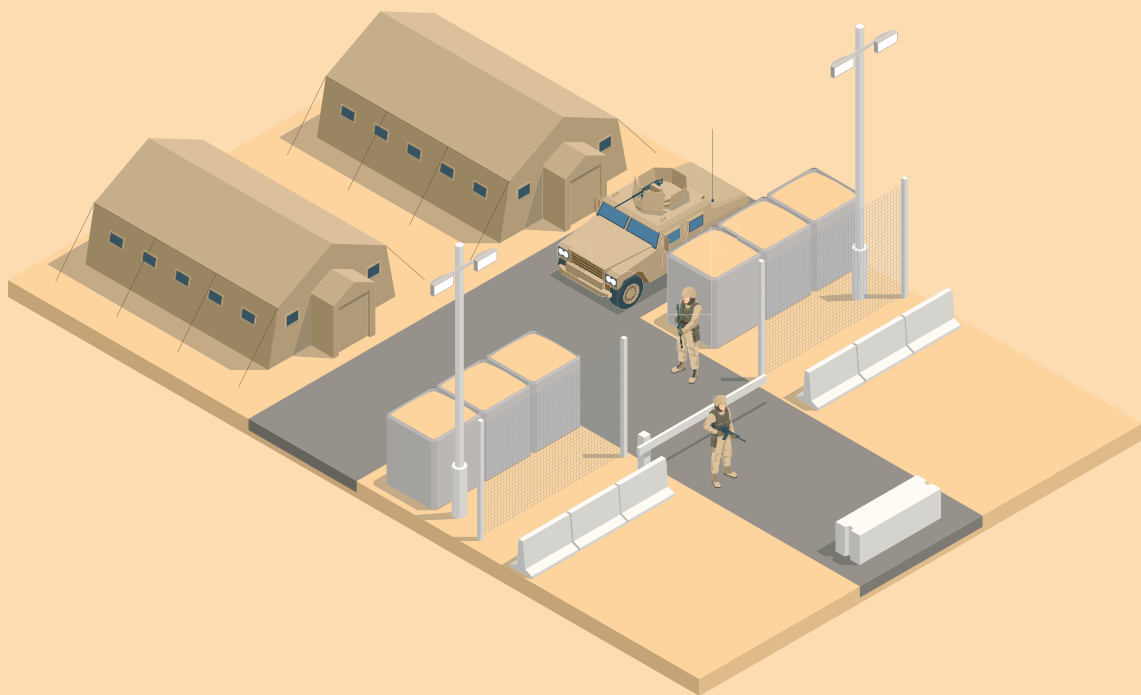


Aleksandrs Geikins

NEKLASIFICĒTO ĒKU ENERGOEFEKTIVITĀTES NOTEIKŠANAS METODOLOĢIJA

Promocijas darbs



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Būvniecības Inženierzinātņu fakultāte
Siltuma, gāzes un ūdens tehnoloģiju institūts

Aleksandrs GEIKINS

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

**NEKLASIFICĒTO ĒKU
ENERGOEFEKTIVITĀTES NOTEIKŠANAS
METODOLOĢIJA**

Promocijas darbs

Zinātniskie vadītāji:

Profesors *Dr. sc. ing.*
ANATOLIJS BORODIŅECS

Profesors *Dr. sc. ing.*
ALEKSANDRS KORJAKINS

RTU Izdevniecība
Rīga 2022

Geikins, A. Neklasificēto ēku energoefektivitātes noteikšanas metodoloģija. Promocijas darbs. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2022. – 130 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-12” 2022. gada 9. jūlijā lēmumu, protokols Nr. 2/22.



NACIONĀLAIS
ATTĪSTĪBAS
PLĀNS 2020



EIROPAS SAVIENĪBA
Eiropas Reģionālās
attīstības fonds

I E G U L D Ī J U M S T A V Ā N Ā K O T N Ē

Promocijas darbs tapis ar ES FONDI 2014–2020 darbības programmas “Izaugsme un nodarbinātība” 1.1.1. specifiskā atbalsta mērķa “Palielināt Latvijas zinātnisko institūciju pētniecisko un inovatīvo kapacitāti un spēju piesaistīt ārējo finansējumu, ieguldot cilvēkresursos un infrastruktūrā” 1. kārtā, projekta iesnieguma Nr.1.1.1.1/16/A/048 “Neklasificēto ēku gandrīz nulles enerģijas ēku risinājumi” un Rīgas Tehniskās universitātes Doktorantūras pētniecības grantu programmas atbalstu.

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2022. gada 11. oktobrī plkst. 13.00 Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības inženierzinātņu fakultātē, Ķīpsalas ielā 6 A, 546. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors Dr. of Sc. *Valerii Deshko*,
Ukrainas Nacionālā tehniskā universitāte, Ukraina

Asociētais profesors *Ph. D. Lakatos Ákos*,
Debrecenas Universitāte, Ungārija

Docente *Dr. sc. ing. Kristina Lebedeva*,
Rīgas Tehniskā universitāte

APSTIPRINĀJUMS

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

Aleksandrs Geikins

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, 5 nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 85 attēli, 30 tabulas, kopā 130 lappuses. Literatūras sarakstā ir 104 nosaukumi.

ANOTĀCIJA

Saskaņā ar Latvijas likumdošanu - Likumu par valsts noslēpumu, pie neklasificētām ēkām pieskaitāmas tādas nedzīvojamās ēkas, kā soda izciešanas iestādes, cietumi un apcietinājuma centri, bruņoto spēku, policijas vai ugunsdzēsības dienestu ēkas un šo iestāžu kazarmas, kā arī palīgēkas un telpu grupas palīgēkās.

Promocijas darbā tika pētītas bruņoto spēku, policijas un ugunsdzēsības dienestu ēkas. Neklasificētajām ēkām, tādām kā militārās ēkas, policijas ēkas un ugunsdzēsēju depo, ir liels potenciāls energoefektivitātes paaugstināšanai. NATO dalībvalstu pētījumi rāda, ka neklasificēto ēku energoefektivitāte varētu būt paaugstināma līdz pat 65% atkarībā no klimata zonas. Agrāk neklasificēto ēku energopatēriņu pētīja Borodiņecs A., Dzelzītis E., Krēsliņš A., Zajacs A., Zhivov A., Herron D., Liesen R., Ellis P., Case M., Deru M., Fisher D. u.c.

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt neklasificēto ēku energoefektivitātes noteikšanas metodoloģiju, vadlīnijas neklasificēto ēku tehniskās apsekošanas, kuras galvenais uzsvars tiek likts uz vienotu renovācijas un energoapgādes risinājumu izstrādi, kas nodrošinās augstu darba kvalitāti un iesaistīto personu skaita minimizēšanu ēku renovācijas procesā, lai sasniegtu un ierosinātu iespējamus uzlabojumus enerģijas patēriņa samazināšanai.

Uz doto brīdī Latvijā nav izstrādāta enerģijas patēriņa noteikšanas metodika, t.sk., energoefektivitātes noteikšanas metodoloģija, kura tieši adresēta pagaidu būvēm un pastāvīgi izvietotajām neklasificētajām ēkām.

Neklasificētu ēku energoefektivitātes risinājumi ir aktuāls jautājums, it īpaši tāpēc, ka liela daļa neklasificēto ēku tiek uzturēta par publiskiem līdzekļiem.

Izstrādāto metodoloģiju var praktiski pielietot veicot neklasificēto ēku segmentu attīstību plānošanas laikā, modelējot uzlabojošo energoefektivitātes paaugstināšanas pasākumu ietekmi uz ēku kopējo energoefektivitāti, nepiesaistot to pie konkrētas adreses un atrašanās vietas, ar finanšu instrumentu iespējamo apjomu noteikšanu attīstības pasākumu ieviešanas rezultātā.

ANNOTATION

In accordance with Latvian legislation - Law on Official Secret, unclassified buildings include nonresidential buildings such as penitentiary facilities, prisons and detention centres, buildings of the armed forces, police or fire departments and barracks for these institutions, as well as subsidiary building and groups of premises in subsidiary buildings.

In the dissertation the buildings of armed forces, police and fire departments were investigated. Unclassified buildings such as military buildings, police departments and fire stations have great potential for improving energy efficiency. Research from NATO member states suggests that the energy efficiency of unclassified buildings could be increased by up to 65% depending on the climate zone. The methodology for forecasting the energy consumption of previously unclassified buildings has been researched by Borodiņecs A., Dzelzītis E., Krēsliņš A., Zajacs A., Zhivov A., Herron D., R. Liesen, Ellis P., Case M., M. Deru, D. Fisher etc.

The aim of the dissertation is to develop energyefficiency detection methodology for unclassified buildings with guidelines for technical inspection of unclassified buildings with a focus on the development of common renovation and energy supply solutions that will ensure high quality of work and minimize the number of stakeholders in the renovation process, in order to achieve and introduce possible improvements to reduce energy consumption.

At present, there is not a developed methodology for the determination of energy consumption in Latvia, including the energyefficiency detection methodology, which is directly addressed to temporary structures and permanently located unclassified buildings.

Energy efficiency solutions for unclassified buildings are a crucial issue, especially since a large proportion of unclassified buildings are maintained by public funds. The developed methodology can be practically applied by carrying out the development of unclassified building segments during planning, modelling the impact of the energy efficiency improvement measures on the total energy performance of buildings, without attaching it to a specific address and location with the potential volume of financial instruments as a result of development measures.

SATURS

IEVADS	8
Promocijas darba aktualitāte.....	9
Promocijas darba mērķis un uzdevumi.....	9
Promocijas darba hipotēze.....	10
Pētniecības metodes.....	10
Promocijas darba zinātniskā novitāte.....	11
Promocijas darba praktiskā nozīme.....	11
Promocijas darba struktūra un apraksts.....	12
Promocijas darba aprobācija.....	12
1. ESOŠĀS SITUĀCIJAS ANALĪZE NEKLASIFICĒTO ĒKU ENERGOEFEKTIVITĀTES JOMĀ	14
1.1. Kopējie Eiropas Savienības un Latvijas Republikas stratēģiskie mērķi.....	14
1.2. Vidējais īpatnējais enerģijas patēriņš Latvijas Republikas Aizsardzības ministrijas (AM) valdījumā esošajām ēkām.....	15
1.3. Vidējais īpatnējais enerģijas patēriņš Latvijas Republikas Iekšlietu ministrijas (IeM) valdījumā esošajām ēkām (ugunsdzēsības un policijas iecirkņi).....	17
1.4. Enerģijas patēriņš karstā ūdens sagatavošanai.....	18
1.5. Siltumenerģijas patēriņš neklasificētās ēkās.....	18
1.6. Enerģijas patēriņa prognozēšana.....	22
1.7. Energoefektivitātes novērtēšana.....	26
1.8. Secinājums par neklasificēto ēku enerģijas patēriņa statistiskiem datiem un pētāmo objektu saņemtajiem praktiskajiem rādītājiem.....	28
2. NEKLASIFICĒTO ĒKU SISTEMATIZĀCIJA	31
2.1. Vispārējais apraksts.....	31
2.2. Neklasificēto ēku sistematizācijas nepieciešamība.....	31
2.3. Neklasificēto ēku telpu izmantošanas klasifikācija.....	36
2.4. Telšu sistematizācija.....	37
2.5. Latvijas policijas, ugunsdzēsības dienestu ēku un Latvijas aizsardzības spēku ēkas sadalījums pēc uzbūvēšanas gadiem.....	39
2.6. Secinājums par neklasificēto ēku sistematizāciju.....	44
3. NEKLASIFICĒTO ĒKU ENERGOEFEKTIVITĀTES NOTEIKŠANAS METODOLOĢIJA	45
3.1. Ēku energoefektivitāti ietekmējošie faktori.....	45
3.2. Neklasificētu ēku energoefektivitāte.....	46
3.3. Pētījuma metodoloģija.....	48
3.4. Ēku un telts siltuma zudumu noteikšanas modelis.....	50
3.4. Spēkā esošās likumdošanas prasību pielāgošana.....	61
4. PĒTĪJUMS PAR ENERGOAUDITĀ IEVADĀMO DATU ROBEŽVĒRTĪBĀM	64
4.1. Metodoloģija.....	64
4.2. Gaisa apmaiņas daudzuma noteikšana neklasificētās ēkās.....	64
4.3. Cilvēka ķermeņa termiskais līdzsvars.....	69
4.4. Militāro formu un to sastāvdaļu siltumizolācija.....	72
4.5. Formastērpa ietekme uz termisko komfortu.....	77
4.6. Iekštelpu gaisa kvalitātes pētījums.....	81
4.7. Aptauja par ēku iekštelpas komfortu militārajā objektā un tās rezultātu apkopojums.....	95
4.8. Termiskā komfortā teorētiskais novērtējums.....	98

4.9. Secinājumi	99
5. REZULTĀTU VALIDĀCIJA PRAKTISKĀ IZMANTOŠANA.....	101
5.1. Neklasificētu ēku enerģijas patēriņa novērtējums dažādās Latvijas pilsētās	101
5.2. Neklasificēto ēku renovācijas scenāriju izstrāde.....	103
5.3. Modulārā ballistiski izturīga koka karkasa siltināšanas risinājuma izstrāde	108
5.4. Saules enerģijas izmantošanas potenciāla novērtējums	114
5.5. Iespējamās ekonomiskās ietekmes aprēķins, realizējot neklasificēto ēku energoefektivitātes paaugstināšanas programmas	116
5.6. Secinājumi	121
SECINĀJUMI.....	123
LITERATŪRAS SARAKSTS	125

IEVADS

Saskaņā ar Starptautiskās Enerģētikas aģentūras (*IEA*) ziņojumu enerģijas patēriņš 2018. gadā pieauga visstraujāk pēdējā desmitgadē, un CO₂ emisijas pieauga līdz rekordaugstam līmenim. Kopējais enerģijas galapatēriņš pasaulē ēku sektorā 2019. gadā (salīdzinot ar 2018. gadu) bija nemainīgs un veidoja aptuveni 35–40 % [1], CO₂ emisijas no ēkām sasniegušas kulminācijas vērtību – aptuveni 28 % no kopējām ar enerģiju saistītām CO₂ emisijām pasaulē [2]. *Covid-19* pandēmija bija lielākais satricinājums globālajai enerģētikas sistēmai, un 2020. gadā bija novērojams enerģijas patēriņa samazinājums gandrīz par 8 %, sasniedzot zemāko līmeni kopš 2010. gada. 2022. gadā sākumā globālo enerģētikas sistēmu satricināja ģeopolitiskā situācija pasaulē, protams, jau tagad var novērot izmaiņas energoresursu izmantošanas bilancē, taču vēl nav apstrādāti reālie dati, lai varētu tos analizēt, tāpēc promocijas darbs balstās 2021. gada reāli pieejamos *IEA*, *EUROSTAT* un Latvijas Centrālā statistikas pārvaldes datos.

2021. gadā ekonomiskā aktivitāte un enerģijas izmantošana atjaunojās valstīs visā pasaulē, un globālais enerģijas pieprasījums palielinājās par 4,6 %, ko veicināja spēcīga globālā ekonomika un lielākas apkures un dzesēšanas vajadzības. Gandrīz 70 % no globālā enerģijas pieprasījuma pieauguma ir jaunattīstības tirgos un jaunattīstības valstīs, kur pieprasījums pieauga līdz 3,4 % virs 2019. gada līmeņa. Pieprasījums pēc visām degvielām pieauga, sākot ar dabasgāzi, oglēm, pat saules un vēja enerģijas apjomam pieaugot par divciparu skaitli. Energoefektivitātes uzlabojumi bija nepilnīgi.

Energoefektivitāte pasaules ekonomikā turpināja uzlaboties, un primārās enerģijas intensitāte pasaulē samazinājās par 1,3 %. Tomēr tas bija zemāks uzlabojums, nekā novērots iepriekšējos gados. Paredzams, ka energoefektivitātes tendences atgriezīsies 10 gadu vidējā līmenī pēc sliktākā gada pēdējo 10 gadu laikā. Tomēr uzlabojumu līmenis ir jādubulto, salīdzinot ar pašreizējo līmeni, lai tas atbilstu *IEA* neto nulles emisiju scenārijam līdz 2050. gadam.

Mūsdienās tikai apmēram uz vienu trešdaļu enerģijas galapatēriņa attiecas obligātā energoefektivitātes politika, piemēram, kodeksi un standarti, un pēdējos gados to pārklājuma pieaugums ir neliels. Arī centieni stiprināt pašreizējo energoefektivitātes politiku 2021. gadā bija vāji. Kodeksu un standartu teritoriālā pārklājuma un likumiskā spēka palielināšana ir energoefektivitātes ieguvumu galvenais virzītājspēks.

Starptautiskās Enerģētikas aģentūras (*IEA*) ziņojumā ir atzīmēts normatīvā regulējuma bāzes trūkums energoefektivitātes jomā, kas vēlreiz apstiprina promocijas darba tēmas aktualitāti un pareizību.

Šobrīd Latvijā nav pieejamas īpašas neklasificēto ēku energoefektivitātes noteikšanas metodoloģijas.

Nonoteiktība, specializētu normatīvo aktu trūkums, kas paredz ekspluatācijas īpatnības, un – rezultātā – esošās reglamentējošās bāzes trūkums; civilās būvniecības regulējošo normatīvo aktu izmantošana, kuros nav noteikti kritēriji, ko ir jāņem vērā, veicot aprēķinus un pieņemot konkrētus tehniskus lēmumus, kas turpmāk nosaka neklasificētās ēkas energoefektivitāti – tas viss izraisa neklasificētu ēku energoefektivitātes samazināšanos,

ekspluatācijas izmaksu pieaugumu, būtisku neatbilstību parādīšanos starp teorētiskajiem (aprēķinājumiem) un praktiskajiem datiem, kā rezultātā tiek sagrozītas plānoto un iegūto rezultātu vērtības.

Promocijas darba aktualitāte

Tieši vērsta normatīvā regulējuma trūkums un ierobežots specializēto izdevumu un statistikas datu daudzums nedod iespēju pieņemt skaidrus, konsolidētus lēmumus, plānojot iespējamās ekonomiskās un enerģētiskās izmaksas, kas var rasties, īstenojot neklasificēto ēku energoefektivitātes paaugstināšanas projektus vai panākot energopatēriņa stagnāciju, ņemot vērā pastāvīgi pieaugošo energoresursu pieprasījumu.

Mūsdienu literatūrā trūkst empīrisku pētījumu, lai pārbaudītu piedāvātās teorētiskās koncepcijas, līdz ar to šim promocijas darbam ar analītisku izpēti, kas iekļauj statistisko datu apkopojumu, Eiropas Savienības un Amerikas Savienoto Valstu normatīvo aktu izpēti, iekļaujot trūkstošās tehniskās vērtības Latvijas Republikas normatīvajā bāzē, aptaujas veikšanu, laboratorijas un lauku pētījumu veikšanu, matemātisku un termodinamisku, teorētisku, kā arī praktisku piemēru aprēķinu veikšanu, ņemot vērā dinamiskā modelēšanas rīka izmantošanas un lietošanas specifiku, kā arī iespējamās ekonomiskās ietekmes aprēķināšanu, ir jāapstiprina neatgriezenisku nepieciešamību veikt pasākumus energoefektivitātes uzlabošanai, sistematizācijai un aprēķina vērtību papildināšanai esošajā normatīvajā bāzē, kā arī datormodelēšanas risinājumu izmantošanu un tipiskā dizaina piemērošanu ar tehniskiem risinājumiem neklasificēto ēku būvniecībā vai renovācijā.

Promocijas darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba **mērķis** ir izstrādāt neklasificēto ēku energoefektivitātes noteikšanas metodoloģiju, kas tiks vērsta uz neklasificētu ēku energopatēriņa samazināšanu un ieteikumiem to tehniskai apskatei. Ieteikumi tiks vērsti uz renovācijas un energoapgādes unificētu risinājumu izstrādi, vienlaikus nodrošinot augstu veicamo darbu kvalitāti, ar nosacījumu piesaistīt minimālu personāla skaitu šāda veida ēku rekonstrukcijai.

Promocijas darba mērķa sasniegšanai tika noteikti vairāki **uzdevumi**.

1. Izpētīt esošos Eiropas Savienības un Latvijas Republikas stratēģiskos mērķus un rīcības virzienus energoefektivitātē, to tendences un izaicinājumus. Veikt spēkā esošās likumdošanas aktu apskatu ar to iespējamo piemērošanu neklasificēto ēku kontekstā.
2. Apkopot, analizēt, veikt secinājumus par esošo neklasificēto ēku enerģijas patēriņa statistiskiem datiem un pētāmo objektu saņemtajiem praktiskajiem rādītājiem. Veikt neklasificēto ēku portfolio analīzi Latvijā, proti, salīdzinot dažādu dienestu ēku vecumu.
3. Veikt ēku kopumu sākotnējo analīzi un klasifikāciju atbilstoši tipoloģijai.
4. Pēc neklasificētās ēkas dažādām funkcionālām, konstruktīvajām un citām pazīmēm veikt tās sistematizāciju tipveida energoefektivitātes risinājumu ieviešanai, kas vēlāk varētu būt replicējami uz līdzīgām ēkām, lai turpmāk modelējot varētu veikt analīzi par

energoefektivitāti uzlabojošo pasākumu ietekmi uz ēku kopējo energoefektivitāti, nepiesaistot to konkrētai adresei un atrašanās vietai.

5. Veikt pētījumu par energoaudita ievadāmo datu robežvērtībām.
6. Izstrādāt neklasificēto ēku energoefektivitātes noteikšanas metodoloģiju, ņemot vērā specifiskās ietekmējošo faktoru vērtības, aprēķina metodes un reglamentējošās likumdošanas prasības.

