

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultāte

Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

Ilze Silīņa

Studiju programmas “Vides zinātne” doktorante

**ENERGOPĀRVALDĪBAS SISTĒMA
KLIMATNEITRĀLĀ CENTRALIZĒTAJĀ
SILTUMAPGĀDĒ**

Promocijas darbs

Zinātniskās vadītājas:

profesore *Dr. habil. sc. ing.*
DAGNIJA BLUMBERGA,

asociētā profesore
Ph. D. Ieva Pakere

RTU Izdevniecība
Rīga 2022

Siliņa I. Energopārvaldības sistēma klimatneitrālā
centralizētajā siltumapgādē. Promocijas darba
kopsavilkums. – Rīga: RTU, 2022. – 33 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU promocijas padomes “P-19”
2022. gada 25. aprīļa lēmumu, protokols Nr. 155.

<https://doi.org/10.7250/9789934227998>

ISBN 978-9934-22-799-8 (pdf)

**PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA
IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2022. gada 18. augustā plkst. 14.00 Rīgas Tehniskās universitātes Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultātē, Āzenes ielā 12/1, 115. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

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

Profesors *Dr. sc. ing.* Gatis Bažbauers,
Rīgas Tehniskā universitāte

Asociētais profesors *Dr. Raimondas Grubliauskas*,
Viļņas Ģedimina tehniskā universitāte, Lietuva

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Ilze Siliņa (paraksts)

Datums

Promocijas darbs ir izstrādāts angļu valodā, tajā, ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 35 attēli, 11 tabulu, kopā 155 lappuses. Literatūras sarakstā ir 95 nosaukumi.

SATURS

IEVADS.....	5
Zinātniskā novitāte.....	8
Praktiskā nozīme.....	9
Pētījuma rezultātu aprobācija.....	10
Ziņojumi zinātniskajās konferencēs.....	10
Darba struktūra	11
1. METODIKA	12
1.1. CSA sistēmas ilgtspējas novērtēšanas metodes izstrāde valsts līmenī	12
1.2. Energo pārvaldības rādītāji un ietekmējošie faktori CSA uzņēmuma līmenī	14
1.3. AER risinājumu izvēle CSA sistēmai	14
1.4. Īstenoto AER pasākumu novērtējums un EnPS rādītāju papildināšana.....	15
1.5. EnPS optimizācija CSA uzņēmumā ar lielu saules enerģijas lauku	15
2. REZULTĀTI.....	17
2.1. CSA sistēmas ilgtspējas novērtēšanas metodes izstrāde valsts līmenī	17
2.2. Energo pārvaldības rādītāji un ietekmējošie faktori CSA uzņēmuma līmenī	18
2.3. AER risinājumu izvēle CSA sistēmai	20
2.4. Īstenoto AER pasākumu novērtējums un energo pārvaldības sistēmas rādītāju papildināšana	22
2.5. EnPS optimizācija CSA uzņēmumā ar lielu saules enerģijas lauku	25
SECINĀJUMI.....	31
LITERATŪRAS SARAKSTS.....	33

IEVADS

Visos enerģētikas nozares līmeņos valda vienprātība, ka Eiropas energoapgādes dekarbonizācija ir atkarīga no centralizētās siltumapgādes (CSA) paplašināšanas. CSA sistēmas izvērsšanas un uzturēšanas ideoloģiskais pamats ir ilgtspējīgu energosistēmu attīstība, fosilo energoresursu patēriņa samazināšana enerģijas ražošanā un kopējā enerģijas patēriņa samazināšana, īstenojot energoefektivitātes pasākumus gan piegādes, gan patēriņa pusē. Tas ietver enerģijas ražošanu no tādiem avotiem kā saules un vēja enerģija, kā arī atlikumsiltuma integrēšana, piemēram, no rūpniecības, datu centriem un lielveikaliem, ko CSA sistēma var izmantot un uzglabāt. Normatīvais regulējums, kas veicina šīs pārmaiņas, jau ir ieviests kā daļa no Eiropas Savienības (ES) tīras enerģijas paketes, tostarp Energoefektivitātes direktīvas un Atjaunojamās enerģijas direktīvas.

Saistībā ar ēku energoefektivitātes paaugstināšanos un stingrākām prasībām par ietekmi uz vidi CSA sistēmas strauji mainās. Tradicionālajai trešās paaudzes CSA sistēmai ar augstu siltumtīklu temperatūru un sadedzināšanas siltuma avotiem jātransformējas uz zemas temperatūras ceturtais paaudzes pārvadi un siltuma avotu. Viens no svarīgākajiem uzdevumiem ir nefosilas CSA sistēmas izveide un AER integrēšana, kas būs ilgtspējīga energosistēma [1]. Nākotnes enerģētikas un klimata politika balstīta AER palielināšanā un siltumapgādes, enerģētikas un transporta sektoru sasaistes nodrošināšanā, lai samazinātu primārās enerģijas patēriņu un siltumnīcefekta gāzu emisijas.

Latvijas Nacionālajā enerģētikas un klimata plānā (2021–2030) noteikts mērķis līdz 2030. gadam CSA nozarē palielināt AER īpatsvaru līdz 54 % un uzlabot energoefektivitāti [2]. Saskaņā ar centrālās statistikas datiem 2020. gadā Latvijā bija 529 katlumājas un 162 koģenerācijas stacijas (turpmāk – KES) [3]. Pēdējos gados Latvijas CSA uzņēmumi ir ievērojami attīstījuši infrastruktūru un samazinājuši fosilā kurināmā patēriņu, izmantojot pieejamos Eiropas Savienības fondus. Kopumā līdz 2020. gadam siltumavotos un siltumtīklos tika īstenoti 106 energoefektivitātes paaugstināšanas pasākumi un AER projekti [4].

Siltumapgādes sistēmās ir pieejams plašs dažādu enerģijas avotu klāsts. Biežāk izmantotie AER energosistēmās ir biomasa [5, 6], vējš [8], ģeotermālā [7] un saules enerģija. Pēdējos gados arvien populārāka ir kļuvusi saules enerģijas integrācija CSA sistēmās, jo saules kolektori izmanto neierobežotu saules enerģiju un tiem ir salīdzinoši zemas uzturēšanas izmaksas [8]. Saules kolektori ir tehnoloģija, kas nerada emisijas, tāpēc ir piemērota, lai samazinātu siltumapgādes sistēmas ietekmi uz vidi. Dānijā saules enerģiju

CSA sistēmās izmanto ļoti plaši [9]. Dānijā un Latvijā ir līdzīgi klimatiskie apstākļi, līdz ar to saules enerģijai ir liels izmantošanas potenciāls CSA [5, 6, 7]. Pirmais lielais saules kolektoru lauks CSA sistēmā Baltijas valstīs darbību sāka 2019. gadā. Konkrētā saules kolektoru lauka aktīvā platība ir 21 672 m² ar iebūvētu 8000 m³ siltuma akumulācijas ūdens tvertni.

Viens no turpmākās attīstības virzieniem būs integrēt siltumapgādi kopējā energosistēmā, mijiedarbojoties ar centralizētās dzesēšanas, enerģētikas, transporta un rūpniecības nozarēm. Šādu nākotnes sistēmu dēvē par viedo energosistēmu, t. i., energosistēmu, kurā viedie tīkli, siltumapgādes un gāzes tīkli ir apvienoti un koordinēti, lai noteiktu sinerģijas starp tiem un panāktu optimālu risinājumu katrai plūsmi, kā arī kopējai energosistēmai. Šādas kombinācijas rezultātā tiek veidotas daudz vairāku enerģijas avotu sistēmas ar augstāku efektivitāti. Lai to panāktu, ir jākoordinē vairāku infrastruktūru darbība, piemēram, enerģijas krātuves, pieprasījuma vadība, IT risinājumi u. c. inovatīvas tehnoloģijas.

Pētījumu aktualitāte

CSA uzņēmumiem ir viens no lielākajiem potenciāliem samazināt enerģijas patēriņu, uzlabot efektivitāti un novērst CO₂ emisijas, jo tiem ir labi attīstīta infrastruktūra un augsts elastības potenciāls, lai segtu siltuma slodzi. Primārās enerģijas patēriņu un CO₂ emisijas ir iespējams samazināt, veicot dažādus pasākumus, piemēram, uzstādot katlus ar augstāku efektivitāti un integrējot dažādus AER veidus, piemēram, saules enerģijas sistēmas vai siltumsūkņus, samazinot siltuma pārvades zudumus, izolējot siltumvadus vai samazinot siltumnesēja temperatūru. Pastāv plašs efektīvāku siltumapgādes iespēju klāsts un turpinās inovatīvu tehnoloģiju attīstība, tāpēc ir nepieciešama sistēmiska domāšana un nepārtraukta siltumapgādes operatoru rīcība, lai sekotu līdzi jaunākajiem notikumiem. Tāpēc energopārvaldības sistēmas (EnPS) ieviešana ir viens no veidiem, kā efektīvi kontrolēt un samazināt primārās enerģijas patēriņu organizācijā.

Lai sasniegtu energoefektivitātes mērķus, 2016. gadā Latvijā tika izdots Energoefektivitātes likums, kas noteica pienākumu lieliem uzņēmumiem ieviest sertificētu EnPS vai veikt ergoauditu, lai noteiktu energoefektivitātes pasākumus. Tāpēc 20 lielākie siltumapgādes uzņēmumi valstī, kas saražo 80 % no kopējā siltumenerģijas patēriņa CSA stacijās, izpildīja šos kritērijus. Īstenojot dažādus attīstības projektus, šie uzņēmumi strauji pārorientējas uz AER. Pēdējos gados ir rekonstruētas šķeldas katlumājas, attīstītas koģenerācijas stacijas un veikti cita veida energoefektivitātes pasākumi. Tomēr CSA

uzņēmumi meklē plašākus inovatīvus risinājumus. ES siltumapgādē izmanto dažādus ilgtspējīgus enerģijas avotus – saules enerģiju, siltumsūkņus, kā arī atlikumu siltumu vai siltuma pārpalikumus no komerciālā un rūpniecības sektora. Sistēma virzās uz ceturrtās paaudzes sistēmas koncepciju, ieviešot zemas temperatūras siltuma avotus, pazeminot tīkla temperatūru, integrējot viedā tīkla tehnoloģijas, dažādas uzglabāšanas tehnoloģijas un mijiedarbojoties ar pašražotājiem.

Sarežģītākās daudzu avotu siltumapgādes sistēmās ir svarīgi ievērot energoefektivitātes rādītājus un skaidru metodoloģiju šo rādītāju noteikšanai, lai sasniegtu iespējami augstāku darbības efektivitāti. Svarīgi, lai EnPS būtu piemērota sarežģītām sistēmām un pastāvīgi attīstītos.

