

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

AGRIS KAMENDERS

**ZEMA ENERĢIJAS PATĒRIŅA ĒKAS
ENERĢIJAS PATĒRIŅA MODELĒŠANA**

Promocijas darba kopsavilkums

Rīga 2011

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

AGRIS KAMENDERS
Doktora studiju programmas „Vides zinātnes” doktorants

**ZEMA ENERĢIJAS PATĒRIŅA ĒKAS
ENERĢIJAS PATĒRIŅA MODELĒŠANA**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskā vadītāja
Dr. sc. ing., profesore
A. BLUMBERGA

Rīga 2011

UDK 697.1(043.2)
Ka 323 z

Kamenders A. Zema enerģijas patēriņa ēkas enerģijas patēriņa modelēšana. Promocijas darba kopsavilkums.-R.: RTU, 2011. 36 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūta 2011.gada 23. maija lēmumu, protokols Nr.11

ISBN 978-9934-10-188-5

Promocijas darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā „Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai”

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2011.g. 29 augustā Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē Kronvalda bulvārī 1, 21. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors, Dr. sc. ing., R. Sudārs,
Latvijas Lauksamniecības universitātē

Dr. sc. ing., T. Muring,
Tartu Universitātē, Igaunija

Dr. sc. ing., J. Reķis,

APSTIPRINĀJUMS

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

Agris Kamenders (Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 4 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 5 pielikumus, 87 zīmējumus un ilustrācijas, kopā 181 lappuses. Literatūras sarakstā ir 168 nosaukumi.

Satura rādītājs

Tēmas aktualitāte	5
Darba mērķi	6
Pētījumu metodika	7
Darba zinātniskā nozīme	7
Darba praktiskā nozīme	7
Darba aprobācija	8
Autora publikācijas	9
Darba struktūra un apjoms	11
1. Zema enerģijas patēriņa ēkas aprēķina modelis	11
2. Zema enerģijas patēriņa ēkas datu apstrāde un analīze. Modeļa validācija	18
2.1. Modeļa validācija ar reāliem datiem	19
2.2. Pirmā zema enerģijas patēriņa ēka Latvijā	22
2.3. Modeļa validācija atbilstoši EN 15265 standartam	25
3. Modeļa aprobācija	26
3.1. Energoefektivitātes pasākuma plāna izstrāde	27
3.2. Optimizācijas rezultāti	29
Secinājumi	34

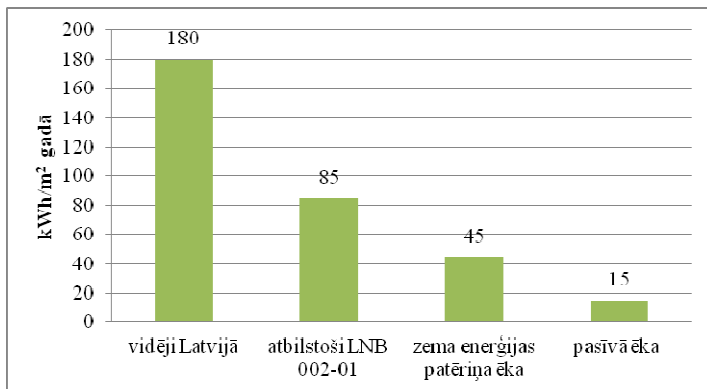
Tēmas aktualitāte

Ēkas ir materiālu un enerģiju ietilpīgas inženierbūves, un tās ir atbildīgas par 40% kopējā enerģijas patēriņa un par 36% kopējo CO₂ emisiju Eiropā. Pašlaik prioritāri ilgtermiņa mērķi kā jaunu ēku būvniecības, tā arī esošo ēku renovācijas gadījumā ir šādi:

- paaugstināt ēku energoefektivitāti, tuvojoties nulles enerģijas patēriņa ēkas rādītājiem;
- palielināt atjaunojamo energoresursu izmantošanu ēku enerģijas patēriņa segšanai;
- samazināt CO₂ emisijas.

Enerģijas patēriņa samazināšana ēkas izmantošanas laikā ir viens no svarīgākajiem faktoriem, lai samazinātu ēkas ietekmi uz apkārtējo vidi un klimata izmaiņām.

Ēkām Latvijā raksturīgs augsts energoefektivitātes potenciāls, kuru iespējams apgūt, veicot ēku renovāciju. 1. attēlā raksturots, kāds ir vidējais siltumenerģijas patēriņš kWh/m² gadā ēkās Latvijā un kādam tam būtu jābūt pēc valsts likumdošanas. Vidējais siltumenerģijas patēriņš ēkās Latvijā ir ap 180 kWh/m² gadā, bet, izpildot būvnormatīvā *LBN 002-01* noteiktās minimālās energoefektivitātes prasības, iespējams sasniegt energoefektivitātes līmeni, kas atbilst siltumenerģijas patēriņam ap 85 kWh/m² gadā. Salīdzinājumam zema enerģijas patēriņa (ZEP) ēkas siltumenerģijas patēriņš ir par četrām reizēm mazāks nekā vidējais patēriņš, un pasīvo ēku vidējais enerģijas patēriņš ir divpadsmit reižu mazāks. Viens no darba uzdevumiem ir arī analizēt pasīvo ēku koncepcijas izmantošanas iespējas Latvijai raksturīgajā klimatā.



1. att. Siltumenerģijas patēriņa apkurei salīdzinājums

Viena no ZEP ēku veidiem pasīvās ēkas koncepcija ļauj sasniegt ievērojamu enerģijas patēriņa samazinājumu kā jaunu ēku būvniecības, tā arī esošu ēku renovācijas gadījumā.

Tomēr darba izstrādes laikā arī konstatēts, ka Pasīvās ēkas institūta izstrādātās prasības ēkas elementiem un tehnoloģijām piemērotas Centrāleiropai un nav tiešā veidā izmantojamas Latvijā, lai sasniegtu ļoti zemu ēkas enerģijas patēriņu. Tāpēc pasīvo ēku koncepciju nepieciešams adaptēt Latvijas klimatiskajos apstākļos. Tā arī vairākos pētījumos uzsvērta nepieciešamība pēc ekonomiskās analīzes un metodikas, kas ļautu nonākt pie iespējami labākiem risinājumiem, veidojot zema enerģijas patēriņa ēkas.

Darba mērķi

Disertācijā aprakstīto pētījumu mērķis ir izstrādāt datormodeli, kas identificē un prioritizē tehnoloģiskos risinājumus zema enerģijas patēriņa ēkai, lai panāktu tās optimālu enerģijas patēriņu. Mērķa sasniegšanai izvirzīti šādi uzdevumi:

- 1) izstrādāt optimizācijas datormodeli Latvijas zema enerģijas patēriņa ēku energoefektivitātes vērtējumam no ekonomiskā un ekoloģiskā viedokļa;
- 2) izvērtēt ļoti zema enerģijas patēriņa ēkas (pasīvās ēkas) koncepcijas izmantošanas iespējas Latvijai raksturīgā klimatā;

- 3) izveidot ēkas enerģijas aprēķina modeli, kas būtu piemērojams zema patēriņa ēku gadījumiem un būtu izmantojams renovācijas darbu plānošanai.

Pētījumu metodika

Darba laikā izstrādāts Latvijas klimatiskajiem apstākļiem un būvniecības metodēm piemērots ēkas enerģijas patēriņa aprēķina un optimizācijas modelis. Izstrādātais modelis validēts un ir piemērots, lai modelētu un analizētu esošo ēku enerģijas patēriņu, ēku enerģijas patēriņu pēc renovācijas un ZEP ēku enerģijas patēriņu. Modelis validēts, salīdzinot mērījumu datus ar aprēķina datiem, izmantojot verifikācijas testus un salīdzinot iegūtos aprēķina datus ar dinamisko modelēšanas programmu rezultātiem. Datormodelis aprobēts, veicot daudzdzīvokļu ēkas energoefektivitātes pasākumu plāna izstrādi un analizējot pirmo ZEP ēku Latvijā. Optimizācijas uzdevums atrisināts, izmantojot variantu caurlūkošanas metodi.

Darba zinātniskā nozīme

Darbā izstrādāts Latvijas klimatiskajiem apstākļiem piemērots ēkas enerģijas patēriņa aprēķina un optimizācijas modelis.

Šis modelis piemērots optimālo energoefektivitātes pasākumu identificēšanai un izmantojams jaunu ēku projektēšanas un renovācijas darbu plānošanai. Darbā analizētas pasīvās ēkas koncepcijas izmantošanas iespējas Latvijā. Pamatojoties uz Latvijā spēkā esošiem būvnormatīviem un raksturīgajiem klimatiskajiem apstākļiem, darbā piedāvāti kritēriji, lai ēka varētu sasniegt pasīvām ēkām raksturīgu siltumenerģijas patēriņu.

Darba praktiskā nozīme

Darbā izstrādāto modeli iespējams izmantot renovācijas darbu plānošanai un ZEP ēku projektēšanai.

Darba laikā veiktā optimizācija ļāva noteikt optimālus energoefektivitātes pasākumus dažāda veida (sērijveida daudzdzīvokļu ēka, privātmāja, sabiedriskā ēka) ēkām. Analīze pierāda, ka, veicot ilgtermiņa ieguldījumus (piemēram, 35 gadu aprēķina periods) energoefektivitātes pasākumos, ēkām nepieciešams realizēt kompleksu renovāciju, kas ļauj sasniegt zemāku enerģijas patēriņu apkurei par 40 kWh/m² gadā. Jaunu ēku būvniecības

gadījumā maza izmēra ēkām (apkurināmā platība mazāka par 200 m²) enerģijas patēriņam apkurei jābūt zemākam par 35 kWh/m² gadā un lielākām ēkām – par 25 kWh/m² gadā.

Šo modeli iespējams izmantot kritēriju noteikšanai, veidojot valsts atbalsta programmas, kas paredzētas ēku energoefektivitātes paaugstināšanai un pārstrādātās direktīvas 2002/91/EK par ēku energoefektivitāti prasību ieviešanu Latvijas likumdošanā.

