija savā ceļvedī virzībai uz konkurētspējīgu ekonomiku ar zemu oglekļa dioksīda emisiju līmeni 2050. gadā. Tādēļ jāizstrādā alternatīvas politikas stratēģijas, lai panāktu lielāku CO₂

izmešu daudzuma samazināšanu. Jāatzīmē arī, ka prognozēto emisiju samazinājumu par 70 % galvenokārt veicina valsts atbalsta pasākumi, un to pārtraukšana var radīt atjaunojamās elektroenerģijas ražošanas jaudas pieauguma kavēšanos.

3.2. Inženiertehniskie aspekti

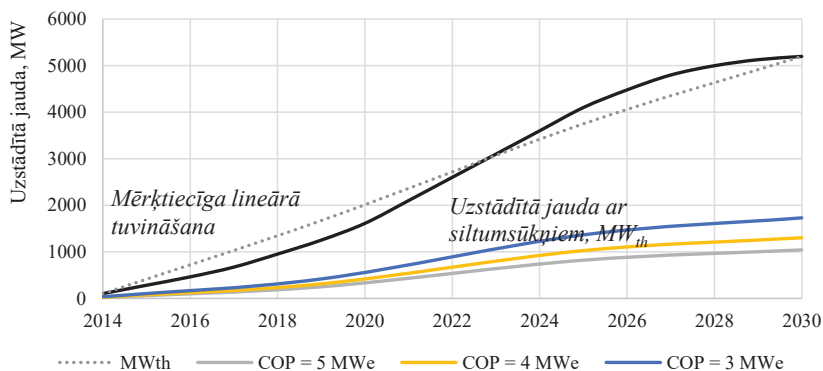
Siltuma sūkņu izmantošana, lai palielinātu elektroenerģijas patēriņu un līdz ar to palielinātu atjaunojamo energoresursu īpatsvaru nacionālajā enerģētikā, parādīta jaudas izmaiņu simulācijas veidā. Tiek pieņemts, ka maksimālais iespējamais mērķis tiks sasniegts līdz 2030. gadam.

Siltumsūkņa integrāciju centralizētās siltumapgādes sistēmā var simulēt trīs attīstības scenāriju – pesimistiskā, mērenā un optimistiskā – kontekstā. Siltumsūkņu veikspējas ietekmes analīze ir vienāda visos scenārijos, un tā parāda, ka 5200 MW siltumenerģijas iegūšanai ar siltumsūkņiem, varētu tikt sasniegta patērējot 1733 MWe elektroenerģijas, ja COP = 3, 1300 MWe, ja COP = 4 un 1040 MWe, ja COP = 5. Kā iepriekš minēts, parasti COP vērtība ir robežās no 3 līdz 5, un, kā redzams visos trijos scenārijos, siltumsūkņi ar lielāku COP ir efektīvāki, jo tie patērē mazāk elektroenerģijas.



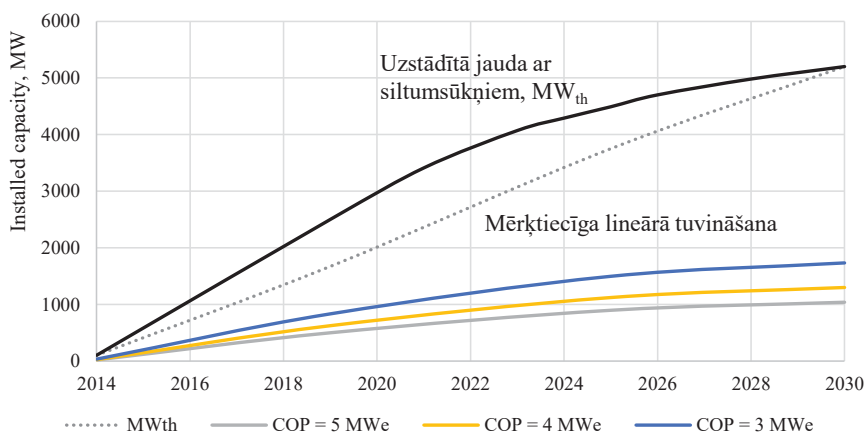
3.5. att. Uzstādītā jauda, ko iespējams segt ar siltumsūkņiem, pesimistiskajam attīstības scenārijam Latvijā.

A scenārijs, kas attēlots 3.5. attēlā, uzrāda eksponenciālu attīstības tendenci. Pesimistiskajā scenārijā tiek pieņemts, ka siltumsūkņu integrācija centralizētās siltumapgādes sistēmā un elektroenerģijas patēriņa samazināšanas mērķu sasniegšana notiks ļoti lēnām: pilns piesātinājums tiks sasniegts tikai modelēšanas perioda beigās. B scenārijs ir mērens scenārijs, kas atbilst S-veida attīstībai. Mērenā scenārija sākumā notiek lēna siltumsūkņu integrācija centralizētās siltumapgādes sistēmā, kas galu galā paātrināsies. Šis scenārijs rodas, ja daži politikas instrumenti kavē siltumsūkņu integrācijas procesu – saskaņā ar modeļa rezultātiem paātrinājums sākas 2020. gadā, un jau līdz 2023. gadam tas sasniegs siltuma sūkņu uzstādītās jaudas mērķi.



