

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**  
Būvniecības inženierzinātņu fakultāte  
Siltuma, ūdens un gāzes tehnoloģijas institūts

**Aleksandrs ZAJACS**

Doktora studiju programmas “Siltuma, gāzes un ūdens inženiersistēmas” doktorants

**CENTRALIZĒTO SILTUMAPGĀDES  
SISTĒMU ATTĪSTĪBAS SCENĀRIJU  
NOVĒRTĒJUMS**

**Promocijas darba kopsavilkums**

Zinātniskais vadītājs  
profesors *Dr. sc. ing.*  
A. Borodiņecs

**RTU Izdevniecība**  
**Rīga 2017**

Zajacs A. Centralizēto siltumapgādes sistēmu  
attīstības scenāriju novērtējums. Promocijas darba  
kopsavilkums. – R.: RTU, 2017. – 22 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes  
“RTU P – 12” 2016. gada 29. septembra lēmumu,  
protokols nr.16/3.

**ISBN 978-9934-10-906-5**

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2017. gada 18. janvārī plkst. 16 Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības inženierzinātņu fakultātē, Ķīpsalas ielā 6B, Sēžu zālē.

**OFICIĀLIE RECENZENTI**

Profesors *Dr. habil. sc. ing.* Egils Dzelzītis  
Rīgas Tehniskā universitāte

Vadošais pētnieks *Dr. sc. ing.* Gaidis Klāvs  
Fizikālas enerģētikas institūts, Latvija

Profesors *Dr. sc. ing.* Janek Laanearu  
Tallinas Tehniskā universitāte, Igaunija

**APSTIPRINĀJUMS**

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

Aleksandrs Zajacs .....

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 51 ilustrācija, kopā 107 lappuses. Literatūras sarakstā ir 103 nosaukumi.

## ANOTĀCIJA

Promocijas darbā ir apkopoti kvalitatīvie un kvantitatīvie pētījumi par centralizētās siltumapgādes sektora attīstības tendencēm un problēmām ar mērķi skaitliski novērtēt centralizēto siltumapgādes sistēmu iespējamās attīstības scenārijus. Energosistēmu optimizāciju iepriekš pētījuši zinātnieki: Borodiņecs A., Dzelzītis E., Klāvs G., Krēsliņš A., Aberg M., Christensen J. E., Laanearu J., Lund H. u. c.

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt metodiku un plānošanas instrumentu centralizēto siltumapgādes sistēmu (CSA) visaptverošam novērtējumam dažādiem attīstības scenārijiem.

Mērķa sasniegšanai tika izvirzīti šādi uzdevumi:

- 1) izpētīt esošās Eiropas Savienības enerģētikas politikas tendences un izaicinājumus;
- 2) izpētīt siltumapgādes sistēmu potenciālos attīstības scenārijus;
- 3) veikt pētījumus par siltumenerģijas patēriņa samazināšanos CSA sistēmu sadales tīklu un esošo mājokļu renovācijas rezultātā;
- 4) izstrādāt CSA sistēmu modelēšanas un novērtēšanas metodoloģiju;
- 5) balstoties uz metodoloģiju, izstrādāt dinamisko simulāciju rīku CSA sistēmu siltuma un masas pārneses procesu modelēšanai un CSA efektivitātes skaitliskai novērtēšanai;
- 6) veikt izstrādātā rīka validāciju, salīdzinot CSA sistēmas noteiktu parametru izmērītās un aprēķinātās vērtības;
- 7) veikt piedāvāto CSA sistēmas attīstības scenāriju simulācijas un izvēlēties visizdevīgāko, pamatojoties uz novērtēšanas kritēriju vērtībām.

**Zinātniskā novitāte.** Balstoties uz piedāvāto metodoloģiju, tika izstrādāts modelis ar vairākiem integrētiem siltuma un masas pārneses procesiem ceturtās paaudzes CSA sistēmu modelēšanai un novērtēšanai mainīga siltumenerģijas patēriņa apstākļos.

**Praktiskā nozīme.** Izstrādāto metodoloģiju un centralizētās siltumapgādes plānošanas rīku var praktiski izmantot pašvaldību un siltumenerģijas apgādes sistēmu operatoru plānošanas un attīstības nodaļās centralizēto siltumapgādes sistēmu novērtēšanai un efektivitātes paaugstināšanai.

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 51 ilustrācija, kopā 108 lappuses. Literatūras sarakstā ir 103 nosaukumi. Par promocijas darba rezultātiem ziņots 10 starptautiskajās konferencēs, publicēti 11 zinātniskie raksti.

## SATURS

IEVADS .....	5
1. <b>NORMATĪVO AKTU APSKATS UN ENERĢIJAS BILANCE</b> .....	6
1.1. Eiropas Savienības enerģētikas politika .....	6
1.2. Centralizētas siltumapgādes tehniskais līmenis Latvijā .....	7
2. <b>METODOLOĢIJA</b> .....	8
2.1. Pamata metodes un principi .....	8
2.2. Pētījums par siltuma sadali: siltuma zudumu optimizācija .....	10
2.3. Pētījums par dzīvojamo ēku energoefektivitāti .....	12
3. <b>CENTRALIZĒTĀS SILTUMAPGĀDES PLĀNOŠANAS RĪKS</b> .....	14
3.1. Centralizētās siltumapgādes plānošanas rīka izstrāde .....	14
3.2. Centralizētās siltumapgādes plānošanas rīka validācija .....	17
3.3. Dažādu attīstības scenāriju simulācijas ar centralizētās siltumapgādes plānošanas rīka palīdzību .....	18
SECINĀJUMI .....	21
PUBLIKĀCIJU SARAKSTS .....	22

## IEVADS

Pēdējo gadu laikā tiek plaši runāts par to, ka pilsētvide ir resurss, kas prasa pārdomātu pārvaldību. Tas radījis nepieciešamību pēc CO<sub>2</sub> izmešu samazināšanas politikas ieviešanas, atjaunojamo un ilgtspējīgu enerģijas resursu izmantošanas un pārdomātas pilsētu attīstības ar integrētām viedām nozarēm – ekonomiku, enerģiju, tehnoloģijām, arhitektūru un politiku, kur lielāka uzmanība jāpievērš arī pilsētu un nacionālās drošības plānošanai, jo tām ir svarīga nozīme jebkuras pilsētas un valsts attīstībā. Tas tiek darīts, lai varētu veiksmīgāk pārvaldīt dažādus riskus, tostarp samazināt atkarību no importētajiem energoresursiem. Jēdziens "pilsētas drošība" nozīmē stabilu energoapgādi, pārdomātu un efektīvu enerģijas pārvaldību un vietējo atjaunojamo enerģijas avotu izmantošanu.

Saskaņā ar Eiropas Parlamenta direktīvas 2010/31/ES 9. pantu dalībvalstīm jānodrošina, ka līdz 2020. gada 31. decembrim visas jaunās ēkas ir gandrīz nulles enerģijas ēkas. Saskaņā ar Kioto protokolu Eiropas Savienībai līdz 2020. gadam par 20 % ir jāsamazina siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisijas, un kopš 2015. gada decembra ES ir apņēmusies izpildīt Parīzes protokola jaunus ambiciozus klimata pārmaiņas mērķus – par 40 % samazināt SEG emisijas līdz 2030. gadam, salīdzinot ar 1990. gada līmeni, un līdz 2050. gadam samazināt vismaz par 60 %, salīdzinot ar 2010. gada līmeni. Sasniegt 27 % atjaunojamās enerģijas īpatsvaru no kopēja enerģijas patēriņa, samazināt enerģijas patēriņu par 27 % salīdzinot ar "business-as-usual"

scenāriju un līdz 2030. gadam noturēt globālās vidējās temperatūras kāpumu 2 °C robežās. Panākt ievērojamus enerģijas ietaupījumus ir iespējams tikai tad, ja ir skaidri identificēti prioritārie pārmaiņu sektori un tiek nodrošināta investīciju kapitāla pieejamība. Eiropas Savienībā enerģijas patēriņš ēkās ir aptuveni 40 % no kopēja enerģijas patēriņa, tādējādi ēku energoefektivitātes paaugstināšana un centralizēto siltumapgādes un aukstumapgādes sektoru attīstība ir efektīvākais veids, kā panākt fosila kurināmā izmantošanas un CO<sub>2</sub> izmešu samazinājumu. Paātrinot ēku renovāciju, ir iespējams par trešdaļu samazināt dabasgāzes patēriņu. Ir konstatēts, ka Ziemeļeiropas klimatā cilvēka paradumi var palielināt siltumenerģijas patēriņu par 50 %, salīdzinot ar standarta energoefektīvo ēku aprēķina vērtībām.

Lai atbilstoši reaģētu uz enerģijas pieprasījuma izmaiņām nākotnē un saimnieciski izdevīgi attīstītu siltumapgādes nozari, ir nepieciešams rīks siltumapgādes sistēmu plānotu attīstības scenāriju izvērtēšanai, kas pamatots uz centralizētās siltumapgādes sektora attīstības tendencu kvalitatīvo un kvantitatīvo pētījumu rezultātiem.