Hipotēze

Pētījuma hipotēze ir šāda: pāreju uz atjaunojamo enerģiju var veiksmīgi integrēt energopārvaldības sistēmā, kas palielinātu uzņēmuma energoefektivitāti un samazinātu tā ietekmi uz vidi.

Mērķis un uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir novērtēt iespējas paplašināt EnPS ar nākotnes inovatīviem siltumapgādes risinājumiem, integrējot sistēmā pāreju uz AER, īpašu uzmanību pievēršot saules kolektoru sistēmām.

Mērķa sasniegšanai noteikti vairāki galvenie uzdevumi.

1. Analizēt energoefektivitātes un vides rādītājus valsts un uzņēmuma līmenī.
2. Izstrādāta vienkāršota metodoloģiju, lai salīdzinātu CSA uzņēmumu energoefektivitāti un ilgtspējības rādītājus.
3. Izstrādāt procesu gaitu, lai vienkāršotu energopārvaldības ieviešanu gan pašvaldībās, gan CSA uzņēmumos.
4. Veikt daudzkritēriju analīzi, izmantojot *TOPSIS* metodi, lai novērtētu piemērotāko AER tehnoloģiju CSA uzņēmumiem.
5. Novērtēt saules kolektoru lauku darbību ietekmējošos faktorus, izmantojot daudzfaktoru regresijas analīzi.
6. Novērtēt iespējas uzlabot saules enerģijas sistēmas darbību CSA sistēmā.

Zinātniskā novitāte

Promocijas darbā piedāvātā metodoloģija palīdz novērtēt iespējas uzlabot esošo energopārvaldības sistēmu CSA uzņēmumiem, integrējot AER tehnoloģijas. Lai sasniegtu šo mērķi, ir apkopotas vairākas metodes, kas detalizēti aprakstītas vairākās publikācijās. Metodika izstrādāta, lai aizpildītu informācijas trūkumu šajā jomā, lai, attīstoties tehnoloģijām, padarītu CSA uzņēmumiem piemērotu energopārvaldības sistēmas modeli. Metodes mērķa sasniegšanai apkopotas 1. attēlā.

Publikācija	Metode			
	Regresijas analīze	Saliktā indeksa metode	Daudzkritēriju novērtējums	Daudzfaktoru regresijas analīze + Pīrsona korelācijas metode
“ISO 50001 piemērošana ilgtspējīgas enerģētikas rīcības plānu īstenošanai”	Energoefektivitātes rādītāju novērtēšana			
“Siltumapgādes uzņēmuma enerģijas samazināšanas potenciāls, ieviešot energopārvaldības sistēmu”	Energoefektivitātes rādītāju novērtēšana			
“Daudzkritēriju analīze atjaunojamo energoresursu risinājumu izvēlei centralizētās siltumapgādes sistēmai”			Izvēlēties piemērotāko atjaunojamo energoresursu tehnoloģiju siltumapgādei	
“Vai ir iespējams iegūt vairāk enerģijas no saules CSA lauka? Saules CSA sistēmas datu interpretācija”	Lai novērtētu saules siltumapgādes sistēmas darbību			
“Klimata indekss centralizētās siltumapgādes sistēmai”	Noteikt siltuma tarifu ietekmējošos faktorus	Salīdzināt siltumapgādes uzņēmumu darbību valsts līmenī		
“Liela mēroga saules enerģijas lauku efektivitātes optimizācija. Latvijas gadījuma izpēte”				Identificēt svarīgākos ietekmējošos faktorus un optimizācijas potenciālu saules sistēmai.

1. att. Darbā izmantotās metodes.

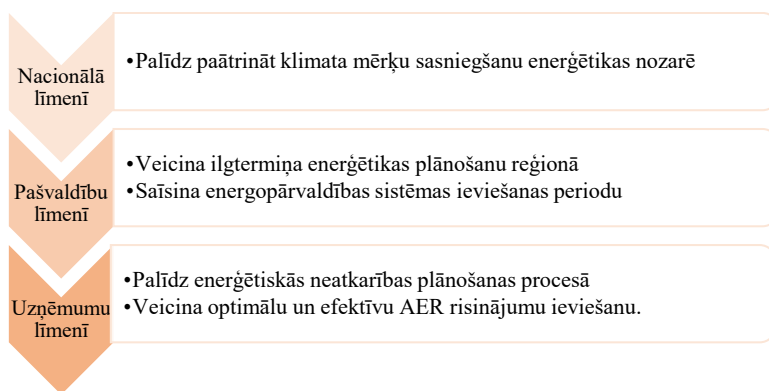
Svarīga metodikas daļa ir siltumapgādes darbības un efektivitātes novērtējums, kas ierosinātajā metodikā ir energoefektivitātes rādītāju un saistīto ietekmējošo faktoru novērtējums attiecībā uz siltumapgādes sistēmas darbību un no tās izrietošo siltuma tarifu. Lai novērtētu saistību starp dažādiem siltumenerģijas ražošanas un piegādes tehniskajiem un ekonomiskajiem parametriem, tika izvēlēta regresijas metode.

Darbā ir ņemts vērā arī valsts siltumapgādes līmenis. Lai novērtētu un salīdzinātu dažādas siltumapgādes sistēmas ar dažādām siltumenerģijas ražošanas tehnoloģijām un siltuma pārvades sistēmas raksturlielumiem, autore ierosina izmantot salikto indeksu metodi, kas apvieno galvenos ilgspējīgas siltumapgādes un efektivitātes rādītājus.

Svarīgs izstrādātā energopārvaldības sistēmas ietvara aspekts ir piedāvātā metodika, kā izvēlēties vispiemērotāko AER tehnoloģiju siltumapgādes sistēmām. Liels uzsvars tiek likts uz jaunajām tehnoloģijām, kas strauji ienāk siltumapgādes risinājumos, piemēram, saules kolektoru sistēmas. Integrējot jaunu sistēmu, ir svarīgi noteikt svarīgākos ietekmējošos faktorus un novērtēt tās optimizācijas iespējas. Šīs metodes kombinācija nodrošina strukturētu modeli, lai novērtētu enerģijas pārvaldības sistēmas potenciālu, lai to paplašinātu un tā būtu piemērotāka nākotnes inovatīvajām siltumapgādes sistēmām.

Praktiskā nozīme

Darbam ir praktiska nozīme trīs dažādos līmeņos: valsts, pašvaldības un uzņēmuma līmenī. Ietekme katrā līmenī apkopota 2. attēlā.



2. att. Darba praktiskā ietekme uz nozarēm.

Būtisks uzsvars tiek likts uz siltumapgādes uzņēmumu līmeni, jo ierosinātā metodoloģija palīdzēs īstenot inovatīvus izmēģinājuma projektus siltumenerģijas pārvades un ražošanas jomā. Uzlabota energopārvaldības sistēma ar papildu darbības rādītājiem ļauj precīzāk

identificēt energoefektivitātes pasākumus un īstenot turpmākus pasākumus, lai optimizētu īstenotos risinājumus.

Pašvaldības līmenī piedāvātie rādītāji ļauj novērtēt vietējos siltumapgādes risinājumus un norāda nepieciešamo atbalstu vai ierobežojumus siltumapgādes operatoram, lai uzlabotu siltumapgādes attīstības ilgtermiņa plānošanas procesu.

AER tehnoloģiju integrēšana energopārvaldības sistēmā paātrinās valsts klimata mērķu sasniegšanu un uzlabos vispārējās siltumapgādes pārredzamību, izceļot siltumapgādes uzņēmumu ilgspējas rādītājus.

Pētījuma rezultātu aprobācija

1. Ilze Dzene, Ilze Poļikarpova, Līga Žogla, Marika Rošā, Application of ISO 50001 for Implementation of Sustainable Energy Action Plans , Energy Procedia 72 (2015) 111–118.

2. Ilze Poļikarpova, Marika Rošā, Energy Reduction Potential of the District Heating Company Introducing Energy Management System, Energy Procedia 128 (2017) 66–71.

3. Ilze Poļikarpova, Dace Lauka, Dagnija Blumberga, Edgars Vīgants Multi-Criteria Analysis to Select Renewable Energy Solution for District Heating System, Environmental and Climate Technologies vol. 23, (2019) 101–109.

4. Roberts Kaķis, Ilze poļikarpova, Ieva Pakere, Dagnija Blumberga “Is it possible to obtain more energy from solar DH field? Interpretation of solar DH system data”, Environmental and Climate Technologies vol. 25, 2021. 1284–1292.

5. Ieva Pakere, Dace Lauka, Kristiāna Dolge, Valdis Vītolīņš, Ilze Poļikarpova, Stefan Holler, Dagnija Blumberga, Climate Index for District Heating System Environmental and Climate Technologies vol. 24, (2020). 406–418.

6. Ilze Poļikarpova, Roberts Kaķis, Ieva Pakere, Dagnija Blumberga “Optimizing large-scale solar field efficiency. Latvia case study” Energies 14 (2021).

Ziņojumi zinātniskajās konferencēs

1. Ilze Dzene, Ilze Poļikarpova, Līga Žogla, Marika Rošā, Application of ISO 50001 for “Implementation of Sustainable Energy Action Plans”, International Scientific Conference Environmental and Climate Technologies – CONECT 2014, Rīga, Latvia.

2. Ilze Poļikarpova, Marika Rošā, Energy Reduction Potential of the District Heating Company Introducing Energy Management System, International Scientific Conference “Environmental and Climate Technologies”, CONECT 2017, 10–12 May 2017, Rīga, Latvia.

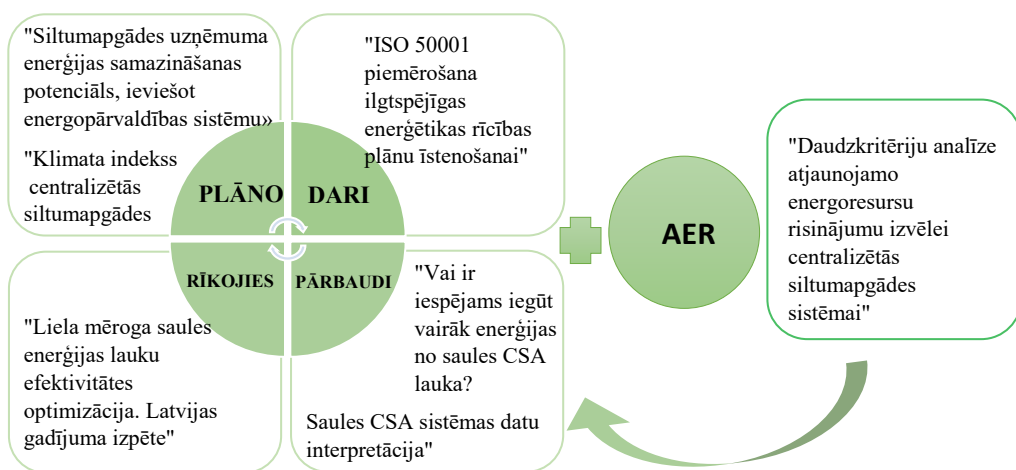
3. Ilze Poļikarpova, Dace Lauka, Dagnija Blumberga, Edgars Vīgants Multi-Criteria Analysis to Select Renewable Energy Solution for District Heating System, International Scientific Conference “Environmental and Climate Technologies”, CONECT 2018, 16–18 May 2018, Rīga, Latvia.

