

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultāte

Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

Līva Asere

Doktora studiju programmas “Vides zinātne” doktorante

**ENERGOEFEKTIVITĀTES UN IEKŠTELPU
GAISA KVALITĀTES DILEMMA IZGLĪTĪBAS
IESTĀŽU ĒKĀS**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskā vadītāja
profesore *Dr. sc. ing.*
ANDRA BLUMBERGA

RTU Izdevniecība

Rīga 2020

Asere, L. Energoefektivitātes un iekštelpu gaisa kvalitātes dilemma izglītības iestāžu ēkās. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2020. 46 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU promocijas padomes “RTU P-19” 2020. gada 19. maija lēmumu, protokols Nr. 119.

Šī darba izstrādi atbalstīja valsts pētījumu programmas projekti “Energoefektīvi un oglekļa mazietilpīgi risinājumi drošai, ilgtspējīgai un klimata mainību mazinošai energoapgādei (LATENERGI)” un “Ēku energoefektivitātes tehnoloģisko risinājumu uzlabošana”, projekta nr. VPP-EM-EE-2018/1-0003.



Vēlos pateikties visiem, kas mani atbalstījuši promocijas darba izstrādes laikā.

Paldies RTU Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūtam un tā vadītājai un lielākajam dzinējspēkam Dagnijai Blumbergai, kas iedrošināja studēt doktorantūrā!

Vēlos izteikt pateicību mana darba vadītājai Andrai Blumbergai par ieskatu aizraujošajā sistēmdinamikas modelēšanas pasaulē. Paldies par man veltīto laiku, padomiem, kā arī par atgādinājumu neapstāties pusceļā!

Vēlos pateikties zinātnisko publikāciju līdzautoram Tomam Molam par sniegto ieguldījumu izglītības iestāžu pētījuma veikšanā.

Visbeidzot – vēlos pateikties saviem mīļajiem un vistuvākajiem par iedrošinājumu, pacietību un par nebeidzama atbalsta sniegšanu.

<https://doi.org/10.7250/9789934225468>

ISBN 978-9934-22-545-1 (print)

ISBN 978-9934-22-546-8 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora grāda (*Ph. D.*) vides zinātnē iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2020. gada 17. decembrī, 14.00 Rīgas Tehniskās universitātes Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultātē, Āzenes ielā 12-1, 115. telpā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. habil. sc. ing.* Ivars Veidenbergs,
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Profesors *Dr. sc. ing.* Aigars Laizāns,
Latvijas Lauksaimniecības universitāte, Latvija

Dr. ing. Uli Jakob,
Štutgartes Tehniskā augstskola (*Die Hochschule für Technik Stuttgart*), Vācija

APSTIPRINĀJUMS

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

Līva Asere (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 53 attēli, sešas tabulas, seši pielikumi, kopā 76 lappuses, neieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 95 nosaukumi.

SATURS

IEVADS	6
Aktualitāte	6
Darba mērķis un uzdevumi.....	7
Izvirzītās hipotēzes	7
Darba zinātniskā novitāte	10
Darba praktiskais pielietojums	10
Zinātniskā darba aprobācija.....	11
Darba struktūra un apjoms.....	11
1. LITERATŪRAS APSKATS	13
1.1. Ēku energoefektivitātes – iekštelpu gaisa kvalitātes dilemma.....	13
1.2. Iekštelpu gaisa kvalitāte un termālais komforts energoefektīvās ēkās	15
1.3. Pašsajūta, veiktspēja un to ietekme uz nākotnes labklājību.....	16
1.4. Ražojoši patērētāji.....	18
2. PĒTĪJUMĀ IZMANTOTĀ METODIKA.....	19
2.1. Iekštelpu gaisa kvalitātes un termālā komforta novērtējums energoefektīvās ēkās	19
2.2. Sistēmdinamikas modelēšana	22
3. REZULTĀTI	28
3.1. Iekštelpu gaisa kvalitāte un termālais komforts energoefektīvās ēkās	28
3.2. Energoefektivitātes ieviešana valsts un pašvaldības iestāžu ēkās.....	34
3.3. Energoefektivitātes un iekštelpu gaisa kvalitātes dilemmas izglītības iestādēs ietekme uz iekšzemes kopproduktu.....	37
3.4. Izglītības iestāde kā ražojošs patērētājs	39
SECINĀJUMI	42
LITERATŪRAS SARAKSTS	44

Promocijas darbā izmantotie zinātniskie raksti

- 1. publikācija** – L. Asere un A. Blumberga. Government and municipality owned building energy efficiency system dynamics modelling (2015) *Energy Procedia*, 72, 180–187.
- 2. publikācija** – L. Asere, T. Mols un A. Blumberga. Assessment of energy efficiency measures on indoor air quality and microclimate in buildings of Liepāja municipality (2016) *Energy Procedia*, 95, 37–42.
- 3. publikācija** – L. Asere, T. Mols un A. Blumberga. Assessment of indoor air quality in renovated buildings of Liepāja municipality (2016) *Energy Procedia*, 91, 907–915.
- 4. publikācija** – L. Asere un A. Blumberga. Energy efficiency – indoor air quality dilemma in public buildings (2018) *Energy Procedia*, 147, 445–451.
- 5. publikācija** – L. Asere un A. Blumberga. Does energy efficiency – indoor air quality dilemma have impact on the gross domestic product? (2020) *Journal of Environmental Management*, 262. ISSN: 03014797.
- 6. publikācija** – L. Asere un A. Blumberga. Energy Efficiency – Indoor Air Quality Dilemma in Educational Buildings: A Possible Solution.(2020) *Environmental and Climate Technologies*, 24(1), 357–367.

IEVADS

Aktualitāte

Vislielākais enerģijas patērētājs Eiropā ir ēku sektors, kas izmanto aptuveni 40 % no kopējā enerģijas patēriņa un rada aptuveni 36 % no kopējām CO₂ emisijām Eiropas Savienībā [1], [2]. Enerģijas patēriņa tendences pasaulē liecina par pieaugumu, ko izraisa iedzīvotāju prasības pēc paaugstināta komforta, plašāks elektroiekārtu lietojums un citi iemesli. Pieaugot enerģijas patēriņam, tiek veicinātas klimata pārmaiņas. Ir vairākas jomas, kur būtu iespējams izmantot enerģiju efektīvāk, samazināt patēriņu, tā rezultātā samazinot siltumnīcefekta gāzu emisijas. Lai Eiropas Savienība 2050. gadā sasniegtu oglekļa neitralitāti, ir definēti ambiciozi mērķi – par 41 % uzlabot energoefektivitāti, izmantot 100 % atjaunīgo energoresursu un samazināt siltumnīcefekta gāzu emisijas par 80 % līdz 100 % [1], [3], [4].

Energoefektīvas ēkas palīdz samazināt siltumenerģijas patēriņu. Valstij un pašvaldībām ir jārada priekšzīme, uzlabojot sev piederošo ēku energoefektivitāti, lai arī citās ēkās notiktu pārmaiņas. Turklāt energoefektivitātes pasākumu ieviešana publiskajam sektoram piederošajās ēkās veicina nacionālo klimata politikas mērķu sasniegšanu.

Izglītības iestāžu ēku telpās ir augsts skolēnu blīvums, kuri elpojot izdala ogļskābo gāzi. Senāk skolās varēja nodrošināt apmierinošu gaisa kvalitāti, izmantojot dabisko ventilāciju. Ēkās bija ierīkoti atvērti ventilācijas kanāli, un gaisa cirkulācija notika bez mehāniskas palīdzības āra un iekštelpu spiedienu starpības rezultātā. Ja āra gaisa spiediens ir zemāks nekā telpās, tad notiek dabīga gaisa apmaiņa, siltajam gaisam izplūstot pa atklātiem ventilācijas kanāliem. Laika gaitā ir radusies taureņa efekta līdzīga sakarība – veicot energoefektivitātes pasākumus, piemēram, logu maiņu pret jaunākiem un blīvākiem, ir samazinājies dabīgās infiltrācijas ceļā iegūta svaigā gaisa pieplūdes apjoms. Tādejādi, lai nodrošinātu labu iekštelpu gaisa kvalitāti, ir nepieciešama piespiedu ventilācijas izbūve un ekspluatācija.

Cilvēka termālais komforts norāda, cik viņi ir apmierināti ar telpas mikroklimatu. Nejūtoties komfortabli attiecīgajā mikroklimatā, rodas gan rakstīšanas, gan domāšanas uzdevumu veikspējas problēmas. Paaugstinot gaisa pieplūdi telpā, ir iespējams paaugstināt veikspēju. Nodrošinot pēfīto izglītības iestāžu ēku mācību telpās zemāko nepieciešamo ventilācijas ražību atbilstoši Latvijas normatīvajiem aktiem, ir iespējams uzlabot veikspēju. Tomēr ir jāreķinās ar ekspluatācijas izmaksām, un tas ir iemesls, kāpēc ventilācijas sistēmas netiek izmantotas.

Uzlabojot ēku energoefektivitāti, tiek ietaupīts finansējums. Tas ir nepieciešams arī, lai nodrošinātu iekštelpu gaisa kvalitāti siltinātās ēkās. Šie divi faktori rada ēku energoefektivitātes un iekštelpu gaisa kvalitātes dilemmu.

Izglītības iestāžu ēkām ir jābūt veidotām pēc ilgtspējas principa. Nākotnes speciālisti šajās būvēs pavada lielāko daļu laika, tāpēc veikt dažādus vides uzlabojumus ir īpaši svarīgi. Vislabākais risinājums ir palielināt energoefektivitāti, vienlaikus nodrošinot labu iekštelpu gaisa kvalitāti, darbinot mehānisko ventilāciju, jo iekšzemes kopprodukta pieaugums nodrošina finanšu avotus turpmākiem energoefektivitātes pasākumiem.

Izglītības iestāžu ēkas pārbūvējot par ražojošiem patērētājiem, var samazināt siltumnīcefekta gāzu emisijas, nodrošināt atjaunojamo energoresursu patēriņu, kā arī veicināt

energoefektivitāti tā, lai vienlaikus tiktu nodrošināta augsta iekštelpu gaisa kvalitāte. Jāņem vērā izglītības iestāžu enerģijas patēriņa dinamika.

Darba mērķis un uzdevumi

Darba mērķis ir veikt energoefektivitātes un iekštelpu gaisa kvalitātes dilemmas novērtējumu izglītības iestāžu ēkās, tās ietekmes analīzi uz nacionālo labklājību un piedāvāt risinājumus dilemmas novēršanai.

Lai sasniegtu mērķi, tika definēti šādi uzdevumi:

- 1) novērtēt iekštelpu gaisa kvalitāti un mikroklimatu pašvaldību izglītības iestādēs, kurās veikti energoefektivitātes pasākumi;
- 2) novērtēt pašvaldības izglītības iestāžu, kurās veikti energoefektivitātes pasākumi, iekštelpu gaisa kvalitātes un mikroklimata ietekmi uz telpu apmeklētāju veiktspēju;
- 3) analizēt valsts un pašvaldību īpašumā esošo ēku fondu un energoefektivitātes paaugstināšanas dinamiku, t. sk. ietekmi uz siltumnīcefektu izraisošo gāzu izmešu samazināšanu un iekštelpu gaisa kvalitāti;
- 4) analizēt iekštelpu gaisa kvalitātes ietekmi uz valsts iekšzemes kopproduktu un siltumnīcefektu izraisošo gāzu izmešu samazināšanu;
- 5) izstrādāt risinājumu, kā samazināt ēku energoefektivitātes un iekštelpu gaisa kvalitātes dilemmu izglītības iestādēs.

Izvirzītās hipotēzes

1. hipotēze. Energoefektivitātes pasākumu ieviešana valstij un pašvaldībām piederošajās ēkās nodrošina nacionālo klimata politikas mērķu sasniegšanu.

2. hipotēze. Pēc energoefektivitātes pasākumu ieviešanas izglītības iestādēs veidojas energoefektivitātes un iekštelpu gaisa kvalitātes dilemma.

3. hipotēze. Energoefektivitātes un iekštelpu gaisa kvalitātes dilemmai ir ilgtermiņa ietekme uz valsts iekšzemes kopproduktu.

4. hipotēze. Energoefektivitātes un iekštelpu gaisa kvalitātes dilemmu var atrisināt, ēkām kļūstot par enerģiju ražojošiem patērētājiem, izmantojot atjaunīgos energoresursus.

Iepriekšminētās hipotēzes tika pētītas ar dažādām zinātniskās izpētes metodēm, kas sīkāk atspoguļotas zinātniskajās publikācijās.

1. hipotēze

1. Zinātniskās literatūras un normatīvo aktu analīze.
2. Datu par īstenotajiem energoefektivitātes projektiem vākšana un analīze.
3. Sistēmdinamikas modeļa izveide valsts un pašvaldību ēku energoefektivitātes vērtēšanai.
4. Politikas pasākumu simulācija sistēmdinamikas modelī.

Izmantotās izpētes metodes un iegūtie rezultāti ir aprakstīti vairākās publikācijās.

1. publikācija – L. Asere un A. Blumberga. Government and municipality owned building energy efficiency system dynamics modelling (2015) *Energy Procedia*, 72, 180–187. Pētījumā ir izstrādāts sistēmdinamikas modelis energoefektivitātes pasākumu ieviešanai valsts un pašvaldību ēkās, un ar tā palīdzību veikta politikas instrumentu un iespējamo finanšu avotu ietekmes analīze. Ar modeļa palīdzību tiek simulētas kopējās siltinātās platības izmaiņas un to ietekme uz siltumnīcefekta gāzu samazinājumu.

4. publikācija – L. Asere un A. Blumberga. Energy efficiency – indoor air quality dilemma in public buildings (2018) *Energy Procedia*, 147, 445–451. Pētījumā ir papildināts 1. publikācijā izstrādātais sistēmdinamikas modelis, iedalot kopējo sabiedrisko ēku krājumu četros apakšmoduļos, pamatojoties uz būvniecības periodiem. Katram no tiem aprēķinātais energoefektivitātes pasākumu rentabilitātes koeficients raksturo siltināšanas tempa dinamiku. Papildus tam modelī ir iebūvēts modulis, kas paredz, ka, veicot energoefektivitātes uzlabošanas pasākumus, tiek ieviesta ventilācijas sistēma. Ar modeļa palīdzību tiek simulētas kopējās siltinātās platības izmaiņas un to ietekme uz siltumnīcefekta gāzu samazinājumu.

2. hipotēze

1. Zinātniskās literatūras un normatīvo aktu analīze.
2. Iekštelpu klimata mērījumi izglītības iestādēs.
3. Gaisa apmaiņas kārtas noteikšana ar marķiergāzes metodi.
4. Ēkas hermētiskuma noteikšana ar ēkas blīvuma pārspiediena testu.
5. Aptaujas un intervijas izglītības iestādēs.
6. Paredzamā vidējā balsojuma aprēķini.

Izmantotās metodes un iegūtie rezultāti ir publicēti vairākās publikācijās.

2. publikācija – L. Asere, T. Mols un A. Blumberga. Assessment of energy efficiency measures on indoor air quality and microclimate in buildings of Liepāja municipality (2016) *Energy Procedia*, 95, 37–42. Pētījumā tika veikti mikroklimata un CO₂ mērījumi Liepājas izglītības iestādēs pēc energoefektivitātes pasākumu veikšanas. Lai noteiktu gaisa apmaiņas kārtu, tika izmantota marķiergāzes metode. Lai noteiktu ēkas hermētiskumu, tika veikts ēkas blīvuma pārspiediena tests.

3. publikācija – L. Asere, T. Mols un A. Blumberga. Assessment of indoor air quality in renovated buildings of Liepāja municipality (2016) *Energy Procedia*, 91, 907–915. Pētījumā veiktas intervijas ar Liepājas izglītības iestāžu atbildīgajām personām, lai iegūtu informāciju par ēkām, t. sk. ēku veidu, kopējo platību, veiktajiem energoefektivitātes pasākumiem un ventilācijas sistēmu darbību. Papildus tam tika aptaujāti telpu lietotāji konkrētās telpās, lai uzzinātu viņu subjektīvo viedokli par iekštelpu mikroklimatu konkrētajā brīdī. Pētījumā veikts paredzamā vidējā balsojuma aprēķins, kas ļauj salīdzināt teorētiskos komforta līmeņa parametrus ar cilvēka subjektīvajām izjūtām.

3. hipotēze

1. Zinātniskās literatūras un normatīvo aktu analīze.
2. Aptaujas un intervijas izglītības iestādēs.
3. Paredzamā vidējā balsojuma aprēķini.
4. Veiktspējas zuduma aprēķini.
5. Veiktspējas izmaiņu ekonomiskās ietekmes un izmaksu un ieguvumu analīze.
6. Izglītības iestāžu ēku siltināšanas sistēmdinamikas modelis.

Izmantotās izpētes metodes un iegūtie rezultāti ir aprakstīti vairākās publikācijās.

3. publikācija – L. Asere, T. Mols un A. Blumberga. Assessment of indoor air quality in renovated buildings of Liepāja municipality (2016) *Energy Procedia*, 91, 907–915. Pētījumā tika intervēti telpu lietotāji, lai uzzinātu viņu subjektīvo viedokli par iekštelpu mikroklimatu konkrētajā brīdī. Datu analīzei tika izmantots produktivitātes zuduma modelis, lai noteiktu, kā pētījumā iekļauto ēku mikroklimata apstākļi ietekmē garīgo darbu un veiktspēju. Pētījumā aprēķināts relatīvais produktivitātes uzlabojums telpā ar svaiga gaisa pieplūdi, kā arī modelēti četri ventilācijas ātruma scenāriji. Veiktspējas izmaiņu ekonomiskās ietekmes un izmaksu un ieguvumu analīzei izmantota ventilācijas ražības metode.

5. publikācija – L. Asere un A. Blumberga. Does energy efficiency – indoor air quality dilemma have impact on the gross domestic product? (2020) *Journal of Environmental Management*, 262. ISSN: 03014797. Pētījumā izstrādāts sistēmdinamikas modelis, ar kura palīdzību analizēta energoefektivitātes un iekštelpu gaisa kvalitātes dilemmas ietekme uz iekšzemes kopproduktu. Modelī simulēts skolēnu akadēmiskais sniegums, studiju un darba ceļš un tā ietekme uz atalgojuma daļu iekšzemes kopproduktā. Pētījumā izmantoti dati par Latvijas izglītības sistēmu. Dažādi modelēšanas scenāriji rada izpratni par energoefektivitātes pasākumu ieviešanas un ventilācijas sistēmu darbības ietekmi uz siltumnīcefekta gāzu samazinājumu un kopējās algu daļas dinamiku iekšzemes kopproduktā.

4. hipotēze

1. Zinātniskās literatūras un normatīvo aktu analīze.
2. Ekonomiski pamatotākā risinājuma analīze izglītības iestādes ēkas pārejai uz ražojošu patērētāju.

Izmantotās izpētes metodes un iegūtie rezultāti ir aprakstīti vienā publikācijā.

6. publikācija – L. Asere un A. Blumberga. Energy Efficiency – Indoor Air Quality Dilemma in Educational Buildings: A Possible Solution.(2020) *Environmental and Climate Technologies*, 24 (1), 357–367. Veiktais pētījums par vienu tipisku skolas ēku Latvijā ļauj analizēt scenārijus izglītības iestādes ēkas pārejai uz ražojošu patērētāju un iespējamo ēku energoefektivitātes un iekštelpu gaisa kvalitātes dilemmas risinājumu. Pētījumā izstrādāti dažādi saules paneļu un koksnes granulatu katlu risinājumi, lai atrastu labāko un ekonomiski pamatotāko risinājumu izglītības iestādes ēkas pārejai uz ražojošu patērētāju.

Darba zinātniskā novitāte

Darbā veikti iekštelpu gaisa kvalitātes un klimata mērījumi reālās izglītības iestādēs, kurās ieviesti energoefektivitātes pasākumi, lai novērtētu energoefektivitātes un iekštelpu gaisa kvalitātes dilemmu un sniegtu ieskatu šīs problēmas cēloņsakarībās. Balstoties uz šiem mērījumiem, kā arī uz telpu apmeklētāju un apsaimniekotāju intervijām, darbā izstrādāts sistēmdinamikas modelis ar vairākiem moduļiem, ar kuru palīdzību iespējams novērtēt energoefektivitātes un iekštelpu gaisa kvalitātes dilemmu izglītības iestādēs un tās ietekmi uz valsts klimata mērķu sasniegšanu un valsts ilgtermiņa labklājību. Līdz šim zinātniskajā periodikā nav atrastas publikācijas par šādu modelēšanas rīku. Ar izstrādātā simulācijas modeļa palīdzību iespējams veikt tādas uzvedības cēloņsakarību analīzi, ko ģenerē kompleksa, nelineāra sistēma ar kavējumiem. Modeļa struktūrā ir iekļauti četri atšķirīgi publiskā sektora ēku fondi, būvniecības uzņēmumu tirgus un tā mijiedarbība ar energoefektivitātes pasākumiem caur siltināšanās izmaksām, dažādi ventilācijas sistēmu veidi, izglītības sistēmas līmeņi no pirmsskolas līdz augstskolai, skolēnu un studentu veiktspēja, algu veidošanās darba tirgū atkarībā no vērtējuma skolā vai augstskolā, iekšzemes kopprodukts un siltumnīcefekta gāzes. Modeļa struktūra ir papildināta ar dažādiem politikas instrumentiem, ar kuru palīdzību ir iespējams mainīt modeļa uzvedību. Izstrādātais simulācijas modelis ir universāls, to var izmantot citās pasaules valstīs un reģionos, lai analizētu dilemmu. Meklējot risinājumu dilemmai, darbā veikta izmaksu un ieguvumu analīze ražojošam patērētājam, un tā sniedz ieskatu, pie kādiem nosacījumiem ražojošs enerģijas patērētājs var kļūt par tās risinājumu, vienlaikus samazinot ietekmi uz klimatu, bet nesamazinot valsts labklājību.