## **1. NORMATĪVO AKTU APSKATS UN ENERĢIJAS BILANCE**

### **1.1. Eiropas Savienības enerģētikas politika**

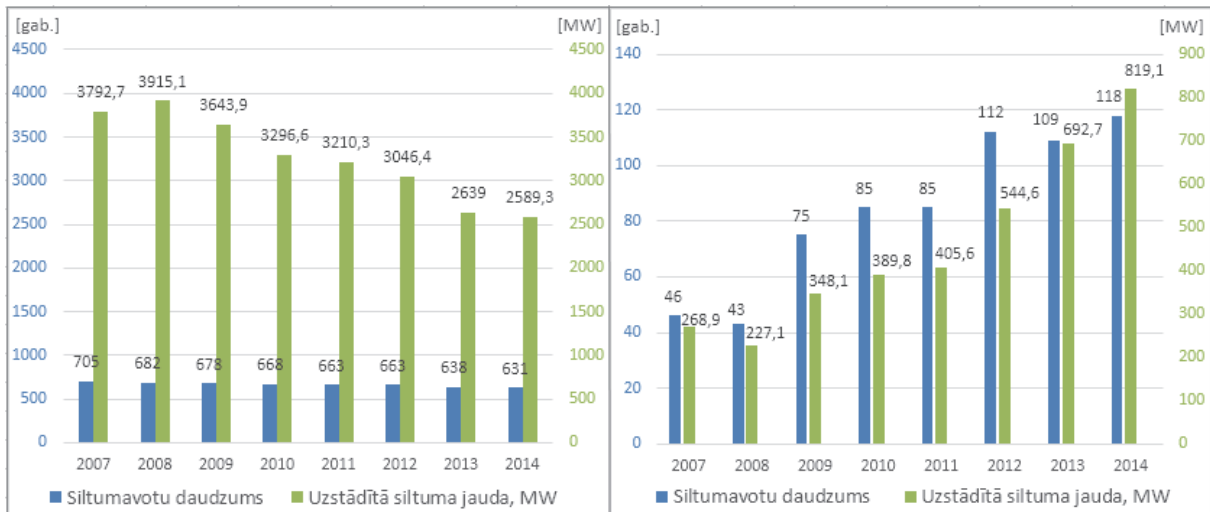
Eiropas Savienība daudzus gadus izstrādāja un uzlaboja normatīvos aktus enerģētikas sektorā. Obligātas un visaptverošas Eiropas enerģētikas politikas ieviešana tika apstiprināta 2005. gada 27. oktobrī. 2007. gada Lisabonas vienošanas nosaka solidaritātes principus enerģijas piegādes jautājumos un ES enerģētikas politikas izmaiņās.

2014. gada janvārī ES uzņēma saistības par 40 % samazināt SEG emisijas līdz 2030. gadam, salīdzinot ar 1990. gada līmeni, un sasniegt 27 % atjaunojamās enerģijas īpatsvara mērķi. Mērķis ir visizaicinošākais no visiem pasaulē zināmajiem, un ir sagaidāms, ka tas izveidos 70 000 pilna laika darba vietu un samazinās fosilā kurināmā importu par 33 miljardiem EUR. Savukārt vadošās Eiropas valstis izvirzījušas savus nacionālos energoefektivitātes mērķus. Zviedrijas mērķis ir līdz 2020. gadam samazināt kopējo enerģijas patēriņu par 20 %, salīdzinot ar 2008. gada līmeni, bet ēkās īpatnējo enerģijas patēriņu samazināt par 20 % līdz 2020. gadam un par 50 % līdz 2050. gadam, salīdzinot ar 1995. gadu. Vācijā plāno samazināt primāro enerģijas patēriņu par 20 % līdz 2020. gadam un par 50 % līdz 2050. gadam, salīdzinot ar 2008. gadu. Apvienotajā Karalistē definēja juridiski saistošus mērķus samazināt CO<sub>2</sub> emisijas par 34 % līdz 2020. gadam un par 80 % līdz 2050. gadam, salīdzinot ar 1990. gada līmeni.

## 1.2. Centralizētās siltumapgādes tehniskais līmenis Latvijā

Pēdējā desmitgadē Latvijā pakāpeniski notiek siltumavotu modernizācijas process. Attīstoties tehnoloģijām, 60. un 80. gados uzstādītās iekārtas ir tehniski un morāli novecojušas, bet pēdējās desmitgades laikā ievērojami paaugstinājušās prasības pret vides kvalitāti, kas veicina modernizācijas procesu un sekmē atteikšanos no videi bīstamiem kurināmā veidiem – akmeņoglēm un mazuta, vienlaikus attīstot vietējos atjaunojamus energoresursus. 90. gadu sākumā izmainījās valsts politiskā situācija un arī enerģētikas politiku, pārejot no "neierobežotas" enerģijas patēriņa uz "efektīvu" enerģijas patēriņu. Centralizētās siltumapgādes sektora modernizācijas procesa mērķis bija optimizēt siltumenerģijas ražošanu un pārvadi un piedāvāt gala lietotājam kvalitatīvu produktu un konkurētspējīgu pakalpojuma cenu.

Analizējot Latvijas CSP statistiskos datus, tika noteikts, ka kopējā uzstādītā siltumavotu jauda Latvijā samazinās kopā ar siltumavotu kopskaitu, kā norādīts attēlā 1.1.



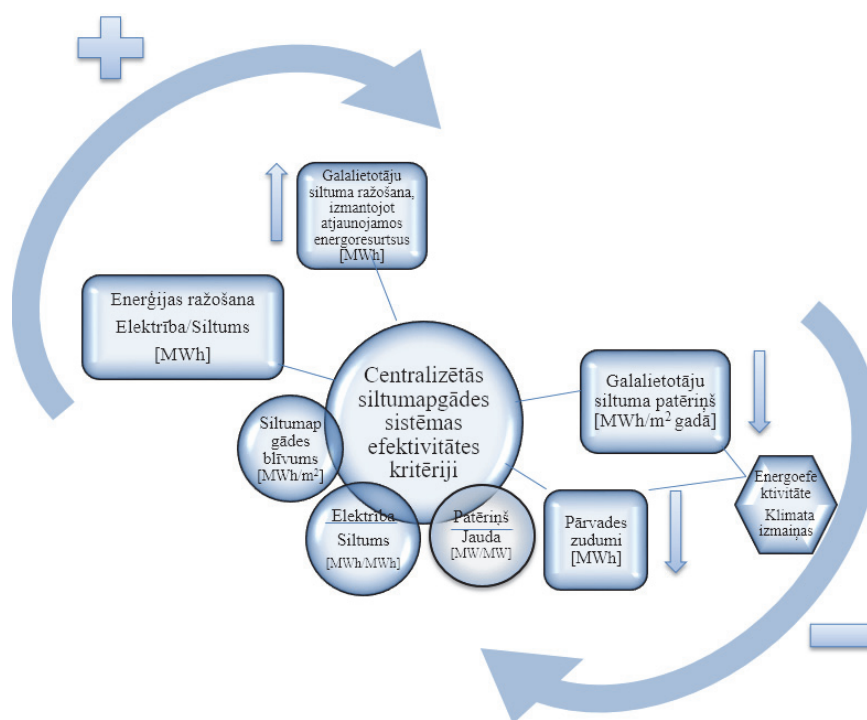
Attēls 1.1. Siltumavotu skaits un uzstādītā jauda (pa kreisi) pret siltumavotiem, kas izmanto koksnes šķeldu (pa labi) Latvijā 2007.–2014. gadā.

Biokurināmā izmantošanas analīze Latvijā liecina, ka tā ļoti aktīvi attīstījusies pēdējo 10 gadu laikā. 2007.–2014. gadā kopējais ogļu katlu māju skaits tika samazināts no 22 līdz trīs, savukārt siltumavotu skaits, kur kā kurināmo izmanto dabasgāzi, tika samazināts no 296 līdz 267. Biokurināmā siltumavotu skaits pieaudzis 2,5 reizes, un uzstādītā jauda 2014. gadā kļuva trīs reizes lielākā, salīdzinot ar 2007. gadu. Savukārt ES statistika liecina, ka no 1990. līdz 2014. gadam Eiropas Savienības atkarība no energoresursu importa palielinājās no 44,2 % līdz 53,4 %. Tas vēlreiz norāda uz nepieciešamību pievērst lielāku uzmanību nacionālas drošības plānošanai, samazinot atkarību no importētiem energoresursiem un attīstot vietējos atjaunojamus enerģijas avotus.

## 2. METODOLOĢIJA

### 2.1. Pamatmetodes un principi

Centralizētās siltumapgādes (CSA) sistēmas līdzsvaru nosaka vienāds saražotās un patērētās siltumenerģijas daudzums. Centralizētās siltumapgādes operatoriem ir iespēja precīzi noteikt siltuma pieprasījumu atkarībā no ārējās temperatūras, izmantojot statistiskos datus, un kvantitatīvi vai kvalitatīvi regulēt siltumslodzi. Siltumenerģijas sadales un patēriņa dinamika ir tieši saistīta ar vēsturiskajām un arhitektūras pilsētas/rajona īpatnībām, un dažādās vietās tā var ievērojami atšķirties. Jebkuru siltumapgādes sistēmas parametru izmaiņas ietekmēs sistēmas efektivitāti, ko var redzēt attēlā 2.1, kur tiek identificēti siltumapgādes sistēmas efektivitātes rādītāji. Efektivitātes kritēriju izmantošana sekmēs CSA sistēmu attīstības scenāriju novērtēšanu, lai sasniegtu labāku vispārējo CSA sistēmas efektivitāti.



Attēls 2.1. Siltumapgādes sistēmas līdzsvars un efektivitātes rādītāji.

