

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

**Jeļena Ziemele**  
Doktora studiju programmas “Vides zinātnes” doktorante

**DAUDZPERSPEKTĪVU ANALĪZE PĀREJAI UZ CETURTĀS  
PAAUDZES CENTRALIZĒTĀS SILTUMAPGĀDES SISTĒMU**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskā vadītāja

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

**RTU Izdevniecība**

**Rīga 2017**

Ziemele J. Daudzperspektīvu analīze pārejai uz ceturtais paaudzes centralizētās siltumapgādes sistēmu.  
Promocijas darba kopsavilkums. – R.: RTU Izdevniecība, 2017. – 30 lpp.

Iespiests saskaņā ar Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūta 2017. gada 25 maija lēmumu, protokols Nr.77

ISBN 978-9934-10-935-5

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda vides zinātnē iegūšanai tiek aizstāvēts 2017. gada 3. augustā plkst. 14.00. Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Āzenes ielā 12/1, 115. auditorijā.

### OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Rītvards Sudārs  
Latvijas Universitāte

Profesors *Dr. sc. ing.* Edmunds Teirumnieks  
Rēzeknes Tehnoloģiju akadēmija

Profesors *Dr. sc. ing.* Andres Siirde  
Tallinas Tehnoloģiskā universitāte

### APSTIPRINĀJUMS

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

Jeļena Ziemele ..... (paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 34 attēli, sešas tabulas, kopā 202 lappuses un 14 pielikumi. Promocijas darba literatūras sarakstā ir 62 nosaukumi.

## SATURA RĀDĪTĀJS

Promocijas darba aktualitāte.....	5
Darba mērķis .....	5
<b>1. CENTRALIZĒTĀS SILTUMAPGĀDES ILGTSPĒJĪGA NĀKOTNE .....</b>	<b>11</b>
<b>2. PĒTĪJUMU METODOLOĢIJA.....</b>	<b>12</b>
2.1. Daudzperspektīvu analīzes metodoloģijas konceptuālā shēma.....	12
2.2. Empīriskie pētījumi.....	13
2.2.1. Regresijas analīze .....	13
2.2.2. Laika rindu prognozēšanas metode .....	13
2.2.3. Dekompozīcijas analīze.....	13
2.3. Daudzkritēriju analīze.....	14
2.4. Sistēmdinamika.....	14
2.4.1. Dinamiskā hipotēze un cēlonisko cilpu diagramma .....	14
2.4.2. Sistēmdinamikas modeļa struktūra .....	15
2.4.3. Scenāriju izstrāde.....	16
2.4.4. Jūtības analīze.....	17
2.5. Lēmumu pieņemšana: daudzperspektīvu analīzes metodoloģija .....	17
<b>3. PĒTĪJUMA REZULTĀTI UN TO ANALĪZE .....</b>	<b>19</b>
3.1. Empīrisko pētījumu rezultāti.....	19
3.1.1. Rūpnieciskā eksperimenta rezultāti .....	19
3.1.2. Laika rindu prognozēšanas metodes rezultāti.....	19
3.1.3. Dekompozīcijas analīzes rezultāti .....	20
3.2. Daudzkritēriju analīzes rezultāts.....	21
3.3. Sistēmdinamikas modelēšanas rezultāti.....	22
3.3.1. Hipotētisko scenāriju salīdzinājums ar sistēmdinamikas modelēšanas rezultātiem .....	22
3.3.2. Temperatūras režīma ietekmes analīze.....	22
3.3.3. CO <sub>2</sub> emisiju prognoze.....	23
3.3.4. Jūtības analīzes rezultāti .....	24
3.4. Daudzperspektīvu analīzes rezultāti .....	24
3.4.1. Centralizētas siltumapgādes sistēmas attīstības scenāriju analīze .....	24
3.4.2. Ekonomiskas efektivitātes noteikšana .....	26
SECINĀJUMI .....	27
LITERATŪRAS SARAKSTS .....	29



Promocijas darbs izstrādāts Nacionālās Pētījumu projekta “Ilgtspējīga klimata politika un inovatīvi, energoefektīvi tehnoloģiski risinājumi (LATENERGI)” ietvaros.

## Promocijas darba aktualitāte

Energoresursu un enerģijas izmantošanas efektivitātes paaugstināšana centralizētās siltumapgādes sistēmas (CSS) avotā, tīklos un pie gala patērētāja ir viens no galvenajiem Eiropas Savienības valstu attīstības un enerģētikas politikas uzdevumiem, kā risināšana pozitīvi ietekmē energoapgādes drošību, klimata pārmaiņu samazināšanu un valsts ekonomikas konkurētspēju. CSS Latvijā ir vēsturiski labi attīstīta un 67 % iedzīvotāju mazākās un lielākās pilsētās saņem apkuri un karsto ūdeni, izmantojot centralizēto siltumapgādi.

Nozares speciālisti aktīvi diskutē par 4. paaudzes centralizētās siltumapgādes sistēmas ieviešanas iespējām. Šī 4. paaudzes CSS balstās uz atjaunojamajiem enerģijas resursiem. Siltumenerģija tiek padota siltumtīklos ar zemas temperatūras grafiku, un piegādātā siltumenerģija tiek izmantota energoefektīvās ēkās ar zemas temperatūras siltumapgādes sistēmas palīdzību. CSS tiek integrēta kopējā energosistēmā, kas nodrošinās sistēmas elastīgumu un samazina ietekmi uz vidi, tuvinot CSS zema oglekļa sistēmai.

Promocijas darbā piedāvāta daudzperspektīvu analīzes metodoloģija, kas ļauj novērtēt virzītājspēkus pārejai uz 4. paaudzes centralizētas siltumapgādes sistēmu.

## Promocijas darba mērķis

Promocijas darba mērķis ir izveidot labi strukturētu daudzperspektīvu analīzes metodoloģiju pārejai no esošās sistēmas uz 4. paaudzes centralizētās siltumapgādes sistēmu. Izstrādātā metodoloģija integrē politikas instrumentus, lai analizētu 4. paaudzes ieviešanas dinamiku un potenciālos centralizētās siltumapgādes attīstības scenārijus. Izvirzītā mērķa sasniegšanai tika noteikti šādi uzdevumi:

- 1) izpētīt esošās CSS raksturojošos inženiertehniskos, ekonomiskos, sociālekonomiskos, vides un institucionālos indikatorus, kuru uzlabojumi tuvinās esošo sistēmu 4. paaudzes sistēmai;
- 2) izveidot visaptverošu metodoloģiju, lai vērtētu piemērotāko risinājumu pārejai no esošās siltumapgādes sistēmas uz 4. paaudzes sistēmu, un sarindot attīstības scenārijus pēc prioritātes no dažādu ieinteresēto nozares dalībnieku puses – no siltumenerģijas ražotāja, nekustamā īpašuma attīstītāja, siltuma patērētāja un citu ieinteresēto personu puses –, kā arī sarindot siltumapgādes kompāniju sniegtus pēc noteiktā efektivitātes rādītāja;
- 3) izveidot sistēmdinamikas modeli, un ar tā palīdzību pētīt daudzperspektīvu attīstības scenārijus, kas atkarībā no lietotiem politikas instrumentiem parāda 4. paaudzes CSS ieviešanas dinamiku un iespēju to sasniegt tuvākā vai tālākā nākotnē.

## Promocijas darba hipotēze

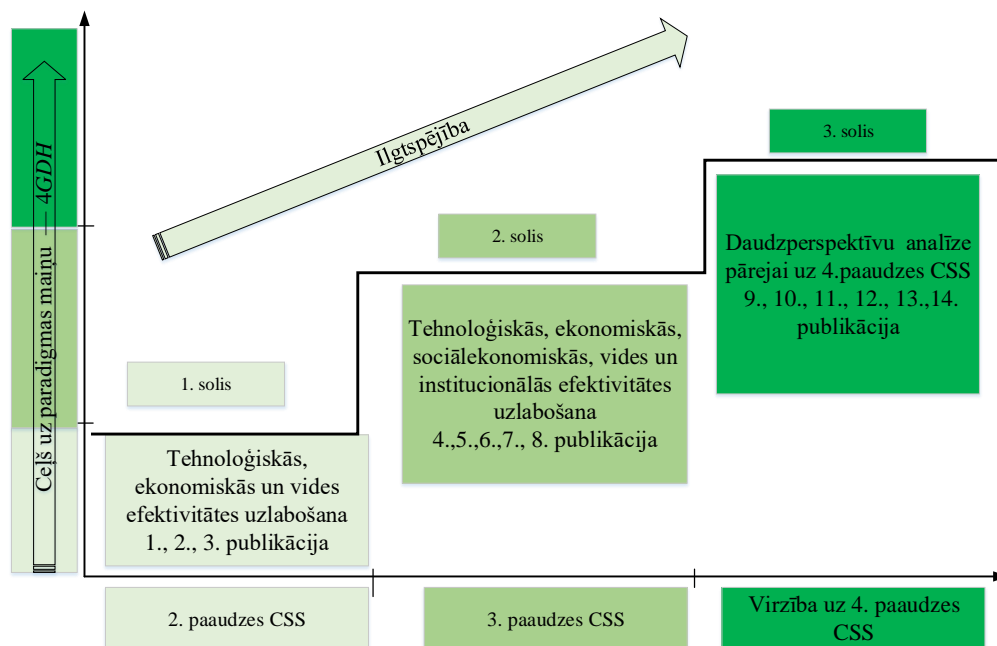
Inženiertehnisko, ekonomisko, sociālekonomisko, vides un institucionālo indikatoru uzlabošana tuvinās esošo centralizētās siltumapgādes sistēmu 4. paaudzes sistēmai. Efektivitātes pasākumu ieviešana nepieciešama visos centralizētās siltumapgādes posmos – siltuma avotā, pārvades sistēmās un pie siltuma patērētājiem, un tas saistīts ar atjaunojamo energoresursu integrēšanu, pakāpenisku pāreju uz zemas temperatūras režīmu siltumtīklos un efektivitātes paaugstināšanu pie gala patērētāja, kā arī viedas vadīšanas sistēmas ieviešanu. Atkarībā no lietotās politikas, siltumapgādes nozarē 4. paaudzes CSS nosacījumi tiks sasniegti tuvākā vai tālākā nākotnē. Optimistiskā scenārijā gadījumā 4. paaudzes CSS nosacījumi varētu tikt sasniegti Latvijā līdz 2020. gadam, bet pesimistiskā scenārijā - līdz 2030. gadam.

## Pētījumu metodika

Darbā izveidota CSS daudzperspektīvu analīzes metodoloģija, kas apvieno empīriskos pētījumus, sistēmdinamikas modelēšanu, daudzkritēriju un ekonomisko analīzi un ļauj analizēt centralizētās siltumapgādes sistēmas 4. paaudzes ieviešanas dinamiku. Pētījumi veikti, izmantojot pakāpeniskuma principu, virzoties no vienkāršākā uz sarežģītāko, analizējot vairākus indikatorus, kas integrēti arvien komplicētākās pētījuma metodēs (1.1. att.).

Pirmajā izpētes solī tehnoloģiskās, ekonomiskās un vides efektivitātes uzlabošanas iespējas esošā CSS, kas lielās pilsētās atbilst 2. paaudzes sistēmas pamatprincipiem, pētītas ar statistiskās analīzes metodi. Otrajā pētījumu solī pievienoti sociālekonomiskie un institucionālie sistēmas uzlabojumi un paplašināts izmantoto metodoloģiju loks (dekompozīcijas analīze, līmeņatzīmes metode un daudzkritēriju analīze; 1.1. att.).

Trešajā pētījumu solī izmantota sistēmdinamikas modelēšana un, balstoties uz holistisko pieeju, izveidota metodoloģija, lai vērtētu iespējamus risinājumus centralizētās siltumapgādes sistēmas pārejai uz 4. paaudzes sistēmu.



1.1. att. Promocijas darba izpētes daļas izklāsts atbilstoši CSS daudzperspektīvu analīzes vispārējai struktūrai (pilns publikāciju saraksts un to nosaukumi doti turpmāk tekstā).

### Promocijas darba zinātniskā novitāte

Darbā izveidota centralizētās siltumapgādes sistēmas attīstības daudzperspektīvu analīzes metodoloģija, kas ļauj analizēt centralizētās siltumapgādes sistēmas 4. paaudzes ieviešanas dinamiku. Daudzperspektīvu analīzes metodoloģija apvieno četras savstarpēji saistītas daļas: empīriskos pētījumus, sistēmdinamikas modelēšanu, daudzkritēriju un lēmumu pieņemšanas sadaļu un ekonomisko analīzi.

Darbā izstrādātais sistēmdinamikas modelis apraksta trīs savstarpēji saistītu CSS posmu uzvedību (siltuma avots, sadales tīkli, galapatērētāji) un ļauj pētīt sistēmai piemītošās atgriezeniskās saites. Katrs no posmiem ir aprakstīts ar vairākiem raksturīgiem indikatoriem (tehnoloģiskiem, ekonomiskiem, sociālekonomiskiem, vides, institucionāliem) un vienādojumiem, kas izveidoti ar statistiskās analīzes palīdzību un raksturo sistēmas izmaiņas un mijiedarbību. Balstoties uz lietoto politikas instrumentu un atjaunojamo tehnoloģiju savstarpējām kombinācijām, modelis ļauj analizēt vairākus simtus potenciālu attīstības scenāriju.

Piedāvātā metodoloģija ļauj diferencēti analizēt CSS dalībnieku uzvedību, jo starp tiem pastāv būtiskas atšķirības attiecībā uz sistēmas attīstības prioritātēm un iespējamiem finanšu attīstības modeļiem. Darbā izstrādāta daudzkritēriju analīzes metodoloģija, kas ļauj vērtēt CSS prioritārus attīstības scenārijus no dažādu dalībnieku viedokļa un sarindot aprēķinos iegūtos vērtējumus.

### Darba praktiskā nozīme

Promocijas darba pētījums par 4. paaudzes sistēmas integrēšanu esošā CSS veicina zema oglekļa sistēmas ieviešanu. Darba rezultātiem ir praktiska nozīme gan nacionālā līmenī, gan reģionālā un pašvaldību līmenī. Neskatoties uz to, ka sistēmdinamikas modelis balstās uz Latvijas centralizētās siltumapgādes uzbūves specifiku, izstrādātā daudzperspektīvu analīzes metodoloģija un izveidotais sistēmdinamikas modelis var tikt piemērots arī citām siltumapgādes sistēmām. Ar modeļa palīdzību var prognozēt CO<sub>2</sub> emisiju samazināšanās dinamiku CSS.

Izmantojot darbā piedāvāto metodoloģiju, CSS operatori var noteikt sistēmas darbināšanas efektivitātes līmeni un salīdzināt šo līmeni ar citiem nozares dalībniekiem. Balstoties uz daudzkritēriju analīzes rezultātiem, CSS ražotāji var pārdomāti izvēlēties investīciju politiku uzņēmumā. Metodoloģija ļauj analizēt dažādus attīstības scenārijus no dažādu CSS dalībnieku skatupunkta: CSS operatora, gala patērētāja, nekustāma īpašuma attīstītāja puses, kā arī no politikas veidotāja viedokļa. Daudzperspektīvu

analīze ļauj pieņemt politiski tālredzīgus lēmumus gan valsts, gan pašvaldību līmenī, ka arī, plānojot dažādu CSS posmu rekonstrukciju, kas tuvinās 4. paaudzes CSS ieviešanu. Piedāvātā metodoloģija ir piemērota zinātniskās izpētes mērķiem, lai izprastu mehānismus, kas tuvina CSS 4. paaudzei.

Izstrādātais modelis ļauj prognozēt siltumenerģijas tarifa dinamiku un noteikt to ietekmējošos mehānismus, kas ir svarīgi lielai Latvijas iedzīvotāju daļai.

### **Pētījumu aprobācija**

Darba rezultāti apspriesti un prezentēti 12 zinātniskajās konferencēs, publicēti 16 zinātniskie raksti (12 no tiem ir *SCOPUS* datubāzē un 7 – *ISI Web of Science* datubāzē).