Darba praktiskais lietojums

Darbā iegūtie mērījumu un interviju rezultāti ir būtiski politiku veidotājiem ne tikai valsts, bet arī pašvaldību līmenī. Tie parāda, kā cieši kopā savijas un mijiedarbojas dažādu nozaru politikas, t. sk. klimata, finanšu, sociālā, izglītības un veselības, atstājot ne tikai īstermiņa, bet arī ilgtermiņa sekas uz visiem valsts iedzīvotājiem. Darbā izstrādātais modelis ir praktiski lietojams rīks politikas plānotājiem, lai izvērtētu dažādu politikas instrumentu ietekmi uz dažādiem valsts un pašvaldības politiku aspektiem. Tas ļauj ēku īpašniekiem un apsaimniekotājiem novērtēt videi draudzīgu tehnoloģiju izmantošanas iespējas gan vides, gan finansiālajā aspektā.

Zinātniskā darba aprobācija

Zinātniskās publikācijas par tēmu

1. L. Asere un A. Blumberga. Energy Efficiency – Indoor Air Quality Dilemma in Educational Buildings: A Possible Solution (2020) *Environmental and Climate Technologies*, 24(1), 357–367.
2. L. Asere un A. Blumberga. Does energy efficiency – indoor air quality dilemma have impact on the gross domestic product? (2020) *Journal of Environmental Management*, 262. ISSN: 03014797.

3. L. Asere un A. Blumberga. Energy efficiency – indoor air quality dilemma in public buildings (2018) *Energy Procedia*, 147, 445–451.
4. L. Asere, T. Mols un A. Blumberga. Assessment of energy efficiency measures on indoor air quality and microclimate in buildings of Liepāja municipality (2016) *Energy Procedia*, 95, 37–42.
5. L. Asere, T. Mols un A. Blumberga. Assessment of indoor air quality in renovated buildings of Liepāja municipality (2016) *Energy Procedia*, 91, 907–915.
6. L. Asere un A. Blumberga. Government and municipality owned building energy efficiency system dynamics modelling (2015) *Energy Procedia*, 72, 180–187.

Promocijas darba rezultāti prezentēti sešās starptautiskajās zinātniskajās konferencēs

1. Starptautiskajā zinātniskajā konferencē “Vides un klimata tehnoloģijas”, CONECT, 2020, Rīga, Latvija.
2. Starptautiskajā zinātniskajā konferencē par vides un klimata tehnoloģijām, CONECT, 2019, Rīga, Latvija.
3. Starptautiskajā zinātniskajā konferencē par vides un klimata tehnoloģijām, CONECT, 2018, Rīga, Latvija.
4. Starptautiskajā zinātniskajā konferencē “Vides un klimata tehnoloģijas”, CONECT, 2015, Rīga, Latvija.
5. Starptautiskajā zinātniskajā konferencē “Saules apsilde un dzesēšana ēkās un industrijā” (*The Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry conference*), 2015, Stambula, Turcija.
6. Starptautiskajā zinātniskajā konferencē par vides un klimata tehnoloģijām, CONECT, 2014, Rīga, Latvija.

Darba struktūra un apjoms

Promocijas darba pamatā ir sešas tematiski vienotas zinātniskās publikācijas. Šīs publikācijas ir prezentētas un pētījumu rezultāti aprobēti vairākās starptautiskajās konferencēs, kā arī tās ir pieejams zinātniskajās informācijas krātuvēs un ietvertas starptautiskajās datubāzēs. Promocijas darbs rakstīts latviešu valodā, tā struktūra ir parādīta 1. attēlā. Darba pamatā ir četras galvenās tēmas.

1. Ēku energoefektivitāte.
Lai arī energoefektivitātes pasākumu ieviešana publiskajam sektoram piederošajās ēkās palīdz samazināt siltumenerģijas patēriņu un veicina nacionālo klimata politikas mērķu sasniegšanu, tomēr tā rada nepieciešamību pēc piespiedu ventilācijas izbūves un ekspluatācijas, un tas ir cēlonis energoefektivitātes un iekštelpu gaisa kvalitātes dilemmai. Pētījumi par energoefektivitātes ieviešanu valsts un pašvaldību iestāžu ēkās atspoguļoti 1. un 4. publikācijā.
2. Iekštelpu mikroklimats un termālais komforts energoefektīvās ēkās.
Tika veikts iekštelpu gaisa kvalitātes un termālā komforta novērtējums ēkās, kurās ieviesti energoefektivitātes pasākumi, izmantojot mērījumus telpās un telpu apmeklētāju

intervēšanu. Šī pētījumu tēma raksturo ēku energoefektivitātes un iekštelpu gaisa kvalitātes dilemmas konstatēšanu, kas ir atspoguļots 2. un 3. publikācijā.

3. Valsts iekšzemes kopprodukts.

Šī tēma raksturo, kā energoefektivitātes un iekštelpu gaisa kvalitātes dilemma ilgtermiņā ietekmē valsts iekšzemes kopproduktu. Izglītības iestāžu iekštelpu gaisa kvalitātes ietekme uz cilvēku veiktspēju ir apskatīta 3. publikācijā, savukārt 5. publikācijā ir atspoguļoti dažādi scenāriji, kā iekštelpu gaisa kvalitāte ietekmē iekšzemes kopproduktu.

4. Ražojoši patērētāji.

Izglītības iestāžu ēkas pārbūvējot par ražojošiem patērētājiem, var samazināt siltumnīcefekta gāzu emisijas, nodrošinot atjaunojamo energoresursu patēriņu, kā arī veicināt energoefektivitāti tā, lai vienlaikus tiktu nodrošināta augsta iekštelpu gaisa kvalitāte. Pētījums ir atspoguļots 6. publikācijā.

Promocijas darba struktūra					Satura			
Publikācijas	1. Hipotēze	2. Hipotēze	3. Hipotēze	4. Hipotēze	Ievads			
					Literatūras apskats			
					Metodika			
					Rezultāti			
					Ēku energoefektivitāte	Iekštelpu gaisa kvalitāte un termālais komforts energoefektīvās ēkās	Valsts iekšzemes kopprodukts	Ražojoši patērētāji
					Cēlonis	Konstatēšana	Ietekme uz IKP	Piedāvātais risinājums
1.								
2.								
3.								
4.								
5.								
6.								
					Secinājumi			

1. att. Promocijas darba struktūra.

Promocijas darbā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi un izmantotās literatūras saraksts. Promocijas darba ievadā definēts darba mērķis un tā īstenošanai veicamie uzdevumi, aprakstīta pētījuma zinātniskā un praktiskā nozīme. Pirmajā nodaļā sniegts literatūras apskats par pētāmajām tēmām. Otrajā nodaļā izklāstītas pētījumu metodes, kas saistītas ar ēku energoefektivitātes un iekštelpu gaisa kvalitātes dilemmas rašanās cēloni, konstatēšanu, ietekmi uz iekšzemes kopproduktu un risinājuma ekonomiskās pamatotības analīzi. Trešajā nodaļā apskatīti pētījumu rezultāti. Promocijas darba noslēgumā apkopoti gūtie secinājumi atbilstoši izvirzītajām hipotēzēm. Promocijas darba literatūras sarakstā ir 95 nosaukumi.

1. LITERATŪRAS APSKATS

1.1. Ēku energoefektivitātes un iekštelpu gaisa kvalitātes dilemma

Ēku sektors šobrīd Eiropas Savienībā patērē gandrīz 40 % no visas energobilances, tāpēc tam ir vislielākais energoefektivitātes potenciāls. Lielākā daļa ēku ir būvētas laikā, kad enerģijas taupīšana nebija aktuāla, ņemot vērā energoresursu salīdzinoši zemās cenas un tradicionālās būvniecības metodes. Vairums no šīm ēkām tiks ekspluatētas vēl ievērojamu laika periodu, un enerģētikas stratēģijas apskatītajā laika periodā nav paredzams, ka notiks esošo ēku intensīva nomaiņa, būvējot jaunas [5]. Mūsdienās šo ēku pakāpeniska atjaunošana ir viena no nozīmīgākajām energoefektivitātes politikas jomām. Saskaņā ar Latvijas Enerģētikas attīstības pamatnostādņēm 2007.–2016. gadam kopējais enerģijas patēriņa samazinājuma mērķis līdz 2016. gadam sabiedriskajā sektorā bija 408 GWh, līdz 2020. gadam – 657 GWh, kas ir otrs lielākais mērķis pēc mājtsaimniecību sektora [6]. Pasaulē ēku energoefektivitāte ir viena no galvenajām pieejām, lai sasniegtu ilgtspēju ēku sektorā, ar pietiekami zemiem līdzekļiem nodrošinot maksimālu efektivitāti.

Energoefektivitātes pasākumi lielā vai mazā pašvaldībā sniedz iespēju risināt tehniskos, ekonomiskos, sociālekonomiskos, vides un klimata jautājumus. Tā ir aktivitāte, ko īstenojot, ieguvēji ir visi:

- valsts budžets – mazāk tērējot importētos energoresursus, mazāk finanšu līdzekļu aizplūst ārpus valsts;
- pašvaldību budžets – mazāk maksājot par enerģiju, vairāk finanšu līdzekļu paliek pašvaldības attīstībai;
- sabiedrība – ilgtspējīga energosektora attīstība nodrošina sakārtotu vidi;
- vide – mazāks vides piesārņojums no emisijām gaisā, ūdenī un augsnē;
- katrs enerģijas lietotājs atsevišķi – enerģijas patēriņa samazinājums dod iespēju enerģijas patērētājam ietaupītos līdzekļus izmantot citur;
- globālo klimata pārmaiņu samazinājums tiek iegūts, mazāk dedzinot fosilo kurināmo katlu māju kurtuvēs.

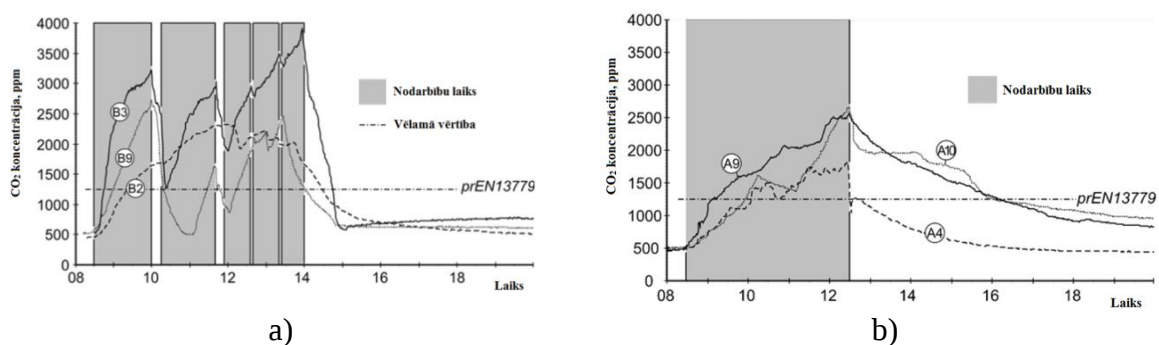
Viena no Eiropas Savienības prioritātēm ir mazināt ietekmi uz klimata pārmaiņām, tāpēc dalībvalstīs tiek veicināta energoefektivitātes pasākumu ieviešana, atjaunīgo energoresursu izmantošana un samazināta primāro energoresursu izmantošana. Valsts enerģētikas pamatnostādnes paredzēja no 2007. gada līdz 2016. gadam sasniegt īpatnējā siltumenerģijas patēriņa samazinājumu līdz 195 kWh/m² gadā. Turpinot energoefektivitāti uzlabojošos pasākumus, līdz 2020. gadam sasniegt 150 kWh/m² gadā. Nacionālais enerģētikas un klimata plāns 2021.–2030. gadam paredz 2030. gadā šo lielumu samazināt līdz 120 kWh/m² gadā.

Valsts un pašvaldības ēkām ir jārada piemērs mājtsaimniecībām un jāveicina energoefektivitātes pasākumu veikšana atbilstoši ES direktīvai par ēku energoefektivitāti. Tajā tika noteikts īpašs mērķis – sākot no 2014. gada, katru gadu jārenovē 3 % no centrālās valdības īpašumā un lietošanā esošo ēku kopējās platības, lai izpildītu vismaz minimālās energoefektivitātes prasības.

Iekštelpu gaisa kvalitāte un siltuma komforts ir svarīgi faktori augstas kvalitātes ēkas projektēšanā, esošo ēku plānošanā un atjaunošanā. Kamendere u. c. [7] ir veikuši pētījumu par energoefektivitāti divās dzīvojamajās ēkās, ilustrējot ventilācijas sistēmas problēmu iekštelpu gaisa kvalitātes aspektā. Biežāk vēlme nodrošināt optimālus, komfortablus iekštelpu gaisa klimata apstākļus ir pretrunā ar mērķi samazināt enerģijas patēriņu. Izglītības iestādēm un biroju ēkām, kur ir salīdzinoši augstāks cilvēku blīvums telpās nekā dzīvojamās ēkās, ir izaicinājums nodrošināt labus iekštelpu klimata apstākļus. Skolēni izglītības iestāžu telpās uzturas aptuveni 25 % no savas ikdienas, tādējādi lielu daļu savas jaunības pavadot šādos apstākļos. Ir īpaši svarīgi, lai telpās tiktu nodrošināti tādi apstākļi, kas neietekmēs skolēnu un darbinieku komfortu, veselību, garīgās spējas un iespējas attīstīties. Tādējādi izglītības iestāžu ēkās ir pienākums nodrošināt optimālus termālā komforta un gaisa kvalitātes apstākļus [8], [9], [10].

Energoefektīvās ēkās, izmantojot tikai dabīgo ventilāciju, ļoti retos gadījumos ir iespējama pienācīga gaisa apmaiņa, lai nodrošinātu atbilstošu gaisa kvalitāti un termālā komforta apstākļus. Šajās ēkās ir nepieciešamas ventilācijas iekārtas ar sildīšanas un dzesēšanas elementiem. Gada siltajā laikā ir jānovada saules starojums un iekšējo avotu veidotais siltums. Āra temperatūrai pārsniedzot nepieciešamo telpas temperatūru, jāizmanto dzesēšanas sistēmas, savukārt, ja temperatūra ir zemāka, tad termālā komforta apstākļi ir salīdzinoši vieglāk sasniedzami. Apkures sistēmai ir jāspēj reaģēt uz iekšējo siltuma avotu saražoto siltumu, lai nepieciešamības gadījumā varētu regulēt telpas apsildei nepieciešamo enerģijas daudzumu. Ēkās, kur tiek manuāli regulēta ventilācija, ir augstāki siltumenerģijas zudumi. Apkures sezonā ir nepieciešama rūpīga kontrole, lai samazinātu zudumus [9].

Piemēram, pētījums Grieķijas aukstā klimata zonas pirmsskolas izglītības iestādēs un pamatskolās parāda energoefektivitātes un iekštelpu gaisa kvalitātes izaicinājumus, piemēram, gaisa apmaiņa tiek nodrošināta, atverot logus, gaisa apmaiņas iekārtas bieži tiek darbinātas manuāli, tām trūkst kontrolētas vadības, un tas izraisa paaugstinātu CO₂ līmeni telpās (1.1. att.) [10]–[12]. Cilvēki, kuri ilgstoši uzturas šajās telpās, intervijās sūdzas par iekštelpu klimatu [10].



1.1. att. CO₂ koncentrācijas līmeņi a) pamatskolās nodarbību laikā un b) bērnudārzos [10].

Termālā komforta, iekštelpu gaisa kvalitātes un energoefektivitātes nodrošināšana ēkās ir uzskatāma par dilemmu, jo energoefektivitātes, termālā komforta un iekštelpu gaisa kvalitātei ir rodams pozitīvs risinājums, piemēram, pētījums Ziemeļitālijā rāda, ka, ja ēkai tiek siltināta fasāde un mainīti logi, bet netiek ierīkota mehāniskā ventilācija, tiek iegūts ietaupījums, tomēr

šādi nav iespējams sasniegt komfortablus apstākļus. Ir nepieciešami lieli sākotnējie kapitālieguldījumi, kā arī līdzekļi ekspluatācijas izdevumu segšanai [13].

1.2. Iekštelpu gaisa kvalitāte un termālais komforts energoefektīvās ēkās

Liela daļa Latvijas izglītības iestāžu ēku ir būvētas no 1940. līdz 1992. gadam atbilstoši bijušās Padomju Savienības būvnormatīviem. Šajā laika posmā svaiga gaisa pieplūde tika paredzēta dabīgās ventilācijas veidā, izmantojot ēku logu spraugas, un noplūde – ventilācijas atverēs. Mācību stundu starplaikos nepieciešamības gadījumā tika atvērti logi, lai izvēdinātu telpas. Šādi tika nodrošināta gaisa apmaiņa, un tolaik tika uzskatīts, ka tā ir pietiekama.

Veicot visvienkāršākos ēku energoefektivitātes pasākumus, tiek siltināta ēkas fasāde un ēku logi nomainīti uz plastikāta logiem, kas ievērojami samazina svaiga gaisa pieplūdi. Šī situācija rada risku gaisa kvalitātei un var būt cēlonis iekštelpu mikroklimata problēmām [14].

Iekštelpu gaisa kvalitāte

Cilvēku izelpā ir oglekļa dioksīds, tāpēc telpās CO₂ koncentrācija ir lielāka nekā ārā. Šī iemesla dēļ ēkās ir jāierīko ventilācijas sistēmas nevēlamo vielu un smaku novadīšanai un svaiga gaisa pieplūdei. Ventilācijas ražībai jāatbilst telpas piesārņojuma avotiem. Gaisa kvalitāti var izteikt ar vēlamo ventilācijas līmeni vai CO₂ koncentrācijas līmeni.

CO₂ koncentrācijai pieaugot, tā var ietekmēt cilvēka pašsajūtu. Cilvēks sāk just miegainību, sagurumu, ja koncentrācija ir no 1000 ppm līdz 2500 ppm. Ja koncentrācija ir robežās no 2500 ppm līdz 5000 ppm, tas sāk nelabvēlīgi ietekmēt veselību – vērojama sirdsdarbības un elpošanas paātrināšanās, intoksikācijas pazīmes. Sasniedzot jau ievērojami lielākas CO₂ koncentrācijas vērtības – ap 30 000 ppm, jūtamas stipras galvassāpes un nelabums. Ap 50 000 ppm cilvēks zaudē samaņu, un 100 000 ppm vidē iespējams pat letāls iznākums. ASHRAE vadlīnijās norādīts, ka cilvēkam nekaitīga iekštelpu vide ir tāda, kurā CO₂ koncentrācija ir 600–1000 ppm [15].

Fisk veiktais pārskats par gaisa apmaiņu un oglekļa dioksīda koncentrāciju skolās visā pasaulē [16] apstiprina apgalvojumu par CO₂ koncentrācijām, kas neatbilst prasībām. Šie mērījumi un pētījumu dati norāda uz plaši izplatītu nespēju nodrošināt minimālu ventilācijas daudzumu, kas klasēm noteikts standartos. CO₂ koncentrācija, kas bieži pārsniedz 1000 ppm, norāda, ka gaisa apmaiņa vairumā gadījumu ir daudz zemāka, nekā noteikts būvnormatīvos. Šie rezultāti sakrīt ar vairākiem pētījumiem (norādīti 5. publikācijā) par pārmērīga CO₂ līmeņa problēmu skolās. Var secināt, ka sabiedriskā sektora pārvaldība ir orientēta uz īstermiņa izdevumu optimizēšanu nevis labvēlīgas vides nodrošināšanu [17].

Termālais komforts

Darba vai mācību vide, kurā cilvēks pavada savu laiku, ietekmē cilvēka pašsajūtu – var uzlabot darba spējas vai tieši pretēji – radīt nepatiku un diskomfortu. Cilvēka individuālie un apkārtējās vides parametri nosaka cilvēka termālo komfortu [18].

Apmierinātības vidējais balsojums jeb *predicted mean vote (PMV)* indekss paredz vidējo vērtību lielas cilvēku grupas balsojumā pēc septiņu punktu skalas – Fanger modeļa. *PMV*

indeksu var aprēķināt dažādām aktivitātes līmeņu, apģērba, gaisa temperatūras, vidējās starojuma temperatūras, gaisa kustības ātruma un mitruma variācijām. Šo indeksu visbiežāk izmanto stabiliem apstākļiem, tomēr tas ir izmantojams arī mainīgos apstākļos, ja ir zināmi konkrētā brīža pārējo mērījumu parametri.