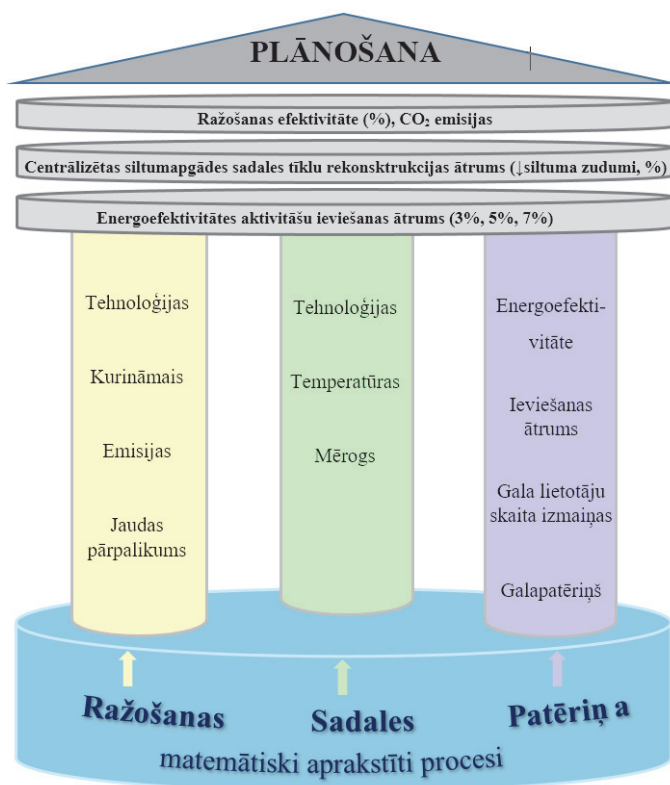
Metodoloģija ir izstrādāta, balstoties uz kvalitatīvo un kvantitatīvo pētījumu kopu, kas sniedz profesionālu viedokli par centralizētās siltumapgādes tendencēm un izaicinājumiem.

1. un 2. nodaļā ir veikti kvalitatīvie pētījumi, kas apkopo esošās Eiropas Savienībā (ES) enerģētikas politikas tendences, siltumapgādes sistēmu potenciālu attīstības scenāriju analīzi un datus par energoefektivitātes paaugstināšanas aktivitātēm. Pētījumi ir identificējuši divus laika periodus – līdz 2020. un 2050. gadam, kad ES dalībvalstis ir paziņojušas savus mērķus samazināt enerģijas izmantošanu attiecīgi no 20 % līdz 80 %, tādējādi var prognozēt



ievērojamas pārmaiņas ēku energoefektivitātes uzlabošanā, kas savukārt stipri ietekmēs CSA sistēmu veikspēju un iespējamās attīstības scenārijus.

Kvantitatīvo pētījumu rezultāti, kas tika veikti šā darba 3. nodaļā, uzskatāmi parāda sasniedzamo siltumenerģijas patēriņa samazināšanās līmeni esošajās siltumapgādes sistēmās, īpaši fokusējoties uz siltumenerģijas patēriņa samazināšanos CSA sistēmu sadales tīklu un esošo mājokļu renovācijas rezultātā.



Attēls 2.2. Centralizētās siltumapgādes plānošanas rīka metodoloģijas shēma.

Kvantitatīvo pētījumu dati tika vākti attālināti no siltuma skaitītājiem, kas atrodas individuālo siltummezglu telpās un siltumavotos. Dati tika statistiski novērtēti, un katrai ēkai tika noteikta standarta kļūda. Nerenovētām ēkām SK bija robežās no 1,2–2,5 ar vidējo vērtību  $\pm 1,8 \text{ kWh/m}^2$  mēnesī vai  $\pm 6,3 \%$ , un visu ēku datiem SK bija robežās no 1,2–4,2 ar vidējo vērtību  $\pm 2,1 \text{ kWh/m}^2$  mēnesī vai  $\pm 7,2 \%$ .

Plānošanas rīks balstās uz CSA sistēmu dinamisko simulāciju modeli siltuma un masas pārnesei procesu modelēšanai un efektivitātes skaitliskai novērtēšanai, kā tas ir parādīts attēlā 2.2. Trīs vertikālie pīlāri, kas ir apvienoti vienā siltumapgādes sistēmā, atspoguļo galvenās CSA sistēmas fāzes – ražošanu, pārvadi un patēriņu ar mainīgiem parametriem. Katrs augšējais horizontālais disks atspoguļo mainīgos parametrus viena scenārija ietvaros. Teorētiski disku skaits ir neierobežots, bet šajā promocijas darbā tika izskatīti trīs svarīgākie mainīgie

parametri katram scenārijam, un papildus tika paredzēta iespēja mainīt siltumenerģijas ražošanas kurināmā veidu un jaudu.

Plānošanas instrumentu ir plānots izmantot vienas siltumapgādes sistēmas ietvaros, bet teorētiski to var lietot arī pilsētas mērogā vai apvienot vairākas centralizētās apkures sistēmas turpmākai novērtēšanai.

## 2.2. Pētījums par siltuma sadali: siltuma zudumu optimizācija

Siltumnesēja temperatūras samazinājums īsā cauruļvadu posmā ir tieši proporcionāls cauruļvada garumam un tā diametram un apgriezti proporcionāls siltumnesēja plūsmas ātrumam. Vispārpieņemtie aprēķini ir precīzi gadījumā, ja siltuma caurlaidības koeficients un siltumnesēja temperatūra ir konstanta cauruļvada garumā, kas var būt novērots cauruļvadiem ar labu izolācijas slāni. Aprēķini tika veikti novecojušiem cauruļvadiem ar sliktu un vietām bojātu izolāciju, kas nozīmē, ka plūstot siltumnesējs zaudē daļu iekšējās enerģijas un notiek tā pakāpeniskā atdzišana, un rezultātā vidējā siltumnesēja temperatūra atšķiras no sākotnējās. Sakarā ar to mainās arī cauruļvadu virsmas temperatūra, un attiecīgi konvektīvo un starojuma siltuma atdeves koeficientu vērtības nav vairs konstantas vērtības.

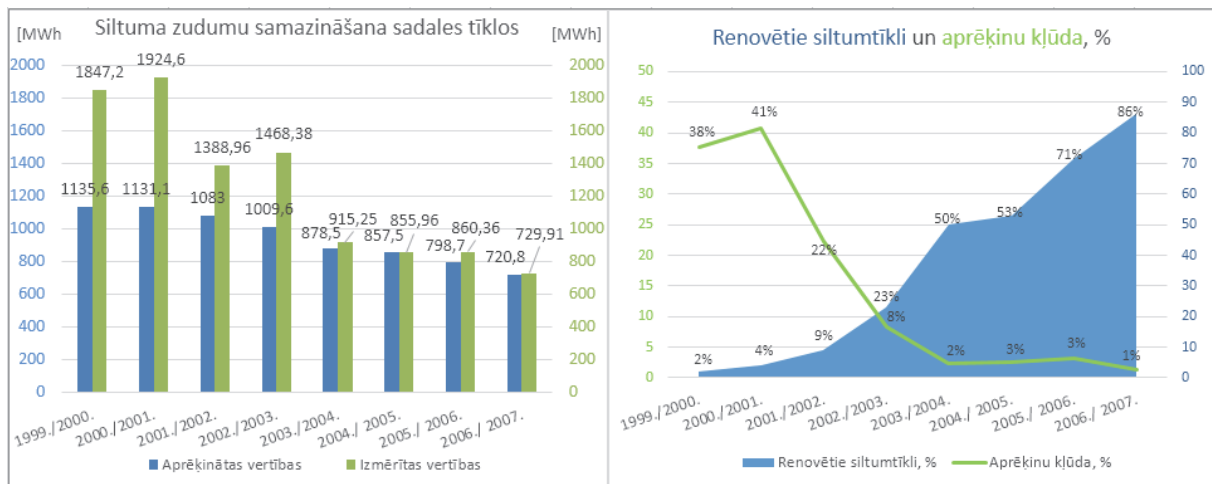
Lai paaugstinātu aprēķinu precizitāti, tiek ierosināts veikt aprēķinu, ņemot vērā siltuma atdeves izmaiņas eksponenciālo raksturu. Šim nolūkam ir nepieciešams izmantot vēl vienu parametru – siltumnesēja masas plūsmas ātrumu  $G_w$ . Vidējā siltumnesēja temperatūra var atšķirties no sākotnējās arī gariem siltumtīklu posmiem ar maziem cauruļvada diametriem un siltumnesēja plūsmām, tādējādi mainās arī temperatūru starpība starp apkārtējo vidi un cauruļvadu virsmu, kas savukārt ietekmē virsmas siltuma atdeves koeficienta vērtības. Likumsakarības var būt atvasinātas no diferenciālo vienādojumu sistēmas, kas apraksta cauruļvada posma virsmas siltuma atdeves procesu un siltuma zudumus siltumnesēja atdzišanas rezultātā:

$$\begin{cases} dQ = h_{op}(T_p - T_{out})\pi D_{op} dL \\ dQ = c_w G_w dT_w \end{cases}, \quad (2.1.)$$

kur

$dQ$  – siltumenerģijas zudumi cauruļvada garuma vienībai, kJ/h;  $dL$  – bezgalīgi mazs cauruļvada posma garums, m;  $dT_w$  – siltumnesēja temperatūras samazināšanās uz vienu bezgalīgi mazu cauruļvada garuma vienību, K;  $c_w$  – ūdens īpatnēja siltumietilpība, kJ/(kg K);  $h_{op}$  – procesa siltuma atdeves koeficients, kJ/(m<sup>2</sup> h K);  $T_{out}$  – ārgaisa temperatūra, °C;  $T_p$  – cauruļvada virsmas temperatūra, °C;  $D_{op}$  – cauruļvada ārējais diametrs, m;  $G_w$  – siltumnesēja masas plūsmas ātrums, kg/h.

