



RĪGAS TEHNISKĀ  
UNIVERSITĀTE

Ieva Pakere

## SAULES ENERĢIJAS IZMANTOŠANA ZEMAS TEMPERATŪRAS CENTRALIZĒTAJĀ SILTUMAPGĀDĒ

Promocijas darba kopsavilkums



**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**  
Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultāte  
Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

**Ieva Pakere**

Doktora studiju programmas “Vides zinātne” doktorante

**SAULES ENERĢIJAS IZMANTOŠANA ZEMAS  
TEMPERATŪRAS CENTRALIZĒTAJĀ  
SILTUMAPGĀDĒ**

**Promocijas darba kopsavilkums**

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

RTU Izdevniecība  
Rīga 2020

Pakere, I. Saules enerģijas izmantošana zemas temperatūras centralizētajā siltumapgādē. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU, 2020. 36 lpp.

Iespiests saskaņā ar Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūta 2020. gada 2. marta lēmumu, protokols Nr. 112.

Darbs izstrādāts saistībā ar šādiem projektiem:

- Eiropas Sociāla fonda projekts “Rīgas Tehniskās universitātes akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās”, Nr. 8.2.2.0/18/A/017;
- valsts pētījumu programmas projekts “Latvijas siltumapgādes un dzesēšanas sistēmu attīstība”, Nr. VPP-EM-EE-2018/1-0002;
- *EU INTERREG* Baltijas jūras reģiona programmas projekts “*Low Temperature District Heating for the Baltic Sea Region*” (*LowTEMP*), Nr. #R063.

NACIONĀLAIS  
ATTĪSTĪBAS  
PLĀNS 2020



EIROPAS SAVIENĪBA  
Eiropas Sociālais  
fonds

IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

ISBN 978-9934-22-443-0 (print)

ISBN 978-9934-22-444-7 (pdf)

# PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora grāda (*Ph. D.*) iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2020. gada 8. jūnijā plkst. 10.00 Rīgas Tehniskās universitātes Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultātē, Āzenes ielā 12 k-1, 115. auditorijā.

## OFICIĀLIE RECENZENTI

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

Pētnieks *Dr. sc. ing.* Vladimirs Kirsanovs,  
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Profesors *Dr. ing.* Stefan Holler,  
*HAWK* lietišķo zinātņu un mākslas universitāte, Vācija (Getingene)

## APSTIPRINĀJUMS

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

Ieva Pakere ..... (paraksts)

Datums .....

Promocijas darbs ir izstrādāts angļu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 59 attēli, 19 tabulu, kopā 165 lappuses. Literatūras sarakstā ir 123 nosaukumu.

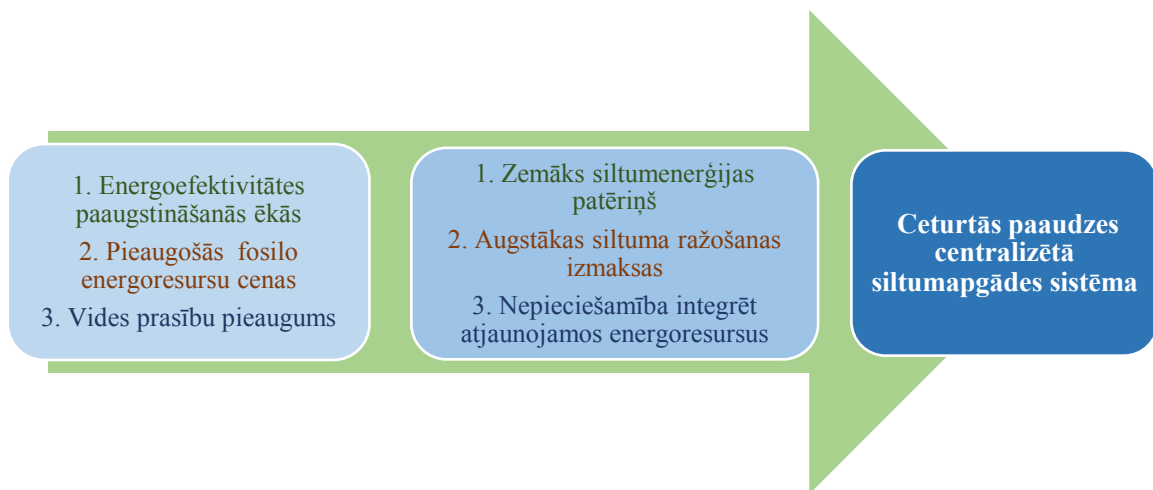
# SATURS

IEVADS .....	5
Darba aktualitāte un hipotēze .....	6
Darba mērķis un uzdevumi.....	7
Zinātniskā novitāte .....	8
Darba zinātniskā nozīme .....	9
Praktiskā nozīme .....	9
Zinātniskā darba aprobācija.....	10
Darba struktūra un apjoms.....	13
1. LITERATŪRAS APSKATS .....	14
1.1. Zemas temperatūras CSA attīstība .....	14
1.2. Saules siltumenerģijas izmantošana .....	15
1.3. Saules elektroenerģijas izmantošana .....	16
2. PĒTĪJUMA METODIKA .....	18
2.1. Esošās CSA sistēmas analīze.....	18
2.2. Tehnisko alternatīvu izvērtēšana .....	18
2.3. Piemērotākās alternatīvas izvēle.....	20
3. REZULTĀTI.....	22
3.1. CSA sistēmas analīze.....	22
3.2. Tehnisko alternatīvu novērtēšana .....	22
Saules siltumenerģijas modelis.....	22
Saules elektroenerģijas modelis .....	24
Kombinētas saules sistēmas modelis.....	26
3.3. Piemērotākās alternatīvas izvēle.....	27
Jutības analīze.....	29
Daudzkritēriju analīzes rezultāti.....	30
SECINĀJUMI .....	32
CSA sistēmas nākotnes attīstība .....	32
Saules enerģijas integrēšana CSA sistēmā .....	33
Galvenie faktori, kas ietekmē saules enerģijas integrēšanu CSA.....	33
LITERATŪRAS SARAKSTS .....	35

## IEVADS

Daudzās valstīs, arī Latvijā, ēku apkure un karstā ūdens sagatavošana ir viena no pamatvajadzībām. Pašlaik notiek diskusijas par to, kā optimizēt siltuma piegādi, lai mazinātu fosilo energoresursu izmantošanu un nodrošinātu optimālu enerģijas izmaksu līmeni. Centralizētās siltumapgādes (CSA) sistēmas infrastruktūrai ir būtiska loma energoefektivitātes uzlabošanā un pieejamo atjaunojamo energoresursu (AER) izmantošanā enerģijas patēriņa segšanai (Latosov et al., 2017). CSA siltumtīkli savieno ēkas dažādās apdzīvotu vietu daļās, tāpēc patērētājiem var piegādāt siltumu no vairākām centralizētajām katlumājām vai mazākiem siltuma avotiem. Šī pieeja ļauj izmantot jebkuru siltuma avotu, kas integrēts CSA sistēmā.

Energoefektivitātes pasākumu un paaugstinātu jaunbūvju celtniecības standartu dēļ ēku siltuma patēriņš turpina samazināties. Pievienot energoefektīvas ēkas esošajiem siltumapgādes tīkliem bieži vien nav ekonomiski izdevīgi, jo CSA sistēmām ir augstas fiksētās izmaksas lielo kapitālieguldījumu dēļ. Kad ēku siltumenerģijas patēriņš samazinās, siltumapgādes sistēmā ir iespējams izmantot siltumnesēju ar zemāku temperatūru, samazināt cauruļvadu diametrus, nodrošinot siltumnesēja optimālu plūsmas ātrumu (Rama & Sipila, 2017; Elmegaard et al., 2016). Pazeminot temperatūru siltumtīklos, kā siltuma avotu efektīvāk iespējams integrēt AER (saules enerģiju, apkārtējās vides siltumu u. c.) un dažādu tehnoloģisko procesu zema potenciāla siltuma pārpalikumus. Balstoties uz šiem aspektiem, ir izstrādāta ceturtās paaudzes centralizētās siltumapgādes sistēmas koncepcija (1. att.) (Lund et al., 2014), kas paredz temperatūras samazināšanu siltumtīklos, AER un zema potenciālā siltumenerģijas integrāciju, lai nodrošinātu ilgtspējīgu siltumapgādi.



1. att. Ceturtās paaudzes CSA virzošie aspekti.

CSA sistēmas konkurētspēju veido vairāki siltuma ražošanas un piegādes efektivitātes aspekti. Svarīga efektīvas siltumapgādes prasība ir koncentrēt siltuma pieprasījumu, lai samazinātu pārvades izmaksas un siltuma zudumus. Mikrorajonos ar zemu siltuma blīvumu rodas salīdzinoši augstas pārvades izmaksas. Lai nākotnē saglabātu ilgtspējīgas

energosistēmas lomu, ņemot vērā mūsdienu attīstības tendences, CSA sistēmai būs jārisina šādas problēmas, (Averfalk & Werner, 2017):

- nodrošināt zemas temperatūras siltumnesēju telpu apkurei un karstā ūdens sagatavošanai esošajās ēkās, renovētajās ēkās un jaunbūvēs ar zemu enerģijas patēriņu;
- piegādāt siltumu ar minimāliem siltuma zudumiem tīklos;
- izmantot siltumenerģiju no zemas temperatūras avotiem un integrēt AER;
- būt integrētai viedās enerģijas sistēmas daļai, tai skaitā nodrošināt ceturtās paaudzes centralizētu dzesēšanas sistēmu;
- nodrošināt atbilstošu darbības plānošanu un izmaksas, kā arī stratēģiski plānot ieguldījumus attīstībā.

### **Darba aktualitāte un hipotēze**

Promocijas darbā izvirzītā hipotēze: saules enerģija ir ilgtspējīgs un rentabls enerģijas ražošanas risinājums ceturtās paaudzes CSA sistēmā, ja tiek piemērota ilgtermiņa plānošana un piemērota organizācija.

Patlaban Latvijā un citās Eiropas valstīs CSA sistēmas saskaras ar vairākiem izaicinājumiem:

- augsts siltuma zudumu īpatsvars tīklos, kas saistīts ar pārāk lielu cauruļvadu uzstādīšanu, sliktu cauruļvadu izolāciju un zemu siltuma blīvumu;
- neefektīva siltuma ražošana ar novecojušām un zemas efektivitātes iekārtām;
- biežas fosilā kurināmā un biomasas cenu izmaiņas;
- plaša viegli automatizējama un vadāmu individuālo siltumenerģijas ražošanas iekārtu izvēle patērētājiem;
- pasražotāju koncepcijas attīstība, kas piedāvā individuāli saražoto enerģiju citiem patērētājiem;
- atbilstošu siltuma ražošanas un piegādes parametru uzraudzības un analīzes trūkums;
- siltuma un aukstuma piegādes attīstības stratēģisko plānu trūkums pašvaldību un valsts līmenī.

Visi šie aspekti rada zemāku siltuma pieprasījumu vai augstākas siltuma ražošanas izmaksas un paaugstina galveno CSA indikatora – siltumenerģijas – gala tarifu. Ja CSA siltumenerģijas tarifs ir augsts, patērētājs var brīvi izvēlēties alternatīvu siltumapgādes iespēju – individuālos apkures katlus, saules kolektorus, siltumsūkņus u. c. Mijiedarbības loks turpinās, jo katrs zaudētais klients paaugstina CSA sistēmas īpatnējās siltuma izmaksas. Turpinot tradicionālu siltuma ražošanu un piegādi, ir viegli iznīcināt esošo CSA infrastruktūru, ko varētu izmantot ilgtspējīgai enerģētikas nozares attīstībai.

CSA sistēmām ir plašas iespēja paaugstināt atjaunojamās enerģijas īpatsvaru gan siltumapgādē, gan augstumapgādē. AER var integrēt CSA gan siltuma slodzes segšanai, gan elektroenerģijas ražošanai, ko izmanto siltuma ražošanai un pārvadei, tomēr prasa enerģijas piegādes tehnoloģiskās un stratēģiskās izmaiņas.

Saules kolektoru uzstādīšana siltuma ražošanai CSA ir kļuvusi par plaši izplatītu risinājumu vairākās valstīs. Papildus CSA var izmantot saules fotoelektriskos (PV) paneļus, lai nodrošinātu elektroenerģiju siltuma ražošanai un pārvadei. Saules enerģija ir svarīgs elements ekonomiski pamatotās 100 % atjaunojamās enerģijas sistēmās, tomēr, ņemot vērā, ka saražotā saules enerģija ir atkarīga no pieejamā saules starojuma, nepieciešami vairāki pielāgojumi veiksmīgai saules enerģijas izmantošanai.



2. att. Trīs CSA ilgtspējīgas attīstības pīlāri (Lund et al., 2014).

Lai saglabātu CSA kā energoefektīvu un ekonomiski pamatotu risinājumu siltumapgādei, tā tālākai attīstībai jābalstās uz trim galvenajiem elementiem: siltumtīklu temperatūras pazemināšanu, atjaunojamo energoresursu integrēšanu un ilgtermiņa plānošanu (2. att.). Promocijas darbā ir iekļauti visi šie atskaites punkti, novērtējot saules enerģijas integrēšanu CSA kā ilgtspējīgas siltumapgādes attīstības perspektīvu.

## Darba mērķis un uzdevumi

Darba mērķis ir izstrādāt metodiku dažādu saules enerģijas integrēšanas stratēģiju novērtēšanai zemas temperatūras CSA sistēmās.

Galvenie uzdevumi mērķa sasniegšanai ir:

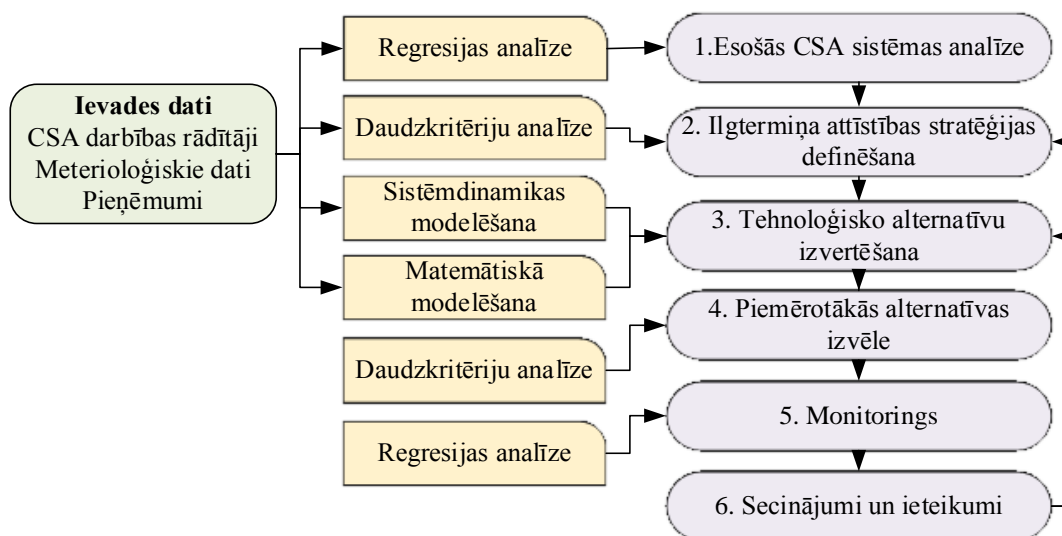
- veikt konkrētas CSA sistēmas darbības analīzes, izmantojot regresijas analīzes metodi un izstrādājot enerģijas bilances modeli;
- identificēt un novērtēt CSA sistēmas ilgtermiņa attīstības virzienus;
- novērtēt saules enerģijas potenciālu, dažādus tehniskos risinājumus un darbības stratēģijas saules enerģijas integrēšanai CSA, izmantojot matemātisko un sistēmas dinamikas modelēšanu;
- prioritizēt analizētās saules CSA sistēmas alternatīvas, novērtējot dažādus kritērijus un izmantojot daudzkritēriju analīzes metodi;



- noteikt galvenos aspektus, kas ietekmē saules CSA sistēmas darbību, izmantojot jutīguma analīzi;
- novērtēt pirmās saules elektrostacijas darbību Latvijā, izmantojot regresijas analīzes metodi.