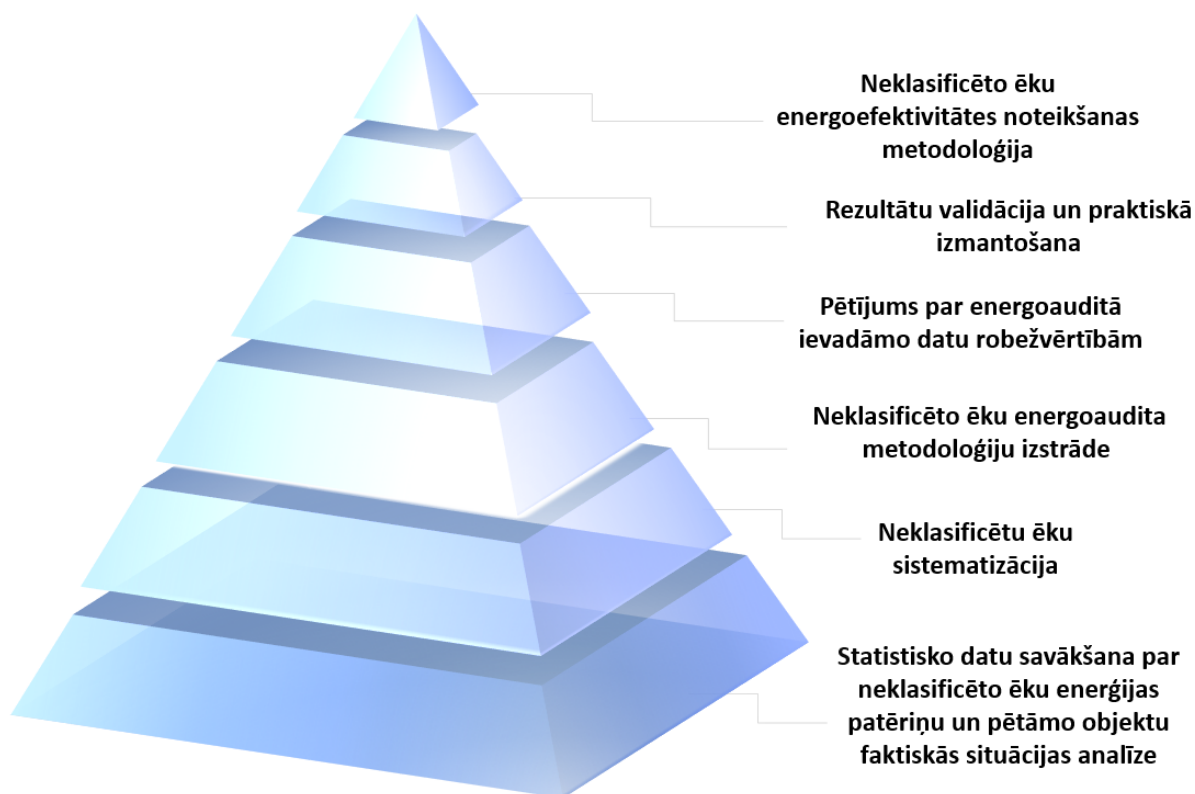
Promocijas darba hipotēze

Izstrādāta neklasificēto ēku energoefektivitātes noteikšanas metodoloģija ar vadlīnijām neklasificēto ēku tehniskās apsekošanai, kuras tās galvenais mērķis ir izveidot vienotu energoefektivitātes novērtējumu, ņemot vērā neklasificēto ēku izmantošanas specifiku, un tā spēs nodrošināt neklasificēto ēku ilgtspējīgas renovācijas un energoapgādes risinājumu izstrādi.

Pētniecības metodes

Mērķa sasniegšanai nepieciešams veikt pētījumu, nodrošinot pilnu empīrisku ciklu, sākot no faktu un datu apkopošanas, grupēšanas un hipotēzes veidošanas līdz hipotēzes pārbaudei no jaunā praktiski apkopotā materiāla, kā arī līdz pētījuma rezultātu validācijai, t. i., kompleksu pasākumu kopums ar mērķi pierādīt pētījuma laikā iegūto datu ticamību un datu gatavības pamatojumu.

Izpētītie kritēriji, kas izmantoti neklasificēto ēku energopatēriņa samazināšanas metodoloģijas izstrādes laikā, redzami 1. attēlā.



1. att. Izpētītie kritēriji, kas izmantoti neklasificēto ēku energoefektivitātes noteikšanas metodoloģijas izstrādes laikā.

Promocijas darba zinātniskā novitāte

Patlaban Latvijā nav izstrādāta ēku enerģijas patēriņa noteikšanas metodika, t. sk. energoefektivitātes noteikšanas metodoloģija pagaidu būvēm un pastāvīgi izvietotajām neklasificētajām ēkām.

Promocijas darba praktiskā nozīme

Neklasificēto ēku energoefektivitātes noteikšanas metodoloģijas izstrāde un plānošanas rīka izveidošana, veicot detalizētu energopatēriņa un notiekošo procesu izpēti no energoefektivitātes paaugstināšanas viedokļa esošajās un projektējamās neklasificētās ēkās prognozējamo klimata izmaiņu ietekmē, bez šaubām radīs primārās enerģijas kopējā patēriņa samazinājumu, un tā rezultātā samazināsies siltumnīcefekta gāzu emisijas apjoms, kas vienlaikus ietekmēs izpētīto ēku veidu kopējo izmantošanas efektivitāti un apsaimniekošanas izmaksas. Tāpēc dažādiem attīstības scenārijiem ir svarīga energopatēriņa prognozēšanas metodoloģijas un novērtēšanas rīka esamība, kas ņems vērā šīs nākotnes tendences ilgtermiņa attīstības plānošanas posmā.

Promocijas darba struktūra un apraksts

Darbs ir strukturēts piecās nodaļās.

1. nodaļā veikta esošas situācija analīze neklasificēto ēku energoefektivitātes jomā: apskatīti kopējie Eiropas Savienības un Latvijas Republikas (LR) stratēģiskie mērķi; novērtēts vidējais īpatnējais enerģijas patēriņš LR Aizsardzības ministrijas (AM) un Iekšlietu ministrijas (IeM) valdījumā esošajām ēkām. Tika veikts plašs piedāvāto enerģijas patēriņa prognozēšanas metodikas pētījums.

2. nodaļā veikta neklasificēto ēku sistematizācija pēc dažādiem parametriem: funkcionāliem mērķiem, stāvu skaita, ilgmūžības, sienu materiāliem un sienu konstrukcijas.

3. nodaļā aprakstīta neklasificēto ēku energoefektivitātes noteikšanas metodoloģijas izstrādes gaita. Tika izpētīti ēku energoefektivitāti ietekmējošie faktori. Aprakstīta izstrādātā pētījuma metodoloģija, kā arī izstrādāts ēku un telts siltuma zudumu noteikšanas modelis. Veikta analīze par spēkā esošās likumdošanas prasībām un to pielāgošanu neklasificētam ēkām.

4. nodaļā aprakstīts pētījums par energoauditā ievadāmo datu robežvērtībām, kas balstās uz: veikto aptauju par ēku iekštelpas komfortu militārajā objektā un rezultātu apkopojumiem, iekštelpu gaisa kvalitātes (*IAQ*) mērījumiem dažāda tipa neklasificēto ēku telpās (kazarmās, administratīvajās ēkās, ēdnīcās, ugunsdzēsēju depo utt. Veikta gaisa apmaiņas daudzuma noteikšana neklasificētās ēkās, kā arī veikts specifisks pētījums, kas tieši saistīts ar promocijas darba tēmu – formastērpa ietekme uz termisko komfortu.

5. nodaļā aprakstīta rezultātu validācija praktiskā izmantošana. Izstrādāti neklasificēto ēku renovācijas scenāriji. Izstrādāts un simulēts modulāra ballistiski izturīga koka karkasa siltināšanas risinājums un apskatīta tā izmantošana neklasificēto ēku renovācijā. Aprēķināts saules enerģijas izmantošanas potenciāls esošajās neklasificētās ēkās. Veikts iespējamās ekonomiskās ietekmes aprēķins, realizējot neklasificēto ēku energoefektivitātes paaugstināšanas programmas, kas ļauj autoram noslēgt promocijas darbu ar secinājumiem.

Promocijas darba aprobācija

Par promocijas darba rezultātiem ir **ziņots piecās starptautiskās konferencēs**, publicēti **12 zinātniskie raksti** (11 citēti *SCOPUS* datubāzē).

1. **Geikins, A.**, Borodinecs, A., Jacnevs, V. Estimation of Energy Profile and Possible Energy Savings of Unclassified Buildings. *Buildings*. 2022; 12(7):974. <https://doi.org/10.3390/buildings12070974> (SCOPUS).
2. Borodinecs, A., **Geikins, A.**, Barone, E., Jacnevs, V., Prozuments, A. Solution of Bullet Proof Wooden Frame Construction Panel with a Built-In Air Duct. *Buildings*, 2022, 12 (1), 30. DOI: 10.3390/buildings12010030 (SCOPUS).
3. Zemitis, J., Borodinecs, A., Bogdanovics, R., **Geikins, A.** A case study of thermal comfort in a temporary shelter. *Journal of Sustainable Architecture and Civil*

- Engineering, 2021, 29 (2), pp. 139–149. DOI: 10.5755/j01.sace.29.2.29240 (SCOPUS).
4. Borodinecs, A., **Geikins, A.**, Prozuments, A. Energy consumption and retrofitting potential of Latvian unclassified buildings. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2020, 163, pp. 319–326. DOI: 10.1007/978-981-32-9868-2_27 (SCOPUS).
 5. Borodiņecs, A., **Geikins, A.**, Smirnovs, S. Energy Performance of Temporary Shelters. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 660 (1), 012017. DOI:10.1088/1757-899X/660/1/012017. (SCOPUS).
 6. **Geikins, A.**, Borodinecs, A., Daksa, G., Bogdanovics, R., Zajecs, D. Typology of Unclassified Buildings and Specifics of Input Parameters for Energy Audits in Latvia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 290 (1), 012131 DOI: 10.1088/1755-1315/290/1/012131 (SCOPUS).
 7. Borodiņecs, A., **Geikins, A.**, Zemītis, J. Life-Cycle Assessment of Apartment Building Renovation in Latvia. *ASHRAE Transaction*, 2018, 1, 1.–9. lpp. ISSN 2378-2129.
 8. Borodiņecs, A., Zemītis, J., **Geikins, A.**, Bykova, Y., Nefedova, A. Energy-Efficient Construction in the Climatic Conditions of Latvia. *Construction of Unique Buildings and Structures*, 2018, 3, pp. 41–48. ISSN 2304-6295. DOI:10.18720/CUBS.66.4.
 9. Tumanova, K., Borodiņecs, A., **Geikins, A.** The Analysis of the Hot Water Consumption and Energy Performance before and after Renovation in Multi-Apartment Buildings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, 251 (1), 012058. DOI:10.1088/1757-899X/251/1/012058; (SCOPUS).
 10. Borodiņecs, A., Zemītis, J., Dobelis, M., Kaļinka, M., **Geikins, A.** Development of Prefabricated Modular Retrofitting Solution for Post-World War II Buildings. *10th International Conference on Environmental Engineering, ICEE 2017*, 2017, enviro.2017.252. DOI:10.3846/enviro.2017.252; (SCOPUS).
 11. Zemītis, J., Borodiņecs, A., **Geikins, A.**, Kalames, T., Kuusk, K. Ventilation System Design in Three European Geo Cluster. *Energy Procedia*, 2016, Vol. 96, 285.–293. lpp. ISSN 1876-6102. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.09.15. (SCOPUS).
 12. Borodiņecs, A., Zemītis, J., Millers, R., Tumanova, K., **Geikins, A.**, Nefedova, A. Specifics of Multi-Apartment Building Deep Complex Retrofitting. *CESB 2016 – Central Europe Towards Sustainable Building 2016: Innovations for Sustainable Future*, 2016, pp. 49–55. DOI:10.1016/j.egypro. 2016.09.151 (SCOPUS).

1. ESOŠĀS SITUĀCIJAS ANALĪZE NEKLASIFICĒTO ĒKU ENERGOEFEKTIVITĀTES JOMĀ

1.1. Kopējie Eiropas Savienības un Latvijas Republikas stratēģiskie mērķi

Klimata pārmaiņu jautājumi, t.sk. siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisiju samazināšana un oglekļa dioksīda (CO₂) piesaiste ir Eiropas Savienības (ES) uzmanības centrā un ir ļoti būtiski arī Latvijai. Latvija ir ratificējusi Apvienoto Nāciju Organizācijas (ANO) Vispārējo konvenciju par klimata pārmaiņām, tās Kioto protokolu un Kioto protokola Dohas grozījumu, kā arī Parīzes nolīgumu. Latvijas Ilgtspējīgas attīstības stratēģijā līdz 2030. gadam *Latvija 2030* noteikts, ka „Latvija – mūsu mājas – zaļa un sakopta, radoša un ērti sasniedzama vieta pasaules telpā, par kuras ilgtspējīgu attīstību mēs esam atbildīgi nākamo paaudžu priekšā”. Saskaņā ar Latvijas Nacionālo enerģētikas un klimata plānu (NEKP) līdz 2030.gadam nepieciešams samazināt kopējo Latvijas SEG emisiju apjomu par 60% salīdzinot ar 1990.gada kopējo Latvijas SEG emisiju apjomu.

ES direktīvā *2012/27/ES* par energoefektivitāti [3] un ES direktīvā *2010/31/ES* par ēku energoefektivitāti [4] aicina rīkoties nekavējoties, lai samazinātu oglekļa dioksīda emisijas un paaugstinātu atjaunojamo energoresursu izmantošanas īpatsvaru. Priekšlikumā Direktīvas *2012/27/ES* grozījumiem ir noteikts pienākums panākt jaunus enerģijas galapatēriņa ikgadējos ietaupījumus 0,8% apmērā 2021.-2030.gada periodā.

Nacionālajā attīstības plānā (NAP 2027) arī noteikts rīcības virziens energoefektivitātē, enerģijas ražošanā, un tās rīcības virziena mērķis ir nodrošināt tautas saimniecībai nepieciešamo energoresursu ilgtspējīgu izmantošanu, veicinot resursu tirgu pieejamību, sektoru energointensitātes un emisiju intensitātes samazināšanos un vietējo atjaunojamo energoresursu īpatsvara palielināšanos kopējā patērētajā apjomā.

Rīcības virziena ietvaros veicamie uzdevumi:

- Energoefektivitātes programmas valsts un pašvaldību sabiedrisko ēku sektorā;
- Atbalsts inovatīvu enerģētikas un energoefektivitātes tehnoloģiju projektiem;
- Atjaunojamo energoresursu izmantošana enerģijas ražošanā, samazinot atkarību no fosilajiem energoresursiem un energoefektivitātes veicināšana centralizētajā siltumapgādē.

Pieņemot Energoefektivitātes direktīvu *2012/27/ES*, Eiropas Savienības valstis, arī Latvija ir nolēmušas veikt dažādus pasākumus, lai uzlabotu gan enerģijas ražošanas un piegādes, gan patērēšanas efektivitāti. Direktīva paredz arī obligātu mērķi – katrai valstij katru gadu ir jānodrošina galapatērētāju energoefektivitātes pasākumi, kas ļautu ietaupīt 1,5% no visas valstī galapatērētājiem piegādātās enerģijas.

Koncepcija piedāvā risinājumu šo saistību izpildei, kas paredz, sākot ar 2014. gadu, katru gadu renovēt 3% **valstij piederošo ēku, to vidū** arī neklasificētas ēkas, tādas kā militārās ēkas, policijas ēkas un ugunsdzēsēju depo; kopējās platības, kuras izmanto tiešās pārvaldes funkciju veikšanai.

Kā norāda Direktīva 2012/27/ES par energoefektivitāti, viena no lielākajām potenciālajām energoefektivitātes paaugstināšanas jomām ir pilsētu esošā apbūve, kur noteikta uzmanība ir pievēršama **valsts un pašvaldību īpašumā esošajām ēkām, kam jākalpo kā paraugam pārējai sabiedrībai** [5]. Saskaņā ar Direktīvas 5. panta prasībām dalībvalstis līdz 2013. gada 31. decembrim sagatavo un publisko to centrālās valdības apsildāmo un/vai dzesējamo ēku sarakstu, kuru kopējā izmantojamā platība ir lielāka par 500 m², un - sākot ar 2015. gada 9. jūliju - to ēku, sarakstu, kuru kopējā izmantojamā platība ir lielāka par 250 m², izņemot ēkas, uz kurām attiecas izņēmums. Direktīva neizvirza prasības ēkām, kas ir kultūrvēsturiskie pieminekļi, kulta ēkas vai arī tiek izmantotas valsts aizsardzības struktūrām.

Vadoties pēc Direktīvas 2012/27/ES 5. panta izvirzītājam prasībām, Latvijas Ekonomikas ministrija (EM) deleģēja uzdevumu valsts un pašvaldību īpašumā esošajiem ēku uzturētājiem - sagatavot un sniegt EM tālākai apstrādei informāciju par viņu padotībā esošo nekustamo īpašumu enerģijas patēriņu (NĪEP).

Neskatoties uz Direktīvā 2012/27/ES noteiktajiem iespējamajiem atvieglojumiem, bet vadoties pēc kopējās ANO, ES un Latvijas Republikas pieņemtās koncepcijas klimata pārmaiņu jautājumos, Latvijas Republikas Aizsardzības ministrija (AM) sagatavojusi un iesniedza EM apstrādei Direktīvā pieprasīto NĪEP informāciju, kur tiek definēti “neatliekami” un “nepieciešami” pasākumi.

Neatliekami pasākumi ietver bojātu jumtu segumu uzturēšanu/labošānu, logu nomaiņu, telpu sildelementu nomaiņu un ikgadēju pārskata sagatavošanu par elektroenerģijas un citu energoresursu patēriņu.

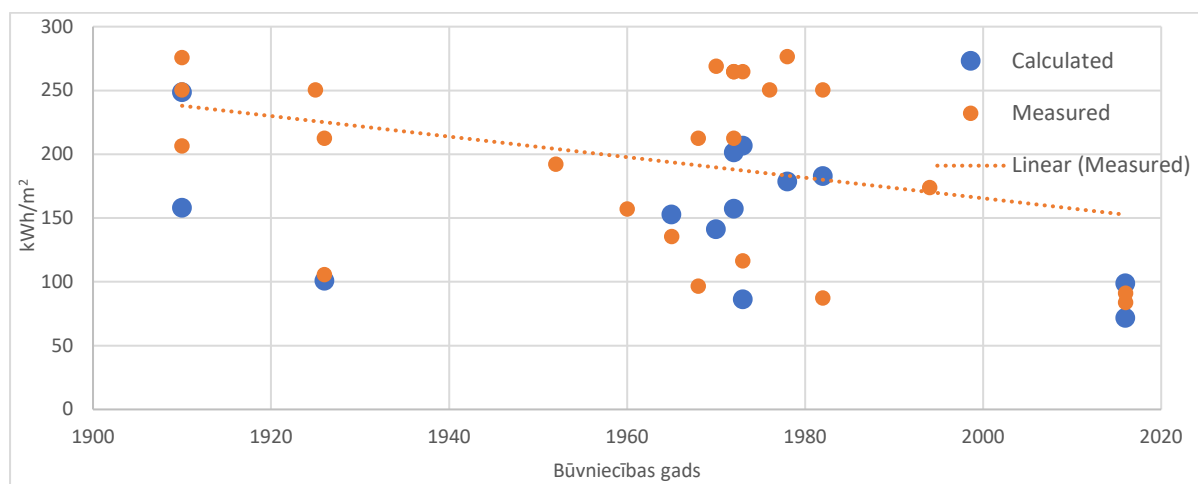
Savukārt nepieciešami pasākumi paredz **energoaudita veikšanu**, apkures (ogļu un šķidrā fosilā kurināmā) katlu nomaiņu, azbestcimenta jumtu nomaiņu (Eiropas Padomes direktīva 87/217/EEK), **ēku energoefektivitātes paaugstināšanas pasākumus** (siltināšana), elektroenerģijas patēriņa samazinājumu, AM valdījumā esošajās ēkās strādājošo darbinieku izglītošanu un energoresursu patēriņa samazināšanas programmas izpildes kontroli.

1.2. Vidējais īpatnējais enerģijas patēriņš Latvijas Republikas Aizsardzības ministrijas (AM) valdījumā esošajām ēkām

Lielākā neklasificēto ēku daļa ir celta pirms 1990. gadiem, izmantojot tipiskus Padomju Savienības celtniecības projektus. Zemo enerģijas cenu un ierobežotās siltumizolācijas pieejamības dēļ tika būvētas galvenokārt ķieģeļu ārsienas un neapsildīti bēniņi ar ļoti minimālu bēniņu plātņu siltumizolāciju. Viencauruļu apkures sistēmas un dabiskā ventilācija ir visizplatītākie tehniskie risinājumi visu veidu neklasificētajās ēkās, izņemot dažas ļoti specifiskas ēkas, piemēram, garāžas, munīcijas telpas, iekštelpu šaušanas laukumus utt. Papildus sākotnējiem sliktajiem tehniskajiem parametriem, neklasificētajās ēkās nav bijusi arī pareiza enerģijas pārvaldība vai energoauditi, ņemot vērā datu privātumu un ierobežotu piekļuvi šādām ēkām.

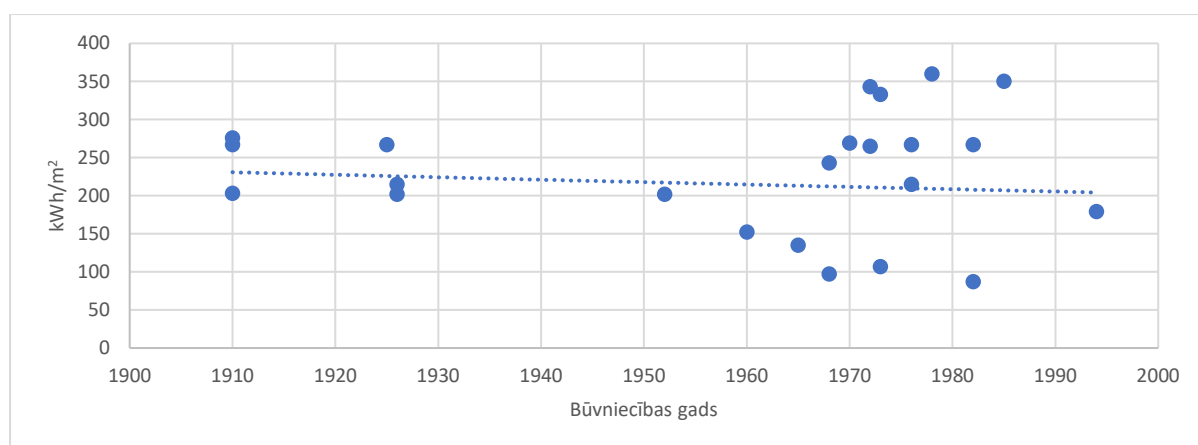
Pēc Latvijas Ekonomikas ministrijas datiem vidējais kopējais enerģijas patēriņš militārajām ēkām, kas uzceltas pirms 1990. gadiem, ir 212 kWh/m² gadā. Mērījumu dati par neklasificētām ēkām ar mainīgiem būvniecības datumiem ir apkopotu un parādīti 1.1. un 1.2.

att. Mērījumi tika veikti divos dažādos periodos. Pirmo reizi tie tika veikti laika posmā no 2011. līdz 2014. gadam, bet otro reizi - no 2014. līdz 2016. gadam. Tāpat dažām ēkām saskaņā ar vietējiem noteikumiem tika aprēķināts arī teorētiskais enerģijas patēriņš.



1.1. att. Aprēķinātais un izmērītais gada kopējais enerģijas patēriņš militārām ēkām ar dažādu celtniecības gadu. Aprēķina periods: 2014-2016.

1.1. un 1.2. att. redzams, ka vidējais enerģijas patēriņš nedaudz samazinās, pieaugot ēku celtniecības datumam. Kopējais vidējais 2011.-2014. gadā izmērītais enerģijas patēriņš militārajām ēkām ir 230 kWh/m² gadā (attēls 1.2.). Aprēķinātās vērtības iegūtas saskaņā ar Latvijas oficiālo aprēķinu procedūru, ko nosaka MK noteikumi Nr. 348 “Ēkas energoefektivitātes aprēķināšanas metodika” [6]. Šī procedūra galvenokārt balstās uz *EN ISO 13790: 2009 L* datiem.