Promocijas darbā tika veikts pētījums par siltumtīklu siltuma zudumu optimizāciju vienā no siltumapgādes sistēmām, kas sastāv no viena siltumavota un 23 daudzdzīvokļu mājām. Siltumtīklu kopējais garums ir 1890 m, tai skaitā 1043 m ir ieguldīti zem zemes un 847 m daudzdzīvokļu ēku pagrabos.



Attēls 2.3. Aprēķinātās un faktiskās sadales tīklu siltuma zudumu vērtības (pa kreisi) un renovēto siltumapgādes sadales tīklu cauruļvadu daļa pret novirzi starp aprēķinātām un izmērītām vērtībām (pa labi).

Laika periodā no 1999. līdz 2007. gadam aprēķinātais siltuma zudumu samazinājums bija 37 %, bet faktiski izmērītais – 60,5 %. Var rasties priekšstats, ka izvēlēta aprēķina metode ir pārāk neprecīza, bet, sākot no 2003./2004. gada, starpība starp izmērītām un aprēķinātām vērtībām sāk samazināties, un 2006./2007. apkures periodā, kad jau 85 % no pazemes siltumtīkliem tika nomainīti, starpība starp izmērītām un aprēķinātām siltuma zudumu vērtībām nepārsniedz 1 %, kas ir uzskatāmi atspoguļots attēlā 2.3. (pa labi). Šo faktu var izskaidrot ar to, ka vecu siltumtīklu stāvoklis bija ievērojami sliktāks, bet tos nevarēja apsekot un koriģēt aprēķina metodi. Siltumtīklu renovācijas procesa ātrums bija nevienmērīgs, un pirmo četru gadu laikā tika renovēti tikai 23 % no kopēja ārējo siltumtīklu daudzuma, kas bija saistīts ar finansiālo līdzekļu un kvalificēta darba spēka trūkumu. Tāpēc pasūtītājam bija rūpīgi jāizvērtē renovējamo siltumtīklu posmus, vispirms izvēloties tos, kas bija kritiskā stāvoklī un apdraudēja siltumapgādes drošību, t. i., kur iepriekš tika konstatēts vislielākais siltumnesēja noplūžu gadījumu skaits. Kad renovēto cauruļvadu daļa sasniedza 50 %, t. i., 2003./2004. gadā, aprēķinu precizitāte ievērojami pieauga, un atšķirības starp faktiskajām un aprēķinātajām vērtībām nepārsniedza 3 %.

### 2.3. Pētījums par dzīvojamo ēku energoefektivitāti

Statistikas dati liecina, ka 2011. gadā Rīgā dzīvojamā sektora platības, kas saņēma siltumenerģiju no ārējiem avotiem, bija 12,6 miljoni m<sup>2</sup>. REA informācija liecina, ka 2014. gadā vidējais faktiskais īpatnējais siltumenerģijas patēriņš Rīgas kompleksi renovētām daudzdzīvokļu mājām ar centralizēto karstā ūdens apgādi bija 107 kWh/m<sup>2</sup> gadā, bet ēkās bez centralizētās karstā ūdens apgādes – 69 kWh/m<sup>2</sup> gadā (faktiskā vidējā āra gaisa temperatūra 2014./2015. apkures sezonā bija +2,5 °C). Savukārt vidējais faktiskais īpatnējais siltumenerģijas patēriņš nerenovētās dzīvojamās ēkas bija:

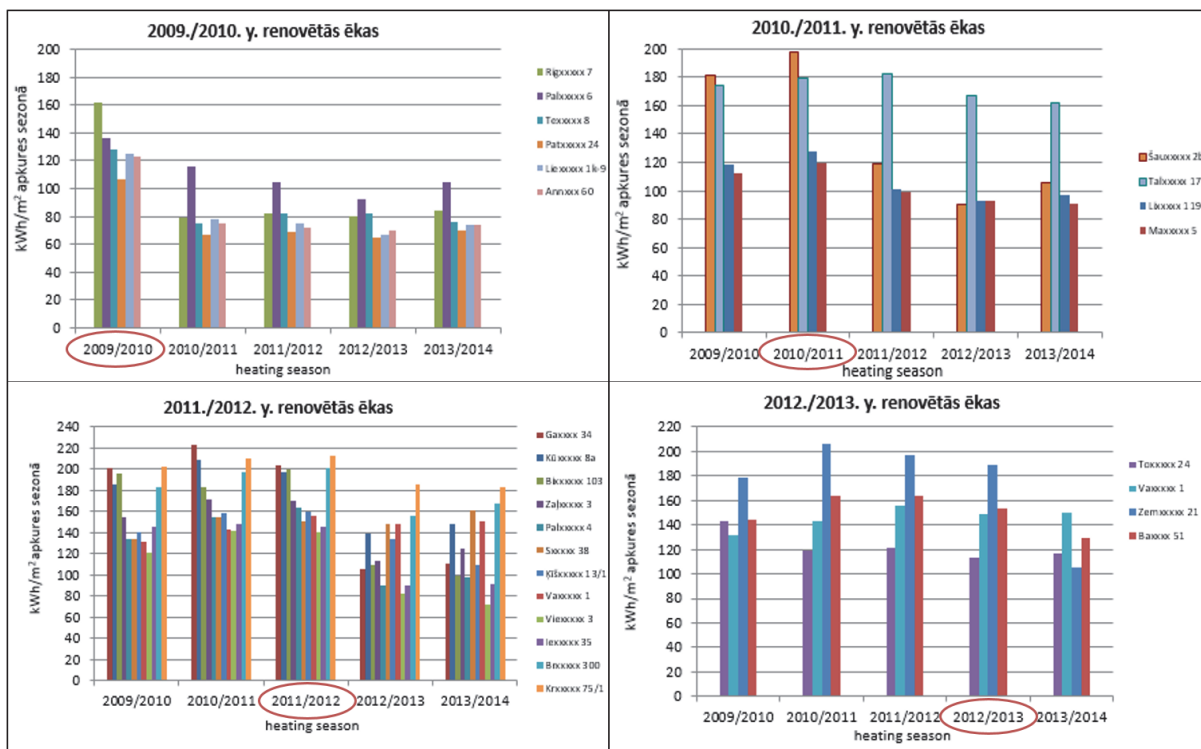
- ēkās ar centralizēto karstā ūdens apgādi – 177 kWh/m<sup>2</sup> gadā,
- ēkās bez centralizētās karstā ūdens apgādes – 136 kWh/m<sup>2</sup> gadā.

Saskaņā ar Latvijas Republikas Ekonomikas ministrijas datiem līdz 2015. gadam kopējais renovēto daudzdzīvokļu ēku skaits Latvijā bija 635 ēkas. Šie skaitļi liecina par lielu iedzīvotāju interesi renovācijas procesā īstenošanā.

Promocijas darbā tika veikts pētījums, lai novērtētu iespējamo siltumenerģijas patēriņa samazinājumu daudzdzīvokļu ēkās, kas radies renovācijas rezultātā. Pētījums tika veikts 55 daudzdzīvokļu mājām, kopējā platība – 96,6 tūkst. m<sup>2</sup>. Par ēkām tika ievākta šāda informācija: kopējā apkurināmā platība, tips (sērija), izbūves gads, renovācijas gads, karstā ūdens sagatavošanas veids (centralizēta vai individuāla), karstā ūdens cirkulācijas esamība (ir/nav). Ikmēneša siltumenerģijas patēriņa dati tika ievākti par piecu gadu periodu – 2010. – 2014. gads. Ēkām, kas tika apsektas pētījumā, ir dažādas iekšējās apkures sistēmas (viencauruļu, divcauruļu, ar augšējo un apakšējo sadali), dažām ēkām nav centralizētā karstā ūdens sagatavošanas. Ēkas iedalītas piecās grupās atkarībā no renovācijas gada, lai uzskatāmi varētu novērtēt siltumenerģijas patēriņa samazinājumu pēc renovācijas.

Dati tika koriģēti, izmantojot grādu dienas, lai panāktu datu salīdzināmību dažādās apkures sezonās ar atšķirīgām āra gaisa temperatūrām un apkures sezonu ilgumiem. No 55 novērotajām ēkām pētījuma brīdī renovācija bija pabeigta tikai 31 ēkai. No tām piecas ēkas tika atjaunotas 2013./2014. gadā, līdz ar to nebija iespējams novērtēt siltumenerģijas patēriņa izmaiņas. Atlikušo 26 ēku rezultāti redzami attēlā 2.4.

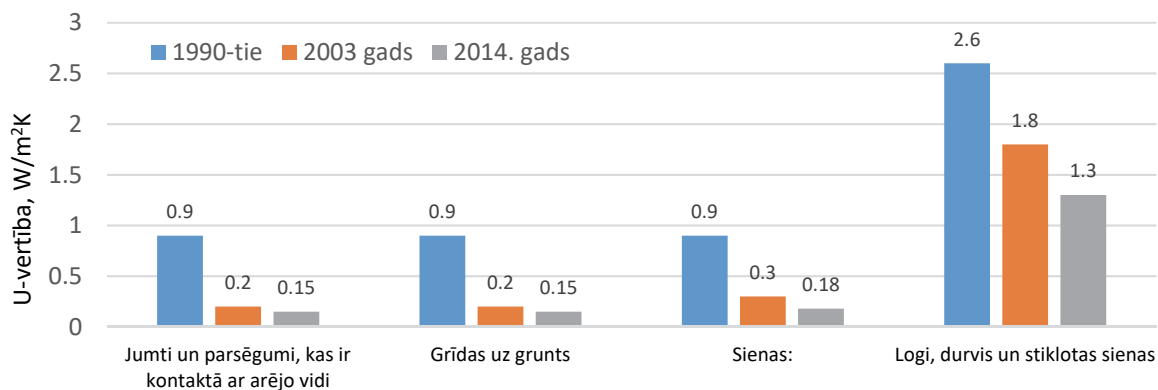
Kompleksas renovācijas rezultātā īpatnējais siltumenerģijas patēriņš samazinājās par aptuveni 40 %, no 130–140 līdz 75–80 kWh/m<sup>2</sup> apkures sezonā. Siltumenerģijas patēriņa samazināšanas atšķirība ir skaidrojama ar to, ka dažādās ēkās tika īstenoti dažādi energoefektivitātes pasākumi.