4. Roberts Kaķis, Ilze poļikarpova, Ieva Pakere, Dagnija Blumberga “Is it possible to obtain more energy from solar DH field? Interpretation of solar DH system data, “Environmental and Climate Technologies”, CONECT 2020, 13–15 May 2020, Riga, Latvia.

5. Ieva Pakere, Dace Lauka, Kristiāna Dolge, Valdis Vītolis, Ilze Poļikarpova, Stefan Holler, Dagnija Blumberga, Climate Index for District Heating System, “Environmental and Climate Technologies”, CONECT 2021, 12–14 May 2021, Riga, Latvia.

Darba struktūra

Darba struktūra balstīta energopārvaldības ciklā – plāno, dari, pārbaudi un rīkojies. Tradicionālā energopārvaldības sistēmas struktūra ir papildināta ar analīzi pārejai uz AER. Publikāciju struktūra redzama 3. attēlā.



3. att. Darba struktūra.

Promocijas darba pamatā ir sešas savstarpēji saistītas zinātniskās publikācijas, kurās apkopotas dažādas metodes un rezultāti, kas kopā veido jaunu metodoloģiju, lai noteiktu iespējas paplašināt energopārvaldības sistēmu CSA uzņēmumiem, integrējot pāreju uz AER, īpaši pievēršoties saules kolektoru sistēmām. Katrs energopārvaldības sistēmas posms ir pamatots ar vismaz vienu autores zinātnisko publikāciju, kā norādīts 3. attēlā. Divi zinātniskie raksti ir saistīti ar plānošanas posmu, jo tā ir svarīga daļa no īstenotās energopārvaldības CSA sistēmā.

Darbā ir ievads, literatūras apskats, pētījuma metodoloģija, rezultāti un secinājumi.

1. METODIKA

EnPS ieviešanas soļi ir definēti, pamatojoties uz Deminga ciklu – plāno, dari, pārbaudi un rīkojies, taču šī sistēma ir vispārēja. EnPS nav vienotas metodoloģijas, kā piemērot šo standartu CSA uzņēmumā un kā integrēt AER tehnoloģijas. Patlaban notiek aktīva pāreja no trešās paaudzes CSA sistēmām uz ceturtais paaudzes sistēmām, kas balstās zemās temperatūrās un AER tehnoloģijās, piemēram, saules kolektoros. Tāpēc ir svarīgi izstrādāt energopārvaldības metodoloģiju, kas papildināta ar AER tehnoloģiju integrāciju sistēmā un to monitoringa sistēmas izstrādi.

Izstrādājot metodoloģiju, ir ņemti vērā energopārvaldības standarta posmi. Pirmajā posmā, izmantojot ilgtspējas rādītājus, tiek pētīts valsts ilgtspējības un energoefektivitātes līmenis CSA sistēmās. Rezultātā ir izveidota vienkāršota nacionāla līmeņatzīme, lai novērtētu uzņēmumu sniegumu. Šo līmeņatzīmi CSA uzņēmumiem var izmantot EnPS kā ārējo atskaites punktu, kas ļaus novērtēt uzņēmuma sniegumu, salīdzinot ar citām CSA sistēmām.

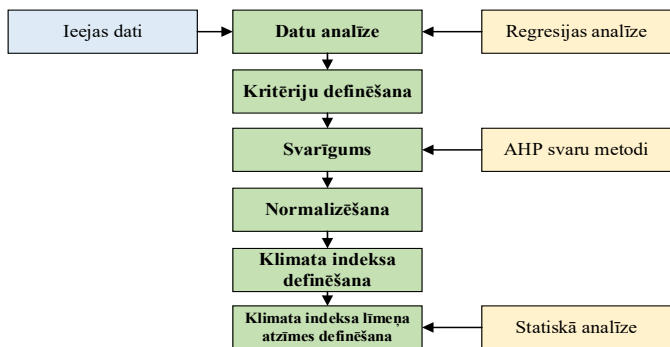
Nākamais solis ir apkopot un noteikt energopārvaldības rādītājus un ietekmējošos faktorus CSA sistēmas līmenī. Šajā posmā tiek apkopoti un noteikti uzņēmumu iekšējie rādītāji, lai identificētu iespējamās optimizācijas vietas un apzinātu AER tehnoloģiju potenciālu. Otrajā posmā tiek analizēti energopārvaldības shēmu ieviešanas ieguvumi, lai pierādītu, ka EnPS ieviešanai ir arī ekonomiski ieguvumi.

Nākamais posms ir AER risinājumu izvēle CSA sistēmai. Šajā metodoloģijā tiek apkopoti attiecīgie rādītāji un izmantota daudzkritēriju analīzes metode, lai atrastu piemērotāko AER tehnoloģiju. Nākamie soļi ir izvēlētas tehnoloģijas – saules kolektoru sistēmas ar akumulācijas tvertni – integrēšana EnPS. Šajos soļos tiek izvērtēti ieviestie AER pasākumi un papildinājumi un noteiktas optimizācijas iespējas, jo EnPS ir nepārtraukts process.

1.1. CSA sistēmas ilgtspējas novērtēšanas metodes izstrāde valsts līmenī

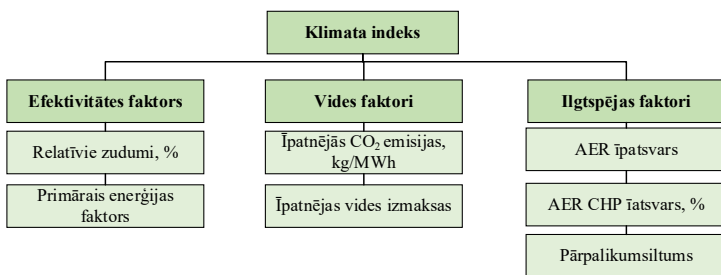
Izstrādāta metodoloģija, lai noteiktu CSA uzņēmumu ilgtspējas rādītājus valsts līmenī. Lai objektīvi salīdzinātu uzņēmumus, ir aptverti dažādi ilgtspējas indikatori un izveidots klimata indekss.

Galvenie klimata indeksa noteikšanas posmi redzami 1. attēlā. Dati ir apkopoti par 20 CSA uzņēmumiem.



1.1. att. Klimata indeksa noteikšanas galvenie posmi un metodes.

Pēc detalizētas datu izvērtēšanas tiek noteikti galvenie kritēriji turpmākai analīzei. Klimata indeksa aprēķināšanai konkrētajā gadījumā tiek izmantoti septiņi dažādi kritēriji (1.2. att.).



1.2. att. Klimata indeksā apvienotie kritēriji.

Lai novērtētu izmantotās enerģijas ražošanas tehnoloģijas un enerģijas avotus, izmantoti ilgtspējas kritēriji, kas ietver trīs dažādus rādītājus: AER īpatsvars, AER koģenerācijā saražotā siltuma īpatsvars un no rūpniecības uzņēmumiem iepirkta siltuma īpatsvars.

Kritēriji ir prioritizēti, lai labāk atspoguļotu ilgtspējīgas attīstības iespēju izmantošanu. Katra kritērija svāri ir aprēķināti saskaņā ar analītiskā hierarhijas procesa (AHP) metodi. Metodes pamatā ir pāru salīdzināšanas matrica, kas atspoguļo kritēriju relatīvo nozīmi [10]. Normalizētās un svērtās kritēriju vērtības tiek summētas, lai iegūtu katra CSA operatora klimata indeksu.

1.2. Energo pārvaldības rādītāji un ietekmējošie faktori CSA uzņēmuma līmenī

EnMS tiek ieviesta uzņēmumos, lai noteiktu iespējamus pasākumus enerģijas patēriņa samazināšanai. EnPS galvenā uzmanība tiek pievērsta tam, lai noteiktu energosistēmas vājās vietas un identificētu energoefektivitātes pasākumus. Lai noteiktu vājās vietas enerģijas izmantošanas organizācijā, ir nepieciešama objektīva salīdzināšanas metode, kurā svarīga ir precīzu energoefektivitātes rādītāju izvēle.

CSA uzņēmuma energoefektivitātes novērtēšanas sistēma, kas balstās indikatoru metodē, tiek veikta, ievērojot šādus pamatposmus:

- identificēt visus enerģijas patērētājus;
- definēt galvenos enerģijas patērētājus;
- noteikt ienākošo resursu plūsmas;
- noteikt siltuma avota efektivitāti;
- noteikt, vai rādītājs korelē ar noteiktiem faktoriem;
- grupēt vienkāršos un sarežģītos rādītājus;
- pārbaudīt, vai noteiktie indikatori pilda arī darbības indikatora funkciju;
- katram rādītājam izvēlieties nepieciešamos datu vākšanas periodus (24 stundas, reizi mēnesī utt.).

Izveidojot rādītāju, kas objektīvi atspoguļo uzņēmuma energoefektivitāti, to var izmantot kā rīku, lai noteiktu vietas, kurās var veikt uzlabojumus un īstenot energoefektivitātes pasākumus, kas samazina enerģijas patēriņu.

1.3. AER risinājumu izvēle CSA sistēmai

Virzoties uz klimata un energoefektivitātes mērķiem, ir svarīgi ieviest pāreju uz AER CSA uzņēmumos, ieviešot vispiemērotāko un izdevīgāko tehnoloģiju.

Lai noteiktu uzņēmumam piemērotāko AER tehnoloģiju, tiek izmantota daudzkritēriju analīze, kas ļauj novērtēt alternatīvas no vairākiem aspektiem: tehniskiem, vides, ekonomiskiem un sociāliem faktoriem.

AER tehnoloģijas tiek vērtētas pēc četriem kritērijiem. Izvēlētie kritēriji ir kopējās īpatnējās izmaksas, energoresursu izmaksas, siltumnīcefekta gāzu emisiju samazinājums un ietekme uz zemes izmantošanu. Eksperti izvēlējās izvēlēto kritēriju svarīgumu no 0 līdz 5, pieņemot, ka vērtējums 0 ir bez ietekmes, 5 – ar ļoti lielu ietekmi.

Lai novērtētu AER tehnoloģijas CSA, tika izmantota *TOPSIS* metode. Procedūra *TOPSIS* ietver piecus galvenos posmus: normalizētā lēmuma matrica, svērtā normalizētā lēmuma

matrica, pozitīvā ideālā un negatīvā ideālā risinājuma aprēķins, pozitīvais ideālais un negatīvais ideālais risinājums un relatīvais tuvums ideālajam risinājumam.