3.6. att. Uzstādītā jauda, ko iespējams segt ar siltumsūkņiem, mērenajam attīstības scenārijam Latvijā.

Mēreno scenāriju raksturo tas, ka valsts politika neatbalsta siltumsūkņu attīstību, tāpēc tas kavē attīstību. Tomēr, ja politika tiks mainīta tā, lai samazinātu fosilo resursu izmantošanu un veicinātu pāreju uz atjaunojamiem resursiem, mēs varam sagaidīt ātrāku attīstību. C scenārijs ir optimistiskais scenārijs, un tas paredz salīdzinoši ātru siltumsūkņu attīstību, kas notiktu, īstenojot daudzus dažādus politikas instrumentus, kas veicinātu siltumsūkņu ieviešanu (skat. 3.7. att.). Uz mērķa sasniegšanu vērsta izaugsmes modeļa ieviešana būtu ātrākais veids, kā sasniegt siltumsūkņu uzstādītās jaudas mērķi centralizētās siltumapgādes sistēmās. Tomēr, ciktāl uzvedību nosaka jaunie politikas instrumenti, pirms 2015. gada būtu jāpiemēro īpaša politikas platforma siltumsūkņu integrācijas jomā CS sistēmās.



3.7. att. Uzstādītā jauda, ko iespējams segt ar siltumsūkņiem, optimistiskajam attīstības scenārijam Latvijā.

Pētījuma rezultāti norāda uz nozīmīgu tehnisko potenciālu no atjaunojamiem energoresursiem saražotās elektroenerģijas uzkrāšanas ieviešanai, integrējot siltumsūkņus Latvijas centralizētās siltumapgādes sistēmā. Tas ļauj secināt, ka apstiprinās pētījumā izteiktā

hipotēze: siltumsūkņu iekļaušana centralizētajā siltumapgādē palielina pieprasījumu pēc elektroenerģijas, kas iegūta no atjaunojamiem energoresursiem.

Pētījuma par biomasas pelnu izmantošanu mērķis bija noteikt labākās alternatīvas biomasas pelnu izmantošanai par katalizatoru ūdeņraža ražošanā elektrolīzes procesos. Izvēlēto alternatīvu novērtēšanai tika izmantota vairākkritēriju analīzes metode *TOPSIS*. Izmantojot vairākkritēriju analīzi, tika novērtētas četras koksnes kurināmā pelnu katalizatora alternatīvas ar dažādu sastāvu: S25, S50, S75 un S100. Tika noteikti trīs kritēriji ar konkrētiem svāriem – pH vērtība, katalizatoru diametrs un sfērisko paraugu virsmas īpašības.

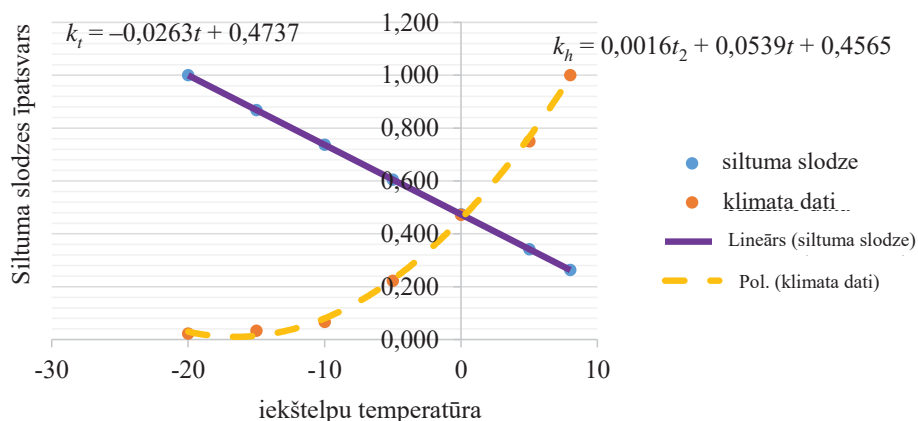
Svērtās normalizētās lēmumu matricas tika izmantotas, lai atrastu ideāli-pozitīvo risinājumu un ideāli-negatīvo risinājumu attiecībā uz izveidoto katalizatoru specifiskajiem fizikālajiem parametriem. Veiktā vairākkritēriju analīze parādīja, ka S25 var definēt kā piemērotu paraugu elektrolīzes procesam: šīs alternatīvas tuvuma koeficients ir 0,87, kas ir ideāli-pozitīvs risinājums. Ideāli-negatīvs risinājums ir S75 paraugs, kura vērtība ir 0,13.

Eksperimenta rezultāti apstiprināja, ka ūdeņraža ražošana, izmantojot ūdens elektrolīzi, ir efektīvāka, ja izmantotajos biomasas pelnu katalizatoros salmu pelnu īpatsvars ir 25 % pelnu un koksnes pelnu īpatsvars 75 %. Tomēr papildu ūdeņraža ražošanas uzraudzība, kuras pamatā ir tiešā pastāvīgā mērīšanas metode ar gāzes analizatoru, varētu būt noderīga, lai samazinātu nenoteiktību, kas saistīta ar “burbuļa metodes” izmantošanu.