### Zinātniskā novitāte

Izstrādātās metodikas algoritms ir redzams 3. attēlā. Katrs metodikas solis ir aprobēts vienā vai vairākās zinātniskajās publikācijās, kas apkopotas 1. tabulā.



3. att. Darbā izstrādātās metodikas galvenie soļi un izmantotās metodes.

1. tabula

#### Promocijas darbā izmantotās zinātniskās publikācijas

Metodikas solis	Nr.	Publikācijas nosaukums
<b>1. CSA sistēmas analīzes</b>	1	<i>Lowering temperature regime in district heating network for existing building stock</i>
<b>2. Ilgtermiņa attīstības virziena izvērtēšana</b>	2	<i>The future competitiveness of the non-Emissions Trading Scheme district heating systems in the Baltic States</i>
	3	<i>Introduction of small-scale 4th generation district heating system. Methodology approach</i>
<b>3. Tehnisko alternatīvu novērtējums</b>	4	<i>Solar energy use in district heating systems. A case study in Latvia</i>
	5	<i>Solar power and heat production via photovoltaic thermal panels for district heating and industrial plant</i>
	6	<i>Solar power in district heating. P2H flexibility concept</i>
<b>4. Piemērotākās alternatīvas izvēle</b>	7	<i>Solar power or solar heat: What will upraise the efficiency of district heating? Multi-criteria analyses approach</i>
<b>5. Uzraudzība</b>	8	<i>First solar power plant in Latvia. Analysis of operational data</i>

Metodikas pirmajā solī tiek veikta esošās CSA sistēmas analīze un siltumnesēja temperatūras pazemināšanās potenciāla noteikšana (1. publikācija). Darbības rādītāju novērtēšanai tiek izmantota regresijas analīzes metode. Otrais solis izriet no pirmajā posmā iegūtajiem CSA analīzes rezultātiem un atspoguļo dažādu ilgtermiņa attīstības virzienu salīdzinājumu CSA sistēmai. 2. publikācijā tiek apskatīti dažādi CSA sistēmas attīstības tehnoloģiskie risinājumi, kas salīdzināti ar daudzkritēriju analīzes metodi. 3. publikācijā ir sniegti rezultāti temperatūras pazemināšanas novērtējumam neliela mēroga CSA sistēmā.

Saules enerģijas integrācijas analīzei (3. solis) izveidoti trīs dažādi modeļi konkrētai CSA sistēmai (4., 5. un 6. publikācija). Katrs modelis atšķiras ar tehnoloģisko risinājumu, pieprasījuma un piedāvājuma salāgošanas stratēģiju un izmantoto modelēšanas metodi. Lai novērtētu saules siltumenerģijas un kombinētās saules enerģijas sistēmas veiktspēju, tika izstrādāti matemātiskie enerģijas bilances modeļi. Ar saules elektroenerģijas tehnoloģijām saistīto dinamisko aspektu novērtēšanai tika izmantota sistēmdinamiskā modelēšana (SD). Iegūtie rezultāti no saules enerģijas modeļiem tiek salīdzināti ar divām atšķirīgām daudzkritēriju analīzes metodēm, kas novērtē dažādus aspektus un scenārijus (7. publikācija). Papildus tiek veikta jutīguma analīze, lai novērtētu galveno pieņēmumu ietekmi uz iegūtajiem rezultātiem. Ir būtiski uzraudzīt un periodiski izvērtēt saules enerģijas sistēmu darbību, tāpēc 8. publikācijā parādīti monitoringa rezultāti pirmajai lielajai saules enerģijas stacijai Latvijā.

### **Darba zinātniskā nozīme**

Darbam ir augsta zinātniskā nozīme, jo tajā piedāvāta jauna metodika optimālas tehnoloģiskās un konceptuālās stratēģijas novērtēšanai saules enerģijas integrēšanai zemas temperatūras CSA sistēmā. Metodika ļauj izvēlēties galveno CSA attīstības virzienu un identificēt vairākus tehnoloģiskos risinājumus saules enerģijas integrēšanai ceturtās paaudzes CSA sistēmās.

Novērtējumā salīdzināta saules siltuma, saules elektroenerģijas un kombinētās saules sistēmas integrēšana, kas atspoguļo dažādas saules enerģijas izmantošanas iespējas. Iegūtie rezultāti no trim saules enerģijas modeļiem iezīmē dažādus aspektus, kas jāņem vērā, plānojot saules CSA sistēmu.

### **Praktiskā nozīme**

Esošās CSA sistēmas saskaras ar būtiskām pārmaiņām ēku siltuma prasību dēļ, kas siltumapgādes operatoriem liek meklēt jaunus risinājumus siltuma ražošanai un pārvadei. Pētījumam ir augsta praktiskā nozīme, jo tas identificē ilgtspējīgas CSA attīstības alternatīvas un novērtē saistītos tehniskos, ekonomiskos un vides aspektus.

Piedāvātā metodika un iegūtie rezultāti ir izmantojami nacionālā līmenī gan enerģētikas nozares plānošanā, pašvaldību siltumapgādes stratēģiju izstrādē, gan apkures nozarē, novērtējot nākotnes attīstības perspektīvas.

## Zinātniskā darba aprobācija

### Zinātniskās publikācijas par tēmu

1. Pakere I., Blumberga D. Solar power or solar heat: What will upraise the efficiency of district heating? Multi-criteria analyses approach (2020) *Energy* 198, 117291.
2. Grāvelsiņš A., Pakere I., Tukulis A., Blumberga D. Solar power in district heating. P2H flexibility concept (2019) *Energy* 181, 1023–1035.
3. Pakere, I., Blumberga, D. Solar Energy in Low Temperature District Heating (2019) *Environmental and Climate Technologies* 23 (3), 147–158.
4. Feofilovs, M., Pakere, I., Romagnoli, F. Life Cycle Assessment of Different Low-Temperature District Heating Development Scenarios: A Case Study of Municipality in Latvia (2019) *Environmental and Climate Technologies* 23 (2), 272–290.
5. Tukulis A., Pakere I., Grāvelsiņš A., Blumberga D. Methodology of system dynamic approach for solar energy integration in district heating (2018) *Energy Procedia*, 147, 130–136.
6. Pakere, I., Lauka, D., Blumberga, D. Solar power and heat production via photovoltaic thermal panels for district heating and industrial plant (2018) *Energy*, 154, 424–432.
7. Pakere I., Romagnoli F., Blumberga D. Introduction of small-scale 4<sup>th</sup> generation district heating system. Methodology approach. *Energy Procedia*, 149, 2018, 549–554.
8. Lauka D., Pakere I., Blumberga D. First solar power plant in Latvia. Analysis of operational data, *Energy Procedia*, 147, 2018, 162–165.
9. Soloha, R., Pakere, I., Blumberga, D. Solar energy use in district heating systems. A case study in Latvia (2017) *Energy*, 137, 586–594.
10. Pakere, I., Ziemele, J., Blumberga, D. DH company in prosumers role (2017) *Energy Procedia*, 128, 234–239.
11. Ziemele, J., Pakere, I., Blumberga, D. The future competitiveness of the non-Emissions Trading Scheme district heating systems in the Baltic States (2016) *Applied Energy*, 162, 1579–1585.
12. Cirule, D., Pakere, I., Blumberga, D. Legislative Framework for Sustainable Development of the 4th Generation District Heating System (2016) *Energy Procedia*, 95, 344–350.
13. Ziemele, J., Pakere, I., Chernovska, L., Blumberga, D. Lowering temperature regime in district heating network for existing building stock (2016) *Chemical Engineering Transactions*, 52, 709–714.
14. Ziemele, J., Pakere, I., Blumberga, D. Development of District Heating System in Case of Decreased Heating Loads (2014) *The 27th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2014): Proceedings*, 2044–2055.

15. Ziemele, J., Pakere, I., Talcis, N., Blumberga, D. Multi-criteria analysis of district heating systems in baltic states (2014) *Energy Procedia*, 61, pp. 2172–2175.

### **Citas zinātniskās publikācijas**

1. Pakere, I., Lauka D., Blumberga, D. Estimation of Carbon Emission Reduction from Upgrading the DH Network to the 4th Generation. Multivariate Linear Regression Model (2019) *Environmental and Climate Technologies*, 23 (2) 64–73.
2. Pakere, I., Purina, D., Blumberga, D., Bolonina, A. Evaluation of Thermal Energy Storage Capacity by Heat Load Analyses (2016) *Energy Procedia*, 95, pp. 377–384.
3. Ziemele, J., Pakere, I., Blumberga, D., Zogla, G. Economy of Heat Cost Allocation in Apartment Buildings (2015) *Energy Procedia*, 72, pp. 87–94.
4. Ziemele, J., Pakere, I., Talcis, N., Cimdirina, G., Vigants, G., Veidenbergs, I., Blumberga, D., Blumberga, D. Analysis of wood fuel use development in Riga (2014) *Agronomy Research*, 12 (2), pp. 645–654.
5. Dāce, E., Pakere, I., Blumberga, D. Evaluation of Economic Aspects of the Deposit-Refund System for Packaging in Latvia (2013) *Management of Environmental Quality: An International Journal* 24 (3) pp. 311–329.
6. Dāce, E., Pakere, I., Blumberga, D. Analysis of Sustainability Aspects of the Packaging Deposit-Refund System in Latvia (2013) *Sustainable Development and Planning VI: WIT Transactions on Ecology and the Environment (173)* C.Brebbia red. New Forest. pp. 729–740.

### **Zinātniskās konferences**

1. Pakere I., Blumberga D. “Solar power or solar heat: What will upraise the district heating?”. *International conference “5th International Conference on Smart Energy Systems”*, Denmark, Copenhagen, September 10–11, 2019.
2. Pakere I., Lauka D., Blumberga D. “Estimating carbon emission reduction from low temperature district heating implementation through multivariate linear regression model”. *International scientific conference of Environmental and Climate Technologies, CONECT 2019*, Latvia, Riga, May 15–16, 2019.
3. Pakere I., Blumberga D. “Solar energy in low temperature district heating”. *International scientific conference of Environmental and Climate Technologies “CONECT 2019”*, Latvia, Riga, May 15–16, 2019.
4. Feofilovs M., Pakere I., Blumberga D. “Life cycle analysis of different Low-temperature district heating development scenarios: A case study of municipality in Latvia”. *International scientific conference of Environmental and Climate Technologies “CONECT 2019”*, Latvia, Riga, May 15–16, 2019.
5. Tukulis A., Pakere I., Blumberga D. “Solar DH system sustainability and flexibility increase forecast via power-to-heat technology integration. System dynamic approach”.

*International conference “4th International conference on Smart Energy Systems and 4<sup>th</sup> generation District Heating”*, Denmark, Alborg, November 13–14, 2018.

6. Pakere I., Romagnoli F., Blumberga D. “Introduction of small-scale 4th generation district heating system. Methodology approach”. *International conference “The 16th International Symposium on District Heating and Cooling”*, Germany, Hamburg, September 9–12, 2018.
7. Tukulis A., Pakere I., Gravelins A., Blumberga D. “Methodology of system dynamic approach for solar energy integration in district heating”. *International conference; International scientific conference of Environmental and Climate Technologies “CONNECT 2018”*, Latvia, Riga, May 16–18, 2018.
8. Pakere I., Ziemele J., Blumberga D. “DH Company in Prosumers role”. *International scientific conference of Environmental and Climate Technologies “CONNECT 2017”*, Latvia, Riga, May 16-18, 2017.
9. Pakere I., Blumberga D. “Solar collectors versus solar panels in DH”. *International conference “3<sup>rd</sup> International conference on Smart Energy Systems and 4<sup>th</sup> generation District Heating”*, Denmark, Alborg, September 12–13, 2017.
10. Soloha R., Pakere I., Blumberga D. “Solar Energy Share in DH system. Case study in Latvia” *“2<sup>nd</sup> International conference on Smart Energy Systems and 4<sup>th</sup> generation District Heating”*, Denmark, Alborg, September 27–28, 2016.
11. Purina D., Pakere I., Blumberga D. Bolonina A. “Evaluation of thermal energy storage capacity by heat load analyses”. *International scientific conference of Environmental and Climate Technologies “CONNECT 2015”*, Latvia, Riga, October 14–15, 2015.
12. Cirule D., Pakere I., Blumberga D. “Legislative framework for sustainable development of the 4th generation district heating system”. *International scientific conference of Environmental and Climate Technologies “CONNECT 2015”*, Latvia, Riga, October 14–15, 2015.
13. Ziemele J., Pakere I., Blumberga D., Zogla G. “Economy of Heat Cost Allocation in Apartment Buildings”. *International conference “Environmental and Climate Technologies”*. Latvia, Riga, October 14–15, 2014.
14. Ziemele J., Pakere I., Blumberga D. “Development of District Heating System in Case of Decreased Heating Loads”. *International conference “The 27th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2014)”*, Finland, Turku, June 15–19, 2014.

### **Monogrāfijas**

1. Barisa, A., Blumberga, A., Blumberga, D., Grāvelsiņš, A., Gušča, J., Lauka, D., Kārklīņa, I., Muižniece, I., Pakere, I., Priedniece, V., Romagnoli, F., Rošā, M., Seļivanovs, J., Soloha, R., Veidenbergs, I., Vīgants, E., Vīgants, Ģ., Ziemele, J. *Energy System Analysis and Modeling*. Rīga: RTU Izdevniecība, 2018. 144 p. ISBN 978-9934-22-037-1.

## Darba struktūra un apjoms

Promocijas darba pamatā ir astoņas 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. Publikācijās aprakstīta metodika esošās CSA sistēmas pārejai uz zemas temperatūras CSA ar integrētām saules enerģijas tehnoloģijām.