1.2. att. Aprēķinātais kopējais gada enerģijas patēriņš militārajām ēkām, aprēķina periods: 2011-2014.

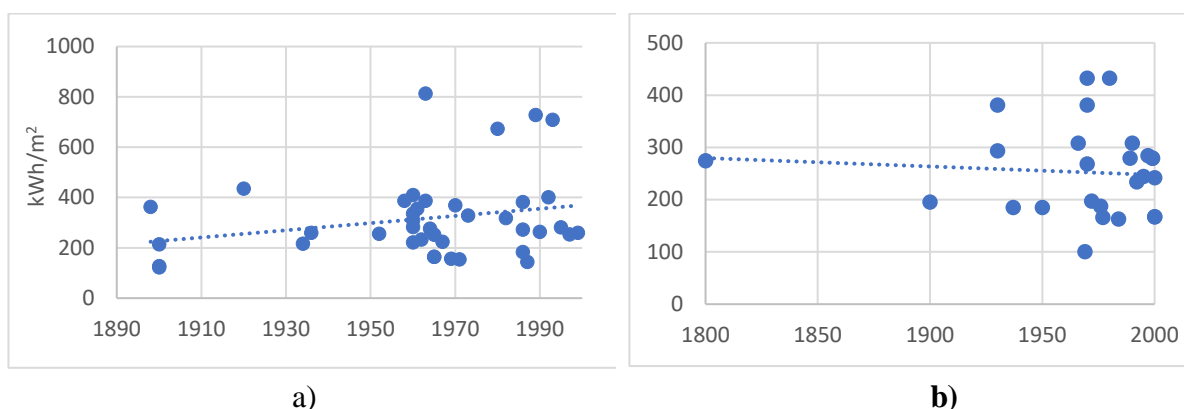
To pašu ēku mērījumus atkārtoja pāris gadus vēlāk, lai noskaidrotu, vai nav notikušas izmaiņas, jo iepriekšējos gados bija sākušās aktīvas informācijas kampaņas un ES direktīvas par energoefektivitāti. Tomēr rezultāti parādīja, ka, kaut arī enerģijas patēriņš ir nedaudz mazāks, šis samazinājums ir niecīgs.

Izmērītais enerģijas patēriņš abos periodos ir ievērojami lielāks, nekā teorētiski aprēķinātās vērtības. Vidējais auditoru aprēķinātais teorētiskais enerģijas patēriņš analizētajām ēkām ir 153 kWh/m², kas ir par 39% mazāks nekā 2014.–2016. gadā izmērītais. Šāda atšķirība var rasties tāpēc, ka ir nepareizi noteiktas tādas sākotnējās iestatītās vērtības kā karstā ūdens patēriņš, iekštelpu temperatūra, pieplūdes gaisa apmaiņa, ēkas norobežojošo materiālu hermētiskums utt. Šīs vērtības ir noteiktas vietējās normās daudzdzīvokļu ēkām un biroju ēkām. **Dati par neklasificētām ēkām nav stingri noteikti vietējās normās, un enerģijas auditori parasti izmanto datus par civilām ēkām.**

1.3. Vidējais īpatnējais enerģijas patēriņš Latvijas Republikas Iekšlietu ministrijas (IeM) valdījumā esošajām ēkām (ugunsdzēsības un policijas iecirkņi)

Līdzīga situācija vērojama arī policijā un ugunsdzēsības dienestos, kur jāņem vērā karstā ūdens patēriņa īpatnības un ventilācijas ātrums. Jāatzīmē arī siltumenerģijas uzkrāšanas nozīme jebkurās ēkās, kas faktiski, ietekmē enerģijas ražošanas vienību galīgo uzstādīto jaudu. Laiks un pieredze ļauj pamatoti secināt, ka termiskās “baterijas” lielākas enerģijas uzkrāšanai var būt efektīvākas un ievērojami lētākas nekā tradicionālās elektriskās baterijas. Elektriskajām baterijām un siltumenerģijas akumulēšanai ir sava loma elektrotīkla stabilizēšanā. Siltumenerģijas uzkrāšanai, kā arī baterijām jābūt neatņemamai nākotnes enerģijas infrastruktūras sastāvdaļai [7].

Policijas iecirkņos izmērītais vidējais gada enerģijas patēriņš ir 252 kWh/m², bet ugunsdzēsības iecirkņos - 317 kWh/m². Palielinātu enerģijas patēriņu ugunsdzēsēju iecirkņu ēkās var izskaidrot ar stingrākām prasībām attiecībā uz ventilācijas ātrumu un jaunu tehnoloģisko ierīču ieviešanu, piemēram, speciālu ventilācijas sistēmu ugunsdzēsēju mašīnu izplūdes caurulēm (1.3. att.).



1.3. att. Izmērītais vidējais kopējais gada enerģijas patēriņš ugunsdzēsības (a) un policijas (b) iecirkņos, mērīšanas periods: 2011-2014.

Iepriekš minēto ēku izmērītais enerģijas patēriņš ievērojami pārsniedz daudzdzīvokļu ēku enerģijas patēriņu. Tipiska Latvijas daudzdzīvokļu māja katru gadu patērē 190 kWh/m² apkurei un karstā ūdens sagatavošanai [8], [9].

1.4. Enerģijas patēriņš karstā ūdens sagatavošanai

Karstā ūdens patēriņš modernām ēkām ar zemu enerģijas patēriņu veido ievērojamu daļu ēku kopējā enerģijas patēriņa profila, jo tehnoloģiskas vai iemītnieku virzītas taupīšanas metodes izmantotā ūdens daudzumu var ietekmēt tikai nedaudz. Lai veiktu precīzus energoauditus, sākotnēji iestatītās vērtības precīzi jānosaka iepriekš, ņemot vērā valsts noteiktās prasības, kā arī vietējo lietotāju paradumu uzskaiti, pielietotos tehniskos risinājumus, apkopes procedūras utt.

Pie neklasificētām ēkām pieder tādas ēkas kā kazarmas un ugunsdzēsības dienesta ēkas, kuriem galvenokārt ir kopīgas vannas istabas un virtuves. Šāda veida ēku karstā ūdens patēriņš ir līdzīgs kopmītnēm. Tomēr turpmākajos pētījumos rūpīgi jāizvērtē karstā ūdens patēriņa atšķirības. Galvenās karstā ūdens patēriņa atšķirības starp kopmītnēm un neklasificētām ēkām ar kopīgām dušām varētu būt aktīvāka dušas lietošana neklasificētās ēkās, jo ir lielāka darba un apmācības slodze, atšķirīgs apģērba veids, dažādi ēdiena pagatavošanas principi, telpu tīrīšanas prasības utt.

Saskaņā ar Latvijas būvnormatīvu LBN 221 standarta karstā ūdens patēriņš vienai personai ir 105 l/dienā daudzdzīvokļu ēkai, 80 l/dienā kopmītnēm ar kopīgu virtuvi un dušām katrā stāvā un 180 l/dienā viesnīcu istabās ar atsevišķām dušām [10]. Tomēr iepriekš veiktā karstā ūdens patēriņa analīze [11] parāda ievērojami zemākas patēriņa vērtības.

1.1. tabula

Vidējais karstā ūdens patēriņš daudzdzīvokļu ēkās, l/dienā vienai personai

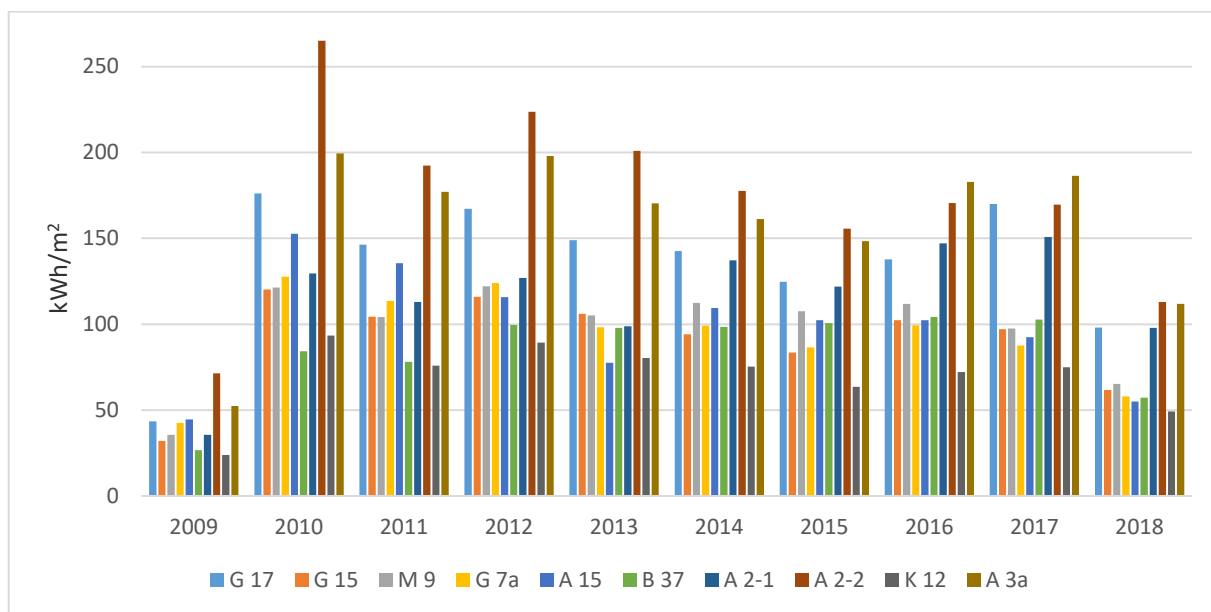
Novērošanas gads			Vidēji
2013	2014	2015	
43.6	40.9	41.4	42.0

1.1. tab. sniegtie dati ir balstīti uz 25 daudzdzīvokļu māju ar kopumā 1500 dzīvokļiem analīzi. Visas ēkas ir aprīkotas ar centralizētām karstā ūdens sistēmām. Pieplūdes karstais ūdens tiek uzturēts 55°C temperatūrā. Salīdzināmie dati par ES valstīm iegūti pētījumos [12], bet par Latviju – pētījumos [13], [14]. Visi rezultāti ir tuvu EN 15316-3-1 [15] noteiktajai minimālajai vērtībai 36 l/d uz vienu personu daudzdzīvokļu ēkās.

1.5. Siltumenerģijas patēriņš neklasificētās ēkās

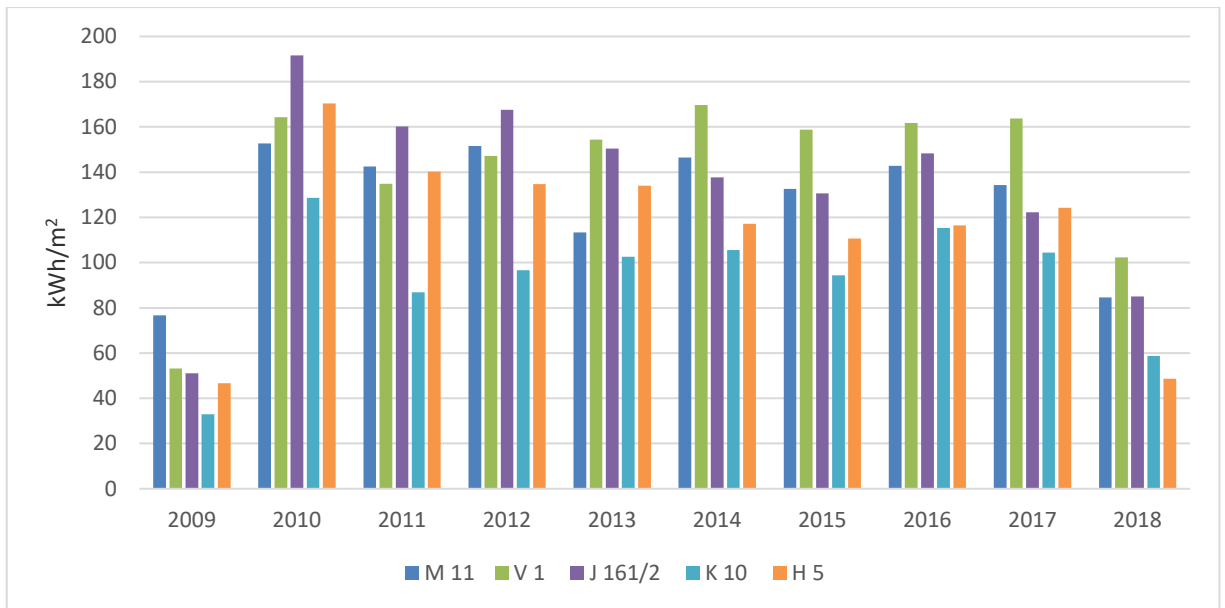
Neklasificētu ēku kopējā siltumenerģijas patēriņa analīzei tika izvēlēts policijas iecirkņu, ugunsdzēsības iecirkņu un **militāro ēku** (speciālas nozīmes centru) kopums. Pārsvarā tās bija administratīvās ēkas, biroju ēkas dežurdaļām un brigādēm, kas veic operatīvo darbu, kazarmas

un ēdnīcas. Siltumenerģijas patēriņš iekļauj siltuma enerģiju apkurei un karstā ūdens sagatavošanai.



1.4. att. Policijas iecirkņu ikgadējais siltumenerģijas patēriņš (informācija par adresēm ir apzināti slēpta).

Kā redzams, siltumenerģijas patēriņš katrai ēkai ir atšķirīgs gads no gada, un tas parāda vienu no svarīgākajiem īpašam nolūkam izmantojamo ēku raksturlielumiem - ka siltumenerģijas patēriņš ir ne tikai ēkas siltumizolācijas un ārējā gaisa temperatūras funkcija, bet to izteikti ietekmē arī lietotāju uzvedība, kas mainās un ir atkarīga no operatīvajam personālam uzticētā uzdevuma un citiem cilvēkfaktoriem. Pašlaik tirgū pieejami daži efektīvi risinājumi, kas var palīdzēt samazināt enerģijas patēriņu telpās ar neparedzamiem un periodiskiem noslogojuma modeļiem, izmantojot īpaši jutīgus noslodzes sensorus, kas uztver ķermeņa siltumu un kustības [16].



1.5. att. Ugunsdzēsības iecirkņu ikgadējais siltumenerģijas patēriņš (informācija par adresēm ir apzināti slēpta).

Pētītajām ēkām ir slikti siltuma parametri, kas izskaidrojams ar to, ka ēkas tika uzceltas pirms 1990. gada, kad nacionālajos būvnormatīvos dažādu mājokļu elementu U-vērtību normatīvās vērtības bija noteiktas daudz augstākas nekā pašreiz. Aprēķināts, ka policijas iecirkņu vidējais gada siltuma patēriņš ir 112 kWh/m², bet ugunsdzēsēju iecirkņiem - 121 kWh/m².

Siltumenerģijas patēriņš speciālās nozīmes centros

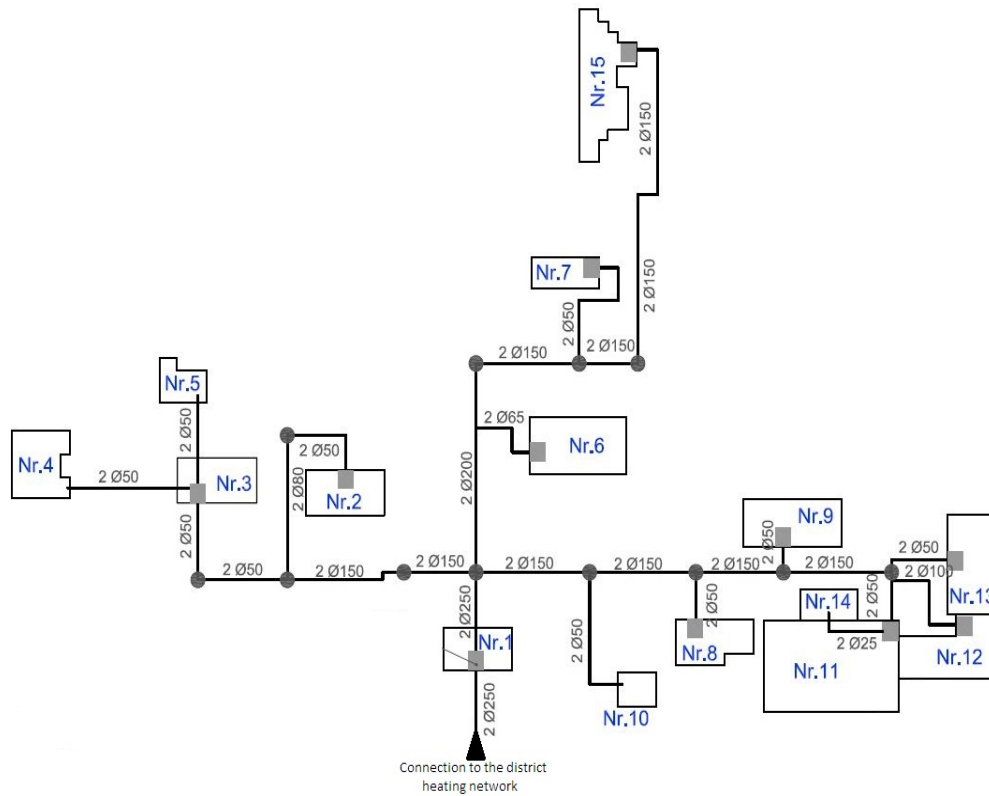
Neklasificētu ēku kopējā siltumenerģijas patēriņa analīzei tika atlasīti un analizēti 15 speciālajiem mērķiem paredzētas ēkas. Kopējā speciālās nozīmes teritorija ir 190 tūkst. kv.m. un aptuveni 100 tūkst. kv.m. ir neklasificētas īpašam nolūkam paredzētas ēkas, kas ir savienotas ar centralizētās siltumapgādes tīkliem (kopmītnes, noliktavas, mācību telpas, telpas sportam, peldbaseins, guļamistabas, koplietošanas telpas). Centra atrašanās vieta ir parādīta 1.6. att.

Tika izpētītas centra ēkas un katrai no tām definēts izmantošanas mērķis. Centralizētās siltumapgādes tīkla shēma tika rūpīgi izpētīta, un noteikta siltumtīklu atrašanās vieta. Pēc detalizēta apskata turpmākajai izpētei tika noteikti cauruļvadu diametri un garums. Centralizētās siltumapgādes tīkla shēma ir parādīta 1.7. att. Ēkas ir apzīmētas ar cipariem no 1 līdz 15, bet to izmantošanas mērķis nav norādīts, jo šī informācija ir uzskatāma par sensitīvu.

Apskojuma laikā tika secināts, ka lielākajai daļai ēku siltumenerģijas patēriņa sadalījums ir nevienmērīgs, kas izskaidrojams ar ēkas mērķi un izlases veida izmantošanu, kad tas ir nepieciešams. Dažas ēkas tiek izmantotas kā noliktavas ļoti dažādiem mērķiem un ar īpašām siltuma prasībām, kurām dažreiz nav nepieciešama papildu siltuma padeve.

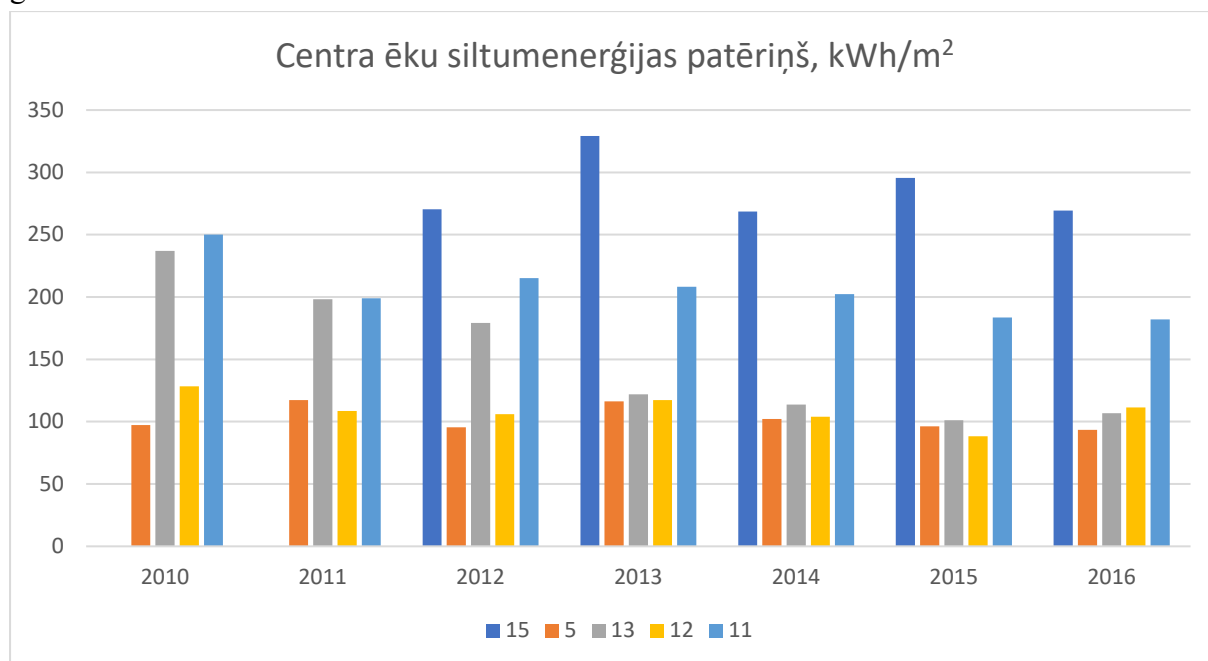


1.6. att. Speciālās nozīmes centra ēku atrašanās vieta



1.7. att. Centralizētās siltumapgādes tīkla pieslēgumi

Pārbaudot visas ēkas, tika konstatēts, ka tikai 5 ēkas ir aprīkotas ar siltumenerģijas skaitītāju. Siltumenerģijas skaitītāji tika uzstādīti tikai tajās ēkās, kur siltumenerģijas patēriņš bija nemainīgs vai regulārs. Siltumenerģija lielākoties ir nepieciešama ēkām, kuras izmanto cilvēki, vai vietējais personāls, piemēram, sporta zālei, peldbaseinam, kopmītnēm, mācību telpām utt. 1.8. att. parāda siltumenerģijas patēriņu neklasificētām speciālajām ēkām pēdējo 7 gadu laikā.



1.8. att. Siltumenerģijas patēriņš neklasificētām speciālajām ēkām (informācija par adresi ir apzināti slēpta).