3.3. Ekonomiskie aspekti

3.3.1. Pieprasījuma analīze

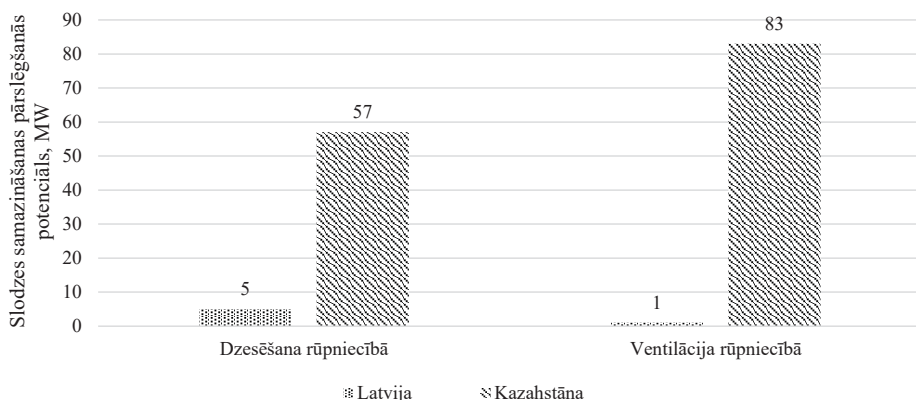
Metodoloģija tiek aprobēta, izmantojot klimata datus vienam Latvijas reģionam. Centralizētās siltumapgādes sistēmas darbība ir atkarīga no klimata apstākļiem – vēja, temperatūras, saules starojuma un citiem. Centralizētās siltumapgādes sistēmas siltuma patēriņa korekcija atbilstoši iekšstelpu un āra temperatūrām ir iespējama, aprēķinot pēc (2.11) un (2.12) formulām (skat. 2.3. apakšodaļu), un korekcijas koeficientu aprēķina rezultāti ir parādīti 3.8. attēlā.



3.8. att. Pieprasījuma analīzes potenciāla diagramma.

Diagrammā redzama korelācija starp diviem faktoriem k_t un k_b . Diagramma parāda, ka nozīmīgākā pieprasījuma reakcijas potenciāla elastība ir pieejama, samazinot korekcijas koeficienta izmaiņu slīpuma leņķi attiecībā pret iekštelpu temperatūru. Pieprasījuma reakcija elektroenerģijas izmantošanā ir pieeja ar augstu novitātes līmeni, un nākotnē tai ir liels potenciāls. Pieprasījuma reakcija centralizētās siltumapgādes sistēmās ir atkarīga no elektroenerģijas cenas, salīdzinot ar siltumenerģijas cenu un atjaunojamās elektroenerģijas īpatsvara pieaugumu.

Pēc vienādojumu un parametru izmantošanas pirmie aprēķinu rezultāti parādīti 3.9. attēlā. Šajā attēlā parādīts vidējais potenciāls slodzes samazināšanai, pārejot uz vēlāku laiku, kas sadalīts pēc dažādiem patērētājiem. Dzesēšana un ventilācija ir galvenie elektroenerģijas patērētāji pārtikas rūpniecībā, rezultāti parādīja atšķirību starp Latvijas un Kazahstānas vidējo potenciālu slodzes samazināšanai – Latvijai 52 MW un Kazahstānai 82 MW. Rūpnieciskai dzesēšanai vidējais slodzes samazināšanas potenciāls Latvijā ir 5 MW un Kazahstānā – 57 MW.



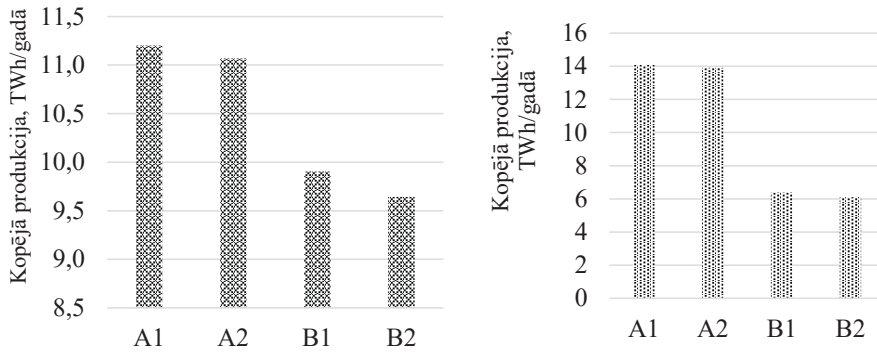
3.9. att. Vidējais potenciāls slodzes samazināšanai, pārejot uz vēlāku laiku, dalījumā pēc patērētāja.

Līdzīgi rezultāti noteikti arī rūpnieciskajai ventilācijai un tās vidējam slodzes samazināšanas potenciālam: Latvijā – 1 MW, Kazahstānā – 83 MW. Elastīgo slodžu noteikšana rūpniecībā veika divām valstīm. Īpaša uzmanība tiek pievērsta kvalificētu klientu īslaicīgai pieejamībai un ģeogrāfiskā sadalījuma novērtēšanai. Tiek ņemts vērā attiecīgo procesu un ierīču slodzes profils, lai analizētu vispārējā pieprasījuma reakcijas potenciāla mainīgumu laikā.