Darba laikā veikti Latvijā pirmās zema enerģijas patēriņa ēkas enerģijas patēriņa datu un iekštelpu komforta rādītāju mērījumi. Šie mērījumi pierāda, ka Latvijā iespējams uzbūvēt privātmāju (ēkas apkurināmā platība 191 m²), kuras enerģijas patēriņš apkurei nepārsniedz 35 kWh/m² gadā. Iegūtie un analizētie rezultāti var kalpot kā vērtīgs izziņas materiāls tālākiem ZEP ēku projektiem.

Darba aprobācija

Par darba rezultātiem ir ziņots, un tie ir apspriesti starptautiskās konferencēs un semināros.

1. „RES-E potential in Latvia”, seminārs „RES-E and co-generation policies in Central Europe”, 2005. gada 9.–10. maijs, Polija, Poznaņa.

2. “Sistēmiskas domāšanas apguve. Ekobūvniecības projektu analīze Rīgas Tehniskajā universitātē”, konference “Vides zinātne un izglītība Latvijā un Eiropā”, 2007. gada 8.–9. februāris, LR Vides ministrija, Rīga.

3. “Energy friendly building concept”, konference “NorthSun 2007”, 2007. gada 31. maijs – 1. jūnijs, Rīgas Tehniskā universitāte, Rīga.

4. „Energoefektivitāte Latvijas slimnīcās”, RTU starptautiskā zinātniskā konference sekcijā “Enerģētika un elektrotehnika” 2004.

5. „Pasīvā ēka Latvijā”, RTU starptautiskā zinātniskā konference sekcijā “Enerģētika un elektrotehnika” 2006.

6. „Energoefektīvas viengimenes ēkas koncepcijas izstrāde Latvijā”, RTU starptautiskā zinātniskā konference sekcijā “Enerģētika un elektrotehnika” 2007.

7. „Hibrīdventilācija pasīvajā ēkā Latvijā”, RTU starptautiskā zinātniskā konference sekcijā “Enerģētika un elektrotehnika” 2007.

8. „Daugavpils dzīvojamo ēku enerģijas patēriņš”, RTU starptautiskā zinātniskā konference sekcijā “Vides un klimata tehnoloģijas” 2008.

9. „Daudzfaktoru optimizācija ēkas energoefektivitātes paaugstināšanai”, RTU starptautiskā zinātniskā konference sekcijā “Vides un klimata tehnoloģijas” 2009.

10. “Laboratorijas darbi rūpnieciskos apstākļos. Iespējas”, konference “Vides zinātne un izglītība Latvijā un Eiropā: izglītība ilgtspējīgai attīstībai”, 2008. gada 14. marts, Rīga.

11. „The 11th International Conference on Solar Energy in High Latitudes”, konference „Latvia: Energy friendly building concept”, 2007. gada 30. maijs – 1. jūnijs, Rīga.

12. „Financing energy efficiency projects in Latvia”, ziņojums konferencē „Tailored financing schemes for social housing refurbishment”, 2008. gada 20. novembris, Slovākija, Bratislava.

13. „Latvian multi-apartment blocks”, starptautiskā konferencē “Energy Efficiency and Energy Services: What is the secret of successful programmes?” 2008. gada 28. novembris, Tallina.

14. „Passive House Characteristics in Latvian Cold Climate”, konferencē “13th International conference on passive house 2009”, 2009. gada 17.–18. aprīlis, Pasīvo ēku institūts, Vācija, Frankfurte.

15. “First Passive House In Latvia: A Real Example” konferencē “14th International conference on passive house 2010”, 2010. gada 28.–30. maijs, Vācija, Drēzdene.

16. “Cost optimality and EnerPHit standard in Latvia”, konferencē “15th International conference on passive house 2011”, 2011. gada 27.–29. maijs, Austrija, Insbruka.

Autora publikācijas

1. Blumberga D., Blumberga M., Gušča J., Kamenders A., Veidenbergs I. Kļiedētas enerģijas ražošanas indikatori. Mazas koģenerācijas stacijas. // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. Issue 6, 2005, p. 16–23.

2. Kamenders A., Movčana N., Blumberga A. Energoefektivitātes analīze Latvijas slimnīcās // RTU Zinātniskie raksti “Enerģētika un elektrotehnika”, 2004

3. Kamenders A., Blumberga A. Pasīvā ēka Latvijā // RTU Zinātniskie raksti “Enerģētika un elektrotehnika”. RTU izdevniecība, 2006, 256.–264. lpp.

4. Blumberga A., Kamenders A. Passive house in Latvia // *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. Issue 6, 2006, p. 25–34.

5. Kamenders A., Blumberga A. Energy efficient one family house development in Latvia// RTU Zinātniskie raksti “Energētika un elektrotehnika”. RTU izdevniecība, 2007, 92.–97. lpp.

6. Kazinovska G., Kamenders A., Blumberga A. Hibrīdventilācija pasīvajā ēkā Latvijā // RTU Zinātniskie raksti “Energētika un elektrotehnika”. RTU izdevniecība, 2007, 163.–169. lpp.

7. Žogla G., Kamenders A., Blumberga A. Energy efficiency measure cost prediction by using regression analysis // RTU Zinātniskie raksti “Energētika un elektrotehnika”. RTU izdevniecība, 2007, 170.–176. lpp.

8. Kamenders A., Blumberga A. Energy efficient and environmentally friendly building concept development in Latvia // 11. starptautiskās konferences par saules enerģijas izmantošanu „North Sun 2007” materiāli. 2007. gada 30. maijs – 1. jūnijs, Rīga.

9. Kamenders A., Veidenbergs I. Izbraukuma laboratorijas darbi rūpnieciskos apstākļos. Iespējas // 2. starptautiskās konferences “Vides zinātne un izglītība Latvijā un Eiropā: izglītība ilgtspējīgai attīstībai” rakstu krājums. RTU izdevniecība, 2008, 46.–48. lpp.

10. Blumberga A., Jaunzems D., Kamenders A., Žogla G. Lietišķo spēļu vieta vides inženierzinātnes studiju programmā Rīgas Tehniskajā universitātē // Starptautiska konference „Vides izglītības saturs augstskolā”. Tēžu krājums, 2008, 3. lpp., Rīga.

11. Kamenders A., Žogla G., Blumberga A. Daugavpils dzīvojamo ēku enerģijas patēriņš // RTU Zinātnisko rakstu krājums “Vides un klimata tehnoloģijas”. 2008, 134.–139. lpp.

12. Žogla G., Kamenders A., Blumberga A. Siltinātas padomju laika daudzdzīvokļu ēkas energoefektivitāte // RTU Zinātnisko rakstu krājums “Vides un klimata tehnoloģijas”. 2008, 127.–133. lpp.

13. Kamenders A., Žogla G., Blumberga A. Passive House characteristics in the Latvian cold climate // *Conference Proceedings of the 13th Passive House Conference*. 2009, p. 201–207.

14. Žogla G., Kamenders A., Blumberga A., Zahare D. Influence of Heat Gains on Typical Apartment House Heat Energy Consumption in Latvia, Simplified Calculation Method // RTU Zinātniskie raksti „Vides un klimata tehnoloģijas”. 13. sēr., 2. sēj., 2009, 123.–130. lpp.

15. Kamenders A., Blumberga A. Multi-Objective Optimization Approach for Improving Performance of Building // RTU Zinātniskie raksti „Vides un klimata tehnoloģijas”. 13. sēr., 3. sēj., 2009, 70.–73. lpp.

16. Kamenders A., Krauklis E., Blumberga A. First passive house in Latvia: A Real Example // 14th international passive house conference 2010. 2010, 109.–115. lpp., Vācija, Drēzdene.

17. Pelšs M., Blumberga A., Kamenders A. Thermal Bridge Impact on the Heating Demand in a Low-Energy House // RTU Zinātniskie raksti „Vides un klimata tehnoloģijas”. 13. sēr., 4. sēj., 2010, 76.–81. lpp.

18. Kamenders A., Krauklis E., Blumberga A. Cost optimality and EnerPHit standard in Latvia // 15th international passive house conference 2011. 2011, 405.–410. lpp., Austrija, Insbruka.

Darba struktūra un apjoms

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, 4 nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, pielikumi, kopā 181 lappuses, t. sk 87 attēli un literatūras saraksts ar 168 literatūras avotiem.

1. Zema enerģijas patēriņa ēkas aprēķina modelis

Vairākos pētījumos uzsvērta nepieciešamība pēc ekonomiskās analīzes un metodikas, kas ļautu nonākt pie iespējami labākiem risinājumiem, veidojot ZEP ēkas.

Pagaidām nav izstrādāti vienoti ZEP ēkas kritēriji. Lai arī pārskatītā ēku energoefektivitātes direktīva *2010/31/EU* nosaka kvalitatīvus zema enerģijas patēriņa ēkas rādītājus, tie nav izteikti kvantitatīvos pārbaudāmos rādītājos.

Eksistē daudzi inženiertehniskie paņēmieni, kas ļauj samazināt ēkas enerģijas patēriņu un izmantot atjaunojamus energoresursus enerģijas patēriņa segšanai. Taču Latvijas būvnormatīvi izvirza tikai minimālās prasības pret ēku energoefektivitāti, un jaunu ēku būvniecības gadījumā nav skaidrs, kādi siltumtehniskie rādītāji jāsasniedz un kādas tehnoloģijas izmantojamas, lai Latvijā sasniegtu zema enerģijas patēriņa ēkas rādītājus.

Veicot ēku renovāciju, trūkst skaidras metodikas, kā izvērtēt un sasniegt izmaksu optimālu energoefektivitātes līmeni.

Ir pieejami aprēķinu modeļi, ar kuru palīdzību iespējams veikt ēkas enerģijas bilances analīzi, taču šie modeļi nav izmantojami optimāla enerģijas patēriņa noteikšanai ZEP ēku gadījumā: Latvijai izstrādātie datormodeļi nav piemērojami ZEP ēku aprēķinam un nav validēti ZEP ēku gadījumiem. Izstrādātie modeļi Latvijā neļauj ņemt vērā ēkas inženierkomunikāciju ietekmi uz ēkas enerģijas patēriņu un nedod iespējas integrēt enerģijas avotu ēkas enerģijas bilancē.