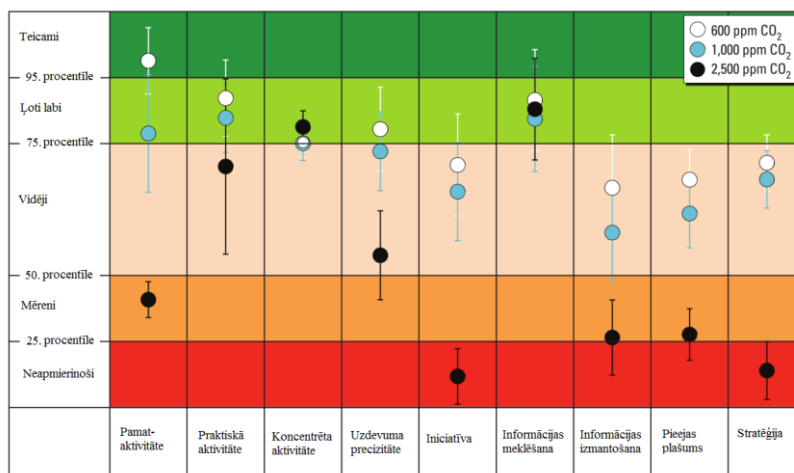
Neapmierinātības procents jeb *PPD* indekss norāda uz termāli neapmierināto cilvēku daļu pie konkrētas *PMV* indeksa vērtības. Neapmierinātību var izraisīt konkrētu ķermeņa daļu sasilšana vai atdzišana, ko sauc par lokālo diskomfortu. Ikdienā labi pazīstamas lokālā diskomforta formas ir vilkme vai caurvējš, kas rada nepatīkamas sajūtas un veselības problēmas. Vēl viens piemērs ir liela vertikālā temperatūru starpība starp ķermeņa augšdaļu un apakšdaļu, ko var izraisīt pārlietu auksta grīda vai siltuma starojums. Cilvēki ar zemu aktivitātes līmeni, piemēram, veicot fiziski vieglus darbus, daudz straujāk reaģē uz lokālā diskomforta izraisītājiem, jo to ķermenis ir tuvu termiskajam līdzsvaram [19], [20], [21].

Cilvēks vēlas uzturēties komfortablā vidē, tādēļ jau sen tiek strādāts, lai šādu vidi radītu. To var vērot būvniecības tradīcijās visā pasaulē no sendienām līdz šim brīdim. Viens no lielākajiem izaicinājumiem ēku būvniecībā un renovācijā ir līdzsvara meklēšana starp enerģijas patēriņu, iekštelpu gaisa kvalitāti un termālo komfortu. Apkures un ventilācijas sistēmu galvenais uzdevums ir sniegt cilvēkam apmierinātību ar vidi [22].

1.3. Pašsajūta, veikspēja un to ietekme uz nākotnes labklājību

Gaisa kvalitātes un termālā komforta ietekme uz veikspēju

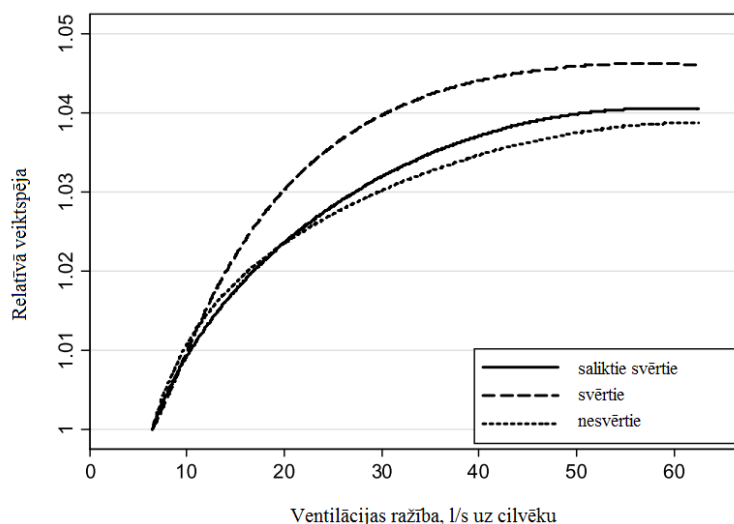
CO₂ ietekme uz cilvēka lēmumu pieņemšanas spējām tika apskatīta eksperimentā, kurā dalībnieki atradās birojā līdzīgos apstākļos un tika pakļauti trīs CO₂ līmeņiem – 600 ppm, 1000 ppm un 2500 ppm. Cilvēku grupas katrā no gaisa kvalitātes apstākļiem atradās 2,5 stundas, pēc tam tika veikts datorizēts lēmumu pieņemšanas tests, kā arī aizpildītas aptaujas par pašsajūtu. Paši dalībnieki netika informēti, kāda ir CO₂ koncentrācija telpā. Rezultātus veido deviņas kategorijas: pamataktivitāte; praktiskā aktivitāte; koncentrēta aktivitāte; uzdevuma precizitāte; iniciatīva; informācijas meklēšana; informācijas izmantošana; pieejas plašums un stratēģija [23].



1.2. att. CO₂ ietekme uz cilvēka lēmumu pieņemšanas spējām [23].

Var novērot, ka sešās kategorijās ir novērojamas daudz vājākas spējas, ja CO_2 koncentrācija ir 2500 ppm, un mazs uzlabojums, veicot koncentrētu aktivitāti (1.2. att.).

Ir izveidots modelis, lai prognozētu cilvēku veikspējas izmaiņas pie dažādām ventilācijas pakāpēm. To var izmantot dažādos gadījumos ar lielu cilvēku blīvumu, piemēram, skolās un bērnudārzos. Veikspējas atkarība no svaigā gaisa pieplūdes redzama 1.3. attēlā [24].



1.3. att. Relatīvās veikspējas atkarība no ventilācijas ražības [24].

Ir novērojama veikspējas uzlabošanās, svaiga gaisa pieplūdei pieaugot līdz 45 L/s. Pie noteikta pieplūdes gaisa daudzuma vairs netiek veicināta gaisa kvalitātes uzlabošana telpā, jo arī saņemtajam gaisam ir konkrēta piesārņojuma koncentrācija, tādējādi ir sasniegts optimālais CO_2 līmenis [24].

Zinātne un industrija nepārtraukti piedāvā jaunus un inovatīvus kondicionēšanas, ventilācijas un citus iekštelpu klimata kontroles risinājumus. Šie produkti palīdz nodrošināt cilvēkiem piemērotāku vidi, kas var pozitīvi ietekmēt cilvēka pašsajūtu, veselību un darba produktivitāti. Tomēr vēlme nodrošināt optimālus un ērtus klimatiskos apstākļus ir pretrunā ar mērķi samazināt enerģijas patēriņu [25].

Ietekme uz nākotnes labklājību

Sasniegumi studiju laikā korelē ar ienākumu līmeni pēc absolvēšanas. Pētījums Lielbritānijā parāda, ka, no politikas viedokļa, ir svarīgi izprast kvalifikāciju ietekmi darba tirgū. Rezultāti rāda, ka 1 % skolēnu, kuri pamet skolu 16 gadu vecumā bez jebkādas kvalifikācijas, to dara ar augstām ekonomiskām izmaksām sev un sabiedrībai, salīdzinot ar iespējamām prasmēm, kas tiktu iegūtas vēlākos gados. Pat nelieli vidējās izglītības sertifikātu uzlabojumi nodrošina lielāku finansiālo ieguvumu, tāpēc pastāv spēcīgs ekonomikas virzītājspēks, lai visi cilvēki sasniegtu savu izglītības potenciālu [26]. Itālijas zinātnieki secina, ka darbiniekiem ar augstāko izglītību ir straujāks pieredzes un ienākumu kāpums nekā darbiniekiem ar vidusskolas vai zemāku izglītību. Pētījumi parādīja, ka izglītība piedāvā ne tikai sākotnējās darba tirgus, bet arī pastāvīgas priekšrocības, kas laika gaitā darba tirgū palielinās [27]. Arī Ekonomiskās sadarbības un attīstības organizācija (OECD) savā ziņojumā

par Baltijas valstīm ir norādījusi uz labāku ienākumu pieaugumu izglītotiem darbiniekiem [28]. Akadēmiskais sniegums pamatskolā vai vidusskolā ir svarīgs īstermiņa mērķis, piemēram, lai veiksmīgi iestātos koledžā vai universitātē. Pētījumā ASV tiek skaidri parādīta saikne starp vidusskolas vidējo novērtējumu un darba tirgus izpeļņu daudzus gadus vēlāk. Pieaugums par vienu punktu vidusskolas vidējā novērtējumā (*GPA*) paaugstina gada izpeļņu pieaugušā vecumā par aptuveni 12 % vīriešiem un 14 % sievietēm. Pētījumi norāda, ka cilvēki ar labākām sekmēm turpinās studijas arī pēc vidusskolas absolvēšanas. Pētījuma rezultāti apstiprina, ka vidusskolas vidējais novērtējums ir nozīmīgs, prognozējot turpmākās izglītības iegūšanas iespējas un nākotnes izpeļņu [29].

Izglītotu personu ienākumi un pievienotā vērtība, ko tie sniedz valsts ekonomikai, ietekmē iekšzemes kopproduktu, tādējādi katrai valstij ir jāpievērš uzmanība visu izglītības sistēmas līmeņu kvalitātei. Pasaules Bankas cilvēkkapitāla indekss mēra sekas, ko rada novārtā atstātās investīcijas cilvēkkapitālā nākamās paaudzes zaudētās produktivitātes izteiksmē. Analīze liecina, ka valstīs ar zemākām cilvēkkapitāla investīcijām darbaspēka produktivitāte būs par pusi vai divām trešdaļām zemāka, nekā tā varētu būt, ja cilvēki būtu pilnībā veseli un saņēmuši augstākas kvalitātes izglītību [30].

1.4. Ražojši patērētāji

Ventilācijas un kondicionēšanas sistēmas var izmantot enerģiju, ko sniedz saules starojumus, tādējādi palielinot atjaunīgo resursu izmantošanu un kompensējot izmaksas. Šipkovs u. c. ir norādījuši, ka saules enerģiju var izmantot, lai samazinātu dzesēšanai nepieciešamo enerģijas daudzumu arī Latvijas klimatiskajos apstākļos [31]. *Aguilar* u. c. eksperimentālie rezultāti Spānijā parāda, ka vasaras mēnešos saules paneļu radītais ieguvums ir aptuveni 65 % [32]. Gaisa kondicionēšana ir svarīga optimāla iekštelpu mikroklimata uzturēšanai, tādējādi saules enerģiju varētu izmantot, lai nodrošinātu optimālus apstākļus ne tikai birojos, bet arī izglītības iestādēs.

Enerģētikas pārkārtošanai ir trīs galvenie mērķi: palielināt energoefektivitāti, atjaunojamās enerģijas izmantošanu un, vissvarīgākais, samazināt SEG emisijas. Ražojši patērētāji (*prosumer*) [33], [34] var būt decentralizētas un ilgtspējīgas enerģijas sistēmas galvenie dalībnieki, daļu enerģijas vajadzību apmierinot ar pašu ražotas enerģijas palīdzību, izmantojot atjaunīgos enerģijas avotus.

Visā pasaulē ražojšie patērētāji veido nozīmīgu daļu no kopējās uzstādītās saules paneļu jaudas, un šī tendence pieaug. Interese par saules paneļiem pieaug visur, jo produktu inovācijas un veikspējas uzlabojumi patērētājiem sniedz plašāku izvēli. Nozīmīgs ieguvums ir arī tas, ka šo sistēmu izmaksas nepārtraukti samazinās. Ražojši patērētāji varētu būt viens no galvenajiem enerģijas pārejas dalībniekiem, jo viņi patērē lielāko daļu saražotās elektroenerģijas un elektrotīkls tiek noslogots ar mazāku papildu elektroenerģijas daudzumu. Saules paneļu sistēmās jāiekļauj elektrības un siltuma uzkrāšanas tehnoloģijas un siltumsūkņi, lai sasniegtu pēc iespējas lielāku pašpatēriņa daļu [35].

2. PĒTĪJUMĀ IZMANTOTĀ METODIKA

Šajā nodaļā ir aprakstītas darbā izmantotās metodes. Tās detalizēti ir atspoguļotas zinātnisko žurnālu publikācijās un prezentētas starptautiskās konferencēs, atsauces uz šīm publikācijām (sk. publikāciju sarakstu 5. lpp.) ir izmantotas visā nodaļā. Darbā izmantotas dažādas zinātniskās izpētes metodes, t. sk. matemātiskā modelēšana ar sistēmdinamikas metodi, mērījumu un interviju veikšana reālos objektos, kā arī izmaksu un ieguvumu metode.

2.1. Iekštelpu gaisa kvalitātes un termālā komforta novērtējums energoefektīvās ēkās

Iekštelpu gaisa kvalitātes un termālā komforta novērtējums ēkās, kurās ieviesti energoefektivitātes pasākumi, veikts, izmantojot mērījumus telpās un telpu apmeklētāju intervijas. Mērījumi veikti Liepājas pilsētai piederošās ēkās – trīs pirmsskolas izglītības iestāžu ēkas, divās skolu ēkās, pašvaldības policijas ēkā, administratīvā ēkā un muzeja ēkā. Pētījums atspoguļots 2. un 3. publikācijā.

Gaisa kvalitātes un mikroklimata mērījumi

Lai iegūtu vispārēju priekšstatu par pētāmajām ēkām un datus, kas būs nepieciešami vēlākajos aprēķinos, veiktas šo ēku pārvaldnieku vai par pārvaldību atbildīgo personu aptaujas. Katrai ēkai ir piešķirts burta identifikators, savukārt telpas tika apzīmētas ar cipariem. Visās ēkās, izņemot F un G, tika izvēlētas divas telpas, kurās tika veikti mērījumi. Lai saprastu kopējo ēkas stāvokli, telpas izvēlētas pēc ventilācijas sistēmas plānojuma, prognozējot potenciāli labus vai sliktus klimata apstākļus, kurās tika veikti mērījumi septiņas dienas. Apsekojot ēkas klātienē, tika novērtēti veiktie renovācijas darbi, kā arī ventilācijas sistēmu lietošanas paradumi. Visās ēkās ir mainīti logi, lielākoties siltinātas norobežojošās konstrukcijas un ierīkotas ventilācijas sistēmas. Tikai vienā ēkā (izglītības iestādē D) ventilācijas sistēma darbojas pēc grafika, pārējās ēkās tā tiek darbināta manuāli, balstoties uz subjektīvu vērtējumu. Šīs sistēmas patērē elektroenerģiju, tāpēc rodas ekspluatācijas izdevumi. Šī iemesla dēļ iekārtas tiek darbinātas retāk nekā paredzēts. Ēku pārvaldnieki ziemā cenšas ventilācijas iekārtas nedarbināt.

Mērījumi visos objektos tika veikti pēc vienotas procedūras, lai iegūtu vienotus, ticamus un salīdzināmus termālās vides parametrus. Vērtējot iekštelpu klimatu, tika precizēta darbības vide – 0,5 m no sienām un 1 m no logiem [36], [37]. Darbības zona mācību iestādēs un biroja ēkās tiek definēta 0,1 m līdz 1,1 m augstumā no grīdas [37].

2. publikācijā iekštelpu klimata mērījumu fiksēšanai pētījumā tika izmantots *Delta Ohm HD 32.1*. datu loggeris. Ierīce tika darbināta A režīmā. Ar statīvā iestiprinātu zondi iegūti šādi mērījumi [38]:

- lodes termometra temperatūra t_g , °C;
- mitrā termometra temperatūra t_{nw} , °C;
- gaisa temperatūra t_a , °C;
- atmosfēras spiediens p_r , hPa;

- relatīvais gaisa mitrums RH , %;
- gaisa kustības ātrums v_a , m/s.

Mērījumu veikšanas laikā parametri tika fiksēti ik pēc piecām minūtēm.

Marķiergāzes paņēmiens

2. publikācijā gaisa apmaiņas kārtas noteikšanai tika izmantots *tracer gas* jeb marķiergāzes paņēmiens. Ar šo metodi var noteikt noplūdes vietu un apjomu, ventilācijas efektivitāti un gaisa apmaiņas kārtu. Mērījumu veikšanai kā marķiergāze tiks izmantots sēra heksafluorīds SF_6 un gāzes koncentrācijas noteikšanai mērierīce *LumaSense Technologies INNOVA 1303*. Pētījumā gaisa apmaiņas kārtas noteikšanai tika izmantota koncentrācijas samazināšanās metode [39], [40]. Pētījuma laikā telpā tika ievadīts neliels daudzums SF_6 , nodrošinot tā vienmērīgu sajaukšanos gaisā. Marķiergāzes pievadīšana tika pārtraukta, un 30–40 minūtes tika veikti ievadītās gāzes koncentrācijas līmeņa mērījumi ar vienas minūtes intervāliem. Testa veikšanas laikā telpās neatradās cilvēki, un ventilācijas sistēma nedarbojās, lai varētu ilustrēt reālo gaisa apmaiņas kārtu telpās, kad tās netika mehāniski vēdinātas. Marķiergāzes koncentrācijas eksponenciālais samazinājums un gaisa apmaiņas kārtā tika noteikta, kā norādīts 2. publikācijā.

CO_2 koncentrācija izglītības iestāžu telpās

2. publikācijā oglekļa dioksīda koncentrācija gaisā tika izvēlēta kā gaisa kvalitātes indikators. Mērījumi katrā telpā tika veikti vienu nedēļu, lai noteiktu parametra dinamiku. Koncentrācijas noteikšanai tika izmantota ierīce *Telaire 7001 CO_2 Sensor*, mērījumu rezultātu ierakstīšanai – datu logeris *HOBO U12*. CO_2 koncentrācija tika fiksēta katras piecas minūtes.

Ēkas blīvuma pārspiediena tests

2. publikācijā veikts ēkas blīvuma pārspiediena tests (*Blower Door tests*), kas ir bieži sastopama metode un palīdz noteikt noplūdes nelielās ēkās vai to daļās. Lai veiktu testu, spiediens telpā tika palielināts līdz 70 Pa un vairāk, regulējot ventilatora ātrumu, to pa 5–10 Pa soļiem secīgi samazinot. Veicot aprēķinus, tika noskaidrots attiecīgās telpas noplūdes daudzums un nepieciešamība pēc mehāniskās ventilācijas.

Apmierinātības vidējā balsojuma aprēķins

3. publikācijā visās telpās mērījumu veikšanas brīdī tika veikta aptauja, lai noskaidrotu cilvēku subjektīvo viedokli par telpas mikroklimatu. Katram dalībniekam bija jānovērtē komforta līmenis pēc Fangeras skalas no –3 līdz +3. Attiecīgajā brīdī tika fiksēti visi gaisa parametri, lai būtu iespējams veikt tālākus aprēķinus. Turpmāko aprēķinu veikšanai tika novērtēts arī veicamās aktivitātes līmenis un apģērba termiskā pretestība [41]. Izmantojot aptaujas laikā fiksētos gaisa parametrus, tika aprēķināti apmierinātības vidējā balsojuma (*PMV*) rādītāji.

Termālā komforta ietekme uz cilvēku veikspēju

Lai noteiktu, cik lielu ietekmi uz veikspēju atstāj 3. publikācijā iekļauto ēku mikroklimata apstākļi, tika izmantots *Kosonen* izveiktais produktivitātes zuduma modelis [42]. Jāņem vērā, ka tie ir izteikti, balstoties uz eksperimentāliem datiem, tādējādi tam ir lietošanas ierobežojumi. Modelis ir izmantojams tādos pašos apstākļos kā iegūts – *PMV* diapazonā no $-0,21$ līdz $+1,28$. Autors norāda, ka, *PMV* vērtībai esot zemākai par modeļa izmantošanas diapazonu, novērojama lineāra sakarība starp *PPD* procentuālo vērtību un veikspējas zudumiem. Ar to domāts, ka cilvēka veikspēja, izpildot domāšanas uzdevumus, pasliktinās par procentuālu vērtību, kas līdzvērtīga *PPD* vērtībai. Savukārt rakstīšanas uzdevumu veikspējas zudumu procentuālais apjoms ir vienāds ar divkārtīgu *PPD* vērtību [42].

Ventilācijas ražības ietekme uz cilvēku veikspēju

Daudz pētījumu apstiprina ventilācijas ražības un gaisa kvalitātes ietekmi uz cilvēku pašsajūtu un veikspēju. *Seppänen* ir izveidojis modeli, lai prognozētu cilvēku veikspējas izmaiņas pie dažādām ventilācijas pakāpēm [43]. Modelis ir veidots, balstoties uz apkopotajiem vairāku pētījumu rezultātiem. Tas tika izmantots 3. publikācijā, lai noteiktu sagaidāmo personas veikspēju pie dažādiem svaiga gaisa pieplūdes apjomiem.