1.4. Īstenoto AER pasākumu novērtējums un EnPS rādītāju papildināšana

Ieviešot jaunu tehnoloģiju, tai skaitā AER, uzņēmumā, ir svarīgi, lai tā iekļautos esošajā sistēmā. Viens no būtiskākajiem EnPS aspektiem ir objektīvi atspoguļota veikspēja. Šajā pētījumā ir novērtēti saules kolektoru sistēmu ietekmējošie faktori un to nozīme efektivitātes paaugstināšanā.

Analizētā sistēma ir liela izmēra saules kolektoru sistēma, kas uzstādīta Latvijā, Salaspilī. Kolektoru kopējā aktīvā platība ir 21 672 m² ar 8000 m³ akumulācijas tvertni. Sistēma darbojas kopš 2019. gada septembra un ir pirmais liela izmēra saules kolektoru lauks CSA Baltijas valstīs.

Galvenie divi darbību ietekmējošie faktori ir saules starojuma intensitāte un iestatītā temperatūra, bet saules lauka darbību ietekmē vēl šādi faktori:

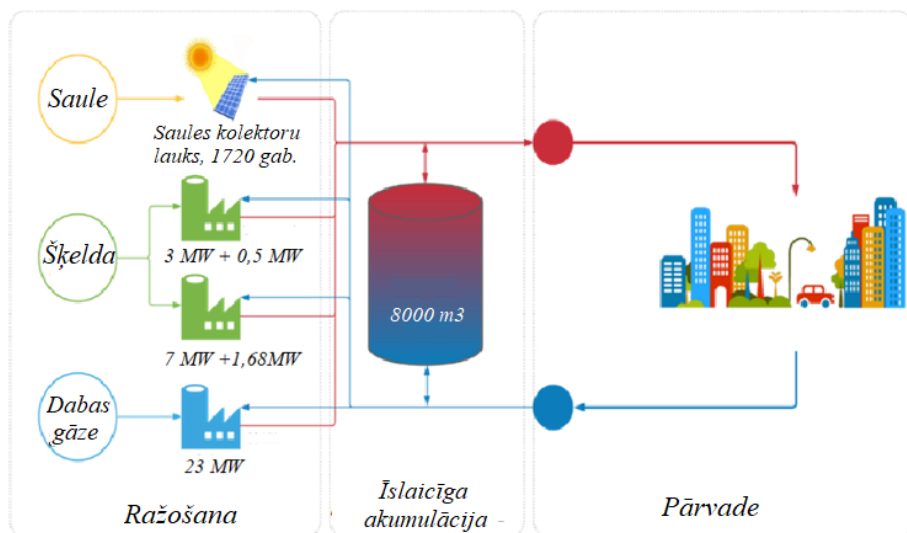
- kolektoru aktīvais laukums;
- kolektora optiskā efektivitāte;
- sistēmas zudumi;
- apkārtējā gaisa temperatūra;
- CSA atgaitas temperatūra – ieplūdes temperatūra;
- kolektora izejas temperatūra.

Nākamais solis ir apzināt, kurus konkrētās sistēmas faktoros operators var ietekmēt un kurus nevar mainīt. Šis ir pirmais projekts Baltijas valstīs, tāpēc tiek analizēts arī saules starojums, lai noteiktu, kā saules starojuma intensitāte ietekmē kopējo sistēmas darbību. Tāpēc saules kolektora ražība tiek novērtēta atkarībā no saules intensitātes, CSA siltumnesēja atgaitas temperatūras un siltumnesēja plūsmas ātruma.

1.5. EnPS optimizācija CSA uzņēmumā ar lielu saules enerģijas lauku

Pēc pirmā tehnoloģijas darbības gada EnPS paredz rezultātu izvērtēšanu un optimizācijas iespēju pārbaudi. Pēc pirmā gada rezultātiem novērtē un analizē ietekmējošos faktoros liela mēroga saules kolektoru laukā Baltijas reģionā, Latvijā.

Siltumapgādes sistēma sastāv no divām šķeldas katlumājām (7 MW + 1,68 MW dūmgāzu kondensators un 3 MW + 0,5 MW dūmgāzu kondensators) un trīs gāzes katliem (jauda 10 MW, 10 MW un 3 MW) maksimālās slodzes nodrošināšanai. Kopējā siltuma ražošanas shēma redzama 1.3. attēlā.



1.3. att. Pētāmās centralizētās siltumapgādes sistēmas shēma.

Lai iegūtu objektīvus rezultātus, tika izmantota statistiskās analīzes un regresijas analīzes metode, jo ir pieejama liela datubāze par saules enerģijas lauku darbību. Regresijas analīzes izmantošana skaidri parāda ietekmējošos faktorus, kas jāoptimizē, lai sasniegtu augstāku saules enerģijas lauka efektivitāti.

Metodika sadalīta trīs daļās: pirmā daļa – datu vākšana un apkopošana; otrā daļa – ietekmējošo faktoru analīze; trešā daļa – daudzkārtēja regresijas analīze. Statistiskā datu analīze tika veikta, izmantojot *Statgraphics 19-X64* programmatūru.

Bez saules radiācijas kā tiešā ietekmējošā faktora tika novērtēti trīs saules kolektoru efektivitāti ietekmējošie faktori. Tie ir CSA sistēmas atgaitas un turpgaitas temperatūra, kolektora laukā ieejošās un izejošās temperatūras starpība un plūsmas ātrums. Šie faktori tika izvēlēti, pamatojoties uz literatūras analīzi, kas iegūti laboratorijas eksperimentos un simulāciju pētījumos.

Lai veiktu datu statistisko analīzi, tika izmantota programmatūra *Statgraphics Version 19.2.01*. Datu analīzes un vizualizācijas programmā ir vairāk nekā 230 datu analīzes funkciju. Lai noteiktu mainīgo faktoru ietekmi uz saules kolektora lauka efektivitāti, tika izmantota vairāku mainīgo analīze un daudzkārtēja regresijas analīze.

2. REZULTĀTI

2.1. CSA sistēmas ilgtspējas novērtēšanas metodes izstrāde valsts līmenī

Iegūtā metodoloģija un rezultāti ļauj pārliecināties, vai uzņēmums ir energoefektīvs un ilgtspējīgs, vai arī jāpievērš uzmanība aspektiem, kas būtu jāuzlabo.

Tika analizēti dati par 20 CSA operatoru darbību 2017. gadā. Analizētās CSA sistēmas ir ļoti atšķirīgas. Saražotais siltumenerģijas daudzums gadā svārstās no vairāk nekā 500 GWh Latvijas galvaspilsētā Rīgā līdz mazāk nekā 1 GWh mazākās pilsētās.

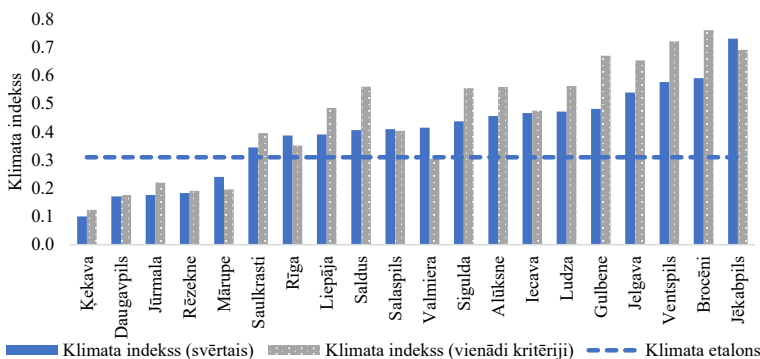
2.1. tabulā sniegts pārskats par katra izvēlēta kritērija normalizētajām vērtībām analizētajām CSA sistēmām. Vērtība 1 norāda par vislabāk novērtēto sistēmu, savukārt vērtība 0 – par zemāko iegūto vērtību. Kā redzams, tikai divas siltumapgādes sistēmas ir iepirkušas siltumu no rūpniecības uzņēmumiem.

2.1. tabula

Kritēriju iegūto vērtību normalizētās vērtības

CSA atrašanās vieta	RES	RES koģenerācija	CO ₂ emisijas	Vides izmaksas	Siltuma zudumi	PEF	Rūpnieciskais siltums
Rīga	0,15	0,13	0,19	0,48	0,57	0,95	0,00
Daugavpils	0,16	0,00	0,09	0,40	0,09	0,49	0,00
Jelgava	0,92	0,97	0,36	0,97	0,42	0,95	0,00
Liepāja	0,63	0,30	0,81	0,56	0,30	0,81	0,00
Ventspils	0,90	0,93	0,90	0,87	0,53	0,92	0,00
Jūrmala	0,47	0,00	0,21	0,30	0,00	0,55	0,00
Rēzekne	0,00	0,00	0,47	0,18	0,26	0,42	0,00
Valmiera	0,25	0,00	0,00	0,20	0,66	0,56	0,46
Jēkabpils	0,82	0,23	0,83	0,53	0,56	0,86	1,00
Salaspils	0,61	0,00	0,35	0,41	0,69	0,78	0,00
Saldus	0,86	0,60	0,80	0,73	0,08	0,86	0,00
Sigulda	0,94	0,30	0,95	0,42	0,39	0,87	0,00
Ludza	0,96	0,00	1,00	0,50	0,50	0,98	0,00
Gulbene	1,00	0,74	1,00	0,87	0,09	0,99	0,00
Alūksne	1,00	0,00	1,00	0,51	0,41	1,00	0,00
Ķekava	0,21	0,00	0,39	0,00	0,26	0,00	0,00
Brocēni	0,95	1,00	0,97	1,00	0,42	0,99	0,00
Iecava	0,58	0,61	0,39	0,18	1,00	0,57	0,00
Mārupe	0,00	0,00	0,39	0,00	0,74	0,24	0,00
Saulkrasti	0,70	0,00	0,67	0,21	0,44	0,75	0,00

2.1. attēlā redzami iegūtie klimata indeksa vērtību rezultāti ar un bez kritēriju svaru piemērošanas. Kā redzams, svaru piemērošanai ir neliela ietekme uz CSA sistēmām ar augstākajām un zemākajām klimata indeksa vērtībām. Visaugstākais vērtējums iegūts CSA sistēmām, kurās siltums tiek ražots, izmantojot biomasas koģenerācijas tehnoloģiju, vai siltums tiek iepirkts no rūpniecības uzņēmumiem. Viszemākās klimata indeksa vērtības ir CSA sistēmām, kurās galvenais enerģijas avots siltuma ražošanai ir dabasgāze.



2.1. att. Klimata indeksa vērtību novērtēšanas rezultāti un iegūtais klimata etalons.