#### **Konferences**

1. Ziemele J., Blumberga D., Talcis N., Laicane I. Industrial Research of Condensing Unit for Natural Gas Boiler House // RTU 53rd International Scientific Conference, Conference proceeding, 11–12 October 2012, Riga, Latvia.
2. Ziemele J., Blumberga D. Inovatīvu degšanas tehnoloģiju ietekme uz klimata samazinājuma vērtējums // Latvijas Universitātes 71. zinātniskā konference “Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Vides zinātne”, 1st February 2013, Riga, Latvia
3. Ziemele J., Pakere I., Blumberga D. Development of District Heating System in Case of Decreased Heating Loads // ECOS 2014, 15–19 June 2014, Finland, Turku.
4. Ziemele J., Pakere I., Blumberga D., Žogla G. Economy of Heat Cost Allocation in Apartment Buildings // International Scientific Conference “Environmental and Climate technologies – CONECT 2014”, Oktober, 2014, Riga, Latvia
5. Ziemele J., Pakere I., Talcis N., Blumberga D. Multi-Criteria Analysis of District Heating Systems in Baltic States // 6th International Conference on Applied Energy, ICAE 2014, 30 May to 2 June 2014, Taipei, Taiwan.
6. Ziemele J., Gravelsins A., Blumberga D. Decomposition Analysis of District Heating System Based on Complemented Kaya Identity // 7th International Conference on Applied Energy, ICAE 2015; 28–31 March 2015, Abu Dhabi, United Arab Emirates.
7. Ziemele J., Gravelsins A., Blumberga A., Vigants G., Blumberga D. System Dynamics Model Analysis of Pathway to 4th Generation District Heating Systems in the Baltic States // 1<sup>st</sup> International Conference on Smart Energy Systems and 4th Generation District Heating. 25–26 August 2015, Copenhagen, Denmark.
8. Ziemele J., Gravelsins A., Blumberga A., Blumberga D. The Effect of Energy Efficiency Improvements on the Development of 4th Generation District Heating // International Scientific Conference “Environmental and Climate technologies – CONECT 2015”, October, 2015, Riga, Latvia.
9. Ziemele J., Gravelsins A., Blumberga A., Blumberga D. Sensitivity Analysis of District Heating System Model for Transition From Fossil Fuel to Renewable Energy Sources // 29th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy System, ECOS 2016, 19–23 June 2016, Portorož, Slovenia.
10. Ziemele J., Pakere I., Chernovska L., Blumberga D. Lowering Temperature Regime in District Heating Network for Existing Building Stock // 19th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction PRES 2016, 27–31 August 2016, Prague, Czech Republic.

11. Ziemele J., Gravelins A., Blumberga A., Blumberga D. Development of Heat Saving Platform in the System Dynamics Model for Transition to 4th Generation District Heating // 2st International conference on Smart Energy Systems and 4th Generation District Heating. 27–28 September 2016, Aalborg, Denmark.
12. Ziemele J., Timma L., Kubule A., Blumberga D. A Holistic Methodology to Assess the Transition to 4th Generation District Heating Systems // International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies CONECT 2016, October 2016, Riga, Latvia.

### **Zinātniskās publikācijas**

1. Ziemele J., Blumberga D., Talcis N., Laicane I. Industrial Research of Condensing Unit for Natural Gas Boiler House // Environmental and Climate Technologies (ISSN: 1691-5208) – 2012, 10, 34–38, doi:10.2478/v10145-012-0023-9 (In Scopus).
2. Ziemele I., Pakere I., Blumberga D., Zogla G. Economy of Heat Cost Allocation in Apartment Buildings // Energy Procedia on International Scientific Conference Environmental and Climate Technologies, CONECT 2014 (ISSN: 18766102) – 2015, 72, 87–94, doi: 10.1016/j.egypro.2015.06.013 (in Scopus and ISI Web of Science).
3. Ziemele J., Pakere I., Talcis N., Cimdirina G., Vigants G., Veidenbergs I., Blumberga A., Blumberga D. Analysis of Wood Fuel Use Development in Riga // Agronomy Research (ISSN: 1406-894X) – 2014, 12(2), 645–654. (in Scopus).
4. Ziemele J., Pakere I., Blumberga D. Development of District Heating System in Case of Decreased Heating Load. //The 27th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2014). Conference proceeding (ISBN: 978-163439134-4) – 2014, 2044–2055. (in Scopus).
5. Ziemele J., Pakere I., Talcis N., Blumberga D. Multi-Criteria Analysis of District Heating Systems in Baltic States // 6th International Conference on Applied Energy, ICAE 2014. Energy Procedia (ISSN: 18766102) – 2014, 61, 2172–2175. doi:10.1016/j.egypro.2014.12.102 (In Scopus and ISI Web of Science).
6. Ziemele J., Vigants G., Vitolins V., Blumberga D., Veidenbergs I. District Heating Systems Performance Analyses. Heat Energy Tariff // Environmental and Climate Technologies (ISSN: 16915208) – 2014, 13(1), 32–43. doi: 10.2478/rtuect-2014-0005 (In Scopus).
7. Ziemele J., Gravelins A., Blumberga D. Decomposition Analysis of District Heating System Based on Complemented Kaya Identity // 7th International Conference on Applied Energy, ICAE 2015. Energy Procedia (ISSN: 18766102) – 2015, 77, 1229–1234. doi:10.1016/j.egypro.2015.07.164 (In Scopus and ISI Web of Science).
8. Ziemele J., Pakere I., Chernovska L., Blumberga D. Lowering Temperature Regime in District Heating Network for Existing Building Stock // Chemical Engineering Transactions (ISBN 978-88-95608-42-6) – 2016, 52, 709–714 doi: 10.3303/CET1652119 (in Scopus and ISI Web of Science).
9. Ziemele J., Pakere I., Talcis N., Blumberga D. The Future Competitiveness of the Non-Emissions Trading Scheme District Heating Systems in the Baltic States // Applied Energy (ISSN: 03062619) – 2016, 162, 1579–1585 (In Scopus and ISI Web of Science).
10. Ziemele J., Gravelins A., Blumberga A., Blumberga D. System Dynamics Model Analysis of Pathway to 4th Generation District Heating in Latvia // Energy (ISSN: 03605442) – 2016, 110, 85–94 (In Scopus and ISI Web of Science).



11. Ziemele J., Gravelins A., Blumberga A., Blumberga D. The Effect of Energy Efficiency Improvements on the Development of 4th Generation District Heating // International Scientific Conference Environmental and Climate Technologies, CONECT 2015. Energy Procedia (ISSN: 18766102) – 2016, 95, 522–527. (In Scopus).
12. Ziemele J., Gravelins A., Blumberga A., Blumberga D. Sensitivity Analysis of District Heating System Model for Transition From Fossil Fuel to Renewable Energy Sources // The 29th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2016). Conference proceeding – 2015, XX–XX. (Pending in Scopus).
13. Ziemele J., Gravelins A., Blumberga A., Blumberga D. Combining Energy Efficiency at Source and at Consumer to Reach 4th Generation District Heating: Economic and System Dynamics Analysis // Energy (ISSN: 03605442) - 2017, in Press,1-12, (In Scopus).
14. Ziemele J., Kubule A., Blumberga D. Multi-Perspective Methodology to Assess the Transition to 4th Generation District Heating Systems // International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies CONECT 2016. Energy Procedia (ISSN: 1876-6102) – 2017,113,17-21. (Pending in Scopus).

#### **Metodiskais materiāls un patenti**

1. Blumberga D., Gedrovičs M., Kirsanovs V., Timma L., Kļaviņa K., Kubule A., Kļaviņš J., Muižniece I., Kauls O., Barisa A., Bāliņa K., Lauka D., Ziemele J., Kārklīņa I. Laboratory Works for Students of Environmental Engineering. Vol. 3 (original title in Latvian “Laboratorijas darbu krājums vides inženierzinātņu studentiem. 3. daļa”) // Riga Technical University Press (ISBN: 978-9934-10-747-4) – 2016 – 92 p.
2. Blumberga D., Ziemele J., Lubiņš A., Vīgants E., Žandeckis A., Vīgants Ģ., Kirsanovs V., Veidenbergs I. Wood pellet burner, Ltd. “Ludzas Bio-enerģija”: LV-14670; 20.06.2013

#### **Citas publikācijas**

1. Cimdina G., Veidenbergs I., Kamenders A., Ziemele J., Blumberga A., Blumberga D. Modelling of Biomass Cogeneration Plant Efficiency// Agronomy Research (ISSN: 1406894X) – 2014, 12, 2, 455–468 (in Scopus).
2. Cimdina G., Slisane D., Ziemele J., Vitols V., Vīgants G., Blumberga D. Sustainable Development of Renewable Energy Resources. Biomass Cogeneration Plant (ISBN:978-609-457-640-9) // The 9th International Conference “Environmental Engineering” – 2014. Vilnius, Lithuania. doi:10.3846/enviro.2014.256 (in ISI Web of Science).
3. Selivanovs J., Blumberga D., Ziemele J., Barisa A. Research of Woody Biomass Drying Process in Pellet Production // Environmental and Climate Technologies (ISSN: 16915208) – 2012, 10(1), 46–50. doi: 10.2478/v10145-012-0017-7 (In Scopus).

## Darba struktūra un apjoms

Promocijas darba pamatā 14 tematiski vienotas zinātniskās publikācijas, kas ir publicētas dažādos zinātniskajos žurnālos, ir pieejamas zinātniskās informācijas krātuvēs un ietvertas starptautiskās datubāzēs. Šo publikāciju mērķis ir pārnest un aprobēt vairāku attīstības perspektīvu analīzes metodoloģiju pārejai uz 4. paaudzes centralizētās siltumapgādes sistēmu.

Promocijas darbs ir izstrādāts angļu valodā un satur ievadu un trīs nodaļas:

1. Centralizētās siltumapgādes ilgtspējīga nākotne;
2. Pētījumu metodoloģija;
3. Rezultāti un to novērtējums.

Promocijas darba ievadā pamatota tēmas aktualitāte, definēti mērķi, uzdevumi un izmantotās pētniecības metodes un sniegts pārskats par promocijas darba aprobāciju zinātniskajās konferencēs, kā arī dots publikāciju saraksts.

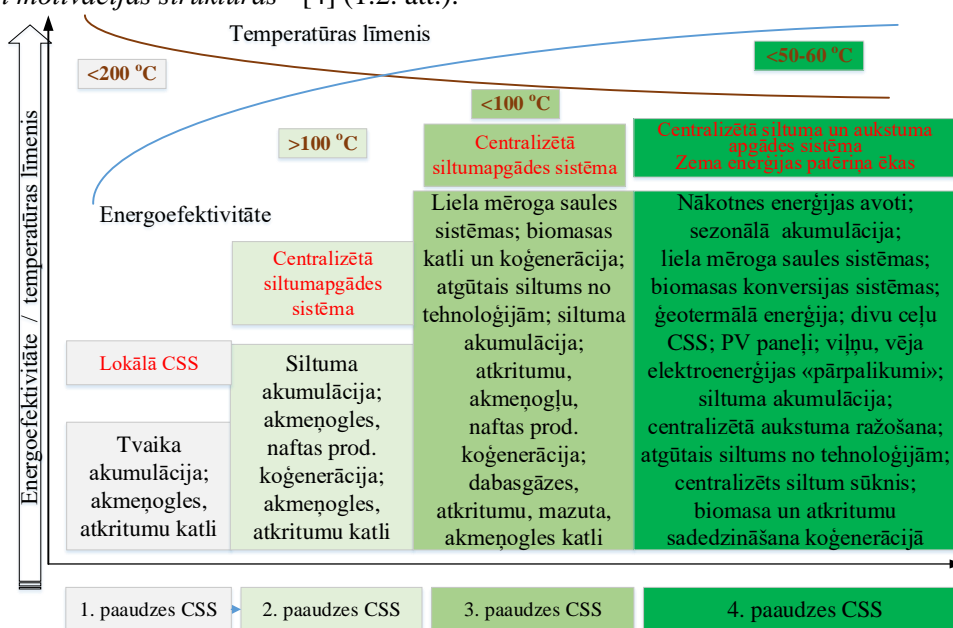
Pirmajā nodaļā izklāstīta 4. paaudzes centralizētās siltumapgādes koncepcija, izskatītas iespējas to ieviest Latvijā. Pirmajā nodaļā sniegts pārskats par tehnoloģiskiem, ekonomiskiem, sociālekonomiskiem, vides un institucionāliem indikatoriem dažādos siltumapgādes posmos (siltuma avotā, sadales tīklos un pie siltumenerģijas patērētājiem) un iespējām tos uzlabot.

Otrā nodaļa apraksta darbā izmantotās metodes: empīriskus pētījumus, sistēmdinamikas modelēšanu un daudzkritēriju analīzi, kas kopā apvienoti daudzperspektīvu analīzē. Vairāku attīstības perspektīvu analīze ļauj identificēt dažādus scenārijus pārejai uz 4. paaudzes sistēmu, kas tuvina CSS nulles emisiju līmenim. Darbā iegūtie rezultāti atspoguļoti 3. nodaļā. Promocijas darba noslēgumā apkopoti galvenie secinājumi, sniegts literatūras saraksts un pielikumi.

# 1. CENTRALIZĒTĀS SILTUMAPGĀDES ILGTSPĒJĪGA NĀKOTNE

Nozīmīgu daļu no kopējā Eiropas Savienības (ES) enerģijas patēriņa sastāda patēriņš centralizētās siltumapgādes un aukstuma apgādes nodrošināšanai; 2014. gadā tas sastādīja apmēram pusi no kopējā enerģijas patēriņa [1]. Tādēļ, kā noteikts ES siltumapgādes un aukstumapgādes stratēģijā [1], kā arī Energoefektivitātes direktīvā [2], energoefektivitātes pasākumi būtu jāievieš visās trīs CSS daļās, tas ir, siltuma avotā, sadales tīklos un pie gala patērētājiem. Turklāt ES līmenī tiek veicināts enerģijas ražošanas no atjaunojamiem energoresursiem pieaugums [3] un arvien attīstās pētījumi par ilgtspējīgām energosistēmām [4]. Tehnoloģijām attīstoties, energoefektivitātes pasākumi un ar atjaunojamiem energoresursiem saistīti risinājumi tiek pakāpeniski ieviesti siltumapgādes sistēmās, tādējādi virzoties uz 4. paaudzes CSS.

Taču ir nepieciešama valdošās paradigmas maiņa, lai ieviestu ilgtspējīgas CSS, kurās būtu īstenota pāreja no esošās CSS uz 4. paaudzes CSS. 4. paaudzes CSS jēdziens tiek definēts kā “sistēmas, kas nodrošina siltumapgādi zema enerģijas patēriņa ēkām un zemu zudumu tīklos, kā arī tajās integrēti zemas temperatūras siltuma avoti un tās tiek vadītas ar viedās vadības sistēmas palīdzību. Šis jēdziens ietver institucionālās un organizatoriskās struktūras izveidi, lai nodrošinātu piemērotas izmaksu un motivācijas struktūras” [4] (1.2. att.).



1.2. att. 4. paaudzes centralizētās siltumapgādes sistēmas salīdzinājums ar iepriekšējam trīs paaudzēm [4].

Paradigmas maiņa ietver nozīmīgas pamatjēdzienu un eksperimentālās prakses izmaiņas kādā zinātniskajā disciplīnā. Kuhns [5] pretstatīja šīs izmaiņas, kas raksturo zinātnisko revolūciju, ar tādu ierasto zinātnisko pieeju, ko viņš raksturo kā zinātnisko darbu, kas atbilst valdošai sistēmai (vai paradigmai). Nepārtraukti uzlabojumi (tehnoloģiski, ekonomiski, sociālekonomiski, vides, institucionāli u. c.) visos siltumapgādes posmos laika gaitā noved pie 4. paaudzes CSS jēdziena (paradigmas maiņas), ko raksturo vairāki elementi – zemas temperatūras siltuma avoti, zemu zudumu sadales tīkli, zema enerģijas patēriņa ēkas –, kas apvienoti vienotā viedās enerģijas sistēmā.