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 zinātniskās konferencēs. Darba ievaddaļā uzskaitītas arī citas publikācijas un monogrāfijas, kas attiecas uz darba autores veikumu citās pētniecības jomās.

Darba pirmajā nodaļā sniegts literatūras apskats par zemas temperatūras CSA attīstību un saules enerģijas izmantošanu. Otrajā nodaļā aprakstītas pētījumu metodes, kas saistītas ar CSA sistēmas ilgtspējīgas attīstības un saules enerģijas integrācijas novērtējumu. Promocijas darba noslēgumā tiek analizēti darba rezultāti, sniegti secinājumi par paveikto darbu un CSA ilgtspējīgu attīstību.

Promocijas darba literatūras sarakstā ir 123 nosaukumu.

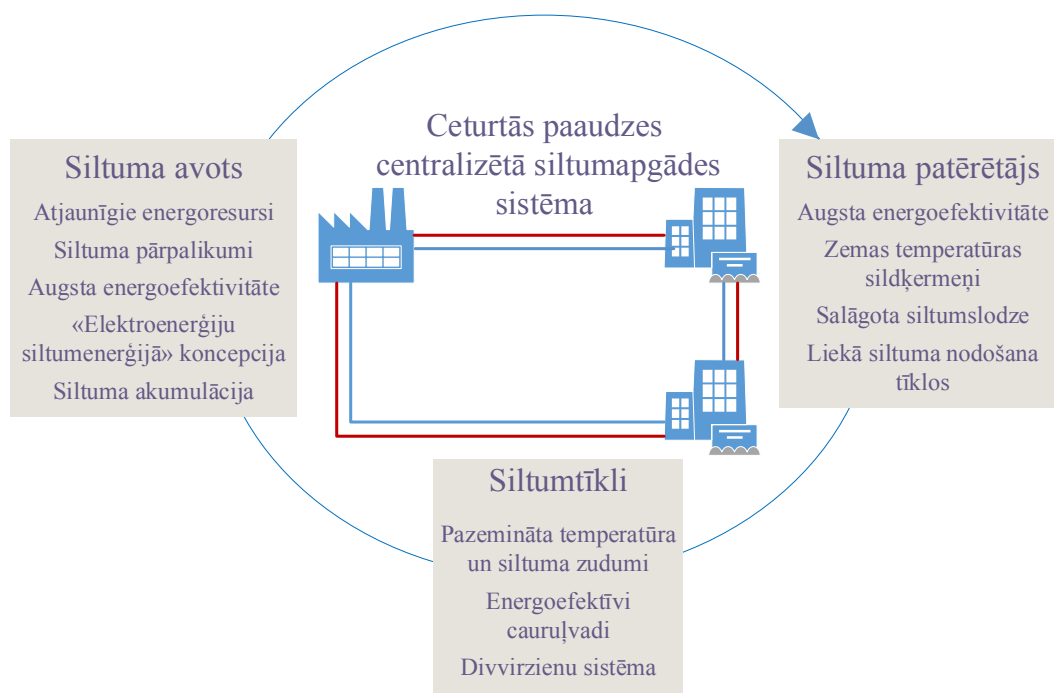
# 1. LITERATŪRAS APSKATS

## 1.1. Zemas temperatūras CSA attīstība

Energoefektivitātes palielināšana un energosistēmu optimizēšana ir kļuvusi par galveno uzdevumu energoapgādes drošības veicināšanā un vispārējās ietekmes uz vidi mazināšanā. To veicina gan Eiropas, gan valstu līmeņa politiski lēmumi un likumdošanas normas (EP, 2012; Saeima, 2016). Vairāki zinātnieki ir izstrādājuši ideju par 100 % atjaunojamās enerģijas sistēmām (Ostergaard et al., 2010; Ostergaard & Lund, 2011; Lund, 2007). Šādas konceptuālas sistēmas galvenokārt balstās uz mainīgu AER (vēja, ģeotermālā, saules) apvienojumu ar neatkarīgākiem resursiem, piemēram, atkritumu un biomasas sadedzināšanas tehnoloģijām. Tomēr, lai mazinātu vajadzību pēc biomasas, ko galvenokārt vajadzētu izmantot augstākas kvalitātes produktu ražošanai, ilgtspējīgas enerģijas sistēmas attīstības koncepcijā jāiekļauj arī enerģijas avotu dažādošana, energoefektivitāte un enerģijas patēriņa mazināšana.

Henrihs Lunds, Svens Verners un citi autori 2014. gadā (Lund et al., 2014) definēja hipotēzi, ka siltumapgādei un aukstumapgādei ir liela nozīme ilgtspējīgas enerģijas sistēmās, taču šīm sistēmām ir jāpielāgojas un jāievieš jauni tehnoloģiski un stratēģiski risinājumi, lai saglabātu konkurētspēju. Esošajās apkures sistēmās nepieciešamas būtiskas izmaiņas, samazinot siltumnesēja temperatūru tīklos, pielāgojoties energoefektīvu ēku enerģijas patēriņam un kļūstot par “viedās enerģijas sistēmas” daļu. Tāpēc tika ieviests termins “ceturtās paaudzes centralizētā siltumapgāde” (Lund et al., 2014).

Viedās energosistēmas koncentrējas uz elektroapgādes, siltumapgādes, aukstumapgādes un transporta nozaru mijiedarbību, kā arī uz enerģijas patēriņa un enerģijas uzkrāšanas sistēmu līdzsvarošanu. Lai to panāktu, ir jākoordinē vairāku viedo infrastruktūru darbība – elektrotīkli, siltumapgādes un dzesēšanas tīkli, gāzes tīkli un dažādu kurināmā infrastruktūra. Viens no turpmākajiem attīstības uzdevumiem būs CSA integrēšana kopējā enerģijas sistēmā, mijiedarbojoties ar elektroapgādes un transporta sektoriem (Jiang et al., 2014). Šāda nākotnes sistēma tiek definēta kā “viedā enerģijas sistēma”, tas ir, energosistēma, kurā tiek apvienoti un koordinēti viedie elektrības, siltuma un gāzes tīkli, lai noteiktu sinerģiju starp tiem, panāktu optimālu risinājumu katrai plūsmai, kā arī kopējai enerģijas sistēmai (Lund, 2014).



1.1. att. Ceturtnā paaudzes CSA sistēmas elementu savstarpējā mijiedarbība.

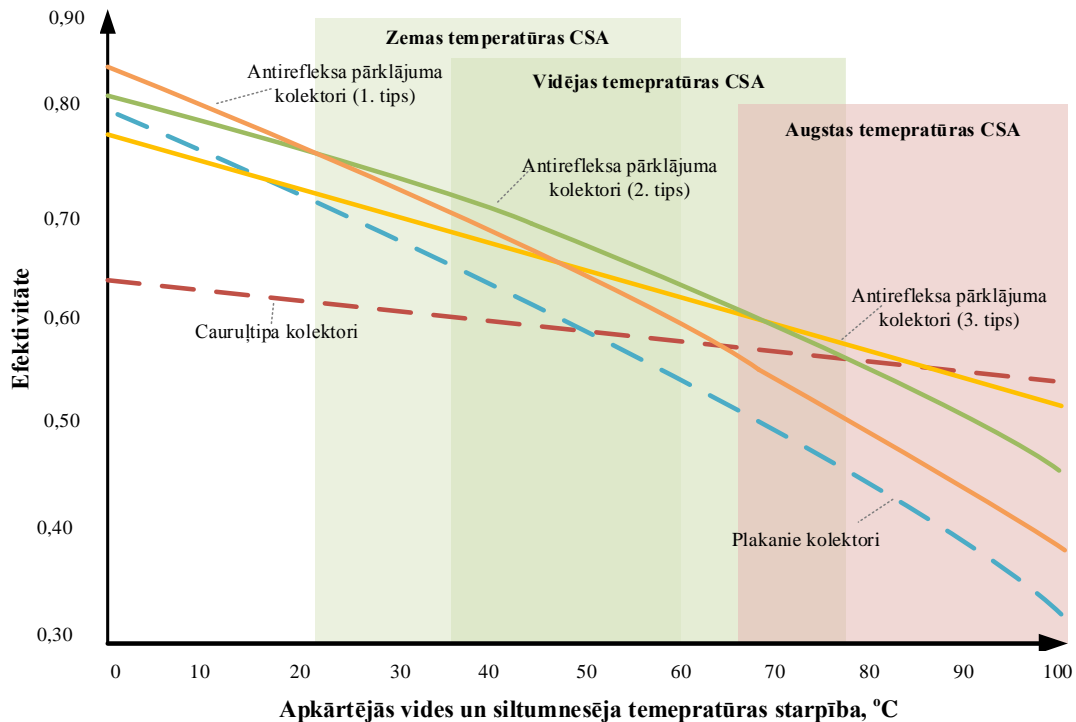
CSS sastāv no trīs pamatelementiem – siltuma avota, siltumtīkliem un siltuma patērētājiem. Visiem šiem elementiem ir noteikta loma kopējā sistēmas attīstībā, un pāreja uz ceturtnā paaudzes CSA ietver pārmaiņas katrā no tiem. 1.1. attēlā redzama mijiedarbība starp visiem CSA sistēmas elementiem. Siltumenerģijas temperatūras pazemināšana tīklos iespējama un izdevīga ir tajos gadījumos, kad ir attiecīgi pielāgots patērētājs (piemēram, paaugstināta ēku energoefektivitāte un integrēti zemas temperatūras sildķermeņi).

## 1.2. Saules siltumenerģijas izmantošana

Saules siltumenerģijas integrācija CSA sistēmās ir arvien izplatītāka prakse daudzās pasaules valstīs. Pamatā CSA integrētie saules kolektoru lauki daļēji vai pilnībā nodrošina CSA sistēmas vasaras siltuma pieprasījumu. Veiktie pētījumi liecina, ka saules CSA ar augstu saules enerģijas izmantošanas īpatsvaru ir iespējama tikai, sistēmā papildus integrējot liela tilpuma sezonālu siltumenerģijas krātuvi. Parasti saules CSA sistēmas sastāv no lieliem kolektoru laukiem, kas integrēti CSA sistēmā, lai piegādātu siltumu dzīvojamām un rūpnieciskām zonām. Kolektora lauks parasti tiek uzstādīts uz zemes tiešā savienojumā ar esošajām siltuma ražošanas iekārtām (Tulus et al., 2016).

Saules kolektoru efektivitāti cieši ietekmē siltumnesēja temperatūra. 1.2. attēlā redzamas dažādu saules kolektoru efektivitātes līknes kā funkcija no siltumnesēja kolektorā un apkārtējās vides temperatūru starpības. Efektivitātes līknes dažādiem saules kolektoru veidiem atšķiras.





1.2. att. Saules kolektoru efektivitāte atkarībā no siltumnesēja un apkārtējās vides temperatūru starpības (Rosa et al., 2012).

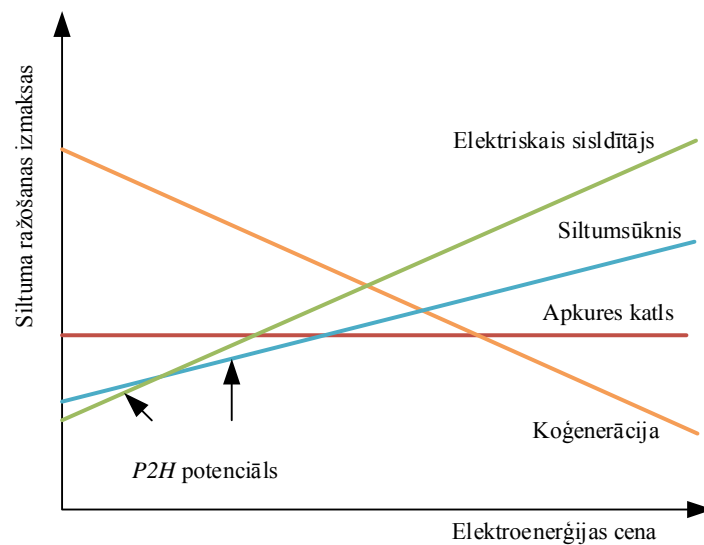
1.2. attēlā shematiski atzīmētas attiecīgi zemas, vidējas un augstas temperatūras CSA sistēmas. Lai gan attēlā norādītas dažāda veidu kolektoru efektivitātes līknes, tām visām ir vienāda tendence – efektivitāte pieaug, samazinoties apkārtējās vides un siltumnesēja temperatūru starpībai. No tā var secināt, ka, pazeminot siltumnesēja temperatūru, krietni pieaug saules kolektoru efektivitāte un līdz ar to iespējams saražot vairāk siltumenerģijas. Arī īstenoto pilotprojektu analīze liecina, ka lielākajās saules CSA integrētiem saules kolektoriem siltumnesēja temperatūras līmenis variē vidējas vai zemas temperatūras CSS līmenī.

### 1.3. Saules elektroenerģijas izmantošana

Viena no CSA sistēmas attīstības iespējām ir saules PV paneļu integrācija pašpatēriņa segšanai (Pakere et al., 2017). Saules elektrostacijas komponentes pārvērš saules starojumu elektrībā un parasti sastāv no PV paneļa, akumulatora, uzlādes kontroliera, invertora un patērētājiem (Sakellariou & Axaopoulos, 2017). Galvenais iemesls, kāpēc tiek apsvērta PV paneļu izmantošana CSA sistēmā, ir straujā paneļu izmaksu samazināšanās. Paredzētais cenu samazinājums vidēji ir no 3 % gadā (Dobrotkova et al., 2018) līdz pat 7 % (Feldman et al., 2014).

PV paneļu šūnas elektroenerģijā pārveido tikai noteiktu ienākošās gaismas starojuma viļņu veidu. Tikai 15–20 % no saules enerģijas tiek pārveidoti elektrībā, savukārt pārējā saules enerģija tiek pārveidota siltumā, kas izraisa saules paneļu uzsilšanu. PV paneļa virsma var uzsilt līdz 40 °C virs apkārtējās vides temperatūras (Makki & Omer, 2015).

Patēriņa slodzes vadība un tīkla interaktivitāte ir galvenie faktori, kas tiek analizēti, lai paaugstinātu atjaunojamās enerģijas sistēmu elastīgumu jeb spēju pielāgoties patēriņam (Elcia et al., 2015). Ja ar saules enerģiju saražotās elektroenerģijas daudzums ir lielāks nekā patēriņš, tad starpību starp saražoto un patērēto var definēt kā saules elektroenerģijas pārpalikumu. Ne vienmēr ir ekonomiski pamatoti šo pāri palikušo elektroenerģiju novadīt kopējā elektrotīklā, un viena no alternatīvām iespējām ir pārveidot elektroenerģijas pārpalikumu siltumā (*P2H* koncepcija), izmantojot elektriskos sildītājus vai siltumsūkņus (Averfalk et al., 2017). 1.3. attēlā parādīta siltuma ražošanas izmaksu un elektrības cenas mijiedarbība dažādām siltuma ražošanas tehnoloģijām. Analizētā *P2H* koncepcija ir iespējama, ja elektrības cena ir zemāka par citu siltuma ražošanas tehnoloģiju ražošanas izmaksām (Moller et al. 2018).