3. publikācijā katrai telpai ir piemēroti četri ventilācijas ražības scenāriji, lai noteiktu ietekmi uz cilvēka veikspēju:

- 1. scenārijs – svaiga gaisa pieplūde 5 L/s uz cilvēku. Raksturo MK noteikumos Nr. 310 norādīto prasību par ventilācijas ražību $15 \text{ m}^3/\text{h}$ uz personu jeb 4,17 L/s;
- 2. scenārijs – svaiga gaisa pieplūde 10 L/s uz cilvēku. Raksturo *ASHRAE* vadlīnijās norādīto ventilācijas ražību 10 L/s uz cilvēku izglītības iestādēs;
- 3. scenārijs – svaiga gaisa pieplūde 15 L/s uz cilvēku;
- 4. scenārijs – svaiga gaisa pieplūde 30 L/s uz cilvēku.

Ventilācijas ražības pieauguma ekonomisko ieguvumu analīze

Pētījuma veikšanas laikā (sk. 3. publikāciju) visās ēkās, izņemot C ēku, bija ierīkotas ventilācijas sistēmas. F ēkā tikai vienā no telpām bija lokāla nosūce, tāpēc arī šai ēkai aprēķinos tika iekļauta jaunas ventilācijas sistēmas uzstādīšana.

Izglītības iestādēs vasarā īsāku vai garāku posmu ir brīvlaiki, kuros ventilācijas iekārtas nav jādarbina. Skolu D un E ēku un pirmsskolas izglītības iestāžu A un B ēku darbs vidēji notiek 186 darba dienas gadā, savukārt C ēkā – 230 dienas. Pārējās pašvaldības ēkās darbs notiek 250 dienas gadā. Ventilācijas iekārtu darba laiks ir svarīgs lielums, lai būtu iespējams prognozēt elektroenerģijas patēriņu [44]. Pētījumā tika izmantotas pašvaldības apstiprinātās izglītojamo mācību un audzināšanas izmaksas [45], [46].

Konsultējoties ar praktizējošu ventilācijas sistēmu projektētāju [47], tika noteiktas jaunu iekārtu ieviešanas izmaksas gadījumos, kad tas bija nepieciešams. Gaisa apstrādes iekārtu piemeklēšanai tika izmantota *KOMFOVENT VERSO* programma [48].

Izmaksu un ieguvumu analīze

Izglītības iestāžu ēkās, pārbūvējot tās par ražojošiem patērētājiem, var samazināt siltumnīcefekta gāzu emisijas, nodrošināt atjaunīgo energoresursu patēriņu, kā arī veicināt energoefektivitāti tā, lai vienlaikus tiktu nodrošināta augsta iekštelpu gaisa kvalitāte. 6. publikācijā veikta izmaksu un ieguvumu analīze tipiskai Latvijas izglītības iestādes ēkai. Pētījumā izstrādāti dažādi saules paneļu sistēmu un koka granulu katlu varianti, lai atrastu vislabāko scenāriju izglītības ēkas pārejai no patērētāja uz ražojošu patērētāju.

6. publikācijā ir aprakstīta saražotās elektroenerģijas novērtēšana. Tiek paredzēts, ka elektrība nedēļas nogalēs tiks nodota tīklā (aptuveni sešas dienas mēnesī saražotā elektroenerģija) un papildus mainīgā daļa no mēneša kopējā saražotā daudzuma.

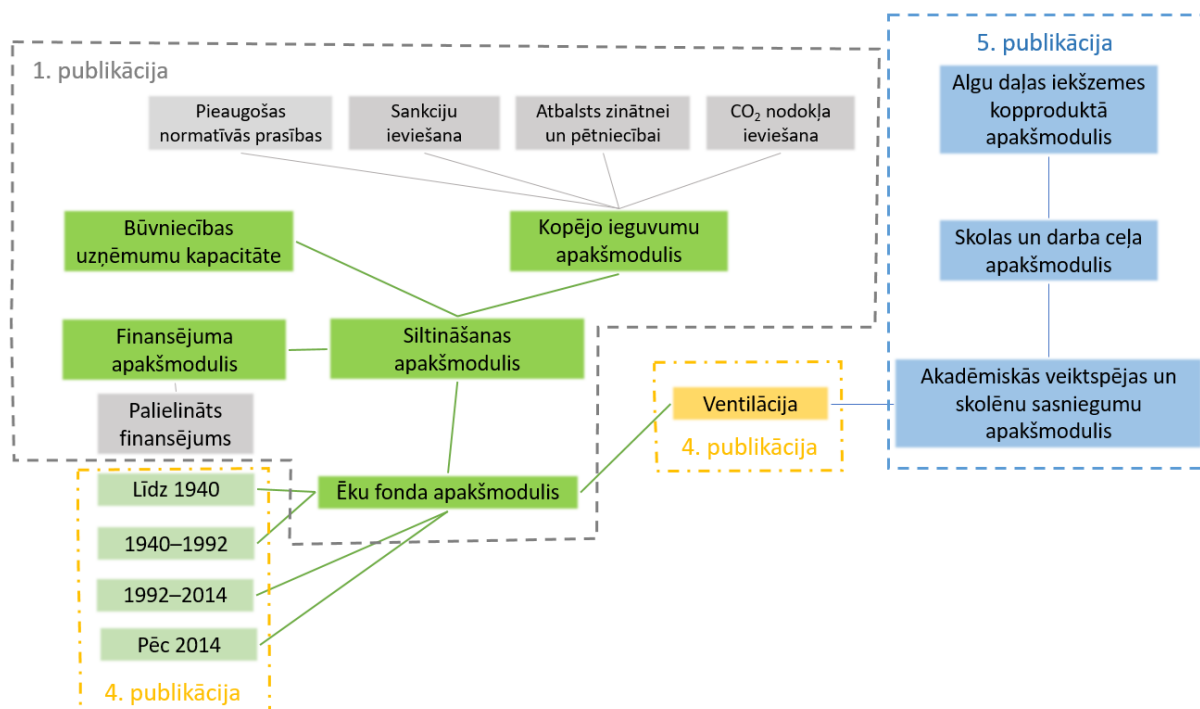
Elektroenerģijas tarifu veido elektrības cena, maksa par ievadaizsardzības aparāta strāvas lielumu, maksa par elektroenerģijas piegādi, jaudas komponente, obligātā iepirkuma komponente un pievienotās vērtības nodoklis. Aprēķinos izmantotie lielumi ir norādīti 6. publikācijā. Ar elektrotīklu savienotus elektrības ražotājus (vairāk nekā 11 kW) definē kā elektrostacijas savienojumu, tāpēc tas var pārdot elektroenerģiju, ievadot to tīklā, un pēc tam to saņemt no sadales sistēmas nopērkot. Aprēķinos elektrības cena pieņemta par nemainīgu pārdošanas un pirkšanas operācijās. Obligātā iepirkumu komponente tiek ņemta vērā tikai attiecībā uz elektrības daudzumu, kas tiek ņemts no tīkla. Kapitāla un uzturēšanas izmaksas ir sniegtas 6. publikācijā.

Energoefektīvai skolas ēkai ar apkurināmo platību 5140 m² piedāvātais risinājums apkures un karstā ūdens apgādei ir granulu katls (400 kW, $\eta = 0,92$) ar granulu tvertni un vītnes transportieri automātiskai granulu padevei no konteīnera uz degli. Tiek pieņemts, ka koksnes granulu (4,8 kWh/kg) patēriņš gadā ir aptuveni 75 tonnas. Kapitāla un uzturēšanas izmaksas ir sniegtas 6. publikācijā.

CO₂ emisijas samazinājuma aprēķināts, izmantojot CO₂ emisijas intensitāti un datus par potenciālajiem elektroenerģijas ražošanas apjomiem 25 gadu laikā.

2.2. Sistēmdinamikas modelēšana

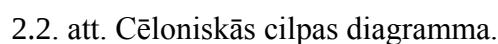
Pētījumā izmantota sistēmdinamikas modelēšana. Šo matemātiskās modelēšanas metodi 1961. gadā izveidoja Foresters [49]. To izmanto cēloņu un seku mijiedarbību analīzei sarežģītās un dinamiskās sistēmās, kurās ir kavējums, atgriezeniskās saites un mainīgos saista nelineāras sakarības. Šo matemātiskās modelēšanas pieeju izmanto, lai pētītu sarežģītu sistēmu dinamiku ar atgriezenisko saiti, nelinearitātēm un kavējumiem. Galvenie modeļa pamatelementi ir krājumi un plūsmas. Krājumus laika gaitā piepilda vai iztukšo ienākošās un izejošās plūsmas. Sistēmu krājumu un plūsmu struktūra palīdz veikt kvantitatīvu analīzi. Cēlonisko cilpu analīze palīdz izprast sistēmas atgriezeniskās saites struktūru un izskaidrot dinamikas cēloņus, to veidotāju garīgos modeļus un noteikt atgriezeniskās saites, kas ir atbildīgas par problēmu. Kā programmatūras rīks ēku fonda krājumu un plūsmu struktūras un sistēmas uzvedības simulācijai izmantots *Powersim Studio 10*. Darbā tika izveidots sistēmdinamikas modelis, kura sākotnējā versija darba gaitā tika papildināta ar papildu moduļiem. Modeļa galvenie moduļi ir redzami 2.1. attēlā.



2.1. att. Sistēmdinamikas modeļa galvenie apakšmoduļi.

Energoefektivitātes ieviešana valsts un pašvaldības iestāžu ēkās ir aprakstīta 1. publikācijā, attēlojot galvenos modeļa apakšmoduļus un mijiedarbības. Ēku energoefektivitātes un iekštelpu gaisa kvalitātes dilemma ir aprakstīta 4. publikācijā, ēku fonda apakšmoduļi iedalot būvniecības periodos un ieviešot ventilāciju pēc energoefektivitātes pasākumu īstenošanas. Izglītības iestāžu ēku sistēmdinamikas modelis ir aprakstīts 5. publikācijā, atspoguļojot ēku energoefektivitātes un iekštelpu gaisa kvalitātes ietekmi uz iekšzemes kopproduktu. Apakšmoduļu attēlojums ir skatāms promocijas darba 2.2. apakšnodaļā.

Modeļa dinamiku un uzvedību skaidro cēlonisko cilpu diagramma. Modeļa pamatā ir trīs cēloņsakarības galvenās cilpas: viena pastiprinošā un divas balansējošās cilpas (2.2. att.). Pastiprinošā cilpa R sāk darboties, ja tiek nodrošināts finansējums energoefektivitātes pasākumiem. Tiek uzlabota ēku energoefektivitāte un pazeminātas SEG emisijas, tādējādi šīs ēkas kļūst hermētiskākas, un palielinās nepieciešamība pēc mehāniskās ventilācijas. Ventilācijas sistēmu darbība nodrošina labāku iekštelpu gaisa kvalitāti, pozitīvi ietekmējot studentu akadēmisko sniegumu. Tas samazinās mazkvalificētu darbinieku daļu iedzīvotāju skaitā, tādējādi palielinās to augsti kvalificēto darbinieku atalgojums, kas veido algu daļu iekšzemes kopproduktā. Ja IKP palielinās, tad ir iespējams energoefektivitātes uzlabošanas pasākumiem sabiedriskajās ēkās piešķirt augstāku finansējuma daļu.



Otru līdzsvarojošo cilpu B2 ietekmē R cilpas izaugsmes ātrums. Jo lielākas ventilācijas izmaksas, jo zemāka energoefektivitātes pasākumu rentabilitāte un zemāka finansējuma daļa. Rezultātā samazinās turpmāko ēku energoefektivitātes pasākumu veikšana un siltumnīcefekta gāzu emisiju samazināšanu, līdz ar to mazinot nepieciešamību darbināt mehāniskās ventilācijas sistēmas un segt to izmaksas.

Daudzu modelēšanas pētījumu galvenā problēma ir datu pieejamība un kvalitāte. Modeļa ģenerētie dati rāda tikai tendenci un neveido precīzus skaitļus, tāpēc nav tādu modeļu, kas nevainojami attēlotu pētāmās sistēmas. Datu pieejamība nav būtiska, lai izveidotu labu sistēmas dinamikas modeli, kā jau ir skaidrojis *Barlas* [50], savukārt *Stermans* apgalvo, ka pilnīga modeļu pārbaude un apstiprināšana nav iespējama [51]. Modeļi ir reālās pasaules vienkāršotas versijas, un tie no realitātes bezgalīgi atšķiras lielākā vai mazāka veidā. Tīri analītiski apgalvojumi un priekšlikumi, kas iegūti no slēgtas loģiskās sistēmas aksiomām, ir vienīgie apgalvojumi, ko var apstiprināt vai pierādīt, ka tie ir patiesi [51].

24

Strukturālā un uzvedības pārbaude tika veikta visā modelēšanas procesā, izmantojot statistiku un literatūras datus. Lai gūtu pārliecību par modeli, tika izmantots vēstures uzvedības validācijas tests studiju un darba ceļam, ieskaitot atalgojuma daļu IKP.

Energoefektivitātes ieviešana valsts un pašvaldības iestāžu ēkās

Valsts un pašvaldības ēku energoefektivitātes tirgus dinamikas izpēte veikta 1. publikācijā.

Valsts un pašvaldību ēku energoefektivitātes ieviešanas procesa sistēmdinamikas modelis ir veidots no četriem apakšmoduļiem: siltināšana; kopējie ieguvumi; finansējums; būvniecības uzņēmumu kapacitāte.

Politikas instrumenti tika iestrādāti modelī, lai noskaidrotu to ietekmi uz ēku energoefektivitātes ieviešanas dinamiku. Šie instrumenti raksturo plānveida rīcību, kas rada izmaiņas kopējās sistēmas darbībā. Tika izstrādāti pieci modelī iestrādājami politiskie instrumenti, lai ietekmētu valsts un pašvaldību ēku siltināšanas tempu. Ieguldot zinātnē un pētījumos, ēku uzlabošanas materiāli ir energoefektīvāki un kalpo ilgāk, kā arī ir iespējams panākt enerģijas patēriņa un izmaksu ietaupījumu. Tādējādi tiek veiktas izmaiņas sistēmas darbībā, kas paredz, ja tiek paredzēts papildu finansējums zinātnes un pētījumu attīstībai, tad kopējais enerģijas izmaksu ietaupījums paaugstināsies par 15 %. Siltumenerģijas tarifu paaugstinot ar CO₂ nodokli, palielinās energoefektivitātes pasākumu veikšanas ieguvumus un tiek ietekmēts siltināšanas temps. Normatīvo prasību paaugstināšana tiek iesaistīta kā sasniedzamais enerģijas patēriņa rādītājs pēc energoefektivitātes pasākumu veikšanas. Sankciju sistēma paredz, ka, nesasniedzot ilgtermiņa stratēģijā paredzētos mērķus valsts un pašvaldībām piederošo ēku energoefektivitātes uzlabošanai, ir jāmaksā soda nauda par katru apkurināmās platības kvadrātmetru. Iegūtos līdzekļus var apvienot kopējā fondā, kas paredzēts ēku energoefektivitātes uzlabošanai. Papildu finansējuma piešķiršana no ārējiem fondiem paredz paaugstināt pieejamos resursus, lai radītu straujāku ēku energoefektivitātes pasākumu ieviešanas tempu.

Ēku energoefektivitātes un iekštelpu gaisa kvalitātes dilemma

4. publikācijā ir veikta ēku energoefektivitātes un iekštelpu gaisa kvalitātes dilemmas analīze. Tā balstās uz sistēmdinamikas modeli, kas veidots, papildinot 2.2. nodaļā aprakstīto modeli (1. publikācija). Kopējais sabiedrisko ēku krājums tiek iedalīts četros krājumos, pamatojoties uz būvniecības periodiem, un tiek izveidoti attiecīgi modeļa apakšmoduļi. Pirmais apakšmodulis ietver vēsturiskās ēkas, kas uzceltas pirms 1940. gada. Lielākajai daļai šo ēku ir vēsturiska vērtība, un tajās var izmantot ierobežotu energoefektivitātes pasākumu kompleksu. Otrā apakšmoduļa ēkas ir celtas no 1940. gada līdz 1992. gadam. Tās ir būvētas atbilstoši bijušās PSRS būvnormatīviem. Trešais apakšmodulis ietver ēkas, kas uzceltas no 1992. gada līdz 2014. gadam. Šajā periodā energoefektivitātes standarti ir mainījušies divreiz, katru reizi kļūstot arvien stingrākiem. Pēdējais apakšmodulis ietver ēkas, kas uzceltas pēc 2014. gada: pašreizējie būvnormatīvi pieprasa, lai tās būtu ēkas ar zemu enerģijas patēriņu [52].

Papildus izveidotajā ventilācijas sistēmu darbināšanas modulī tiek pieņemts, ka pirms energoefektivitātes pasākumu ieviešanas ir darbojusies tikai dabiskā ventilācija, kuras gaisa

apmaiņas ātrums ir $0,7 \text{ h}^{-1}$. Pēc energoefektivitātes pasākumu veikšanas simulācijai tiek izmantota vidējā gaisa apmaiņas kārtā 4 h^{-1} , ko rada mehāniskā ventilācija. Latvijas klimatam īpatnējais enerģijas patēriņš pēc energoefektivitātes pasākumu ieviešanas ir 9 kWh/m^2 gadā pieplūdes gaisam un 4 kWh/m^2 gadā elektrībai ar siltuma reģenerācijas efektivitāti 80 % un īpatnējo ventilatora jaudu $1,25 \text{ kW/(m}^3/\text{s)}$, kas darba dienās darbojas 12 stundu.

Modelis papildināts ar rentabilitātes rādītāja apakšmoduli. Rentabilitāte ietekmē arī modeļa darbību: jo augstāka ir iespējamā rentabilitāte, jo lielāka ir šai ēku grupai piešķirtā finansējuma daļa. Finansējums tiek piešķirts dažādiem ēkas apakšmoduļiem, pamatojoties uz rentabilitātes koeficientu, kas parāda ietaupīto enerģiju energoefektivitātes pasākumu kalpošanas laikā uz vienu investēto eiro. Finansējuma sadalīšanai izmantota *logit* funkcija.

Izglītības iestāžu ēku sistēmdinamikas modelis

5. publikācijā aprakstīta ēku energoefektivitātes un iekštelpu gaisa kvalitātes ietekme uz iekšzemes kopproduktu. Šis pētījums balstīts uz sistēmdinamikas modeli, kas aprakstīts 2.2. nodaļā (1. un 4. publikācija), to papildinot ar trīs apakšmoduļiem: studentu akadēmiskais sniegums un sasniegumi; studiju un darba ceļš; iekšzemes kopprodukts. Studentu akadēmiskā snieguma un sasniegumu vispārējā apakšmoduļa struktūra ir parādīta 5. publikācijā. Šī struktūra ar dažādām sekmēm tiek izmantota dažādiem izglītības līmeņiem. Studentu skaits noteiktā izglītības pakāpē tiek uzkrāts krājumos pēc vidējiem rezultātiem. Krājums “Studenti sāk ar X vērtējumu” var palikt vienā krājumā visu izglītības ilgumu konkrētā izglītības līmenī vai arī var pāriet uz krājumu “Studenti beidz ar $X + 1$ vērtējumu”. Pirmo krājumu regulē viena ienākošā un divas izejošās plūsmas. Ienākošais studentu skaits, kas katru gadu iestājas noteiktā izglītības līmenī, veido ienākošo plūsmu. Izejošā plūsma “Absolventi ar X vērtējumu” ir studentu skaits, kas katru gadu beidz ar X vērtējumu. “Studenti, kuri maina vērtējumu” veido pieplūdumu otrajā krājumā. Šī plūsma ir atkarīga no ventilācijas režīma, kas ietekmē studentu akadēmisko sniegumu. Modelēšanā tiek izmantoti divi ventilācijas režīmi ($3 \text{ m}^3/\text{h}$ uz cilvēku, izmantojot dabisko ventilāciju, un $36 \text{ m}^3/\text{h}$ uz cilvēku, izmantojot mehānisko ventilāciju). Akadēmiskais sniegums palielinās par 2,7 % uz katru L/s uz cilvēku, pamatojoties uz [53]. Ja pašreizējais vērtējums ir X , ventilācija ir slikta un nepalielinās līdz noteiktam līmenim, students arī absolvē ar X vērtējumu. Ja ventilācijas līmenis palielinās vairāk, students pāriet no krājuma ar X vērtējumu uz krājumu ar $X + 1$ vērtējumu un students absolvēs ar $X + 1$ vērtējumu.

Studiju un darba ceļa apakšmodulis ietver novecošanās dzīves ķēdi no dzimšanas (iekļaujot pirmsskolu, pamatskolu, vidusskolu, universitāti, darba vietu un, visbeidzot, līdz aiziešanai pensijā). Šī apakšmoduļa krājumu un plūsmas struktūra ir parādīta 5. publikācijā. Cilvēki sistēmā ienāk, izmantojot dzimstības līmeni, un uzkrājas pirmsskolas vecuma krājumos. Pēc tam viņi pāriet uz pamatskolu. Pamatskolas absolventi var nolemt pārtraukt studijas un iekļauties darba tirgū kā mazkvalificēts darbspēks vai turpināt mācības vidusskolās vai profesionālajās skolās. Pēc vidējās profesionālās izglītības beigšanas viņi var iekļūt darba tirgū kā vidēji kvalificēti darbinieki vai turpināt studijas universitātē. Universitātes absolventi ienāk darba tirgū kā kvalificēts darbspēks. Gan vidusskolu absolventi, gan universitāšu absolventi tiek iedalīti apakškategorijās, pamatojoties uz atzīmēm.