Siltumenerģijas patēriņš tiek norādīts MWh/m² bez korekcijām pēc apkures grādu dienām, jo iekšējās temperatūras iestatījumi **īpašam mērķim paredzētām ēkām nav stingri noteikti**. Āra temperatūrai būs zināma ietekme uz siltumenerģijas patēriņu jebkurai ēkai, taču šajā gadījumā izšķiroša ietekme ir noslogojuma profilam un konstrukcijas siltumizolācijai. Kā redzams, ēkā Nr. 13 kopš 2013. gada ir ievērojami zemāki siltumenerģijas patēriņi, un tas ir saistīts ar ēku renovācijas pasākumiem, kas tika veikti 2012. gadā. Vidējais siltumenerģijas patēriņš pirms renovācijas bija vidēji 204 kWh/m², bet pēc atjaunošanas siltumenerģijas patēriņš tika samazināts vairāk nekā uz pusi un vidēji tika sasniegts 110 kWh/m². Atlikušajām vērtībām vidējā absolūtā novirze ir 7,92% robežās. Siltumenerģijas patēriņš ēkai Nr. 15 ir daudz lielāks, ņemot vērā tās izmantošanas mērķi, kas saistīts ar lielu ūdens patēriņu. Ēka Nr. 15 ir atvērta kopš 2012. gada.

1.6. Enerģijas patēriņa prognozēšana

Saskaņā ar 2015. gada datiem par enerģijas patēriņu, ko publiskojusi ASV Enerģētikas informācijas pārvalde (Energy Information Administration, EIA) [17], dzīvojamās un

komerciālās ēkas patērēja 39 kvadriljonus Btu (britu termiskās mērvienības), kas ir 40% no kopējā enerģijas patēriņa Amerikas Savienotajās Valstīs [18]. Tāpat, kā norāda Eiropas Komisija [19] ES ēkas, ēku enerģijas patēriņš veido 40% no kopējā enerģijas patēriņa ES. Globālā mērogā būvniecības nozare 2010. gadā patērēja aptuveni 32% no kopējā enerģijas patēriņa [20]. Enerģijas patēriņa modeļiem ir būtiska loma enerģijas pārvaldībā un saglabāšanā, jo tie attiecas uz ēkām. Tie var palīdzēt novērtēt ēkas energoefektivitāti, palīdzēt veikt ēkas nodošanu ekspluatācijā, kā arī identificēt un diagnosticēt ēkas sistēmas traucējumus. Iekļaujot pašreizējās ēkas ēku modelēšanas metodes ēku enerģijas patēriņa prognozēšanai, tās var iedalīt trīs grupās, saskaņā ar avotiem [21], [22], [23]:

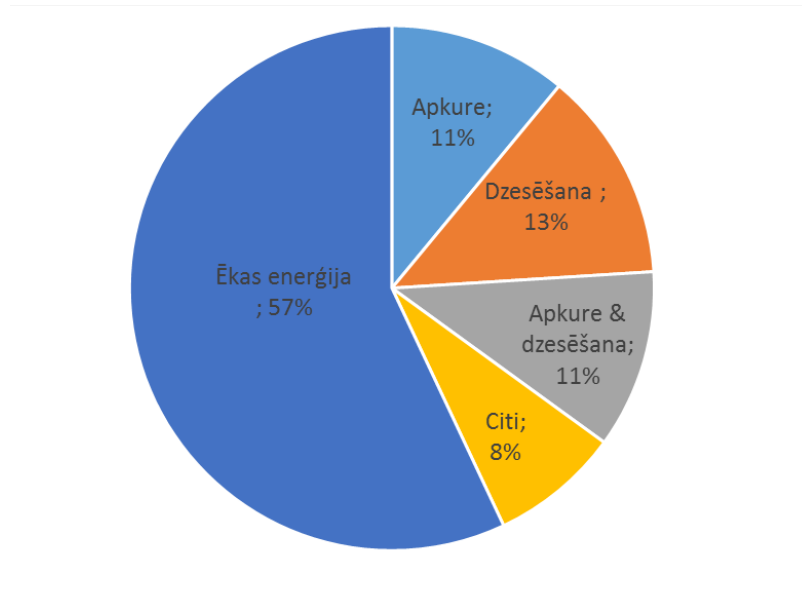
- ✓ inženiertehniskās metodes (baltās kastes modeļi);
- ✓ statistiskās metodes (melnās kastes modeļi);
- ✓ hibrīdpieejas (pelēkās kastes modeļi).

Ar inženiertehniskās metodēm tiek fiziski modelēts ēkas enerģijas patēriņš, imitējot termodinamikas likumus un izmantojot plašus ēkas līmeņa datus. Šo metodi nevar precīzi piemērot pilsētas mērogā, jo tā prasa lielu datu un aprēķinu apjomu, tomēr to izmanto, lai novērtētu nelielas ēku tipoloģijas enerģijas patēriņu, kas pēc tam tiek summēta pa visām pilsētas teritorijām [24]. Statistisko metožu izmantošana ēkas enerģijas patēriņa novērtēšanai ir vērsta uz tiešu enerģijas patēriņa regresiju uz saistīto ēku un klimata mainīgajiem lielumiem. Parasti mašīnmācīšanās metodes ietilpst šajā kategorijā [21]. Hibrīdmetodes ietver gan inženiertehnisko, gan statistisko modeļu apvienojumu, un inženiertehnisko modeļu izejas datus izmanto kā ieejas datus statistiskajos modeļos. Šo modeļu mērķis ir kompensēt dažus ierobežojumus, kas saistīti ar fizisko modelēšanu (piemēram, nespēju modelēt katru rajona ēku), izmantojot statistisko pieeju elastīgumu [25].

Prognozēto enerģijas patēriņu, atbilstoši prognozēšanas mērķim un specifikai saskaņā ar avotu [26] var iedalīt šādās piecās kategorijās:

- ✓ visa ēkas enerģija / elektrība;
- ✓ apkures un dzesēšanas enerģija;
- ✓ apkures enerģija;
- ✓ dzesēšanas enerģija;
- ✓ visa pārējā enerģija.

Kā parādīts zemāk 1.9. att., vairāk nekā 50% pētījumu koncentrējas uz enerģijas patēriņa prognozēšanu visas ēkas līmenī, kas atspoguļo ēkas kopējos parametrus. Visu pētījumu kopējais apjoms apkures un dzesēšanas kategorijā ir 35%. Iemesls ir tāds, ka komerciālās vai izglītības/pētniecības ēkas, kā minēts iepriekš, visbiežāk tiek uzskatītas, kā siltuma avots un dzesēšanas enerģijas patēriņš veido milzīgu ēkas enerģijas patēriņa daļu. Jāatzīmē, ka, saistībā ar klimata joslām un pētījumu vajadzībām, dažos no pētījumiem kā izejas dati izvēlēta apkures vai dzesēšanas enerģija [27].



1.9. att. Sadalījums pēc enerģijas veida [28].

Vissvarīgākās enerģijas patēriņa sastāvdaļas ir ēkas apkure/dzesēšana, karstā ūdens sagatavošana un elektrības patēriņš. Starp tiem esošo ēku siltumenerģijas pieprasījums veido vairāk nekā 50% no primārā enerģijas pieprasījuma dzīvojamajās un dienesta ēkās ES [29].

Neklasificētu ēku, kas galvenokārt atrodas ziemeļu klimatiskajos apstākļos, izpēte liecina, ka enerģijas patēriņš lielākoties ir saistīts ar apkures, dzesēšanas un karstā ūdens sagatavošanas mērķiem. Par enerģijas patēriņu mākslīgajam apgaismojumam var pieņemt sabiedriskajām ēkām noteiktās vidējās vērtības atkarībā no cilvēku aktivitātēm un nepieciešamā apgaismojuma līmeni luksos, kas norādīts Eiropas un valstu standartos un būvnormatīvos. Ir svarīgi uzsvērt, ka enerģijas avots (fosilais vai atjaunojamais kurināmais) apkurei, dzesēšanai un karstā ūdens sagatavošanai neklasificētu ēku gadījumā nav definēts un to var izvēlēties, pamatojoties uz esošajām vajadzībām un iespējām, atkarībā no ēkas veida (stacionāra vai pārvietojama) un citiem dažādi tehniski ekonomiskajiem parametriem. Militārais sektors ir ļoti ieinteresēts pārnēsājamajos (mobilajos) enerģijas apgādes risinājumos, un mācībās NATO SMART ENERGY CAPABLE LOGISTICIAN 2015 [30] tika prezentētas vairākas viedās enerģijas iekārtas.

Padziļināta literatūras analīze rāda, ka ēku enerģijas patēriņu mazo pilsētu teritorijās ir grūti novērtēt bez ēku līmeņa datiem, un tikai daži pētījumi ir mēģinājuši novērtēt enerģijas pēdas dzīvojamajām un komerciālajām ēkām apkārtnes mērogā [31] nodrošinot vispārēju paņēmieni ēku enerģijas novērtēšanai no publiski pieejamiem datiem ASV. Zinātnieki atzīst, ka arī mašīnmācīšanās modeļu izmantošana pilsētu un reģionālajiem plānotājiem var palīdzēt prognozēt enerģijas slodzi.

Viens no veidiem, kā novērtēt ēkas enerģijas patēriņu, ja **nav faktisko sensoru datu**, ir izveidot fizisko ēku modeļus ar reprezentatīvu ēku “veidni” un pēc tam veikt termodinamiskās simulācijas, lai novērtētu enerģijas pieprasījumu [21]. Šie ēku enerģijas patēriņa “inženiertehniskie” modeļi ir skaitliski dārgi, un nevar aptvert plašo dažādu ēku klāstu, kas atrodas pilsētās, jo katra ēkas veida modelēšanai nepieciešami ļoti detalizēti ievades dati, kuru

savākšanas izmaksas ir lielas. Statistiskos modeļus var izmantot, lai aizpildītu nepilnības, ja resursi ir pārāk ierobežoti, lai izmantotu fiziskos modeļus, vai ja pētījumu zonas mērogs padara fizisko modelēšanu nepraktisku. Statistiskā pieeja ļauj izvairīties no dārgiem fiziskās modelēšanas centieniem, un tā spēj sniegt pamatotas aplēses, kuras var apstiprināt, ņemot vērā esošo ēku līmeņa enerģijas patēriņa datu bāzes [31].

Statistiskajai pieejai [32] ir iesaka izmantot stabilus lineāros modeļus, lai novērtētu dzīvojamo un komerciālo ēku enerģijas patēriņu. Ēkas enerģijas patēriņu uzdod ar šādu funkciju:

$$\gamma = \alpha + \beta_1 SPATIAL_i + \beta_2 BULK_i + \beta_3 OCC_i + \beta_4 TYPE_i + \beta_5 ENERGY_i + \varepsilon, \quad (1.1.)$$

kur SPATIAL sastāv no ģeogrāfiskiem un atrašanās vietas mainīgiem lielumiem, BULK iekļauj mainīgos lielumus, kas mēra ēkas lielumu un izvietojumu uz dotā zemes gabala, OCC apzīmē mainīgos attiecībā uz iemītnieku blīvumu un enerģiju patērējošajām ērtībām, TYPE ietver telpas tipa mainīgos, ENERGY sastāv no enerģijas avota mainīgajiem un ε ir kļūdas parametrs.

Izmantojot robustas daudzkārtējās regresijas metodes, tiek pārbaudīti faktori, kas ietekmē ēkas energoefektivitāti [33], [34], [35]. Balstoties uz modeļa koeficientiem un nozīmīguma testiem, modeļa izvades dati tiek izmantoti, lai prognozētu ēkas enerģijas patēriņu un lai izveidotu energoefektivitātes etalonu komerciālām ēkām [36], [37]. Jāatzīmē, ka ēku energoefektivitātes prognozēšanai, izmantojot vairākkārtējās regresijas modelēšanu, ir ierobežojumi [34]. Piemēram, potenciālā novirze koeficientu aplēsēs var rasties no skaidrojošo mainīgo kolinearitātes. Tomēr šī metode tiek atzīta par piemērotu, ņemot vērā datu bāzes raksturu un apjomu, un šīs analīzes mērķi. Sakarā ar būtiskajām enerģijas patēriņa atšķirībām starp ēku tipiem, tipam raksturīgie mainīgie lielumi jāaprēķina atsevišķi katram ēkas veidam. Šim nolūkam būtu jāveic plaša datu apkopošana no visām esošajām Latvijas speciāliem mērķiem paredzētajām ēkām, jāklasificē pēc veida un citiem statistiskajiem mainīgajiem raksturojumiem.

Kaut arī lineārās regresijas modeļi ir viegli interpretējami, mašīnmācīšanās modeļi ir labāk piemēroti, lai modelētu sarežģītās attiecības starp ēkas līmeņa raksturlielumiem un enerģijas patēriņu, jo šādiem modeļiem ir mazāk ierobežojumu attiecībā uz statistiskajām attiecībām starp mainīgajiem. Iepriekšējie pētījumi ir parādījuši, ka mašīnmācīšanās modeļi ēku enerģijas patēriņa modelēšanā pārsniedz lineāros modeļus [34]. Pētījumā tiek sadalīta datu kopa vasaras un ziemas sezonās un modeļi tiek apmācīti katrai sezonai atsevišķi. Citi pētījumi [38], [39], [40] atklāj, ka mašīnmācīšanās modeļi darbojas labāk nekā modeļi, kuru pamatā ir lineārā regresija, tomēr tos ierobežo gan daži modeļi, kurus viņi apskata, gan mazākas datu kopas, ko viņi izmanto. Lai iegūtu autentiskus un ticamus rezultātus, ir jāizmanto plašs mašīnmācīšanās modeļu klāsts un jāizmanto pēc iespējas vairāk UBECS (Unclassified Buildings Energy Consumption Survey - Neklasificētu ēku enerģijas patēriņa apsekojuma) datu ar mērķi izveidot vispārēju modeli neklasificētas ēkas enerģijas patēriņa novērtēšanai. Līdzīgus enerģijas patēriņa apsekojumus veic ASV Enerģētikas informācijas aģentūra, taču dati ir pieejami tikai par komerciālām ēkām un attiecīgi par ASV ēkām. Kas attiecas uz Latvijas neklasificētās speciāliem mērķiem paredzētajām ēkām, visplašākie un pilnīgāk apkopotie dati

ir sniegti un analizēti šajā pārskatā, kas acīmredzami nav pietiekami statistiskās modelēšanas metodes pielietošanai.

Padziļināta literatūras analīze rāda, ka statistisko metožu (melnās kastes modeļi) un hibrīdpieteju (pelēkās kastes modeļi) vajadzībām ir nepieciešams daudz UBECS datu, lai realizētu esošās modelēšanas metodes. Datu meklēšanas mēģinājumi skaidri parāda informācijas trūkumu, ņemot vērā neklasificētas ēkas enerģijas patēriņa novērtējumu apstākļos, kad liela daļa neklasificēto ēku atrodas Iekšlietu ministrijas un Aizsardzības ministrijas jurisdikcijā. Iepriekš minētie apstākļi nosaka ēku enerģijas patēriņa prognozēšanas metožu izvēli, un turpmākajai izpētes darbībai tiek izvēlētas inženiertehniskās metodes (baltās kastes modeļi).

1.7. Energoefektivitātes novērtēšana

Pēc enerģijas patēriņa samazināšanas noteikšanas ar darbībām, kas nav saistītas ar kapitālu, visiem instalācijas objektos un infrastruktūrā būtu jāveic turpmāka pieprasījuma samazināšanas novērtējums, izmantojot energoefektivitātes tehnoloģijas. NZEI (Net Zero Energy Installation - nulles enerģijas ēku instalācija) novērtēšanas nolūkā var tikt paplašināti potenciālie energoefektivitātes projekti, un instalācijas personāls var aprēķināt ietaupījumus un pēc nepieciešamības atbalstīt darbuzņēmējus. Šīs analīzes rezultātam jāietver potenciālo ietaupījumu aprēķins visas bāzes mērogā [41], [42]. Pirms projekta ieviešanas sertificētiem enerģijas novērtēšanas speciālistiem jāveic investīciju līmeņa audits. Investīciju līmeņa energoefektivitātes novērtējuma rezultātam jāietver aprēķinātie ietaupījumi (enerģijas un izmaksu ziņā), projekta izmaksas, vienkāršs atmaksāšanās periods un energoefektivitātes pasākumu ikgadējās darbības un uzturēšanas (O&M - Operations and Maintenance) izmaksas. Lai samazinātu sākotnējo enerģijas patēriņu, ir nepieciešams kvantitatīvs enerģijas samazināšanas potenciāla novērtējums pirms atjaunojamās enerģijas vai citu ražošanas tehnoloģiju lieluma noteikšanas. Kā papildu iznākumam vajadzētu būt arī instalācijas iekārtu pašreizējās relatīvās energoefektivitātes etalonuzdevumu noteikšanai. Plaši aprakstītas pieejas un metodes energoefektivitātes novērtēšanai un turpmākai slodzes novērtēšanai ierosinājusi Nacionālā atjaunojamās enerģijas laboratorija (ASV) [31]. Zemāk ir aprakstītas tikai dažas pamatidejas.

Energoefektivitātes pārbaude un audits: apmācītam instalācijas personālam vai darbuzņēmējam jāveic detalizēti energoaudi, lai noteiktu energoefektivitātes uzlabošanas potenciālu. Detalizācijas pakāpei būtu jāsniedz pietiekami daudz informācijas, lai veiksmīgi īstenotu daudzus projektus ar augstu uzticamības pakāpi. Piemēram, apgaismojuma projektam detalizācija attiektos uz apgaismojuma līmeņa mērīšanu, spuldžu un balastu skaita uzskaiti katrā telpā un mērinstrumentu uzstādīšanu, lai noteiktu apgaismojuma faktisko izmantošanu un darbības stundas. Energoefektivitātes pārbaudei un auditam jābūt pēc iespējas visaptverošam, un tajā jāpārbauda tādi enerģijas izmantošanas veidi kā apgaismojums, HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning - apkure, ventilācija un gaisa kondicionēšana) sistēmas, ēku vadības sistēmas, ēkas norobežojošās konstrukcijas, ūdens patēriņš, ierīces,

kontaktdakšu slodzes, rūpnieciskās iekārtas, ēdināšanas pakalpojumu aprīkojums un instalācijas infrastruktūra, piemēram, ielas apgaismojums.

Enerģijas salīdzinošā novērtēšana: instalācijas personālam jāmēģina noteikt savu ēku relatīvo energoefektivitāti salīdzinājumā ar citiem līdzīgiem objektiem. Salīdzinošā novērtēšana ļauj noteikt relatīvo energoefektivitātes potenciālu un izceļ lielos enerģijas patērētājus objektā. Instalācijas ar citiem objektiem salīdzina, pamatojoties uz enerģijas patēriņa indeksu (EUI - Energy Use Index), kas aprēķina izmantoto kBtu attiecību pret kvadrātpēdu. Instalāciju EUI var salīdzināt ar citu iekārtu instalāciju pēc vecuma, atrašanās vietas, veida vai citiem faktoriem. Energoefektivitātes mērķus var noteikt, pamatojoties uz jauna EUI sasniegšanu, (šādā veidā tiek noteiktas federālās pilnvaras energoefektivitātes jomā). Piemēram, varētu izvirzīt mērķi, lai visas instalācijas biroju ēkas sasniegtu vidējo EUI no ENERGY STAR® kvalificētas komerciālas ēkas.

Ēku enerģijas modelēšana: tiek izveidoti izvēlēto instalācijas objektu datormodeļi, lai noteiktu ietaupījumus no iespējamajiem energoefektivitātes vai enerģijas taupīšanas pasākumiem.

Privāto sektoru vai komunālo pakalpojumu sniedzēju iesaiste izpildes līgumā: jāizpēta izpildes līgumu, piemēram, enerģijas ietaupījuma līgumu (ESPC - Energy Savings Performance Contract) vai komunālo pakalpojumu energopakalpojumus (UESC - Utility Energy Services Contract), kur privātā sektora vai komunālais uzņēmums palīdz noteikt iespējamus ietaupījumus un enerģijas taupīšanas pasākumus.

Ēku pamatizpēte: ja nav pieejami resursi detalizētāka audita vai skrīninga veikšanai, pamata novērtējums var sniegt pietiekamu informāciju, lai turpinātu nulles enerģijas ēku izstrādes (NZEI) novērtējumu. Šī pārbaude sastāv no ēku izpētes, kurās tiek noteikti potenciālie enerģijas taupīšanas projekti, kā rezultātā tiek veiktas aptuvenas energoefektivitātes potenciāla aplēses. Šis novērtējuma līmenis nebūs pietiekams projekta īstenošanai. Pirms jebkādu projektu ieviešanas jāveic investīciju līmeņa audits, lai informētu par projektu priekšlikumiem. Pamata enerģijas pārbaudē var noteikt enerģijas taupīšanas pasākumus, piemēram, kvēlspuldžu nomaiņu ar kompaktām dienasgaismas spuldzēm, veco vai neefektīvo katlu nomaiņu vai nepieciešamību pēc ēkas atkārtotas nodošanas ekspluatācijā.

Tomēr [43] Nagpal, S. atzīst, ka modeļa izstrādes darbplūsmas, kas paredzētas atsevišķām ēkām, prasa tādu ieguldījumu, kas būtu pārāk dārgi laika un izmaksu ziņā, lai piemērotu tādiem centriem (pilsētiņām), kuros bieži ietilpst simtiem dažādu lietojumu ēku. Kaut arī mazāki centri var efektīvi izmantot tradicionālo BEM (Block element Modifier) pieeju, lai pētītu modernizācijas scenārijus, lielākiem centriem šī iespēja nav pielietojama. Statistisko un izklājlapu modeļu kombināciju, kas, iespējams, pilnībā neaptver atsevišķu pilsētiņas ēku unikālās arhitektūras iezīmes, programnodrošinājuma prasības un sistēmu konfigurācijas, joprojām var izmantot, lai precīzi prognozētu ietaupījumus no dažādu modernizēšanas pasākumu ieviešanas. Papildus ir sniegta praktiskā informācija par sešām RE tehnoloģijām un atjaunojamās enerģijas projektu ieviešanas tehniski un finansiāli efektīvu risinājumu radīšanas procesu (Atjaunojamo energoresursu saglabāšanas investīciju programmas (ECIP) ceļvedis [44]).