1.3. att. Siltumenerģijas ražošanas izmaksas un elektrības cena mijiedarbojas dažādām siltumenerģijas ražošanas tehnoloģijām (Moller et al. 2018).

Hipotētiski *P2H* koncepcija būtu piemērots risinājums CSA sistēmā, jo elektroenerģiju var tieši izmantot dažādām iekārtām katlumājā (sūkņiem, kurināmā padeves sistēmām, apkures katlu darbināšanai u. c.), savukārt elektroenerģijas pārpalikumus, ja tādi rodas, var pārveidot siltumā un ievadīt kopējā siltumapgādes sistēmā.

## **2. PĒTĪJUMA METODIKA**

Visām CSA sistēmām nav vienota risinājuma, kā pazemināt siltumnesēja temperatūru, integrēt saules enerģiju un paaugstināt kopējo enerģijas ražošanas un piegādes efektivitāti. Ceturtās paaudzes CSA sistēmas jāiekļauj kopējā enerģētikas stratēģijā, kurā tiek analizētas dažādas iespējas šādas sistēmas ieviešanai. Līdz ar to ir nepieciešams rūpīgs stratēģiskās plānošanas process, lai virzītos uz ilgtspējīgu jaunās paaudzes CSA sistēmas attīstību. Šīs metodikas mērķis ir iepazīstināt ar esošās CSA sistēmas detalizētas analīzes posmiem un nākotnes siltuma patēriņa prognozēšanu, lai izvēlētos vispiemērotākos attīstības virzienus efektīvākai siltumapgādei, izmantojot saules enerģiju.

Pirmkārt, tiek veikta CSA sistēmas galveno parametru analīze, lai iegūtu informāciju par siltuma pieprasījumu, siltumnesēja temperatūras līmeņiem (temperatūras grafiku), siltuma ražošanas efektivitāti un citiem darbības rādītājiem. Detalizēta CSA sistēmas un pieejamo datu analīze ļauj noteikt iespējamās ilgtermiņa attīstības virzienu ceļus. Nākamais pētījuma solis ir tehnoloģisko alternatīvu noteikšana. Konkrētais pētījums ir vērsts uz temperatūras pazemināšanu, ēku energoefektivitātes paaugstināšanu un saules enerģijas integrāciju CSA sistēmā. Veicot katras tehnoloģiskās alternatīvas detalizētu analīzi, tiek noteikti vairāki kritēriji. Tie tiek salīdzināti, izmantojot daudzkritēriju analīzes metodi, lai noteiktu ilgtspējīgāko risinājumu konkrētai CSA sistēmai.

### **2.1. Esošās CSA sistēmas analīze**

Novērtēšanas process sākas ar konkrētās CSA sistēmas esošās situācijas analīzi. Šajā solī ietilpst vairāku parametru analīze, piemēram, enerģijas bilances, siltuma slodzes, sistēmas efektivitātes, izmantoto tehnoloģiju, enerģijas avotu u. c.

CSA sistēmas darbība ietver daudzus tehniskos, ekonomiskos un vides parametrus, kas ietekmē kopējo sistēmas efektivitāti. Lai novērtētu dažādus scenārijus, ir nepieciešams iegūt salīdzinošos rādītājus, izmantojot pieejamos ievades datus un pieņēmumus. Šādi aprēķini sniedz vajadzīgās atbildes par vispiemērotākajām alternatīvām sistēmas turpmākai attīstībai.

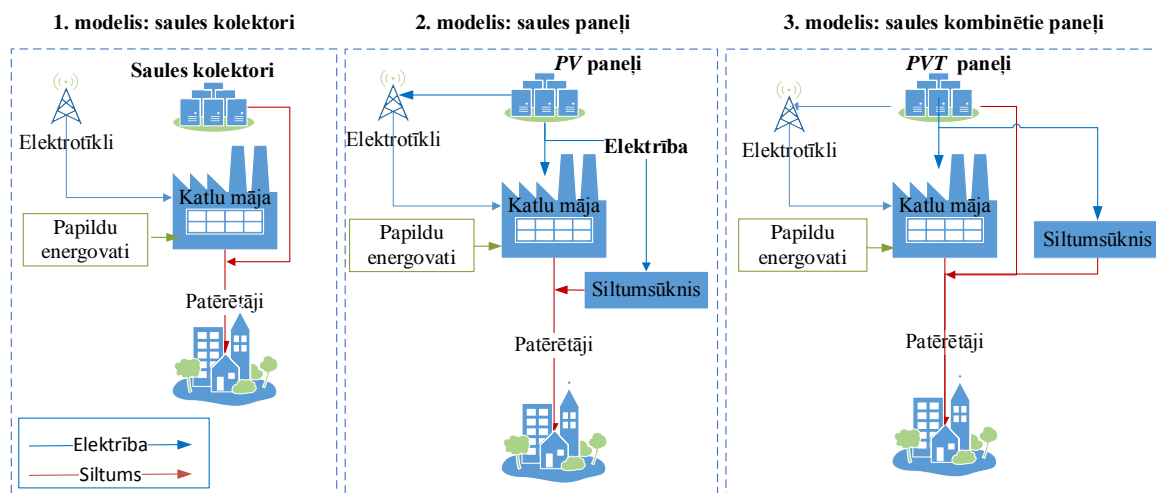
Viens no svarīgākajiem parametriem, kas raksturo CSA sistēmas darbību, ir siltuma slodzes līkne, kas parāda saražotās siltumenerģijas daudzumu. Šo līkni izmanto visiem tehniskajiem un ekonomiskajiem aprēķiniem. Zinot siltuma patēriņu, ir iespējams noteikt nepieciešamo iekārtu skaitu un to jaudu. Siltuma slodzes līkne raksturo CSA sistēmas bāzes un maksimālo slodzi. Šāda slodžu analīze sniedz visaptverošu pārskatu par dažādām enerģijas avotu (tai skaitā, saules tehnoloģiju) jaudām, kuras var integrēt centrālā apkures sistēmā.

### **2.2. Tehnisko alternatīvu izvērtēšana**

Konkrētajā pētījumā saules enerģijas integrācija tika identificēta kā ilgtermiņa attīstības virziens, un pētījuma laikā tika izstrādāti trīs dažādi saules sistēmas modeļi (2.1. att.).

Pirmajā modelī tiek modelēta saules CSA sistēma ar integrētiem saules kolektoriem, kas uzstādīti vasaras siltuma slodzes segšanai. Saules kolektora efektivitātes aprēķināšanai tiek izmantota ikstundas siltumnesēja un apkārtējās vides temperatūra (Solohe et al., 2017). Konkrētajā modelī tieši var izmantot visu saules siltumu, jo saules siltuma sistēmas jauda nepārsniedz vasaras siltuma slodzi (ap 2 MW).

Otrajā modelī tiek analizēta saules paneļu integrācija, lai primāri segtu katlumājas elektroenerģijas pašpatēriņu. Tiek pieņemts, ka elektroenerģijas ražošanai tiks izmantoti monokristāliskie PV paneļi. Detalizētai analīzei izstrādāts sistēmdinamikas modelis, kurā tiek aprēķināts saražotais saules enerģijas daudzums desmit gadu periodā stundas griezumā, kas tiek salāgots ar konkrētās CSA sistēmas siltuma slodzi (Gravelsins et al., 2019). Ja tiek saražots vairāk saules elektroenerģijas, nekā ir katlu mājas pašpatēriņš, tā tiek vai nu nodota elektrotīklā (BTG), ja konkrētās stundas elektroenerģijas cena ir augsta, vai arī tiek pārveidota par siltumu ar siltumsūkņa palīdzību un izmantota siltuma slodzes segšanai. Siltumsūkņa jauda tiek aprēķināta kā maksimālā pāri palikušās elektrības jauda, bet siltumsūkņa efektivitātes rādītājs (COP) ir atkarīgs no CSA sistēmas siltumnesēja temperatūras.



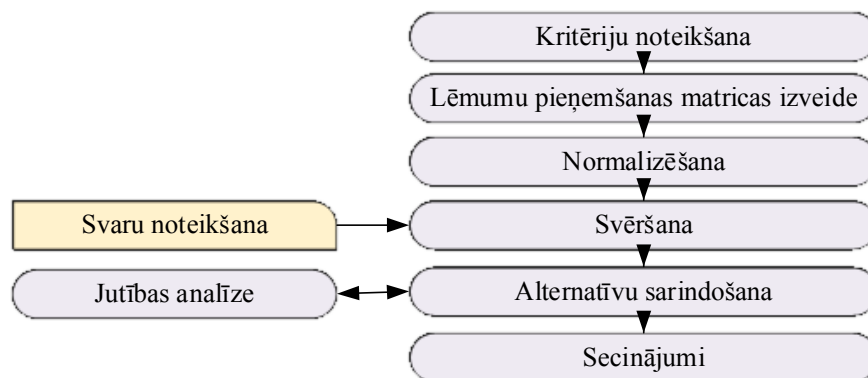
2.1. att. Analizētie saules sistēmu modeļi.

Trešajā modelī tiek analizēta kombinēta sistēma, kurā tiek uzstādīti PV paneļi ar siltuma atgūšanas iespēju (PVT paneļi), kas ražo gan elektrību, gan siltumu. Paneļu darbība tiek modelēta saskaņā ar metodoloģiju, kas aprakstīta autores publikācijā (Pakere et al., 2018). Saražotā elektroenerģijas galvenokārt tiek patērēta uz vietas katlumājā, bet siltums tiek nodots patērētājiem. Ja saražo vairāk elektroenerģijas par katlumājas patēriņu, pāri palikušā elektroenerģija tiek vai nu nodota elektrotīklā (ja elektrības stundas cena ir augsta), vai arī tiek pārveidota par siltumu, izmantojot siltumsūkni, siltuma slodzes segšanai.

Izstrādātie saules modeļi sniedz detalizētu informāciju par saules enerģijas potenciālu atšķirīgu tehnoloģisko risinājumu gadījumā. Saražotais, patērētais un pārdotais saules enerģijas daudzums (siltums vai elektroenerģija) tiek aprēķināts pie dažādām uzstādīto saules sistēmu jaudām (maza un liela mēroga), lai iegūtu skaidrāku priekšstatu par sistēmas aspektiem.

### 2.3. Piemērotākās alternatīvas izvēle

Trīs dažādu saules modeļu iegūtie rezultāti tika salīdzināti un sarindoti, izmantojot divus dažādus daudzkritēriju analīzes metodes rīkus – *TOPSIS* un *AHP* (Dynova et al., 2013; Laurenzutti & Krohling, 2014). Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metodes galvenie soļi ir redzami 2.2. attēlā.



2.2. att. Daudzkritēriju analīzes soļi.

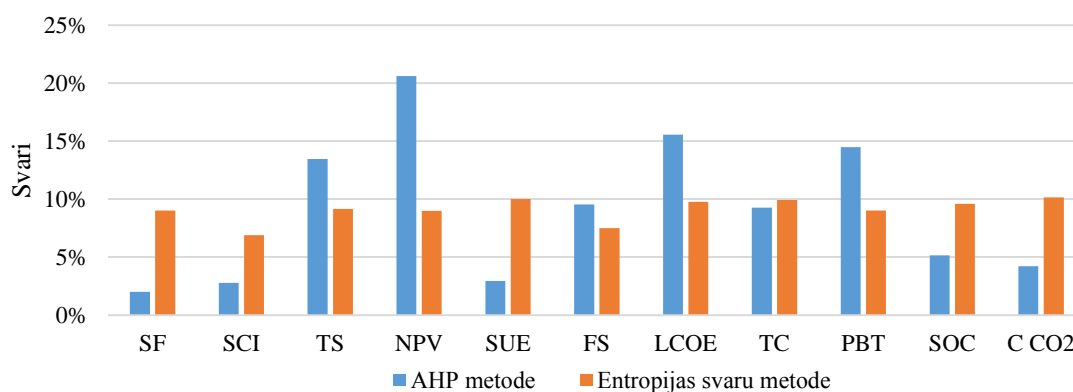
Pirmais solis ietver visu piemērojamo kritēriju identificēšanu un aprēķināšanu, izmantojot izstrādātos saules modeļus. Konkrētajā pētījumā gan *TOPSIS*, gan *AHP* metodēs tiek izmantoti 11 dažādi kritēriji (saules īpatsvars (*SF*); pašpatēriņa indekss (*SELFICI*); kopējais ekonomiskais ietaupījums (*TS*); neto pašreizējā vērtība (*NPV*); īpatnējā lietderīgā ekserģija (*SUE*); elastības ietaupījumi (*FS*); izlīdzinātās enerģijas vienības izmaksas (*LCOE*); kopējās izmaksas (*TC*); vienkāršais atmaksāšanās laiks (*PBT*); īpatnējās ekspluatācijas izmaksas (*SOC*); novērstās  $\text{CO}_2$  izmaksas ( $C_{\text{AV,CO}_2}$ )).

Iegūtie rezultāti no saules modeļiem (saražotais saules enerģijas daudzums, patērētais saules siltums un enerģija, nodotā saules enerģija tīklos un siltumenerģijas ražošanā izmantotā elektroenerģija) tiek novērtēti dažādiem scenārijiem, lai noteiktu vēlamu alternatīvo risinājumu (2.1. tab.). Autore kā atsaucis parametru izmanto uzstādīto saules tehnoloģiju lietderīgo platību, pieņemot, ka pieejamā zeme paneļu un kolektoru uzstādīšanai varētu būt ierobežojošais faktors lēmumu pieņemšanā. Tika analizēti dažādi sistēmas mērogi, sākot no atsaucis scenārija ( $140 \text{ m}^2$  uzstādīto tehnoloģijas laukuma) līdz liela mēroga sistēmai ar  $2000 \text{ m}^2$  paneļu/kolektoru lietderīgo platību.

Lēmumu pieņemšanas matrica un iegūto vērtību normalizēšana tiek veikta saskaņā ar Lokena aprakstīto metodi (Loken, 2007). Kritēriju svēršanai tiek izmantota entropijas svēršanas metode, ko ieviesa Šenons un Vīvers (Shannon & Weaver, 1949), un *AHP* pāru salīdzināšanas metode. Izmantojot entropijas svēršanas metodi, visaugstākā svaru vērtība tiek piešķirta kopējām izmaksām (*TC*), kopējiem ietaupījumiem (*TS*), novērstajām  $\text{CO}_2$  emisijām ( $C_{\text{CO}_2}$ ) un sasniegtajam saules īpatsvaram (*SF*) (2.3. att.). Nosakot svarus ar *AHP* metodi, visaugstākās vērtības ir neto pašreizējā vērtības (*NPV*), izlīdzinātās enerģijas vienības izmaksu (*LCOE*), vienkāršā atmaksāšanās laika (*PBT*) un kopējo ietaupījumu (*TS*) kritērijiem.