4. paaudzes CSS sistēmas ieviešana nav vienkārša, tā saistīta ar dažādiem priekšnoteikumiem emisiju tirdzniecības sistēmas (ETS) dalībniekiem un pārējiem dalībniekiem [6]. Gan finanšu modeļu, gan iesaistīto pušu ziņā pastāv būtiskas atšķirības starp ETS un pārējiem dalībniekiem. Līdz šim 4. paaudzes CSS ieviešana ir pētīta no dažādiem aspektiem. Sperlinga un Mulera pētījums [7] identificē būtiskākos ieguvumus un trūkumus atjaunojamo energoresursu integrēšanai CSS un uzsver atjaunojamo energoresursu lomu pilsētas teritorijas attīstības stratēģijas izveidē. Østergaards un Lunds [8] pētījuši politikas veidošanas procesus; viņu pētījums ir par ES politikas mērķu, valstu stratēģiju un pilsētu attīstības iespēju apvienošanas aspektiem, izmantojot inovatīvu risinājumu. Lai gan 4. paaudzes CSS ieviešana tikusi izvērtēta no politiskā, ekonomiskā, tehniskā un vides aspekta, maz uzmanības ticis pievērsts šo aspektu vienotai sistēmiskai izpētei un sistēmas izpētei no dažādām perspektīvām.

Nemot vērā, ka CSS ir sarežģīta sistēma, kas nepārtraukti mainās, šīs sistēmas uzvedība var tikt raksturota ar dinamiskām struktūrām. Šajā jomā vairāki pētījumi veltīti jautājumam – cik lielu atjaunojamo energoresursu proporciju centralizētajā siltumapgādē iespējams sasniegt gan īstermiņa, gan ilgtermiņa perspektīvā? Modelēšanai tiek izmantoti dažādi rīki: energosistēmu modelēšanas rīks *EnergyPLAN* [7], lineārās optimizācijas modeļi – *Baltimore* modelis [9], *MARKAL* modelis [10] u. c.

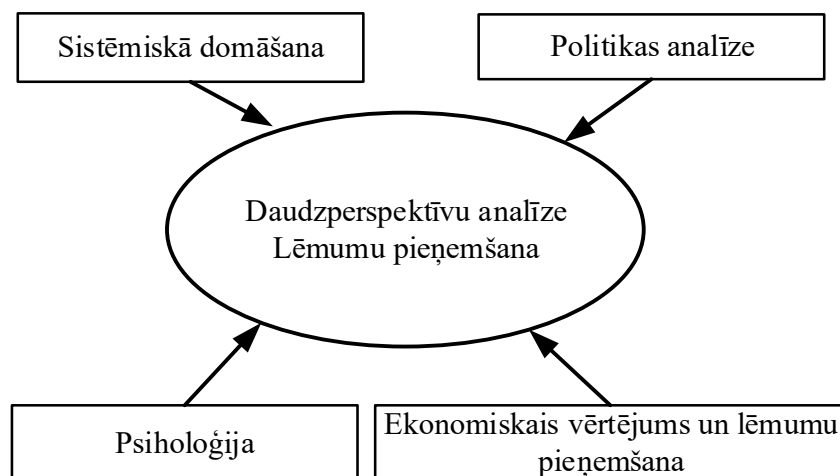
Daudzperspektīvu analīzes metodoloģija ir svarīgs instruments, lai pētītu attīstības iespējas 4. paaudzes CSS ieviešanai. Siltumapgādes sistēmās šīs perspektīvas var atšķirties starp vairākām ieinteresētajām pusēm: pašvaldībām, siltumapgādes uzņēmumu īpašniekiem, jaunu pilsētas teritoriju attīstītājiem, dzīvojamo un komercīpašumu īpašniekiem, kā arī gala patērētājiem, kas dzīvo šajos īpašumos, un citiem [11].

## 2. PĒTĪJUMU METODOLOĢIJA

Siltumapgādes sistēmu izbūve dažādās vietās atšķiras gan atkarībā no tehnoloģiskajiem risinājumiem, ko izmanto siltuma avotos, pārvades tīklos un pie patērētājiem, gan arī atkarībā no siltumenerģijas ražošanai izmantotā kurināmā, esošās institucionālās sistēmas un citiem aspektiem. Šajā promocijas darbā izmantotās metodes piemērotas siltumapgādes sistēmai Latvijā. Taču izstrādātā metodoloģija var tikt piemērota arī citām siltumapgādes sistēmām, ja tiek iegūti un izmantoti atbilstoši sākotnējie dati un dati par citām atjaunojamo energoresursu tehnoloģijām.

### 2.1. Daudzperspektīvu analīzes metodoloģijas konceptuālā shēma

Šajā promocijas darbā ir izveidota daudzperspektīvu analīzes metodoloģija, lai novērtētu pāreju uz 4. paaudzes CSS. Ierosinātā metodoloģija apkopo sistēmisku domāšanu, politikas analīzi, ekonomikas analīzi, lēmumu pieņemšanas zinātni un psiholoģiju (neērtību izmaksas), un to var izmantot, lai novērtētu pāreju no esošās siltumapgādes sistēmas uz 4. paaudzes CSS (2.1. att.).



2.1. att. Daudzperspektīvu analīzes metodoloģijas konceptuālā shēma (pēc [12]).

Izstrādātā metodoloģija ļauj izvērst un salīdzināt vairākus potenciālos siltumapgādes attīstības scenārijus pārejai uz 4. paaudzes CSS.

Laika gaitā lietotā metodoloģija kļuva arvien sarežģītāka (2.1. tab.), jo pieauga arī pētāmo jautājumu – par tehnoloģiskajiem, sociāli ekonomiskajiem, vides un institucionāliem uzlabojumiem, kā arī par ieskatu dažādos scenārijos, kas ļauj virzīties no esošās siltumapgādes sistēmas uz 4. paaudzes CSS – sarežģītības pakāpe.

Promocijas darbā lietotās metodes\*

Lietotā metodoloģija	Zinātniskais raksts													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Novērošanas analītiskie pētījumi	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Statistiskā datu analīze	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Dekompozīcijas analīze							×							
Līmeņatzīmes						×								
Delfu metode				×	×	×		×		×	×		×	×
Daudzkritēriju analīze				×	×	×			×					×
Jutības analīze				×								×		
Sistēmdinamika										×	×	×	×	×
Daudzperspektīvu analīze										×	×	×	×	×
Ekonomiskas efektivitātes analīze										×			×	

\* 2.1. tabulas doto metožu un daudzperspektīvu analīzes metodoloģijas (2.4. att.) savietojamība.

Empīriskie pētījumi	Daudzkritēriju analīze	Sistēmdinamika	Ekonomika un lēmumu pieņemšana
---------------------	------------------------	----------------	--------------------------------

## 2.2. Empīriskie pētījumi

Promocijas darba pirmajā solī veikti empīriskie pētījumi, kas saistīti ar siltumapgādes sistēmas posmu (avots, sadales tīkli un patērētājs) statistisko datu apstrādi un nepieciešamību definēt neatkarīgos mainīgos, ka arī izveidot aprakstošus vienādojumus atkarīgajiem mainīgajiem.

### 2.2.1. Regresijas analīze

Regresijas analīze nosaka gadījuma lielumu izmaiņu precīzus kvantitatīvus parametrus – ar funkcionālām sakarībām izsaka stohastiskās saites nozīmību. Regresijas analīzes rezultātā ir iegūti neatkarīgo un atkarīgo gadījuma mainīgo lielumu statistiskās sakarības ciešuma kvantitatīvie parametri un noteikti regresijas vienādojuma koeficienti. Regresijas analīzes mērķis ir iegūt grafiskas vai analītiskas attiecības starp mainīgajiem.

### 2.2.2. Laika rindu prognozēšanas metode

Siltumenerģijas apjomu, ko varēs saražot ar biokurināmo (šķeldu), prognozēšana veikta ar diviem rīkiem: laika rindu modeli (programma *STATGRAPHICS*) un ar datorprogrammā *Excel* izveidotu algoritmu. Modelēšanas gaitā izvēlētais periods bija 1 mēnesis un sezonālitate – 12 mēneši. Prognozēšanai izmantots modelēšanā plaši lietotais *ARIMA* modelis, ko izmanto prognozēšanai dažādās nozarēs.

### 2.2.3. Dekompozīcijas analīze

Dekompozīcijas analīze, kas balstās uz *Kaya* vienādojumu [13], ir plaši izplatīta un bieži lietota CO<sub>2</sub> emisiju dinamikas analizēšanas metode [14]. Centralizētā siltumapgāde atšķiras no citiem tautsaimniecības sektoriem, kas rada CO<sub>2</sub> emisijas, ar to, ka būtisku lomu spēlē ne tikai izvēlētais kurināmā veids [15], bet arī sistēmas energoefektivitāte [16]. Lai varētu analizēt primāras enerģijas izmantošanas efektivitāti, *Kaya* vienādojums tika papildināts ar efektivitātes komponenti (*PF/HC*):

$$C = (C/PF)(PF/HC)(HC/Y)(Y/P)P, \quad (2.1)$$

kur  $C$  – CO<sub>2</sub> emisiju daudzums, t<sub>CO2</sub> gadā,  $HC$  – CSS siltumenerģijas patēriņš, MWh gadā,  $PF$  – CSS primāras enerģijas patēriņš, MWh gadā,  $Y$  – iekšzemes kopprodukts, EUR gadā,  $P$  – iedzīvotāju skaits, kas izmanto CSS.

Vispārīgā gadījumā formulā (2.1) tiek summētas siltumnīcefekta gāzu emisijas, ko rada dažādu fosilo kurināmo sadedzināšana [14].

Piedāvātā metodika paredz neatkarīgu mainīgo identificēšanu, kuru izmaiņas ietekmē *Kaya* vienādojuma komponentes. Ar efektivitātes komponenti papildinātais *Kaya* vienādojums tika testēts, izmantojot Latvijas CSS datus.

### 2.3. Daudzkritēriju analīze

Veicot siltumapgādes sistēmas efektivitātes analīzi, nepieciešams salīdzināt inženiertehniskus, ekonomiskus, sociālekonomiskus, vides un institucionālus indikatorus un ekspertu viedokļus par trīs siltumapgādes posmiem: siltuma avotu, siltuma tīkliem un patērētāju. Lai veiktu šo uzdevumu, izmanto daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metodiku [17] (*MADM/MCDM – multi-attribute or multi-criteria decision making*) un tās rīku *TOPSIS* [18]. Izmantojot izvēlētos kritērijus, tiek izveidota matrica  $D_k$ , kuru apraksta 2.2. vienādojums:

$$\begin{matrix}
 & b_1 & b_2 & \dots & b_j & \dots & b_n \\
 A_1 & \left[ \begin{matrix} b_{11}^k & b_{12}^k & \dots & b_{1j}^k & \dots & b_{1n}^k \\
 A_2 & b_{21}^k & b_{22}^k & \dots & b_{2j}^k & \dots & b_{2n}^k \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\
 A_i & b_{i1}^k & b_{i2}^k & \dots & b_{ij}^k & \dots & b_{in}^k \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\
 A_n & b_{n1}^k & b_{n2}^k & \dots & b_{nj}^k & \dots & b_{nn}^k \end{matrix} \right]
 \end{matrix} \quad (2.2)$$

Promocijas darbā daudzkritēriju analīze izmantota, lai novērtētu dažādus CSS attīstības scenārijus un atrastu vispiemērotāko pāreju uz 4. paaudzes sistēmu.

Lietojot *TOPSIS* metodi, noteikti vairāku siltumapgādes uzņēmumu efektivitātes rādītāji. Lietojot līmeņatzīmes metodi, visi uzņēmumi sadalīti grupās pēc to darbības efektivitātes vērtējuma (no ļoti zemas efektivitātes līdz augstas efektivitātes uzņēmumiem).

### 2.4. Sistēmdinamika

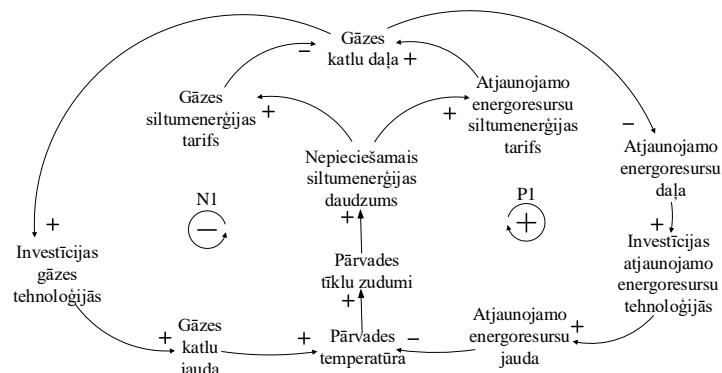
Centralizētā siltumapgādes sistēma ir kompleksa sistēma, kuras darbība promocijas darbā modelēta ar sistēmdinamikas modeļa palīdzību, izmantojot datorprogrammu *Powersim Studio 8*. Modeļa izstrādes process sastāv no 5 galvenajiem posmiem – problēmas identificēšanas un formulēšanas, dinamiskās hipotēzes izstrādes, modeļa veidošanas un formulēšanas, modeļa testēšanas un verificēšanas, kā arī politikas instrumentu ieviešanas un dažādu scenāriju testēšanas [19]. Promocijas darbā izveidots centralizētas siltumapgādes sistēmas modelis ne-ETS sektoram.

#### 2.4.1. Dinamiskā hipotēze un cēlonisko cilpu diagramma

Galvenā promocijas darba hipotēze nosaka, ka CSS sasniegs 4. paaudzes nosacījumus tuvākā vai tālākā nākotnē atkarībā no nozarē lietotās politikas.

Kā modeļa galvenie krājumi, tika izvēlētas tehnoloģiju uzstādītās jaudas, jo no to izmaiņām atkarīgs izmantotā resursa īpatsvars. Kā viens no krājumiem tiek ņemts dabasgāzes katlu jauda, kas šobrīd Latvijas centralizētajā siltumapgādē ir dominējošais kurināmais, bet papildus darbojas arī dažādu atjaunojamo resursu jaudas. Jaudas lieluma vērtību nosaka uzstādīšanas un nolietojšanās tempa izmaiņas. Tehnoloģijas konkurē savā starpā, un to, kura tehnoloģija tiks uzstādīta nolietotās jaudas vietā, nosaka ekonomiskais izdevīgums.

Sistēmas cēlonisko cilpu diagramma (2.2. att.) sastāv no vienas pozitīvas (P1) un vienas negatīvas (N1) cilpas. Pozitīvā cilpa raksturo gāzes tehnoloģiju nomaīņu ar atjaunojamo energoresursu tehnoloģijām, kamēr negatīvā cilpa cenšas bremsēt šo pāreju. Centrālais elements ir siltumenerģijas pārvades temperatūra, kas augsta gāzes tehnoloģiju īpatsvara gadījumā ir augstāka, bet, pārejot uz atjaunojamo resursu tehnoloģijām, balstoties uz 4. paaudzes CSS konceptu, pārvades temperatūra tiek samazināta, vienlaikus veicinot siltumenerģijas zudumu un siltumenerģijas patēriņa samazinājumu [20].



2.2. att. Modelētas 4. paaudzes CSS integrēšanas esošajā CSS cēlonisko cilpu diagramma (P1 – pastiprinošā cilpa, N1 – līdzsvarojošā cilpa).

Pāreju uz atjaunojamo resursu tehnoloģijām apraksta S veida pieauguma līkne, kuras gadījumā sākotnēji pozitīvās cilpas darbības rezultātā atjaunojamo energoresursu tehnoloģiju jaudas īpatsvars pieaug. Sākotnējais pieauguma temps ir lēns, jo pretī darbojas negatīvā cilpa, kas cenšas saglabāt gāzes tehnoloģiju jaudu pašreizējā līmenī, tomēr pozitīvā cilpa ir spēcīgāka, un seko eksponenciāls atjaunojamo energoresursu jaudas pieaugums. Tā kā negatīvā cilpa cenšas atgriezt sistēmu līdzsvarā, pozitīvās cilpas veicinātais pieaugums nevar turpināties bezgalīgi, un kādā brīdī negatīvās cilpas ietekmē atjaunojamo resursu jaudas pieaugums samazināsies, un sistēma sasniegs līdzsvara stāvokli.