1.8. Secinājums par neklasificēto ēku enerģijas patēriņa statistiskiem datiem un pētāmo objektu saņemtajiem praktiskajiem rādītājiem

1. Darbā ir parādīti aprēķinātie un izmērītie dati par enerģijas patēriņu neklasificētām ēkām, kas būvētas pirms 1990. gadiem. Oficiālie dati par visām neklasificētajām ēkām liecina, ka vidējais izmērītais kopējais gada enerģijas patēriņš ir 212 kWh/m², bet ēkām, kurām tika veikti atsevišķi mērījumi, tas bija aptuveni 230 kWh/m². Enerģijas patēriņš, kas tika aprēķināts saskaņā ar vietējiem noteikumiem, deva daudz zemākus rezultātus - 153 kWh/m², kas ir par 39% zemāks nekā izmērītais.
2. Uzrādītie rezultāti par karstā ūdens daudzumu un enerģijas patēriņa tā sagatavošanai divām kopmītnēm 2015. un 2016. gadā liecina, ka vidēji karstā ūdens daudzums dienā ir 70 l/dienā, kas ir par aptuveni 17% mazāk, nekā norādīts vietējos noteikumos. Vidējā nepieciešamā enerģija karstā ūdens sagatavošanai ir aptuveni 71 kWh uz cilvēku.
3. Īpaši veiktie mērījumi parādīja, ka vidējais kopējais enerģijas patēriņš gadā policijas iecirkņos ir 252 kWh/m², bet ugunsdzēsības iecirkņos - 317 kWh/m². Jāatzīmē, ka jaunākām ugunsdzēsības iecirkņu ēkām ir palielināts enerģijas patēriņš. Mērījumu rezultāti citai līdzīgas nozīmes ēku grupai parādīja, ka vidējais siltumenerģijas patēriņš gadā (apkurei un karstā ūdens sagatavošanai), no 2010. gada līdz 2017. gadam ir 121 kWh/m² ugunsdzēsības iecirkņos un 112 kWh/m² policijas iecirkņos. Abos gadījumos ugunsdzēsības iecirkņu enerģijas patēriņš ir lielāks nekā policijas iecirkņos, kas izskaidrojams ar šāda veida ēku arhitektūras īpatnībām. Ikgadējās siltumenerģijas patēriņa atšķirības var izskaidrot ne tikai ar atšķirīgajiem klimatiskajiem apstākļiem, kas korelē starp ugunsdzēsības un policijas iecirkņiem. Arī siltumenerģijas patēriņa svārstības gadā katrai ēkai ir viena no vissvarīgākajām speciālam mērķim izmantojamo ēku īpašībām, kad siltumenerģijas patēriņš ir ne tikai ēkas siltumizolācijas un ārējā gaisa temperatūras funkcija, bet to spēcīgi ietekmē arī lietotāju izturēšanās, kas mainās un ir atkarīga no uzdevuma, kas uzticēts operatīvajam personālam un citiem cilvēkfaktoriem.
4. Apsekojot īpašas nozīmes centru siltumenerģijas patēriņu, tika secināts, ka lielākajā daļā ēku siltumenerģijas patēriņš ir sadalīts nevienmērīgi, kas izskaidrojams ar ēkas mērķi un izlases veida izmantošanu, kad tas ir nepieciešams. Dažas ēkas tiek izmantotas kā noliktavas ļoti dažādiem mērķiem un īpašām siltuma prasībām, kurām dažreiz nav nepieciešama papildu siltuma padeve. Siltumenerģijas skaitītāji tika uzstādīti tikai tajās ēkās, kur siltumenerģijas patēriņš bija nemainīgs vai regulārs. Siltumenerģija lielākoties ir nepieciešama ēkām, kuras izmanto cilvēki vai vietējie darbinieki, piemēram, sporta zālei, peldbaseinam, kopmītnēm, mācību telpām utt. Āra temperatūrai būs zināma ietekme uz jebkuras ēkas siltumenerģijas patēriņu, bet šajā gadījumā izšķiroša ietekme ir noslogojuma profilam un korpusa siltumizolācijai. Vidējais siltumenerģijas patēriņš pirms atjaunošanas darbiem bija vidēji 204 kWh/m², bet pēc atjaunošanas siltuma patēriņš tika samazināts vairāk nekā uz pusi un vidēji bija 110 kWh/m².
5. Lai rastu optimālus risinājumus, tika veikts plašs piedāvāto enerģijas patēriņa prognozēšanas metodiku pētījums. Šajā darbā ir uzsvērtas būtiskākās idejas par enerģijas

patēriņa prognozēšanu un energoefektivitātes pasākumu novērtējumu. Inženiertehniskās metodes fiziski modelē ēkas enerģijas patēriņu, imitējot termodinamikas likumus un izmantojot plašus ēkas līmeņa datus. Šo metodi nevar precīzi piemērot pilsētu mērogā, jo tai ir lielas datu apjoma un aprēķina prasības, tomēr to izmanto, lai novērtētu nelielas ēku tipoloģijas enerģijas patēriņu, kas pēc tam tiek summēta pa visām pilsētas teritorijām. Ēku enerģijas patēriņa novērtēšanas statistisko metožu mērķis ir tieši regresēt enerģijas patēriņa vērtības saistītajos ēku un klimata mainīgajos lielumos. Kopumā mašīnmācīšanās metodes ietilpst šajā kategorijā. Hibrīdmetodes ietver gan inženiertehnisko, gan statistisko modeļu apvienojumu, un kā ieejas datus statistiskajiem modeļiem izmanto inženiertehnisko modeļu izejas datus. Šo modeļu mērķis ir kompensēt dažus ierobežojumus, kas saistīti ar fizisko modelēšanu (piemēram, nespēju modelēt katru rajona ēku), izmantojot elastīgo statistisko pieeju. Modeļu izstrādes darbplūsmas, kas paredzētas atsevišķām ēkām, prasa ievērojamu piepūli, kas būtu pārāk dārgi laika un izmaksu dēļ, piemērojot šo metodi centros, kuros bieži ietilpst simtiem daudzveidīga lietojuma ēku. Kamēr mazāki centri var efektīvi izmantot tradicionālo BEM pieeju, lai pētītu modernizācijas scenārijus, lielākajiem centriem šī iespēja nav pielietojama. Statistisko un izklājlapu modeļu kombināciju, kas, iespējams, pilnībā neaptver atsevišķu pilsētiņas ēku unikālās arhitektūras iezīmes, programnodrošinājuma prasības un sistēmu konfigurācijas, joprojām var izmantot, lai precīzi prognozētu ietaupījumus no dažādu modernizēšanas pasākumu ieviešanas. Neklasificētu ēku, kas galvenokārt atrodas ziemeļu klimatā, izpēte rāda, ka enerģijas patēriņš lielākoties ir saistīts ar apkures, dzesēšanas un karstā ūdens sagatavošanas mērķiem. Par enerģijas patēriņu mākslīgajam apgaismojumam var pieņemt tā vidējās vērtības sabiedriskām ēkām atkarībā no cilvēku aktivitātes un nepieciešamā apgaismojuma luksos, kas norādītas Eiropas un valstu standartos un būvnormatīvos. Apsverot iespējamās enerģijas avotus, ir svarīgi atzīmēt, ka enerģijas avotus (fosilo vai atjaunojamo kurināmo) apkurei, dzesēšanai un karstā ūdens sagatavošanai neklasificētām ēkām var izvēlēties, pamatojoties uz esošajām vajadzībām un iespējām, atkarībā no ēkas veida (stacionāras vai pārvietojamas) un citiem dažādiem tehniski ekonomiskiem parametriem.

6. Ministru kabineta noteikumos Nr.222 par ēku energoefektivitātes aprēķina metodēm un ēku energosertifikācijas noteikumiem noteiktas ēku energoefektivitātes klases no A + līdz G (salīdzinošajā vērtēšanas skalā). Dzīvojamām ēkām A+ klase energoefektivitātes rādītājs apkurei nepārsniedz 65 kWh uz kvadrātmetru gadā, nedzīvojamām ēkām energoefektivitātes rādītājs apkurei no 90 līdz 130kWhm²/gadā atkarība no ēkas pielietojuma tipa (biroji, izglītības iestādes, slimnīcas utt.). Savukārt G-klase energoefektivitātes rādītājs dzīvojamām ēkām ir noteikts 220 – 260 kWh/m² un nedzīvojamām ēkām ir noteikts 400-450 kWh uz kvadrātmetru gadā un tādām ēkām, pēc noteikumu prasībām, ir nepieciešami energoefektivitātes uzlabošanas pasākumi.

Apkopojot augšminēto, jāsecina, ka neklasificēto ēku energoefektivitāte varētu būt un vajadzētu būt paaugstināma. Energoefektivitātes uzlabošanu var sasniegt gan sistematizējot datus, gan ar izmaiņām normatīvajos aktos, nosakot dažādas prasības, tehnoloģiskām izmaiņām, gan vadības un organizatoriskiem uzlabojumiem valsts īpašumā (neklasificētas

ēkas) esošajām ēkām, gan ar individuālo patērētāju uzvedības maiņu, kas panākta, patērētājus izglītojot un informējot, neizmirstot pētījumā sektora specifiku.

2. NEKLASIFICĒTO ĒKU SISTEMATIZĀCIJA

2.1. Vispārējais apraksts

Neklasificēto ēku energoefektivitātes risinājumi ir aktuāls jautājums, it īpaši tāpēc, ka liela daļa neklasificēto ēku tiek uzturēta par publiskiem līdzekļiem. Lai pēc iespējas optimizētu energoefektivitāti paaugstinošus risinājumus, kā arī plānotu veicamos pasākumus attiecībā uz neklasificēto ēku portfolio, proti – ēku kopumu, jāveic sākotnējā analīze un ēkas jāklasificē atbilstoši tipoloģijai.

Attiecībā uz energoefektivitātes paaugstināšanu nozīmīgi ēkas raksturojošie parametri ir funkcionālās, konstruktīvās, lietošanas mērķa, vēlamā vai noteiktā iekštelpu vides kvalitātes līmeņa un citām pazīmēm.

Klasificējot ēkas, iespējams radīt tipveida risinājumus, kas vēlāk replicējami uz līdzīgām ēkām. Tipveida risinājumu radīšanu ievērojami atvieglo modelēšanas rīki. Izmantojot kādu no vienotajiem formātiem, piemēram *.ifc, iespējams izmantot dažādus rīkus energopatēriņa analīzei.

Īslaicīgām būvēm, piemēram, teltīm, arī iespējami energoefektivitātes paaugstināšanas risinājumi. Promocijas darbs apskata arī tēlu sistematizācijas principus, kā arī veicamos pasākumus energopatēriņa samazināšanai. Darbs aplūko neklasificēto ēku portfolio Latvijā, proti, salīdzinot ēku vecumu dažādu dienestu ietvaros.

2.2. Neklasificēto ēku sistematizācijas nepieciešamība

Saskaņā ar Latvijas Republikas Ministru kabineta noteikumiem [45] par būvju klasifikāciju visas būves tiek sadalītas divās lielās grupās – ēkas (atsevišķi lietojamas apjuntas būves, kurās var iekļūt cilvēki un kuras ir noderīgas, vai paredzētas, cilvēku un dzīvnieku patvērumam vai priekšmetu turēšanai) un inženierbūves (visas būves, kurām nav ēku pazīmju). Savukārt, ēkas tiek sadalītas dzīvojamajās mājās un nedzīvojamajās ēkās, bet inženierbūves tiek sadalītas vairākās apakšgrupās - transporta būves, cauruļvadi, sakaru un elektropārvades līnijas, rūpniecības kompleksās būves un citas inženierbūves.

Saskaņā ar klasifikāciju dzīvojamās mājas var būt viena dzīvokļa mājas, divu vai vairāku dzīvokļu mājas un dažādu sociālo grupu kopdzīvojamās mājas.

Nedzīvojamās ēkas tiek klasificētas viesnīcās un tām līdzīga lietojuma ēkās, biroju ēkās, vairumtirdzniecības un mazumtirdzniecības ēkās, satiksmes un sakaru ēkās, rūpnieciskās ražošanas ēkās un noliktavās, plašizklaides pasākumu, izglītības vai veselības aprūpes iestāžu ēkās un citās nedzīvojamās ēkās.

Savukārt citas nedzīvojamās ēkas tiek sadalītas četrās grupās - lauksaimniecības nedzīvojamās ēkas, kulta ēkas, kultūrvēsturiskie objekti un citas, iepriekš neklasificētas ēkas.

Neklasificēto ēku sistematizācija ir nepieciešama, lai turpmāk varētu veikt analīzi par energoefektivitāti uzlabojošo pasākumu ietekmi uz ēku kopējo energoefektivitāti, nepiesaistot to pie konkrētas adreses un atrašanās vietas. Tādejādi tiks nodrošināti ierobežotas piekļuves

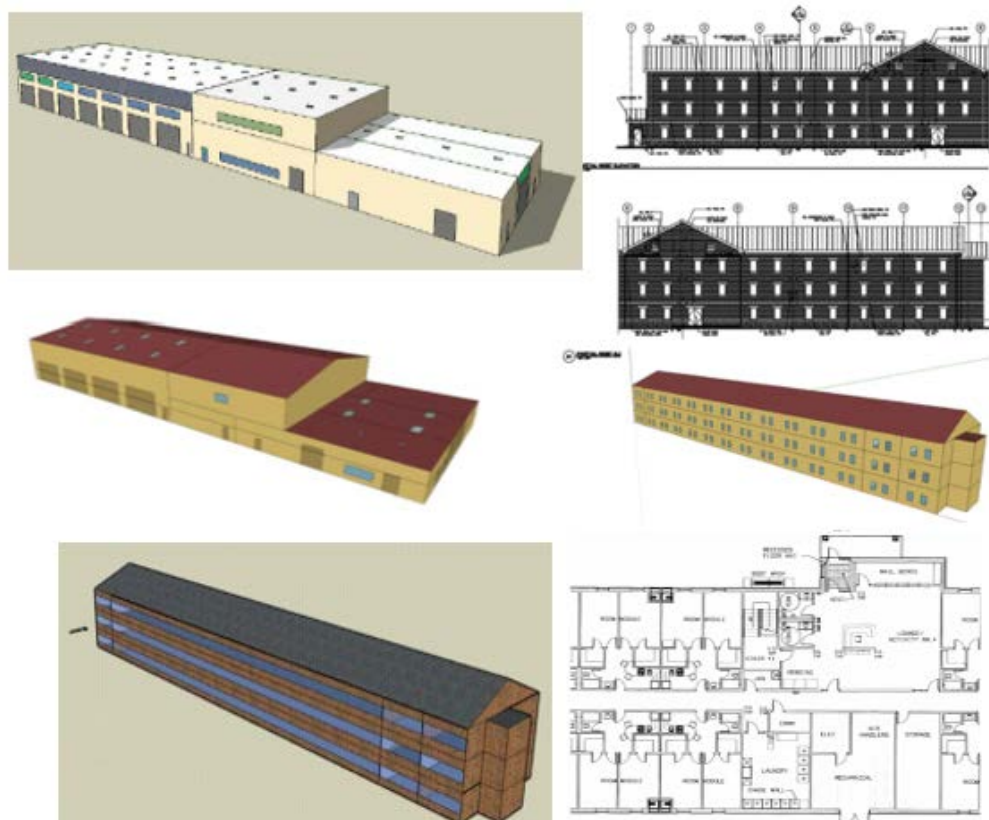
datu aizsardzība pirms gala lēmuma pieņemšanas un speciālistu pieaicināšanas, lai veiktu ēku apsekošanu klātienē.

Viens no šī promocijas darba mērķis ir sistematizēt neklasificētās ēkas pēc dažādām funkcionālām, konstruktīvajām un citām pazīmēm.

Neklasificēto ēku sistematizācija ļauj turpmāk uzsākt darbu pie tipveida modeļu izveides.

ASV armija izmanto tipveida ēku dizainu, lai novērtētu dažādu kompleksu renovācijas pasākumu lietderību un energoefektivitāti. Tipveida ēku modeļa izmantošana ļauj nodrošināt konfidencialitāti un datu aizsardzību pirms gala lēmumu pieņemšanas.

2.1. att. parāda ASV armijas ēku tipveida modeļu izskatu [46], [47], [48].

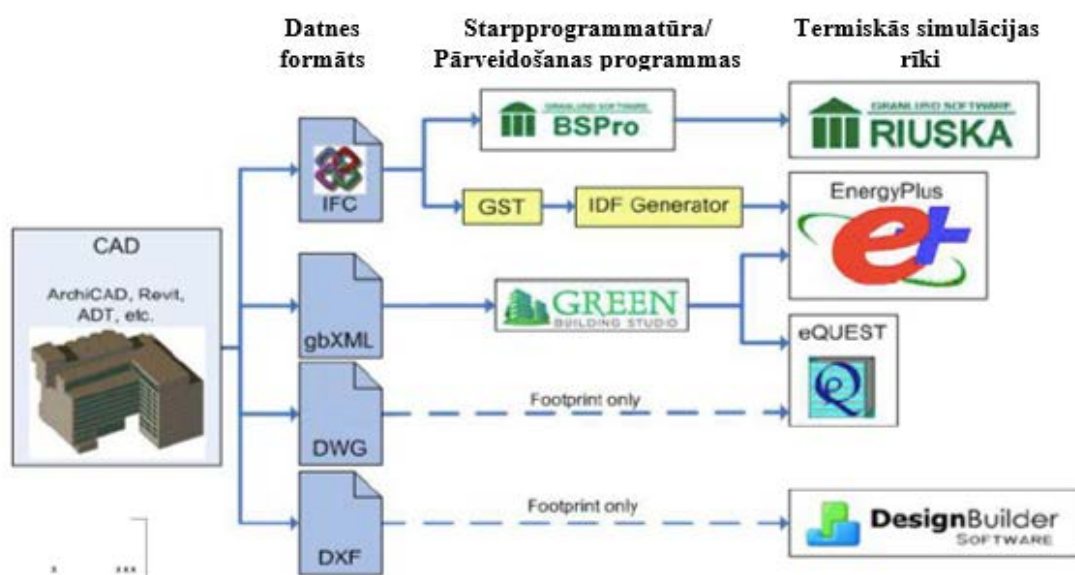


2.1. att. ASV armijas ēku tipveida modeļi [46], [47], [48], [49].

Tālāk ASV izstrādātie modeļi tiek izmantoti tīmekļa modelēšanas rīkā - gandrīz Nulles plānotājā [50]. Šis plānotājs palīdz projektētājiem un lēmumu pieņēmējiem optimizēt enerģijas un ūdens patēriņu, kā arī atkritumu daudzumu ēku līmenī.

Papildus tam, tipveida modeļu izveide palīdz novērtēt termisko tiltu ietekmi un sagatavot katalogu ar tipveida risinājumiem, tādējādi nodrošinot vienādu pieeju energoaudita veikšanai neatkarīgi no izvēlēta darbu veicēja pieredzes. Avota [51] dati liecina par termisko tiltu ietekmi uz militāro ēku kopējo energoefektivitāti un tipveida katalogu lietderību ēku renovācijas projektu izstrādes stadijā.

Balstoties uz pētījuma rezultātiem, turpmāk būs iespējams izstrādāt tipveida unificētos modeļus. Pašlaik praksē tiek izmantoti IFC un DWG formāti, lai veiktu ēku energopatēriņa analīzi.



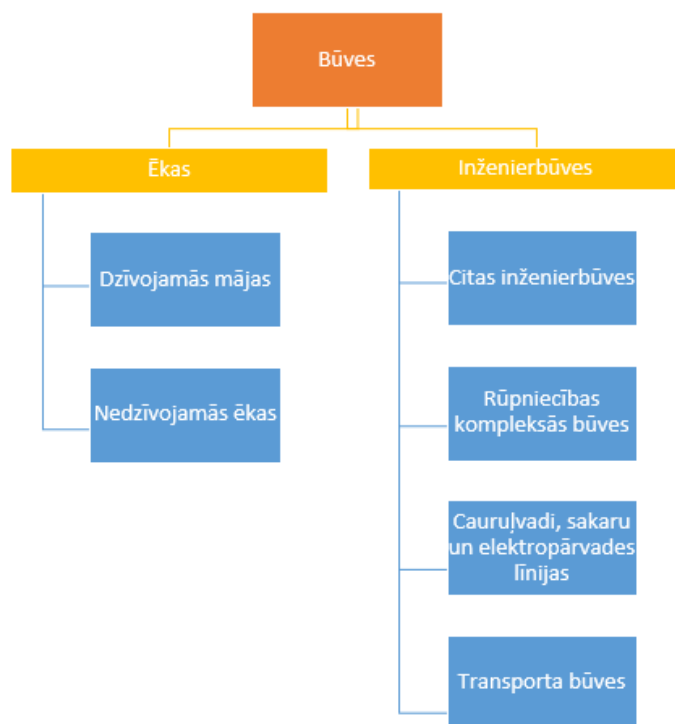
Footprint only – tikai datora atmiņas resursi

2.2. att. Ēkas energopartēriņa novērtēšanas iespējas [52].

Papildus iepriekšminētajiem programmām, mūsdienās izmanto arī IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE) programmu. Šī programma dod iespēju izmantot gan DWG formātu, gan IFC 3D ēku modeli. Papildus tam, ir iespējams izveidot ēku modeli balsoties uz ēkas plānu vizuālajiem datiem.

Būvju pamatklasifikācija

Saskaņā ar vispārpieņemto definīciju ēkas ir atsevišķi lietojamas apjuntas būves, kurās var iekļūt cilvēki un kuras ir noderīgas vai paredzētas cilvēku un dzīvnieku patvērumam vai priekšmetu turēšanai. Papildus tam, pazemes būves, kuras paredzētas cilvēku patvērumam vai priekšmetu turēšanai arī tiek pieskaitītas pie ēkām. Plašāks jēdziens, būve, tiek lietots Latvijas Būvniecības likumā [53]. Saskaņā ar šo likumu būve ir ķermeniska lieta, kas tapusi cilvēka darbības rezultātā un ir saistīta ar pamatni. Būvju iespējamā klasifikācija, kas tiek izmantota šī pētījumā parādīta 2.3. att.



2.3. att. Būvju sākotnējais iedalījums

Ēku un inženierbūvju klasifikācija parādīta 2.1. un 2.2. tab.

2.1. tabula

Ēku klasifikācija

Dzīvojamās mājas	Nedzīvojamās ēkas
Viena dzīvokļa mājas	Viesnīcas un tām līdzīga lietojuma ēkas (viesnīcu ēkas, citas īslaicīgas apmešanās ēkas)
Divu vai vairāku dzīvokļu mājas	Biroju ēkas
Dažādu sociālo grupu kopdzīvojamās mājas	Vairumtirdzniecības un mazumtirdzniecības ēkas
	Satiksmes un sakaru ēkas (sakaru ēkas, stacijas, termināļi un ar tām saistītās ēkas, garāžu ēkas)
	Rūpnieciskās ražošanas ēkas un noliktavas (rūpnieciskās ražošanas ēkas, rezervuāri, bunkuri, silosi un noliktavas)
	Plašizklaides pasākumu, izglītības vai veselības aprūpes iestāžu ēkas (plašizklaides pasākumu ēkas, muzeji un bibliotēkas, skolas, universitātes un zinātniskās pētniecības ēkas, ārstniecības vai veselības aprūpes iestāžu ēkas, sporta ēkas)
	Citas nedzīvojamās ēkas: lauku saimniecību nedzīvojamās ēkas, kulta ēkas, vēsturiskie vai aizsargājamie pieminekļi

Inženierbūvju klasifikācija

Transporta būves	Cauruļvadi, sakaru un elektropārvades līnijas	Rūpniecības kompleksās būves	Citas inženierbūves
Šosejas, ielas un ceļi	Maģistrālie cauruļvadi, maģistrālās sakaru un elektropārvades līnijas	Iežguves būves	Sporta un atpūtas būves
Sliežu ceļi	Vietējie cauruļvadi un kabeļi	Elektrostaciju būves	Citas, iepriekš neklasificētas, inženierbūves
Lidlauku skrejceļi		Ķīmiskās rūpniecības būves	
Tilti, estakādes, tuneļi un pazemes ceļi			
Ostas, ūdensceļi, dambji un citas hidrobūves			

Neklasificētu ēku klasē ietilpst soda izciešanas iestādes, cietumi un apcietinājuma centri, aizsardzības spēku, policijas un ugunsdzēsības dienestu ēkas un šo iestāžu kazarmas. Tualetes ēkas, māj-saimniecību saimniecības ēkas, individuālās garāžas, individuālās pirtis, pagrabi, vasaras virtuves, siltumnīcas, apsardzes ēkas, caurlaides ēkas, individuālās lapenes, citur neklasificētās nojumes u.tml.