Attēls 2.4. Rīgas pilsētas daudzdzīvokļu dzīvojamo ēku siltumenerģijas patēriņš pirms un pēc renovācijas, renovācijas gads ir atzīmēts ar sarkano apli.

Diemžēl nevienā no analizētajām ēkām netika veikta ventilācijas sistēmu rekonstrukcija vai jaunas mehāniskās ventilācijas sistēmas ierīkošana. Ventilācijas sistēmas neesamība vai slikts stāvoklis apdraud dzīvojamo telpu iekštelpu gaisa kvalitāti. Citi vietējie pētījumi ir parādījuši, ka mājās bez ventilācijas CO<sub>2</sub> koncentrācija pārsniedz maksimālo mēriekārtu vērtību – 2500 ppm un jaunu hermētisko stikla pakešu logu uzstādīšana vienlaikus ar ārējo norobežojušo konstrukciju pārklāšanu ar siltumizolācijas slāni rada neapmierinošu gaisa kvalitāti telpās.

Izpētīto ēku ārējo norobežojušo konstrukciju siltuma caurlaidības koeficienti atbilst normatīvajām prasībām, kas bija spēkā līdz 2014. gada aprīlim.

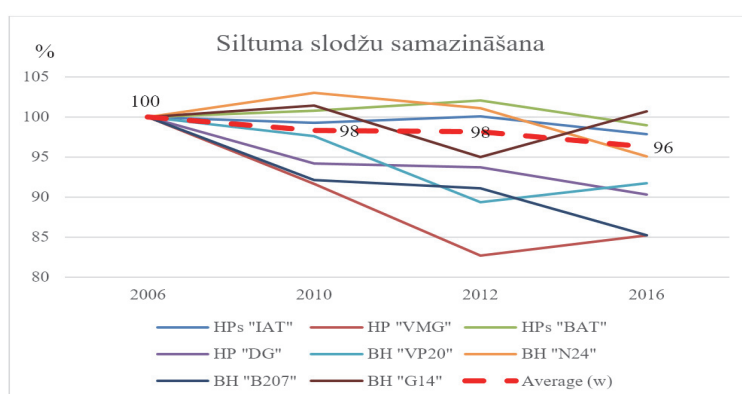


Attēls 2.5. Normatīvo U-vērtību salīdzinājums Latvijā.

Sākot no 2014. gada aprīļa, Latvijā ir ievērojami samazinājušas normatīvās siltuma caurlaidības koeficientu vērtības, tas parādīts attēlā 2.5, kur var redzēt dažādu ēku ārējo norobežojušo konstrukciju U-vērtības Latvijā no 90. gadiem.

Papildus, lai novērtētu situāciju no siltumenerģijas ražošanas puses, tika veikts pētījums par siltumavotu slodžu samazinājumu pēdējo 10 gadu laikā. Par pētījuma objektiem tika izvēlēti astoņi siltumavoti ar kopējo uzstādīto siltuma jaudu no 1,8 MW līdz 400 MW. Pārreķinot apkures sezonu siltuma slodzes vienādā temperatūrā ( $-20,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), rezultāti liecina, ka vislielākajam siltuma avotam HPS "IAT" (400 MW) pēdējo 10 gadu laikā nav būtisku siltuma slodžu izmaiņu. To var izskaidrot ar to, ka siltumtīklu siltuma zudumu samazinājums un ēku energoefektivitātes uzlabošana tiek kompensēta ar slodzes pieaugumu jaunu siltumenerģijas patērētāju pieslēgšanas rezultātā.

Lielākais samazinājums, salīdzinot ar 2006. gadu, ir šādos siltumavotos: HP "VMG" aptuveni par 15 %, BH "B207" – par 15 %, HP "DG" – par 10 %, BH "VP20" – par 8 % ar uzstādīto jaudu attiecīgi 63 MW, 6 MW, 32 MW un 7 MW. Tik liels siltumslodžu kritums ir izskaidrojams ar to, ka papildus ēku energoefektivitātes palielināšanai sociāli ekonomiskie faktori motivē iedzīvotājus meklēt pievilcīgāku dzīvošanas vietu.



Attēls 2.6. Siltuma slodžu samazinājums dažādiem siltuma avotiem.

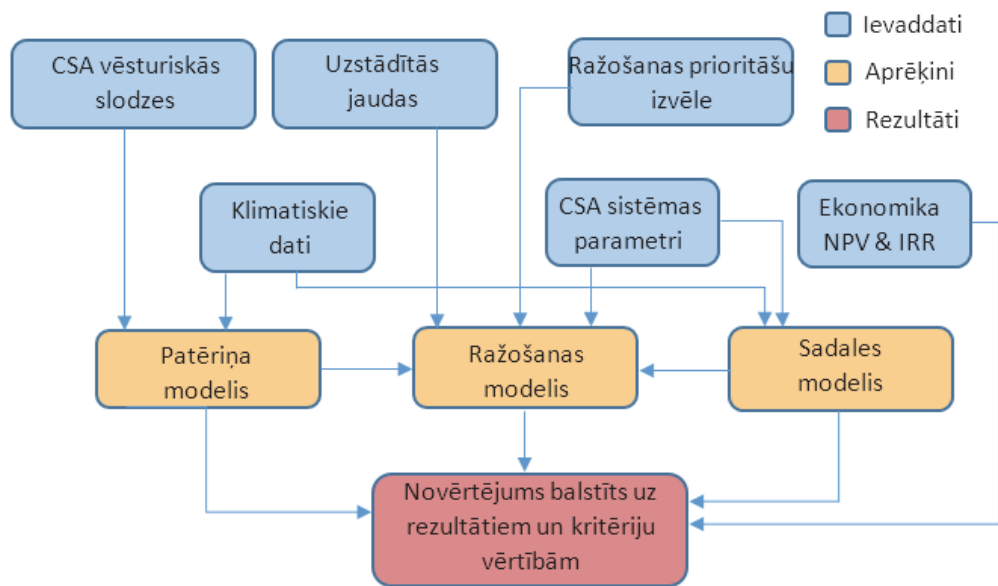
Tajā pašā laikā vidējais svērtais siltuma slodžu samazinājums visiem astoņiem siltumavotiem, salīdzinot ar 2006. gadu, ir samazinājies par 4 %, un viens no iemesliem ir Rīgas pilsētas iedzīvotāju samazinājums. Saskaņā ar Rīgas pilsētas domes datiem iedzīvotāju skaits Rīgas pilsētā pēdējo 10 gadu laikā ir samazinājies par 3,3 %.

### 3. CENTRALIZĒTĀS SILTUMAPGĀDES PLĀNOŠANAS RĪKS

#### 3.1. Centralizētās siltumapgādes plānošanas rīka izstrāde

Centralizētās siltumapgādes plānošanas rīka izstrādes algoritmam ir vairāki posmi – novērtēšana, aprēķini, dažādu moduļu sasaiste, validācija, scenāriju integrācija, rezultātu

interpretācija. Sākotnēji tiek izvērtēti, kādi ievades dati ir nepieciešami, tad seko rīka aprēķinu procesa darbības shēmas izstrāde (attēls 3.1.) un pēc tam tiek izvēlēti, kādi rezultāti vai kritēriji ir jāiekļauj gala rezultātu blokā. Balstoties uz šiem rezultātiem, tiek veikta dažādu scenāriju novērtēšana. Plānošanas rīks sastāv no deviņiem atsevišķiem moduļiem, un katrs modulis atsevišķi veic katra procesa aprēķinu, pamatojoties uz siltuma un masas pārnese likumsakarībām. Tālāk moduļi ir sasaistīti kopā, lai apvienotu visus centralizētā siltumapgādes sistēmā notiekošus procesus vienotā modelī. Šī mērķa īstenošanai ir piemērota jebkura izklājlapu datorprogrammatūra.



Attēls 3.1. Plānošanas rīka darbības shēma.

Patēriņa modelis ir matemātiski aprakstīts ar Furjē siltuma vadīšanas likumu līdzsvara stāvoklī ( $Q_{in} = Q_{out}$ ) un viendimensijas (temperatūra ir atkarīga tikai no viena mainīga) siltuma vadīšanai (promocijas darbā vienādojums 4.2.) un Ņūtona konvekcijas likumu (promocijas darbā vienādojums 4.3). Tā kā transmisijas siltuma zudumi caur ēkas norobežojošām konstrukcijām ir atkarīgas no siltuma vadīšanas, konvekcijas un radiācijas procesiem, transmisijas siltuma zudumus var pierakstīt šādi:

$$\dot{Q}_t = \frac{(T_i - T_o)}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{L}{Ak} + \frac{1}{h_2 A}}, \quad (3.1.)$$

kur

$\dot{Q}_t$  – transmisijas siltuma zudumi caur ēkas ĀNK elementu, W;  $k$  – elementa siltumvadītspēja, W/(m °C);  $h$  – siltuma atdeves koeficients (1 – iekšējais, 2 – ārējais), W/(m<sup>2</sup> °C);  $L$  – elementa biezums;  $A$  – elementa laukums, m<sup>2</sup>;  $T_i$  – iekšējā temperatūra, °C;  $T_o$  – ārējā temperatūra, °C.