Pārskats par analizētajiem scenārijiem

Saules tehnoloģija	Scenārija nosaukums	Laukums, m <sup>2</sup>	Elektriskā jauda, kW	Siltuma jauda, kW	Siltumsūkņa elektriskā jauda, kW
<b>3. modelis</b> (PVT sistēma)	PVT 1	140	24	70	0
	PVT 2	500	85	240	85
	PVT 3	1000	170	480	90
	PVT 4	2000	340	960	230
<b>2. modelis</b> (PV sistēma)	PV 1	140	25	n/a	0
	PV 2	500	90	n/a	26
	PV 3	1000	180	n/a	90
	PV 4	2000	360	n/a	247
<b>1. modelis</b> (saules kolektoru sistēma)	SC 1	140	n/a	100	n/a
	SC 2	500	n/a	360	n/a
	SC 3	1000	n/a	720	n/a
	SC 4	2000	n/a	1442	n/a

2.3. att. Kritēriju noteiktā svara salīdzinājums, izmantojot *AHP* un entropijas svaru metodi.

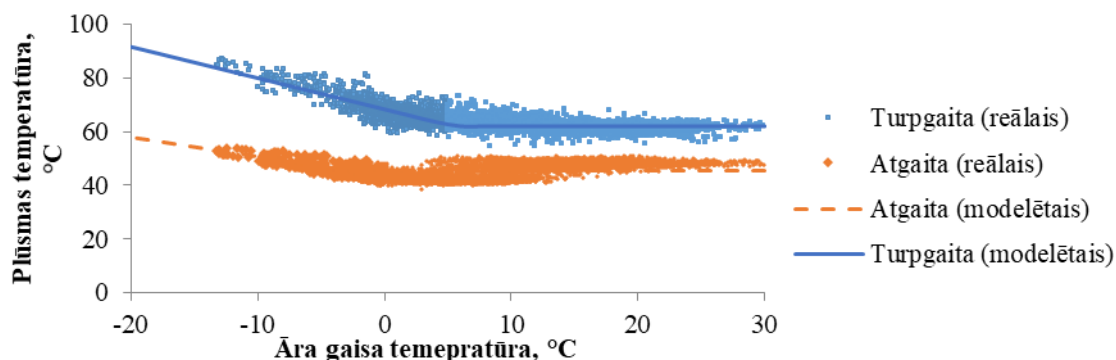
Galīgo alternatīvu novērtējumu iegūst, reizinot kritērija noteikto svaru ar atbilstošo normalizēto alternatīvas vērtējumu. Ja izmanto *AHP* metodi, papildus tiek aprēķināts konsekvenču indekss lēmumu pieņemēju vērtējumu konsekvenču pārbaudei (Samal & Kansal, 2015).

## 3. REZULTĀTI

### 3.1. CSA sistēmas analīze

Izstrādāto metodiku pielietoto konkrētas liela mēroga CSA sistēmas analīzei. Kopējais piegādātais siltumenerģijas daudzums ir aptuveni 61 GWh gadā, un vidējie siltuma zudumi CSA sistēmas tīklos ir aptuveni 12,4 %. CSA sistēmai pieslēgtas daudzdzīvokļu ēkas, kā arī privātmājas un pašvaldību ēkas.

Aptuveni 44 % no piegādātā siltuma tiek saražoti no šķeldas, 7 % – no dabasgāzes, atlikušie 49 % tiek iepirkti no koģenerācijas stacijas, kas izmanto dabasgāzi. Vidējā siltuma slodze vasaras sezonā, kad tiek patērēts tikai karstais ūdens, ir 3 MW. Maksimālā pīķa siltuma slodze apkures periodā pārsniedz 20 MW.



3.1. att. Analizētās CSA sistēmas temperatūras grafiks.

3.1. attēlā redzams, ka CSA sistēma darbojas ar temperatūras režīmu 90/60 °C. Vidējā turpgaitas un atgaitas temperatūra apkures sezonā ir 66 °C un 46 °C. Vasaras sezonā atgaitas temperatūra ir augstāka nekā apkures sezonā, un temperatūras starpība starp turpgaitas un atgaitas temperatūru ir neliela.

### 3.2. Tehnisko alternatīvu novērtēšana

#### Saules siltumenerģijas modelis

Ar saules kolektoru modeļa palīdzību tiek novērtētas dažādas tehniskās alternatīvas saules siltumenerģijas izmantošanai ar sezonālo akumulācijas tvertni un bez tās. Kopumā tiek salīdzināti seši saules CSA sistēmas scenāriji, kas atšķiras ar uzstādīto saules kolektora laukumu un siltumenerģijas akumulācijas tvertnes tilpumu (3.1. tab.). Pirmajā scenārijā netiek ietverta sezonālās akumulācijas sistēma, jo saražotā saules enerģija ir mazāka nekā faktiskais siltuma patēriņš vasaras periodā. Otrajā jeb pamatscenārijā saules enerģija nodrošina karstā ūdens patēriņu. Atlikušajos četros scenārijos tiek analizēti lielāki saules kolektoru lauki ar dažāda tilpuma sezonālās akumulācijas tvertnēm.

Kā viens no galvenajiem parametriem tiek modelēta ik stundas saules kolektora efektivitāte, kas nosaka no saules kolektoriem saražotā siltuma daudzumu. Konkrētai CSA

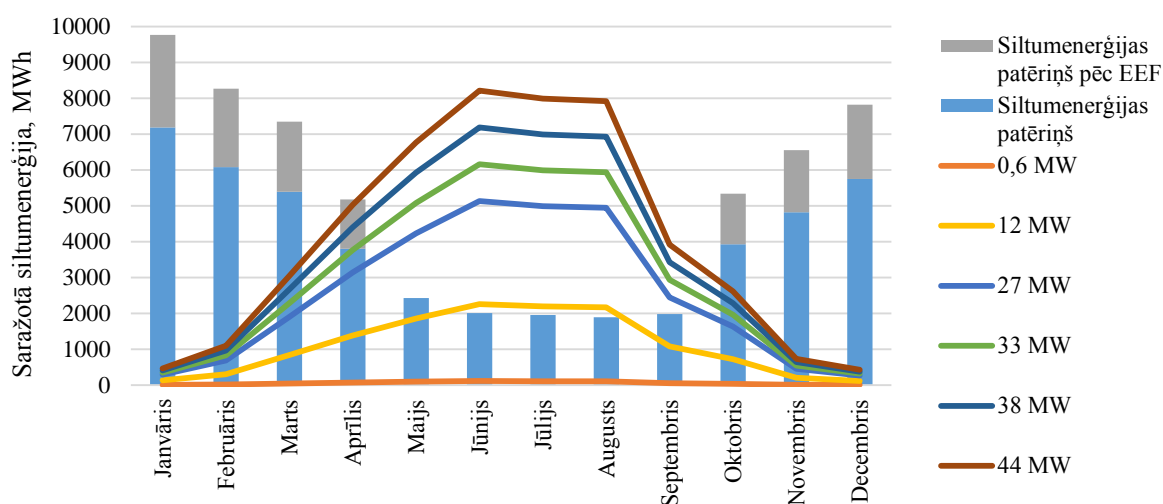
sistēmai teorētiskā saules kolektora efektivitāte ir aptuveni 0,66, tomēr to var palielināt, pārejot uz zemākas temperatūras režīmiem.

3.1. tabula

Analizētie saules siltumenerģijas CSA sistēmas scenāriji

Scenārijs	Saules kolektoru laukums, m <sup>2</sup>	Akumulācijas tvertnes tilpums, m <sup>3</sup>
S1	9000	0
S2	36 500	218 000
S3	45 600	272 000
S4	54 700	327 000
S5	63 800	382 000
S6	72 900	438 000

3.2. attēls parāda esošo siltuma pieprasījumu un iegūtos saules siltumenerģijas sistēmas rezultātus dažādiem scenārijiem. Saules starojuma intensitāte palielinās vasaras mēnešos. Lielākā daļa saules siltuma tiek ražota no jūnija līdz augustam, kad siltuma pieprasījums ir mazāks. Tomēr, kā liecina sistēmas analīze, 1. scenārija gadījumā ar 9000 m<sup>2</sup> saules kolektoru laukuma ir iespējams nodrošināt tikai pusi no nepieciešamā siltuma karstā ūdens patēriņam vasarā. Kopējais no saules enerģijas saražotā siltuma daudzums svārstās no 6000 MWh gadā 1. scenārijā līdz 23 700 MWh gadā 6. scenārijā. Tomēr, lai izmantotu visu šo enerģiju, 30–50 % saražotās saules enerģijas jāuzkrāj sezonālās akumulācijas tvertnē (3.2. att.). Aprēķinātie siltuma zudumi no akumulācijas tvertnes ir nelieli un svārstās no 600 MWh līdz 1300 MWh gadā. Tas ir saistīts ar relatīvi zemu temperatūru akumulācijas tvertnē, jo 6. scenārijā maksimālā temperatūra ir 64 °C.



3.2. att. Esošais siltumenerģijas patēriņš, siltumenerģijas patēriņš pēc energoefektivitātes pasākumiem ēkās (EEF) un saražotais saules siltums dažādiem scenārijiem.

Visiem scenārijiem tiek noteikts saules enerģijas īpatsvars (*SF*) kopējā CSA energobilancē, un tas svārstās no 10 % līdz 78 %. Analizējot sasniedzamā *SF* potenciālu, tiek novērtēta energoefektivitātes pasākumu ietekme, kad daļā ēku tiktu samazināts



siltumenerģijas patēriņš. Ja siltuma pieprasījums samazinās, *SF* palielinās, un 6. scenārijā ir iespējams visu siltumu nodrošināt ar saules enerģiju. Šādai sistēmai nepieciešamais akumulācijas tvertnes tilpums ir 438 000 m<sup>3</sup>.

### Saules elektroenerģijas modelis

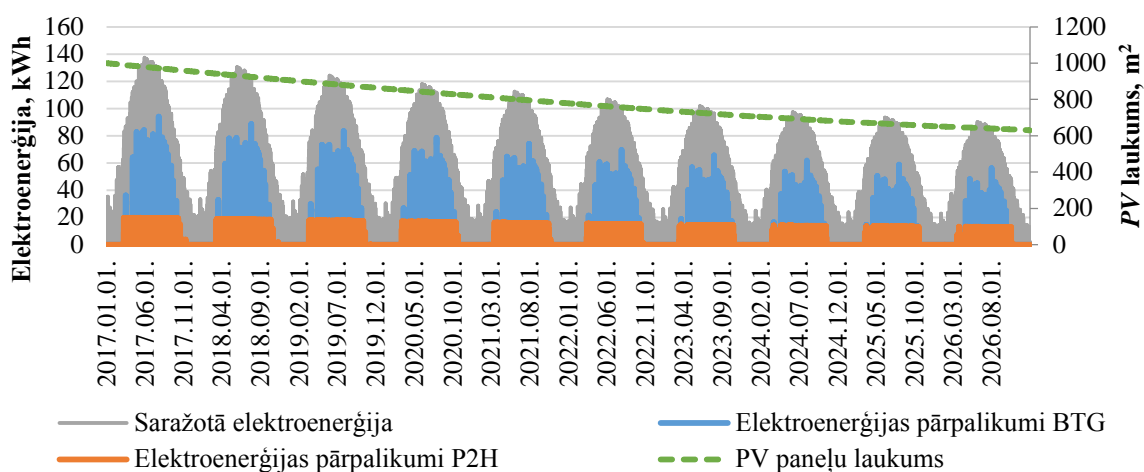
Vēl viena alternatīva saules enerģijas izmantošanai ir saules elektroenerģijas ražošana, ko var izmantot gan katlumājas iekārtu pašpatēriņa segšanai, gan ievadīt elektrotīklos, gan pārveidot par siltumenerģiju. Šajā sadaļā apkopoti dažādu saules *PV* paneļu sistēmu konfigurāciju rezultāti. Modelēšana veikta, izmantojot sistēmdinamikas (*SD*) metodi 10 gadu periodā, lai parādītu iegūto rezultātu ilgtermiņa attīstības dinamiku. Izstrādātais *SD* modelis novērtē dažādas saules *PV* paneļu alternatīvas. 3.2. tabulā ir apkopoti analizēto scenāriju galvenie raksturlielumi.

3.2. tabula

Pārskats par analizētajiem scenārijiem saules elektroenerģijas modelī

Scenārijs	Uzstādītais <i>PV</i> laukums m <sup>2</sup>	<i>HP</i> slodzes faktors
Bāzes scenārijs	1000	0,1
SC 1	100	0
SC 2	1000	0
SC 3	1000	0,05
SC 4	1000	0,2
SC 5	500	0
SC 6	500	0,05
SC 7	500	0,1

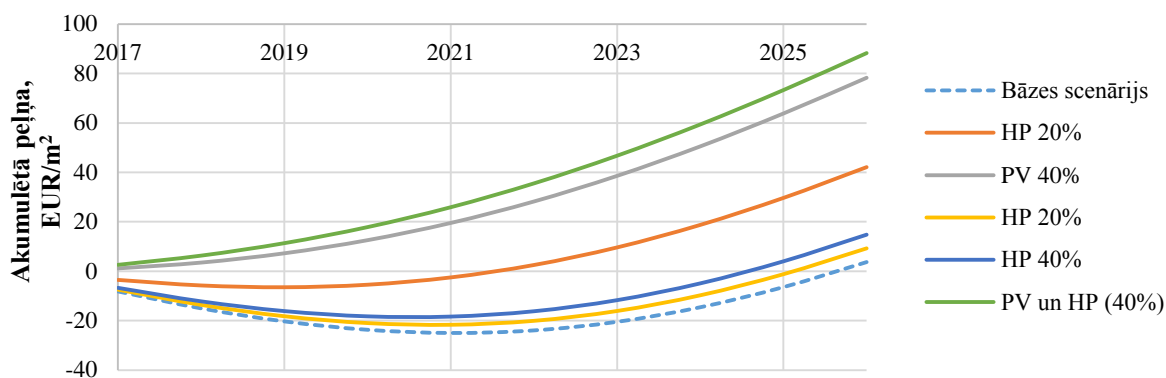
Bāzes scenārijs atspoguļo 1000 m<sup>2</sup> *PV* paneļu lietderīgā laukuma uzstādīšanu un *HP* ar sākuma jaudu 20 kW. Saražotā saules elektroenerģija tiek modelēta katru stundu atbilstoši pieejamajam saules starojumam. Tālāk tas tiek salāgots ar konkrētās stundas elektroenerģijas patēriņu un elektrības tirgus cenu.