Ēku energoefektivitātes direktīva paredz, ka ēku renovācijas gadījumā tiek noteikts izmaksu ziņā optimāls energoefektivitātes līmenis. Tāpat direktīvā noteikts, ka, nosakot izmaksu optimālu energoefektivitātes līmeni, dalībvalstīm būs nepieciešams izvērtēt ēkas dzīves cikla izmaksas.

Lai sasniegtu darbā izvirzītos mērķus tika izstrādātas ēkas enerģijas patēriņa modeļi, kurš sastāv no vairākām aprēķinu grupām:

1. Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnisko parametru un siltuma zudumu aprēķins – šajā aprēķinu grupā ietilpst visu ēku norobežojošo konstrukciju – ārsienu, jumta vai bēniņu pārseguma, logu, ārdurvju un pagraba ārējo konstrukciju – aprēķinam nepieciešamie dati.

2. Siltuma zudumu noteikšana ēkas ventilācijas sistēmai – aprēķinā tiek izmantoti parametri, kas ietekmē siltuma zudumus caur ventilācijas sistēmu un ar gaisa infiltrāciju.

3. Siltuma ieguvumu aprēķins – šī aprēķinu grupa ietver aprēķinus par siltuma izdalījumu un saules siltuma izmantošanu ēkas siltuma bilancē.

4. Siltuma zudumu aprēķins apkures sistēmai – ņemot vērā apkures sistēmas konstruktīvo risinājumu, tiek veikts siltuma zudumu aprēķins no apkures sistēmas.

5. Siltumenerģijas patēriņa un zudumu aprēķins karstā ūdens sistēmai – šajā aprēķinu grupā ietilpst dati par siltuma zudumiem karstā ūdens apgādes sistēmā – cirkulācija cīlpā, stāvošais ūdens krānos un akumulācijas tvertnē.

6. Ekonomiskie aprēķini.

7. Optimizācija.

Optimizācijas mērķis ir atrast optimālu energoefektivitātes pasākumu kopumu atbilstoši noteiktajam optimalitātes kritērijam.

Izmaksu optimālo energoefektivitātes līmeni var apskatīt no sabiedrības vai indivīda pozīcijām. Privātais investors balstīs savas

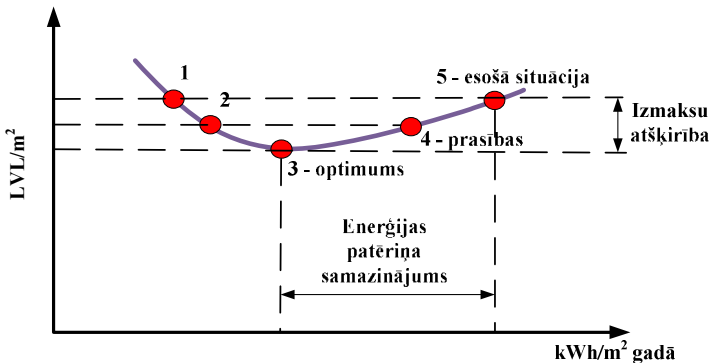
investīcijas uz energoefektivitātes pasākumiem, izvērtējot ieguldīto līdzekļu pamatojamību esošajos ekonomiskajos apstākļos. Turpretī, izvērtējot investīcijas energoefektivitātes pasākumos plašākā kontekstā, var tikt apskatīti arī citi ieguvumi, kas var ietvert vides un energoapgādes drošības ieguvumus. Tāpēc darbā izstrādāti divi atšķirīgi optimalitātes kritēriji, no kuriem viens ataino ieguldīto līdzekļu lietderību un otrs izvērtē CO₂ emisiju samazināšanas efektivitāti.

Izvēlēti šādi optimalitātes kritēriji: c

1) izmaksu optimāls energoefektivitātes līmenis – zemākās kopējās izmaksas uz vienu kvadrātmetru izvēlētajā aprēķina periodā, LVL/m²;

2) CO₂ samazinājuma optimāls energoefektivitātes līmenis – lielākais CO₂ izmešu samazinājums pret kopējām izmaksām noteiktā aprēķina periodā, kg CO₂/LVL.

Iespējamā optimizācijas līkne, nosakot izmaksu optimālu energoefektivitātes līmeni, vispārīgā veidā parādīta 2. attēlā.



2. att. Kritērija LVL/m² optimizācijas līkne vispārīgā veidā

Katrs punkts attēlo dažādas renovācijas alternatīvas. Apskatot reālus gadījumus, visi iespējamie varianti, protams, neveido vienu izteiktu optimizācijas līkni, bet gan punktu mākonī, kas nosaka līknes raksturu. Izmaksu optimāls ēkas energoefektivitātes līmenis atbilst viszemākajām kopējām dzīves cikla izmaksām noteiktā aprēķina periodā. Ja optimizācijas līkne veidojas ar ļoti tuvām optimālajām vērtībām, jāizvēlas pasākumi, kuri dod vislielāko

enerģijas patēriņa samazinājumu, tādējādi palīdzot sasniegt valsts un ES noteiktos mērķus.

Kā redzams 2. attēlā, var veidoties situācijas, kad izmaksas ir vienādas, bet ievērojami atšķiras ēkas energoefektivitātes līmenis (sk. 2. attēlā otro un ceturto alternatīvu). Ceturtā alternatīva apraksta minimālās energoefektivitātes prasības atbilstoši Latvijas būvnormatīvam, bet otrajai alternatīvai atbilstošie energoefektivitātes pasākumi ļauj tuvoties ZEP ēkas rādītājiem. Veidojot optimizācijas līkni, iespējams noteikt, cik liela ir atšķirība starp minimālajām energoefektivitātes prasībām atbilstoši Latvijas likumdošanai, un noskaidrot optimālos energoefektivitātes pasākumus.

Kopējās izmaksas veido izmaksas, kurās tiek ieskaitīti maksājumi par enerģiju un investīcijām energoefektivitātes pasākumos. Lai pēc iespējas precīzāk aprēķinātu kopējās izmaksas noteiktā laika posmā, tiek ņemts vērā enerģijas cenas pieaugums un inflācija. Kopējās diskontētās izmaksas noteiktajā aprēķina periodā aprēķina atbilstoši 1. formulai:

$$I_{\text{kop,d}} = I_{\text{pas}} + \left(\frac{Q_{\text{apk}}}{\eta_k} + \frac{Q_{\text{kr}}}{\eta_{kr}} \right) * T * \left(1 - \left(\frac{1 + E_p}{1 + R_R} \right)^P \right) + \frac{I_{\text{men}} * \left(1 - \left(\frac{1}{1 + R_R} \right)^\beta \right)}{1 - \frac{1}{1 + R_R}} * \frac{1}{1 + R_R}, \text{LVL} \quad (1)$$

kur

I_{pas} – pašu finansējums;

I_{men} – ikmēneša maksājums bankā, LVL;

R_R – reālā procentu likme, %;

B – naudas aizņēmuma periods, gadi;

P – aprēķina periods, gadi;

Q_{apk} – enerģijas patēriņš apkurei pēc energoefektivitātes pasākumiem (tiek noteikts ar enerģijas patēriņa un ekoloģisko aprēķina moduļa palīdzību), MWh gadā;

Q_{kr} – enerģijas patēriņš karstā ūdens nodrošināšanai pēc energoefektivitātes pasākumiem (tiek noteikts ar enerģijas patēriņa un ekoloģisko aprēķina moduļa palīdzību), MWh gadā;

η_k – apkures sistēmu sadales un avota (katla) lietderības koeficients, %;

η_{kr} – karstā ūdens sistēmas sadales efektivitāte, %;

T – enerģijas tarifs, Ls/MWh;

E_p – enerģijas cenas pieaugums gadā, %.

Izvēlētais plāna rādītājs ļauj savstarpēji salīdzināt dažādus energoefektivitātes pasākumu kopumus.

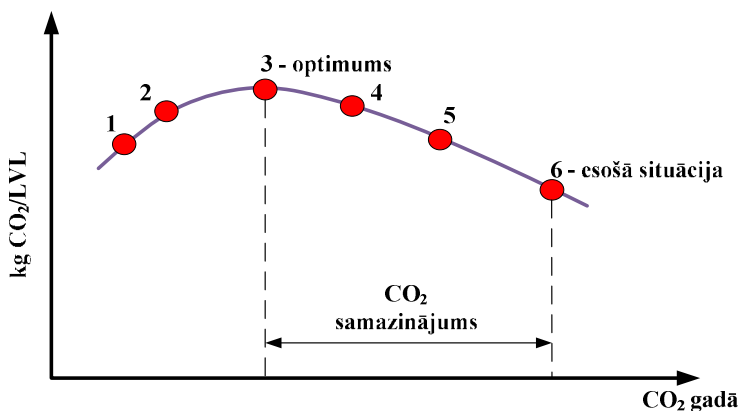
$$\text{OPTe} = \frac{I_{\text{kop,d}}}{A_{\text{apr}}} \rightarrow \text{min, LVL/m}^2, \quad (2.)$$

kur

$I_{\text{kop,d}}$ – kopējās diskontētās izmaksas, LVL;

A_{apr} – aprēķina (apkurināmā) platība, m^2 .

Par CO_2 samazinājuma efektivitātes indikatoru izmantots vispāratzīts rādītājs $\text{kg CO}_2/\text{LVL}$, kas atspoguļo CO_2 emisiju samazinājumu pret kopējām izmaksām noteiktajā aprēķina periodā. Šajā gadījumā izvēlētais plāna rādītājs ir jāmaksimizē. Optimizācijas līkne vispārīgā veidā parādīta 3. attēlā.



3. att. Kritērija $\text{kg CO}_2/\text{LVL}$ optimizācijas līkne vispārīgā veidā

Arī šajā gadījumā, apskatot dažādas alternatīvas, veidosies punktu mākonis, kurā katrs punkts attēlos vienu noteiktu alternatīvu.