Neklasificēto ēku sistematizācijas principi

Ēku ir iespējams sistematizēt pēc vairākiem parametriem. Izšķir ekspluatācijas īpašības, plānojuma parametrus, funkcionālo nozīmi u.t.t. Pētījumā ietvaros tika izvēlēti sekojošie būtiski parametri, kas ietekmē energoapgādes risinājumu izvēli, standartizētā modeļa izveidi un tipveida energoefektivitātes pasākumu izstrādi: funkcionalitāte, stāvu skaits, ilgmūžība, materiāls un būvniecības gads. Papildus tam, ēku sistematizācijā var izmantot arī plānojuma parametrus: plānojuma shēmas, ēku funkcionālo zonēšanu un citus.

Pēc **funkcionāliem mērķiem** ēkas var sistematizēt:

- civilās (dzīvojamās un sabiedriskās) – cilvēku sadzīves vajadzību un sabiedrisku darbību nodrošināšanai;
- rūpniecības – dažādai ražošanas darbībai;
- lauksaimniecības – dažādām lauksaimniecības ražošanas nozarēm.

Pēc **stāvu skaita** ēkas var sistematizēt:

- mazstāvu (līdz 5 stāviem);
- ar vidēju stāvu skaitu (5 – 12 stāvi);
- daudzstāvu (vairāk nekā 12 stāvi).

Pēc **ilgmūžības** ēkas var sadalīt:

- ar kalpošanas laiku vairāk nekā 100 gadu;
- ar kalpošanas laiku no 50 līdz 100 gadiem;
- ar kalpošanas laiku no 25 līdz 50 gadiem;
- ar kalpošanas laiku līdz 25 gadiem (pagaidu ēkas).

Ēkas var sadalīt pēc **sienu materiāliem**:

- koka;
- ķieģeļu;
- paneļu saliekamās konstrukcijas;
- citas.

Pēc **sienu konstrukcijas** izšķir:

- nesošās sienas;
- starpsienas;
- pašnesošās sienas.

2.3. Neklasificēto ēku telpu izmantošanas klasifikācija

Lai pareizi noteiktu iekštelpu temperatūras režīmu gada laikā un izvēlētos nepieciešamo gaisa apmaiņas daudzumu, kā arī noteiktu norobežojošo konstrukciju siltumtehnikās īpašības, ir nepieciešams noteikt neklasificēto ēku telpu izmantošanas specifiku. Lielākoties, telpas izmantošanas specifika atbilst biroju un publisko ēku izmantošanas vajadzībām. Galvenā atšķirība, kas jāņem vērā, izstrādājot energoauditu, ir lielāka kaitīgo izdalījumu un siltuma izdalījumu intensitāte.

2.3. tabula

Neklasificēto ēku telpu specifika

Telpas veids	Publiskas ēkas	Neklasificēto ēku specifika
Administratīvas telpas	Biroju telpas un ar to saistītas palīgtelpas	Specializēts apģērbs, uniformas lielāka CLO vērtība, ierobežotas iespējas aizmanot pasīvas vedināšanas un dzesēšanas risinājumus.
Noliktavas	Kancelejas preces, inventārs, biroju tehnika	Sprādzienbīstamie materiāli, municija, pārtikas produkti.
Garāžas	Vieglas automašīnas	Smagas un bruņu automašīnas. Auto remonta darbnīcas (ierobežotas iespējas veikt remontdarbus civilos autoservisos), krāsošanas darbnīcas.
Ēdnīca	Dažādie ēdieni, vienmērīga apmeklētāju plūsma	Vienlaicīgi liels apmeklētāju skaits, stingras diētiskas prasības. Lielāka gaisa apmaiņa un ūdens patēriņš [54]
Viesnīcas un kopmītnes	Prognozējam un vienmērīgs ūdens patēriņš	Lielāks karstā ūdens patēriņš lielāku darba, vingrošanas un treniņu slodžu dēļ. Kazarmās lielāks apdzīvotības līmenis.
Iekštelpu šautuves	Civila šautuve - nelielo kalibru izmantošana	Lielo kalibru izmantošana, aktīva noslodze

2.4. Telšu sistematizācija

Ņemot vērā, ka pētījumā ietvaros tiek plānots izstrādāt telšu mobilos energoapgādes risinājumus, tiek veikta arī telšu sistematizācija. Galvenokārt tiek apskatītas teltis, kas paredzētas cilvēku izvietošanai. Pētījumā ietvaros tiek sagatavots sistematizācijas piemērs uz aizsardzības spēku ēku pamata un, proti, sīkāk tiks apskatīts militārās teltis. Aizsardzības spēku ēkas ir kazarmas, mācību ēkas, biroju ēkas, šautuves, garāžas, dienesta viesnīcas, noliktavas, muniģiju glabātuves, ēdnīcas, sporta zāles, medicīnas telpas un citas. Pie dzīvojamām ēkām pieskaitāmas kazarmas un dienesta viesnīcas, bet mācību ēkas, biroju ēkas, noliktavas, ēdnīcas, sporta zāles ir sabiedriskas ēkas.

Apskatīsim tādu uzbūvi kā militārā telts. Militārā telts ir saliekama pagaidu būve, kuru var ātri uzcelt. Telts ir paredzēta aizsardzībai no nelabvēlīgiem laika apstākļiem, cilvēku pagaidu izvietošanai un dzīvošanai, darbu veikšanai, saimniecības vajadzībām, kā arī dažādu materiālu glabāšanai lauka apstākļos.

Pēc **funkcionāliem mērķiem** militārās teltis var sadalīt:

- pārgājiena teltis;
- nometņu teltis.

Pārgājiena teltis galvenokārt ir domātas īslaicīgai cilvēku izmitināšanai nakts laikā, paredzot vietu tikai cilvēku gulēšanai. Tām ir zemi griesti un kompakta forma. Savukārt, nometņu teltis tiek paredzētas, lai tajās cilvēki uzturētos ilgstoši. Lai nodrošinātu cilvēku komfortablu uzturēšanos, tām raksturīgi augsti griesti, ieejas mezglis, logi un ventilācijas atvērumi. Tomēr tām ir lielāks svars un ilgāks uzcelšanas laiks. Nometņu teltīm ir iespējams ierīkot cieto grīdu.

Pēc **konstrukcijas** teltis var būt:

- karkasa;
- bezkarkasa;
- piepūšamas.

Piepūšamajam teltīm ir īss uzcelšanas laiks. Karkasa telšu struktūra viegli iztur sniega slodzi līdz 15-20 kg/m² un vēja slodzi līdz 30 m/sek.

Teltis var sistematizēt arī pēc formas, pēc ietilpības, pēc materiāla un pēc slāņu skaita. Dažādas formas teltis parādītas 2.4. att. Telts vējizturība ir atkarīga ne tikai no telts materiāla un slāņu skaita, bet arī no telts formas.



Hospitāļa telts



Karkasa telts



Kores teltis



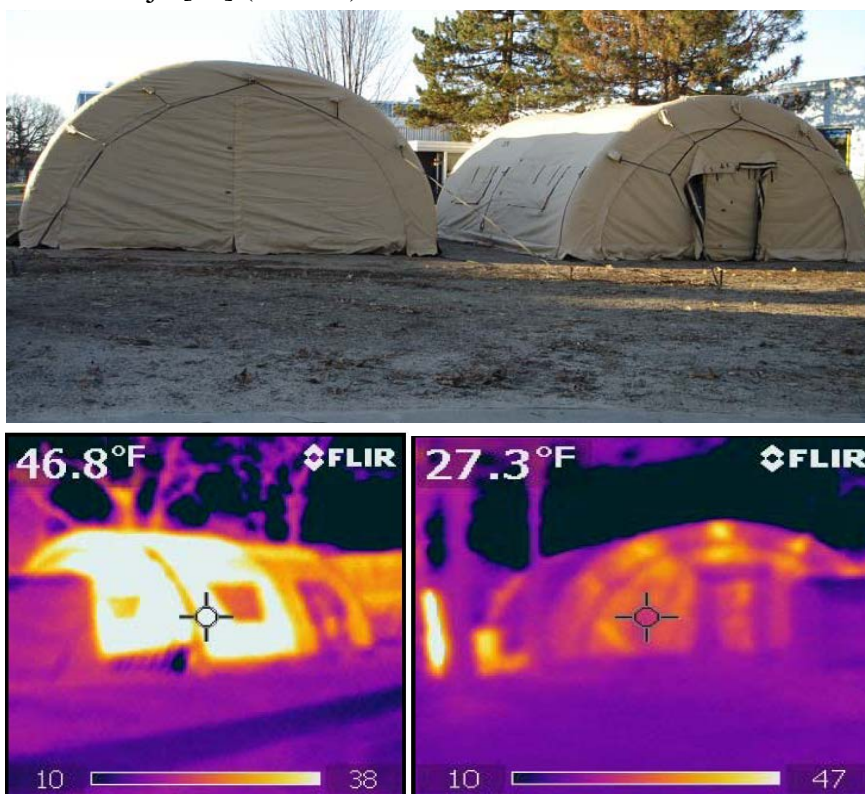
Loka telts

2.4. att. Telšu veidi

Telts siltumvadītspēja un ūdensizturība ir atkarīga no telts materiāla un slāņu skaita [55]. Parasti izmanto vienslāņa un divslāņu norobežojošos audumus. Ziemas apstākļiem

paredzētājam teltīm izmanto arī daudzslāņu (līdz sešiem slāņiem) audumus. Tomēr jāņem vērā, ka šādu telšu uzcelšanas laiks ir garāks, un tas parasti izmanto ilgstošai izvietojšanai. Modernas neizolētās vienslāņa telts termiskā pretestībā sastāda $0.33 \text{ m}^2\text{K/W}$ [56]. Attiecīgi siltuma caurlaidības koeficients - $2.98 \text{ W/m}^2\text{K}$. Pēc avota datiem šādu telšu termiskā pretestība ir $0.124 \text{ m}^2\text{K/W}$. Divslāņu telts termiskā pretestībā sastāda $0.60 \text{ m}^2\text{K/W}$. Attiecīgi siltuma caurlaidības koeficients – $1.68 \text{ W/m}^2\text{K}$ [56]. Piemēram, tipveida TEMPER izolētā auduma termiskā pretestība sastāda $0.564 \text{ m}^2\text{K/W}$ [57]. Pēc cita avota [58] datiem vienslāņa telts auduma termiskā pretestība ir $0.39 \text{ m}^2\text{K/W}$. Izmantojot papildu auduma slāni un ierīkojot nekustīgo gaisa slāni ir iespējams palielināt termisko pretestību līdz $0,21 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Lai uzlabotu telts siltumtehnikās īpašības, ir iespējams izmantot vairākslāņu materiālu ar vakuuma siltuma izolāciju [57] (2.5. att.).



2.5. att. Armijas teltis bez siltuma izolācijas (pa kreisi) un ar siltuma izolāciju, aerogels (pa labi) [57].

Aerogela izmantošana ļauj būtiski samazināt siltuma zudumus ziemas laikā, kā arī siltuma pieplūdi vasaras laikā. Šajā gadījumā termiskā pretestība sastāda $1.814 \text{ m}^2\text{K/W}$. Papildu iespēja ir izmantot izsmidzināmas poliuretāna putu izolācijas putas (2.6. att.). Poliuretāna putas tiek izsmidzinātas un telts ārējām virsmām un sacietējot palielina esošās struktūras termisko pretestību līdz $1,25 \text{ m}^2\text{K/W}$. Putu izmantošana ir ievērojami lētāka, nekā aerogela audums. Tomēr pēc poliuretāna putu izolācijas izmantošanas vairs nav iespējams pārvietot telti un siltumizolācijas darbus jāveic, piesaistot ārējo pakalpojumu.



2.6. att. Telts pirms un pēc poliuretāna putu izolācijas ārējās uzklāšanas [59].

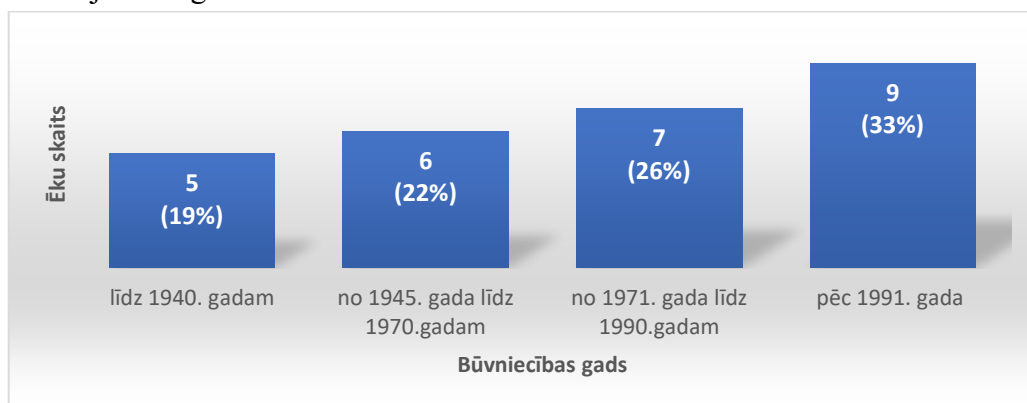
2.5. Latvijas policijas, ugunsdzēsības dienestu ēku un Latvijas aizsardzības spēku ēkas sadalījums pēc uzbūvēšanas gadiem

Pētījumā ietvaros tika sagatavota informācija balstoties uz:

1. Valsts institūciju īpašumā, valdījumā un lietošanā esošās ēkas ar kopējo platību virs 250 m² uz 09.07.2015. saskaņā ar Eiropas Eiropas Parlamentu un Padomi Direktīvas 2010/27/ES [3] par energoefektivitāti 5. panta 5.punktu (sagatavota pēc valsts institūciju sniegtās informācijas);
2. Valsts institūciju īpašumā, valdījumā un lietošanā esošās ēkas ar kopējo platību virs 250 m² uz 09.07.2017. saskaņā ar Eiropas Parlamentu un Padomi Direktīvas 2010/27/ES par energoefektivitāti 5. panta 5.punktu (sagatavota pēc valsts institūciju sniegtās informācijas);

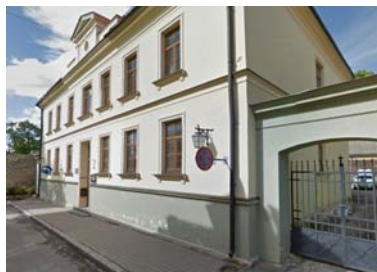
Ņemot vērā būvniecības nozares attīstību Latvijas teritorijā, var izdalīt četrus laika posmus un sadalīt ēkas pa šiem posmiem. Pirmā kategorija ir pirmskara ēkas (ēkas uzbūvētas līdz 1940. gadam), otrajā kategorijā ietilpst ēkas uzbūvētas periodā no 1945. gada līdz 1970. gadam. Trešā kategorija ietver ēkas uzbūvētas periodā no 1971. gada līdz 1990. gadam. Ēkas uzbūvētas, pēc 1991. gada attiecināsim pie ceturrtās kategorijas.

Kopā tika apskatītas 67 ēkas, no kurām 27 ir policijas dienestu ēkas un 40 ir ugunsdzēsības dienestu ēkas. Policijas dienestu ēku sadalījums pēc uzbūvēšanas gadiem ir attēlots sekojošā diagrammā.



2.7. att. Policijas dienestu ēku sadalījums.

Periodā līdz 1940. gadam bija uzbūvētas 19% ēku, kuras pašlaik tiek izmantotas policijas dienestu vajadzībām ar kopējo platību 5961,2 m². Periodā no 1945. gada līdz 1970. gadam bija uzbūvētas 22% ēku ar kopējo platību 3758,0 m² [60]. Periodā no 1971. gada līdz 1990. gadam bija uzbūvētas 26% ēku ar kopējo platību 6618,0 m². Periodā pēc 1991. gada bija uzbūvētas 33% ēku ar kopējo platību 8799,6 m².



a) 1900.g.



b) 1930.g.



c) 1970.g.



d) 2001.g.



e) 1972.g.



g) 1992.g.

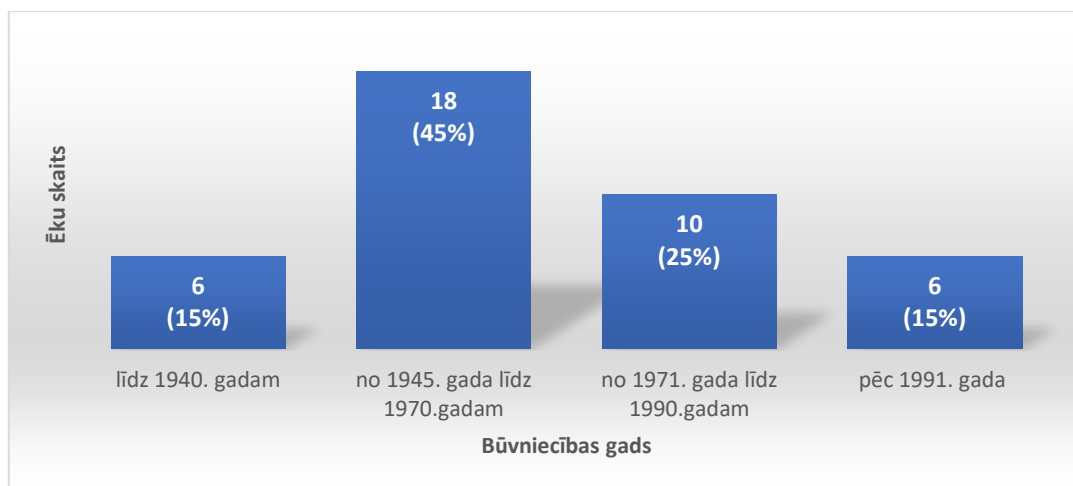


h) 2000.g.

2.8. att. Latvijas policijas dienestu ēku apskats.

Analizējot policijas ēku tipoloģiju, var secināt, ka policijas vajadzībām tiek pielāgotas jau esošās ēkas. Pārsvārā tiek pielāgotas dzīvojamās ēkas un publiskās ēkas, ieskaitot kopmītnes.

Ugunsdzēsības dienestu ēku sadalījums pēc uzbūvēšanas gadiem ir attēlots 2.9. att.

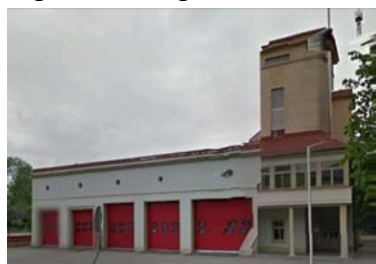


2.9. att. Ugunsdzēsības dienestu ēku sadalījums.

Periodā līdz 1940. gadam bija uzbūvētas 15% ugunsdzēsības dienestu ēku ar kopējo platību 2553,7 m². Periodā no 1945. gada līdz 1970. gadam bija uzbūvētas 45% ugunsdzēsības dienestu ēku ar kopējo platību 11251,1 m². Periodā no 1971. gada līdz 1990. gadam bija uzbūvētas 25% ugunsdzēsības dienestu ēku ar kopējo platību 8208,0 m². Periodā pēc 1991. gada bija uzbūvētas 15% ugunsdzēsības dienestu ēku ar kopējo platību 4098,1 m². Latvijas ugunsdzēsības depo tipoloģijas apskats tiek parādīts 2.10. att.



a) 1973



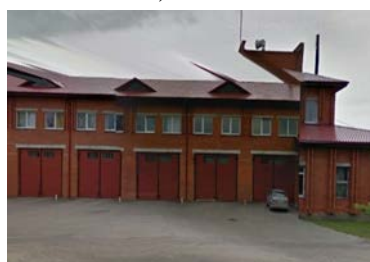
b) 1934



c) 1960



d) 1965



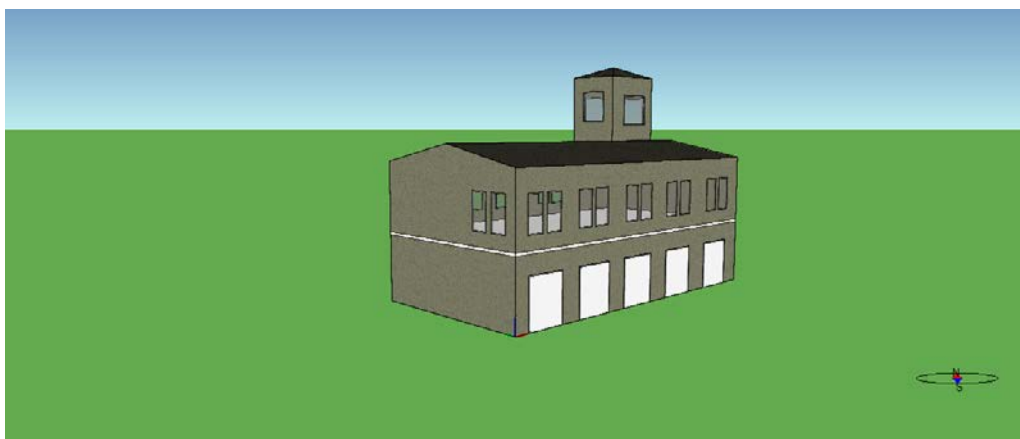
e) 1993



f) 1989

2.10. att. Latvijas ugunsdzēsības depo apskats.