Lai aprakstītu siltuma patēriņu ventilācijas un karstā ūdens sagatavošanas vajadzībām, kas ir galvenie ēkas enerģijas bilances komponenti, jo karstā ūdens patēriņš turpinās visu gadu, tiek izmantots šāds vienādojums (atkarībā no siltumnesēja):

$$\int_{t=0}^{\tau} \dot{Q}_m dt = - \int_{T=T_0}^{T_s} \rho_m V_m c_m dT, \quad (3.2.)$$

kur

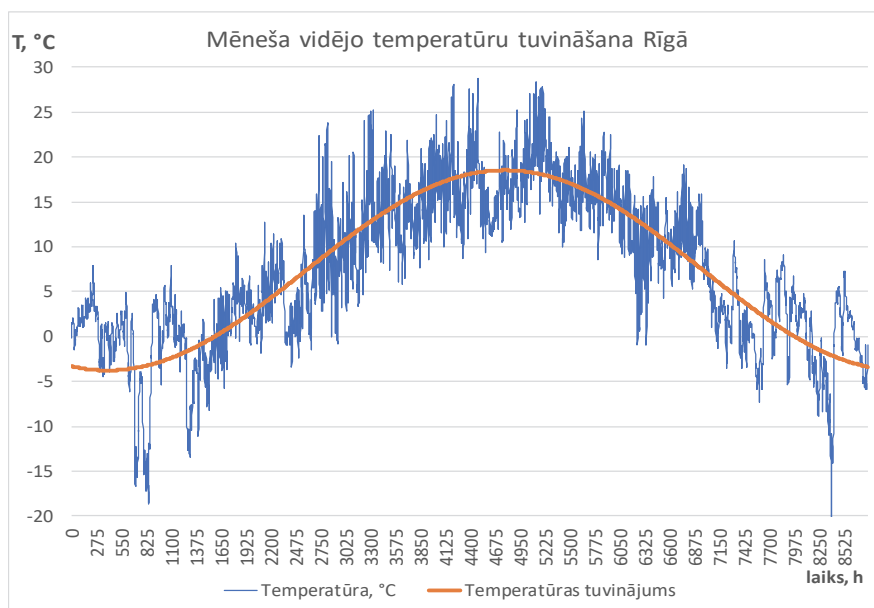
$\dot{Q}_m$  – siltumslodze ventilācijai, infiltrācijai vai kārsta ūdens sagatavošanai, kJ/h;  $\rho_m$  – siltumnesēja blīvums, kg/m<sup>3</sup>;  $c_m$  – siltumnesēja īpatnējā siltumietilpība, kJ/(kg °C);  $V_m$  – siltumnesēja caurplūde, m<sup>3</sup>/h;  $T_s$  – padeves temperatūra, °C;  $T_0$  – ārējā gaisa vai aukstā ūdens temperatūra, °C;  $t$  – laiks, h.

Precīzu rezultātu iegūšanai patēriņa modelī ir jāiekļauj gada ārgaisa temperatūra. Izstrādātā modeļa klimatiskie dati ir pielāgoti Rīgas pilsētai, ievadot detalizētas stundas temperatūras no tipiska meteoroloģiskā gada (TMY). Ārgaisa temperatūras jebkurai citai vietai vai pilsētai var būt pietuvināti noteiktas pēc mēneša vidējām temperatūrām, izmantojot trigonometriskās funkcijas. Katras stundas vidējās temperatūras var aprēķināt, izmantojot šo vienādojumu:

$$\theta = \theta_{avg} + \theta_{amp} \cos\left(\frac{2\pi t}{365,25} - (-\phi_{fs})\right), \quad (3.3.)$$

kur

$t$  – laiks, dienas (simulācijām pa stundām 1 stunda = 0,0416 dienas);  $\theta_{avg}$  – vidējā gada temperatūra (Rīgai 7,38 °C), °C;  $\theta_{amp}$  – gada vidējā temperatūras amplitūda (Rīgai 11,15 °C), °C;  $\phi_{fs}$  – fāzes nobīde (Rīgai 2,858 rad), rad; 365,25 – 1 gads, ar labojumu gariem gadiem, dienas.



Attēls 3.2. Gada mēnešu vidējo temperatūru tuvināšana Rīgas pilsētai.



Rezultāti pēc Furjē analīzes dod amplitūdas un fāzes nobīdes konstantes Rīgas pilsētai. Izmērīto temperatūru var grafiski salīdzināt pret Furjē tuvināšanas rezultātiem ar vienu harmoniku (Attēls 3.2.). Savukārt ekonomikas modulis izveidots ar mērķi novērtēt piedāvāto modernizācijas pasākumu atmaksāšanos un iekļauj neto pašreizējās vērtības (NPV) un iekšējās peļņas normu (IRR) aprēķinus. Ekonomikas modulis nav saistīts ar citiem moduļiem, jo neietekmē tehnoloģisko vērtējumu, bet kalpo kā papildu instruments lēmuma pieņemšanai.

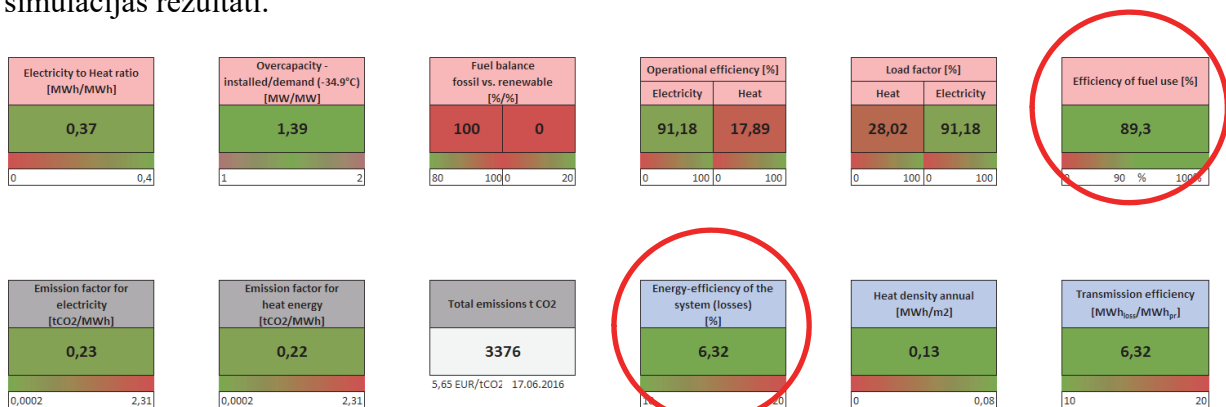
CSA sistēmā notiekošie procesi ir aprakstīti matemātiski, bet tomēr tos var prognozēt ar noteiktu varbūtību, jo katras sistēmas patēriņa grafiku ietekmē individuālās sistēmas iezīmes un īpašības, tādām kā – galalietotāju paradumi, patērējošo ēku siltumtehnikās īpašības un klimatiskie apstākļi, kas savukārt nosaka nepieciešamību veikt rīka iestatīšanu un kalibrēšanu pēc konkrētās pētāmās sistēmas raksturojošiem parametriem.

### 3.2. Centralizētās siltumapgādes plānošanas rīka validācija

Centralizētās siltumapgādes plānošanas rīka validācijai un tālākām simulācijām tika izvēlēta esoša un funkcionējoša centralizētās siltumapgādes sistēma ar zināmiem raksturojošiem parametriem. Sistēmas īss apraksts:

- uzstādītā siltuma jauda – 6 MW ( $2 \times 3$  MW dabas gāzes apkures katli);
- koģenerācijas iekārtas siltuma jauda – 600 kW;
- ēku apkurināmā plātība – 51 069 m<sup>2</sup>;
- siltumtīklu garums – 1962 m (t. sk. 1138 m – ārējie tīkli, 824 m – tīkli pagrabos);
- turpgaitas/atgaitas vidējās temperatūras – 75/55 °C.

Validācija tika veikta diviem sistēmas stāvokļiem (pirms koģenerācijas iekārtas uzstādīšanas un esošais stāvoklis ar koģenerācijas iekārtu), jo šiem sistēmas stāvokļiem bija pieejami sistēmas darbības vēsturiskie dati. Attēls 3.3. ir apkopoti sistēmas “faktiskā stāvokļa” scenārija simulācijas rezultāti.



Attēls 3.3. Sistēmas “Faktiskais stāvoklis” attīstības scenārija simulācijas rezultāti.

Lai noteiktu teorētiski aprēķinātu datu novirzi no faktisko datu vērtībām, tika aprēķināta vidējā absolūtā kļūda procentos. Visos validācijas gadījumos aprēķināto rezultātu novirze no faktiskām vērtībām nepārsniedza 8 % robežu.