3.3. att. Saražotā saules elektroenerģija, enerģijas pārpalikuma izmantošana (*P2H* un *BTG*) un *PV* paneļu laukam izmaiņas bāzes scenārijā

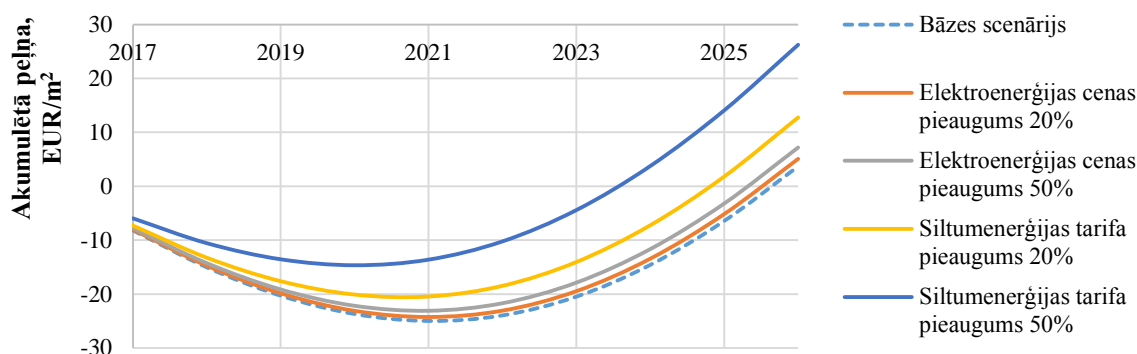
3.3. attēlā redzams pamatscenārijā saražotais saules elektroenerģijas daudzums, elektroenerģija, kas tiek tieši patērēta katlumājā un pāri palikusī elektroenerģija, ko ievada elektrotīklos vai pārveido par siltumenerģiju. Saules enerģijas īpatsvars pirmajā gadā sasniedz aptuveni 20 % no kopējā enerģijas patēriņa, bet desmitajā gadā samazinās līdz 13 %. Apmēram 81 % saražotās saules elektroenerģijas tiek izmantots tieši pašpatēriņam, bet atlikusī daļa ir enerģijas pārpalikums, ko var novadīt elektrotīklā (*BTG*) vai pārveidot siltumā (*P2H*), izmantojot *HP*, ja ik stundas elektrības cena ir zema.

Vairāki autori uzsvēruši, ka saules enerģijas integrācija un *P2H* koncepcija varētu būt izdevīgāka, izmantojot papildu atbalsta politikas vai dažādu tarifu piemērošanu (Moller et al., 2018; Schweigener et al., 2017; Kirkerund et al., 2017). Tāpēc *PV* integrēšanas izvērtējumā ir iekļauti scenāriji ar papildu atbalstu subsīdiju veidā *PV* paneļiem un *HP* iegādei un uzstādīšanai. 3.4. attēlā parādīti uzkrātās peļņas rādītāji dažādiem scenārijiem ar papildu politisko atbalstu līdzfinansējuma veidā. Iegūtie rezultāti tiek salīdzināti ar bāzes scenāriju. Subsīdijas *PV* paneļu uzstādīšanai (20 % un 40 % apmērā) uzrāda lielāku uzkrāto peļņas pieaugumu, salīdzinot ar atbalstu *HP*. Lielākā vērtība 88,25 EUR/m<sup>2</sup> tiek iegūta, apsverot atbalstu gan *PV* paneļiem, gan *HP* integrēšanai. Tomēr 40 % subsīdijas *PV* paneļu uzstādīšanai ļauj sasniegt tikai nedaudz mazāku uzkrātās peļņas daļu – 78,26 EUR/m<sup>2</sup>.



3.4. att. Akumulētas peļņas rādītājs scenārijiem ar dažādu subsīdiju apmēru.

Galvenais faktors, kas ietekmē *PV* paneļu uzstādīšana ienesīgumu, ir enerģijas izmaksas, kas tiek aizvietotas ar saules enerģijas izmantošanas izmaksām. 3.5. attēlā parādīta siltuma un enerģijas cenu pieauguma ietekme uz *PV* sistēmas uzkrāto peļņu. Ja siltuma cena palielinās par 20 %, uzkrātā peļņa palielinās par 71 %. Elektroenerģijas cenas pieaugums nerada tik vienmērīgu uzkrātās peļņas pieaugumu.



3.5. att. Akumulētas peļņas rādītājs scenārijiem ar elektroenerģijas cenas un siltumenerģijas tarifa pieaugumu.

Tomēr konkrētajā modelī scenārijos ar papildu atbalstu investīciju izmaksām un augstāku siltumenerģijas tarifu nepieaug pāri palikušās elektroenerģijas daudzums, kas tiek pārveidots siltumenerģijā. Tas ir saistīts ar mazo *HP* jaudu, kas nav pietiekama, lai pārvērstu visu elektroenerģijas pārpalikumu siltumā.

### Kombinētas saules sistēmas modelis

Kā alternatīvu saules CSA sistēmu autore salīdzina dažādus *PV* paneļu ar siltuma atgūšanas iespēju (*PVT*) uzstādīšanas scenārijus. Scenāriji atšķiras pēc uzstādītā *PVT* laukuma un elektroenerģijas pārpalikumu izmantošanas iespējām (3.3. tab.).

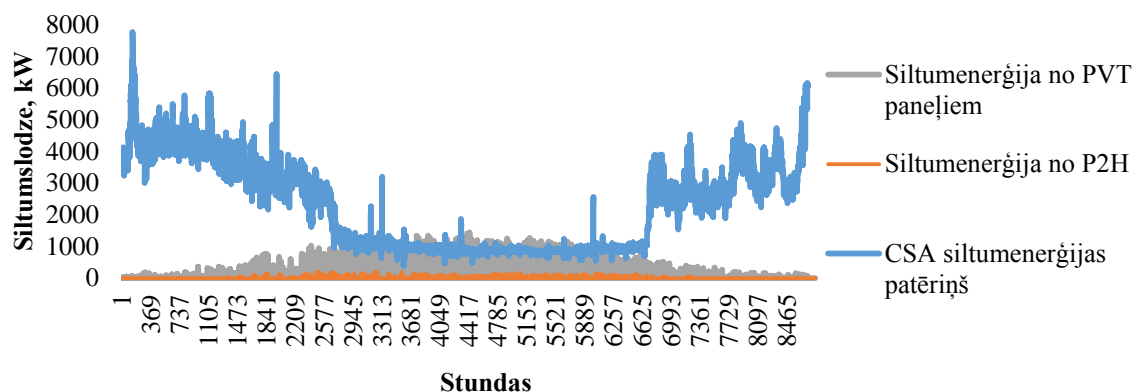
3.3. tabula

#### Analizēto *PVT* sistēmu scenāriji

Scenārijs	Uzstādītais laukums, m <sup>2</sup>	<i>PVT</i> siltuma jauda, kW	<i>PVT</i> elektriskā jauda, kW	Siltuma pārpalikumu izmantošana	Akumulatoru jauda, kWh
1.scenārijs	1000	600	150		–
2.scenārijs	1500	900	225	Novadīts elektrotīklā vai pārveidots siltumenerģijā	–
3.scenārijs	2000	1200	300		–
4.scenārijs	2500	1500	375		–
5.scenārijs	3000	1800	450		–
6.scenārijs	2000	1200	300	Uzkrāts akumulatorā vai nodots tīklā	250
7.scenārijs	2500	1500	375		300
8.scenārijs	3000	1800	450		350

Uzstādot 1000 m<sup>2</sup> *PVT* paneļu (1.scenārijs), lielākā daļa (88 %) saražotās saules elektroenerģijas tieši sedz katlumājas pašpatēriņu. Tikai neliela daļa ir jānodod tīklā (*BTG*) vai jāpārveido siltumā (*P2H*) ar elektriskā boileru palīdzību. Saules enerģijas īpatsvars elektroenerģijas patēriņa segšanai sasniedz tikai 13 %. Atšķirīga situācija ir novērojama S3 scenārijā, kad tiek uzstādīts 3000 m<sup>2</sup> *PVT* paneļu. Šajā scenārijā maksimālā saražotā elektroenerģija vasaras periodā ir gandrīz tāda pati kā kopējais elektroenerģijas patēriņš gadā, līdz ar to rodas elektroenerģijas pārpalikums.

Saules siltums, ko saražo *PVT* paneļi, tiek tieši izmantots *CSA* siltuma slodzes segšanai. Analizētajā modelī siltuma pieprasījums vasaras periodā ir salīdzinoši augsts, tāpēc gandrīz visu saules siltumu pat 3000 m<sup>2</sup> *PVT* scenārijā var izmantot karstā ūdens sagatavošanai vasarā (3.6. att.).



3.6. att. *CSA* siltuma slodze un saražotā saules siltumenerģijas 5. scenārijā.

Maksimālais saules enerģijas īpatsvars siltuma patēriņa segšanai sasniedz 7 %. 5. scenāriju un 8. scenārija gadījumā. Siltuma pieprasījums ziemas periodā strauji palielinās ēku apkures dēļ, un to nevar pilnībā segt ar saules enerģiju bez papildu uzkrāšanas tehnoloģijām.

### 3.3. Piemērotākās alternatīvas izvēle

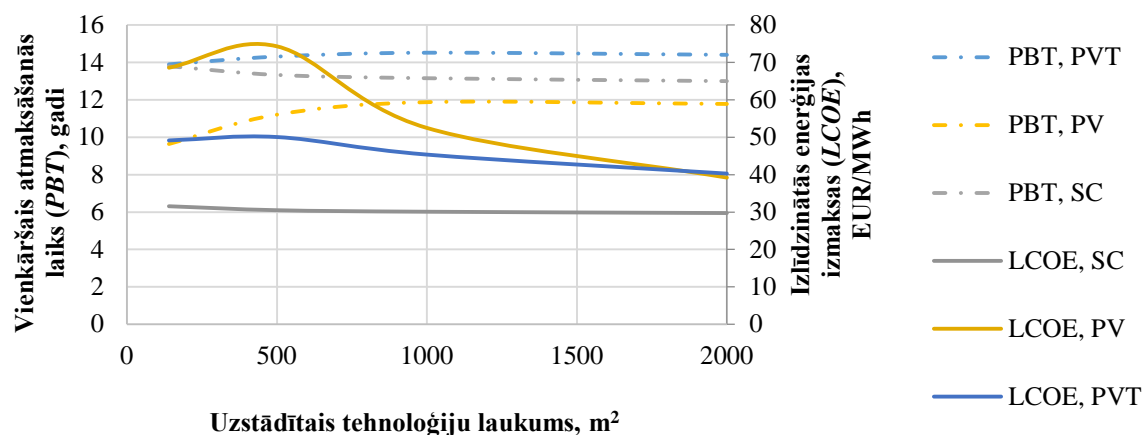
Šajā sadaļā sniegts saules siltumenerģijas, saules elektroenerģijas un saules kombinētās sistēmas modeļu rezultātu salīdzinājums, veicot ekonomisko un vides analīzi. No izveidotajiem modeļiem atlasīti pamatotākie scenāriji tālākam izvērtējumam (sk. 2.3. nodaļu). Galvenie analizēto scenāriju rezultāti ir apkopoti 3.4. tabulā.

3.4. tabula

Pārskats par analizēto scenāriju rezultātiem

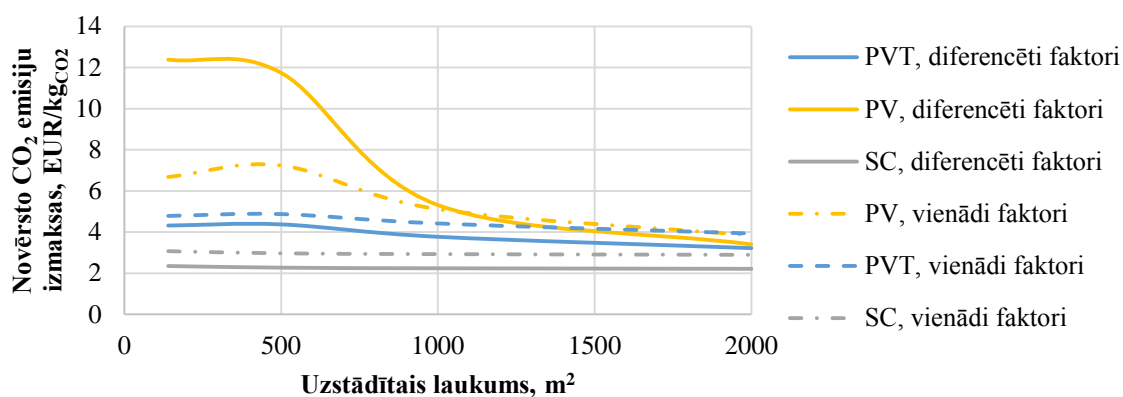
Scenārijs	Saražotā saules elektroen., MWh gadā	Patērētā saules elektroen., MWh gadā	Elektroen. <i>BTG</i> , MWh	Elektroen. <i>P2H</i> , MWh	Saules siltumen., MWh	Siltums no <i>P2H</i> , MWh	Lietderīgā ekserģija, MWh
<b><i>PVT 1</i></b>	24	24	0	0	69	0	83
<b><i>PVT 2</i></b>	86	84	0	1	245	6	300
<b><i>PVT 3</i></b>	171	135	2	34	490	150	687
<b><i>PVT 4</i></b>	342	189	11	142	980	604	1563
<b><i>PV 1</i></b>	25	25	0	0	n/a	0	25
<b><i>PV 2</i></b>	91	88	0	2	n/a	10	97
<b><i>PV 3</i></b>	181	139	3	39	n/a	174	291
<b><i>PV 4</i></b>	362	194	13	156	n/a	683	794
<b><i>SC 1</i></b>	n/a	n/a	n/a	n/a	102	n/a	88
<b><i>SC 2</i></b>	n/a	n/a	n/a	n/a	364	n/a	313
<b><i>SC 3</i></b>	n/a	n/a	n/a	n/a	728	n/a	625
<b><i>SC 4</i></b>	n/a	n/a	n/a	n/a	1455	n/a	1251

Lai novērtētu saules tehnoloģiju ekonomiskos aspektus, noteikti ekonomiskie rādītāji katram no scenārijiem (3.7. att.). Viszemākās izlīdzinātās enerģijas izmaksas (*LCOE*) tiek sasniegtas *SC* scenāriju gadījumā, un tās ir mazāk atkarīgas no uzstādītās sistēmas jaudas. Pretēji rezultāti tiek novēroti *PV* sistēmu gadījumā, kurā *LCOE* vērtība ļoti atšķiras maza mēroga sistēmai (ap 68,59 EUR/MWh) un liela mēroga sistēmai (39,21 EUR/MWh).



3.7. att. Ekonomiskie rādītāji (vienkāršais atmaksāšanās laiks (*PBT*) un izlīdzinātās enerģijas izmaksas (*LCOE*)) dažādiem analizētajiem scenārijiem.