Kā otrs optimizācijas plāna efektivitātes rādītājs piedāvāts īpatnējais rādītājs, kas raksturo CO_2 samazinājumu uz kopējām diskontētajām izmaksām noteiktajā aprēķina periodā. CO_2 emisiju samazinājumu ietekmē apkures sistēmas un enerģijas avota lietderības koeficients, ēkas enerģijas patēriņš un kurināmā veids, kas tiek lietots energoavotā.

$$\text{OPT}_V = \frac{E_M * 1000}{I_{\text{kop,d}}} \rightarrow \max, \text{kgCO}_2 / \text{LVL} , \quad (3.)$$

kur

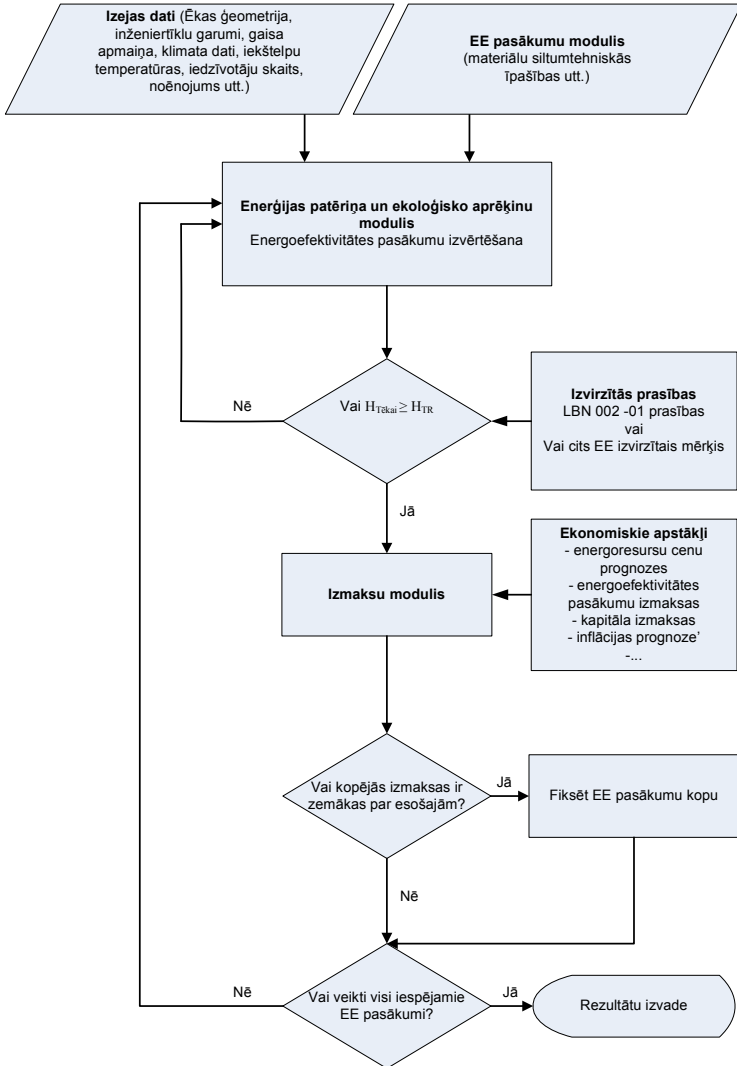
$I_{\text{kop,d}}$ – kopējās diskontētās izmaksas, LVL;

E_M - CO₂ emisiju samazinājums aprēķina periodā, t.

Optimālo energoefektivitātes pasākumu kopumu iespējams noteikt atkarībā no lietotāja prioritātēm, izvēloties vienu no piedāvātajiem optimalitātes kritērijiem. Energoefektivitātes pasākumu ekonomiskais izvērtējums sevī neiekļauj tādu papildu ieguvumus no energoefektivitātes pasākumiem kā:

- 1) lielāka energoneatkarība;
- 2) ietekmes uz vidi samazināšana (ārējo izmaksu samazināšana, iespējamie ieguvumi no CO₂ kvotu tirdzniecības);
- 3) labāks iekštelpu klimats, kas var samazināt saslimšanas risku un palielināt darba ražību;
- 4) ēkas tehniskā mūžā pagarināšanās un apsaimniekošanas izdevumu samazināšana;
- 5) nekustamā īpašuma vērtības pieaugums.

Optimizācijas procesa algoritms, ja mērķis ir kopējas zemākās izmaksas aprēķina periodā, redzams 4. attēlā.



4. att. Optimizācijas procesa algoritms

Darbā izstrādātā optimizācijas programma sastāv no vairākiem moduļiem, no kuriem svarīgākie ir šādi:

1) *izejas dati* – satur informāciju par analizējamo ēku. Tiek raksturota ēkas ģeometrija, apkures un karstā ūdens sistēmas, ēkas novietojums pret debess pusēm, noēnojums, uzturētie iekštelpu klimatiskie apstākļi (temperatūra telpās, gaisa apmaiņa), iedzīvotāju skaits un norobežojošo konstrukciju siltumtehnikās īpašības;

2) *energoefektivitātes pasākumu modulis* – satur informāciju par iespējamiem energoefektivitātes pasākumiem;

3) *enerģijas patēriņa un ekoloģisko aprēķinu modulis* – tiek sastādīta ēkas siltumenerģijas bilance un atbilstoši aprēķināts emitēto CO₂ emisiju daudzums;

4) *izmaksu modulis* – tiek noteiktas kopējās izmaksas izvēlētajam aprēķina periodam un veikts optimizācijas plāna rādītāju aprēķins;

5) *ekonomiskos apstākļus raksturojošais modulis* – tiek raksturota energoresursu cenu prognoze, inflācija, aizdevuma procentu likme, pašu finansējuma daļa.

2. Zema enerģijas patēriņa ēkas datu apstrāde un analīze. Modeļa validācija

Ēkas enerģijas patēriņš tiek noteikts, balstoties uz izstrādāto matemātisko modeli, tāpēc ir svarīgi pārlicināties, cik precīzi ēkas matemātiskais modelis apraksta ēkas enerģijas bilanci un spēj prognozēt ēkas enerģijas patēriņu kā jaunu ēku būvniecības gadījumā, tā arī pēc ēkas renovācijas. Lai pārbaudītu izstrādāto modeli, tika veikta modeļa validācija. Pagaidām nav izstrādātas starptautiski atzītas vienotas enerģijas patēriņa modelēšanas programmu validācijas metodes vai vienoti testēšanas kritēriji.

Bet iespējams izdalīt trīs dažādus ēku enerģijas patēriņa modelēšanas programmu validācijas veidus:

1) *Ēkas enerģijas programmu validācija, salīdzinot modelētos rezultātus ar reālu ēku enerģijas patēriņa mērījumiem.* Šāda pārbaude ir labs veids, lai pārlicinātos, vai izstrādātais modelis adekvāti apraksta reālu ēku enerģijas patēriņa datus, un šāds pārbaudes paņēmiens arī ļoti bieži tiek izmantots praksē. Tomēr šajā gadījumā ir pieļaujama lielāka atšķirība starp mērījumiem un aprēķinu ceļā iegūtajiem datiem, jo mērītos ēku enerģijas patēriņa datus ietekmē daudzi dažādi faktori, kuri bieži vien nav zināmi un ir grūti nosakāmi. Ja dati nesakrīt, ir ļoti grūti izvērtēt kļūdas iemeslus, jo tas iespējams tikai tiktāl, cik to pieļauj mērīto datu informācija.

2) *Diagnostikas (verifikācijas) testi.* Ēkas enerģijas programmu validācija notiek, veicot aprēķinus vairākiem iepriekš izstrādātiem piemēriem un salīdzinot iegūtos rezultātus ar standartā uzdotajiem pareizajiem rezultātiem. Parasti standartā uzdotie rezultāti ir iegūti, veicot detalizētus mērījumus laboratorijās un dinamisko modelēšanu. Šādi validācijas testi dod lielākas iespējas noteikt kļūdas modelī, bet nesniedz informāciju par to, kā modelis apraksta reālas ēkas. Viens no šādu testu piemēriem ir dinamisko modelēšanas programmu validācijai izstrādātais standarts *EN 15265: Energy performance of buildings – Calculation of energy needs for space heating and cooling using dynamic methods – General criteria and validation procedures.*

3) *Salīdzinājums ar verificētām ēku dinamiskajām simulācijas programmām.* Parasti šādu validācijas veidu izvēlas noteiktu ēkas tipu vai komponentu modelēšanā, kas palīdz izvērtēt dažādas modeļa nianšes.

2.1. Modeļa validācija ar reāliem datiem

Datu kopā iekļautas sabiedriskās ēkas, viengimenes ēka un populārākās sērijveida renovētas un nerenovētas daudzdzīvokļu ēkas. Apskatītās ēkas ietver 103. sērijas, 467. sērijas, 602. sērijas, 318. sērijas, 316. sērijas un 104. sērijas daudzdzīvokļu ēkas.

Datu analīzei darbā izmantoti dati par ēku energopatēriņu apkurei. Apstrādāto datu kopu veido analizētās ēkas un to enerģijas patēriņš pa dažādiem gadiem. Apstrādāto datu kopā

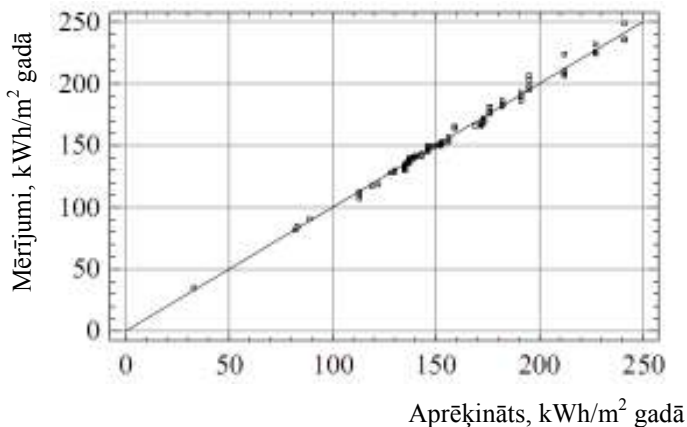
1) nav veikta kompleksa ēkas renovācija. Ir uzstādīti siltummezgli un mainīti atsevišķi logi:

$$m = 85$$

2) ir veikta ēkas kompleksa renovācija:

$$m = 17$$

Kā energoefektivitāti raksturojošs indikators izvēlētas kWh/m² gadā, un šis indikators tiek plaši izmantots, lai raksturotu ēku enerģijas patēriņu. Tas lietots būvniecības normatīvajos aktos, Latvijas un citu valstu likumdošanā. Mērītās enerģijas patēriņa vērtības atkarībā no modelī iegūtajiem aprēķinu lielumiem parādītas 5. attēlā.