Iekšzemes kopproduktu (IKP) mēra, balstoties uz ienākumiem. Kopējo IKP vērtību aprēķina kā darbinieku atalgojuma summu, bruto darbības rezultātu, bruto jauktos ienākumus, nodokļus, no kuriem atskaitītas subsīdijas par ražošanu un imports. Šajā pētījumā modelēta darbinieku atalgojuma daļa IKP. Kopējo atalgojumu darbiniekiem par paveikto darbu veido algas un darba devēja sociālās apdrošināšanas iemaksas.

Darbinieku atalgojuma daļas iekšzemes kopproduktā vispārējais apakšmodulis ir sniegts 5. publikācijā. Studiju un darba ceļa apakšmodulī aprakstīto dažādu darbinieku grupu gada ienākumi (alga plus darba devēja sociālās apdrošināšanas iemaksas) mainās pēc gada ienākumu izmaiņu neto likmes. Neto gada ienākumu izmaiņu likme ir konkrētas darba grupas gada ienākumi, kas reizināti ar fracionēto gada ienākumu izmaiņu likmi (statistikas dati – 3 %). Gada ienākumus reizina ar cilvēku skaitu konkrētajā darbinieku grupā. Visas grupas tiek saskaitītas, lai iegūtu kopējo darbinieku atalgojumu, kas ir daļa no kopējās IKP vērtības. Modeļa ievades dati ir aprakstīti 5. publikācijā.

Simulācijas scenāriji

Tika izstrādāti un modelēti seši scenāriji (2.1. tab.), kuros noteiktas atšķirīgas gaisa apmaiņas kārtas un energoefektivitātes projektiem pieejamie finanšu resursi. Tika pieņemts, ka pirms energoefektivitātes pasākumu ieviešanas ir uzstādīta un darbojas tikai dabiskā ventilācija (gaisa apmaiņas kārta $0,5 \text{ h}^{-1}$). Pēc energoefektivitātes pasākumu un mehāniskās ventilācijas ieviešanas gaisa apmaiņas kārta ir 6 h^{-1} .

2.1. tabula

Simulācijas scenāriji			
	Gaisa apmaiņas kārta ēkās bez energoefektivitātes pasākumiem, h^{-1}	Gaisa apmaiņas kārta ēkās ar energoefektivitātes pasākumiem, h^{-1}	Investīcijas energoefektivitātes pasākumos
0. scenārijs (pamata scenārijs)	0,5	0,5	Valsts energoefektivitātes programmas ir pieejamas līdz 2022. gadam. Pēc tam netiek sniegts papildu finansējums.
1. scenārijs	0,5	6,0	Valsts energoefektivitātes programmas ir pieejamas līdz 2022. gadam. Pēc tam netiek sniegts papildu finansējums.
2. scenārijs	0,5	0,5	Valsts energoefektivitātes programmas ir pieejamas līdz 2022. gadam. Pēc tam tiek sniegts papildu finansējums 2 miljoni eiro gadā.
3. scenārijs	0,5	6,0	Valsts energoefektivitātes programmas ir pieejamas līdz 2022. gadam. Pēc tam tiek sniegts papildu finansējums 2 miljoni eiro gadā.
4. scenārijs	0,5	0,5	Papildu 130 miljoni eiro gadā no valsts un pašvaldību finanšu avotiem.
5. scenārijs	0,5	6,0	Papildu 130 miljoni eiro gadā no valsts un pašvaldību finanšu avotiem.

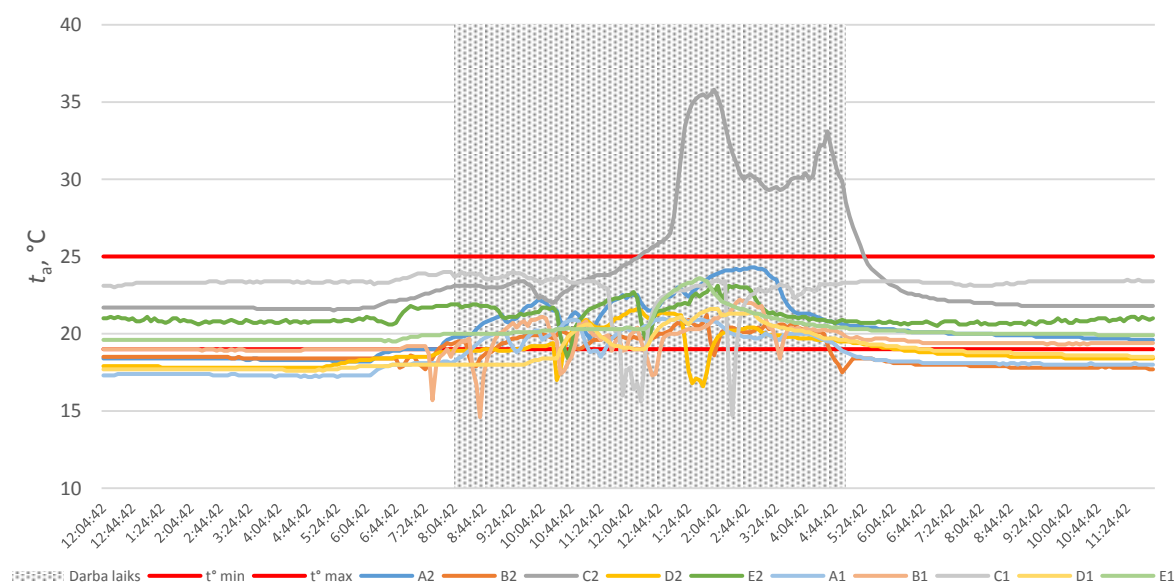
* Valsts finansējuma programmas, kas piešķirtas energoefektivitātes uzlabošanai valstij piederošajās ēkās no 2016. līdz 2022. gadam par kopējo summu 115,1 miljons eiro.

3. REZULTĀTI

3.1. Iekštelpu gaisa kvalitāte un termālais komforts energoefektīvās ēkās

Iekštelpu gaisa parametru veikto mērījumu rezultāti ir apkopoti un aprakstīti 2. un 3. publikācijā. Tie apstiprina ēku apsaimniekotāju un lietotāju intervijās minēto, ka lielākajā daļā pētāmo ēku ventilācijas iekārtas darbina tikai pēc nepieciešamības.

Klases telpas, kurās ir vairāk skolēnu un atrodas saules pusē, gaiss ir ievērojami siltāks. Ņemot vērā aktivitātes līmeni, gaisa temperatūrai jābūt no 19 °C līdz 25 °C atbilstoši Ministru kabineta noteikumiem Nr. 359 [54]. Izglītības iestāžu telpās veiktie temperatūras mērījumi parādīja, ka vairumā gadījumu tā neiekļaujas noteiktajā temperatūru diapazonā (3.1. att.). Aptuveni pusē telpu tā periodiski mēdz samazināties zem minimāli noteiktās vērtības, kā arī vienā no telpām temperatūra ir izteikti augstāka.

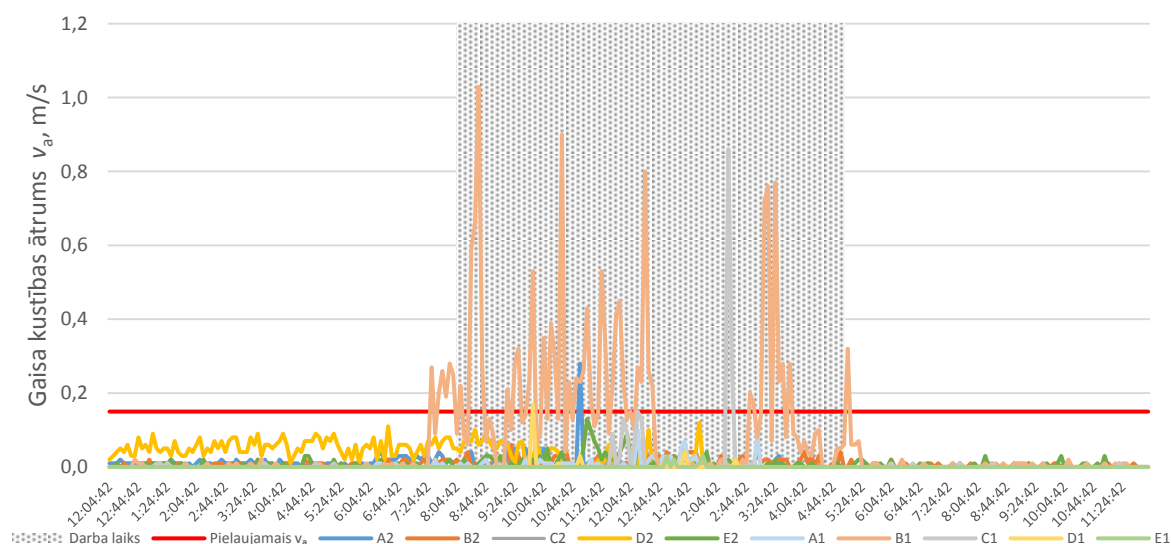


3.1. att. Gaisa temperatūras t_a svārstības izglītības iestāžu telpās diennakts laikā.

Vienā no telpām dienas sākumā temperatūra ir zemāka par optimālo, un tikai pēc pirmajām pāris stundām, kad telpās uzturas cilvēki, tā sasniedza normu. Citā telpā temperatūra ir pārāk augsta, un dažas reizes dienā atvērtie logi rada tikai īslaicīgu efektu, tādējādi nenodrošinot optimālu gaisa apmaiņu. Tas norāda uz nepareizu ēkas ekspluatāciju, jo energoefektivitātes pasākumi samazina dabisko gaisa apmaiņu, ko nevar manuāli kompensēt.

Relatīvā gaisa mitruma mērījumi ēkās parādīja, ka vairumā gadījumu tie iekļaujas starp 30 % un 70 % atzīmēm. Divas telpas ir izņēmumi, kur vienā gadījumā gaisa mitrums mēdz palielināties virs normas, otrā – samazinās zem minimālā līmeņa.

Pētījumā tika mērīts arī gaisa kustības ātrums, un rezultāti liecina, ka tie ir zemi un maz ietekmēs uztverto gaisa kvalitāti un termālo komfortu (3.2. att.). Izņēmums ir B ēkas 1. telpa, kurā gaisa kustības ātrums dienas laikā vairākkārt pārsniedz pieļaujamo vērtību.

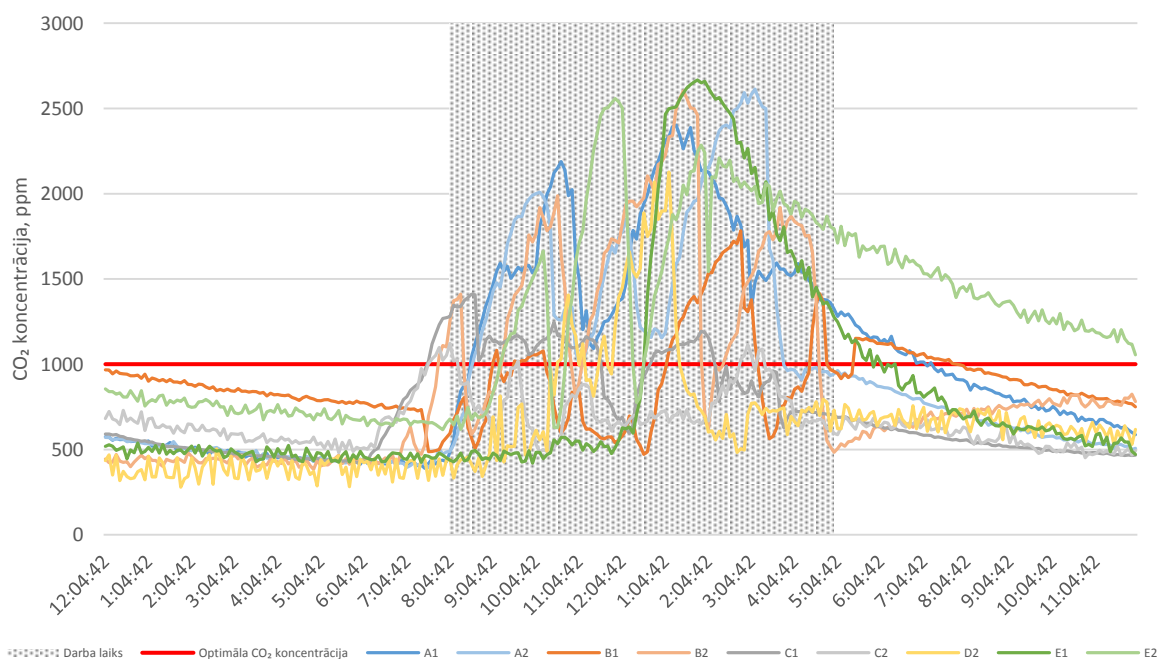


3.2. att. Gaisa kustības ātrums izglītības iestāžu telpās diennakts laikā.

Ņemot vērā 3.1. attēlā novērojamos temperatūras kritumus, var secināt, ka telpas bieži ir vēdinātas, atverot logus. Pārējās telpās nav konstatēti ilgstoši augsti rādītāji, tāpēc var secināt, ka ventilācijas sistēmas tiek darbinātas neregulāri vai vispār netiek ieslēgtas.

Saskaņā ar ASHRAE vadlīnijām CO₂ koncentrācijas līmenis, kas ir robežās no 600 ppm līdz 1000 ppm ir uzskatāms par nekaitīgu iekštelpu gaisu [15]. Arī pēc EN 13779:2007 [36] ogļskābās gāzes atzīme līdz 1000 ppm ir uzskatāma par optimālu.

Mērījumi ēkās (3.3. att.) parādīja, ka visās ēkās īsāku vai garāku laika posmu ir paaugstināts CO₂ līmenis. Ilgstoši uzturoties šādos, paaugstināta CO₂ līmeņa apstākļos, gan darbinieki, gan audzēkņi var izjust miegainību un nogurumu, kas var negatīvi iespaidot mācību kvalitāti.



3.3. att. CO₂ koncentrācijas līmeņa izmaiņas izglītības iestāžu telpās diennakts laikā.

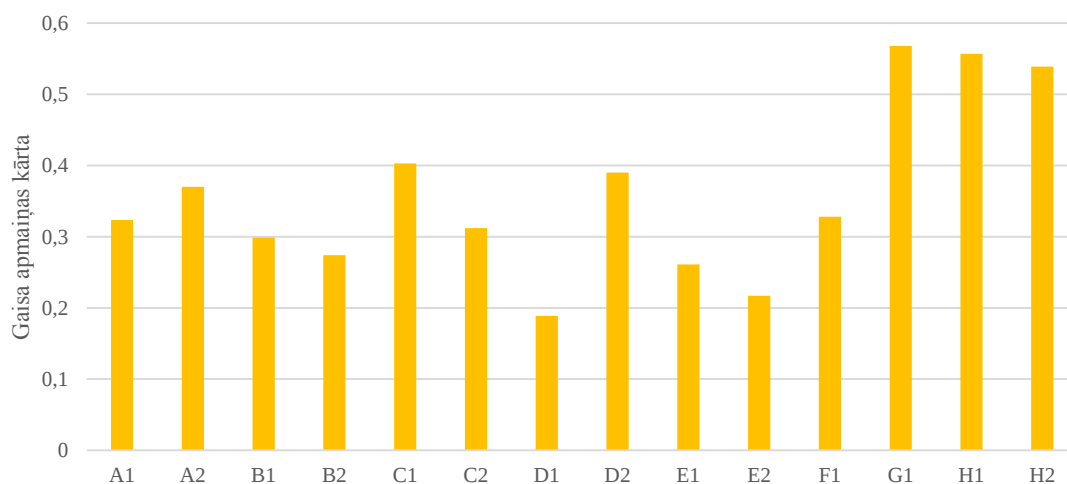
Vairumā gadījumu darba laikā tas neatbilst labai gaisa kvalitātei un tikai dienas beigās samazinās un iekļaujas optimālā CO₂ koncentrācijas līmenī (zem 1000 ppm). Novērojamie īslaicīgie un krasie CO₂ koncentrācijas samazināšanās brīži, pēc kuriem koncentrācija strauji paaugstinās, norāda, ka telpas tiek vēdinātas, atverot logus. Tādējādi tiek veikta siltā telpas gaisa un aukstā gaisa ar zemāku CO₂ koncentrāciju apmaiņa. Āra gaisa sildīšanai ir nepieciešama papildu siltumenerģija. Logu atvēršanas ventilācijas scenāriji norāda uz to īslaicīgo efektu. Mācību telpās ir nepietiekama gaisa kvalitāte, un ir nepieciešama pastāvīga ventilācija, lai nodrošinātu apmierinošus gaisa kvalitātes parametrus telpās.

Lielāko daļu ventilācijas iekārtu darbina tikai pēc nepieciešamības, kā tas ir noskaidrots, intervējot darbiniekus, un to apstiprina arī mērījumu rezultāti, kas atspoguļoti 2. un 3. publikācijās.

Gaisa apmaiņas kārta un gaisa pieplūde telpās

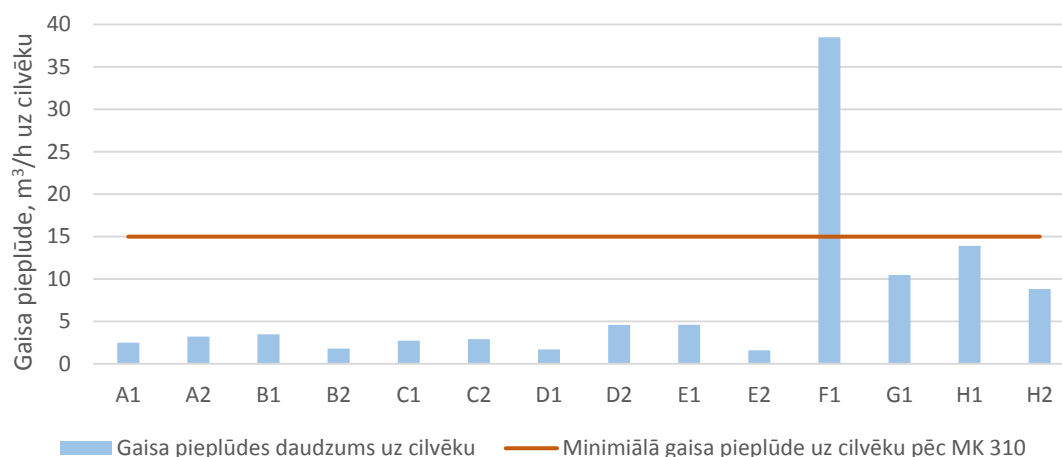
Sēra heksafluorīda koncentrācija pirmsskolas izglītības iestādes A ēkas 1. telpā 20 minūšu laikā samazinājās tikai par aptuveni 15 ppm. Šajā telpā gaisa apmaiņas kārta ir 0,32 h⁻¹, tādējādi telpā gaiss nomainās tikai aptuveni vienreiz trīs stundās.

Visu telpu aprēķinātās gaisa apmaiņas kārtas vērtības ir redzamas 3.4. attēlā. Vidusskolu ēkās (D un E) rādītāji vienā no telpām ir viszemākie, attiecīgi 0,19 h⁻¹ un 0,22 h⁻¹. Pirmsskolas izglītības iestādēs rādītāji ir mazliet augstāki – vismaz 0,27 h⁻¹. Vislabākā gaisa apmaiņas kārta ir G un H ēkā, kur ikdienā uzturas mazāk nekā trīs cilvēki. Rezultāti korelē ar augstāk apskatītajiem CO₂ koncentrāciju mērījumiem – koncentrācija dienas beigās samazinās ļoti lēni.



3.4. att. Gaisa apmaiņas kārtas aprēķinu rezultāti.

Izmantojot rezultātus, kas iegūti pēc marķiergāzes mērījumiem, tika aprēķināts svaiga gaisa pieplūdes daudzums uz cilvēku (3.5. att.). Visās izglītības iestādēs iegūtie rādītāji neatbilst MK noteikumu Nr. 310 prasībām [55]. Citās pašvaldības iestādēs rādītāji ir mazliet augstāki, tomēr tikai tiesībsargājošajā struktūrvienībā gaisa pieplūde ir pietiekama.



3.5. att. Gaisa pieplūdes daudzums uz cilvēku.