#### 2.4.2. Sistēmdinamikas modeļa struktūra

Siltumenerģijas ražošanas iekārtu jaudas ir sistēmdinamikas modeļa galvenie krājumi. Modeļa izstrādē tiek izvēlēti dabasgāzes katli (GK) kā šobrīd dominējošais fosilais kurināmais, bet kā atjaunojamo resursu tehnoloģijas tiek ņemti jau šobrīd esošie biomasas katli (BK), kā arī šobrīd Latvijas centralizētajā siltumapgādē faktiski neeksistējošie, bet perspektīvie saules kolektori (SK) un siltumsūkņi (SS). To, kā šīs tehnoloģijas savstarpēji konkurē, apraksta 2.3. attēlā parādītā modeļa shēma.

Modelis tiek būvēts centralizētās siltumapgādes sistēmai ar 1,75 TWh saražoto siltumenerģijas apjomu, kas atbilst Latvijas katlu mājās saražotajam siltumenerģijas apjomam 2013. gadā. Lai nodrošinātu šādu siltumenerģijas daudzumu, nepieciešama 875 MW liela gāzes un biomasas tehnoloģiju jauda. Kurināmā sadalījums sistēmā tiek ņemts 80 % dabasgāzei, bet 20 % biomasai, kas atbilst Latvijas centralizētās siltumapgādes situācijai, un tas nozīmē, ka modeļa sākotnējās jaudas vērtības gāzes katliem ir 700 MW, bet biomasas katliem 175 MW. Ņemot vērā Latvijas centralizētās siltumapgādes pašreizējo situāciju, saules kolektori un siltumsūkņi sākotnēji nav uzstādīti.

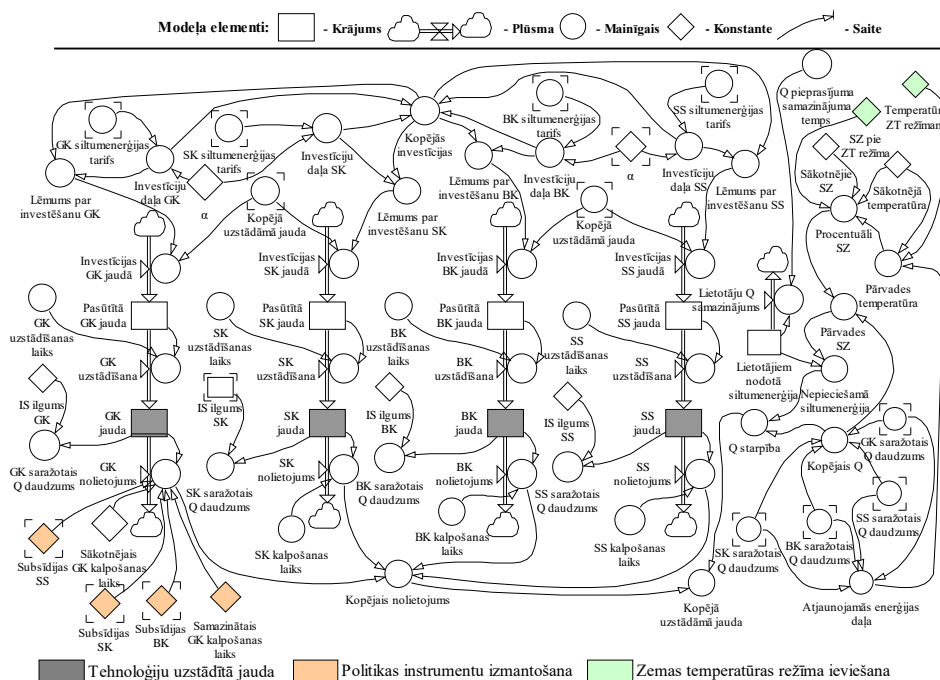
Katra no modelī iekļautajām tehnoloģijām tiek izveidota 2.3. attēlā parādītā shēma, kur centrālais krājums ir attiecīgās tehnoloģijas jauda. Krājuma vērtības izmaiņas regulē ieejošā un izejošā plūsma, un to var aprakstīt ar formulu [21]:

$$dN_i = N_{Ni}dt - N_{di}dt, \quad (2.3)$$

kur  $dN$  – tehnoloģijas jaudas izmaiņa, MW;  $N_N$  – tehnoloģiju uzstādītā jauda, MW gadā;  $N_d$  – tehnoloģiju nolietojums, MW gadā;  $dt$  – simulācijas solis;  $i$  – tehnoloģiju veids.

Tehnoloģiju nolietojums atkarīgs no tehnoloģijas kalpošanas laika ( $\tau_{sli}$ ).

$$N_{di} = \frac{N_{Ni}}{\tau_{sli}}. \quad (2.4)$$



2.3. att. Tehnoloģiju jaudu mainības modelis.

GK – gāzes katli; BK – biomasas katli; SK – saules kolektori; SS – siltumsūkņi; IS ilgums – izlīdzinātais siltumslodžu ilgums;  $Q$  – siltumenerģija; SZ – siltuma zudumi; ZT režīms – zemas temperatūras režīms.

Katrā simulācijas solī tiek noteikta siltuma jauda, ko nepieciešams uzstādīt un tiek uzstādīta tehnoloģija, kuras siltumenerģijas tarifs ir viszemākais.

Tarifa aprēķina modelis veidots, balstoties uz Latvijas sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisijas izstrādāto siltumenerģijas tarifa aprēķina metodiku [22]. Katrai no tehnoloģijām siltumenerģijas tarifs tiek aprēķināts individuāli. Siltumenerģijas tarifu veido 3 daļas – ražošanas tarifs, pārvades tarifs un realizācijas tarifs. Papildus kopējā tarifā pievienotas neērtību izmaksas  $R$  (EUR/MWh):

$$T_i = T_{\text{prod}i} + T_{\text{tr}i} + T_{3i} + R, \quad (2.5)$$

kur  $T_i$  – attiecīgās tehnoloģijas siltumenerģijas tarifs, EUR/MWh;  $T_{\text{prod}}$  – ražošanas tarifs, EUR/MWh;  $T_{\text{tr}}$  – pārvades tarifs, EUR/MWh;  $T_3$  – realizācijas tarifs, EUR/MWh;  $R$  – neērtību izmaksas, EUR/MWh,  $i$  – tehnoloģiju veids.

Neērtību izmaksas raksturo siltumenerģijas ražotāju tehniskās, ekonomiskās un citas papildu izmaksas, kas attur tos no jaunu atjaunojamo energoresursu tehnoloģisko risinājumu ieviešanas (Latvijā tie ir saules kolektori ar akumulāciju un siltumsūkņi). Izveidotais sistēmdinamikas modelis tika validēts, izmantojot struktūras un uzvedības testus.

### 2.4.3. Scenāriju izstrāde

Sistēmdinamikas modeļa siltuma pārvades daļai papildus tika pievienots zemas temperatūras režīms. Daudzperspektīvu attīstības scenāriju apraksts dots 2.2. tabulā.



		CSS daudzperspektīvu attīstības scenāriji									
		Subsīdijas			Riska komponente			Efektivitātes paaugstināšana			
		Bi <sup>1</sup>	SC <sup>1</sup>	HP <sup>1</sup>	Bi	SC	HP	Bi	SC	HP	
1	A <sup>2</sup>										
	B <sup>2</sup>	Bez politikas instrumentiem	0	0	0	0	0	0	0	0	
	C <sup>2</sup>										
2	A										
	B	Ar politikas instrumentiem	1	1	1	1	1	1	1	1	
	C										
3		Atbalsts siltumsūkņiem	0	0	1	0	0	1	0	0	1
4	D <sup>3</sup>		0	1	0	0	0	0	0	0	
	E <sup>3</sup>	Atbalsts saules tehnoloģijai									
5		Riska komponentes samazināšana saules tehnoloģijai	0	0	0	1	0	0	0	0	
6		Efektivitātes paaugstināšana saules tehnoloģijai	0	0	0	0	0	0	1	0	

Bi<sup>1</sup>, SC<sup>1</sup>, HP<sup>1</sup> – biomasas (Bi), saules kolektori (SC), siltumsūkņi (HP).

A<sup>2</sup>, B<sup>2</sup>, C<sup>2</sup> – temperatūras režīma nomaiņa pie 60 % (A), 80 % (B), 95 % (C) atjaunojamo resursu īpatsvara.

D<sup>3</sup>, E<sup>3</sup> – subsīdiju apjoms 15 % (D) un 25 % (E).

Modelis tika papildināts arī ar dažādiem politikas instrumentiem, lai veicinātu straujāku atjaunojamo tehnoloģiju ieviešanu centralizētajā siltumapgādē. Modelī iekļauti 3 dažādi politikas instrumenti. Viens no tiem ir subsīdijas, kas paredzētas atjaunojamo tehnoloģiju subsīdēšanai. Izmantojot šo politikas instrumentu, atjaunojamām tehnoloģijām tiek piešķirtas subsīdijas 25 % apjomā no investīciju izmaksām. Otrs politikas instruments ir riska samazināšanas instruments, kas paredzēts neērtību izmaksu komponentes samazināšanai. Politikas instruments paredzēts kā informatīva kampaņa par atjaunojamo tehnoloģiju pareizu izmantošanu, lai samazinātu riskus, kas saistīti ar informācijas un zināšanu trūkumu. Trešais politikas instruments ir efektivitātes paaugstināšanas instruments, kas iedarbojas uz atjaunojamo tehnoloģiju efektivitātes paaugstināšanu.

#### 2.4.4. Jūtības analīze

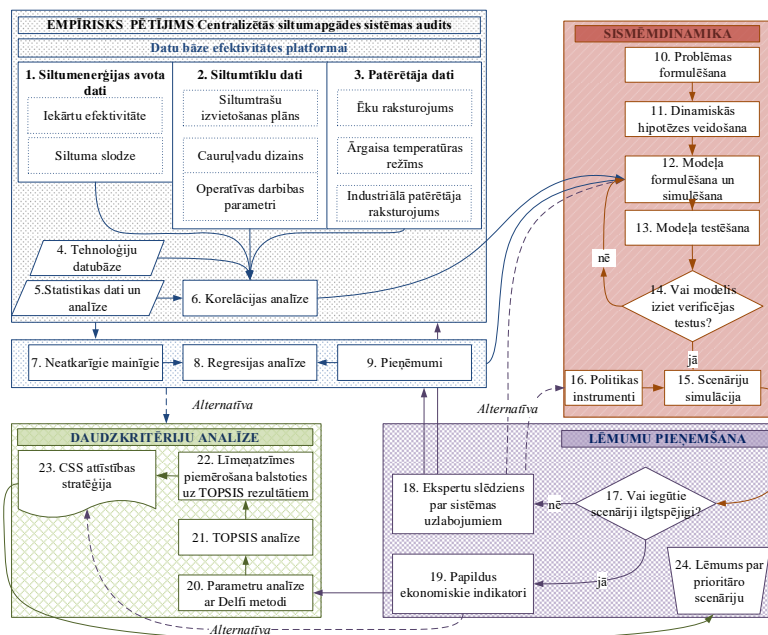
Promocijas darbā veikta jutības analīze, lai noteiktu, cik izveidotais modelis ir jutīgs pret dažādu ieejas parametru maiņu un kuriem mainīgiem ir vislielākā ietekme uz modeļa rezultātu. Lai padziļināti izpētītu, kurš no parametriem vairāk iespaido siltumapgādes tarifa izmaiņas, tika veikta jutības analīze diviem siltumapgādes sistēmas uzbūves stāvokļiem, mainot pēc kārtas vienu no ieejas parametriem: dabasgāzes cenu, biomasas cenu, saules kolektoru un siltumsūkņu tehnoloģiju izmaksas, elektroenerģijas cenu un siltuma zudumu izmaksas.

### 2.5. Lēmumu pieņemšana: daudzperspektīvu analīzes metodoloģija

Daudzperspektīvu analīzes metodoloģija apvieno un paplašina visas līdz šim promocijas darbā izmantotās metodes. Metodoloģija sastāv no četriem, savstarpēji saistītiem moduļiem: empīriskie pētījumi, sistēmdinamikas modelēšana, daudzkritēriju analīze un lēmumu pieņemšanas modulis ar scenāriju ekonomisko novērtējumu (2.4. att.).

Uzsākot attīstības scenāriju izveidi, nepieciešams iegūt izejas datus sistēmdinamikas modeļa uzbūvei (1., 2., 3., 4. un 5. modulis). Izejas dati tiek analizēti ar regresijas vienādojumu palīdzību (8. modulis). Izejas dati kopā ar izveidotiem regresijas vienādojumiem, ņemot vērā pieņēmumus (9.

modulis), veido sistēmdinamikas modeļa struktūru (12. modulis). Modelis tiek verificēts, pārbaudot modeļa struktūru un ievades parametrus (13. modulis) un salīdzinot modeļa ģenerētos rezultātus ar reāliem datiem no objekta (14. modulis).



2.4. att. Daudzperspektīvu analīzes konceptuālā shēma.

Promocijas darba hipotēze nosaka, ka 4. paaudzes CSS nosacījumus var sasniegt tuvākā un tālākā perspektīvā atkarībā no politikas instrumentiem, kas tiek pievienoti sistēmdinamikas modelim (16. modulis), kas ļauj izveidot vairākus attīstības scenārijus (15. modulis). Scenāriji parāda CSS attīstības cēloņsakarības, jo sistēmas elementiem ir nelineārs raksturs. Ja modelis ir neprecīzs un rezultāti ir neadekvāti, tad, uzlabojot modeli (12. modulis), tas tiek atkārtoti testēts. Pozitīvu rezultātu gadījumā lēmuma pieņēmējiem tiek nodoti izveidotie attīstības scenāriji. Lēmuma pieņēmēji vērtē scenāriju ilgtspējību (18. modulis) un negatīva rezultāta gadījumā lieto citus politikas instrumentus. Ja vērtējums ir pozitīvs, tad iespējamajam attīstības scenārijam papildus tiek aprēķināti ekonomiskie rādītāji – neto pašreizēja vērtība (NPV), iekšējā peļņas norma (IRR) (19. modulis) un citi rādītāji.

Nemot vērā, kā siltumapgādes sistēmu attīstības scenārijus raksturo vairāki tehnoloģiskie, ekonomiskie un vides indikatori, lai nenonāktu pretrunā, tos būtu jāanalīzē ar daudzkritēriju analīzes rīkiem, piemēram, ar *TOPSIS* metodi (21. modulis). Tas ļaus sarindot visus izveidotus attīstības scenārijus, nosakot to efektivitāti. Ar līmeņatzīmes metodes palīdzību iespējams noteikt scenārijus, kas nodrošinās ātrāku virzību uz 4. paaudzes CSS (22. modulis). Tādā gadījumā var tikt noteikts konkrēts CSS attīstības scenārijs un izveidota stratēģija 4. paaudzes sistēmas nosacījumu izpildei (22. un 23. modulis).

Piedāvātās metodoloģijas atgriezeniskā saite (17. modulis) ļauj koriģēt sākotnējos ievades datus, mainīt vai dažādot lietotos politikas instrumentus, balstoties uz spēkā esošajām direktīvām, finanšu ierobežojumiem vai citiem specifiskiem nosacījumiem.

Stratēģisku lēmumu pieņemšana šī promocijas darbā ietvaros cieši saistīta ar risinājumiem, kas ļauj pāriet no esošās siltumapgādes sistēmas uz 4. paaudzes sistēmu un paredz CSS tuvināšanu zema oglekļa sistēmām. Ilgtspējības mērķiem atbilstošie scenāriji saistīti ar dažādu atjaunojamās enerģijas tehnoloģiju ieviešanu, pāreju uz zemākiem temperatūras grafikiem pārvades tīklos, siltuma patēriņa samazināšanu pie gala lietotāja un optimālām izmaksām par piegādāto siltumenerģiju.