Konkrētajām analizēm līmeņa atzīme tiek iegūts saskaņā ar Pareto principu, analizējot konkrētu iegūto klimata indeksa vērtību biežumu. Līmeņatzīme tiek noteikta kā visbiežāk sastopamā minimālā indeksa vērtība. Lai pierādītu ilgtspējīgu siltumenerģijas ražošanu, klimata indeksa vērtībai jābūt lielākai par noteikto līmeņatzīmes vērtību, kas šajā konkrētajā gadījumā ir 0,31.

Pēc datu analīzes redzams, ka piecu CSA sistēmu novērtējums ir zemāks par iegūto līmeņatzīmi. Šo uzņēmumu stratēģiskie plāni būtu jāpārskata, uzsverot energoefektivitāti un ilgtspēju, ieviešot analizētos kritērijus uzņēmumā kā progresa uzskaites līmeni.

Noteiktajam klimata indeksam ir potenciāls tālākai attīstībai un izmantošanai sistēmas darbības novērtēšanā starptautiskā līmenī. Metodoloģiju var pielāgot konkrētiem valsts apstākļiem, izmantojot papildu tehniskos, ekonomiskos un vides rādītājus.

2.2. Energopārvaldības rādītāji un ietekmējošie faktori CSA uzņēmuma līmenī

Īstenojot EnPS uzņēmumā, jāņem vērā uzņēmuma specifiskācija. Plānošanas posmā ir svarīgi izvēlēties atbilstošus energoefektivitātes rādītājus. 2.2. tabulā apkopoti svarīgākie

energoefektivitātes rādītāji un ietekmējošie faktori CSA uzņēmumam [11, 12]. Pēc šiem rādītājiem uzņēmumi var veikt energoefektivitātes analīzi.

2.2. tabula

Galvenie energoefektivitātes indikatori un ietekmējošie faktori

Energoefektivitātes veiktspējas indikatori	Mērvienība	Ietekmējošais faktors	Mērvienība
Katlu lietderības koeficients vai īpatnējais kurināmā patēriņš	% vai MWh_{iev}/MWh_{sar}	Saražotais silt. enerģijas daudzums	MWh
Relatīvie siltuma zudumi	%		MWh
Īpatnējais elektroenerģijas patēriņš	kWh/MWh		MWh
Dūmgāzu kondensatora efektivitāte	%	Kurināmā mitrums	%
		Atgaitas temperatūra	°C

Viens no svarīgākajiem CSA uzņēmuma energopārvaldības indikatoriem ir īpatnējais kurināmā patēriņš jeb katla efektivitātes koeficients. Katlam, kas darbojas ar gāzi, ir salīdzinoši viegli aprēķināt īpatnējo kurināmā patēriņu, jo tam ir gāzes un saražotās siltumenerģijas skaitītājs, un šī uzskaites sistēma ir ar augstu ticamību. Savukārt šķeldas apkures katlam ir sarežģītāk, jo ir grūti noteikt ievadītās šķeldas daudzumu, tomēr var iegūt salīdzinoši ticamus ikmēneša datus.

Viens no EnPS analīzes mērķiem ir noskaidrot uzņēmuma enerģijas patēriņa vājās vietas un noteikt energoefektivitātes pasākumus. Šīs vājās vietas var identificēt, ja tiek noteikti atbilstoši rādītāji un ietekmējošie faktori.

Ir divi veidi, kā veikt energoefektivitātes pasākumus:

- sākt ar patērētāju vai patērētāju grupu, kurai noteikts vislielākais enerģijas patēriņš;
- veikt ekanomiski pamatorus pasākumus. Pirmie pasākumi tiks īstenoti bez nepieciešamajiem ieguldījumiem vai ar nelieliem ieguldījumiem, pēc tam tiks īstenoti pasākumi, kas būtiski ietekmē patēriņu un var radīt vislielākos enerģijas ietaupījumus.

Šādi pasākumi tika identificēti analizētajā CSA uzņēmumā, lai paaugstinātu ražošanas procesa efektivitāti:

- ieviest darbības rādītājus un procedūras, lai nodrošinātu to, ka katru dienu tiek kontrolēti un analizēti ražošanas procesi;
- izveidot stimulējošus pasākumus darba veicēja kontrolei;

- regulāri katlu operatoru apmācības kursi;
- katla vadības sistēmas optimālais iestatījums regulārai pārbaudei.

Energoefektivitātes pasākumu ieviešana, kas apzināti analizētajā CSA uzņēmumā, vidēji gadā varētu ietaupīt aptuveni 4 % primārās enerģijas.

2.3. AER risinājumu izvēle CSA sistēmai

Daudzkritēriju analīzes rezultāti ļauj uzņēmumam izvēlēties piemērotāko risinājumu pārējai uz AER. Dati atspoguļo vidēja lieluma CSA uzņēmuma darbību.

2.3. tabulā apkopoti dati par pašreizējo situāciju un divām dažādām alternatīvām – esošo situāciju, kad vasaras slodze tiek segta ar dabasgāzes katliem, plānotā situācija, kad tiek uzstādīti saules kolektori ar akumulācijas tvertni un alternatīvā situācija, kad tiek uzstādīts siltumsūknis ar saules paneļu lauku. Analizēti šādi kritēriji alternatīvu salīdzināšanai: energoresursu izmaksas; siltumnīcefekta gāzu emisiju samazinājums; ietekme uz izmantojamo zemi; kopējie īpatnējie ieguldījumi.

2.3. tabula

Sākotnējā lēmumu pieņemšanas matrica

	Resursu izmaksas	Siltumnīcefekta gāzu emisiju samazināšana	Atjaunojamo energoresursu īpatnējais svars	Ietekme uz izmantoto zemi	Kopējie ieguldījumi
Pašreizējā situācija	35	0,2	50	0	0
Plānotā situācija	0	0	90	2	375000
Alternatīva situācija	0	0	90	3	613333
	min.	min.	max	min.	min.
Svars	0,25	0,23	0,2	0,14	0,18

Pēc vērtību normalizēšanas tiek iegūta matrica, kurā vērtības ir no 0 līdz 1, ņemot vērā, kurus no kritērijiem nepieciešams maksimizēt vai minimizēt (2.4. tab.).

2.4. tabula

Normalizēta lēmumu matrica

	Resursu izmaksas	Siltumnīcefekta gāzu emisiju samazināšana	Atjaunojamo energoresursu īpatnējais svars	Ietekme uz izmantoto zemi	Kopējie ieguldījumi
Pašreizējā situācija	0,00	0,00	0,37	0,95	0,93
Plānotā situācija	0,71	0,71	0,66	0,32	0,36
Alternatīva situācija	0,71	0,71	0,66	0,00	0,00

TOPSIS metodē svarīgs ir rādītāju svars, tāpēc to noteikšanai piesaistīti vairāki CSA eksperti. Viens kritērijs var būt ļoti dominējošs, un visi kritēriji var būt līdzvērtīgi. Šajā gadījumā visi rādītāji, var teikt, ir līdzvērtīgi. Vissvarīgākās ir resursu izmaksas, jo uzņēmums iegūst lielāku enerģētisko neatkarību un enerģijas cenu izmaiņām ir mazāka ietekme. Nākamais svarīgais aspekts ir CO₂ emisiju samazinājums. Siltumnīcefekta gāzu samazināšana ir svarīga atjaunojamo enerģijas avotu izvēles sastāvdaļa.

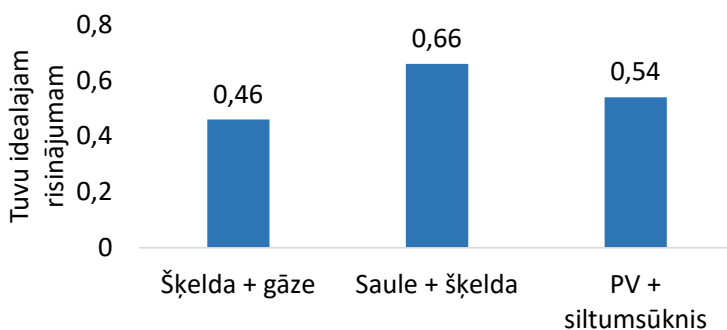
TOPSIS rezultāts, pēc kā var izvēlēties piemērotāko energotehnoloģiju vidējam CSA uzņēmumam, sniegts 2.5. tabulā. Tas norāda, ka priekšroka tiek dota alternatīvajam scenārijam ar saules kolektoriem un akumulācijas tvertni, otrs labākais ir alternatīvais scenārijs ar siltumsūkņa un PV paneļu uzstādīšanu.

2.5. tabula

TOPSIS ideālo/negatīvo punktu un tuvuma koeficientu rezultāti analizētajiem scenārijiem

	di+	di-	ci	Rezultātu rangs
Pašreizējā situācija	0,25	0,21	0,46	3,00
Plānotā situācija	0,14	0,26	0,66	1,00
Alternatīva situācija	0,21	0,25	0,54	2,00

Kopumā pieci rādītāji lēmumu pieņemšanai aptver ekonomiskos un vides aspektus. Labākais variants ir plānotais variants, kurā tiks uzstādīti saules kolektori un akumulācijas tvertnes.



2.2. att. Daudzkritērija analīzes rezultāti analizētajiem scenārijiem.

2.4. Īstenoto AER pasākumu novērtējums un energopārvaldības sistēmas rādītāju papildināšana

Pēc jaunas sistēmas integrēšanas esošajā sistēmā ir svarīgi novērtēt darbības rezultātus, salīdzināt tos ar plānotajiem rezultātiem un izmantot tos kā pamatu turpmākajiem datiem.

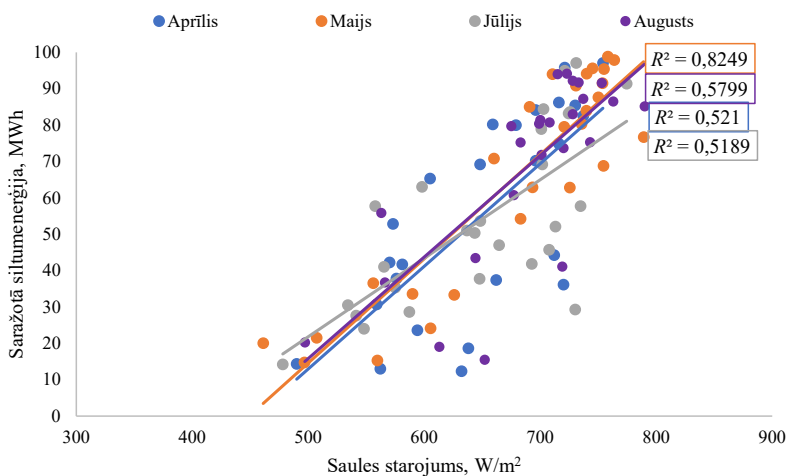
Pirmajā gadā, kopš Salaspilī ir uzstādīti saules kolektori, saules kolektoru saražotās siltumenerģijas īpatsvars gadā ir aptuveni 20 % no kopējā saražotā siltumenerģijas apjoma. Ar saules kolektoriem saražotais daudzums bija 11088 MWh, savukārt kopējais saražotais siltumenerģijas daudzums Salaspils siltumtrasē bija aptuveni 58 GWh. Lielākais saules laukā saražotās enerģijas īpatsvars ir vērojams jūnijā, jūlijā un augustā, kad saules enerģijas īpatsvars sasniedza 46–49 % no kopējā saražotā daudzuma.