3.3.2. Investīciju analīze

EMPS modeļa rezultāti un investīciju algoritms Latvijai un Lietuvai parādīts 3.10. attēlā. Visu četru scenāriju sākuma jauda ir 1600 MW. Pēc investīciju veikšanas lielākā jauda ir scenārijam A2 – vairāk nekā 1900 MW.

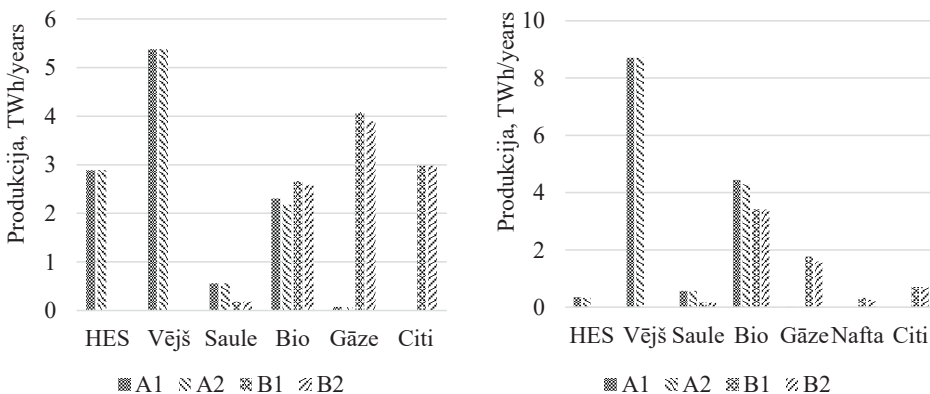
Kopējā elektroenerģijas ražošana Latvijā un Lietuvā ir parādīta četriem scenārijiem, un visos scenārijos iekļauta elektroenerģijas ražošana no atjaunojamiem resursiem.



3.10. att. (a) Kopējā ražošana Latvijā scenāriju griezumā; (b) kopējā ražošana Lietuvā scenāriju griezumā.

Pēc kopējās produkcijas scenāriji A1 un A2 ir diezgan līdzīgi, kā arī nav lielas atšķirības starp situāciju Latvijā un Lietuvā. Abos šie scenāriji ir balsīti uz AER izmantošanu, un nav iespējami turpmāki ieguldījumi Krievijā un Baltkrievijā. Galvenā atšķirība šajos divos scenārijos ir tāda, ka scenārijā A1 ir ietverts savienojums ar Krieviju un Baltkrieviju, bet A2 scenārijā nav. Latvijas kopējā produkcija scenārijā A1 ir 11,2 TWh gadā, scenārijā A2 – 11,1 TWh gadā, savukārt Latvijas kopējā ražošana scenārijā B1 ir 9,9 TWh/gadā, B2 – 9,6 TWh/gadā.

Analizējot četrus scenārijus pēc to izmantotajiem avotiem, Lietuvai ir lielāks elektroenerģijas ražošanā izmantojamo AER potenciāls. Salīdzinājumam: Lietuvai ir lielāks potenciāls vēja un bioloģisko resursu izmantošanā elektroenerģijas ražošanai, bet Latvijai ir lielāks hidroenerģijas potenciāls. Saules izmantošana elektroenerģijas ražošanai ir diezgan līdzīga abām Baltijas valstīm. Latvijas vēja potenciāls ir vairāk nekā 5 TWh/gadā. Hidroelektrostaciju izmantošana ražošanai Latvijā ir gandrīz trīs reizes lielāka nekā Lietuvā.

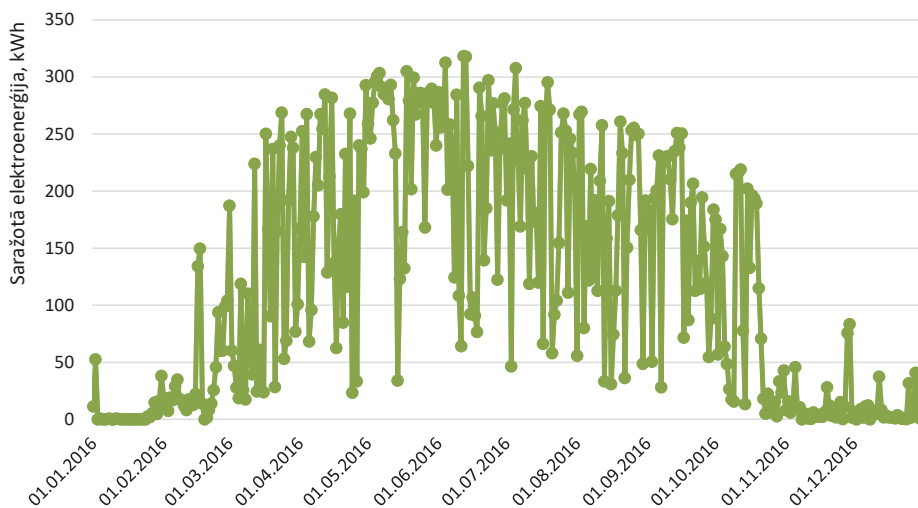


3.11. att. (a) Ražošana Latvijā avotiem dažādos scenārijos; (b) Ražošana Lietuvā avotiem dažādos scenārijos.