5. att. Ēku enerģijas patēriņa mērījumu un aprēķinu datu salīdzinājums

Kā redzams 5. attēlā, starp abām datu kopām ir laba datu korelācija un punktu izkliede ir neliela. Jo precīzāk attēlotais datu punkts guļ uz taisnes, jo precīzāk izstrādātais modelis ir spējis aprakstīt reālo ēkas enerģijas patēriņu.

Lai kvantitatīvi novērtētu datu savstarpējās sakarības ciešumu un standarta kļūdu, veikta to regresijas un korelācijas analīze. Regresijas analīzei izvēlēts lineārs modelis

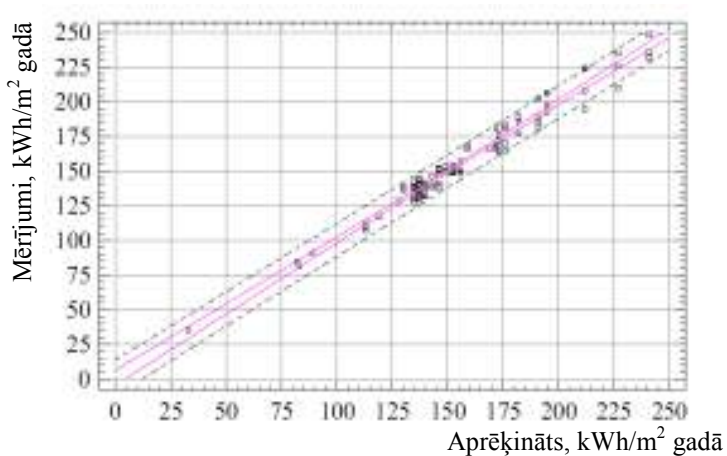
$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1, \quad (4.)$$

kur

y – mērītās energopatēriņa vērtības, kWh/m² gadā;

x_1 – aprēķinātās energopatēriņa vērtības, kWh/m² gadā.

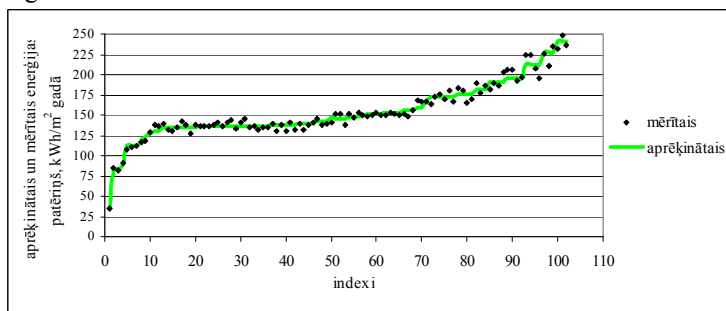
Regresijas analīzes rezultātu grafiskais attēlojums redzams 6. attēlā.



6. att. Ēku enerģijas patēriņu dati ar intervālu 2σ robežām

Iegūtie rezultāti liecina, ka lineārais modelis labi raksturo attiecību starp mērītajiem un ar modeļa palīdzību aprēķinātajiem rezultātiem. Noteiktā korelācijas koeficienta R^2 vērtība ir 0,97, un tas nozīmē, ka modelis apraksta 97% mērījuma rezultātu izmaiņu. Korelācijas koeficients $R = 0,985$ liecina par to, ka starp mērījumu un aprēķinu rezultātiem ir cieša sakarība. Regresijas un korelācijas analīzes rezultātā ir noteikts, ka aprēķinu un mērījumu rezultātu standarta kļūda $\sigma = 5,89 \text{ kWh/m}^2 \text{ gadā}$. Ticamības varbūtībai 0,95 atbilst intervāls $2\sigma = 11,8 \text{ kWh/m}^2 \text{ gadā}$. Šī intervāla robežas parādītas 6. attēlā.

Ēku mērītie un aprēķinātie energopatēriņi aprēķināto patēriņu augošā kārtībā doti 7. attēlā.



7. att. Ēku aprēķinātā un mērītā enerģijas patēriņa izmaiņas

7. attēlā sarindoti dati no mazākās vērtības uz lielāko un veikts salīdzinājums starp aprēķināto un izmērīto enerģijas patēriņu. Kā redzams, enerģijas patēriņa mērījumu rezultātu izkliede ap aprēķinu līkni ir vienmērīga un nav atkarīga no ēkas enerģijas patēriņa.

Salīdzinot datus, redzams, ka modelis adekvāti apraksta reālu dažāda tipa ēku enerģijas patēriņa datus. Tā kā ar izstrādātā modeļa palīdzību paredzēts aprēķināt ēkas enerģijas patēriņu pēc noteiktu ēkas energoefektivitātes pasākumu ieviešanas, padziļināti apskatīti ēkas renovācijas gadījumi.

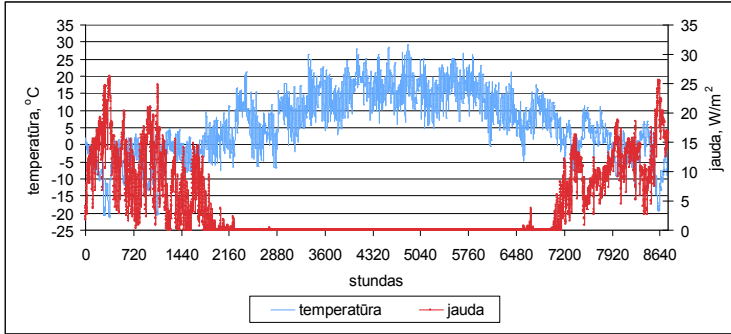
2.2. Pirmā zema enerģijas patēriņa ēka Latvijā

Darbā veikts pirmās ļoti zema enerģijas patēriņa ēkas enerģijas patēriņa un iekštelpu klimatu raksturojošo rādītāju monitorings, kas sastāv no šādiem ilglaicīgiem mērījumiem:

- 1) iekštelpu gaisa temperatūra visās ēkas telpās;
- 2) āra gaisa temperatūra;
- 3) gaisa relatīvais mitrums dzīvojamā istabā un guļamistabā;
- 4) CO₂ līmenis guļamistabā;
- 5) ventilācijas iekārtas pretaizsalšanas cirkulācijas sūkņa ieslēgšanās/izslēgšanās;
- 6) siltumenerģijas patēriņš apkures un karstā ūdens sagatavošanai.

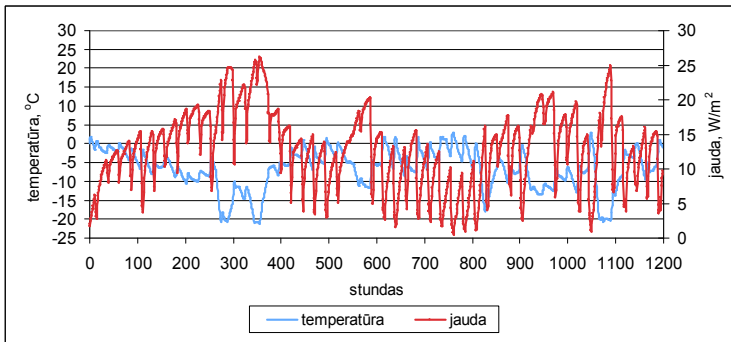
Veiktie mērījumi ļāva sagatavot precīzus izejas datus aprēķina modelim un veikt modeļa validāciju ZEP ēku gadījumiem. Lai validētu izstrādāto modeli zema patēriņa ēkām, veikti ne tikai ēkas enerģijas patēriņa un nepieciešamo ievaddatu mērījumi, bet arī izveidots ēkas dinamiskais aprēķina modelis programmas *TRNSYS* vidē.

Izstrādātais zema enerģijas patēriņa ēkas dinamiskais modelis ļāva izsekot temperatūras un apkures pīķa slodžu izmaiņām dažādās zonās. Lai precīzi noteiktu ēkas apkures pīķa slodzi, tika veikta ikstundas analīze. Iegūtie rezultāti redzami 8. attēlā.



8. att. Ēkas pīķa slodze atkarībā no ārējās temperatūras

Kā redzams 8. attēlā, apkures pīķa slodze bieži pārsniedz 10 W/m^2 vērtību, kas ir limitējošā vērtība, kādā iespējams izmantot tikai ventilācijas sistēmu apkures slodzes segšanai. Lielākās apkures pīķa slodzes novērojamas janvārī un februārī. Šie divi mēneši detalizētāk apskatīti 9. attēlā, lai precīzi noteiktu apkures pīķa slodzi.

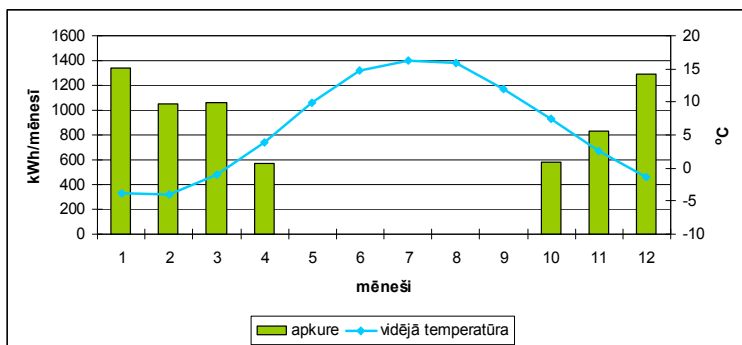


9. att. Apkures pīķa slodze janvārim un februārim

Kā redzams 9. attēlā, maksimālā ēkas apkures pīķa slodze ir 26 W/m^2 . Tā kā šādu apkures slodzi nav iespējams nosegt, izmantojot izbūvēto ventilācijas sistēmu, ēkā atsevišķās zonās tika izbūvētas siltās grīdas.