Lielā saules starojuma periodos, kad saule spīd ar lielu intensitāti vairākas dienas, uzstādītā 8000 m³ akumulācijas tvertne nespēj uzkrāt visu saražoto saules enerģiju, tāpēc tiek iedarbināta saules lauka aizsardzība pret pārkaršanu. Taču ir arī zema saules starojuma un mākoņaina laika brīži vairāku dienu garumā, kad visa uzkrātā siltumenerģija tiek patērēta un saules kolektoru saražotā siltumenerģija ir nepietiekama. Šādos brīžos siltuma ražošanai izmanto dabasgāzes katlus, kuru darbība ir efektīvāka nekā biomasas katliem, ja tie ieslēgti uz īsāku laiku.

Vēl viens darbības parametrs, ko var regulēt operators, ir saules lauka iestatītais temperatūras punkts. Iestatītais punkts ir manuāli iestatīta temperatūras atzīme, pie kuras sāk darboties saules kolektora lauka cirkulācijas sūkņi un virza siltumnesēju siltummaiņa virzienā, kur notiek siltuma noņemšana. Vasaras mēnešos apkārtējā gaisa temperatūra un saules radiācija ir daudz augstāka nekā pavasarī, un tā rezultātā saules siltumenerģijas ražošana ir lielāka, bet

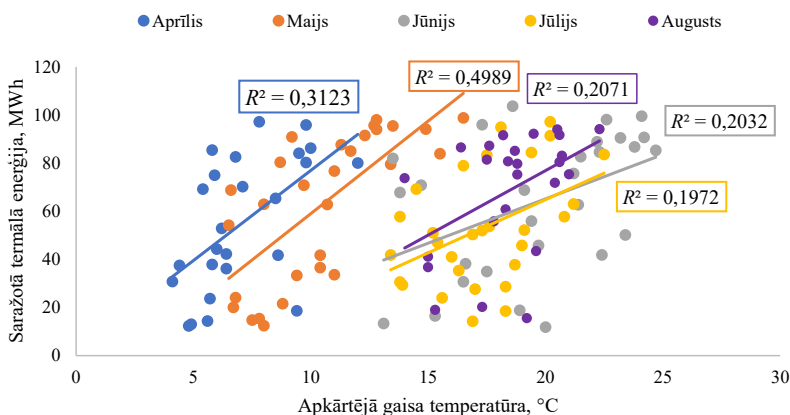
siltumenerģijas pieprasījums patērētāja pusē ir mazāks, salīdzinot ar maiju un aprīli. Šādos gadījumos jāpalielina iestatītais punkts, tādējādi samazinot saražotās enerģijas daudzumu un pielāgojot to siltumenerģijas patēriņam. Pretēja situācija ir pavasarī, kad pieprasījums pēc siltumenerģijas ir pietiekami liels un visa saules enerģija ir vai nu patērēta, vai arī uzkrāta. Līdz ar to iestatītais punkts tiek regulēts zemāk, dažkārt pat zem tīkla plūsmas temperatūras, lai samazinātu biomasas katlu slodzi un kurināmā patēriņu.

Iegūtie monitoringa dati analizēti, izmantojot regresijas analīzes metodi, nosakot korelāciju starp dažādiem parametriem. Sniegtie dati ir vākti visu saulaino sezonu, kas Latvijas gadījumā ir no aprīļa līdz augustam. 2.3 attēlā redzams, ka saules starojums ir galvenais saražotās saules siltumenerģijas ietekmējošais faktors. No visiem pētītajiem parametriem, kas var tieši ietekmēt saules kolektoru darbību, saules radiācijai ir augstākais korelācijas koeficients, kura vidējā vērtība sasniedz 0,6112. Līdzīgi rezultāti ir novēroti pētījumos, kas veikti liela mēroga saules siltumapgādes sistēmās Dānijā [12]. Lielākais datu sadalījums novērots jūlijā, kas saistīts ar jau minētā iestatītā punkta regulēšanu. Pie augstas ražības vairāku dienu laikā un nepietiekama siltuma pieprasījuma iestatītais punkts tika paaugstināts, samazinot saražoto siltumenerģiju. Savukārt vislielākā korelācija novērota maijā, jo saules kolektori ir novietoti tādā pozīcijā, ka maijā tie ražo siltumenerģiju ar visaugstāko efektivitāti un produktivitāti. Ja šī korelācija starp saules starojumu un saules kolektoru ražīgumu ir visspēcīgākā maijā, tad ir radīti vispiemērotākie apstākļi, lai ražošana šajā laikā būtu visefektīvākā.



2.3. att. Ražotās saules enerģijas atkarība no saules starojuma.

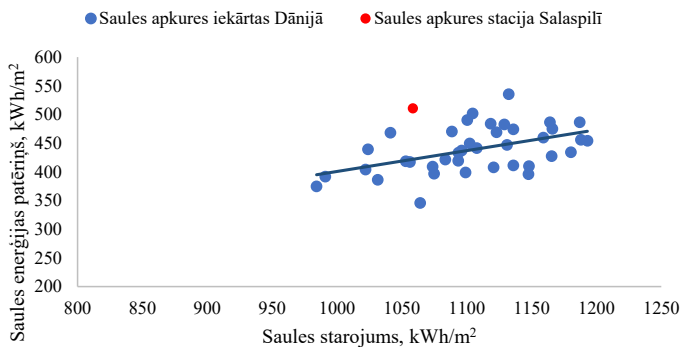
2.4. attēlā redzama korelācija starp apkārtējā gaisa temperatūru un saražoto siltumenerģiju. Korelācija starp šiem parametriem ir zemāka jūnijā, jūlijā un augustā, augstāka – aprīlī un maijā. Vidējā korelācija starp apkārtējā gaisa temperatūru un saražoto siltumenerģiju ir 0,2837, kas nozīmē, ka korelācija ir zema un citi apstākļi vairāk ietekmē saules kolektora darbību.



2.4. att. Saules kolektora efektivitātes atkarība no apkārtējā gaisa temperatūras.

Citi analizētie ietekmējošie parametri, kas tika pārbaudīti šajā pētījumā, bija siltumnesēja plūsmas un atgaitas temperatūra. Pētījums parādīja, ka korelācija starp šiem parametriem un saražoto siltumenerģiju ar saules kolektoriem ir ļoti zema. Dati bija ļoti izkliedēti, un, zinot, ka iestatītā vērtība tika mainīta regulāri, vairākas reizes dienā, šo parametru analīze ir ļoti sarežģīta. Ja temperatūras starpība mainās vairākas reizes dienā, ir grūti reģistrēt un sadalīt datus par to, cik daudz siltumenerģijas tika saražots ar katru konkrēto temperatūras starpību starp turpgaitas un atgaitas temperatūru.

2.5. attēlā redzams vairāku saules siltumapgādes staciju Dānijā un konkrētās saules sistēmas Salaspilī efektivitātes salīdzinājums. Visās šajā salīdzinājumā iekļautajās sistēmās tiek izmantotas vienas un tās pašas saules kolektoru tehnoloģijas (AS “Arcon-Sunmark”, HTHEATstore 35/10). Dati tika aprēķināti kā vidējie saules enerģijas efektivitātes un saules radiācijas rezultāti laika posmā no 2012. līdz 2016. gadam, kas prezentēti [14]. Redzams, ka Salaspils saules sistēmā ir sasniegts augsts saules kolektora lietderības koeficients. Īpatnējais saules enerģijas lietderības koeficients (511 kWh/m²) ir augsts, salīdzinot ar citām saules siltumapgādes sistēmām ar līdzīgu vidējo saules radiāciju.



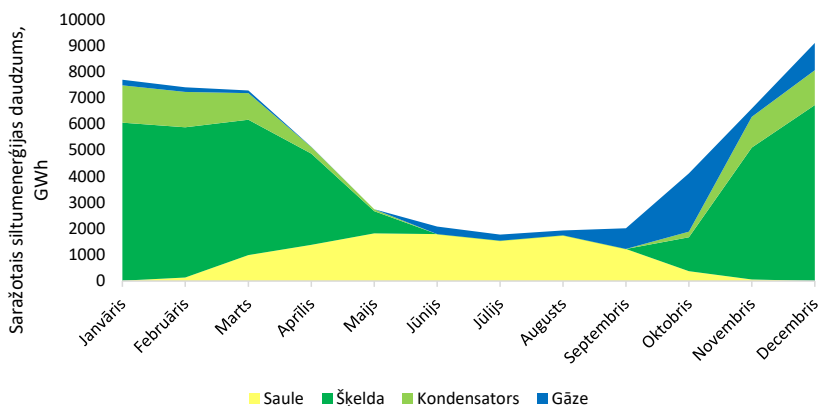
2.5. att. Saules sistēmas darbības rādītāju salīdzinājums, ņemot vērā saules starojumu Dānijā (vidējie dati 2012–2016) [14] un Salaspilī uzstādītās saules tehnoloģijas (2020).

Atšķirība starp rezultātiem varētu rasties tāpēc, ka saules sistēma Salaspilī aktīvi darbojas tikai pirmo gadu, kad iekārtas un tehnoloģijas ir visefektīvākās, lai gan saules kolektoru efektivitāte gadu gaitā tik būtiski nesamazinās. Nākotnē tiks turpināta sistēmas efektivitātes uzraudzība un noskaidrots vairāk noteicošo faktoru.

Kopumā Salaspilī uzstādītā saules kolektoru lauka saules enerģijas efektivitāte ir augsta, tomēr būtu iespējams saražot vēl vairāk siltumenerģijas, ja stacijā būtu lielāks akumulators, kur šo enerģiju uzglabāt, vai tad, ja pieprasījums būtu lielāks. Taču problēma ir tā, ka laikapstākļus nevar kontrolēt un pieprasījums sarūk laikā, kad ražošana (ar saules kolektoriem) ir visproduktīvākā – siltās un saulainās dienās. Tālākā analīzē tiek pievērsta uzmanība saules kolektoru efektivitātei, izslēdzot saules radiācijas ietekmi, lai labāk noteiktu citu faktoru ietekmi, kuru atkarība no efektivitātes ir ievērojami mazāka, salīdzinot ar saules radiāciju.