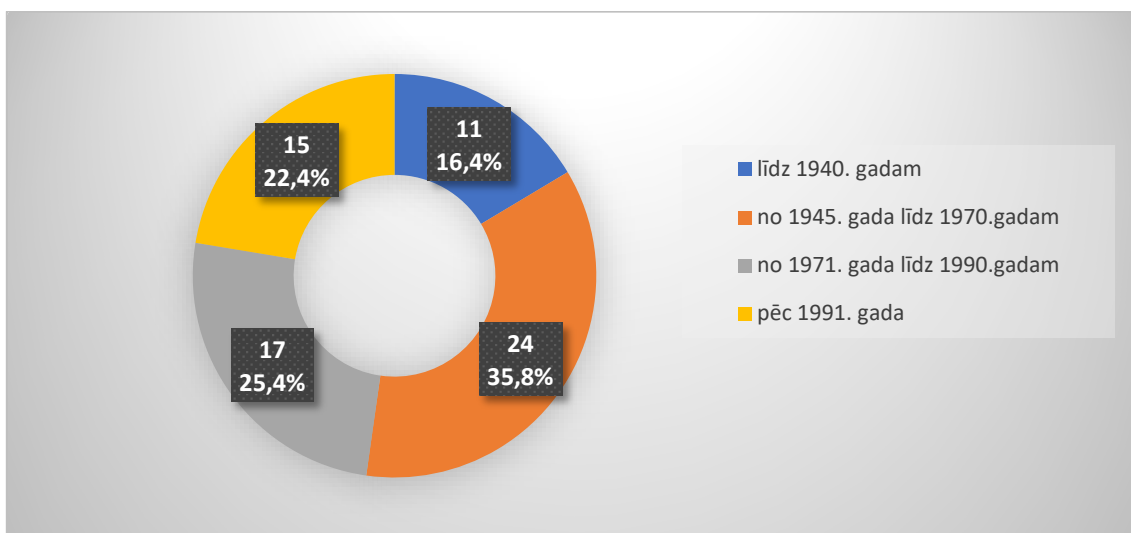
Kā var redzēt 2.10. att., ugunsdzēsības depo tika būvēti pēc individuālajiem projektiem. Tomēr analizējamo depo tipoloģija norāda uz kopējo būvniecības principu. Proti, pirmais stāvs tiek izmantots dienesta automašīnu izvietošanai, un otrais stāvs personāla vajadzībām un administrācijai.



Attēls 2.11. Ugunsdzēsības depo tipveida IFC modelis

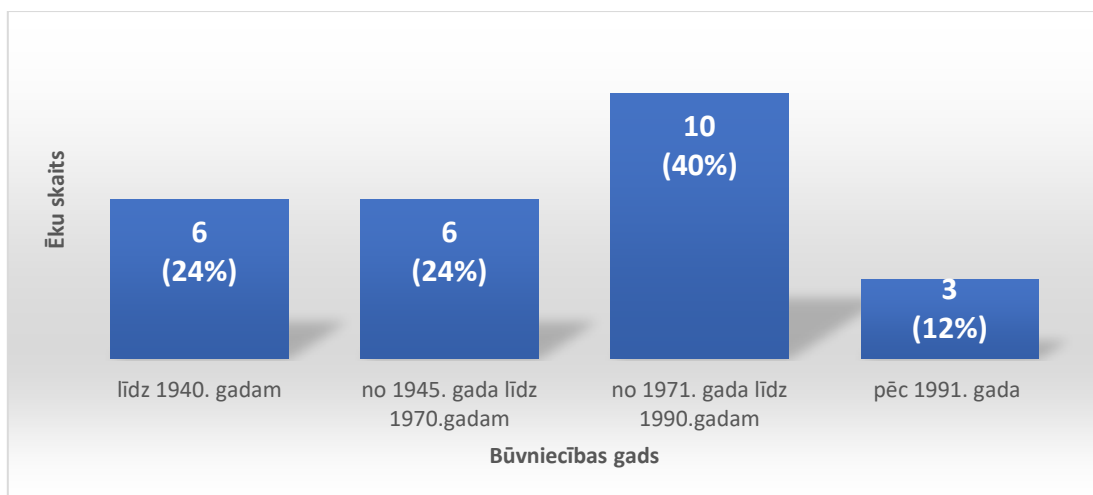
Izmantojot izveidoto 3D modeli (2.11. att.), ir iespējams novērtēt dažādu energoefektivitāti uzlabojošo pasākumu lietderību un to atbilstību ugunsdzēsības depo specifikai.

Apskatot ugunsdzēsības un policijas dienestu ēkas kopā, iegūstam sekojošu diagrammu.



2.12. att. Policijas dienestu un ugunsdzēsības dienestu ēku sadalījums

Kā arī tika apskatītas 25 Latvijas aizsardzības spēku ēkas. Apskatot šo ēku sadalījumu pēc uzbūvēšanas gadiem, iegūstam sekojošu diagrammu.



Attēls 2.13. Aizsardzības spēku ēku sadalījums

Aizsardzības ēku tipoloģija šajā pētījumā nav parādīta. Tomēr publiski pieejamā informācija dod izpratni par būvniecības principiem (2.14. att.).



Attēls 2.14. Tipveida kazarma [61].

Promocijas darba pētījumu veikšanas ietvaros, balstoties uz militāro ēku analīzi un apsekošanu, tiks sagatavoti tipveida ēku vizuālie 3D modeļi. Dati būs publiski pieejami pēc saskaņošanas ar atbildīgajām institūcijām.

Ēku sadalījumu pēc to vidējā vecuma var arī apskatīt pa dienestiem. Dati ir apkopoti 2.4. tabulā.

2.4. tabula

Ēku sadalījums attiecībā pret vidējo vecumu

Dienests	Ēku skaits	Vidējais vecums (gadi)	Ēku skaits, kuras ir jaunākas par vidējo vecumu	Ēku skaits, kuras ir vecākas par vidējo vecumu
Policijas dienests	27	49,7	20 (74%)	7 (26%)
Ugunsdzēsības dienests	40	55	22 (55%)	18 (45%)
Aizsardzības spēki	25	54,8	17 (68%)	8 (32%)
Kopā	92	53,4	59 (64,1%)	33 (35,9%)

2.6. Secinājums par neklasificēto ēku sistematizāciju

1. Neklasificēto ēku klasifikācija atbilst civilo ēku klasifikācijai. Pēc ekspluatācijas un noslodzes īpatnībām ēkas var iedalīt sekojošās grupās: administratīvās telpas, noliktavas, garāžas, ēdnīcas, viesnīcas/kopmītnes un iekštelpu šautuves. Galvenās būtiskās atšķirības ir lielāka telpu noslodze, cilvēku ierobežotas iespējas, adaptēties apkārtējai videi, sprādzienbīstamo vielu uzglabāšana un intensīvie kaitīgo vielu izdalījumi.
2. Pētījumā ietvaros, kopumā apskatītas 92 dažāda tipa neklasificētas ēkas. Apskatīto ēku vidējais vecums uz 2018. gadu ir 53,4 gadi. Policijas dienestu ēku vidējais vecums ir 49,7 gadi, ugunsdzēsības dienestu ēku vidējais vecums ir 55 gadi, un aizsardzības spēku ēku vidējais vecums ir 54,8 gadi.
3. Visvairāk policijas dienestu ēku bija uzbūvētas periodā pēc 1991. gada (33%), visvairāk ugunsdzēsības dienestu ēku bija uzbūvētas periodā no 1945. gada līdz 1970. gadam (45%) un visvairāk aizsardzības spēku ēku bija uzbūvētas periodā no 1971. gada līdz 1990. gadam (40%).
4. Ēku skaits, kuras ir vecākas, par 53,4 gadiem ir 33 jeb 35,9%. Ēku skaits, kuras ir jaunākas, par vidējo vecumu ir 59 (jeb 64,1%).
5. Lai nodrošinātu komfortablu ilgstošu cilvēku uzturēšanu teltīs un samazinātu telpu apkurei un dzesēšanai nepieciešamo enerģijas daudzumu, ir iespējams izmantot poliuretāna putas vai izmantot papildu apvalku ar aerogela pildījumu. Tomēr šie risinājumi būtiski samazina telšu mobilitāti un prasa papildu ārpakalpojumu.
6. Armijas telšu siltumtehniskās īpašības ir iespējams būtiski uzlabot, izmantojot aerogel vai citu vakuuma tipa siltuma izolāciju. Tas ļauj būtiski samazināt telts energopatēriņu un dod iespēju palielināt atjaunojamo energoresursu īpatsvaru kopējā bilancē.

3. NEKLASIFICĒTO ĒKU ENERGOEFEKTIVITĀTES NOTEIKŠANAS METODOLOĢIJA

3.1 Ēku energoefektivitāti ietekmējošie faktori

Vispārējā gadījumā apkurei vai dzesēšanai nepieciešamo enerģiju aprēķina periodam nosaka kā starpību starp siltuma izdalījumiem un siltuma zudumiem apskatāmā periodā.

$$Q_a = Q_z - \eta_u \cdot Q_i, Wh, \quad (3.1.)$$

kur: Q_a – ēkas apkurei nepieciešamā enerģija (Wh);

Q_z – kopējie siltuma zudumi apkurei (Wh);

Q_i – kopējie siltuma izdalījumi apkures režīmā (Wh),

η_u – siltuma izdalījumu utilizācijas faktors.

$$Q_{dz} = Q_z - \eta_u \cdot Q_s, Wh, \quad (3.2.)$$

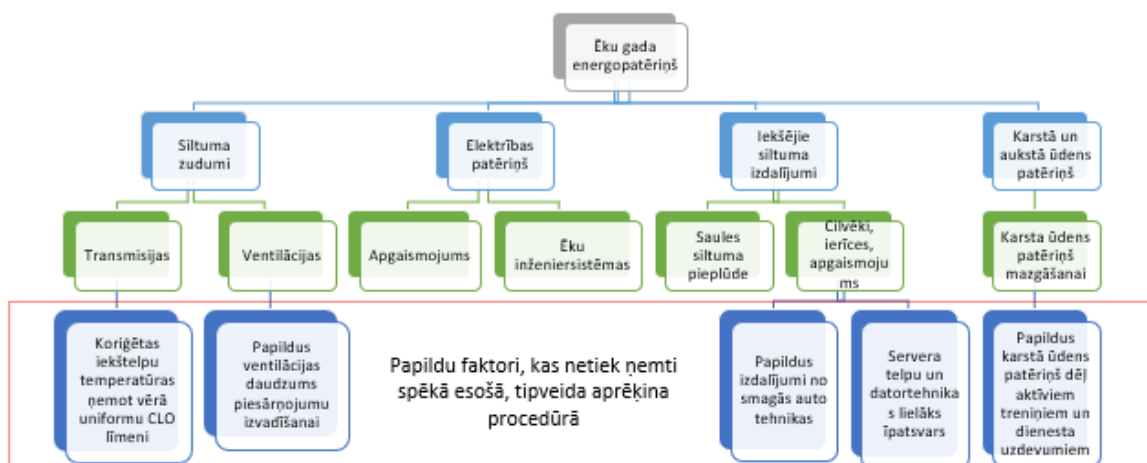
kur: Q_{dz} – ēkas dzesēšanai nepieciešamā enerģija (Wh);

Q_{iz} – kopējie siltuma izdalījumi (Wh);

Q_s – kopēja siltuma plūsma (Wh);

η_u – siltuma zudumu utilizācijas faktors.

Lai noteiktu precīzu gada enerģijas patēriņu, ir jāņem vērā visi iespējamie atsevišķie enerģijas patēriņa veidi, kurus var iedalīt siltuma zudumos, elektrības patēriņā un karstā ūdens patēriņā. No tiem ir jāatņem iekšējie pieplūdumi, kuri rodas no saules kā arī dažādiem citiem siltuma avotiem kā cilvēkiem, ierīcēm, apgaismojuma, karstā ūdens caurulēm. Zemāk esošajā 3.1. att. ir apkopoti visi faktori, kuri ietekmē kopējo ēkas energopatēriņu un ir jāņem vērā, izstrādājot energoauditus. Atsevišķi ir izdalīti specifiskie faktori, kuri ir raksturīgi tieši neklasificēto ēku gadījumā.



3.1. att. Ēku energoefektivitātes ietekmējošie faktori.

3.2. Neklasificētu ēku energoefektivitāte

Tā kā nav publiski pieejamas datu bāzes, kas ietvertu katras atsevišķas neklasificētas ēkas būvniecības datus un ekspluatācijas parametrus, bija jāizstrādā pamatīgi un detalizēti prototipu modeļi, kas pārstāvētu tipisku militāro, policijas un ugunsdzēsēju depo ēku. Turklāt ēkas prototipa modeļi ir nepieciešami, lai veiktu siltumenerģijas patēriņa aprēķinu izvēlētajām ēkām, jo katrai no neklasificētajām ēku apakškategoriām var būt atšķirīgas konstrukcijas īpašības un prasības attiecībā uz būvprojektu, materiāliem, siltuma pārnese koeficientiem, iekštelpu komforta līmeni un citiem siltumparametriem.

Ēkas būvniecības elementu standartizētie siltuma pārnese koeficienti lielā mērā nosaka ēkas siltumenerģijas patēriņu un līdz ar to ir siltumenerģijas patēriņa vienādojuma pamatā. Šos koeficientus definē Latvijas būvnormatīvs LBN 002-19 “Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika” (siltuma pārnese koeficientu normatīvās vērtības [62]. Nepieciešamā gada siltumenerģija (kWh/m²) prototipam tika aprēķināta saskaņā ar MK noteikumiem Nr. 222 “Ēku energoefektivitātes aprēķina metodes un ēku energosertifikācijas noteikumi”, kas minēta LBN 002-19. Gada siltumenerģijas patēriņš (kWh) dotajā laika skalā katrai ēku kategorijai (dzīvojamā, publiskā, rūpnieciskā) tika noteikts, aprēķinot konkrētu siltumenerģijas patēriņu (kWh/m²) un apkopojot datus par attiecīgā ēku fonda platību (m²). Tādējādi gada siltumenerģijas pieprasījumu prototipa ēkai (kWh/m²) var noteikt, izmantojot vienādojumu (3.3.) [6]:

$$E_{gada} = \frac{\sum U_i A_i + \sum \psi l_j + \sum \chi_k + (V_g \cdot c) \cdot 24 \cdot D_{apk} \cdot (T_{iekš} - T_{ār})}{1000 \cdot A} - \eta \cdot (Q_{int} + Q_{sol}), \quad (3.3.)$$

kur:

U_i – ēkas konstrukcijas elementa siltuma pārnese koeficients (W/(m²·K));

A_i – ēkas prototipa modeļa attiecīgā konstrukcijas elementa laukums (m²);

ψ_i – lineārā siltumtilta siltuma pārnese koeficients (W/(m·K));

l_i – lineārā siltumtilta garums (m);

χ_k – punktteida siltumtilta siltuma pārnese koeficients (W/K);

V_g – ventilācijas gaisa tilpuma plūsmas ātrums (m³/h);

c – gaisa siltuma jauda uz tilpuma vienību = 0.34 (Wh/(m³·°K));

D_{apk} – apkures dienu skaits;

$T_{iekš}$ – vidējā iestatītā temperatūra novērtējuma (apkures vai dzesēšanas) periodā (°C);

$T_{ār}$ – vidējā ārējā temperatūra aprēķina periodā (°C);

A – ēkas kopējā platība (m²);

η – enerģijas patēriņa koeficients apkurei saskaņā ar LVS EN ISO 52016-1:2017 [63];

Q_{int} – visas ēkas iekštelpu siltuma guvums novērtēšanas periodā t (Wh);

Q_{sol} – visas ēkas saules siltuma guvums novērtēšanas periodā t (Wh).

Militārās ēkas

Lai salīdzinātu faktisko enerģijas patēriņu ar teorētisko enerģijas patēriņu, 2011. –2016. gadā vienā un tajā pašā militāro ēku grupā tika veikta energorevīzija un veikti mērījumi. Enerģijas patēriņš samazinās atbilstoši ēkas būvniecības datumam, un tas liecina, ka, laikam

ejot, pakāpeniski uzlabojas ēku siltumefektivitātes nodrošināšanas prakse. Dažām ēkām, iespējams, tikusi veikta enerģijas modernizēšana, kas galu galā uzlaboja siltumefektivitāti (skat. 1.1. att.) [64].

Kā redzams grafikā, kopējais vidējais izmērītais gada enerģijas patēriņš militārajām ēkām bija 230 kWh/m^2 , savukārt vidējā aprēķinātā (teorētiskā) enerģijas patēriņa vērtība militārajām ēkām bija 153 kWh/m^2 (33% mazāka par izmērīto).

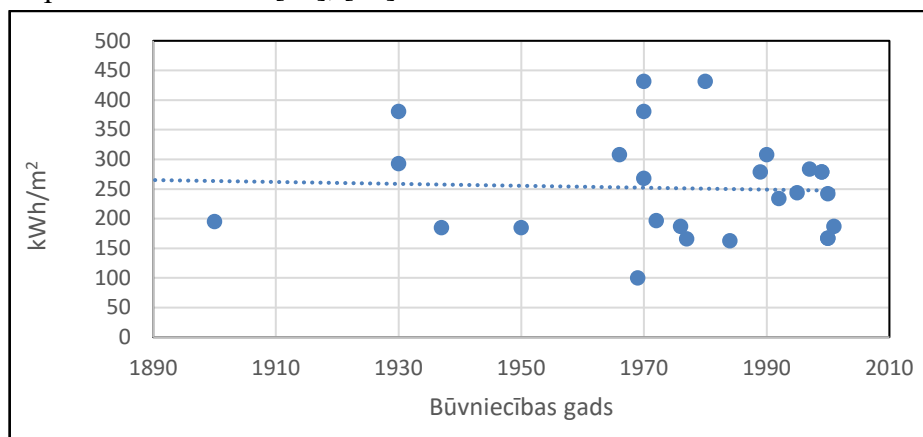
Šī neatbilstība skaidri norāda uz militāro ēku sliktu faktisko stāvokli, atsaucoties uz teorētiski pieņemamo energoefektivitāti, kas pamatojas uz pašlaik spēkā esošajām ēku energoefektivitātes prasībām.

Vēl viens faktors augstajai neatbilstības pakāpei starp faktiskajiem (izmērītajiem) un teorētiskajiem (aprēķinātajiem) enerģijas patēriņa rezultātiem ir iespējamā novirze no ieejas vērtībām salīdzinājumā ar faktiskajām vērtībām (karstā ūdens patēriņš, iekštelpu temperatūra, padeves gaisa apmaiņas ātrums, norobežojošās konstrukcijas hermētiskums utt.).

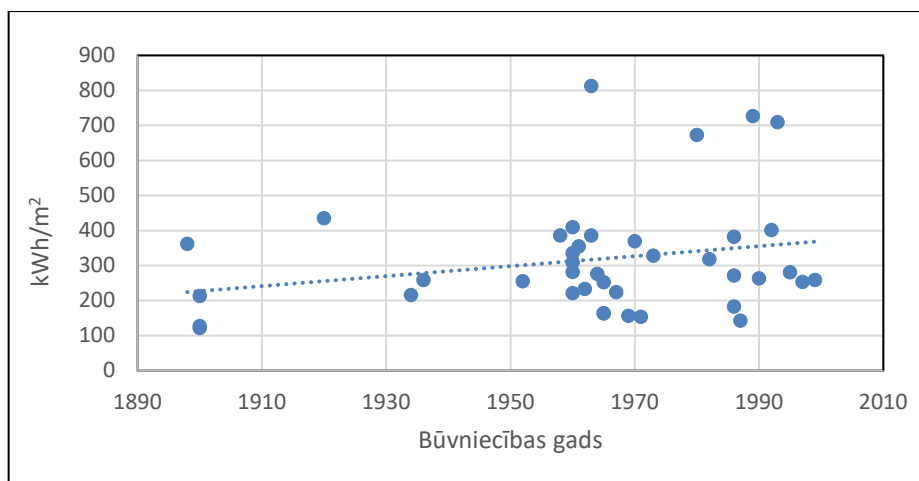
Tā kā ievades dati par neklasificētām ēkām nav definēti vietējos normatīvos, energoauditori parasti ņem vērā vienkāršotus ievades datus, ko izmanto civilām (dzīvojamām un/vai publiskām) ēkām, kas var radīt lielu neatbilstību starp faktisko un teorētisko sniegumu.

Policijas iecirkņi un ugunsdzēsēju depo

Energoprofilam policijas iecirkņu ēkās bija līdzīga tendence kā militārajām ēkām (enerģijas patēriņam samazinoties līdz ar uzbūvēšanas gadu). Savukārt analizētās ugunsdzēsēju depo ēkas parādīja nedaudz pretēju tendenci – ar nelielu enerģijas patēriņa pieaugumu telpu apsildei un karstajam ūdenim vēlākiem būvniecības gadiem. Tas, iespējams, ir izskaidrojams ar to, ka nesen uzbūvēties ugunsdzēsēju depo ir lielāki, un tāpēc tie rada lielāku enerģijas pieprasījumu, jo to jauda un slodze ir lielāka (ugunsdzēsēju automašīnu skaits, personāla skaits utt.). Vidējais izmērītais gada enerģijas patēriņš policijas iecirkņiem ir 252 kWh/m^2 , bet ugunsdzēsēju depo - 317 kWh/m^2 [65], [66].



3.2. att. Izmērītais gada enerģijas patēriņš pētītajos policijas iecirkņos (kWh/m^2)

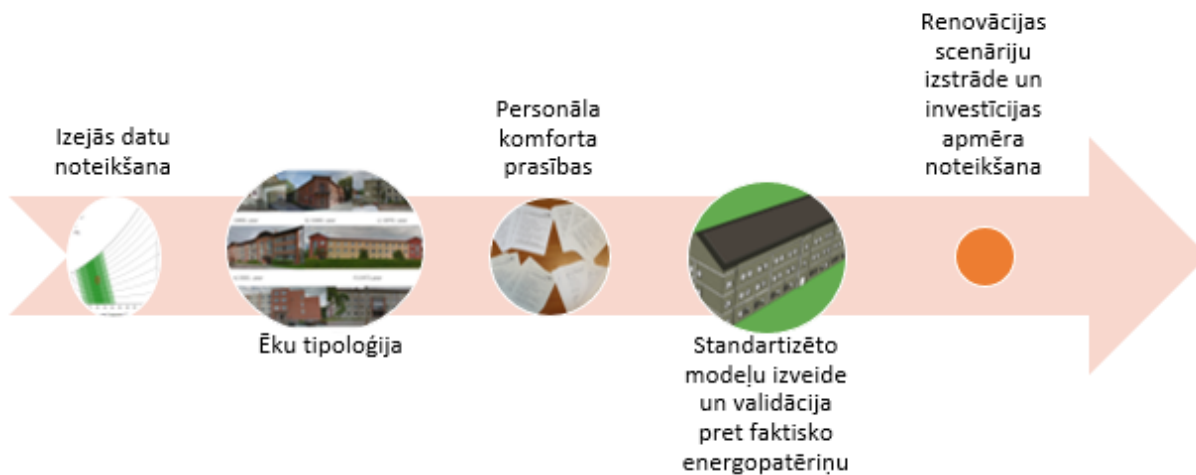


3.3. att. Izmērītais gada enerģijas patēriņš pētītajos ugunsdzēsēju depo (kWh/m²)

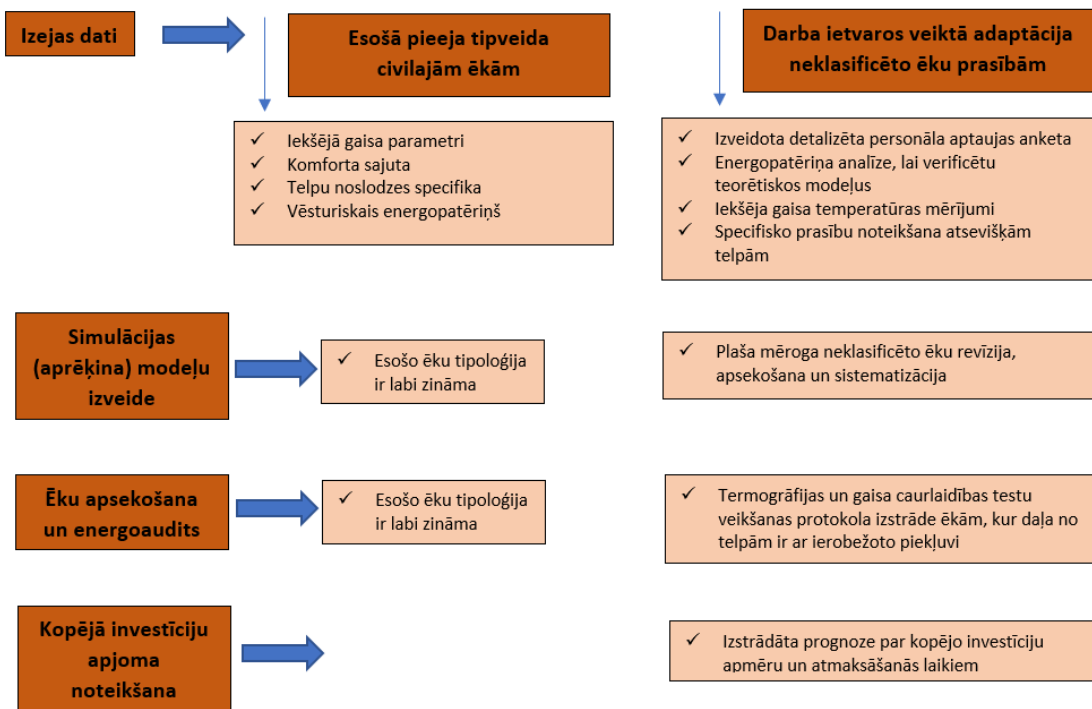
3.3. Pētījuma metodoloģija

Pētījuma metodoloģija ir balstīta uz iekšējas gaisa parametru mērījumiem dažāda veida neklasificētās ēkās; cilvēku aptaujām par energopatēriņu; energopatēriņu analīzēm un dinamiskajām ēku energopatēriņa simulācijām.