Galvenā atšķirība starp Latviju un Lietuvu ir gāzes kā avota izmantošana abos scenārijos. Latvija ir vairāk atkarīga no gāzes izmantošanas, un gāzes ražošana ir vairāk nekā divas reizes augstāka nekā Lietuvā. Investīciju algoritms ļauj prognozēt investīciju apjomu un kopējo ražošanas apjomu. Latvijai un Lietuvai piemērotākie scenāriji ir AER scenāriji.

3.4. Atjaunojamo enerģijas avotu izpēte

Dati no četriem 10kW invertoriem tika analizēti *MINITAB 18* programmā. Datu apstrādes rīkā tika izmantoti viena gada dati. Pēc apstrādes *MINITAB 18* programmā dati ļoti labi atspoguļo Latvijas sezonālītāti un visintensīvāko saules radiāciju vasarā no aprīļa līdz augustam (skat. 3.12. att.).



3.12. att. Saražotā elektroenerģija, kWh.

Arī regresijas analīze tika veikta *MINITAB 18* programmatūrā. Saules elektrostacija katru gadu ražo vidēji 45 MWh, vasaras mēnešos – apmēram 6 MWh. Regresijas analīzei tika izmantoti 12 paraugi, un tas nav pietiekami liels skaits, lai nodrošinātu ļoti precīzu sakarības stipruma novērtējumu. Sakarības stipruma novērtēšanas lielumi, piemēram, R^2 un pielāgotais R^2 , var ievērojami atšķirties analizētā parauga lieluma dēļ. Regresijas analīze parāda, ka R^2 ir 95,65 %. Elektroenerģijas ražošana var tik izskaidrota, izmantojot regresijas vienādojumu, kas aprakstīts ar (2.22) formulu:

$$Y = -0,5583 + 0,07581X - 0,000194X^2 \quad (2.22)$$

Vienam datu punktam ir liels atlikums (starpība), un tas ļoti nesaskan ar vienādojumu. Grafikā šis punkts ir atzīmēts ar sarkanu. Datu analīzei izmantoti mazāk par 15 datu punktiem, tāpēc datus nevar interpretēt, izmantojot p vērtību. Ar maziem paraugiem p vērtības precizitāte ir jutīga pret neparastām atlikumu kļūdām.

Regresijas analīze norāda, ka ir cieša saistība starp elektroenerģijas ražošanu un saules starojumu. Lai gan starp šiem diviem faktoriem ir saistība, ir arī citi faktori, kas ietekmē saražotās elektroenerģijas daudzumu, piemēram, izvēlētās tehnoloģijas, tehnoloģiju uzturēšana un saules paneļu novietojums, paneļu efektivitāte un citi mazāk svarīgi faktori. No šī pētījuma redzams, ka no saules enerģijas saražotā elektroenerģija stingri korelē ar saules starojumu Latvijas klimata apstākļos. Autore secina, ka saules enerģijas izmantošanai Latvijā ir potenciāls, bet saules enerģijas izmantošana ir saistīta ar citiem faktoriem, kas jāņem vērā, lai to integrētu, piemēram, centralizētās siltumapgādes sistēmā.

Saskaņā ar iepriekš aprakstīto metodoloģiju saules elektroenerģijas ražošana tika modelēta ikstundas laika periodiem, un iegūtie rezultāti tika saskaņoti ar enerģijas patēriņu.

Uzstādot 1000 m² PVT (S1), galvenā daļa (88 %) saražotās saules elektroenerģijas tieši nosedz elektroenerģijas patēriņu. Tikai nelielu daļu nepieciešams nodot tīklā vai pārveidot par siltumu. Tāpēc saules enerģijas īpatsvars elektroenerģijas patēriņa segšanā sasniedz tikai 13 %. Scenārijā (S3) vasaras periodā maksimālā saražotā jauda ir gandrīz vienāda ar kopējo enerģijas patēriņu. Ir vairāk stundu, kad rodas saules enerģijas pārpalikums, tādēļ 16 % no saražotās saules enerģijas jāpārvērš siltumenerģijā, jo šajos periodos siltumenerģijas tarifs ir lielāks par energoresursu cenu.

Ekonomiski pamatoti būtu eksportēt uz tīklu tikai 4 % no radītās saules enerģijas, jo enerģijas pārpalikums galvenokārt rodas tad, kad elektroenerģijas tirgus cena ir zema. S5 scenārijā ar vislielāko PVT platību un bez enerģijas uzkrāšanās liela daļa radītās saules enerģijas pārsniedz enerģijas patēriņu (7. att. publikācijā Nr. 9, (skat. Tabula 1.1)). Elektroenerģija, kas pārveidota par siltumu, sasniedz 32 % no saražotās elektroenerģijas, bet aptuveni 10 % no elektroenerģijas ir ekonomiski pamatoti pārdot un eksportēt uz tīklu.