2.5. EnPS optimizācija CSA uzņēmumā ar lielu saules enerģijas lauku

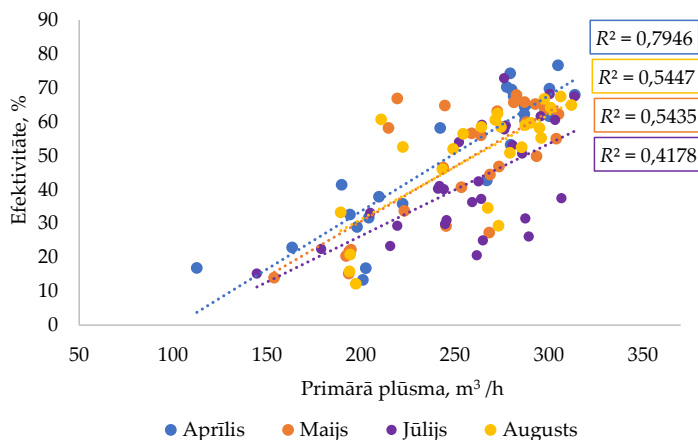
Uzstādot sistēmu, tika plānots, ka vasaras mēnešos saules kolektori segs 100 % no pieprasījuma. Tomēr 2020. gada vasaras mēnešos tā nosedza 90 % no pieprasījuma, bet pārējo saražoja, izmantojot dabasgāzes katlu. Pārskats par faktisko siltumenerģijas ražošanu pēc primārā enerģijas avota 2020. gadā redzams 2.6. attēlā. Būtiski izpētīt, vai ir iespējams veikt uzlabojumus.



2.6. att. Saražotā siltumenerģija pēc izmantotā kurināmā 2020. gadā.

Dati par saules siltuma ražošanu tika apstrādāti divos posmos. Pirmajā posmā atsevišķi novērtēja četrus saules kolektora efektivitāti ietekmējošos faktoros. Tika ņemti vērā šādi faktori: atgaitas temperatūra; plūsmas ātrums; saules kolektoru laukā izejošā un izejošā temperatūras starpība; apkārtējās vides temperatūra.

Vispirms tika novērtēts, kā primārā plūsma maina saules kolektora lauka efektivitāti. Iegūtie rezultāti liecina: jo lielāka plūsma, jo augstāka efektivitāte. Iegūtie regresijas analīzes rezultāti apkopoti 2.7. attēlā.

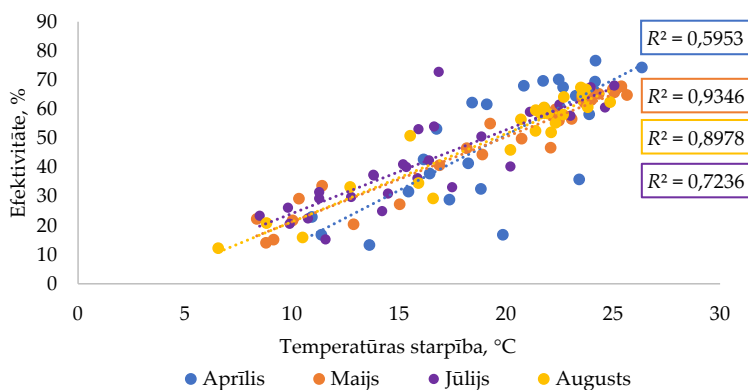


2.7. att. Siltumnesēju primārās plūsmas ātruma un saules lauka efektivitātes korelācija.

Plūsma ir atkarīga no saules starojuma, un tā tiek regulēta, lai sasniegtu nepieciešamo padeves temperatūru. Ja saules lauks saražo vairāk siltumenerģijas nekā faktiskais siltuma pieprasījums, siltuma pārpalikums tiek uzkrāts akumulācijas tvertnē.

Salīdzinot četru analizēto mēnešu datus, vislielākā efektivitātes atkarība no caurplūduma ir vērojama aprīlī (korelācijas koeficients = 0,7946). Aprīlī siltumenerģijas pieprasījums ir lielāks nekā vasaras periodā, jo ir nepieciešama telpu apkure. Efektivitāte samazinās, ja ir daudz saulainu dienu, netiek prognozēts pieprasījums un akumulācijas tvertne ir pilna. Efektivitātes samazinājumu nodrošina, paaugstinot saules kolektora ieklūdes temperatūru, kā rezultātā sekundārā ūdens puse ieklūdes sistēmā sajaucas ar siltā ūdens plūsmu. Attiecīgi jūlijā regresijas koeficients ir aptuveni 0,41. Kā redzams no punktiem grafikā, efektivitāte šajos punktos samazinājās, tāpēc tā bija mazāk atkarīga no primārās plūsmas ātruma. Optimizējot sistēmu, ir iespējams palielināt efektivitāti un iegūt vairāk saules enerģijas. Primārā caurplūduma optimizācija ir nepieciešama arī tāpēc, ka cirkulācijas sūkņi patērē daudz elektroenerģijas. Iegūtā datu analīze liecina, ka dažās dienās bija iespējams sasniegt augstāku saules enerģijas efektivitāti ar mazāku plūsmas ātrumu. Tāpēc turpmākajā izpētē varētu pievērsties konkrētām dienām ar augstāku saules lauka efektivitāti un zemāku primāro plūsmas ātrumu.

Otrais ietekmējošais faktors šajā gadījumā ir saules kolektora laukā ieejošā un izejošā temperatūras starpība. Iegūtie regresijas analīzes dati redzami 2.8. attēlā.



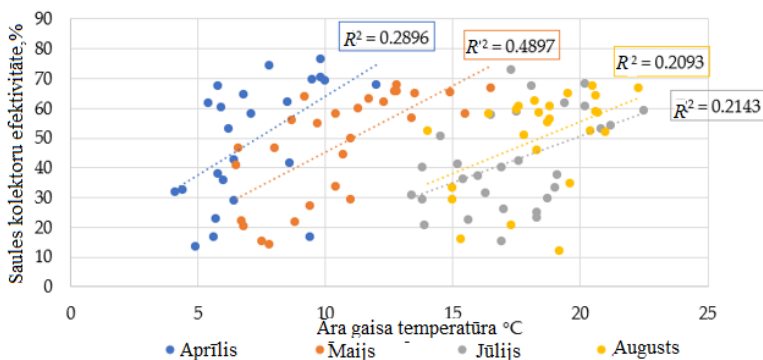
2.8. att. Saules kolektora efektivitātes atkarība no temperatūras starpības.

Rezultāti liecina: jo lielāka temperatūras starpība, jo augstāka saules kolektora efektivitāte. Ieklūdes temperatūra ir atkarīga no siltumtīkla atgaitas temperatūras, savukārt iestatītais punkts regulē izejas temperatūru no saules lauka. Visaugstākais efektivitātes regresijas koeficients ar plūsmas ātrumu ir aprīlī, bet tajā pašā laikā tika konstatēta mazāka atkarība no temperatūras starpības. Tas skaidri parāda, ka kvantitatīvā siltumtīklu regulēšana notiek pavasarī, bet kvalitatīvā regulēšana – vasarā. Rezultāti liecina, ka varētu veikt turpmāku

optimizāciju, lai izvēlētos piemērotu siltumtīklu regulēšanas mehānismu, meklējot līdzsvaru starp sūkņēšanas izmaksām, siltuma zudumiem un saules lauku efektivitāti.

Literatūrā minēts, ka ietekmējošs faktors ir āra gaisa temperatūra [4], jo tā ietekmē plūsmas ātrumu un siltumnesēja temperatūru. Vidējās dienas āra gaisa temperatūras svārstības bija no + 1,7 °C līdz + 12,1 °C. 6. attēlā redzams, ka aprīlī ir dienas ar augstāku saules lauka efektivitāti, jo temperatūras atšķirības var saglabāties lielākas. Turklāt jūlijā dažus punktus varēja optimizēt. Iestatītā temperatūra (siltumnesēja temperatūra pirms siltummaiņa) tika mainīta, pamatojoties uz laikstākļu prognozēm nākamajām dienām. Kad bija gaidāmas dienas ar lielāku saules starojumu, šis iestatītais punkts tika paaugstināts, tādējādi samazinot saules kolektora efektivitāti. Turpmākajos pētījumos būtu jāapsver precīzu laikstākļu prognožu ietekme uz kopējo saules kolektora efektivitāti. Ņemot vērā datu analīzi, redzams, ka mainīgā iestatītā temperatūra izraisa saules enerģijas ražošanas apstākļu svārstības. Visaugstākais korelācijas koeficients ir maijā ($R^2 = 0,93$), jo saules starojums bija stabils un saules lauka iestatījumi netika mainīti.

Trešais analizētais faktors ir apkārtējā gaisa temperatūras izmaiņu ietekme uz saules lauka efektivitāti (2.9. att.).



2.9. att. Saules kolektora efektivitātes atkarība no apkārtējā gaisa temperatūras.

Skaidri redzams, ka vidējā diennakts āra gaisa temperatūra Latvijā no aprīļa līdz augustam ir robežās no + 1,7 °C līdz + 22,3 °C. Salīdzinot ar citiem ietekmējošiem faktoriem, kas noteikti kā nozīmīgi, gaisa temperatūra ir palīgfaktors, kas var izskaidrot nozīmīgo faktoru novirzes. Tomēr, salīdzinot visus mēnešus, vislielākā āra gaisa temperatūras un saules lauka efektivitātes korelācija tika novērota maijā ($R^2 = 0,4897$). Tāpēc āra gaisa temperatūra nav

nozīmīgs faktors. Tomēr tā ietekmē atgriešanās temperatūru no patērētājiem un līdz ar to arī temperatūras starpību.

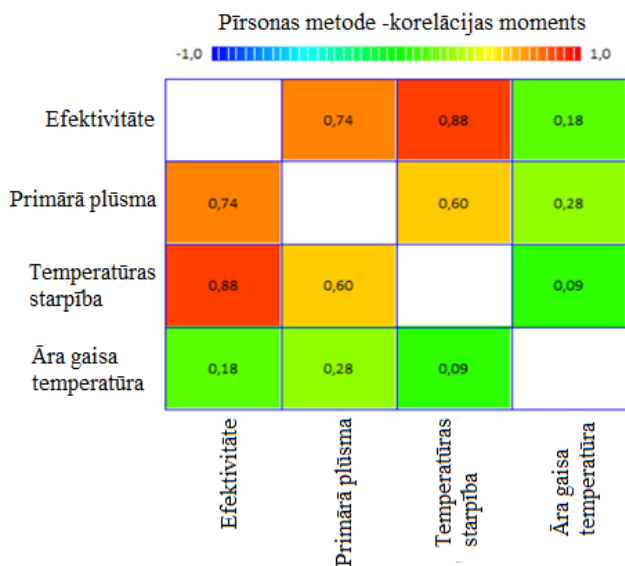
Lai noteiktu saistību starp analizētajiem mainīgajiem, tika veikta daudzkārtēja regresijas analīze, izmantojot *Statgraphics* funkcijas. Rezultātā parādīti rezultāti, kas iegūti, pielāgojot daudzkārtējās lineārās regresijas modeli, lai aprakstītu saistību starp efektivitāti un trim neatkarīgajiem mainīgajiem. Pielāgotā modeļa vienādojums ir šāds:

$$E = -31,617 + 0,135 \times w_1 + 2,32794 \times \Delta t + 0,091657 t_a,$$

kur: w_1 – primārā plūsma; Δt – temperatūras starpība; t_a – apkārtējā gaisa temperatūra.