Kā vides aspekts tiek aprēķinātas īpatnējās novērstās CO<sub>2</sub> emisijas uz saules tehnoloģiju kapitālizmaksām (kg<sub>CO2</sub>/EUR). Novērtējot ieguvumus videi, ir svarīgi noteikt atsaucēs enerģijas sistēmu, ko aizstāj ar saules enerģiju, tāpēc konkrētajā pētījumā tiek pieņemts, ka saules enerģija ļaus aizvietot CSA saražoto siltumenerģiju un elektroenerģiju no tīkliem, vai arī enerģiju, ko ražo ar dabasgāzi (gan siltumu, gan elektroenerģiju). 3.8. attēlā parādīti aizvietoto CO<sub>2</sub> emisiju rezultāti pie diferencētu emisiju koeficientu piemērošanas (elektrībai no elektrotīkliem (109 t<sub>CO2</sub>/MWh) un siltumam no CSA (264 t<sub>CO2</sub>/MWh)) un pie vienādu CO<sub>2</sub> emisijas koeficientu (dabasgāze 202 t<sub>CO2</sub>/MWh) izmantošanas. Visaugstākās novērsto emisiju izmaksas ir *PV* scenāriju gadījumos, kad tiek piemēroti diferencēti koeficienti, kas ir zemāki.



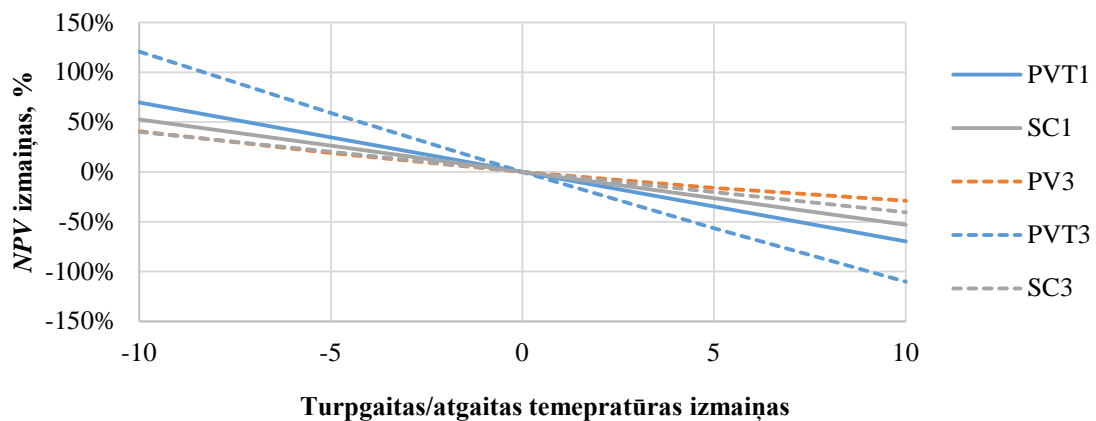
3.8. att. Novērsto CO<sub>2</sub> emisiju izmaksu salīdzinājums dažādos scenārijos.

Ekonomiskās un vides analīzes rezultāti tiek tālāk izmantoti daudzkritēriju analīzē, lai noteiktu galveno kritēriju vērtības.

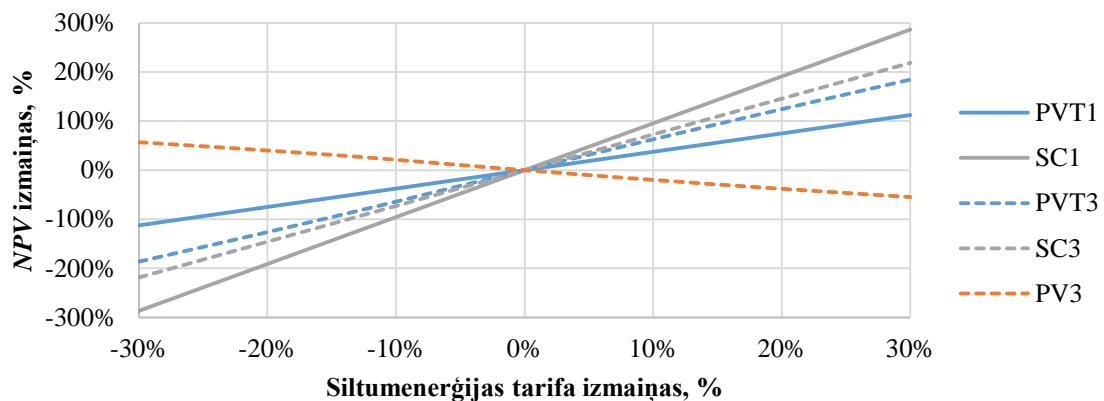
## Jūtības analīze

Nemot vērā aktuālās diskusijas par nepieciešamību pazemināt CSA siltumtīklu temperatūru, siltumnesēja turpgaitas un atgaitas plūsmas temperatūra ir viens no mainīgajiem lielumiem, kas ietekmē saules sistēmu darbību un ekonomiskos rādītājus. Siltumnesēja temperatūras pazemināšana ietekmē saules kolektoru un siltumsūkņa *COP* efektivitāti. 3.9. attēlā redzams, ka kombinētie *PV* paneļi (īpaši *PVT3* scenārijā) ir visjutīgākie, jo pazemināta temperatūra ietekmē gan siltumenerģijas ražošanu, gan elektroenerģijas pārpalikuma pārveidošanu siltumenerģijā. Samazinot turpgaitas temperatūru par 10 °C, neto pašreizējā vērtība (NPV) *PVT3* scenārijā palielinās par vairāk nekā 100%. Temperatūras izmaiņu ietekme uz *PV* scenārijiem ir nenozīmīga.

Darbā tiek analizēti dažādi siltuma tarifi, jo siltumenerģijas tarifa vērtība nosaka elektroenerģijas pārpalikuma izmantošanu – vai nu to nodošanu tīklos (*BTG*), vai arī pārveidošanu par siltumu (*P2H*). Tiek pieņemts, ka siltumenerģijas ražošanas tarifs mainās no pašreizējiem 45 EUR/MWh par 30%. Ja siltuma cena samazinās par 20%, lielāko daļu no *PVT* paneļu sarāžotās elektroenerģijas pārdod elektrotīklā nevis pārveido par siltumu (*P2H*). Turpretī, ja siltuma tarifs palielinās, lielākā daļa enerģijas pārpalikuma tiek pārveidota par siltumu.



3.9. att. NPV vērtības izmaiņas atkarībā no turpgaitas un atgaitas temperatūras izmaiņām.



3.10. att. NPV vērtības izmaiņas atkarībā no siltumenerģijas tarifa.

Siltumenerģijas tarifs ir identificēts kā virzošais faktors, kas ietekmē saules siltuma sistēmas ekonomiskos rādītājus. Ja siltumenerģijas cena mainās par 30 %, saules kolektoru scenārijos NPV vērtība var mainīties pat par 300 % (3.10. att.). Liela mēroga PV scenārija gadījumā ietekme nav tik liela.

### Daudzkritēriju analīzes rezultāti

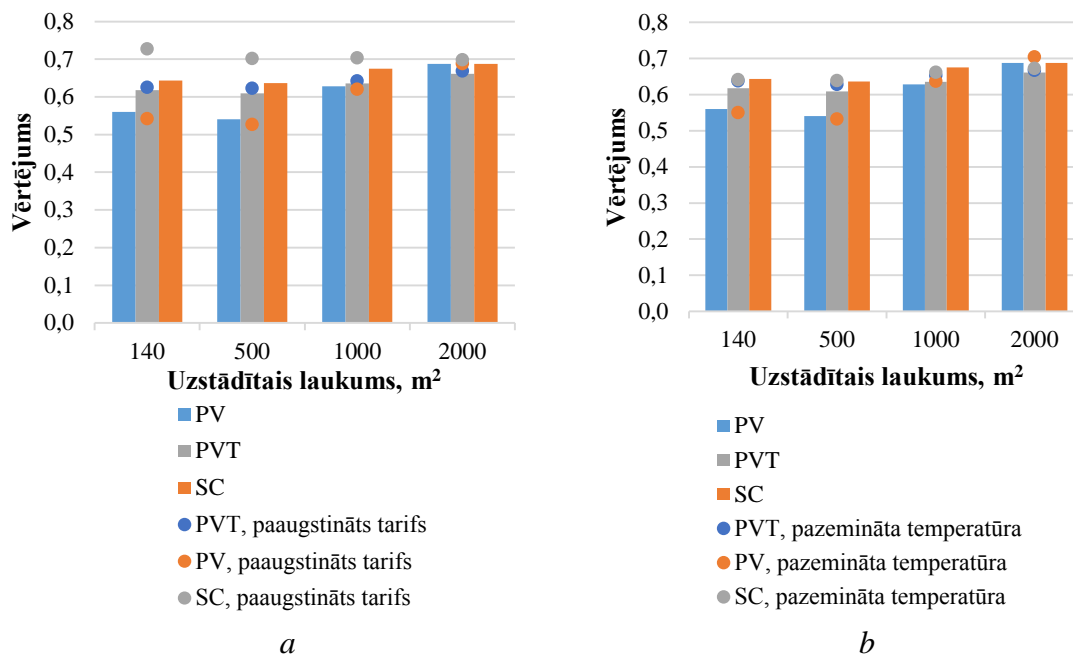
Saules PV, PVT paneļu un kolektoru modeļu un jutīguma analīzes rezultāti tiek izmantoti daudzkritēriju analīzes modelī, lai noteiktu dažādus kritērijus. 3.5. tabulā parādītas katra scenārija dažādu rādītāju vērtības, kas tālāk normalizētas ar *TOPSIS* un *AHP* metodēm. Analīzē izmantoti šādi kritēriji: saules īpatsvars (*SF*); pašpatēriņa indekss (*SELFICI*); kopējais ekonomiskais ietaupījums (*TS*); pašreizējā neto vērtība (NPV); īpatnējā lietderīgā ekserģija (*SUE*); elastības ietaupījumi (*FS*); izlīdzinātas enerģijas vienības izmaksas (*LCOE*); kopējās izmaksas (*TC*); vienkāršais atmaksāšanās laiks (*PBT*); īpatnējās ekspluatācijas izmaksas (*SOC*); novērtās CO<sub>2</sub> izmaksas (*C<sub>AV,CO2</sub>*)

Daudzkritēriju analīzes rezultāti, izmantojot *TOPSIS* metodi (3.11. att.), parāda, ka optimāls uzstādāmās saules tehnoloģijas risinājums atšķiras dažādiem analizēto sistēmu mērogiem. Saules sistēmas platībai līdz 1000 m<sup>2</sup> visizdevīgākais risinājums ir saules kolektoru uzstādīšana. Liela mēroga sistēmai (2000 m<sup>2</sup> uzstādītās platības) rezultāti ir vienādi saules kolektoru un PV paneļu tehnoloģijām.

3.5. tabula

Pārskats par daudzkritēriju analīzē izmantoto kritēriju vērtībām

Kritērijs	Scenāriji											
	<i>PVT 1</i>	<i>PVT 2</i>	<i>PVT 3</i>	<i>PVT 4</i>	<i>PV 1</i>	<i>PV 2</i>	<i>PV 3</i>	<i>PV 4</i>	<i>SC 1</i>	<i>SC 2</i>	<i>SC 3</i>	<i>SC 4</i>
<b>1. <i>SF</i></b>	0 %	2 %	4 %	8 %	0 %	0 %	1 %	4 %	0 %	2 %	3 %	7 %
<b>2. <i>SCI</i></b>	100 %	100 %	96 %	92 %	100 %	98 %	88 %	84 %	100 %	100 %	100 %	100 %
<b>3. <i>TS</i></b>	46	46	48	49	25	26	27	29	33	33	33	33
<b>4. NPV</b>	116	98	96	109	142	105	101	119	67	83	88	94
<b>5. <i>SUE</i></b>	0,9	0,9	1,0	1,1	0,7	0,7	0,9	1,1	1,4	1,4	1,5	1,5
<b>6. <i>FS</i></b>	0,0	0,5	5,9	11,7	0,0	0,8	6,8	13,2	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>7. <i>LCOE</i></b>	49	50	45	40	69	74	52	39	32	30	30	30
<b>8. <i>TC</i></b>	640	661	694	709	245	287	326	345	452	437	431	426
<b>9. <i>PBT</i></b>	14	14	15	14	10	11	12	12	14	13	13	13
<b>10. <i>SOC</i></b>	9,1	8,9	7,4	6,2	24,8	22,4	12,7	8,6	6,9	6,9	6,9	6,9
<b>11. <i>C<sub>CO2</sub></i></b>	4,3	4,4	3,8	3,2	12,4	11,7	5,3	3,4	2,4	2,3	2,2	2,2



3.11. att. Daudzkritēriju analīzes rezultāti atsauces scenārijiem un scenārijiem ar a) paaugstinātu siltuma tarifu b) un pazeminātu siltumtīklu temperatūru.

No veiktās jutības analīzes redzams, ka ir vairāki mainīgie, kas būtiski ietekmē kopējo saules sistēmu darbību. Tāpēc tiek atkārtota daudzkritēriju analīze pie paaugstināta siltuma tarifa scenārijam (no 45 EUR/MWh līdz 59 EUR/MWh) un par 10 °C pazeminātas siltumtīklu temperatūras. 3.11. attēlā redzami iegūtie rezultāti siltuma tarifa pieauguma (a) un temperatūras pazemināšanās (b) gadījumā. Siltumenerģijas tarifu pieauguma ietekme ir lielāka maza mēroga sistēmām, kad saules kolektoru scenārijiem ir ievērojams pieaugums, salīdzinot ar citām alternatīvām. Temperatūras pazemināšanās gadījumā liela mēroga PV sistēmai tiek novērotas lielākas atšķirības no atsauces scenārijiem, jo siltumsūkņa efektivitāte ir augstāka.



## SECINĀJUMI

Darbā ir aprakstīta jauna metodika saules enerģijas integrācijas novērtēšanai zemas temperatūras CSA sistēmā, kas ietver esošās situācijas novērtējumu, ilgtermiņa attīstības virziena noteikšanu, dažādu tehnoloģisko alternatīvu identificēšanu un klasificēšanu, pastāvīgu uzraudzību un secinājumu izdarīšanu turpmākai attīstībai.

Lai pārbaudītu metodoloģiju un salīdzinātu dažādu tehnoloģiskos risinājumus piemērotību integrēšanai CSA, darbā ir izstrādāti trīs dažādi saules enerģijas modeļi. Lai salīdzinātu dažādu saules siltuma un elektroenerģijas tehnoloģisko risinājumu rādītājus, tiek izmantota daudzkritēriju analīzes metode. Izstrādāto metodiku var izmantot CSA uzņēmumi un politikas veidotāji dažādu saules enerģijas integrācijas scenāriju pārbaudei.

Darbā saules PV paneļu sistēmas modelēšanai izmantota arī sistēmdinamikas metode, kas ļauj novērtēt dinamisku faktoru (tehnoloģiju izmaksu, efektivitātes, enerģijas izmaksu u. c.) un dažādu politikas virzienu ilgtermiņa ietekmi uz saules enerģijas izmantošanas potenciālu. Jutīguma analīze identificē galvenos mainīgos lielumus, kas ietekmē kopējo saules sistēmas veiktspēju dažādu alternatīvu gadījumā.