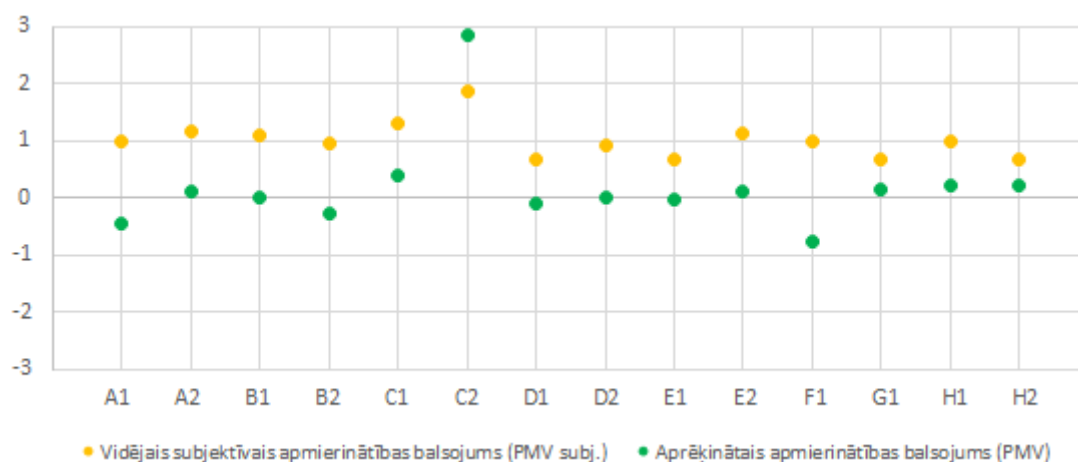
Telpu svaigā gaisa daudzums norāda uz kritiski zemiem rādītājiem, kas apstiprina ogļskābās gāzes novērojumu rezultātu, ka telpās netiek nodrošināta regulāra svaiga gaisa pieplūde.

Gaisa noplūde

Blower door testa laikā tika fiksēti gaisa plūsmas rādītāji. Lai noteiktu gaisa apmaiņas kārtu telpai pie 50 Pa un 4 Pa spiediena starpības, tiek izmantota iegūtā gaisa plūsma. Šie dati ļauj analizēt attiecīgo telpu blīvumu un sniedz izpratni par ēkas hermētiskumu. Ņemot vērā testa ierīces lietošanas un rezultātu interpretēšanas vadlīnijas [56], vairums izglītības iestāžu ir vērtējamas kā vidēji blīvas, un tām var būt nepieciešama mehāniskā ventilācija.

Apmierinātības vidējais balsojums

Izmantojot aptaujas laikā fiksētos gaisa parametrus, ar Fanger modeļa palīdzību iegūtas apmierinātības vidējā balsojuma vērtības. Veikto aptauju un aprēķināto *PMV* vērtību izkliede redzama 3.6. attēlā.



3.6. att. Vidējais subjektīvais un aprēķinātais apmierinātības vidējais balsojums.

Gandrīz visos gadījumos cilvēku aptaujās iegūtais vērtējums ir augstāks nekā aprēķinātais. Cilvēki, atrodoties konkrētajā telpā, jūtas siltāk, nekā to ir noteicis izmantotā modeļa aprēķins. C ēkas 2. telpā subjektīvais vērtējums ir mazliet zemāks, nekā modeļa vērtējums, tomēr abi rezultāti raksturo karstu un neapmierinošu vidi.

Renovētajās ēkās saskaņā ar *EN 15251:2007* standartu būtu jānodrošina II kategorijas gaisa kvalitātes līmenis. Šādi apmierinātības vidējā balsojuma vērtībai būtu jābūt robežās no – 0,5 līdz +0,5. Aprēķinātās *PMV* vērtības vairumā gadījumu ir atbilstošas [57].

Termālā komforta ietekme uz cilvēku veikspēju

Pēc veiktajiem aprēķiniem potenciālie veikspējas zudumi apkopoti 3.1. tabulā. C ēkas 2. telpai pēc izvēlēta modeļa veikspējas zuduma skaitlisko vērtību nebija iespējams iegūt, jo apmierinātības vidējā balsojuma vērtība bija pārāk liela – 2,86. Tomēr ir iespējams pieņemt, ka gan domāšanas, gan rakstīšanas uzdevumiem tas būtu robežās no 30 % līdz 35 %, jo, sasniedzot 1,28 vērtību, *PMV* ietekme uz cilvēka veikspēju kļūst nemainīga. No pētītajām ēkām B, D un E ēku 1. telpu rezultāti nodrošina vislabākos apstākļus darba ar mazu fizisku piepūli veikšanai [42]. Rezultāti tika iegūti, ņemot vērā konkrētu brīžu termiskos apstākļus attiecīgajās telpās un aktivitātes līmeni, tomēr netika ņemta vērā gaisa kvalitāte un to ietekmējošie faktori. Iegūtajiem rezultātiem ir ilustratīvs raksturs.

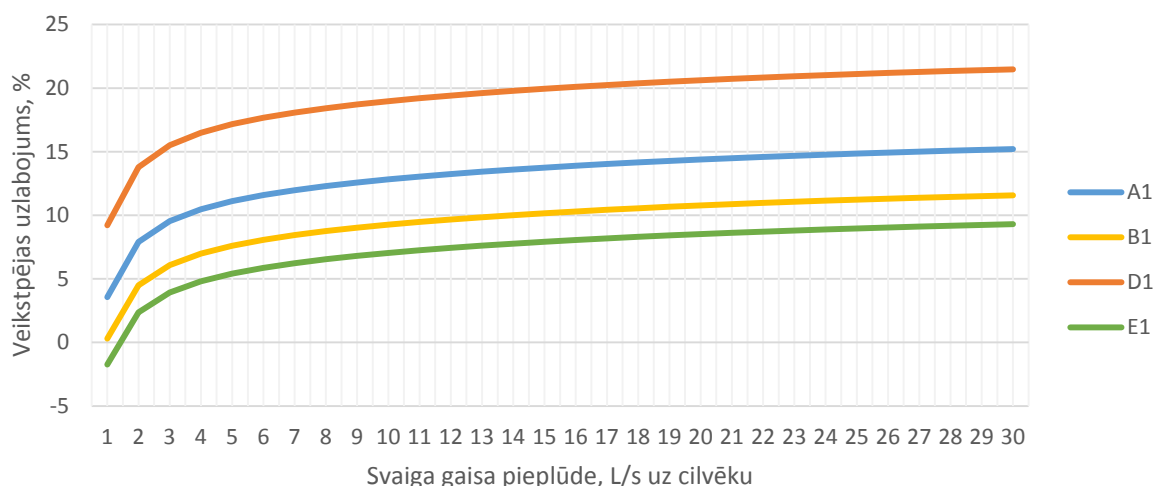
3.1. tabula

Termālā komforta ietekme uz veikspējas zudumu

Telpa	Aprēķinātais <i>PMV</i>	PPD, %	Domāšanas uzdevumu veikspējas zudums Y_{ds} , %	Rakstīšanas veikspējas zudums Y_r , %
A1	–0,46	9,38	9,38	18,76
A2	0,13	5,37	3,92	9,86
B1	0,01	5,00	2,01	5,23
B2	–0,28	6,60	6,60	13,20
C1	0,41	8,46	9,86	22,77
C2	2,86	98,32	–	–
D1	–0,10	5,19	0,74	2,18
D2	0,02	5,01	2,15	5,56
E1	–0,02	5,01	1,62	4,28
E2	0,12	5,30	3,74	9,43
F1	–0,77	17,54	17,54	35,08
G1	0,14	5,40	4,10	10,30
H1	0,22	6,02	5,64	13,98
H2	0,21	5,87	5,44	13,50

Ventilācijas ražības ietekme uz cilvēku veikspēju

Pēc veiktajiem marķiergāzes mērījumiem tika noskaidrota gaisa apmaiņas kārtā un svaiga gaisa pieplūde uz personu katrā no telpām, kā arī veikti aprēķini, lai noteiktu, kā mainās sagaidāmā personas veikspēja dažādos gaisa pieplūdes apjomos. Tas ir vizualizēts 3.7. attēlā.



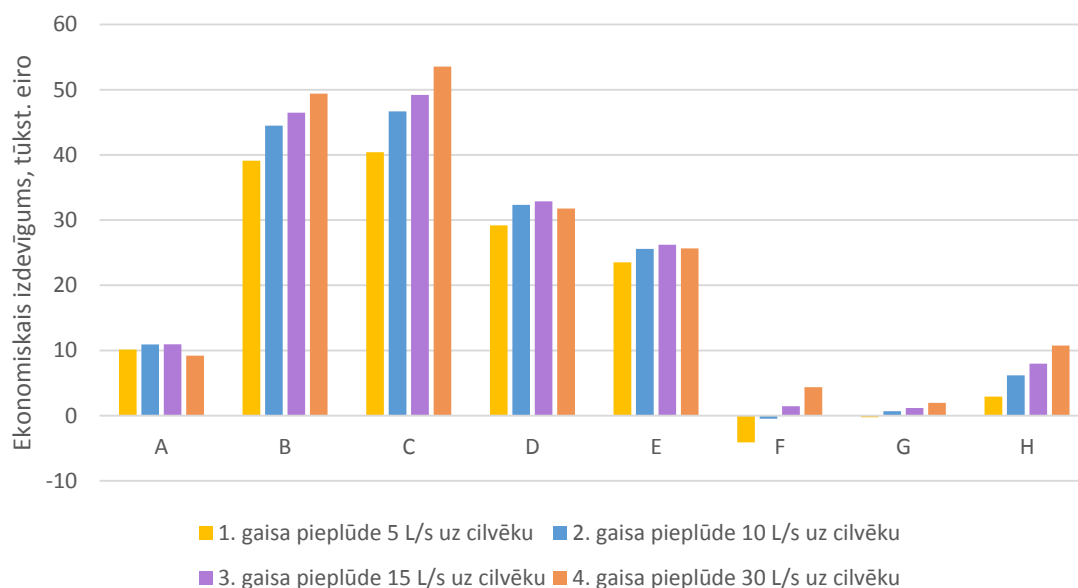
3.7. att. Veiktspējas uzlabojums atkarībā no svaiga gaisa pieplūdes L/s uz cilvēku.

Cilvēka veiktspēju svaiga gaisa pieplūde ietekmē visvairāk, ja to paaugstina no viszemākās vērtības. Garīgā darba spēju uzlabojums četrus no pētījumā iekļautajām ēkām gadījumā ir atspoguļots 3.7. attēlā. Visstraujākās izmaiņas ir novērojamas, mainot svaiga gaisa pieplūdes daudzumu no 1 L/s līdz 5 L/s uz personu. Diapazonā no 5 L/s līdz 10 L/s uz cilvēku izmaiņas jau kļūst mazāk izteiktas, un turpmāk rada arvien mazākus ietekmi. Vislielākā ietekme ir novērojama D ēkas 1. telpā, savukārt E ēkas 1. telpā tā ir vismazākā. Sākotnēji noteiktais gaisa pieplūdes daudzums šajās telpās bija attiecīgi 0,47 L/s un 1,28 L/s uz personu. E ēkas 1. telpā 1 L/s uz personu rada gaisa apmaiņas samazinājumu, tāpēc arī rodas negatīvs rezultāts.

Veiktspējas izmaiņu ekonomiskā ietekme

Pirmo scenāriju (5 L/s uz personu) var īstenot gandrīz visās ēkās, izmantojot jau esošās gaisa apstrādes iekārtas. Lai gan pieaugs elektroenerģijas izdevumi, tiks sasniegts lielāks ekonomiskais ieguvums, tādējādi nodrošinot mazliet lielāku svaigā gaisa pieplūdi, nekā norādīts MK noteikumos Nr. 310 [55], visās izglītības iestāžu ēkās (A–E) jau pirmajā gadā ir pozitīvs ekonomiskais ieguvums. Administratīvajām ēkām ar zemu cilvēku blīvumu (F–H) ekonomiskais ieguvums ir tuvu nullei vai negatīvs. Otrā scenārija ieviešanai nepieciešamie ieguldījumi pirmajā gadā vēl neatmaksāsies. Trešais un ceturtais scenārijs ar esošajām iekārtām ir īstenojams tikai ēkā H.

Ekonomiskais izdevīgums scenāriju otrajā īstenošanas gadā ir ilustrēts 3.8. attēlā. Visu izglītības iestāžu ēkās ir novērojama pozitīva ietekme visos scenārijos, jo veiktspējas uzlabojumu radītais ekonomiskais ieguvums ievērojami pārsniedz ekspluatācijas izmaksas. A ēkā ir novērojams, ka 5 L/s uz personu rada lielāku pozitīvu ietekmi nekā 30 L/s uz personu, tādējādi ir īpaši svarīgi, lai esošās iekārtas tiktu izmantotas.



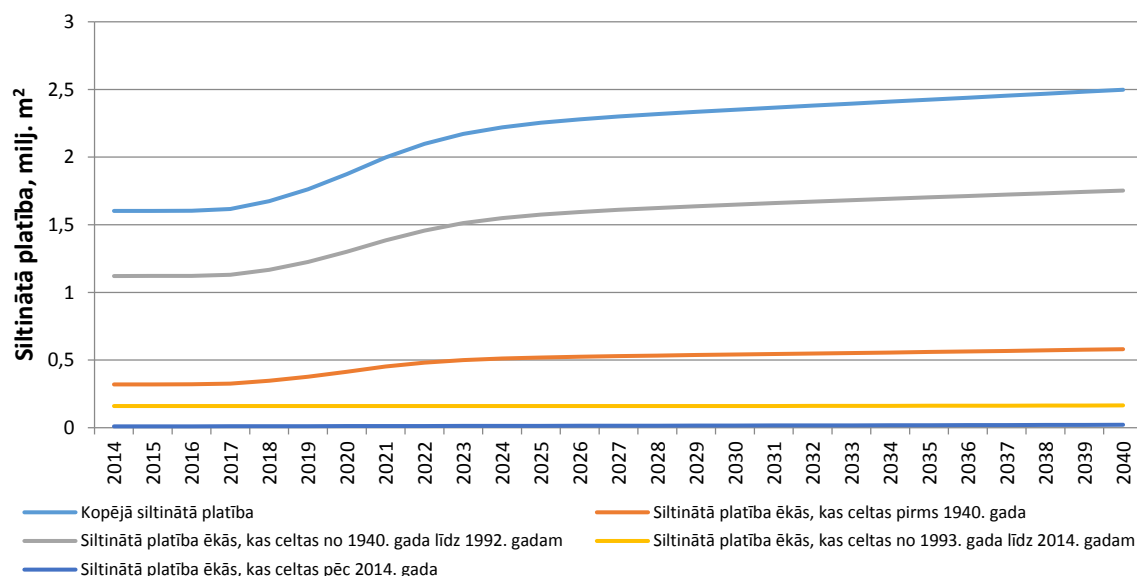
3.8. att. Ekonomiskais izdevīgums četru ventilācijas scenāriju īstenošanā otrajā gadā.

Ekonomisko ieguvumu aprēķinā ir iekļautas audzēkņu mācību izmaksas un darbinieku vidējais atalgojums. Ja skolēniem uzlabojas veiktspēja, tad mazāk laika būtu nepieciešams vielas atkārtotai apguvei, papildu nodarbībām, un vērojami arī citi aspekti, kas var samazināt kopējos izdevumus audzēkņu skološanai. Arī biroja darbiniekiem, paveicot darbu ātrāk un kvalitatīvāk, būtu iespējams samazināt izdevumus [58].

3.2. Energoefektivitātes ieviešana valsts un pašvaldības iestāžu ēkās

Enerģijas patēriņa ietaupījuma simulācija tika veikta, izmantojot vairākus politikas instrumentus, un veiktas prognozes diviem nacionālās politikas dokumentos minētajiem termiņiem – 2016. un 2020. gadam. 1. un 4. publikācijā atspoguļotie rezultāti rāda, ka līdz 2016. gadam bez politiku īstenošanas neizdosies sasniegt nacionālajos politikas dokumentos plānoto 408 GWh ietaupījumu, toties līdz 2020. gadam var sasniegt 657 GWh ietaupījumu. Vislabākos rezultātus parāda CO₂ nodokļa politikas īstenošana. Ja tiek īstenots šis politikas pasākums, tad līdz 2016. gadam ir iespējams sasniegt 88 % mērķa, kas ir definētajam mērķim iespējami tuvākais enerģijas patēriņa ietaupījums, savukārt līdz 2020. gadam parametra vērtība var pārsniegt plānoto mērķi par aptuveni 80 %.

Dažādos periodos celto ēku energoefektivitātes pasākumu veikšanas dinamika redzama 3.9. attēlā. Vislielākais pieaugums vērojams ēkās, kas uzceltas no 1940. līdz 1992. gadam, tam seko vēsturiskās ēkas, kas uzceltas pirms 1940. gada. No 1993. līdz 2014. gadam būvētajās ēkās notiek nenozīmīgas izmaiņas.

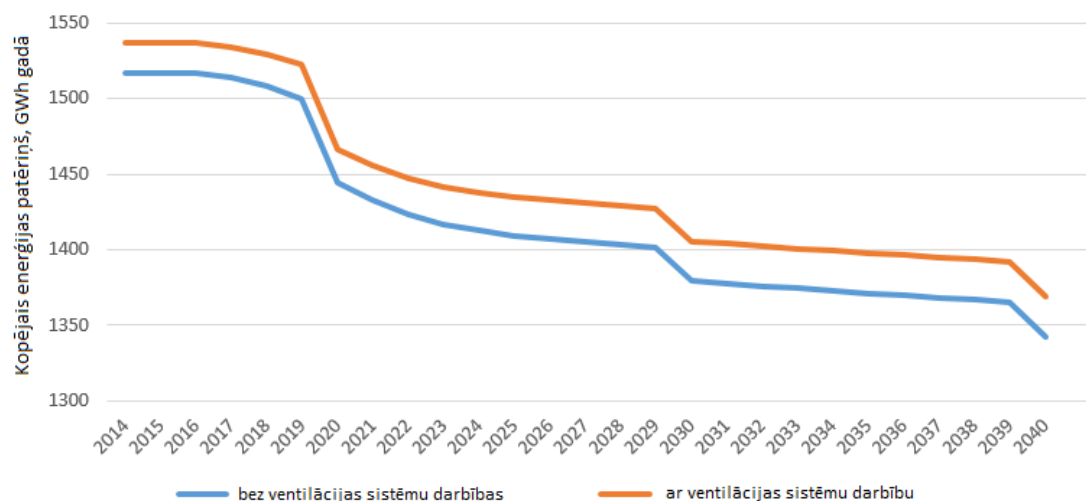


3.9. att. Sabiedrisko ēku siltinātā platība.

Katrs politikas instruments ietekmē gan siltināšanas tempu, gan kopējo enerģijas patēriņu, radot pozitīvu iespaidu energoefektivitātes jomā un labvēlīgi ietekmējot klimatu kopumā. Raugoties ēku siltināšanas aspektā, Latvija var sasniegt definētos mērķus līdz 2020. gadam, taču jāņem vērā, ka, beidzoties pieejamajam KPFI un ES struktūrfondu finansējumam, valsts un pašvaldību iestāžu vēlme siltināt ēkas no saviem līdzekļiem strauji samazināsies. Ņemot vērā to, ka turpmāk tiks izvirzīti vēl augstāki mērķi un ir jāveicina zema patēriņa ēku būvniecība, tas var radīt sarežģījumus. Tāpēc ir laikus jāpārdomā iespējamās politikas un rīcība, lai valsts un pašvaldību ēkas atbilstu noteiktajiem kritērijiem un palīdzētu radīt plānoto enerģijas ietaupījumu.

Dabiskās un mehāniskās ventilācijas ietekme uz kopējo enerģijas patēriņu

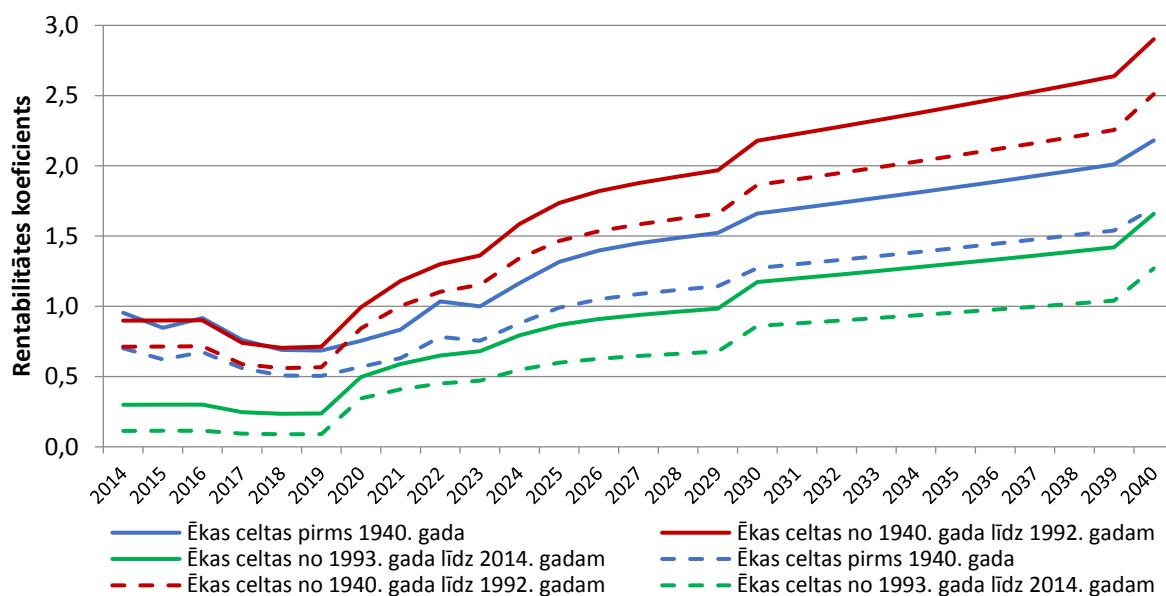
4. publikācijā aprakstītā simulācija parāda kopējo enerģijas patēriņu sabiedriskajās ēkās gan ar mehāniskās ventilācijas sistēmu darbību, gan bez tās. Iegūtais rezultāts redzams 3.10. attēlā. Abos gadījumos kopējais enerģijas patēriņš samazinās. Sākumā atšķirība starp abām alternatīvām ir 1,3 %, un ar laiku tā palielinās. Līdz 2040. gadam tā sasniedz 2 % jeb CO₂ emisijas 7050 t gadā. Prognozējams, ka līdz 2040. gadam tiks veikti energoefektivitātes paaugstināšanas pasākumi 667 tūkst. m², kas ir aptuveni 10 % no kopējās ēku, kas celtas līdz 2014. gadam, platības. Ja energoefektivitātes pasākumi tiktu īstenoti ar lielāku ātrumu, enerģijas patēriņa starpība starp divām alternatīvām palielinātos līdz 2040. gadam.