Lielākā saules frakcija (SF) elektroenerģijas ražošanai noteikta S8A scenārijā, kurā ietverti litija jonu akumulatori elektroenerģijas uzkrāšanai. Pārējā daļa tiek nodota tīklos un pārdota par ikdienas tirgus cenu. PVT tehnoloģiju saražotā saules siltumenerģija tieši sedz siltuma pieprasījumu. Konkrētajā piemērā siltuma pieprasījums ir relatīvi augsts. Tādēļ gandrīz visu saules siltumu pat 3000 m² PVT scenārijā var izmantot vai nu telpu apkurei aukstajā sezonā, vai arī karstā ūdens sagatavošanai vasarā (9. att. publikācijā nr. 9, (skat. Tabula 1.1)). Papildu siltumenerģija tiek sagatavota no saules elektroenerģijas, bet tikai gadījumos, kad siltuma pieprasījums ir pietiekami augsts. Maksimālais SF siltuma pieprasījuma segumam sasniedz 7 % scenārijos S5 un S8A. Ziemas periodā siltuma pieprasījums strauji palielinās apkures pieprasījuma dēļ, un to pilnībā nevar nosēgt ar saules enerģiju bez papildu uzkrāšanas tehnoloģijām.

Aprēķinātie ekonomiskie rādītāji liecina, ka S5 scenārijam ir vislielākā NPV vērtība un zemākā LCOE vērtība – 34,10 EUR/MWh. Sistēmas atmaksāšanās laiks ir no 12 līdz 13 gadiem, un tas ir līdzīgs visiem scenārijiem. Visu scenāriju ietekme uz vidi tika salīdzināta, izmantojot siltumnīcefekta gāzu emisiju analīzi. Emisijas koeficients ir daudz augstāks centralizētās siltumapgādes siltumam, tādēļ PVT siltuma ražošanas dēļ neradītās emisijas būtiski ietekmē vides novērtējuma rezultātus. Visvairāk ietaupīto CO₂ emisiju ir S5 scenārijā. Lai iegūtu precīzākus vides novērtējuma rezultātus, būtu jāveic padziļināta aprites cikla analīze atsevišķiem scenārijiem.

SECINĀJUMI

1. Atjaunojamo energoresursu ilgtspējas analīze ļauj novērtēt šos resursus četru būtisku aspektu griezumā. Promocijas darbā tiek analizēta atjaunojamo energoresursu saikne ar vidi un klimatu, inženiertehnisko, ekonomisko aspektiem un atjaunojamo enerģijas avotu izvērtējumu, parādot to trīs tematiski saistītās sadaļās. Katrā sadaļā izmantotas dažādas metodikas, kurās aprakstīta saikne starp atjaunojamiem energoresursiem un izvēlētajiem aspektiem. Tika izmantoti dažādi zinātniskās izpētes metodoloģijas veidi – sistēmdinamikas modelēšana, pieprasījuma reakcijas analīze, investīciju analīze, scenāriju analīze, vairākkritēriju analīze, laika rindas un regresijas analīze.
2. Izveidotais sistēmdinamikas modelis ļauj analizēt iespējamo SEG emisiju samazinājumu un ietekmi, kādu uz šo samazinājumu varētu izraisīt ierosinātie politikas instrumenti. Modelis ļauj novērtēt arī ekonomiskos un finansiālos faktorus. Sistēmdinamikas modeļa testēšana Latvijas apstākļos norāda, ka lielāko siltumnīcefekta gāzu emisiju samazinājumu var sasniegt, aizstājot fosilo kurināmo ar atjaunojamiem enerģijas avotiem. Īstenojot 1. scenāriju, kumulatīvais SEG emisiju samazinājums ir 0,25 miljoni tonnu CO₂, salīdzinot ar bāzes scenāriju. Lai īstenotu šo scenāriju, laika posmā no 2016. gada līdz 2030. gadam būtu vajadzīgs valsts atbalsts 500 miljonu EUR apmērā. Saskaņā ar 2. scenāriju kumulatīvais SEG emisiju samazinājums ir 1,2 miljoni tonnu CO₂, salīdzinot ar bāzes scenāriju. Lai īstenotu šo scenāriju laikposmā no 2016. gada līdz 2030. gadam, būs nepieciešams valsts atbalsts 930 miljonu EUR apmērā. SEG emisiju samazināšanas pasākumus var īstenot pa vienam, neveicot citus pasākumus.
3. Kā lielākajai oglekļa dioksīda emisiju veicinātājai kopumā Eiropas Savienībā enerģētikas nozarei ir svarīga loma klimata pārmaiņu mazināšanā. Izmantojot jaunizveidotu datorsimulācijas modeli, šajā promocijas darbā analizēti Latvijas elektroenerģijas tirgus attīstības modeļi līdz 2050. gadam saskaņā ar esošo politiku Sistēmdinamikas pieeja tika izmantota, lai modelētu reģionālā elektroenerģijas sektora attīstību. Rezultāti norāda uz potenciālu ilgtermiņā ievērojami integrēt atjaunojamus energoresursus elektroenerģijas ražošanas bilancē. Visdaudzsološākie avoti būs saules, vēja, biomasas un biogāzes. Tomēr, lai tas notiktu, svarīgi izpildīt konkrētu priekšnoteikumu. Elektrības, kas ražota no atjaunojamiem enerģijas avotiem, izmaksām jābūt konkurētspējīgām ar tādas elektroenerģijas izmaksām, kas ražota no dabasgāzes. Kā liecina pētījuma rezultāti, tas būs iespējams, pateicoties vēsturiski novērotām tirgus tendencēm – dabasgāzes cenas pieaugumam un alternatīvo enerģijas tehnoloģiju sākotnējo investīciju apjoma samazinājumam. Tomēr, lai nodrošinātu vēlamo pāreju, ir svarīgi nodrošināt arī papildu atbalsta pasākumus (piemēram, atjaunojamo energoresursu elektroenerģijas ievades tarifu vai nodokļu politiku). Ja šie priekšnoteikumi pastāv, ir potenciāls samazināt Latvijas elektroenerģijas sektora radīto oglekļa dioksīda emisiju daudzumu par aptuveni 70 % līdz 2050. gadam, salīdzinot ar 2012. gadu, Šie secinājumi liecina par ievērojamo enerģētikas nozares potenciālu sekmēt ekonomiku ar zemu oglekļa dioksīda emisiju līmeni. Izveidotais simulācijas modelis var tikt pielāgots izmantošanai citās valstīs ar līdzīgu enerģijas tirgus struktūru kā Latvijā.