### CSA sistēmas nākotnes attīstība

Paaugstināta energoefektivitāte ēkās, siltumtīklu temperatūras pazemināšana un saules enerģijas integrācija ir identificēti kā konkrētas CSA sistēmas ilgtermiņa attīstības virzieni. Attīstot zema patēriņa ēku būvniecību un renovāciju, CSA uzņēmumi būs ieinteresēti pazemināt siltumnesēja temperatūru, lai samazinātu īpatnējās pārvades izmaksas. Ceturtās paaudzes CSA sistēmai ir liels potenciāls nākotnē pieaugošās ēku energoefektivitātes dēļ.

CSA sistēmas novērtējuma rezultāti rāda, ka pāreja uz zemākas temperatūras režīmu var samazināt pārvades izmaksas un palielināt integrētu saules siltuma sistēmu efektivitāti. Samazinoties ēku siltumenerģijas patēriņam, esošās CSA sistēmas ar augstu temperatūras režīmu kļūst neefektīvas, jo īpatnējās pārvades izmaksas palielinās par vairāk nekā 50 %. Lai motivētu renovēto un jaunuzcelto ēku īpašniekus pieslēgties CSA sistēmai, ir nepieciešams samazināt vai diferencēt siltuma tarifus, izmantot lētākus enerģijas avotus un/vai samazināt pārvades izmaksas.

Pētījumā uzsvērts, ka CSA uzņēmuma pāreja no fosilā kurināmā uz atjaunojamo enerģiju (tai skaitā, saules enerģiju) var gan samazināt siltumenerģijas tarifu, gan emisiju daudzumu, kas savukārt palīdz Latvijai sasniegt nepieciešamo emisiju samazinājumu ne-ETS sektorā. Ceturtās paaudzes CSA sistēmu ieviešana Baltijas valstīs jāiekļauj stratēģiskajos ilgtermiņa plānošanas dokumentos, lai novērstu dažādus ieviešanas šķēršļus, piemēram, ēku attīstītāju zemā motivācija pielāgot ēkas zemas temperatūras režīmam.

## Saules enerģijas integrēšana CSA sistēmā

Pastāv vairāki tehniskie risinājumi saules enerģijas integrēšanai CSA sistēmā. Konkrētajā pētījumā autore salīdzina saules elektroenerģijas, saules siltumenerģijas un kombinētās saules enerģijas sistēmu dažādus risinājumus, ņemot vērā atšķirīgas pieejas enerģijas patēriņa un piedāvājuma salāgošanai un dažādus uzstādīto sistēmu mērogus.

Ievērojams *PV* paneļu cenas samazinājums veicina saules elektroenerģijas integrācijas paplašināšanu dažādiem lietojumiem. Tomēr izveidotā sistēmdinamikas modeļa saules elektroenerģijas rezultāti rāda, ka bez papildu finansiālā atbalsta nav rentabli uzstādīt lielāku *PV* paneļu laukumu, nekā nepieciešams vasaras elektrības patēriņa segšanai. Bāzes scenārijā 10 gadu laikā kopējā uzstādītā *PV* platība samazinās par 37 %, jo netiek gūta pietiekama peļņa no saražotās elektroenerģijas. Lielākā uzkrātā peļņas vērtība tika iegūta scenārijā ar mazāku *PV* laukumu, kad visu saražoto saules elektroenerģiju izmanto pašpatēriņam (katlu, sūkņu un citu iekārtu darbināšanai).

Saules siltumenerģijas modelis konkrētai CSA sistēmai rāda, ka ar 9000 m<sup>2</sup> līdz 72 900 m<sup>2</sup> lielu saules kolektoru lauku ar piemērota lieluma sezonālo akumulācijas tvertni varētu saražot no 6000 MWh līdz 23 700 MWh saules siltumenerģijas gadā. Ar šādu sistēmu būtu iespējams segt no 10 % līdz 78 % no kopējā siltuma pieprasījuma konkrētā CSA sistēmā. Paredzot, ka tiktu ieviesti energoefektivitātes pasākumi ēkās, būtu iespējams sasniegt pat 95 % saules enerģijas īpatsvaru. Šādas liela mēroga saules siltumenerģijas sistēmas kopējās kapitālizmaksas ir augstas, bet aprēķinātās īpatnējās izmaksas ir salīdzināmas ar izmaksām enerģijas atsauces sistēmai, piemēram, dabasgāzes katlumājam.

Izstrādātais saules kombinētās sistēmas modelis, kurā integrēti *PV* paneļi ar siltuma atgūšanas iespēju (*PVT* paneļi), rāda, ka augstāku saules enerģijas īpatsvaru (38 %) var iegūt maksimālās *PVT* uzstādīšanas scenārijā ar pievienotu enerģijas uzkrāšanas sistēmu, bet šis scenārijs rada arī visaugstākās izmaksas. Ekonomiskā analīze rāda, ka visaugstākā neto pašreizējās plūsmas (NPV) vērtība un zemākā izlīdzināto izmaksu vērtība (*LCOE*) ir scenārijam ar maksimāli uzstādītu *PVT* laukumu un bez litija-jonu akumulatoriem. Aprēķinātā *LCOE* vērtība visiem scenārijiem ir zemāka par pieņemtajām enerģijas atsauces sistēmas izmaksām, bet tā ir ļoti atkarīga no izdarītajiem pieņēmumiem attiecībā uz saules sistēmas izmaksām. Īpatnējo novērsto CO<sub>2</sub> emisiju izmaksu novērtējums rāda, ka optimālais scenārijs konkrētajai CSA sistēmai ir tāds, kurā tiek uzstādīti 2000 m<sup>2</sup> *PVT* paneļu.

Daudzkritēriju analīzes rezultāti rāda, ka atsauces scenārijos visizdevīgākais risinājums ir saules kolektoru uzstādīšana, bet liela mēroga sistēmai rezultāti ir līdzīgi gan saules kolektoru, gan *PV* paneļu sistēmām. Gadījumā, ja tiek pazemināta siltumtīklu temperatūra, vēlamākais risinājums liela mēroga sistēmas ieviešanas gadījumā ir *PV* scenārijs.

## Galvenie faktori, kas ietekmē saules enerģijas integrēšanu CSA

Balstoties uz izstrādātajiem saules enerģijas modeļiem ir noteikti dažādi kritēriji tālākai saules enerģijas integrēšanas analīzei: tehnoloģiskie (saules enerģijas īpatsvars, pašpatēriņa indekss, lietderīgā ekserģija), ekonomiskie (kopējie ietaupījumi un izmaksas, vienkāršais

atmaksāšanās laiks, NPV, *LCOE*, īpatnējās ekspluatācijas izmaksas) un vides (novērsto CO<sub>2</sub> emisiju izmaksas). Iegūtās kritēriju vērtības dažādiem saules sistēmu scenārijiem ir atšķirīgas. Īsākais atmaksāšanās laiks ir *PV* sistēmām, kas svārstās no 10 līdz 12 gadiem, bet zemākā *LCOE* vērtība ir saules kolektoru scenārijiem – no 31,56 EUR/MWh līdz 29,74 EUR/MWh. Lielākā NPV vērtība (vairāk nekā 230 000 EUR) tika iegūta liela mēroga *PV* scenārijā. Zemākās novērsto emisiju izmaksas tiek iegūtas saules kolektoru scenārijos – 2,3 EUR/kg<sub>CO2</sub>, piemērojot diferencētus CO<sub>2</sub> koeficientus saules siltumam un saules elektroenerģijai.

Analizētajos scenārijos ir iekļauta saules *PV* vai *PVT* paneļu elektroenerģijas ražošanas sistēma, kurā integrēts siltumsūkņis, lai pārpalikuma elektroenerģiju pārveidotu par siltumu. Šāda pārvaldība ļauj palielināt kopējo sistēmas elastību. Modelī tiek analizēta ik stundas enerģijas tirgus cena, tā salīdzināta ar siltumenerģijas ražošanas izmaksām, un tiek pieņemts lēmums par labāko elektroenerģijas pārpalikuma izmantošanu – vai nu to eksportēt elektrotīklā vai arī pārveidot par siltumenerģiju, lai segtu CSA siltuma slodzi. Paredzami elastīguma ieguvumi šādai koncepcijai ir gandrīz 7000 EUR gadā lielāka mēroga *PV* scenārija gadījumā un gandrīz 6000 EUR gadā *PVT* scenārija gadījumā.

Jutīguma analīzē tiek vērtēta dažādu saules tehnoloģiju kapitālizmaksu, siltumapgādes tīklu temperatūras un siltuma un elektroenerģijas cenu ietekme uz iegūtajiem rezultātiem. Siltumtīklu temperatūras pazemināšana (turpgaitas un atgaitas) sniedz ievērojamu NPV vērtības pieaugumu *PVT* un *SC* scenārijos. Saules tehnoloģiju izmaksu izmaiņas būtiskāk ietekmē *PVT* scenāriju rezultātus, jo paneļa izmaksas veido lielāku īpatsvaru kopējās kapitālizmaksās. Elektroenerģijas cenu izmaiņas ietekmē tikai *PV* un *PVT* scenārijus, bet siltumenerģijas tarifa izmaiņas ietekmē gandrīz visas analizētās saules sistēmas (izņemot maza mēroga *PV*), jo tas nosaka arī enerģijas pārpalikuma izmantošanas veidu. Siltumenerģijas tarifa pieaugums par 30 % rada NPV vērtības pieaugumu par gandrīz 300 % maza mēroga saules kolektoru scenārija gadījumā.

Rezultāti rāda, ka, ja tiek ieviestas liela mēroga saules elektrostacijas CSA, jāapsver siltumsūkņa integrācija, lai elektroenerģijas pārpalikumu pārvērstu siltumā. Ievērojamu ekonomisko rādītāju pieaugumu var iegūt, ja saules enerģijas sistēmas tiek ieviestas zemākas temperatūras CSA tīklā.

## LITERATŪRAS SARAKSTS

- Averfalk H., Ingvarsson P., Persson U., Gong M., Werner S. (2017). Large heat pumps in Swedish district heating systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 1275–1284
- Averfalk H., Werner S. (2017). Essential improvements in future district heating systems. *Energy Procedia*, 116, 17–225
- Dobrotkova P.A., Surana K., Audinet P. (2018). The price of solar energy: Comparing competitive auctions for utility-scale solar PV in developing countries. *Energy Policy*, 118, 133–48
- Dynova L., Sevastjanov P., Tikhonenko A. (2013). A direct Interval Extension of TOPSIS Method. *Expert Systems with Applications*, 40 (12), 4841–4847
- Elcia M., Oliva A., Herkel S., Klein K., Ripka A. (2015). Grid-interactivity of a solar combined heat and power district heating system. *Energy Procedia*, 70, 560–567
- Elmegaard B., Ommen T.S., Markussen M., Iversen J. (2016). Integration of space heating and hot water supply in low temperature district heating. *Energy and Buildings*, 124, 255–264
- EP (European Parliament and the Council of the European Union) (2012). Directive 2012/27/EU on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC. *Official Journal of the European Union*, 315, 1–56
- Feldman D., Barbose G., Margolis R., James T. et.al. (2014). Photovoltaic System Pricing Trends Historical, Recent, and Near-Term Projections Edition. Available at: <https://www.nrel.gov/docs/fy15osti/64898.pdf> [Accessed 07.03.2010]
- Gravlsins A., Pakere I., Tukulis A., Blumberga D. (2019). Solar power in district heating. P2H flexibility concept *Energy* 181, 1023–1035
- Jiang X.S., Jing Z.X., Li Y.Z., Wu Q.H., Tang W.H. (2014). Modelling and operation optimization of an integrated energy based direct district water-heating system. *Energy*, 64, 375–388
- Kirkerud G.J., Bolkesjø T.F., Trømborg E. (2017). Power-to-heat as a flexibility measure for integration of renewable energy. *Energy*, 128, 776–784
- Latosov E., Volkova A., Siirde A., Thalfeldt M., Kurnitski J. (2019) The Impact of Parallel Energy Consumption on the District Heating Networks. *Environmental and Climate Technologies*, 23, 1–13
- Laurenzutti R., Krohling R. (2014). The Hellinger Distance in Multicriteria Decision Making: An illustration to the TOPSIS and TODIM methods. *Expert Systems with Applications*, 41, 4414 – 4421
- Loken E. (2007). Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(7), 1584–1595.
- Lund H. (2007). Renewable energy strategies for sustainable development. *Energy*, 32, 912–919
- Lund H., Werner S., Wiltshire R., Svendsen S., Thorsen J.E., Hvelplund F. (2014) 4th Generation District Heating (4GDH). Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *Energy*, 68, 1–11
- Makki A. S., Omer H. S. (2015). Advancements in hybrid photovoltaic systems for enhanced solar cells performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 658–684

- Moller M., Sandberg E., Koduvere H., Olsend O.J., Blumberga D. (2018). Policy incentives for flexible district heating in the Baltic countries. *Utilities Policies*, 51, 61–72
- Ostergaard P.A., Lund H. (2011). A renewable energy system in Frederikshavn using low-temperature geothermal energy for district heating. *Applied Energy*, 88(2), 479–487
- Ostergaard P.A., Mathiesen B.V., Möller B., Lund H. (2010). A renewable energy scenario for Aalborg Municipality based on low-temperature geothermal heat, wind power and biomass. *Energy*, 35 (12), 4892–4901
- Pakere I, Ziemele J, Blumberga D. (2017). DH company in prosumers role. *Energy Procedia*, 128, 234–239
- Pakere, I., Lauka, D., Blumberga, D. (2018). Solar power and heat production via photovoltaic thermal panels for district heating and industrial plant *Energy*, 154, 424–432
- Rama M., Mohammad S. (2017). Comparison of distributed and centralised integration of solar heat in a district heating system. *Energy*, 137, 649–660
- Rosa D. A., Boulter R., Church K., Svendsen S. (2012). District heating network design and operation toward a system-wide methodology for optimizing renewable energy solutions (SMORES) in Canada: A case study. *Energy*, 45(1), 960–974
- Saeima (The Parliament of the Republic of Latvia) (2016). Energy Efficiency Law. *Latvijas Vēstnesis*, 52 (5624)
- Sakellariou E, Axaopoulos P. (2017). Simulation and experimental performance analysis of a modified PV panel to a PVT collector. *Solar Energy*, 155, 715–26
- Samal R.K., Kansal M.L. (2015). Sustainable development contribution assessment of renewable energy projects using AHP and compromise programming techniques. *International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Sustainable Growth (ICEPE)*, Shilling, 1–6
- Schweiger G., Rantzer J., Ericsson K., Lauenburg P. (2017). The potential of power-to-heat in Swedish district heating systems. *Energy*, 137, 661–669
- Shannon C.E., Weaver W. (1949). *The Mathematical Theory of Communication* University of Illinois. *Urbana University of Illinois Press*, 85, 24–30
- Soloha, R., Pakere, I., Blumberga, D. (2017). Solar energy use in district heating systems. A case study in Latvia *Energy*, 137, 586–594
- Tulus V., Boer D., Cabeza L. F., Jiménez L., Guillén- Gosálbez G. (2016). Enhanced thermal energy supply via central solar heating plants with seasonal storage: A multi-objective optimization approach. *Applied Energy* 2016; 181, 549–561