### 3. PĒTĪJUMA REZULTĀTI UN TO ANALĪZE

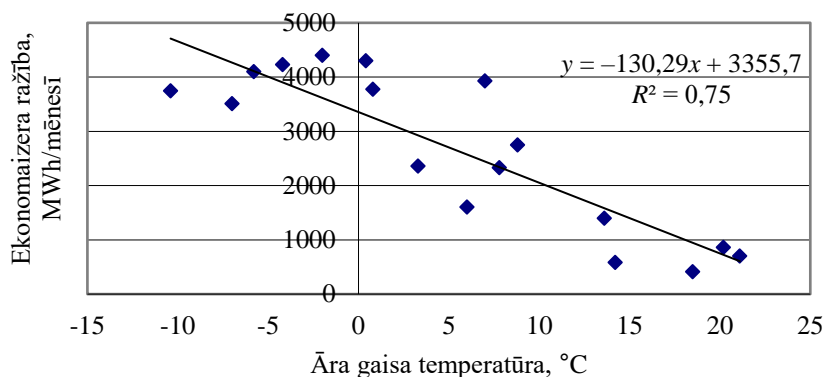
#### 3.1. Empīrisko pētījumu rezultāti

Empīrisko pētījumu rezultāti iegūti, izmantojot dažādas statistiskās analīzes metodes: siltumapgādes procesu raksturojošo indikatoru regresijas analīzi, laiku rindu prognozēšanas metodi un dekompozīcijas analīzi.

Turklāt korelācijas un regresijas analīzes rezultāti izmantoti kā ieejas dati sistēmdinamikas modeļa izveidei.

##### 3.1.1. Rūpnieciskā eksperimenta rezultāti

Kondensācijas ekonomaizers ir klasisks cauruļveida siltummainis, kas paredzēts siltuma pārvadei no karstā siltumnesēja (dūmgāzes) uz aukstāko (siltumtīkla ūdens). Ekonomizers uzstādīts *KVGM-100* katla dūmgāžu dūmvadā starp dūmsūcēju un dūmeni. Kā siltumnesējs ekonomizerā tiek izmantots atgaitas ūdens no siltumtīkliem.



3.1. att. Kondensācijas ekonomizera ražība atkarībā no āra gaisa temperatūras.

Apkopojot iegūtos datus, var redzēt, ka ekonomizera saražotais siltuma daudzums palielinājās, āra gaisa temperatūrai lineāri pazeminoties (3.1. att.). Sakarība izteikta lineārās regresijas vienādojumā veidā.

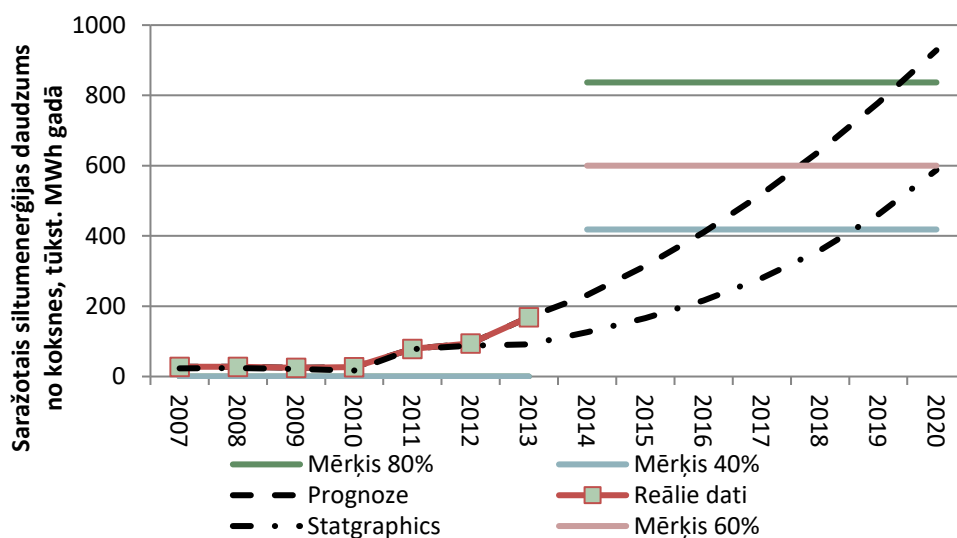
Visos gadījumos ir spēkā sakarība  $|t| > t_{tab}$ . Tas nozīmē, ka visi parametri ir būtiski un saglabājami vienādojumā. Veiktā analīze rāda, ka noteiktā  $R^2$  vērtība ir 0,75 un korelācijas koeficients ir 0,87. Korelācijas koeficienta vērtība liecina par ciešu sakarību starp ekonomizera saražoto siltuma daudzumu un āra gaisa temperatūru. Izveidotais modelis izskaidro 75,5 % no saražotā siltuma daudzuma analizējamā ekonomizerī. Lai ekonomizera darbs būtu efektīvāks, lineārai taisnei jāatrodas augstāk par izveidoto līkni, kas balstīta uz rūpnieciskā eksperimenta rezultātu datiem.

##### 3.1.2. Laika rindu prognozēšanas metodes rezultāti

Valstīm, kurām nav fosilā kurināmā krājumu, bet ir pieejami bagāti mežu resursi, biokurināmā izmantošana ir ilgtspējīgs risinājums siltumapgādes attīstībai. Ar laika rindu prognozēšanas modeli (*ARIMA* (0, 1, 1) × (2, 0, 1)) un regresijas analīzes palīdzību iegūtas divas iespējamās prognozēšanas līknes, kas raksturo tendences līdz 2020. gadam. Ar *ARIMA* modeli iegūtā līkne, kuras modelēšanā izmantoti ikmēneša dati, pieaug straujāk nekā ar regresijas analīzi iegūtā līkne. Modelēšanas rezultāti rāda, ka var iegūt ap 600 GWh siltumenerģijas aukstākajos mēnešos līdz 2020. gadam (3.2. att).

Atbilstoši abiem modeļiem fosilā kurināmā izmantošanas pilnīga izslēgšana ir iespējama līdz 2020. gadam, ja siltumenerģijas ražotāji uzstādīs ambiciozākus mērķus.

Pētījuma rezultāts rāda, ka tehnoloģiskie uzlabojumi, veicot siltuma avota rekonstrukciju ar pāreju uz atjaunojamu kurināmo, ļauj samazināt siltumenerģijas tarifu un uzlabot vides efektivitāti siltumapgādē, kas pakāpeniski ļauj pāriet uz 4. paaudzes CSS.

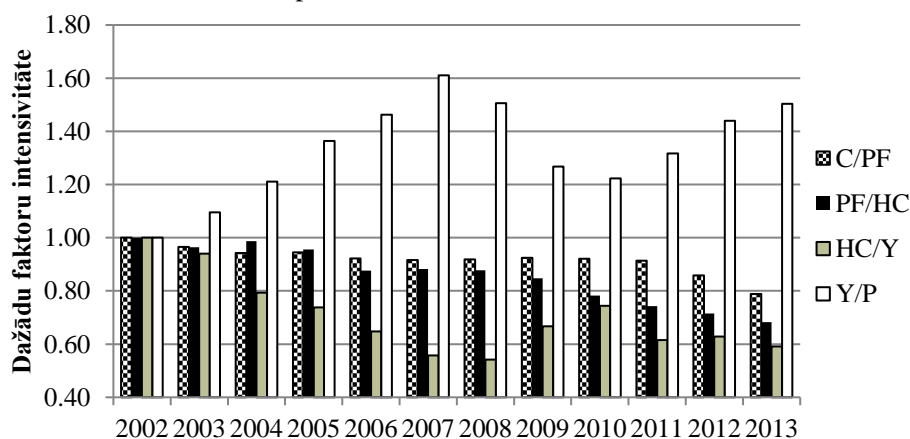


3.2. att. Prognozēšanas modeļu rezultātu salīdzinājums, izmantojot regresijas analīzi un ARIMA laika rindu prognozēšanas metodi.

### 3.1.3. Dekompozīcijas analīzes rezultāti

Ar *Kaya* vienādojuma palīdzību tika veikta oglekļa dioksīda emisiju izmaiņu izpēte centralizētā siltumapgādes sistēmā. Visi pētījumā iegūtie dati tika attiecināti uz perioda sākumu – 2002. gadu – ar mērķi salīdzināt *Kaya* vienādojuma komponentu dinamiku. Rezultāti, kas apkopoti 3.3. attēlā, ilustrē šo komponentu izmaiņu intensitāti.

Pēdējos gados fosilā kurināmā kopējais emisijas faktors Latvijas CSS ir samazinājies par 6 %, par ko liecina *Kaya* vienādojumā iekļautā emisijas faktora dinamika. Pateicoties tam, ka *Kaya* vienādojums papildināts ar energoefektivitātes komponenti (*PF/HC*), iespējams analizēt atjaunojamo energoresursu un siltuma ražošanas, pārvades un patēriņa efektivitātes ietekmi uz CO<sub>2</sub> emisijām. Pētījuma rezultāti rāda, ka pēdējos gados īpatnējā primāro energoresursu patēriņa intensitāte (*PF/HC*), kas ir apgriezts lielums energoefektivitātei, samazinās par 32 %.



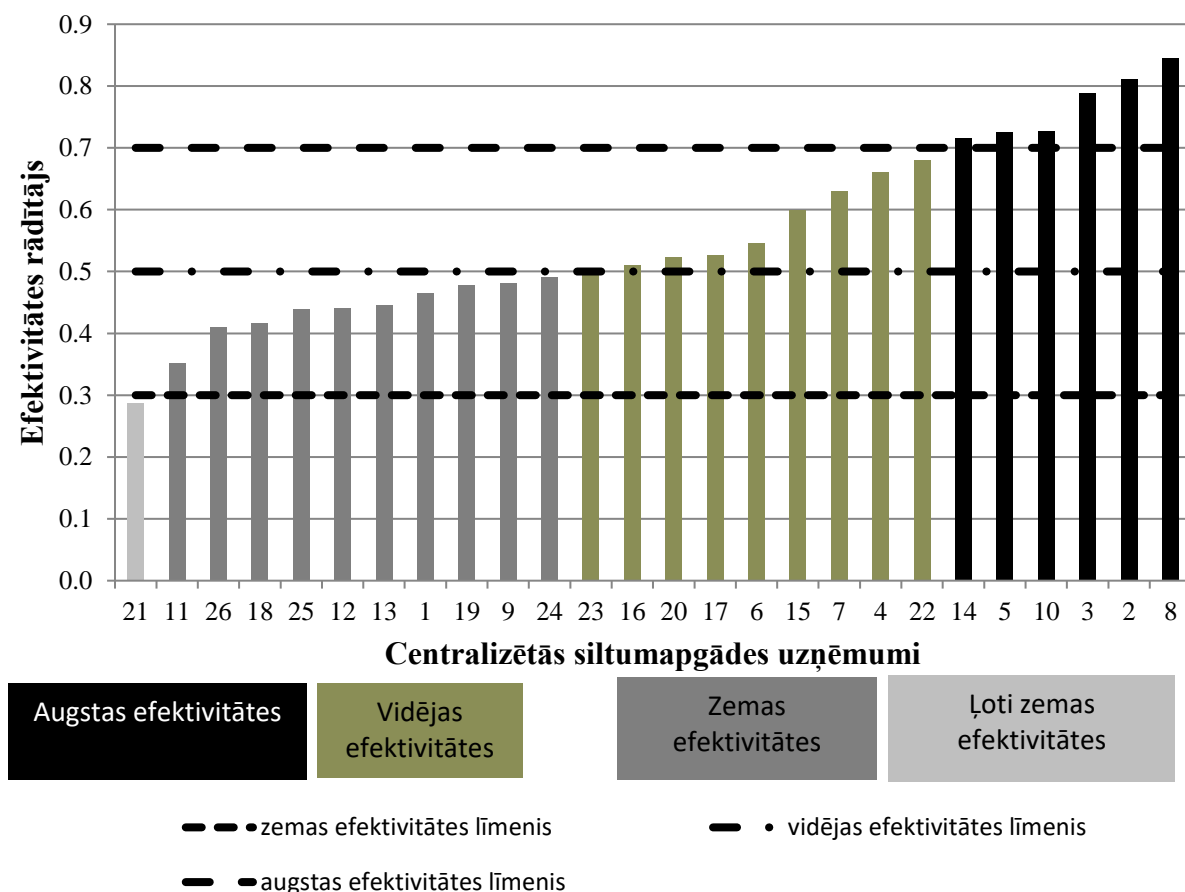
3.3. att. Dažādu faktoru intensitāte *Kaya* vienādojumā.

Pēdējos gados ir pieaugusi siltumenerģijas saražošana no atjaunojamiem enerģijas resursiem, un līdz ar to ir samazinājies primārā fosilā kurināmā patēriņš. Rezultāti liecina, ka atjaunojamo enerģijas resursu integrēšana siltumapgādē uzlabo sistēmas vides efektivitāti un ļauj pakāpeniski pāriet uz 4. paaudzes sistēmu.

### 3.2. Daudzkritēriju analīzes rezultāts

Ar *TOPSIS* metodes palīdzību siltumapgādes uzņēmumi tika sarindoti pēc principa – cik tālu tie atrodas no ideālā uzņēmuma. Analīzes procesā tika izvēlēti septiņi kritēriji, pēc kuriem salīdzināta Latvijas siltumapgādes uzņēmumu darbība, un katram uzņēmumam noteikts efektivitātes rādītājs.

Ar *TOPSIS* metodi noteiktais siltumapgādes uzņēmumu efektivitātes rādītājs potenciāli var būt robežās no 0 līdz 1. Noteiktā vidējā efektivitātes vērtība ir 0,557, un puse no uzņēmumiem atrodas virs šī vidējā līmeņa, bet otra puse zem tā. 3.4. attēlā izveidotas četras efektivitātes zonas. Visaugstākajā zonā (virš 0,7) atrodas seši siltumapgādes uzņēmumi. Veiktā analīze rāda, ka šie uzņēmumi pēdējos gados veikuši modernizāciju un spējuši saglabāt relatīvi zemu siltumenerģijas tarifu. Padziļināti izpētot šos uzņēmumus, konstatēts, ka par kurināmo tajos izmanto šķeldu, kas ļauj samazināt ražošanas izmaksas.



3.4. att. Centralizētās siltumapgādes uzņēmumu reitings.

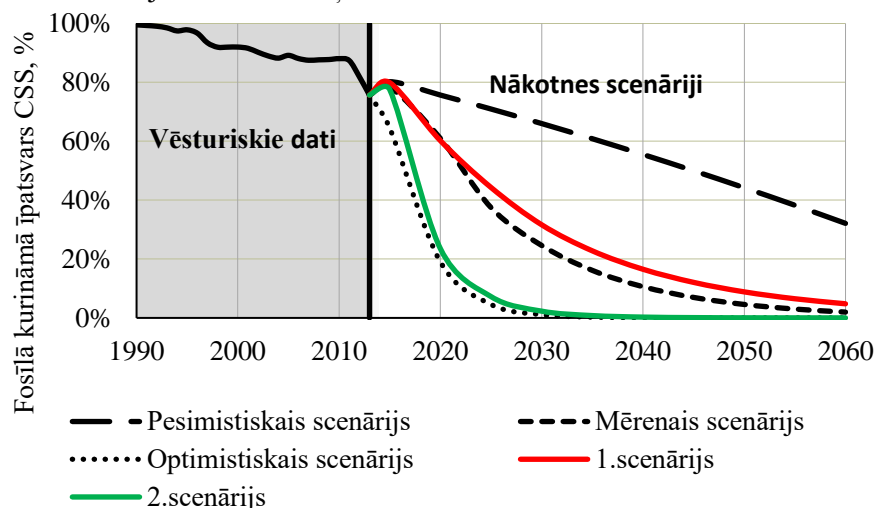
Nākamajā efektivitātes zonā atrodas vēl deviņi siltumapgādes uzņēmumi. Efektivitātes rādītājs šiem uzņēmumiem ir virs vidējā. Tas nozīmē, ka uzņēmumos veikta daļēja modernizācija un siltuma avotu vadītāji strādā pie efektivitātes jautājuma risināšanas.