### **3.3. Dažādu attīstības scenāriju simulācijas ar centralizētās siltumapgādes plānošanas rīka palīdzību**

Promocijas darbā tiek piedāvāti, simulēti un novērtēti seši dažādi centralizētās siltumapgādes sistēmas attīstības scenāriji ar šādiem nosacījumiem:

- a) atskaites scenārijs – nerenovēti siltumtīkli, siltumenerģijas ražošanai izmanto tikai dabasgāzi, dzīvojamais sektors nav atjaunots;
- b) faktiskais stāvoklis – siltumtīkli ir atjaunoti par 85 %, koģenerācija iekārta ir uzstādīta, dzīvojama sektora energoefektivitāte ir bez izmaiņām;
- c) reāla renovācija – dzīvojamā sektora renovācijas ātrums ir 3 % ēku gadā, siltumtīkli ir atjaunoti par 100 %, koģenerācijas iekārta ir uzstādīta (scenāriju novērtē 15 gadu perspektīvā);
- d) intensīvā renovācija – dzīvojamā sektora renovācijas ātrums 5 % ēku gadā, siltumtīkli atjaunoti par 100 %, koģenerācijas iekārta ir uzstādīta, ir uzstādīts šķeldas ūdenssildāmais katls 2 MW (scenāriju novērtē 15 gadu perspektīvā);
- e) pastiprinātā renovācija – dzīvojamā sektora renovācijas ātrums 7 % ēku gadā, siltumtīkli atjaunoti par 100 %, koģenerācijas iekārta ir uzstādīta, pie patērētajiem papildus uzstādīti saules kolektori, vidējas temperatūras grafiks siltumtīklos 55/35 °C (scenāriju novērtē 15 gadu perspektīvā);
- f) reālā renovācija un biomasas izmantošana – dzīvojamā sektora renovācijas ātrums 3 % ēku gadā, siltumtīkli atjaunoti par 100 %, koģenerācijas iekārta ir uzstādīta, ir uzstādīts šķeldas ūdenssildāmais katls 3 MW, siltumtīklu vidējās temperatūras grafiks 55/35 °C (scenāriju novērtē 15 gadu perspektīvā).

Izvēloties siltumenerģijas ražošanas iekārtas, prioritāte tika dota visefektīvākajām un videi draudzīgākajām ražojošām vienībām, piemēram, koģenerācijas iekārta vai šķeldas katli. Tie tika noslogoti bāzes režīmā, bet dabasgāzes katli tika izmantoti kā rezerves katli vai pīķa slodžu nodrošināšanai.

Installed Heat capacity	6,97 MW	Total Emissions	2990,447 tCO <sub>2</sub>
Capacity of installed cogeneration unit	0,5 MW el 0,637 MW th	Emissions for heat	2112,16 tCO <sub>2</sub>
Peak load for heating period (heat)	3,84925 MW	Emissions for electr	878,29 tCO <sub>2</sub>
Peak load for heating period (electr)	0,5 MW		

### Production programs

#### Cogeneration heating plants

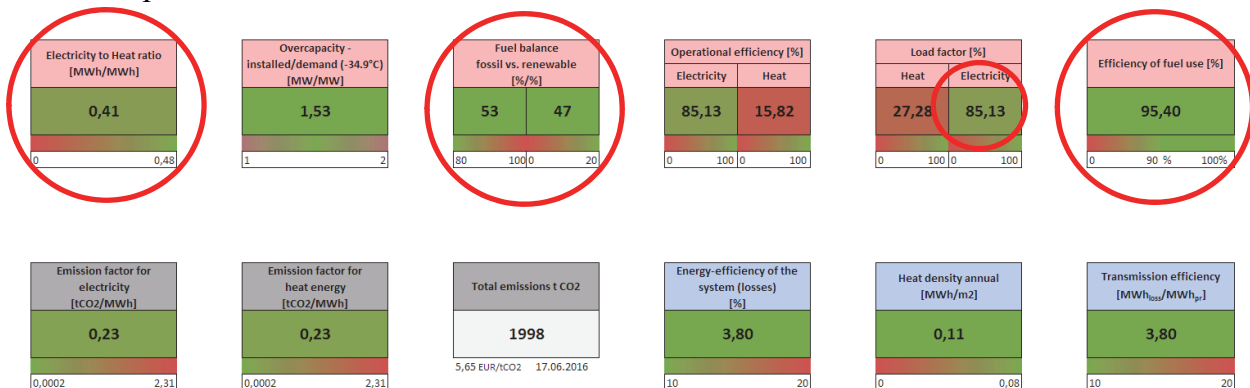
	Units	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
Hours year		744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744	8760
Working hours of cogeneration unit	h	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744	8760
Working hours of natural gas boilers	h	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744	8760
Heat energy to the network	MWh	1443	1284	1237	874	339	307	311	313	307	623	1017	1336	9392
Average heating load	MW	1,94	1,91	1,66	1,21	0,46	0,43	0,42	0,42	0,43	0,84	1,41	1,79	
Cogeneration unit el load	MW	0,50	0,50	0,50	0,50	0,36	0,33	0,33	0,33	0,33	0,50	0,50	0,50	
alfa (electr/heat)		0,785	0,785	0,785	0,785	0,785	0,785	0,785	0,785	0,785	0,785	0,785	0,785	
Cogeneration unit produced electr.	MWh	372	336	372	360	266	241	245	246	241	372	360	372	3783
El. self-consumption of cog unit	MWh	46	46	50	27	15	14	15	15	14	17	47	39	343
Electricity to the grid	MWh	326	290	322	333	251	227	230	233	227	355	313	333	3440
Heat load of cogeneration unit	MW	0,64	0,64	0,64	0,64	0,46	0,43	0,42	0,42	0,43	0,84	0,64	0,64	
Heat energy produced by cogeneration unit	MWh	474	428	474	458	339	307	311	313	307	474	458	474	4819
Heat energy produced by heating boiler (ng)	MWh	969	856	764	416	0	0	0	0	0	149	558	861	4573
Natural gas consumption	th.m3	219	196	195	151	76	69	70	70	69	123	168	207	1611
Efficiency water boiler		0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	
Efficiency cogeneration unit		0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	
Total efficiency		0,90	0,90	0,90	0,89	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,88	0,89	0,90	0,89
Heat energy produced by renewables	MWh													0

Attēls 3.4. Ražošanas programmas piemērs “Reālā renovācija” scenārijam.

Siltumenerģijas ražošanas apjoms tika iestatīts ar atbilstošu iekārtu darba stundām un slodzi (Attēls 3.4). Dažādu kurināmā veidu izmantošana diversificē riskus un paaugstina sistēmas drošību. Strādājot ar šķeldu bāzes slodzē, ir nepieciešams nodrošināt rezerves un piķa siltumenerģijas ražojošus avotus, un šim mērķim vispiemērotākie ir dabasgāzes katli, kas ir pilnībā automatizēti, ar īsu palaišanas laiku un izcilām slodzes regulēšanas iespējām.

### “Reālā renovācija un biomasas izmantošana” scenārijs

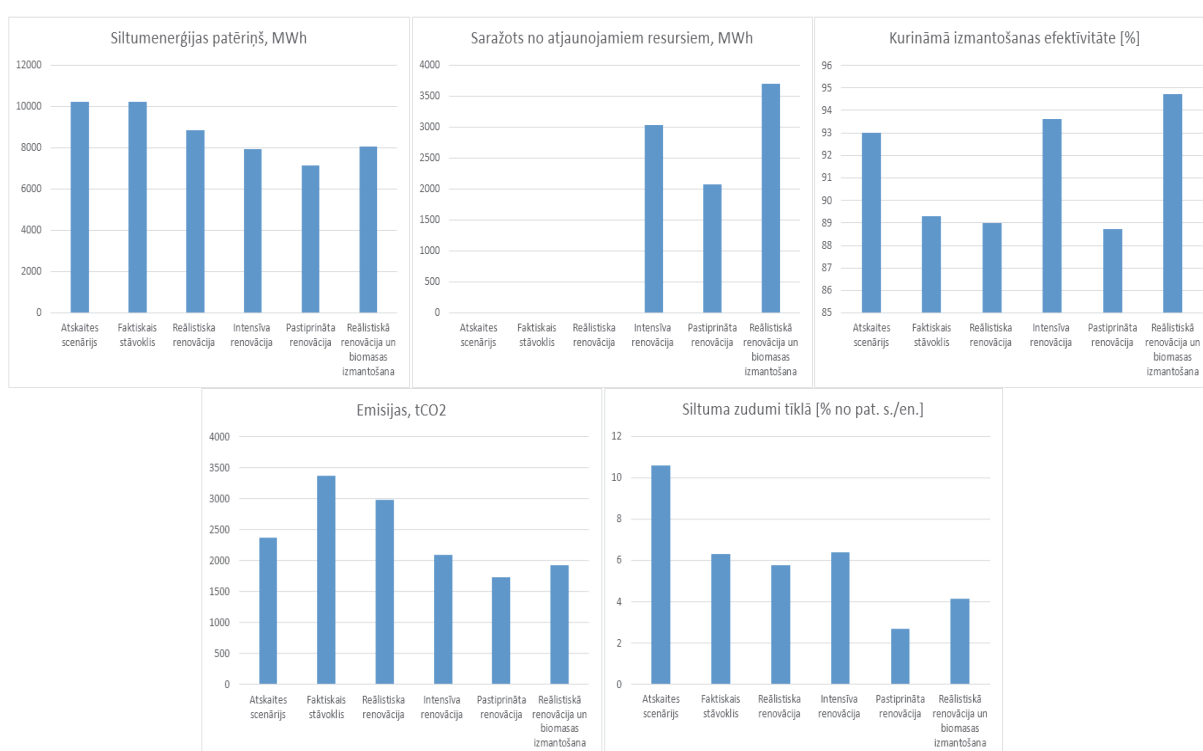
No sešiem piedāvātajiem scenārijiem kopsavilkuma ierobežota apjoma dēļ var apskatīt tikai vienu, kas būtībā ir veiksmīgākais, jo ir ņemtas vērā iepriekšējo scenāriju nepilnības un tas vienlaikus nodrošina maksimālu ieguvumu siltumapgādes operatoram un gala lietotājam. Apskatāmais attīstības scenārijs ir arī vispievilcīgākais no tehnoloģiskā viedokļa, jo slodzes faktors koģenerācijas iekārtai ir augsts – 85,13 %, salīdzinot ar literatūras datiem, parasti šīs vērtības ir 50–60 %. Slodzes faktors un efektivitāte siltuma ražošanai nav tik laba, jo ūdenssildāmie katli darbojas tikai periodiski, kas notiek reti un tikai apkures periodā, kad koģenerācijas stacijas jauda ir nepietiekama, lai nodrošinātu nepieciešamo siltuma slodzi. Bet tajā pašā laikā uzstādītās jaudas samazināšana un esošo katlu demontāža nozīmē siltumapgādes drošības prasību samazināšanu.