4. Siltumsūkņu izmantošana nepieciešama, lai palielinātu elektroenerģijas patēriņu un tādējādi palielinātu atjaunojamo resursu īpatsvaru nacionālajā enerģētikā. Siltumsūkņa integrācija centralizētās siltumapgādes sistēmā tika simulēta saskaņā ar trīs attīstības scenārijiem – pesimistisko scenāriju, mēreno scenāriju un optimistisko scenāriju. Pētījuma rezultāti norāda, ka eksistē labas tehniskās perspektīvas ieviest ar atjaunojamiem energoresursiem saražotās elektroenerģijas uzkrāšanu, integrējot siltumsūkņus Latvijas centralizētās siltumapgādes sistēmā.
5. Vēl viens no darba inženiertehniskajiem aspektiem veltīts atjaunojamās enerģijas avotu atkritumu izmantošanai kā potenciālu papildinājumu elektrolīzes procesā. Promocijas darbā pētīta biomasas pelnu piemērotība izmantošanai par katalizatoru ūdens elektrolīzes procesā. *MCA TOPSIS* metode tika izmantota, lai salīdzinātu dažādus katalizatoru parametrus, lai iegūtu lielāku H₂ ražošanas jaudu. Tika novērtētas četras koksnes kurināmā pelnu katalizatora alternatīvas ar dažādu sastāvu: S25, S50, S75 un S100. Pētījumā tika izvēlēti trīs kritēriji, kas vajadzīgi veiktspējas novērtēšanai: pH, katalītisko sfēru diametrs un sfēru virsmas īpašības. Kritēriju svars tika noteikts, pamatojoties uz literatūras analīzi, un tika ņemts vērā arī nozares ekspertu viedoklis. Tika pierādīts, ka pastāv iespēja izmantot biomasas pelnus kā katalizatorus ūdens elektrolīzes procesos. Šādas aizstāšanas ietekme uz vidi varētu būt ievērojama – tiek nodrošināta ķīmisko katalizatoru izmantošanas samazināšana. Tomēr būtu nepieciešams padziļināts tehniskās, vides un ekonomiskās efektivitātes aprēķins (piemēram, ūdeņraža ražošanas apjoms attiecībā pret materiālu ietaupījumu un resursu efektivitāti). Pētījums parādīja, ka *TOPSIS* metode ir piemērota metode uz bioresursiem balstītu ūdens elektrolīzes katalizatoru analīzei. Arī plašākā mērogā metodes izmantošana var tikt iekļauta eksperimenta plānošanas posmā, lai izvēlētos labāku alternatīvu turpmākiem eksperimentiem.
6. Lai samazinātu neatjaunojamu resursu izmantošanu un palielinātu atjaunojamo enerģijas avotu daļu, var izmantot dažādas metodes. Pieprasījuma reakcija un investīciju analīze ļauj palielināt AER daļu. Elektroenerģijas patēriņa pieprasījuma reakcijas analīze ir pieeja ar augstu jaunievedumu līmeni un plašu nākotnes potenciālu. Pieprasījuma reakcija siltumapgādes sistēmās ir atkarīga no elektroenerģijas cenas, salīdzinot ar siltumenerģijas cenu un atjaunojamās elektroenerģijas daļas pieaugumu. Investīciju algoritms ļauj prognozēt investīciju un kopējo ražošanas apjomu. Saskaņā ar veikto pētījumu investīciju analīze parāda, ka AER scenārijs ir Latvijai piemērotākais scenārijs. Ieguldījumu algoritmu var izmantot arī citās valstīs, ja ir pieejami visi nepieciešamie ievades dati.
7. Patlaban pāreja no fosilajiem uz atjaunojamiem avotiem ir aktuāla problēma, un saules enerģija ir viens no daudzsološiem resursiem. Veiktā pētījuma rezultāti liecina, ka no aprīļa līdz septembrim tiek saražots vairāk nekā 6000 kWh elektroenerģijas. Plānotā elektroenerģijas jauda bija 58 MWh, savukārt rezultāti liecina, ka saules enerģijas iekārta saražoja ~ 45 MWh/gadā. Tika veikta arī regresijas analīze saražotajai elektroenerģijai atkarībā no globālā siltumstarojuma. Regresijas analīze rāda, ka *R-sq* ir 95,65 % un saražoto elektroenerģiju var izteikt ar regresijas modeli $Y = -0,5583 + 0,07581X - 0,000194X^2$. Sakarība starp saražoto elektroenerģiju (MWh) un globālo siltumstarojumu (kWh/m²) ir statistiski nozīmīga ($p < 0,05$). Ir nepieciešams iegūt papildu datus, lai veiktu padziļinātu pētījumu par faktoru korelāciju.