Lielākā daļa jeb desmit siltumapgādes uzņēmumu atrodas efektivitātes robežā no 0,5 līdz 0,3, un diviem no tiem efektivitāte ir tuvu 0,4 līmenim. Šiem uzņēmumu vadītājiem, kā arī uzņēmumam, kura efektivitāte ir kritiska (0,2), jau tuvākajā laikā nepieciešams pievērsties energoefektivitātes problēmu risināšanai. Uzņēmumiem ar zemu efektivitāti būtu jāpārņem vērtīgā pieredze, kas ir sešiem labākajiem nozares pārstāvjiem. CSS uzņēmuma zems efektivitātes novērtējums pievērš siltumenerģijas ražotāja uzmanību nepieciešamībai veikt efektivitātes uzlabojumus, lai tuvinātu ražošanu zemu oglekļa emisiju sistēmai.

### 3.3. Sistēmdinamikas modelēšanas rezultāti

#### 3.3.1. Hipotētisko scenāriju salīdzinājums ar sistēmdinamikas modelēšanas rezultātiem

Galvenā promocijas darba hipotēze, kas attīstīta sistēmdinamikas modelī, nosaka, ka atkarībā no lietotās politikas siltumapgādes nozarē 4. paaudzes CSS nosacījumi tiks sasniegti tuvākā vai tālākā nākotnē. Lai varētu ieviest 4. paaudzes CSS, nepieciešams palielināt atjaunojamo resursu īpatsvaru, turklāt papildus biomasai būtu nepieciešams sistēmu papildināt arī ar citām tehnoloģijām, kā saules kolektoriem ar akumulāciju un siltumsūkņiem.



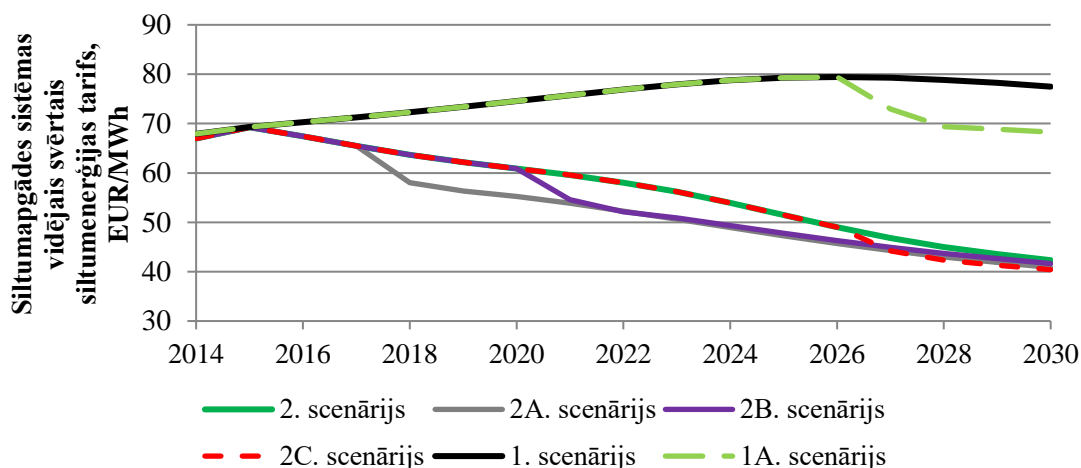
3.5. att. Hipotētisko scenāriju salīdzinājums ar iegūtajiem sistēmdinamikas modeļa rezultātiem. (1. scenārijs – bez politikas instrumenta atbalsta, 2. scenārijs – izmantojot visus politikas instrumentus visām alternatīvo enerģijas avotu tehnoloģijām).

Balstoties uz vēsturiskajiem datiem, tika izstrādāti trīs centralizētās siltumapgādes hipotētiskie scenāriji (3.5. att.), kas prognozē fosilo resursu aizstāšanas tempu ar atjaunojamiem resursiem. Pesimistiskais scenārijs paredz, ka fosilo resursu nomaiņa ar atjaunojamiem resursiem varētu notikt pēc vēsturisko datu vidējā izmaiņas tempa, bet optimistiskais scenārijs paredz, ka fosilo resursu īpatsvars varētu samazināties pēc vēsturisko datu pēdējos gados novērotā straujā izmaiņas tempa. Optimistiskā scenārija gadījumā attīstās situācija, ka politika ir pilnībā sakārtota, kas varētu veicināt gandrīz 100 % atjaunojamās enerģijas izmantošanu Latvijas centralizētajā siltumapgādē jau 2030. gadā, kamēr mērenā scenārija gadījumā tas varētu notikt tikai ap 2060. gadu. Pesimistiskais scenārijs apraksta situāciju, ka nomaiņa notiek bez īpaša politikas atbalsta, un augsta atjaunojamo resursu īpatsvara sasniegšana īstermiņā netiek plānota. Mērenais scenārijs ir balanss starp pesimistisko un optimistisko scenāriju.

Modelēšanas rezultāti rāda, ka mērenais hipotētiskais scenārijs realizēsies gadījumā, ja atjaunojamo energoresursu tehnoloģiju ieviešanai nav politikas instrumentu atbalsta (1. scenārijs). Bet gadījumā, kad tiek izmantoti visi politikas instrumenti (2. scenārijs), fosilo energoresursu nomaiņas temps atbilst optimistiskam attīstības scenārijam. CSS pāreju uz atjaunojamiem enerģijas avotiem galvenokārt ietekmē kurināmā cenas, tehnoloģiju izmaksas un elektroenerģijas cenas. Sistēmdinamikas modelī iekļautie pieņēmumi saistīti ar degvielas cenas pieaugumu un atjaunojamo energoresursu tehnoloģiju izmaksas samazinājumu. Pretēja gadījumā – attīstības scenārijs būs tuvāks pesimistiskajam scenārijam.

#### 3.3.2. Temperatūras režīma ietekmes analīze

Zemas temperatūras režīms pārvades tīklos ir svarīga 4. paaudzes CSS komponente. Pāreja uz zemas temperatūras siltumapgādes sistēmu sniedz papildu energoefektivitātes parametru uzlabojumus: kondensācijas ekonomāzera efektivitātes paaugstināšanu, papildu elektroenerģijas izstrādi koģenerācijā, emisijas samazinājumu u. c. [23]. Iekļaujot sistēmdinamikas modelī temperatūras režīmu maiņu (2.2. tab.), tika pētīti seši attīstības scenāriji, kas atspoguļo temperatūras pazemināšanu siltuma tīklos (1A., 1B., 1C., 2A., 2B. un 2C. scenārijs).



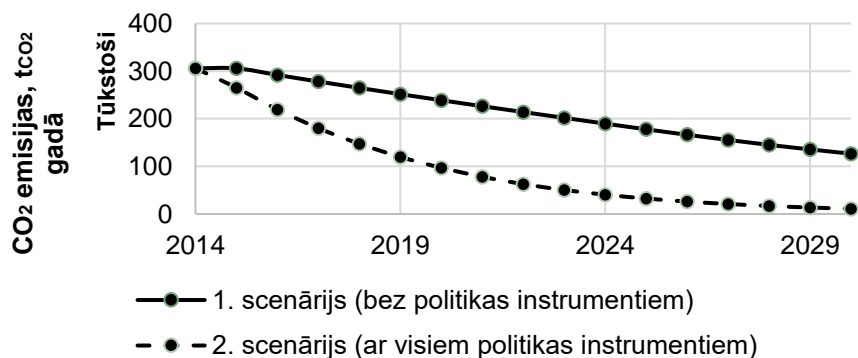
3.6. att. Siltumapgādes sistēmas vidējais svērtais siltumenerģijas tarifs pie dažādiem attīstības scenārijiem. 1. scenārijs: bez politikas instrumentu atbalsta. 2. scenārijs: izmantojot visus politikas instrumentus visām tehnoloģijām. 1A., 2A. scenārijā temperatūras režīma maiņa notiek pie 60 % atjaunojamās enerģijas īpatsvara. 1B., 2B. scenārijā – pie 80 % un 1C., 2C. scenārijā – pie 95 % atjaunojamās enerģijas īpatsvara.

Temperatūras režīma maiņa ietekmē siltumenerģijas tarifu visos scenārijos (3.6. att.). Bez politikas instrumentu atbalsta (1.scenārijs) siltumenerģijas tarifs sākumā pieaug, jo siltumapgādes sistēmas lielu daļu veido iekārtas, kas tiek darbinātas ar fosilo kurināmo. Pāreja uz zemas temperatūras režīmu notiek tikai 1A. scenārija gadījumā, un simulācijas perioda beigās sistēma maksimāli sasniedz 69,8 % atjaunojamo resursu robežu.

Gadījumā, kad tiek izmantoti visi politikas instrumenti, sistēma pāriet uz zemas temperatūras režīmu jau 2018. gadā (2A. scenārijs). Pārejot uz zemas temperatūras režīmu pie 60 % atjaunojamo resursu īpatsvara (2A. scenārijs), vērojams daudz ātrāks un straujāks siltumenerģijas tarifa samazinājums nekā tad, kad temperatūras režīma maiņa notiek, sasniedzot 80 % (2B. scenārijs) vai 95 % (2C. scenārijs) atjaunojamo resursu īpatsvaru. Tas skaidrojams ar faktu, ka gan politikas instrumenti, gan temperatūras režīms darbojas uz siltumapgādes sistēmas efektivitātes paaugstināšanu, bet, pateicoties politikas instrumenta veiktajai efektivitātes paaugstināšanai, temperatūras režīma maiņas ietekme vairs nav tik būtiska. Pāreja uz zemas temperatūras režīmu ir izdevīgāka patērētājiem, jo samazina siltuma tarifu nākotnē, bet kopumā pāreja uz 4. paaudzes sistēmu ļauj nodrošināt optimālu maksājumu par saņemto siltumenerģiju (balanss starp patērēto siltumenerģiju un tarifu).

### 3.3.3. CO<sub>2</sub> emisiju prognoze

4. paaudzes koncepcijas pamatā ir zema oglekļa siltumapgādes sistēmas. Ar sistēmdinamikas modeļa palīdzību iegūti CO<sub>2</sub> emisiju samazinājuma scenāriji: 1. scenārijs bez politikas instrumentu atbalsta; 2. scenārijs, kurā iedarbināti visi politikas instrumenti, ko izmanto visām tehnoloģijām CSS. Iegūtie rezultāti atspoguļoti 3.7. attēlā.



3.7. att. CO<sub>2</sub> emisiju daudzums pie dažādiem scenārijiem.

Tehnoloģijas nomaiņa modelī notiek pēc biznesa principiem – siltumenerģijas ražošanas tehnoloģija ar lētāko tarifu nomaina iepriekšējās. Sākuma periodā ar dabasgāzi darbināmas iekārtas tiek nomainītas uz iekārtām, kas tiek darbinātas ar koksnī. Bet no 2024. gada kopā ar dabasgāzes iekārtu uzstādītajām jaudām sāk samazināties arī ar biomasu kurināmas iekārtu jaudas. Un stabili vietu centralizēta siltumapgādē ieņem saules kolektori ar akumulāciju.

Līdz ar to CO<sub>2</sub> emisijas 1. scenārija gadījumā pakāpeniski samazinās par 58,6 % līdz 2030. gadam. Līdzīgs rezultāts sasniegts arī iepriekš veiktajā Romagnoli u. c. [21] pētījumā, kura ietvaros netika apskatīta pāreja uz 4. paaudzes sistēmu, bet tikai iespēja aizvietot dabasgāzi ar biomasas kurināmo.

### 3.3.4. Jūtības analīzes rezultāti

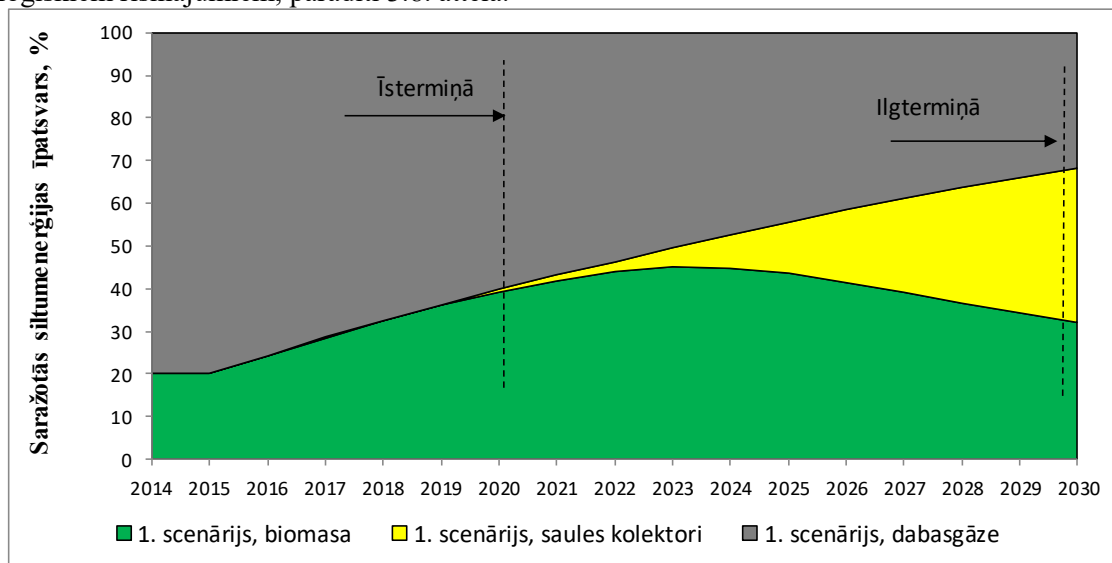
Sistēmdinamikas modeļa ietvaros CSS darbība aprakstīta ar vairākiem mainīgiem parametriem: kurināmā cenu, avotu jaudu, zudumiem tīklos, tehnoloģiju izmaksām, energoefektivitātes parametriem u. c. Lai izpētītu, kuri no parametriem vairāk ietekmē CSS pāreju uz 4. paaudzes sistēmu, veikta jutības analīze diviem siltumapgādes sistēmas uzbūves stāvokļiem: A stāvoklis, kad 80 % sastāda dabasgāze un 20 % biokurināmā tehnoloģijas; un B stāvoklis, kad tehnoloģiju sadalījums ir 25 % / 25 % / 25 % / 25 % (dabasgāze / biokurināmais / saules kolektori ar akumulāciju / siltumsūkņi). Jūtības analīzes rezultāts CSS sistēmai A stāvoklī rāda, ka dabasgāzes cena ir visjutīgākais parametrs, kura izmaiņas ( $\pm 30\%$ ) maina siltumenerģijas tarifu par  $\pm 18\%$ . Tas savukārt maina attīstības perspektīvas, palielinot dabasgāzes tehnoloģiju īpatsvaru līdz 49,7 % 2030. gadā.

CSS līdzsvara stāvoklī (B) siltuma tarifa jutīgumu pret ieejas parametru maiņu ( $\pm 30\%$ ) var iedalīt trīs grupās: jutīga, vidēji jutīga un elastīga. Sistēma ir visjutīgākā uz saules kolektoru cenu izmaiņām, vidēji jutīga uz siltuma zudumu izmaksām, dabasgāzes cenu, siltumsūkņa tehnoloģiju cenu un elektroenerģijas cenu izmaiņām un elastīga uz biomasas cenu, biomasas tehnoloģiju cenu un dabasgāzes tehnoloģiju cenu izmaiņām.