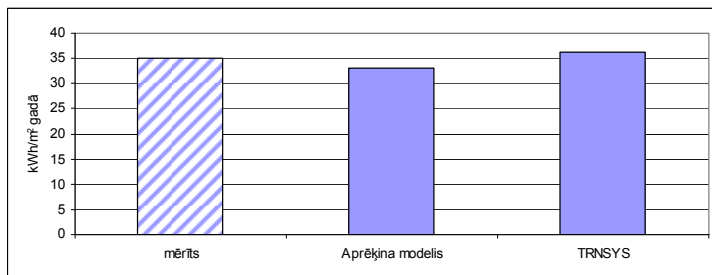
Lai izmērītie enerģijas patēriņa dati būtu salīdzināmi ar aprēķinu ceļā iegūtajiem, tie tika koriģēti, pieņemot, ka klimatiskie apstākļi ir vienādi un iekštelpu temperatūra $t = +20 \text{ }^\circ\text{C}$. Koriģētie

Ēkas enerģijas patēriņa dati 2010. gadam pa mēnešiem parādīti 10. attēlā.



10. att. Ēkas enerģijas patēriņš pa mēnešiem

Kopējais ēkas enerģijas patēriņš 2010. gadā bija 6719 kWh gadā jeb 35 kWh/m² gadā. Ar aprēķina modeli iegūtais rezultāta salīdzinājums ar mērījumu datiem un dinamisko modeli redzams 11. attēlā.



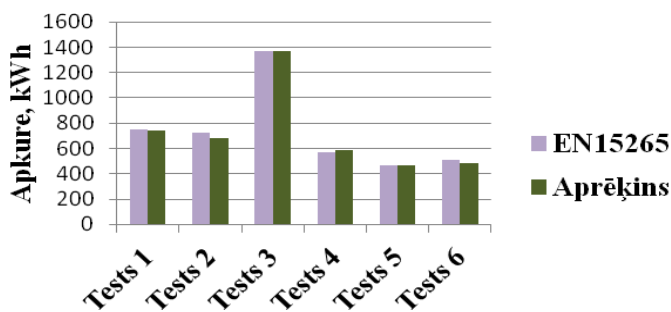
11. att. Enerģijas patēriņa salīdzinājums – mērījumi pret aprēķiniem

Kā redzams attēlā, aprēķinu ceļā noteiktais ēkas enerģijas patēriņš precīzi apraksta enerģijas patēriņu ēkā.

2.3. Modeļa validācija atbilstoši EN 15265 standartam

Izstrādātais modelis tika validēts, izmantojot arī EN 15265:2007 standartā paredzētos testus. Piedāvāto testu variācijas paredzētas dinamisko modeļu validācijai, kuri apraksta vienu ēkas istabu, bet netiek apskatīti gadījumi ar pirmā stāva siltuma pānesi uz neapkurinātiem pagrabiem vai grunti, kā tas ir reālu ēku gadījumā. Standarts kopumā piedāvā divpadsmit dažādus gadījumus, no tiem sezonālajam aprēķinam piemērojami seši, kuri arī tika izmantoti izstrādātā modeļa validācijai.

Iegūtie rezultāti apkopoti 12. attēlā.



12. att. Testu un aprēķinu rezultātu salīdzinājums

1. tabulā dotas rezultātu skaitliskās vērtības, un to relatīvā atšķirība starp testa un aprēķina rezultātiem izteikta procentos.

1. tabula

Rezultātu salīdzinājums

Tests	EN 15265	Aprēķinātais siltumenerģijas patēriņš	Relatīvā atšķirība
-	kWh	kWh	%
1.	748	745,62	-0,32
2.	722,7	677,32	-6,28
3.	1368,5	1367,48	-0,075
4.	567,4	591,32	4,22

5.	463,1	465,17	0,45
6.	509,8	482,93	-5,27

Kā redzams, lielākā atšķirība ir 6% robežās, kas vērtējama kā augsta izstrādātā modeļa precizitāte. Atbilstoši EN 15265 standartam modeļus iespējams iedalīt trīs precizitātes klasēs: A, B un C. A klasei atbilst modeļi, kuriem atšķirības starp modelētajiem un dotajiem rezultātiem nav lielākas par 5%, pie B klases pieskaitāmi modeļi, kuriem atšķirības nav lielākas par 10%, un pie C klases – modeļi, kuriem atšķirības nav lielākas par 15%.

Izstrādātais aprēķina modelis validēts, izmantojot vairākus validācijas paņēmienus:

- 1) reālus ēku enerģijas patēriņa datus renovētām, nerenovētām un ZEP ēku;
- 2) dinamisko modelēšanas programmu pārbaudes testu EN 15265;
- 3) dinamisko ēku aprēķina programmu *TRNSYS 16*.

Datu analīze liecina, ka izstrādātais modelis adekvāti apraksta ēku enerģijas patēriņu, un to var lietot, lai noteiktu ēku enerģijas patēriņu. Lai katras konkrētas ēkas gadījumā būtu iespējams paaugstināt piedāvātā aprēķina modeļa precizitāti, galvenie faktori jānosaka mērījumu ceļā.

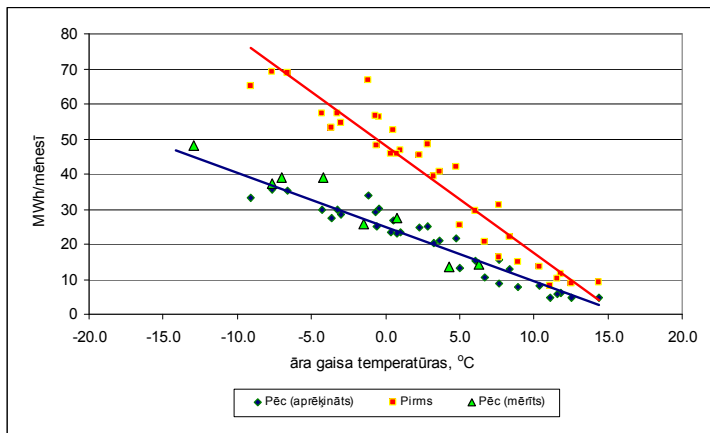
3. Modeļa aprobācija

Modeļa validācijas gaitā detalizēti analizēts, kā modelis spēj prognozēt ēkas enerģijas patēriņu pēc ēkas renovācijas pasākumiem. Analizētas trīs dažādas ēkas pirms un pēc renovācijas: Maskavas ielā 1, Rēzeknē, Dzintaru ielā 2, Kuldīgā, un Gaujas ielā 13, Valmierā. Pilnībā izstrādātais ēkas enerģijas patēriņa aprēķina modelis praksē tika izmēģināts, izstrādājot daudzdzīvokļu ēkas Gaujas ielā 13 energoefektivitātes pasākumu plānu un nosakot ēkas enerģijas patēriņu pēc renovācijas.

3.1. Daudzdzīvokļu ēkas renovācija

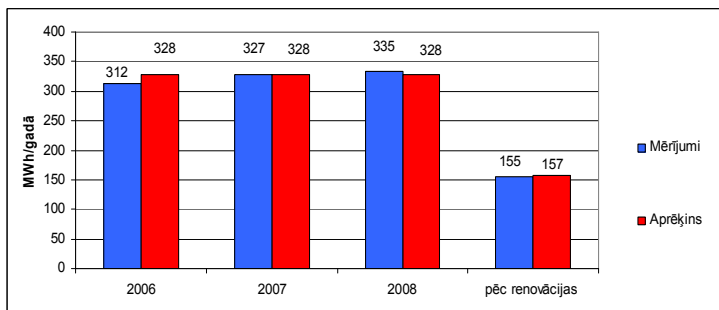
Izstrādātā aprēķina programma praksē aprobēta, izstrādājot energoefektivitātes pasākumu plānu ēkai Gaujas ielā 13, Valmierā, un prognozējot ēkas enerģijas patēriņu pēc ēkas renovācijas. Analizētā ēka ir 467. sērijas ēka, kuras āršienas veidotas no keramzītbetona paneliem. Ēkai ir neapkurināms pagrabs un bēniņi, tai ir savietotais jumts. Ēkas kopējā platība ir 2239 m², un apkurināmā dzīvokļu platība – 1900 m². Ar izstrādātā modeļa palīdzību noteikts, ka ēkas enerģijas patēriņš pēc ēkas renovācijas apkurei būs 157 MWh gadā jeb 83 kWh/m² gadā un karstā ūdens siltumenerģijas patēriņš būs 57 MWh gadā jeb 30 kWh/m² gadā. Attiecīgi plānotais enerģijas patēriņa samazinājums apkures vajadzībām ir 51% un karstā ūdens vajadzībām 42% no pašreizējā ēkas enerģijas patēriņa. Tika noteikts, ka kopējais siltumenerģijas patēriņš pēc ēkas renovācijas būs 214 MWh gadā jeb 113 kWh/m² gadā.

Ēkas renovācijas laikā tika izbūvēta enerģijas patēriņa monitoringa sistēma, kas ļāva analizēt ēkas enerģijas patēriņu un iekštelpu temperatūru pēc ēkas renovācijas. Mērīto un aprēķināto enerģijas patēriņa datu salīdzinājums dots 13. attēlā. Enerģijas patēriņa dati attēloti atkarībā no ārējās temperatūras, katrs punkts attēlo viena mēneša enerģijas patēriņu. Ar līniju atzīmēts vidējais ēkas enerģijas patēriņš mēnesī atkarībā no ārējās temperatūras pirms ēkas renovācijas, ar zilu līniju – prognozētais ēkas enerģijas patēriņš pēc renovācijas pasākumiem, un trīsstūrveida punkti parāda mērītos rezultātus pēc ēkas renovācijas. Kā redzams, prognozētais ēkas enerģijas patēriņš pēc ēkas renovācijas precīzi apraksta ēkas enerģijas patēriņu.