Saskaņā ar iegūto vienādojumu, mainot ietekmējošos faktorus, var aprēķināt saules kolektora efektivitāti. Tāpēc šo vienādojumu var izmantot, lai plānotu saules kolektora darbību un prognozētu siltuma ražošanu. Plānojot sistēmas darbību, galvenais uzdevums ir sasniegt pēc iespējas augstāku efektivitāti periodos, kad ir lielāks pieprasījums, un saglabāt efektivitāti, kad krātuvē vairs nav rezerves.

Lai novērtētu korelāciju starp mainīgajiem lielumiem un pēc tam vizualizētu šo korelāciju, tika izmantotas korelācijas un matricas grafika funkcijas. Dati apkopoti 2.10. attēlā.



2.10. att. Korelācijas diagramma.

2.10. attēla tabulā parādītas Pīrsona reizinājuma korelācijas starp katru mainīgo pāri. Šie korelācijas koeficienti ir robežās no -1 līdz $+1$, un tie mēra lineārās saistības stiprumu starp

mainīgajiem. P-vērtības zem 0,05 liecina par statistiski nozīmīgām ne nulles korelācijām 95,0 % ticamības līmenī. Šādu mainīgo p vērtības ir zemākas par 0,05:

- efektivitāte un primārā plūsma;
- efektivitāte un temperatūras starpība;
- primārā plūsmas un temperatūras starpība;
- primārā plūsma un apkārtējā gaisa temperatūra.

Visspēcīgākā korelācija ir starp efektivitāti un temperatūras starpību – korelācijas koeficients ir 0,88. Vājākā korelācija ir starp efektivitāti un apkārtējā gaisa temperatūru, tomēr plūsmu ietekmē arī apkārtējā gaisa temperatūra.

SECINĀJUMI

Promocijas darbā izstrādāta metodika, kas ļauj plānot, ieviest, novērtēt un optimizēt AER risinājumus siltumapgādē EnPS ietvarā kas paaugstina uzņēmuma energoefektivitāti un samazina tā ietekmi uz vidi. Energopārvaldības plānošanas process ir lietots valsts, pašvaldību un uzņēmumu līmenī.

Valsts siltumapgādes novērtējums

Promocijas darbā ieviests klimata indekss kā kopīgs vērtējums, lai novērtētu CSA sistēmas efektivitāti, ietekmi uz vidi un ilgtspējību. Novērtēšanai tiek izmantoti septiņi dažādi CSA raksturojoši kritēriji: AER īpatsvars; AER koģenerācijas īpatsvars; īpatnējās CO₂ emisijas; vides izmaksas; īpatnējie siltuma zudumi; primārās enerģijas faktors; rūpniecības uzņēmumu piegādātās siltumenerģijas īpatsvars. Metodikā izmantots saliktā indeksa ietvars, kritēriji ir prioritizēti un svērti pēc AHP metodes.

Klimata indeksa izmantošana varētu uzlabot konkurenci starp CSA operatoriem un veicināt virzību uz ilgtspējīgākiem risinājumiem nacionālā līmenī. Noteiktais klimata indekss varētu būt arī siltuma tarifa aprēķina kritērijs. CSA uzņēmumiem ar augstāko noteikto klimata indeksu varētu tikt pieļauta lielāka peļņas daļa, vieglāks siltumenerģijas tarifs apstiprināšanas process vai citas priekšrocības. Metode tiek piemērota 20 dažādiem CSA operatoriem. Iegūtās klimata indeksa vērtības 15 CSA uzņēmumiem ir virs aplēstā vidējā atsauces līmeņa. Piecas CSA sistēmas bija zem noteiktās robežvērtības, jo dabasgāze tika izmantota kā galvenais enerģijas avots.

Energopārvaldība pašvaldības līmenī

Standartizētās energopārvaldības procedūras ir elastīgas un sekmīgi piemērojamas dažāda veida organizācijās, tajā skaitā pašvaldībās. Enerģijas datu pieejamība ir ļoti svarīga darbību plānošanai un to īstenošanas uzraudzībai. Datu trūkumu var atrisināt, ieviešot integrētas datu pārvaldības procedūras kā daļu no EnPS. Informācija turpmāk būtu jāizmanto izmērāmu enerģijas rādītāju aprēķināšanai.

EnPS darbosies tikai tad, ja pastāvēs pašvaldības kopējā organizatoriskā un administratīvā modeļa neatņemama sastāvdaļa. Tāpēc standartizētu procedūru izmantošana (kā noteikts *ISO 50001*) ir būtisks faktors veiksmīgas, funkcionējošas un efektīvas EnPS ieviešanai pašvaldību līmenī. Papildus tas veicinās arī efektīvāku ilgtspējīgas enerģētikas rīcības plānu ieviešanu. Lai atvieglotu energopārvaldības standarta ieviešanu pašvaldībās, būtu jāizstrādā visaptverošas vadlīnijas ar procedūru piemēriem un to ieviešanas gaitu soli

pa solim. Šajās vadlīnijās jāiekļauj arī energoindikatoru kopums, kas būtu jāizmanto, lai novērtētu iekārtu stāvokli un identificētu pašvaldības energosistēmas kritiskās daļas.

EnPS CSA uzņēmumos

Darbā piedāvāta metode CSA uzņēmumiem atbilstošas atjaunojamās enerģijas tehnoloģijas izvēlei, papildinot EnPS modeli. Lai objektīvi salīdzinātu vairākas alternatīvas pārejai uz AER, tika izmantota daudzkritēriju analīzes metode. Galvenie rādītāji CSA uzņēmumu darbības novērtējumam ir esošā apkures katla efektivitāte atkarībā no saražotā siltuma daudzuma, kondensatora lietderības koeficients atkarībā no atgaitas temperatūras un šķeldas mitruma satura, īpatnējais jaudas patēriņš. AER īpatsvars kopējā izmantotās enerģijas apjomā ir nozīmīgs EnPS rādītājs.

Atbilstoši EnPS ietvaram būtiski ir pārbaudīt gan īstenoto energoefektivitātes pasākumu, gan AER projektu darbības efektivitāti. Promocijas darbā šis posms tiek prezentēts kā Saules kolektoru sistēmas veiktspējas novērtējums. Eksploatācijas datu analīze veikta pirmajam liela mēroga saules kolektoru laukam Latvijā, kas pieslēgts CSA tīklam, analizējot vairākus faktorus.

Analīzes rezultāti liecina, ka sistēmas produktivitāti galvenokārt ietekmē saules starojums un spēcīgākā korelācija starp šiem parametriem tiek konstatēta maijā. Saules kolektora veiktspēju būtiski ietekmē regulētā temperatūras iestatījuma vērtība. Dažkārt jābūt jāņem vērā ar šķietami neizdevīgu pieļaujamā temperatūras maksimuma līmeni, taču tas tiek darīts ar ilgtermiņa mērķi, lai saules kolektoru sistēma būtu droša. Korelācija starp saules starojumu un kolektora produktivitāti ir lineāra.

Energo pārvaldības darbības posmā tika analizētas saules kolektora optimizācijas iespējas. Salaspilī uzstādītā saules kolektoru lauka veiktspēja ir augsta, tomēr siltumenerģiju būtu iespējams saražot vēl vairāk, ja sistēmai būtu lielāka enerģijas uzkrāšanas jauda vai ja būtu lielāks siltumenerģijas pieprasījums.

Ieviešot pasākumus, kas palielina AER īpatsvaru uzņēmumā, svarīgi ir pārbaudīt tā atbilstību jau plānošanas stadijā noteiktajiem mērķiem. Nodrošinot nepārtrauktu EnPS, ieviešot jaunus risinājumus uzņēmumā, ir jāuzlabo darbības rādītāji. Lai nodrošinātu nepārtrauktu sistēmas darbības uzlabošanu, ir svarīgi apzināt optimizācijas iespējas un definēt jaunus mērķus.

LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] Lund H., Werner S., Wiltshire R. 4th Generation District heating (4GDH) Integration smart thermal grids into future suitable energy systems. *Energy* 2014;68:1–11. doi:10.1016/j.energy.2014.02.089.
- [2] Ministry of Environmental Protection and Regional Development. Latvian National Energy and Climate Plan 2020–2030.
- [3] Data about district heating [Online]. [Accessed 15.03.2019]. Available: <https://www.csb.gov.lv/lv/statistika/db>.
- [4] Data for projects implemented by the EU [Online]. [Accessed 15.03.2019]. Available: www.esfondi.lv.
- [5] Joelsson J., Gustavsson L. Swedish biomass strategies to reduce CO2 emission and oil use in an EU context. *Energy* 2012;43(1):448–468. doi:10.1016/j.energy.2012.03.050.
- [6] Rodzkin A., Kundas S., Charnenak Y., Khroustalev B., Wichtmann W. The Assessment of Cost of Biomass from Post-Mining Peaty Lands for Pellet Fabrication. *Environmental and Climate Technologies* 2018;22(1):118–131. doi:10.2478/rtuct-2018-0008.
- [7] Ostergaard P. A., Lund H. A renewable energy system in Frederikshavn using low-temperature geothermal energy for district heating. *Applied Energy* 2011;88(2):479–487. doi:10.1016/j.apenergy.2010.03.018.
- [8] Morvaj B., Evins R., Carmeliet J. Decarbonizing the electricity grid: the impact on urban energy systems, distribution grids and district heating potential. *Applied Energy* 2017;191:125–140. doi:10.1016/j.apenergy.2017.01.058.
- [9] European solar district heating system database [Online]. [Accessed 15.03.2019]. Available: <http://solar-district-heating.eu/ServicesTools/Plantdatabase.aspx>.
- [10] Dynova L., Sevastjanov P., Tikhonenko A. A direct Interval Extension of TOPSIS Method. *Expert Systems with Applications* 2013;40(12):4841–4847. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.02.022>.
- [11] Valtere S., Koks N., Blumberga D. Vides vadība un energoparvaldība. Rīga: RTU; 2014.
- [12] Vigants G. Zema oglekļa siltumapgādes sistēmas. Dissertation, Riga Technical university, 2011.
- [13] Noussan M., et al. Data Analysis of the Energy Performance of Large Scale Solar Collectors for District Heating. *Energy Procedia* 2017;134:61–68. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.619>.
- [14] Furbo S., et al. Yearly thermal performances of solar heating plants in Denmark – Measured and calculated. *Solar energy* 2018;159:186–196. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.10.067>.