## 3.4. Daudzperspektīvu analīzes rezultāti

### 3.4.1. Centralizētas siltumapgādes sistēmas attīstības scenāriju analīze

Promocijas darbā izveidots CSS sistēmdinamikas modelis, kas nav ETS, un vairāki attīstības scenāriji. Daudzperspektīvu analīzes metodoloģija (2.4. att.) paredz izveidoto scenāriju vērtēšanu no ilgtspējības viedokļa īstermiņā un ilgtermiņā. Ilgtspējīgo scenāriju nosacījumi veido plānošanas uzdevumus dažādos līmeņos: valsts, pašvaldības vai CSS uzņēmuma līmenī. Tas ļaus sasniegt zema oglekļa CSS, kurā iekļauti atjaunojamie enerģijas avoti, zemas temperatūras sadales tīkli un zema enerģijas patēriņa ēkas. Turklāt CSS ir iekļauta kopējā viedajā energosistēmā. Pirmā iespējamā scenārija rezultāti, kura ietvaros situācija CSS attīstās bez papildu pasākumiem, kas atbalsta kādu no tehnoloģiskiem risinājumiem, parādīti 3.8. attēlā.

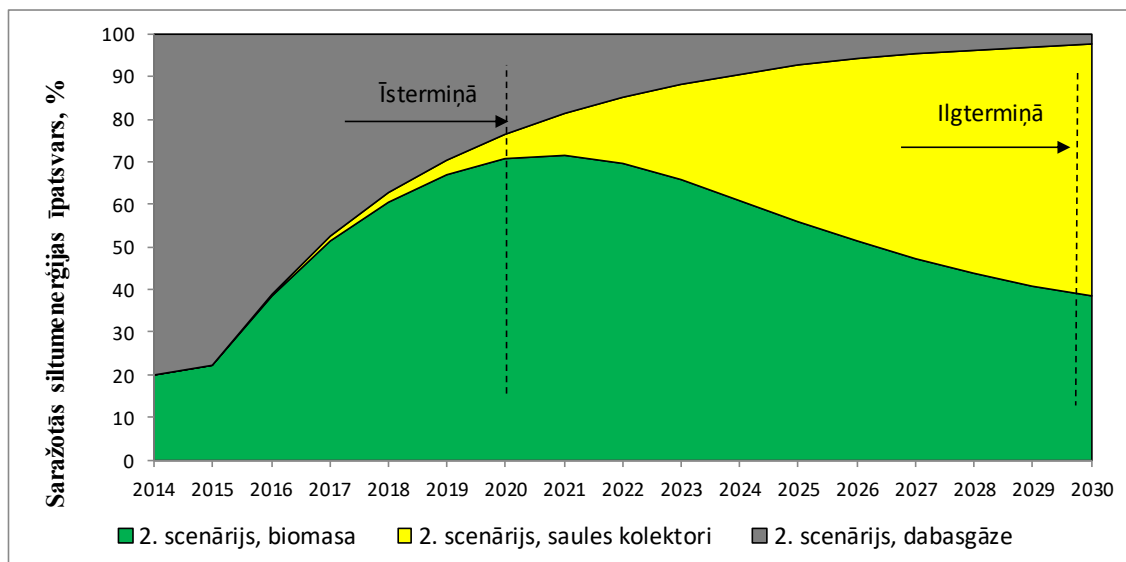


3.8. att. Saražotās siltumenerģijas īpatsvars (1. scenārijs bez politikas instrumenta atbalsta).



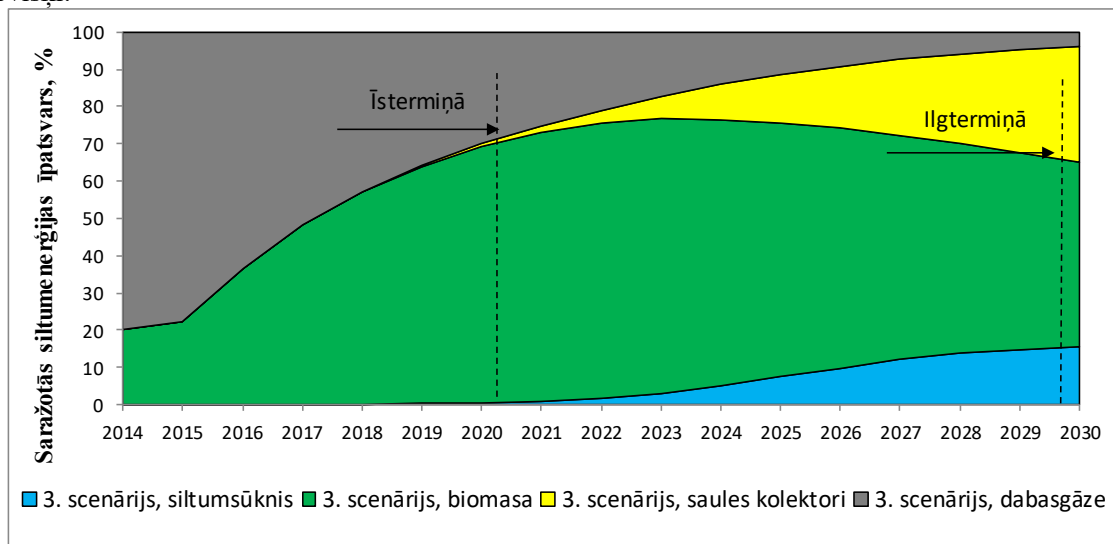
1. scenārija gadījumā perioda sākumā ar fosilā kurināmā palīdzību tiek ražots 80 % siltumenerģijas, bet perioda beigās tā daļa sarūk līdz 31,6 %. Perioda beigās saražotais siltumenerģijas apjoms trīs tehnoloģiskiem risinājumiem ir samērā vienāds: dabasgāze – 31,6 %, biomasa – 32,2 % un saules kolektori ar akumulāciju – 36,0 %. Atlikusī nelielā daļa siltumenerģijas tiek ražota ar ceturto sistēmdinamikas modelī integrēto tehnoloģisko risinājumu – siltumsūkņiem (0,2 %).

Politikas instrumentu ieviešana, neapšaubāmi, strauji paātrina atjaunojamo energoresursu integrēšanu CSS. Simulācijas perioda beigās (2030. gads) ar atjaunojamo energoresursu palīdzību var saražot 97,7 % siltumenerģijas (2. scenārijs 3.9. attēlā).



3.9. att. Saražotās siltumenerģijas īpatsvars (2. scenārijs – atbalsts ar visiem politikas instrumentiem).

Arī 2. scenārija gadījumā siltumenerģijas ražošana ar siltumsūkņu tehnoloģiju nav ekonomiski pamatota. Tāpēc, ja tas ir stratēģiski svarīgi, konkrēto tehnoloģisko risinājumu nepieciešams atbalstīt atsevišķi.



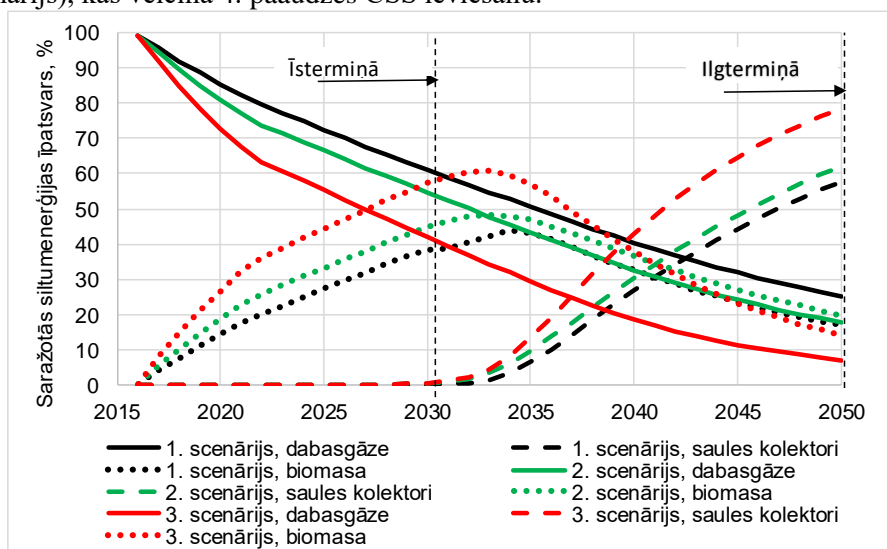
3.10. att. Saražotās siltumenerģijas īpatsvars (3. scenārijs – visi politikas instrumenti siltumsūkņa tehnoloģiju atbalstam).

Lietojot visus politiskos instrumentus siltumsūkņu tehnoloģisko risinājumu ieviešanai CSS, īpatnējais siltumenerģijas daudzums, kas tiek saražots, izmantojot šo tehnoloģiju, simulācijas perioda beigās pieaug līdz 15,4 % (3.10. att.). Tas izmaina arī proporciju starp citām atjaunojamo energoresursu tehnoloģijām (biomasa – 49,7 %, un saules kolektori ar akumulāciju – 31,0 % 2030. gadā).

Sistēmdinamikas modeļošana ļauj noteikt ekonomiskos rādītājus (investīcijas izmaksas, kurināmā un elektroenerģijas izmaksas, siltumenerģijas tarifs u. c.) dinamikā visiem attīstības scenārijiem un vērtēt tos atbilstoši daudzperspektīvu analīzes metodikai, lai noteiktu ilgtspējīgu scenāriju.

### 3.4.2. Ekonomiskas efektivitates noteikšana

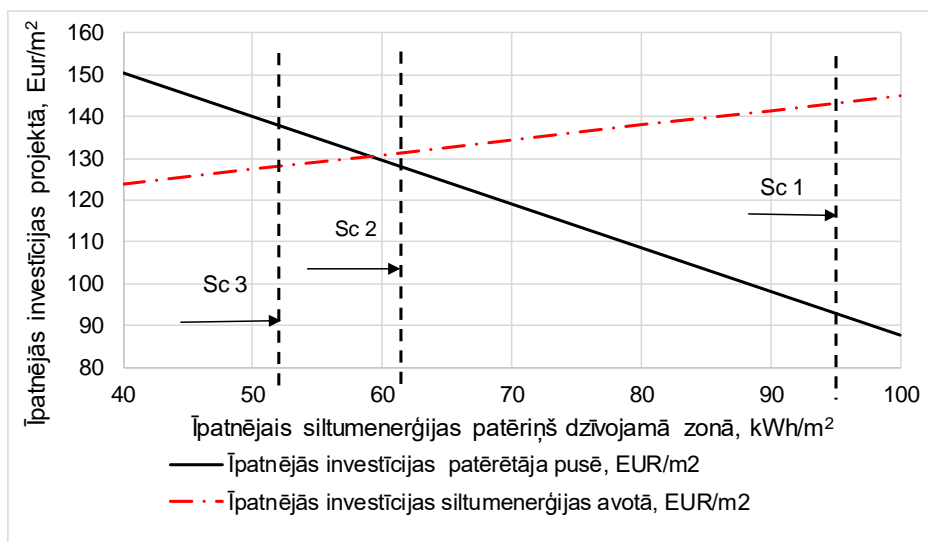
Saskaņotas modernizācijas pieeja ļauj izveidot CSS modeli pārejai no esošās uz 4. paaudzes sistēmu, paaugstinot energoefektivitāti visos CSS posmos – avotā, tīklos un pie galalietotāja. Sistēmdinamikas modelis tika adaptēts konkrētai CSS sistēmai ar 3,6 MW uzstādīto jaudu ar mērķi noteikt balansa stāvokli starp kapitālieguldījumiem, kas nepieciešami siltuma avotu rekonstrukcijai, un energoefektivitātes pasākumiem pie patērētājiem, pārejot uz 4. paaudzes CSS. Darbā izveidoti scenāriji ar energoefektivitātes līmeņa paaugstināšanu: 1. scenārijā energoefektivitāte pieaug par 22 % attiecībā pret bāzes scenāriju; 2. scenārijā – par 42 %; 3. scenārija – par 51 %. Visos scenārijos siltuma avota izmantoto tehnoloģiju klāsts atbilst ar sistēmdinamikas modelēšanu iegūtajam 2050. gada sadalījumam (3.11. att.). Saules kolektoru ar akumulāciju tehnoloģiju īpatsvars pieaug no 75 % (1. scenārijs) līdz 93 % (3. scenārijs), kas veicina 4. paaudzes CSS ieviešanu.



3.11. att. Saražotās siltumenerģijas īpatsvara dinamika pie dažādiem attīstības scenārijiem.

Pētījumā noteikti īpatnējie kapitālieguldījumi, kas nepieciešami siltumenerģijas avota rekonstrukcijai, veicot energoefektivitātes pasākumus pie patērētāja.

Savstarpēji saistītie īpatnējie kapitālieguldījumi parādīti 3.12. attēlā. Līnijas krustojas pie 60 kWh/m<sup>2</sup>, kas atbilst 2. scenārijam, ko var uzskatīt par optimālo CSS attīstības risinājumu.



3.12. att. Īpatnējās investīcijas patērētāja un siltumenerģijas ražotāja pusē.

Pamatojoties uz iepriekš minētajiem argumentiem, optimāls esošās CSS attīstības scenārijs saistīts ar energoefektivitātes pasākumiem, kas samazinās saražoto siltumenerģijas daudzumu par 42 % un nodrošinās pāreju uz 4. paaudzes CSS.