Attēls 3.5. “Reālā renovācija un biomasas izmantošana” scenārija novērtēšanas rezultāti.

Plānota dzīvojama sektora ēku renovācija ir ietekmējusi kopējo siltumenerģijas patēriņu un, salīdzinot ar stāvokli, kad ēkas netika renovētas (ar 10 231 MWh siltumenerģijas patēriņu gadā), apskatītā scenārijā kopējais siltumenerģijas patēriņš 15 gadu perspektīvā varētu samazināties līdz 8850 MWh vai par 13,5 %.

Siltuma zudumi sadales tīklos, kas novērtēšanas rīkā norādīti kā “sadales efektivitāte”, ir salīdzinoši zemi – tikai 3,8 %. Tas liecina, ka, samazinot siltumnesēja turpgaitas un atgaitas temperatūru, ir iespējams samazināt siltuma zudumus par vairāk nekā 35,6 %, salīdzinot ar reālas renovācijas scenāriju, vai par 193 MWh gadā jeb naudas izteiksmē par 7851 eiro gadā pie esošā siltumenerģijas tarifa. Lielākām siltumapgādes sistēmām ieguvumi varētu būt ievērojami lielāki.



Attēls 3.6. Sešu CSA sistēmas attīstības scenāriju salīdzinājums.

Pēdējā attīstības scenārijā atjaunojamo enerģijas avotu īpatsvars sasniedza 47 %, ievērojami samazinot CO<sub>2</sub> emisiju apjomu. Dabsgāzes ūdenssildāmais katls tiek izmantots aptuveni 260 stundu pīķa slodzes segšanai. Tas notiek tikai tad, kad āra gaisa temperatūra pazeminās zemāk par -22 °C. Atgūstot ūdens tvaiku siltumu no dūmgāzēm, darbinot šķeldas katla dūmgāzu kondensatoru, tiek palielināta kopējā kurināmā izmantošanas efektivitāte līdz 95,40 %, rēķinot pēc kurināmā zemākās siltumspējas. Pārējo piecu attīstības scenāriju simulāciju rezultāti atspoguļoti Attēls 3.6., un ar detalizētu rezultātu aprakstu var iepazīties promocijas darba pilnajā tekstā.

## SECINĀJUMI

- 1) Ir divi laika periodi – līdz 2020. un 2050. gadam, kad ES dalībvalstis ir definējušas mērķus enerģijas patēriņa samazināšanai attiecīgi no 20 % līdz 80 %.
- 2) Laikā posmā no 2007. līdz 2014. gadam šķeldas siltumavotu skaits Latvijā pieauga 2,5 reizes, un kopējā uzstādītā šķeldas katlu jauda trīskāršojās un sasniedza 819 MW.
- 3) Pētījuma rezultāti par 2010.–2014. gadā 55 renovētām ēkām Rīgā ir parādījuši, ka kompleksas renovācijas rezultātā ir sasniedzams kopējās siltumenerģijas patēriņa samazinājums no 35 % līdz 50 % (vidēji 42,3 %).
- 4) Pētījuma rezultāti par siltuma zudumiem siltumtīklos norāda, ka jaunu rūpnieciski izolētu cauruļvadu siltuma zudumu aprēķiniem ir augsta precizitāte un kļūda starp aprēķinātiem un faktiskiem datiem nepārsniedz 3 %, savukārt veco izolēto cauruļvadu siltuma zudumu aprēķināto vērtību maksimāla novirze no izmērītām sasniedza 41 %, kas norāda, ka vecu siltumtīklu stāvoklis bija ievērojami sliktāks nekā paredzēts, bet tos nevarēja apsekot un koriģēt aprēķina metodi.
- 5) Veikto kvalitatīvo un kvantitatīvo pētījumu rezultāti kalpoja par pamatu siltumapgādes sistēmas procesu modelēšanas metodoloģijas izstrādei. Balstoties uz izstrādāto metodoloģiju, tika izstrādāts dinamisko simulāciju rīks CSA sistēmu siltuma un masas pārnesei procesu modelēšanai un CSA efektivitātes skaitliskai novērtēšanai
- 6) Siltumapgādes plānošanas rīka validācija tika veikta, izmantojot strādājošas siltumapgādes sistēmas datus par 1999.–2015. gadu. Sistēmas parametri: uzstādītā siltuma jauda –  $2 \times 3$  MW ūdenssildāmie katli un koģenerācijas iekārta ar jaudu 0,6 MW<sub>th</sub>, siltumtīklu kopējais garums 1890 m, 23 abonenti ar kopējo apsildāmo platību 51 069 m<sup>2</sup>. Validācijas laikā iegūto datu apstrāde un analīze norāda, ka simulāciju laikā iegūto rezultātu precizitāte ir 8 % robežās.
- 7) Deviņi efektivitātes un līdzsvara rādītāji ar definētām pieļaujamām robežām tika piedāvāti siltumapgādes sistēmu attīstības scenāriju novērtēšanai. Siltumapgādes plānošanas rīks ir noderīgs dažāda mēroga centralizēto siltumapgādes sistēmu attīstības scenāriju novērtēšanai, uzskatāmi norādot katra scenārija stiprās un vājās puses, scenāriju skaits neierobežots.
- 8) Piedāvāto CSA sistēmas attīstības scenāriju secīgas simulācijas ar dažādiem ēku renovācijas ātrumiem 3 %, 5 % un 7 % 15 gadu perspektīvā parādīja siltumenerģijas patēriņa samazinājumu par attiecīgi 13,5 %, 22,5 % un 30 % (vai 1380 MWh, 2301 MWh un 3068 MWh).
- 9) Pēdējo trīs scenāriju simulāciju rezultāti, kur bija paredzēts izmantot atjaunojamus enerģijas avotus, parāda CO<sub>2</sub> emisijas samazinājumu vidēji par 40 % (no 3376 tCO<sub>2</sub>/gadā līdz aptuveni 2000 tCO<sub>2</sub>/gadā, salīdzinot ar esošo stāvokli) un siltumenerģijas ražošanai izmantoto atjaunojamo enerģijas avotu īpatsvara palielinājumu līdz 47 %.
- 10) Veikto simulāciju detalizētas analīzes rezultātā tika izvēlēts tehnoloģiski izdevīgākais sistēmas attīstības scenārijs "Reālā renovācija un biomasas izmantošana" ar atmaksāšanās periodu 5,78 gadi (bez ES finansējuma).

## PUBLIKĀCIJU SARAKSTS

1. Borodinecs A., Nazarova J., Zajacs A., Malyshev A., Pronin A. Specifics of building envelope air leakage problems and airtightness measurements// MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 73. – 7 p.
2. Nefedeova A., Bykova J., Kukolev M., Kosov S., Zajacs A., Borodinecs A. Possibility of thermal Storage Systems Use with different accumulating material in SPbSTU// MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 73. – 7 p.
3. Nefedeova A., Bykova J., Kukolev M., Kosov S., Zajacs A., Borodinecs A. Possibility of thermal Storage Systems Usage During Buildings Renovation in Saint-Petersburg// Proc. 12th REHVA World Congress “CLIMA 2016”. Aalborg, Denmark. – Vol. 6. – 11 p.
4. Zajacs A., Korjakins A., Zemitis A., Borodinecs A. Low-energy and smart concept expansion: from single house to the city scale// COST Action TU1104 - Smart Energy Regions – Cost and Value. – Cardiff, Wales UK: The Welsh School of Architecture, Cardiff University, 2016. – p. 162–169.
5. Zajacs A., Nazarova J., Borodinecs A. Review of the geothermal energy potential in the Europe// Proc. 5th International Scientific Conference “Civil Engineering '15”. Jelgava, Latvia. – Vol. 5. – p. 108–115.
6. Nefedeova A., Bykova J., Kosov S., Vatin N., Zajacs A., Borodinecs A. Predesign evaluation of St. Petersburg State Polytechnical University Campus Energy Efficiency Measures// Proc. REHVA Annual Conference 2015 “Advanced HVAC and Natural Gas Technologies”. Riga, Latvia. – p. 195–200.
7. Zajacs A., Zemitis J., Prozuments A., Tihomirova K., Borodinecs A. Sustainable City Development: Implementation Practices in Riga// Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 725-726. – p. 1470–1476.
8. Borodinecs A., Zemitis J., Zajacs A., Nazarova J. Renovation of Multi-apartment Building in Latvia// Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 725–726. – p. 1177–1181.
9. Zajacs A., Zemitis J., Tihomirova K., Borodinecs A. Concept of Smart City: First Experience from City of Riga// Journal of sustainable architecture and civil engineering. – 2014. – Vol. 7, No. 2. – p. 54 – 59.
10. Borodinecs A., Zemitis J., Zajacs A. Renovation of multi-apartment building in Latvia// Proc. IV Международная научно-практическая конференция “Энергоэффективные технологии в городском строительстве и хозяйстве”. Odessa, Ukraine. – p. 34–38.
11. Zajacs A., Borodinecs A. The solar energy use in air conditioning systems. – Saarbrücken, Germany: GlobeEdit, 2014. – 59 p.