13. att. Ēkas siltumenerģijas patēriņš pirms ēkas renovācijas, prognozētais enerģijas patēriņš un enerģijas patēriņš pēc ēkas renovācijas

Ēkas enerģijas patēriņa mērītie un modelētie dati pa gadiem pirms un pēc ēkas renovācijas redzami 14. attēlā. Tajā attēloti mērītie un standarta apstākļiem pielāgotie enerģijas patēriņa dati un aprēķinu ceļā iegūtie enerģijas patēriņa dati.



14. att. Ēkas mērītie un modelētie enerģijas patēriņa dati pa gadiem

Kā redzams 13. un 14. attēlā, izstrādātais ēkas enerģijas patēriņa modelis precīzi apraksta ēkas enerģijas patēriņu kā pirms, tā arī pēc ēkas renovācijas, un atšķirība starp mērīto un aprēķināto ēkas enerģijas patēriņu ir 2% robežās. Ēkas enerģijas patēriņa modelis pēc ēkas renovācijas paredzēja, ka, izpildot noteiktus darbus, enerģijas

patēriņš apkurei būs 157 MWh gadā jeb 49% enerģijas patēriņa samazinājums. Karstā ūdens sistēmas gadījumā prognozēts cirkulācijas zudumu samazinājums no 61,9 MWh gadā līdz 20 MWh gadā, kas nozīmē 68% samazinājumu.

3.2. Optimizācijas rezultāti

Darba izstrādes laikā izveidota datorprogramma, ar kuras palīdzību iespējams aprēķināt ēkas enerģijas patēriņu apkures un karstā ūdens vajadzībām un noteikt optimālo energoefektivitātes pasākumu kopumu atkarībā no izvēlēta plāna efektivitātes rādītāja.

Izmantojot izstrādāto modeli, tika analizētas trīs dažāda veida ēkas:

- 1) sērijveida daudzdzīvokļu ēka;
- 2) sabiedriska ēka;
- 3) privātmāja.

Optimizācijas piemērs sniegts daudzdzīvokļu ēkai.

Optimizācija veikta diviem atšķirīgiem aprēķinu periodiem – 20 un 35 gadiem. Optimizācijas laikā atkarībā no izvēlēto energoefektivitātes pasākumu skaita tiek veidotas unikālas energoefektivitātes pasākumu kopas. Šīs kopas tiek reizinātas, izmantojot Dekarta reizinājumu, kur katras kopas katrs elements tiek reizināts savā starpā, tādējādi veidojot noteiktu skaitu rezultējošo kortežu. Dotajā piemērā apskatītie energoefektivitātes pasākumi kopā veido 1 290 240 dažādas unikālas energoefektivitātes pasākumu kopas, kuras optimizācijas rezultātā tiek caurskatītas, aprēķinot uzdotos optimalitātes kritērijus. Optimizācijas rezultātā 35 gadu aprēķinu periodam, par optimālo kritēriju izvēloties mazākās kopējas izmaksas, kā optimālie energoefektivitātes pasākumi noteikti šādi:

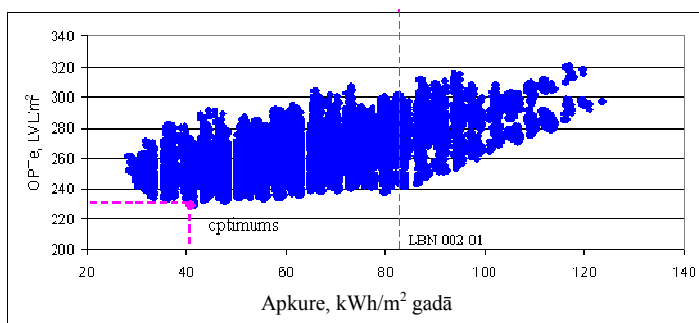
- 1) visu sienu siltināšana 0,15 m biezā siltumizolācijas slānī (siltumizolācija $\lambda \leq 0,04 \text{ W}/(\text{m}\times\text{K})$);
- 2) bēniņu pārseguma siltināšana 0,35 m biezā siltumizolācijas slānī (siltumizolācija $\lambda \leq 0,04 \text{ W}/(\text{m}\times\text{K})$);
- 3) ieejas durvju nomaiņa ar stikla pakešu durvīm (siltumizolācija $U \leq 0,042 \text{ W}/(\text{m}^2\times\text{K})$);
- 4) pagraba pārseguma siltināšana 0,07 m biezā siltumizolācijas slānī (siltumizolācija $\lambda \leq 0,04 \text{ W}/(\text{m}\times\text{K})$);

5) visu logu nomaiņa ar trīsstiklu pakešu logiem ar selektīvo stiklu (4/12/4/15/4) un argona gāzes maisījumu ($(U_w \leq 0,9 \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$ un $g > 0,45$);

6) mehāniskās ventilācijas un gaisa rekuperācijas ($\eta > 75\%$) sistēmas izbūve, vidēji nodrošinot $n = 0,5 \text{ h}^{-1}$ gaisa apmaiņu telpās;

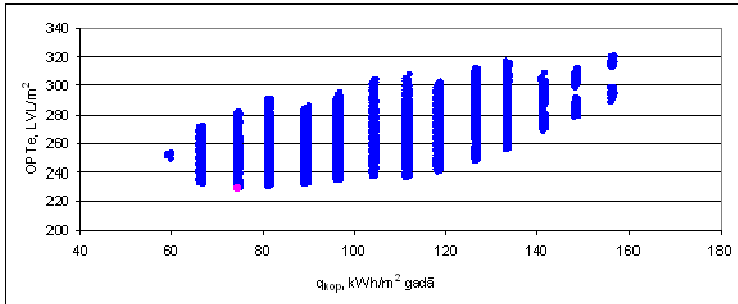
7) karstā ūdens sadales un apkures sistēmas sadales cauruļvadu siltināšana ar 0,07 m biezu siltumizolācijas slāni.

Šo pasākumu rezultātā kopējais enerģijas patēriņš $Q_{\text{kop}} = 141,17 \text{ MWh}$ gadā jeb $q_{\text{kop}} = 74,3 \text{ kWh}/\text{m}^2$ gadā. Īpatnējais enerģijas patēriņš apkures vajadzībām $q_{\text{apk}} = 41,13 \text{ kWh}/\text{m}^2$ gadā, un atbilstošais plāna efektivitātes rādītājs $\text{OPTe} = 229,03 \text{ LVL}/\text{m}^2$. Tā kā dažādu energoefektivitātes pasākumu kopu skaits ir liels, lai noteiktu optimizācijas liknes raksturu, energoefektivitātes pasākumi tiek attēloti ar 10% nobīdi no optimālās vērtības uz katru pusi. Optimizācijā iegūti 15. attēlā redzami rezultāti.



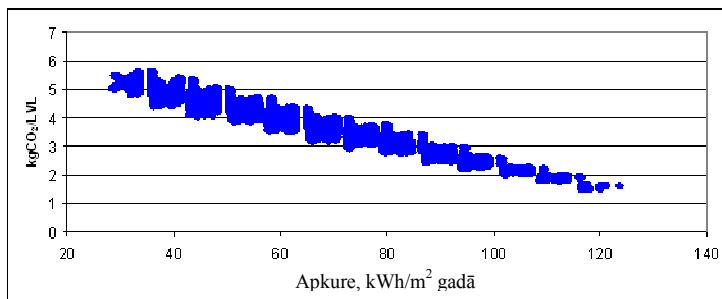
15. att. Optimizācijas rezultāti. Apkures enerģijas patēriņš pret OPTe (35 gadi)

15. attēlā redzami optimizācijas rezultāti tipveida daudzdzīvokļu ēkai 35 gadu aprēķinu periodam. Optimums veidojas no 33 līdz 55 kWh/m^2 gadā. Ja energoefektivitātes pasākumi tiktu realizēti atbilstoši Latvijas būvnormatīvam LBN 002-01, tad ēkas enerģijas patēriņš apkurei būtu 157,7 MWh gadā jeb 83 kWh/m^2 gadā. 16. attēlā redzams optimālais kopējais enerģijas patēriņš.



16. att. Optimizācijas rezultāti. Kopējais enerģijas patēriņš atkarībā no izmaksu plāna efektivitātes rādītāja (35 gadi)

Nosakot optimālo energoefektivitātes pasākumu kopumu no CO₂ emisiju samazinājuma efektivitātes viedokļa, redzams, ka optimums veidojas, ja īpatnējais apkures patēriņš ir 33–36 kWh/m² gadā. Aprēķinātais efektivitātes plāna rādītājs OPT_v = 5,71 kg CO₂/LVL, īpatnējais enerģijas patēriņš apkurei ir 35 kWh/m² gadā un kopējais īpatnējais enerģijas patēriņš – 62,06 kWh/m² gadā. 4.15. attēlā redzams optimizācijas līknes raksturs analizētajai ēkai.