3.10. att. Kopējais enerģijas patēriņš sabiedriskajās ēkās ar mehāniskās ventilācijas darbības un bez tās pēc energoefektivitātes pasākumu veikšanas (4. publikācija).

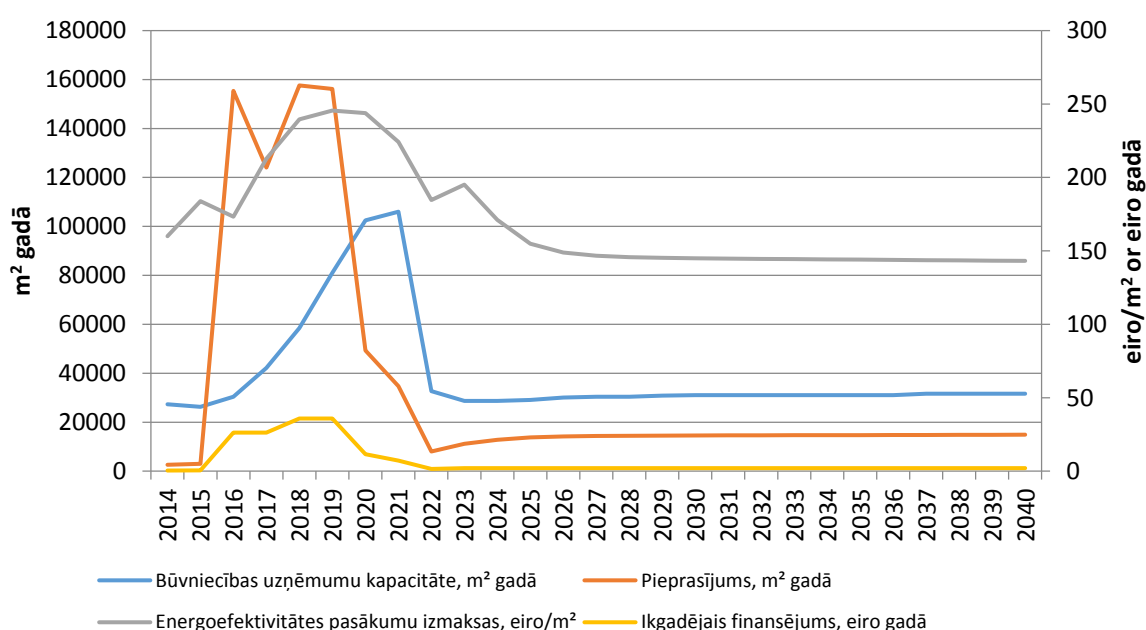
Dažādu būvniecības periodu ēku siltināšanas rentabilitāte

Energoefektivitātes pasākumu veikšanas dinamiku raksturo rentabilitātes koeficients. Tas ir visaugstākais ēkām, kas uzceltas no 1940. līdz 1992. gadam, jo tām ir vislielākais energoefektivitātes potenciāls. Vēsturiskajam ēku fondam tas ir zemāks tehnisko ierobežojumu un mantojuma vērtības dēļ (3.11. att.). Vismācākais rentabilitātes koeficients ir ēkām, kas uzceltas no 1993. līdz 2014. gadam, jo tām ir vismazākais energoefektivitātes potenciāls.



3.11. att. Energoefektivitātes pasākumu rentabilitātes koeficients sabiedriskajās ēkās ar mehāniskās ventilācijas darbību (punktētās līnijas) un bez tās (pildītās līnijas) pēc energoefektivitātes pasākumu ieviešanas.

Rentabilitātes koeficients parāda dinamisko uzvedību laika gaitā. Izmaiņas izraisa atgriezeniskās saites, nelinearitāte un sistēmā iebūvētie kavējumi. Kad finansējums nav pieejams, energoefektivitātes pasākumu pieprasījums un piedāvājums ir zems, tāpat arī cenas (3.12. att.). Tiklīdz finansējums nonāk tirgū, palielinās pieprasījums un arī piedāvājums, lai gan būvniecības uzņēmumu kapacitātes palielināšanai ir nepieciešams laiks. Šādos apstākļos cenas strauji palielinās, jo pastāv atšķirība starp piedāvājumu un pieprasījumu. Tad, kad šie lielumi ir līdzsvarā, cenas pamazām sāk kristies. Kad finansējuma plūsma apstājas, samazinās pieprasījums, kam seko piedāvājums, un pēc noteikta perioda – arī cenas. Šis process, kurā pēkšņi tirgū ieplūst liels finansējums, izraisa rentabilitātes samazināšanos, kā redzams 3.11. attēlā. Augsto cenu dēļ var siltināt mazāk ēku, salīdzinot ar apstākļiem pirms finansējuma saņemšanas.

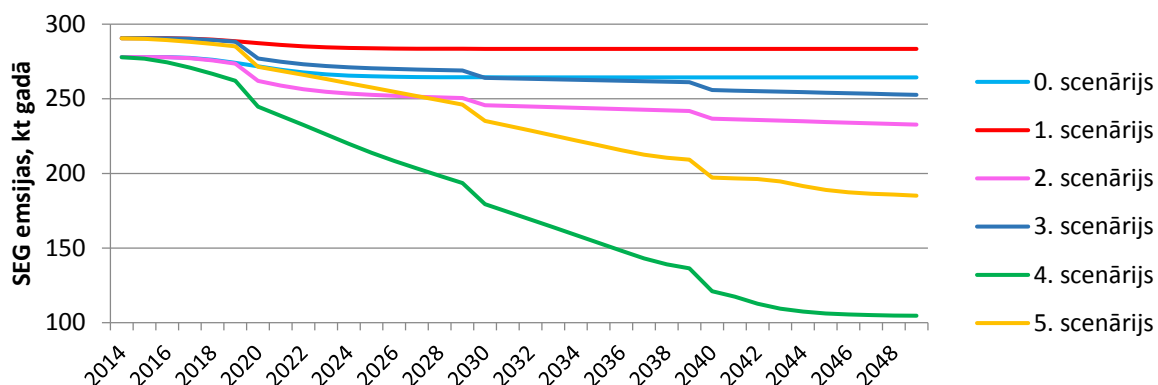


3.12. att. Sabiedrisko ēku energoefektivitātes pasākumu piedāvājums, pieprasījums, izmaksas un finansējums.

3.3. Energoefektivitātes un iekštelpu gaisa kvalitātes dilemmas izglītības iestādēs ietekme uz iekšzemes kopproduktu

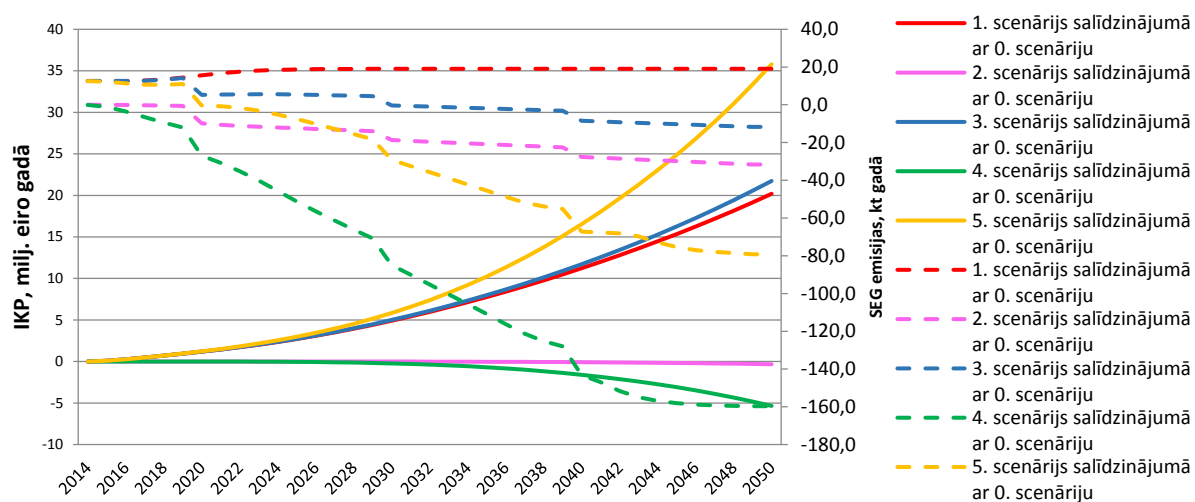
5. publikācijā aprakstītais modelis un ar to iegūtie siltumnīcefekta gāzu emisiju simulācijas rezultāti dažādiem scenārijiem ir parādīti 3.13. attēlā. Viszemāko SEG samazinājumu panāk ar 1. scenāriju, kam seko 0. scenārijs. Abos scenārijos energoefektivitātes pasākumu īstenošana ir ļoti lēna, jo pēc 2022. gada trūks finanšu. Atšķirību starp šiem diviem scenārijiem rada gaisa apmaiņas kārtā – jo augstāks šis rādītājs, jo lielāks ir enerģijas patēriņš, attiecīgi – arī SEG emisijas. 2. un 3. scenārijā parādīts lielāks SEG emisiju samazinājums. Tas ir saistīts ar energoefektivitātes projektiem piešķirto papildu finansējumu. Līdzīgi kā 0. un 1. scenārijā, atšķirību rada ventilācijas sistēmu darbība. 4. un 5. scenārijs parāda ievērojamu SEG samazinājumu, jo lielākajai daļai ēku ir uzlabojusies

energoefektivitāte. Atšķirība starp ēkām ar mehānisko un dabisko ventilāciju 2050. gadā sasniegs 80 kt.



3.13. att. Siltumnīcefekta gāzu emisijas dažādiem scenārijiem.

Scenārijus salīdzina pa pāriem, jo galvenā atšķirība starp scenārijiem ir gaisa maiņas ātrums ($0,5 \text{ h}^{-1}$ vai 6 h^{-1}): 0. un 1. scenārijs, 2. un 3. scenārijs un 4. un 5. scenārijs. 3.14. attēlā redzamas divu parametru izmaiņas laika gaitā – ienākumu radītais IKP un energoefektivitātes pasākumu rezultātā samazinātās SEG emisijas.

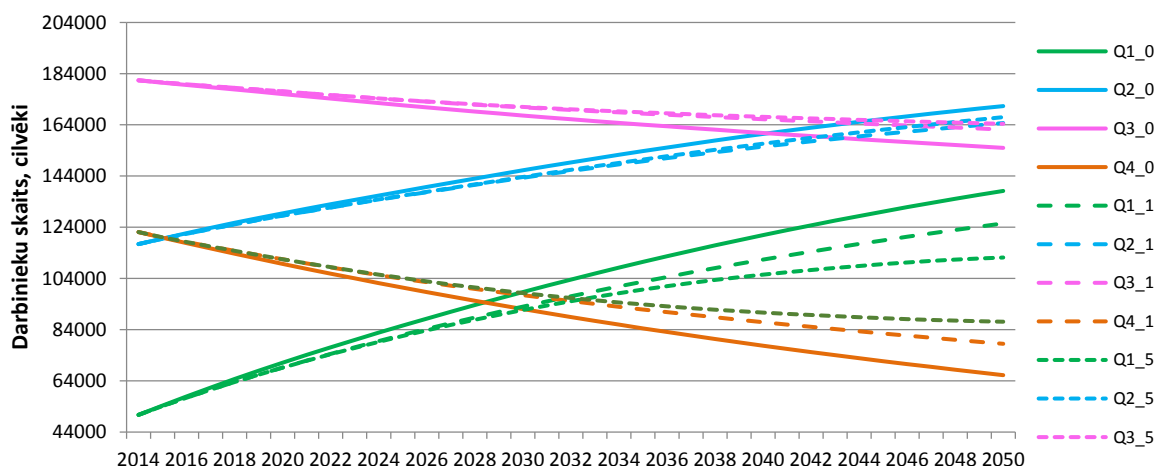


3.14. att. 1.–5. scenārija salīdzinājums pa pāriem un ar bāzes scenāriju (pilnas līnijas – IKP ienākumu pieaugums; pārtrauktās līnijas – SEG emisiju samazinājums).

Ar pietiekamu finansējumu un mehāniskās ventilācijas darbību (5. scenārijs) IKP ir visaugstākais pieauguma temps, un tas sasniedz vērtību, kas ir par 36 miljoniem eiro/gadā augstāka nekā 0. scenārijā. Tajā pašā laikā 5. scenārijs rāda otru augstāko SEG emisiju samazinājumu, salīdzinot ar 0. scenāriju. Vislabāko SEG emisiju samazinājumu uzrāda 4. scenārijs, tomēr IKP šajā gadījumā pasliktinās, salīdzinot ar 0. scenāriju. Šāda situācija parāda, ka tad, ja ēku energoefektivitātes pasākumus īsteno bez labas iekštelpu gaisa kvalitātes, klimata pārmaiņu mērķus var sasniegt, kamēr IKP pieaugums krītas.

Pētījuma laikā tika izveidots optimālais scenārijs (6. scenārijs), izmantojot *Powersim Studio* optimizācijas rīku. Tādējādi tika iegūti 6. scenārija ievades dati – papildu 74,66 miljoni eiro gadā no valsts un pašvaldību finansējuma avotiem un $4,05 \text{ h}^{-1}$ gaisa maiņas kārtā.

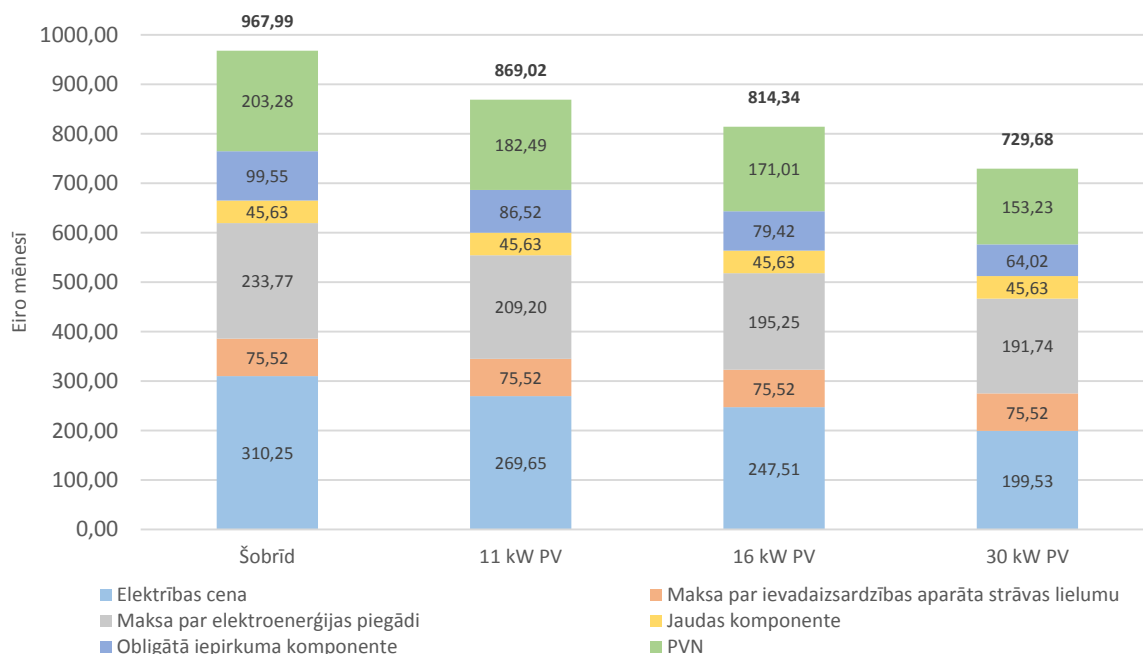
3.15. attēlā redzama kvalificēta darbaspēka apakšgrupu dinamika atbilstoši 0., 1. un 5. scenārijam. Ja tiek uzlabota iekštelpu gaisa kvalitāte, samazinās mazāk apmaksātu apakšgrupu darbinieku skaits, palielinoties augsti apmaksātu apakšgrupu skaitam. Tas ir saistīts ar augstākiem sasniegumiem izglītības procesā, ja tiek uzlabota gaisa kvalitāte telpās. Tāda pati tendence vērojama vidējas kvalifikācijas darbaspēka apakšgrupās.



3.15. att. Kvalificēta darbaspēka dinamika dažādās apakšgrupās (Q1 – darbaspēks ar zemu ienākumu līmeni; Q2 – ar vidēji zemu ienākumu līmeni; Q3 – ar vidēji augstu ienākumu līmeni; Q4 – darbaspēks ar augstu ienākumu līmeni) scenārijiem 0, 1 un 5.

3.4. Izglītības iestāde kā ražojošs patērētājs

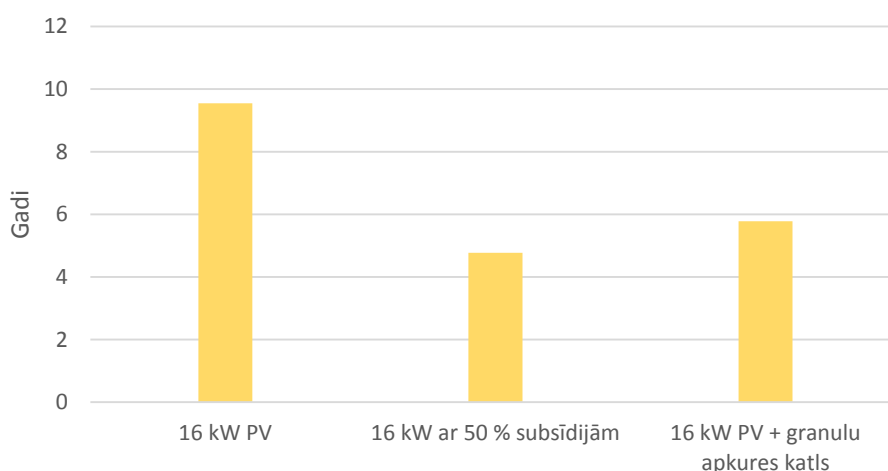
6. publikācijā raksturotie izmaksu un ieguvumu aprēķini, rāda, ka gadā no saules paneļiem saražotā elektroenerģija būs aptuveni 963 kWh uz vienu uzstādīto paneļu jaudas kW. Izglītības ēkai, kas pati vismaz daļēji ražo elektroenerģiju, samazinās elektrības izmaksas. Mēneša vidējais elektroenerģijas tarifs variē starp scenārijiem (3.16. att.), un vislabāko rezultātu sniedz augstākās uzstādītās jaudas scenārijs, tomēr jāņem vērā, ka šajā gadījumā gandrīz puse no enerģijas ieplūst tīklā. Saražotais elektroenerģijas daudzums pirmajā gadā nebūs tāds pats, kā pēc 25 gadiem, jo saules paneļu ražotāji garantē 80 % efektivitāti kalpošanas laika beigās, tāpēc, lai iegūtu maksimālo labumu, investīciju atmaksāšanās laikam vajadzētu būt iespējami īsam.



3.16. att. Mēneša vidējais elektrības rēķins pirms un pēc saules paneļu uzstādīšanas.

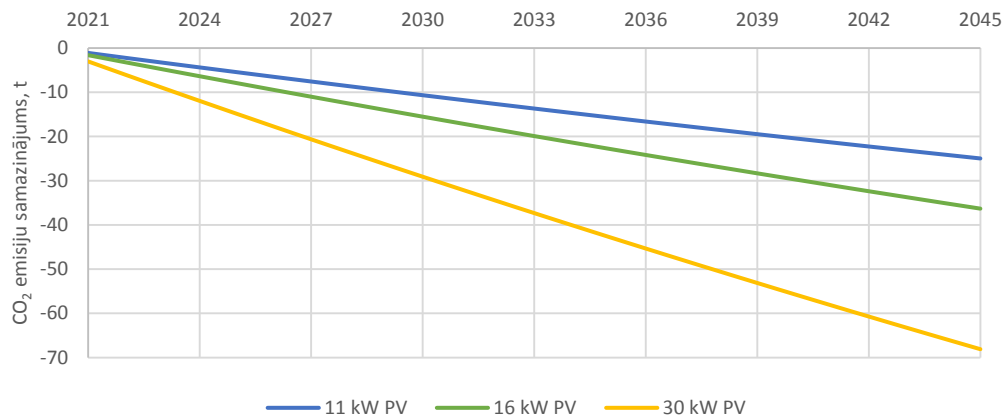
Saules paneļu sistēmas kapitāla izmaksas un ieguldījumu atmaksāšanās laiks ir parādīts 6. publikācijā. 16 kW sistēmas kapitālieguldījumu atmaksāšanās laiks ir mazāks nekā 11 kW un 30 kW sistēmām, tomēr gandrīz 10 gadu periods nav apmierinošs rezultāts.