## SECINĀJUMI

1. Promocijas darbs piedāvā daudzperspektīvu analīzes metodoloģiju CSS attīstības scenāriju novērtēšanai ar mērķi pāriet uz 4. paaudzes CSS; piedāvātā metodoloģija apvieno empīriskos pētījumus, sistēmdinamikas modelēšanu, daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas ietvaru, ekonomisko analīzi un ilgtspējīgas politikas izpēti. Divas no šīm daļām – empīriskie pētījumi un daudzkritēriju lēmumu pieņemšana – ir statiskas. Trešā daļa ir dinamiska, jo tā pēta kompleksu sistēmu mainīgu uzvedību, identificējot un nosakot tās elementus un to savstarpējo mijiedarbību. Ekonomiskā analīze lēmumu pieņemšanas metodoloģijas sadaļā ļauj novērtēt attīstības scenāriju ekonomiskos rādītājus un prognozēt izvēlētajā scenārija attīstības dinamikas izmaksas. Izstrādātā metodoloģija iekļauj modeļus, kas balstīti uz apdomības un vienkāršības principiem, kur sarežģītāku modeļu izmantošanai jābūt pamatotai ar konkrētiem modeļa mērķiem, kā arī vēlamu ieskatu, ko modelim būtu jāsniedz. Promocijas darbs parāda, ka paradigmas maiņa (4. paaudzes CSS), kuru raksturo zemas temperatūras siltumenerģijas avoti, zemas temperatūras pārvades tīkli un zema patēriņa ēkas kopējā viedās enerģijas sistēmā, rada jaunus izaicinājumus visām iesaistītajām pusēm (CSS uzņēmumiem, patērētājiem, nekustamo īpašumu attīstītājiem, politikas izstrādātājiem un citām ieinteresētajām pusēm). Tas nozīmē, ka visus CSS posmus jāpēta vienoti.
2. Šajā promocijas darbā tika izvērtēti un analizēti tehnoloģiskie, sociālekonomiskie un vides indikatori, kuru uzlabošana ļautu pakāpeniski pāriet uz 4. paaudzes CSS. Lietoto metodoloģiju sarežģītības pakāpe attīstījās pakāpeniski, lai pielāgotos arvien sarežģītākiem pētniecības jautājumiem, kas radās pētījuma laikā.
3. Empīrisko pētījumu rezultāti promocijas darbā tiek sniegti, izmantojot dažādas statistiskās analīzes metodoloģijas: regresijas analīzi, laika rindu prognozēšanas metodi un dekompozīcijas analīzi pašvaldību un valsts mērogā. Promocijas darbā tika analizēta šķeldas izmantošanas iespējamība Latvijas galvaspilsētā – Rīgā. Rezultāti rāda, ka kopējās novērstās CO<sub>2</sub> emisijas līdz 2020. gadam varētu sasniegt līdz pat 80 %. CO<sub>2</sub> emisiju pētījumam Latvijas CSS tika izmantota dekompozīcijas analīzes metode ar *Kaya* vienādojumu. Optimistiskā scenārija gadījumā CO<sub>2</sub> emisijas līdz 2020. gadam, salīdzinot ar 2012. gadu, varētu samazināties par 29 %. Siltumavotu tehnoloģiskos uzlabojumus būtu iespējams nodrošināt ar atjaunojamo enerģijas tehnoloģiju ieviešanas palīdzību. Tas sniegtu ekonomiskus ieguvumus, samazinot siltumenerģijas tarifu, kā arī uzlabotu CSS vides rādītājus. Bet kopumā tas ļautu pakāpeniski virzīties uz 4. paaudzes CSS ieviešanu. Diemžēl pētījumi, kas apskata tehnoloģiskus, ekonomiskus, sociālekonomiskus un vides indikatoru uzlabojumus dažādos CSS posmos, neļauj identificēt visas sistēmas attīstības virzienus, kam būtu jāpievēršas, lai virzītos uz 4. paaudzes CSS ieviešanu. Līdz ar to pētījumā nepieciešamas izmantot komplicētākas metodes: daudzkritēriju analīzi, sistēmdinamikas metodi un, visbeidzot, daudzperspektīvu analīzi.
4. Promocijas darbā CSS tika analizēta, izmantojot daudzkritēriju analīzi. Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas platforma sniedz iespēju nodrošināt visaptverošu metodoloģiju ar mērķi izvērtēt un noteikt vispiemērotāko risinājumu, ļaujot lēmuma pieņēmējiem, CSS uzņēmumiem un nekustamo īpašumu attīstītājiem sarindot visus attīstības scenārijus vai arī sarindot CSS uzņēmumu darbības rādītājus. Iegūtie daudzkritēriju analīzes rezultāti rāda, ka vispiemērotākais CSS temperatūras režīms standarta ēkām un Baltijas valstu klimatiskajiem apstākļiem ir 90/60 C. Tomēr energoefektīvām ēkām ekonomiski pamatotākais scenārijs būtu 60/30 C. Daudzkritēriju analīzes rezultāti apstiprina, ka scenārijs, kas no CSS uzņēmumu skatpunkta ir vistuvāk ideālajam risinājumam, ievērojami atšķiras no scenārija, ko par labāko uzskata attīstītāji. Starpība, kas vērojama scenāriju novērtējumā, norāda, ka ēku attīstītājiem ir nepieciešama papildu motivācija, lai ēkas pielāgotu zemas temperatūras režīmam. To iespējams izdarīt, ieviešot valdības atbalsta pasākumus (dotācijas, nodokļu atvieglojumi u. c.) ēku attīstītājiem, kas ļautu pārslēgties uz zemas temperatūras režīmu. Daudzkritēriju analīzes izmantošanai CSS pētīšanā ir viens būtisks trūkums – tā ir statiska. Attīstītā metodoloģija iekļauj modeļus. Turklāt CSS gadījumā modelim vajadzētu būt dinamiskam.
5. Sistēmdinamikas modelis tika izstrādāts Latvijas CSS, un tas parāda, kā 4. paaudzes CSS var tikt sasniegta jau ļoti tuvā nākotnē atkarībā no lietotajiem politikas instrumentiem, izmantojot daudzperspektīvu scenārijus. Vērā tika ņemtas 4. paaudzes CSS koncepcijas: zemas temperatūras siltumavoti (atjaunojamās enerģijas avoti), zemas temperatūras pārvades tīkli, kā arī gala lietotāju siltumenerģijas patēriņa samazinājums. Pāreja uz 4. paaudzes CSS un tehnoloģiju nomaina balstīta uz ekonomiskā izdevīguma principiem. Optimistiskā scenārija gadījumā (4.paaudzes CSS nosacījumi tiktu sasniegti Latvijā līdz 2020. gadam) hipotēze neapstiprinājās, bet pesimistiskā

scenārija gadījumā (4.paaudzes CSS nosacījumi tiktu sasniegti Latvijā līdz 2030. gadam) hipotēze tika pierādīta. Balstoties uz pašreizējiem attīstības tempiem un ņemot vērā prognozēto kurināmā un tehnoloģiju izmaksu dinamiku, simulācijas perioda beigās – 2030. gadā (ilgtermiņa perspektīva) – atjaunojamo enerģijas avotu īpatsvars sasniedza 68,4 %, tādējādi ļaujot sasniegt 4. paaudzes CSS nosacījumus. Līdz 2024. gadam (īstermiņa perspektīva) tiek prognozēts galvenokārt biomasas tehnoloģiju īpatsvara pieaugums, bet pēc 2024. gada atjaunojamās enerģijas daļa tiek papildināta ar saules kolektoriem ar sezonālo akumulāciju. Rezultāti rāda, ka bāzes scenārija gadījumā līdz 2024. gadam CSS attīstība nav ilgtspējīga, līdz ar to lēmumu pieņemšanai nepieciešams ieviest daudzperspektīvu politikas instrumentus.

6. Lai sekmētu pāreju uz atjaunojamo enerģiju, sistēmdinamikas modelī tika iekļauti politikas instrumenti: subsīdijas, riska samazināšanas instruments, kā arī efektivitātes paaugstināšanas instruments. Lietojot visus politikas instrumentus, simulācijas perioda beigās (ilgtermiņa perspektīvā) 97,7 % siltumenerģijas tiek saražots ar atjaunojamiem resursiem (2. scenārijs). Šajā scenārijā 4. paaudzes CSS nosacījumi jau gandrīz tiek sasniegti īstermiņa perspektīvā.

Sistēmdinamikas modelī tika iekļauta pāreja uz zemas temperatūras režīmu (60/30) pie dažādas atjaunojamās enerģijas daļas (60 %, 80 %, 95 %). Izmaiņas temperatūras režīmā paaugstina atjaunojamās enerģijas tehnoloģiju efektivitāti, bet nemaina atjaunojamās enerģijas īpatsvaru kopējā sistēmā.

Atjaunojamās enerģijas izmantošanai CSS pastāv vairāki šķēršļi – relatīvi augstas tehnoloģiju kapitālizmaksas, pieredzes trūkums tehnoloģiju uzstādīšanā, darbināšanā un uzturēšanā, kā arī informācijas trūkums. Tādējādi, paplašinot atjaunojamās enerģijas tehnoloģiju izmantošanu, šie šķēršļi samazinās. Tomēr, pat ņemot vērā politikas instrumentu izmantošanu (2. scenārijs), siltumenerģijas ražošana ar siltumsūkņiem nav ekonomiski izdevīga. Turklāt promocijas darbs rāda, ka galvenā barjera ir pēdējos gados katlu māju rekonstrukciju rezultātā uzstādītie jaunie gāzes katli. Lai mainītu atjaunojamās enerģijas un fosilās enerģijas attiecību CSS un tuvinātu sistēmu 4. paaudzes CSS, būtu nepieciešams pieņemt papildu lēmumu par gāzes sadedzināšanas tehnoloģiju kalpošanas laika samazināšanu.

Turklāt ar modeļa palīdzību iegūtie jutības analīzes rezultāti rāda, ka dabasgāzes cena ir visjutīgākais parametrs, kam seko gāzes katlu tehnoloģiju cena, biomasas cena, elektroenerģijas cena, biomasas tehnoloģiju cena. Bāzes scenārijs (1. scenārijs) paredz, ka 2030. gadā gāzes tehnoloģiju saražotās enerģijas īpatsvars būs 31,6 %, bet atjaunojamās enerģijas – 68,4 %. Jutības analīze liecina, ka dabasgāzes cenas krituma (–25 %) gadījumā ar dabasgāzi saražotās enerģijas daļa var pieaugt līdz 49,7 %, bet cenas pieauguma (+25 %) gadījumā samazināties līdz 29,7 %. Šos rezultātus būtu jāņem vērā, izstrādājot CSS attīstības politiku.

Izstrādātajam modelim ir būtisks praktisks potenciāls kļūt par nozīmīgu palīgu politikas veidotājiem, lai novērtētu politikas instrumentus un veiktu stratēģiskas darbības 4. paaudzes CSS ieviešanai.

7. Promocijas darba ietvaros tika veikta ekonomiskās efektivitātes analīze pārejai no tradicionālās CSS uz 4. paaudzes CSS. Analīzē tika iekļauti energoefektivitātes pasākumi ar dažādiem efektivitātes līmeņiem. Pētījumā tika izvērtēti dažādi energoefektivitātes pasākumi un salīdzinātas īpatnējo investīciju izmaksas visiem scenārijiem, balstoties uz to siltumenerģijas ietaupījumu. Optimālais risinājums tiek sasniegts pie 60 kWh/m<sup>2</sup> īpatnējā siltumenerģijas patēriņa, kas tiek raksturots ar zemākajām īpatnējām investīciju izmaksām abos siltumapgādes posmos: siltuma avotā un pie galalietotājā.

Izstrādātā energoefektivitātes platforma var tikt izmantota arī citām CSS ar nosacījumu, ka tiek pievienoti atbilstoši sākotnējie ievades dati. Piedāvātā metodoloģija ļauj izvērtēt iespējamus variantus, kā pārslēgties no pašreizējās CSS uz 4. paaudzes CSS, saglabājot CSS konkurētspēju.

8. CSS daudzperspektīvu analīzes rezultāti rāda, ka lēmuma pieņēmējiem jākoncentrē uzmanība uz stratēģiskām darbībām – valdības regulējumiem, piemēram, nodokļiem, subsīdijām, izmaiņām enerģijas cenās utt., balstoties uz prioritāro scenāriju. Politikas instrumentu ieviešana enerģijas sistēmu plānošanā ļautu ieviest 4. paaudzes CSS. Lai noteiktu optimālo CSS dizainu, papildus tika rēķināta neto pašreizēja vērtība, iekšējā peļņas norma un citi ekonomikas rādītāji. Optimālākais risinājums CSS attīstībai, lai virzītos uz 4. paaudzes CSS, nosaka, ka labākajam dizainam jāsamazina CSS izmaksas un, kas ir ļoti svarīgi, jānodrošina optimāla siltumenerģijas cena galalietotājiem. Makroekonomikas novērtējuma scenāriji šajā promocijas darbā netiek pētīti, taču tas var būt temats turpmākajiem pētījumiem.

Balstoties uz direktīvu prasībām, finansiālajiem ierobežojumiem un citiem svarīgiem lēmuma pieņemšanas faktoriem, sākotnējie ievades dati, izstrādātais modelis un politikas instrumenti var tikt pielāgoti kompromisa sasniegšanai.

Piedāvātā platforma ļauj izvērtēt dažādus CSS attīstības scenārijus no visu iesaistīto pušu skatpunkta – CSS uzņēmumu, nekustamā īpašuma attīstītāju, galalietotāju, politikas veidotāju utt. Dažādām iesaistītajām pusēm būs atšķirīgas prioritātes, bet gala lēmumu, balstoties uz daudzperspektīvu metodoloģiju, būtu jāpieņem ar domu par CSS virzīšanu uz 4. paaudzes CSS.

Lai gan modelis tika izstrādāts, balstoties uz tehnoloģiju aizstāšanas procesu, Latvijas situācijai, izstrādātā daudzperspektīvu platforma var tikt lietota arī citām CSS. Turpmākajos pētījumos būtu nepieciešams papildināt sistēmdinamikas modeli ar CSS galalietotāju uzvedības rādītājiem.

## LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] European Commission, An EU Strategy on Heating and Cooling, *Communication From The Commission To The European Parliament, The Council, The European Economic And Social Committee And The Committee Of The Regions*, Com(2016) 51 final. *European Commission*, Brussels 2016; 1–13.
- [2] European Commission, Directive 2012/27/Eu Of The European Parliament And Of The Council, Com (2012), *European Commission*, Brussels. 25.10.2012, 2012.
- [3] European Commission, EUROPE 2020. A Strategy for Smart, Sustainable and Inclusive Growth, Brussels, *European Commission*, Brussels 2010.
- [4] H. Lund, S. Werner, R. Wiltshire, S. Svendsen, J. Thorsen, F. Hvelplund un M. B.V, 4th Generation District Heating (4GDH) Integrating Smart Thermal Grids Into Future Sustainable Energy Dystems. *Energy 2014*; 68: 1–11.
- [5] T. S. Kuhn, The Structure of Scientific Revolution, Chicago: *University of Chicago Press*, 3rd edition, 1996.
- [6] Y.-J. Wei, Y.-M. Zhang, An overview of current research on EU ETS: Evidence From Its Operating Mechanism and Economic Effect, *Applied Energy* 2010; 87: 1804–1814.
- [7] K. Sperling, B. Möller, End-Use Energy Savings and District Heating Expansion in a Local Renewable Energy System – A Short-Term Perspective, *Applied Energy* 2012; 92: 831–842.
- [8] P. Østergaard, B. Mathiesen, B. Möller un H. Lund, A Renewable Energy Scenario for Aalborg Municipality Based on Low-Temperature Geothermal Heat, Wind Power and Biomass., *Energy* 2010; 35: 4892–4901.
- [9] E. Zvingilaite un O. Balyk, Heat Saving in Building in a 100% Renewable Heat and Power System in Denmark With Different Share of District Heating, *Energy and Buildings* 2014; 82: 173–186.
- [10] A. Dedinec, V. Taseska-Gjorgievska, N. Markovska, T. Obradovic Grncarovska un N. Duic, Towards Post-2020 Climate Change Regime: Analyses of Various Mitigation Scenarios and Contributions for Macedonia, *Energy* 2016; 94: 124–137.
- [11] T. Bruckner, R. Morrison un W. T, Public Policy Modeling of Distributed Energy Technologies: Strategies, Attributes, and Challenges, *Ecological Economics* 2005;54 (2–3): 328–345.
- [12] L. Wainfan, Multi-Perspective Strategic Decision Making. Principles, Methods, and Tools. PhD Thesis, Pardee RAND Graduate Schoole, 2010.
- [13] H. Williams, Model Building in Mathematical Programming, GB: Wiley, 2013. Y. Kaya, Impact of Carbon Dioxide Emissions Control on GNP Growth: Interpretation of Proposed Scenarios, The IPCC Energy and Industry Subgroup, Responce Strategies Working Group, Paris, 1990
- [14] T. O'Machony, Decomposition of Ireland's Carbon Emission From 1990 to 2010: An Extended Kaya Identity, *Energy Policy* 2013; 59: 573–581.
- [15] E. Vigants, D. Blumberga un I. Veidenbergs, Climate Technology in a Wood Chips Boiler House, *Environmental and climate technologies* 2011; 13(6): 127–131.

- [16] D. Blumberga, E. Vigants, I. Veidenbergs, G. Vigants un V. Vitolons, Eco-Intensity Analysis for a Chip-Fuelled Boiler House, *Journal of Environmental Engineering & Landscape Management* 2012; 20(4): 249–255.
- [17] J. Wang, Y. Jing, C. Zhang un J. Zhao, Review on Multi-Criteria Decision Analysis Aid in Sustainable Energy Decisionmaking, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2009; 13(9): 2263–2278.
- [18] C. Hwang un K. Yoon, Multiple Attribute Decision Making – Method and Applications, Berlin: Springer-Verlag, 1981.
- [19] A. Blumberga, D. Blumberga, G. Bažbauers, P. Davidsen, E. Moxnes un I. Dzene, System Dynamics for Environmental Engineering Students, Riga: Riga Technical university, 2011.
- [20] A. Dalla Rosa, H. Li, S. Svendsen, S. Werner, U. Persson, K. Ruehling un C. Felsman, Toward 4th Generation District Heating: Experience and Potential of Low-Temperature District Heating, International Energy Agency, Germany, 2014.
- [21] F. Romagnoli, A. Barisa, I. Dzene, A. Blumberga un D. Blumberga, Implementation in Different Policy Strategy Promotion the Use of Wood Fuel in Latvian District Heating System: Impact Evaluation Throught a System Dynamic Model, *Energy* 2014; 76: 210–222.
- [22] Methodology for Calculation of Heat Supply Tariff, 2010. Available: <http://likumi.lv/doc.php?id=208283>.
- [23] A. Dalla Rosa, H. Li, S. Svendsen, S. Werner, U. Persson, K. Ruehlig, C. Felsmann, M. Crane, R. Burzynski un C. Bevilacqua, Final report. Toward 4th Generation District Heating: Experience and Potential of Low-Temperature District Heating, International Energy Agency, 2014.