8. Saules enerģijas nepārtrauktie pētījumi nosaka, ka saules enerģiju var integrēt vienā no sistēmām, kas ražo elektroenerģiju vai siltumu. Saules enerģija tiek plaši apspriesta kā risinājums centralizētās siltumapgādes un enerģētikas nozaru ilgtspējīgai attīstībai. Tādēļ promocijas darbā tika analizēta fotoelementa un termālās hibridiekārtas (*photovoltaic thermal hybrid – PVT*) uzstādīšana siltuma un elektroenerģijas vienlaicīgai ražošanai. Saules elektroenerģijas saražotais apjoms svārstās no 109 MWh līdz 307 MWh gadā, savukārt saražotais siltuma apjoms ir no 444 līdz 1330 MWh gadā. Augstāko saules enerģijas daļu var iegūt scenārijā ar maksimālu *PVT* uzstādīšanu un papildu uzkrāšanu (S8A). Saules enerģijas daļa S8A scenārijā sasniedz 38 % no kopējā siltuma un enerģijas patēriņa. Taču šis scenārijs ir arī ar vislielākajām izmaksām. Rezultāti rāda, ka gadījumā, ja tiks uzstādīti 3000 m² *PVT* bez uzkrāšanas iespējām, tiks saražots elektroenerģijas pārpalikums. Analizējot ikstundas elektroenerģijas tirgus cenas, ir ekonomiski izdevīgāk pārvērst lielāko daļu elektroenerģijas pārpalikuma siltumenerģijā, jo tirgus cena elektroenerģijai ir zemāka nekā centralizētās siltumapgādes tarifs. Ekonomiskā analīze rāda, ka visaugstākā *NPV* vērtība un viszemākā *LCOE* ir scenārijam ar maksimālo uzstādīto *PVT* platību un bez uzkrāšanās (S5). Aprēķinātā *LCOE* vērtība visiem scenārijiem ir zemāka nekā tad, kad tiek izmantoti atsauces dati par enerģijas cenu. Kopējais emisiju samazinājums ir lielāks scenārijiem bez enerģijas uzkrāšanas. Īpatnējās CO₂ emisiju ietaupījuma izmaksas norāda, ka optimālais scenārijs ir tas, kurā ir uzstādīta 2000 m² *PVT* platība. Iegūtie rezultāti rāda, ka *PVT* tehnoloģija var būt optimāls risinājums integrācijai centralizētās siltumapgādes sistēmā. Tas ir saistīts ar augstu centralizētās siltumapgādes bāzes slodzes pieprasījumu un papildu elektroenerģijas patēriņu. Ziemeļeiropas klimata joslās iespējams sasniegt salīdzinoši lielu saules enerģijas frakciju liela izmēra *PVT* sistēmās. Piedāvāto metodiku var izmantot, lai noteiktu optimālo *PVT* jaudu un ekonomiskos parametrus. Ikstundas saules enerģijas analīze parāda, ka ir saprātīgi pārveidot lieko elektroenerģiju siltumā un tādā veidā segt nepieciešamo siltuma slodzi, ja enerģijas tirgus cena ir zema.
9. Kopumā var secināt, ka atjaunojamo energoresursu izmantošanas ilgtspējīgu attīstību un ilgtermiņa veikspēju var raksturot ar aspektiem, kas saistīti ar klimatu un vidi, inženiertehniskiem aspektiem, ekonomiskajiem aspektiem un atjaunojamo enerģijas avotu izvērtējumu.



Dace Lauka (dzim. Eihvalde) dzimusi 1990. gadā. 2012. gadā ieguvusi bakalaura grādu vides zinātnē Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU). 2014. gadā absolvējusi gan RTU, gan Viļņas Ģedimīna tehniskās universitātes maģistrantūru un ieguvusi dubultdiplomu vides inženierzinātnēs. Par izstrādāto maģistra darbu saņēma Venera fon Sīmensa izcilības balvu.

Dace Lauka ir RTU Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātes Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūta pētniece un lektore. Kopumā RTU EEF VASSI nostrādājusi 6 gadus, kuru laikā publicējusi vairāk nekā 20 zinātniskās publikācijas. Dace Lauka ir līdzautore 4 monogrāfijām un 3 patentiem. Dace Lauka savu zinātnisko darbību spēj pamatot ar dalību dažāda mēroga zinātniskajās konferencēs un zinātnisko projektu izpildē. Pētījuma virzieni – resursu ilgtspējīga izmantošana, atjaunojamie energoresursi un vides tehnoloģijas.