17. att. Optimizācijas rezultāti. Apkures enerģijas patēriņš atkarībā no vides plāna efektivitātes rādītāja (35 gadi)

Optimizācija veikta arī iespējami īsākajam aprēķina periodam – 20 gadiem. Optimizācijas rezultātā 20 gadu aprēķinu periodam, par optimālo kritēriju izvēloties mazākās kopējās izmaksas, kā optimālie energoefektivitātes pasākumi noteikti šādi:

1) visu sienu siltināšana 0,10 m biezā siltumizolācijas slānī (siltumizolācija $\lambda \leq 0,04 \text{ W}/(\text{m}\times\text{K})$);

2) bēniņu pārseguma siltināšana 0,20 m biezā siltumizolācijas slānī (siltumizolācija $\lambda \leq 0,04 \text{ W}/(\text{m}\times\text{K})$);

3) ieejas durvju nomaiņa ar stikla pakešu durvīm (siltumizolācija $U \leq 0,04 \text{ W}/(\text{m}^2\times\text{K})$);

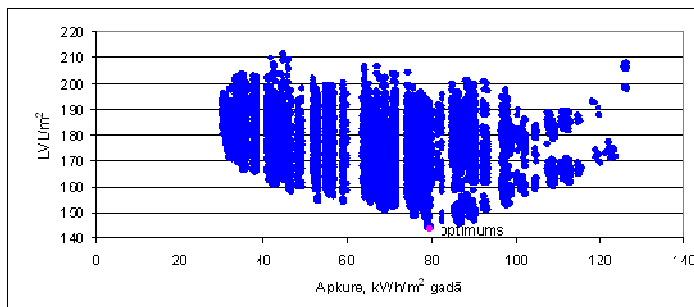
4) pagraba pārseguma siltināšana 0,07 m biezā siltumizolācijas slānī (siltumizolācija $\lambda \leq 0,04 \text{ W}/(\text{m}\times\text{K})$);

5) visu logu nomaiņa ar divstiklu pakešu logiem ($(U_w \leq 1,4 \text{ W}/(\text{m}^2\times\text{K})$ un $g > 0,5$);

6) dabīgā gaisa apmaiņa caur logu restītēm, iztīrot ventilācijas šahtas un noblīvējot neblīvējumus ventilācijas. Vidēji nodrošināta $n = 0,5 \text{ h}^{-1}$ gaisa apmaiņa telpās;

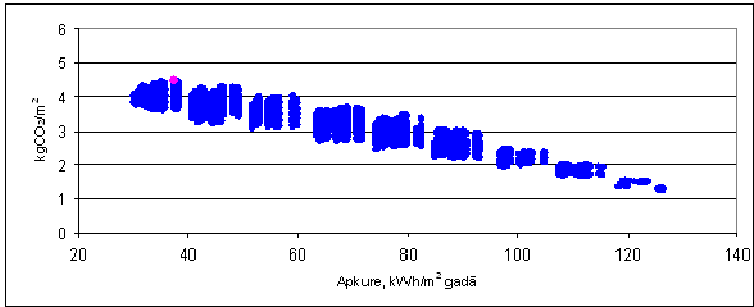
7) karstā ūdens sadales un apkures sistēmas sadales cauruļvadu siltināšana ar 0,05 m biezu siltumizolācijas slāni.

Šo pasākumu rezultātā kopējais enerģijas patēriņš $Q_{\text{kop}} = 215,53 \text{ MWh}$ gadā jeb $q_{\text{kop}} = 113,44 \text{ kWh}/\text{m}^2$ gadā. Īpatnējais enerģijas patēriņš apkures vajadzībām $q_{\text{apk}} = 79 \text{ kWh}/\text{m}^2$ gadā, un atbilstošais plāna efektivitātes rādītājs $\text{OPTe} = 144,08 \text{ LVL}/\text{m}^2$. Optimizācijā iegūti 18. attēlā redzami rezultāti.



18. att. Optimizācijas rezultāti. Apkures enerģijas patēriņš pret OPTe (20 gadi)

18. attēlā redzami optimizācijas rezultāti tipveida daudzdzīvokļu ēkai 20 gadu aprēķinu periodam. Optimums veidojas no 75 līdz 85 kWh/m^2 gadā. 19. attēlā redzami optimizācijas rezultāti, par plāna efektivitātes rādītāju izvēloties CO_2 emisiju samazinājuma efektivitātes rādītāju 20 gadu aprēķina periodam.



19. att. Optimizācijas rezultāti. Apkures enerģijas patēriņš atkarībā no vides plāna efektivitātes rādītāja (20 gadi)

Nosakot optimālo energoefektivitātes pasākumu kopumu no CO₂ emisiju samazinājuma efektivitātes viedokļa, redzams, ka optimums veidojas ar īpatnējo apkures patēriņu 37 kWh/m². Aprēķinātais efektivitātes plāna rādītājs $OPT_v = 4,45 \text{ kg CO}_2/\text{LVL}$.

Secinājumi

1. Darba laikā veikti Latvijā pirmās zema enerģijas patēriņa ēkas enerģijas patēriņa datu un iekštelpu komforta rādītāju mērījumi. Šie mērījumi pierāda, ka Latvijā iespējams uzbūvēt privātmāju (ēkas apkurināmā platība 191 m²), kuras enerģijas patēriņš apkurei nepārsniedz 35 kWh/m² gadā.

2. Izstrādāts Latvijas apstākļiem piemērots ēkas enerģijas patēriņa aprēķina un optimizācijas modelis.

3. Izstrādātais modelis validēts un ir piemērots, lai modelētu un analizētu esošo ēku enerģijas patēriņu, ēku enerģijas patēriņu pēc renovācijas un ZEP ēku enerģijas patēriņu. Datu analīze rāda, ka nav novērojama aprēķinu un mērījumu datu nesakritība atkarībā no ēkas enerģijas patēriņa. Modelis izmantojams arī ZEP ēku enerģijas patēriņa analīzei.

4. Pasīvo ēku koncepcija ir piemērota un izmantojama Latvijas apstākļos. Pasīvo ēku koncepcijas izmantošana ļauj sasniegt ievērojamu enerģijas patēriņa samazinājumu kā jaunu ēku būvniecības, tā arī esošu ēku renovācijas gadījumā. Tomēr darba laikā arī konstatēts, ka Pasīvās ēkas institūta izstrādātās prasības konkrētiem elementiem un tehnoloģijām piemērotas Centrāleiropai un nav tiešā veidā izmantojamas Latvijā, lai sasniegtu ļoti zemu ēkas enerģijas patēriņu. Darbā laikā izstrādāti indikatīvie rādītāji, lai ēka Latvijā varētu tuvuoties pasīvo ēku prasībām, vērtējot pēc enerģijas patēriņa apkurei.

Lai Latvijas apstākļos ēkas tuvotos ZEP ēkas rādītājiem, tām jāsasniedz šādi rādītāji:

▪ Latvijas klimatam atbilstošas U vērtības privātmāju gadījumā:

- sienas, jumts, pārsegumi $< 0,08 \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$;
- logi $< 0,65 \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$;
- rekuperācija $> 85\%$;
- ēkas blīvums $n_{50} < 0,4 \text{ h}^{-1}$;
- maksimāli izmantota Saules enerģija pasīvā veidā;
- ēka maksimāli kompakta.

▪ Latvijas klimatam atbilstošas U vērtības daudzdzīvokļu ēku gadījumā:

- sienas, jumts, pārsegumi $< 0,12 \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$;
 - logi $< 0,65 \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$;
 - rekuperācija $> 80\%$;
 - ēkas blīvums $n_{50} < 0,4 \text{ h}^{-1}$;
 - maksimāli izmantota Saules enerģija pasīvā veidā;
 - ēka maksimāli kompakta.
- Latvijā iespējams panākt ļoti zema patēriņa ēkas rādītājus ($< 15 \text{ kWh}/\text{m}^2$ gadā).
 - Kā pierāda veiktie aprēķini, ēkās ir ļoti grūti sasniegt mazāku apkures pīķa slodzi par $10 \text{ W}/\text{m}^2$.

5. Darba laikā izstrādāts ZEP ēkas dinamiskais modelis programmā *TRNSYS 16*, ar kura palīdzību analizēts ēkas enerģijas patēriņš un apkures pīķa slodze. Aprēķinu rezultātā konstatēts, ka privātmāju gadījumā (ēkas apkurināmā platība mazāka par 200 m^2) ir tehniski ļoti grūti uzbūvēt ēku, kuras apkures pīķa slodze būtu mazāka par $10 \text{ W}/\text{m}^2$ gadā. Līdz ar to privātmāju gadījumā nepieciešams paredzēt papildu apkures sistēmu.

6. Enerģijas patēriņu un komfortu raksturojošo rādītāju monitorings un citi mērījumi pirmajā ZEP ēkā Latvijā ļāva identificēt un aprakstīt vairākas būvniecības laikā pieļautās kļūdas, kas kalpo kā vērtīgs izziņas materiāls tālākiem ZEP ēku projektiem.

7. Ēkām Eiropā ir milzīgs tehniski sasniedzams un ekonomiski pamatots energoefektivitātes potenciāls, kas patlaban netiek pienācīgi izmantots. Esošo ēku renovācija Latvijā notiek lēni. Bieži tiek realizēta tikai daļēja ēkas renovācija un vidēji ēku renovācijas projektos tiek sasniegts zems enerģijas patēriņa samazinājums (līdz 25%). Darbā veiktie mērījumi un datu analīze pierāda, ka, veicot kompleksu ēkas renovāciju atbilstoši minimālajām būvnormatīva LBN 002-01 prasībām, iespējams sasniegt 50% enerģijas patēriņa samazinājumu apkures un karstā ūdens vajadzību nodrošināšanai, nodrošinot augstu komfortu. Darbā veiktie aprēķini un analizētie renovācijas piemēri pierāda, ka esošajās ēkās iespējams sasniegt vēl lielāku enerģijas patēriņa samazinājumu (līdz 80%).

8. Veiktā optimizācija ļāva noteikt optimālas energoefektivitātes pasākumu komplektus dažāda veida (sērijveida daudzdzīvokļu ēka, privātmāja, sabiedriskā ēka) ēkām. Analīze

pierāda, ka, domājot par ilgtermiņa (35 gadu aprēķina periods) ieguldījumiem energoefektivitātes pasākumos, ēkām nepieciešams realizēt kompleksu renovāciju, kas ļauj sasniegt zemāku enerģijas patēriņu apkurei par 40 kWh/m² gadā. Jaunu ēku būvniecības gadījumā maza izmēra ēkām (apkurināmā platība mazāka par 200 m²) enerģijas patēriņam apkurei jābūt zemākam par 35 kWh/m² gadā un lielākām ēkām – par 25 kWh/m² gadā.

9. Izstrādātais modelis piemērots optimālo energoefektivitātes pasākumu identificēšanai un izmantojams jaunu ēku projektēšanas un renovācijas darbu plānošanai. Šo modeli iespējams izmantot kritēriju noteikšanai, veidojot valsts atbalsta programmas, kas paredzētas ēku energoefektivitātes paaugstināšanai.