Atmaksāšanās laiku var saīsināt uz pusi, ja tiktu piesaistīts mērķfinansējums 50 % apmērā no kapitālieguldījumiem. Biomasas katla uzstādīšanas atmaksāšanās laiks ir aptuveni 4,2 gadi. Apkures izmaksas būs zemākas, tāpēc šie ietaupījumi varētu būt kā “subsīdija” saules paneļu sistēmai. Šāds scenārijs palīdzētu samazināt saules paneļu atmaksāšanās laiku līdz aptuveni 6 gadiem (3.17. att.).



3.17. att. Investīciju atmaksāšanās laiks.

CO₂ izmešu samazinājums, ja tiek izmantota saules paneļu sistēma, ir parādīts 3.18. attēlā. Saules paneļu sistēma ar jaudu 16 kW var samazināt aptuveni 36 t CO₂ emisiju 25 gadu periodā. Saražojot vairāk elektroenerģijas, rodas lielāks CO₂ izmešu samazinājums, tomēr izglītības iestāžu ēkas elektroenerģijas patēriņa specifika liecina, ka sistēmas, kuru jauda pārsniedz 16 kW, tīklā ievada vairāk nekā 25 % no saražotās enerģijas.



3.18. att. CO₂ izmešu samazinājums.

SECINĀJUMI

1. hipotēze. Energoefektivitātes pasākumu ieviešana valstij un pašvaldībām piederošajās ēkās nodrošina nacionālo klimata politikas mērķu sasniegšanu.

Pirmā hipotēze tika pētīta 1. un 4. publikācijā, izmantojot izveidoto valsts un pašvaldībai piederošo ēku energoefektivitātes sistēmdinamikas modeli. Tas tika validēts, izmantojot pieejamos datus par Latvijas publiskā sektora enerģijas patēriņu, siltumenerģijas tarifu un tā izmaiņām, būvniecības izmaksām un citiem ietekmējošajiem parametriem. Papildus tam modelis tika validēts, izmantojot datus par Liepājas pašvaldību.

Hipotēze apstiprinājās, jo 1. publikācijā ziņotie modeļa rezultāti rāda, ka Latvija var sasniegt nacionālajos politikas dokumentos definētos mērķus līdz 2020. gadam, raugoties tikai ēku siltināšanas aspektā. Beidzoties pieejamajam KPFI un ES struktūrfondu finansējumam, valsts un pašvaldību iestāžu vēlme siltināt ēkas no saviem līdzekļiem strauji samazināsies. Ekonomiskais ieguvums ir viens no svarīgākajiem kritērijiem lēmumu pieņemšanas procesā par ēku siltināšanu. Tāpēc, lai veicinātu valsts un pašvaldību iestāžu lēmumu pieņemšanu energoefektivitātes jomā, ir jāparāda energoefektivitātes pasākumu ietekme uz budžetu. Ir jāveicina ne tikai valsts un pašvaldību iestāžu ēku fasāžu siltināšana un logu nomaiņa, bet arī apkures sistēmu pielāgošana atjaunīgajiem energoresursiem, tā samazinot kopējo fosilo resursu patēriņa īpatsvaru. Savukārt 4. publikācijā parādīts, ka energoefektivitātes pasākumu ieviešanai sabiedriskajās ēkās ir liela ietekme uz iekštelpu gaisa kvalitāti, kas rada ēku energoefektivitātes un iekštelpu gaisa kvalitātes dilemmu. Simulācijas rezultāti rāda, ka, ja ventilācija tiek darbināta atbilstoši valsts būvnormatīviem, kopējais enerģijas patēriņš sabiedrisko ēku sektorā paaugstinās no 1,3 % 2014. gadā līdz 2 % 2040. gadā (jeb CO₂ emisijām 7050 t gadā), salīdzinot ar situāciju, kad nav mehāniskās ventilācijas.

2. hipotēze. Pēc energoefektivitātes pasākumu ieviešanas izglītības iestādēs veidojas energoefektivitātes un iekštelpu gaisa kvalitātes dilemma.

Hipotēze tika pētīta 2. un 3. publikācijās, veicot iekštelpu klimata mērījumus, nosakot gaisa apmaiņas kārtu un svaiga gaisa pieplūdi telpās, testējot ēkas hermētiskumu, kā arī veicot aptaujas izglītības iestādēs un paredzamā vidējā balsojuma aprēķinus.

Hipotēze apstiprinājās, jo 2. publikācijā pētītajās izglītības iestāžu ēkās konstatēts ilgstošs paaugstināts ogļskābās gāzes līmenis, kas dažos gadījumos ievērojami pārsniedz normatīvos noteiktās vērtības. Šajās ēkās, kurās ir augsts cilvēku blīvums, novērots, ka epizodiska telpu vēdināšana, atverot logu, rada īslaicīgu efektu un CO₂ koncentrācija strauji atgriežas paaugstinātā līmenī, jo pēc energoefektivitātes pasākumu ieviešanas ēkas ir kļuvušas hermētiskākas. Veiktie ēku blīvuma pārspiediena testi norāda, ka vairums izglītības iestāžu ir vērtējamas kā vidēji blīvas, kam nepieciešama mehāniskā ventilācija. Pētījumā veiktie mērījumi rāda, ka ēku mehāniskās ventilācijas sistēmas darbojas slikti. Marķiergāzes testa rezultāti liecina, ka gaisa apmaiņas ātrums lielākajā daļā ēku ir zems un svaiga gaisa padeve jāpalielina vismaz līdz valsts normatīvajos aktos noteiktajam rādītājam – 15 m³/h [55] uz cilvēku. Ventilācijas sistēmas pētītajās ēkās tiek ekspluatētas nepareizi. 3. publikācijā veiktās aptaujas norādīja telpu lietotāju subjektīvo vērtējumu no +0,67 līdz +1,86, kas nozīmē, ka audzēkņi un darbinieki vērtē iekštelpu vidi kā pārāk siltu un neapmierinošu.

3. hipotēze. Energoefektivitātes un iekštelpu gaisa kvalitātes dilemmai ir ilgtermiņa ietekme uz valsts iekšzemes kopproduktu.

Tā tika pētīta 3. un 5. publikācijā, izmantojot veiktspējas uzlabojuma aprēķinus un sistēmdinamikas modelēšanu.

Hipotēze apstiprinājās. 3. publikācijā veiktais pētījums norāda, ka, ieviešot scenāriju, kurā ir palielināta gaisa pieplūde līdz 30 L/s uz personu, ir iespējams sasniegt līdz pat 19 % garīgā darba spēju uzlabojumu. Secināts, ka apmācāmo veiktspējas uzlabojuma apmērs ir atkarīgs no sākotnējās gaisa apmaiņas kārtas. Svaiga gaisa nodrošināšana 5 L/s uz personu, īstenojot vienu no scenārijiem, vairumā izglītības iestāžu ēku ir iespējama bez papildu kapitālieguldījumiem, tādējādi tas būtu ekonomiski izdevīgi jau pirmajā gadā. 5. publikācijā simulācijas rezultāti rāda, ka pat tad, ja visām izglītības ēkām ir uzlaboti energoefektivitātes rādītāji un ir ievērojami samazināts āra CO₂ līmenis, CO₂ līmenis telpās būs ļoti augsts, ja netiks izmantota mehāniskā ventilācija. Vislabākais risinājums ir palielināt energoefektivitāti, vienlaikus nodrošinot labu iekštelpu gaisa kvalitāti, darbinot mehānisko ventilāciju, jo IKP pieaugums nodrošina finanšu avotus turpmākajiem energoefektivitātes pasākumiem. Rezultāti rāda, ka standartā *ASHRAE* un *EN 15251* izmantotās gaisa apmaiņas kārtas sniedz optimālu siltumnīcefekta gāzu samazinājumu un iekšzemes kopprodukta palielinājumu. Šajā pētījumā izveidotā modeļa struktūra ir universāla, to var izmantot dažādās valstīs ar atšķirīgu izglītības sistēmu, algām un citiem faktoriem.

4. hipotēze. Energoefektivitātes un iekštelpu gaisa kvalitātes dilemmu var atrisināt, ēkām kļūstot par enerģiju ražojošiem patērētājiem, izmantojot atjaunīgos energoresursus.

Ceturta hipotēze tika pētīta 6. publikācijā, analizējot ekonomiski pamatotākā risinājumu izglītības iestādes ēkas pārejai uz ražojošu patērētāju.

Ceturta hipotēze apstiprinājās daļēji, jo 6. publikācijā pētītās izglītības iestādes elektroenerģijas izmaksas varētu samazināt par 16 %, ja tiktu uzstādīta 16 kW saules paneļu sistēma. Šādas sistēmas atmaksāšanās laiks ir aptuveni 10 gadu. Atmaksāšanās laiku var saīsināt uz pusi, ja tiktu piesaistīts mērķfinansējums 50 % apmērā no kapitālieguldījumiem. Biomasas katla uzstādīšanas atmaksāšanās laiks ir aptuveni 4,2 gadi. Apkures izmaksas būs zemākas, tāpēc šie ietaupījumi varētu būt kā “subsīdija” saules paneļu sistēmai. Šāds scenārijs palīdzētu samazināt saules paneļu atmaksāšanās laiku līdz aptuveni sešiem gadiem. Tika analizēts arī ārpus tīkla esoša ražojoša patērētāja scenārijs, tomēr izglītības iestādes specifiskais enerģijas patēriņa profils un enerģijas akumulatoru cenas padara šo scenāriju nerentablu.

Saules paneļu izmantošana skolas ēkai nepieciešamās elektroenerģijas daļējai ražošanai ļāva samazināt vidējās elektrības izmaksas, kas parasti ir galvenais trūkums mehāniskās ventilācijas sistēmu regulārā darbināšanā. Šāds iekārtu izmantojums izglītības iestādēs ir iespējamais energoefektivitātes un iekštelpu gaisa kvalitātes dilemmas risinājums.

LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] "DIRECTIVE (EU) 2018/844 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency (Text with EEA relevance)".
- [2] "Energy Performance of Buildings Directive," *Structural Survey*, vol. 23, no. 1, 2005, doi: 10.1108/ss.2005.11023aab.001.
- [3] European Environment Agency, "Share of EU energy consumption from renewable sources, 2005–2050," 2019.
- [4] European Commission, "A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050," Brussels, 2011.
- [5] Enerģētikas stratēģija 2030.
- [6] Latvijas Republikas Otrais energoefektivitātes rīcības plāns 2011.-2013.gadam | POLSIS. [Online]. Available: <http://polsis.mk.gov.lv/documents/3754>. [Accessed: 12-May-2020].
- [7] E. Kamendere, G. Zogla, A. Kamenders, J. Ikaunieks, and C. Rochas, "Analysis of Mechanical Ventilation System with Heat Recovery in Renovated Apartment Buildings," *Energy Procedia*, vol. 72, pp. 27–33, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.06.005.
- [8] S. A. Ghita and T. Catalina, "Energy efficiency versus indoor environmental quality in different Romanian countryside schools," *Energy and Buildings*, vol. 92, pp. 140–154, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.01.049.
- [9] R. Becker, I. Goldberger, and M. Paciuk, "Improving energy performance of school buildings while ensuring indoor air quality ventilation," *Building and Environment*, vol. 42, no. 9, pp. 3261–3276, Sep. 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2006.08.016.
- [10] T. G. Theodosiou and K. T. Ordoumpozanis, "Energy, comfort and indoor air quality in nursery and elementary school buildings in the cold climatic zone of Greece," *Energy and Buildings*, vol. 40, no. 12, pp. 2207–2214, 2008, doi: 10.1016/j.enbuild.2008.06.011.
- [11] J. M. Daisey, W. J. Angell, and M. G. Apte, "Indoor air quality, ventilation and health symptoms in schools: an analysis of existing information.," *Indoor air*, vol. 13, no. 1, pp. 53–64, 2003, doi: 10.1034/j.1600-0668.2003.00153.x.
- [12] Higiēnas prasības izglītības iestādēm, kas īsteno vispārējās pamatizglītības, vispārējās vidējās izglītības, profesionālās pamatizglītības, arodizglītības vai profesionālās vidējās izglītības programmas. [Online]. Available: <https://likumi.lv/ta/id/69952-higienas-prasibas-izglitibas-iestadem-kas-isteno-visparejas-pamatizglitibas-visparejas-videjas-izglitibas-profionalas>. [Accessed: 04-May-2020].
- [13] G. Dall'O and L. Sarto, "Potential and limits to improve energy efficiency in space heating in existing school buildings in northern Italy," *Energy and Buildings*, vol. 67, no. 2013, pp. 298–308, 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.08.001.
- [14] G. Stankevica and A. Lesinskis, "Indoor Air Quality and Thermal Comfort in Latvian Daycare Centres," vol. 12, no. October 2010, pp. 59–63, 2011.
- [15] ASHRAE (American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), *2009 Ashrae Handbook: Fundamentals*, vol. 30329, no. 404. 2009.
- [16] W. J. Fisk, "The ventilation problem in schools: literature review," *Indoor Air*, vol. 27, no. 6, pp. 1039–1051, Nov. 2017, doi: 10.1111/ina.12403.
- [17] P. Wargocki and D. P. Wyon, "Providing better thermal and air quality conditions in school classrooms would be cost-effective," *Building and Environment*, vol. 59, pp. 581–589, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.buildenv.2012.10.007.
- [18] K. E. Charles, "Fanger's Thermal Comfort and Draught Models," *Institute for Research in Construction research report*, vol. RR-162, 2003.

- [19] Ansi/Ashrae, “ANSI/ASHRAE 55:2004 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy,” *Ashrae*, p. 30, 2004, doi: 10.1007/s11926-011-0203-9.
- [20] K. E. Charles, “Fanger ’ s Thermal Comfort and Draught Models Fanger ’ s Thermal Comfort and Draught Models IRC Research Report RR-162,” *October*, p. 29, 2003, doi: IRC Research Report RR-162.
- [21] *EN ISO 7730:2005, Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*. 2005.
- [22] P. M. Bluyssen, D. Zhang, S. Kurvers, M. Overtoom, and M. Ortiz-Sanchez, “Self-reported health and comfort of school children in 54 classrooms of 21 Dutch school buildings,” *Building and Environment*, vol. 138, pp. 106–123, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.04.032.
- [23] U. Satish, M. J. Mendell, K. Shekhar, T. Hotchi, and D. Sullivan, “Concentrations on Human Decision-Making Performance,” vol. 120, no. 12, pp. 1671–1678, 2012.
- [24] O. Seppanen, W. J. Fisk, and Q. H. Lei, “Ventilation and performance in office work,” *Indoor Air*, vol. 16, no. 1, pp. 28–36, Feb. 2006, doi: 10.1111/j.1600-0668.2005.00394.x.
- [25] D. Mumovic and M. Santamouris, *Sustainable Building Design and Engineering : An Integrated Approach to Energy , Health and Operational Performance*. London, 2009.
- [26] H. Hayward, E. Hunt, and A. Lord, “The economic value of key intermediate qualifications : estimating the returns and lifetime productivity gains to GCSEs , A levels and apprenticeships Research report,” no. December, 2014.
- [27] G. Brunello and S. Comi, “Education and earnings growth: Evidence from 11 European countries,” *Economics of Education Review*, vol. 23, no. 1, pp. 75–83, 2004, doi: 10.1016/S0272-7757(03)00048-7.
- [28] OECD, *Labour market and social policies in the Baltic Countries*, vol. 9789264100. Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD), 2003.
- [29] M. T. French, J. F. Homer, I. Popovici, and P. K. Robins, “What You Do in High School Matters: High School GPA, Educational Attainment, and Labor Market Earnings as a Young Adult,” *Eastern Economic Journal*, vol. 41, no. 3, pp. 370–386, Jun. 2015, doi: 10.1057/eej.2014.22.
- [30] World Bank, *World Development Report 2019 : The Changing Nature of Work*. 2019.
- [31] P. Shipkovs, A. Snegirjovs, J. Shipkovs, G. Kashkarova, K. Lebedeva, and L. Migla, Solar Thermal Cooling on the Northernmost Latitudes, *Energy Procedia*, vol. 70, pp. 510–517, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.02.155.
- [32] F. J. Aguilar, P. V. Quiles, and S. Aledo, “Operation and energy efficiency of a hybrid air conditioner simultaneously connected to the grid and to photovoltaic panels,” *Energy Procedia*, vol. 48, pp. 768–777, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.02.089.
- [33] O. Bernsen *et al.*, “IEA-RETD RESIDENTIAL PROSUMERS-DRIVERS AND POLICY OPTIONS (RE-PROSUMERS) The Authors would like to thank the following IEA-RETD RE-PROSUMERS Project Steering Group (PSG) members for their guidance and support throughout the project: LEAD AUTHOR CONTRIBUTING AUTHORS,” 2014.
- [34] M. Flaute, A. Großmann, C. Lutz, and A. Nieters, “Macroeconomic effects of prosumer households in Germany,” *International Journal of Energy Economics and Policy*, vol. 7, no. 1, pp. 146–155, 2017.
- [35] D. Keiner, M. Ram, L. D. S. N. S. Barbosa, D. Bogdanov, and C. Breyer, “Cost optimal self-consumption of PV prosumers with stationary batteries, heat pumps, thermal energy storage and electric vehicles across the world up to 2050,” *Solar Energy*, vol. 185, pp. 406–423, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.04.081.

- [36] EN 13779:2007 Requirements for Ventilation and Room-Conditioning Systems, *Management*, 2010.
- [37] CBCA, Thermal Comfort, *Technical Fact Sheet*, vol. 1, no. 2, pp. 1–7, 2013.
- [38] DELTA OHM SRL, *HD32.1 Thermal Microclimate manual*. 2009.
- [39] M. H. Sherman, “Tracer-Gas Techniques For Measuring Ventilation in a Single Zone,” *Building and Environment*, vol. 25, no. 4, pp. 365–374, 1990.
- [40] Innova AirTech Instruments A/S, *Ventilation Measurements And Other Tracer-Gas Applications*. Ballerup.
- [41] P. O. Fanger, *Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering*. New York: McGraw-Hill, 1972.
- [42] R. Kosonen and F. Tan, “Assessment of productivity loss in air-conditioned buildings using PMV index,” *Energy and Buildings*, vol. 36, no. 10 SPEC. ISS., pp. 987–993, 2004, doi: 10.1016/j.enbuild.2004.06.021.
- [43] O. Seppänen, “Association of ventilation rates and CO₂ concentrations with health and other responses in commercial and institutional buildings,” *Indoor Air*, vol. 9, no. 4, pp. 226–252, 1999.
- [44] Liepājas Izglītības pārvalde, “Liepājā visu vasaru darbosies četri bērnudārzi”.
- [45] G. Jākobsone, “Audzēknis Liepājas skolā izmaksā 31,97 eiro, bērnudārzā – 132,” 2015.
- [46] Liepājas Pilsētas dome, “Liepājas pilsētas sociālekonomiskais pārskats 2013,” 2013.
- [47] E. Krivko, “Komfovent SIA,” 2015.
- [48] Komfovent, “Gaisa apstrādes iekārtu piemeklēšanas programma VERSO,” 2015.
- [49] J. Forrester, *Industrial dynamics*. [Cambridge Mass.]: M.I.T. Press, 1961.
- [50] Y. Barlas, “Formal aspects of model validity and validation in system dynamics,” *System Dynamics Review*, vol. 12, no. 3, pp. 183–210, 1996, doi: 10.1002/(SICI)1099-1727(199623)12:3<183::AID-SDR103>3.0.CO;2-4.
- [51] J. Sterman, *Business dynamics : systems thinking and modeling for a complex world*. Irwin/McGraw-Hill, 2000.
- [52] Ekonomikas Ministrija, “Ēku renovācijas ilgtermiņa stratēģija,” Rīga, 2014.
- [53] U. Haverinen-Shaughnessy and R. J. Shaughnessy, “Effects of Classroom Ventilation Rate and Temperature on Students’ Test Scores,” *PLOS ONE*, vol. 10, no. 8, p. e0136165, Aug. 2015, doi: 10.1371/journal.pone.0136165.
- [54] MK noteikumi Nr. 359 Darba aizsardzības prasības darba vietās, 28.04.2009, 2009.
- [55] Noteikumi par Latvijas būvnormatīvu LBN 231-15 “Dzīvojamo un publisko ēku apkure un ventilācija.” [Online]. Available: <https://likumi.lv/ta/id/274815-noteikumi-par-latvijas-buvnormativu-lbn-231-15-dzivojamo-un-publisko-eku-apkure-un-ventilacija->. [Accessed: 12-May-2020].
- [56] F. Spevak, “Blower Door Basics : Tried and true techniques for using this diagnostic tool effectively,” 2010.
- [57] EN 15251:2007 Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings- addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics, *European Committee for Standardization*, 2007.
- [58] David W. McNamara, “Quanifying the Hidden Benefits of High-Performance Buildings,” no. December, pp. 1–19, 2011.