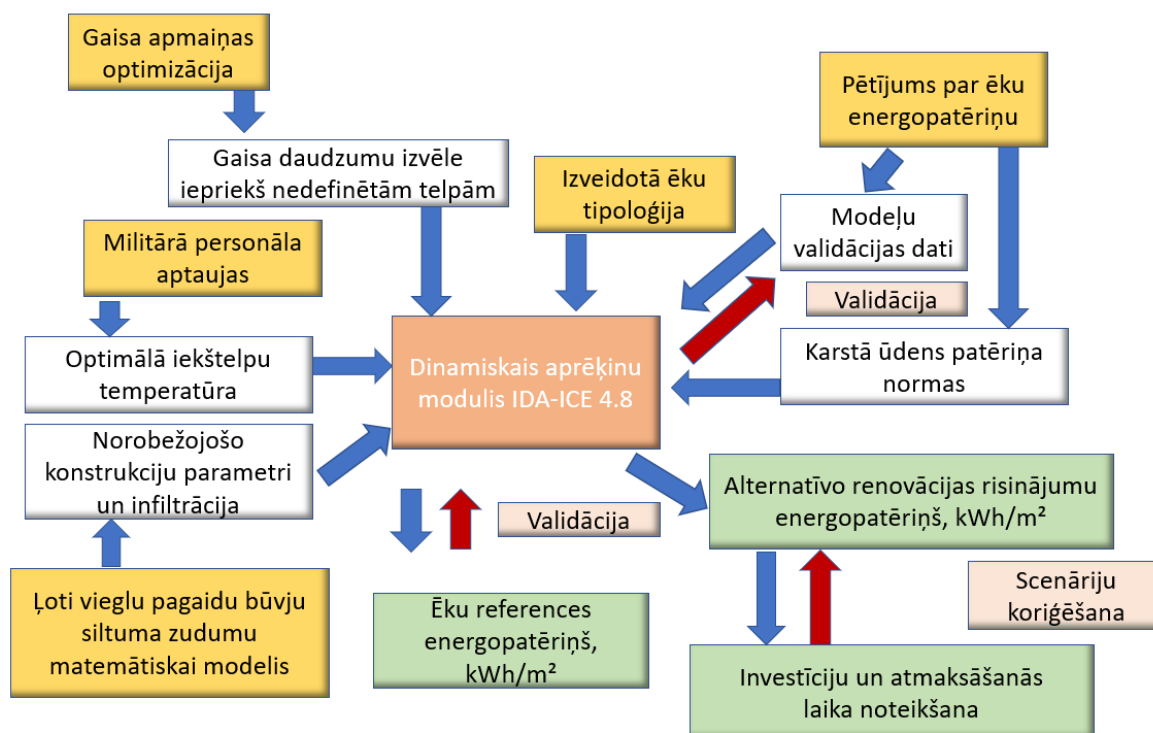
Darba savstarpējo procesu iedarbība un darba pētījuma struktūra tiek parādīta 3.4., 3.5. un 3.6. attēlos.



3.4. att. Darba savstarpējo procesu iedarbība.



3.5. att. Darba pētījuma struktūra.



3.6. att. Darba pētījuma struktūra.

3.4. Ēku un telts siltuma zudumu noteikšanas modelis

Dotajā promocijas darba sadāļā tiek apskatītas metodes siltuma zudumu aprēķināšanai no teltīm ar mērķi samazināt enerģijas patēriņu apkurei un uzlabot komfortu. Pamatidejas siltuma zudumu aprēķināšanai no teltīm tiek ņemtas no darba [67]. *Būtībā, šīs metodes neatšķiras no metodēm siltuma zudumu aprēķināšanai no ēkām [68], [69], [70] tikai ar nelielām modifikācijām.*

Katras aprēķināšanas metodes pamata ir neatgriezenisks process - siltumapmaiņa, kas var sastāvēt no trim atsevišķiem siltuma enerģijas izplatīšanas veidiem (siltumvadīšana, siltuma konvekcija, starošana) dažādas to kombinācijas.

Darba struktūrā ir sekojoša: vispirms īsi aplūkosim siltumapmaiņas teorijas dažus faktus [71], [72], kurus turpmāk izmantosim, aprēķinos. Tālāk aprakstīsim metodes siltuma zudumu noteikšanai no teltīm un sniegsim konkrētu aprēķināšanas piemēru. Beigas salīdzināsim aprēķinātos datus ar vērtībām, kuras bija iegūtas ar mērinstrumentiem [73], [74] un koriģēsim dažus koeficientus.

Siltumvadīšana plakanā siena stacionārā režīmā

Siltumvadīšana ir siltuma pārnese molekulārais process starp ķermeņiem, kuri saskaras, vai ķermeņu daļām ar dažādu temperatūru. Siltuma pārnese procesu ar siltumvadīšanu apraksta siltumvadīšanas diferenciālvienādojums:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T + \frac{q_v}{c\rho}, \quad (3.4.)$$

kur T - temperatūra [K], t - laiks [s], $\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \Delta T$ - Laplasa operators, $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ - temperatūras vadītspējas koeficients $\left[\frac{m^2}{s}\right]$,

λ - siltumvadītspējas koeficients $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$, ρ - blīvums $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$,

c - masas īpatnējā siltumietilpība $\left[\frac{J}{kgK}\right]$,

q_v - iekšējais siltuma avots $\left[\frac{J}{sm^3} = \frac{W}{m^3}\right]$.

Ja iekšēja siltuma avota nav, tad siltumvadīšanas diferenciālvienādojums ir:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T, \quad (3.5.)$$

un, ja temperatūras lauks $T(x, y, z)$ ir stacionārs (nav atkarīgs no laika t), tad iegūstam, ka

$\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ un siltumvadīšanas diferenciālvienādojums ir:

$$\nabla^2 T = 0. \quad (3.6.)$$

Turklāt, ja aplūkot viendabīgu un izotropu plakanu sienu ar konstantu siltumvadītspējas koeficientu λ , kuras biezums l [m] ir pietiekami mazs salīdzinājuma ar platumu un garumu, var pieņemt, ka siltums plūst tikai x ass virzienā ($T = T(x)$) un siltumvadīšanas diferencialvienadojums ir:

$$\frac{d^2T}{dx^2} = 0. \quad (3.7.)$$

Ja uz sienas virsmām ir uzdotas temperatūru vērtības, tad iegūstam robežnosacījumus

$$T(0) = T_{s,1}, T(l) = T_{s,2}. \quad (3.8.)$$

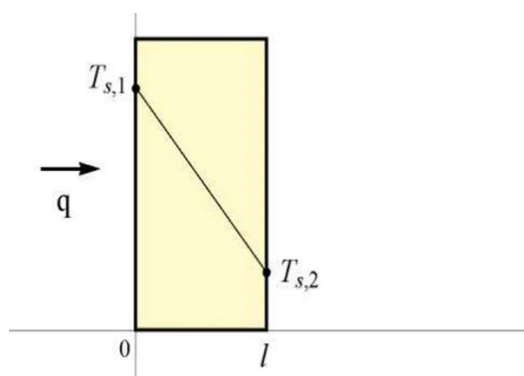
Rezultāta iegūstam matemātisko modeli:

$$\frac{d^2T}{dx^2} = 0, T(0) = T_{s,1}, T(l) = T_{s,2}, \quad (3.9.)$$

kura apraksta siltumvadīšanas procesu plakanā sienā stacionārā režīmā. Pēc būtības tā ir robežproblēma otrās kārtas parastajam diferenciālvienādojumam. Problēmas (3.10.) atrisinājums ir taisne:

$$T(x) = (T_{s,2} - T_{s,1}) \frac{x}{l} + T_{s,1} \quad (3.10.)$$

kura savieno punktus $(0, T_{s,1})$ un $(l, T_{s,2})$ plaknē xT .



3.7. att. Siltumvadīšana plakanā sienā

Saskaņā ar Furjē hipotēzi, siltuma daudzums, kas laika vienība tiek izvadīts caur sienas laukuma vienību x ass virzienā (siltuma plūsmas blīvums q [$\frac{W}{m^2}$]) ir:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}. \quad (3.11.)$$

Tātad iegūstam:

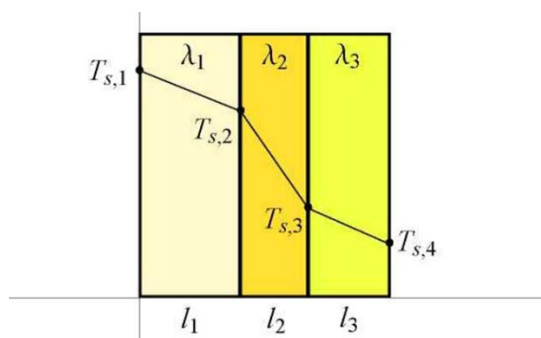
$$q = \frac{\lambda}{l} (T_{s,1} - T_{s,2}), \quad (3.12.)$$

un siltuma daudzums, kas laika vienībā tiek izvadīts caur sienas laukumu A [m^2] (siltuma plūsma Q [W]) ir

$$Q = qA = \frac{\lambda}{l} (T_{s,1} - T_{s,2})A. \quad (3.13.)$$

Ja apskatīt daudzkārtu sienu (sienu ar siltumizolāciju, 3.3. att.), tad siltuma plūsmas blīvums ir

$$q = \frac{T_{S,1} - T_{S,4}}{\frac{l_1}{\lambda_1} + \frac{l_2}{\lambda_2} + \frac{l_3}{\lambda_3}} \quad (3.14.)$$



3.8. att. Siltumvadīšana daudzkārtu sienā.

Piemērs: Ēkas sienu veido trīs kārtas: iekšējā - ķieģeļi ($l_1 = 10\text{cm}$, $\lambda_1 = 0.68 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$); vidējā - izolācija ($l_2 = 15\text{cm}$, $\lambda_2 = 0.038 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) un ārējā - apdare ($l_3 = 1\text{cm}$, $\lambda_3 = 0.48 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$). Iekšējās virsmas temperatūra ir 22°C un ārējās virsmas temperatūra ir 5°C .

Aprēķināt siltuma plūsmas blīvumu caur sienu un temperatūras starp kārtām.

Risinājums:

Izmantojot (3.13.) formulu, iegūstam siltuma plūsmas blīvumu

$$q = \frac{T_{S,1} - T_{S,4}}{\frac{l_1}{\lambda_1} + \frac{l_2}{\lambda_2} + \frac{l_3}{\lambda_3}} = \frac{17}{\frac{0.1}{0.68} + \frac{0.15}{0.038} + \frac{0.01}{0.48}} = 4.13 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right).$$

Temperatūras starp kārtām aprēķināsim, izmantojot (3.11.) formulu

$$q = \frac{\lambda}{l}(T_{S,1} - T_{S,2}) \Rightarrow T_{S,2} = T_{S,1} - \frac{ql_1}{\lambda_1} = 22 - \frac{4.13 * 0.1}{0.68} = 21.39^\circ\text{C},$$

$$q = \frac{\lambda}{l}(T_{S,3} - T_{S,4}) \Rightarrow T_{S,3} = T_{S,4} - \frac{ql_3}{\lambda_3} = 5 - \frac{4.13 * 0.01}{0.48} = 5.09^\circ\text{C}.$$

Siltumpāreja caur plakānu sienu stacionārā režīmā

Siltumapmaiņu starp diviem siltumnesējiem, kuri atdalīti ar starpsienu, sauc par siltumpāreju. Šajā gadījumā siltums no karstākā siltumnesēja uz starpsienu pāriet konvektīvās siltumapmaiņas veidā, caur starpsienu - ar siltumvadīšanu un no starpsienas uz vēsāko siltumnesēju - atkal konvektīvās siltumapmaiņas veidā. Konvektīvā siltumapmaiņa ir siltuma pārnese process, kurš ir nepārtraukti saistīts ar vides pārnesei [75] un kura intensitāti raksturo siltumatdeves koeficients $h \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$. Siltumatdeves koeficients ir atkarīgs no daudziem faktoriem – ķermeņa formas un izmēriem, siltumnesēja ātruma un kustības režīma un citiem.

Pieņemsim, ka siltumnesēju temperatūras ir $T_{\infty,1}$ un $T_{\infty,2}$, siltumatdeves koeficienti ir h_1 un h_2 (3.7. att.). Siltuma plūsmas blīvumu starp siltumnesējiem un sienu aprēķina pēc Ņūtona vienādojuma.

No viena siltumnesēja uz sienu Ņūtona vienādojums siltuma plūsmas blīvuma aprēķināšanai ir:

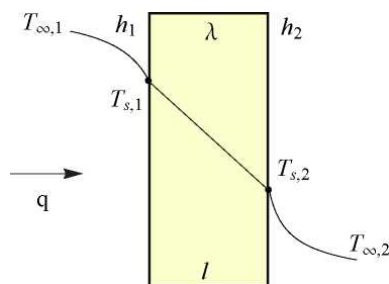
$$q = h_1(T_{\infty,1} - T_{s,1}), \quad (3.15.)$$

bet no sienas uz otru siltumnesēju –

$$q = h_2(T_{s,2} - T_{\infty,2}). \quad (3.16.)$$

Siltuma plūsmas blīvumu caur sienu atrod pēc (3.12.) formulas

$$q = \frac{\lambda}{l}(T_{s,1} - T_{s,2}).$$



3.9. att. Siltumpāreja caur plakanu sienu.

Rezultātā, saskaitot pēdējās trīs vienādības, iegūstam:

$$q = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{\frac{1}{h_1} + \frac{l}{\lambda} + \frac{1}{h_2}}. \quad (3.17.)$$

Pēdējo formulu reizinot ar sienas laukumu A, iegūstam siltuma plūsmu Q:

$$Q = q \cdot A = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{\frac{1}{h_1} + \frac{l}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} \cdot A. \quad (3.18.)$$

Piemērs: Aprēķināt siltuma plūsmas blīvumu caur ēkas sienu, kā arī sienas virsmu temperatūras, ja sienas materiāls ir ķieģeļi ($l = 510\text{mm}$, $\lambda = 0.8 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$). Gaisa temperatūra ēkas iekšienē 18°C , siltumatdeves koeficients $h_1 = 7.5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$. Arēja gaisa temperatūra ir -30°C un $h_2 = 20 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$.

Risinājums:

Izmantojot (3.16.) formulu, iegūstam siltuma plūsmas blīvumu:

$$q = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{\frac{1}{h_1} + \frac{l}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} = \frac{48}{\frac{1}{7.5} + \frac{0.51}{0.8} + \frac{1}{20}} = 58.48 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right)$$

Atrodīsim sienas virsmu temperatūras izmantojot Ņūtona vienādojumus (3.15.) un (3.16.).

$$q = h_1(T_{\infty,1} - T_{s,1}) \Rightarrow T_{s,1} = T_{\infty,1} - \frac{q}{h_1} = 18 - \frac{58.48}{7.5} = 10.19^\circ\text{C},$$

$$q = h_2(T_{s,2} - T_{\infty,2}) \Rightarrow T_{s,2} = T_{\infty,2} + \frac{q}{h_2} = -30 + \frac{58.48}{20} = -27.08^\circ\text{C}.$$

Siltumapmaiņa ar starošanu starp divām virsmām

Siltuma starošana ir siltuma (ķermeņa iekšējās enerģijas) izplatīšanas process ar elektromagnētisko vilnu palīdzību. Fundamentāls fizikas likums, kurš pārvalda starošanu, ir Stefana-Bolcmaņa likums. Šis likums apgalvo, ka absolūti melna ķermeņa starojuma plūsmas blīvums (intensitāte) ir proporcionālas ķermeņa temperatūras $[K]$ ceturtajai pakāpei, jeb

$$q = \sigma T^4 = E_b, \quad (3.19.)$$

kur proporcionalitātes koeficientu σ sauc par Stefana-Bolcmaņa konstanti, turklāt

$$\sigma = 5.669 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}.$$

Reālas virsmas izstaro mazāk enerģijas, nekā absolūti melnas virsmas.

Attiecību

$$\frac{E}{E_b} = \varepsilon, \quad (3.20.)$$

kur E ir reāla ķermeņa starojuma plūsmas intensitāte (pie tās pašas temperatūras), sauc par reāla ķermeņa melnuma pakāpi, jeb starojuma relatīvo koeficientu. Ķermeņa melnuma pakāpe ir atkarīga no daudziem faktoriem (ķermeņa daba, temperatūra, virsmas stāvoklis un citi), bet būvniecībās aprēķinos tiek uzskatīta par konstanti.

Papildus melnuma pakāpei, trīs papildīpašības ietekmē starojuma plūsmas intensitāti - ķermeņa virsmas absorbcijas koeficients α , caurlaidības koeficients τ un atstarošanas koeficients ρ .

Ņemot vērā enerģijas saglabāšanas likumu

$$\alpha + \tau + \rho = 1. \quad (3.21.)$$

Siltuma starošanas procesā arī ir svarīgs tā saucamais formas faktors – virsmu, starp kurām notiek starošana, relatīvais izmērs un izvietojums. Formas faktors F_{12} ir vismas 1 izstarotas enerģijas attiecība pret virsmas 2 saņemtu enerģiju (bet nav obligāti absorbētu). No otrā termodinamikas likuma izriet, ka

$$A_1 F_{12} = A_2 F_{21}, \quad (3.22.)$$

kur A_1 un A_2 virsmu laukumi. No pirmā termodinamikas likuma var iegūt, ka

$$F_{11} + F_{12} + \dots + F_{1J} = 1. \quad (3.23.)$$

(Formas faktors F_{11} nav nulle tikai ieliektām virsmām).

Siltuma plūsmu starp divām virsmām var aprēķināt pēc formulas

$$Q_{12} = \frac{A_1(\sigma T_1^4 - \sigma T_2^4)}{\frac{\rho_1 + 1}{\varepsilon_1 + F_{12}} + \frac{\rho_2 A_1}{\varepsilon_2 A_2}}. \quad (3.24.)$$

Ja starošana notiek starp divām paralēlām necaurspīdīgam plāknēm ar vienādiem laukumiem, tad šo formulu var vienkāršot. Ņemot vērā pieņēmumus, $F_{12} = 1$, $\rho_1 = 1 - \varepsilon_1$, $\rho_2 = 1 - \varepsilon_2$ un $A_1 = A_2 = A$,

iegūstam

$$Q_{12} = \frac{A_1(\sigma T_1^4 - \sigma T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}. \quad (3.25.)$$

Piemērs: Telpas platums, garums un augstums atbilstoši ir 5m, 5m un 3m. Visu virsmu temperatūras ir 16°C izņemot vienu neizolētu sānu sienu ar temperatūru 12°C. Aprēķināt siltuma zudumus, kas rodas starošanas veidā, no izolētām sienām uz neizolētu sienu, ja sienu

melnuma pakāpe $\varepsilon = 0.85$.

Risinājums:

Izolētas sienas apskatīsim kā vienu virsmu un, tāpēc, formas faktors $F_{12} = 1$ (1 – izolēta virsma, 2 – neizolēta virsma).

$$A_1 = 95m^2, A_2 = 15m^2$$

$$T_1 = 289.15 K, T_2 = 285.15 K$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.85$$

$$\varrho_1 = \varrho_2 = 0.15, \tau = 0.$$

Izmantojot (3.23.) formulu, iegūstam

$$Q_{12} = \frac{A_1(\sigma T_1^4 - \sigma T_2^4)}{\frac{\varrho_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{\varrho_2 A_1}{\varepsilon_2 A_2}} = \frac{95 \cdot 5.669 \cdot 10^{-8}(289.15^4 - 285.15^4)}{\frac{0.15}{0.85} + 1 + \frac{0.15 \cdot 95}{0.85 \cdot 15}} = 889.37 (W).$$

Siltuma zudumu no teltīm īss apraksts

Vispārīgi apsvērumi

Eksistē divi galvenie siltuma zudumu ceļi no teltīm: siltumpāreja caur ārējām konstrukcijām (sienas, griesti, grīda) un infiltrācija jeb siltā gaisa noplūde uz aru, un auksta gaisa ieplūde iekšā. Stingri runājot, ir trešais siltuma zudumu veids - siltuma starošana no telts virsmas, bet, ņemot vērā nosacīti mazu virsmas temperatūru, tā intensitātē arī ir maza (saskaņā ar Stefana-Bolcmaņa likumu (3.19.)). Protams, pilnīgi neieverot siltuma starošanu nedrīkst, bet, tomēr, mēs uzskatīsim, ka siltuma starošanas intensitāte ir iekļauta siltuma plūsmas blīvuma no telts virsmas uz apkārtējo vidi, kuru raksturo siltumatdēvēs koeficients.

Aprēķināšanas pamatformulas

Tātad kopējo siltuma zudumu var aprēķināt pēc formulas:

$$Q = Q_C + Q_A, \quad (3.26.)$$

kur Q_C ir siltuma zudumi siltumpārejas veidā (ieskaitot starošanas sastāvdaļu), Q_A , ir siltuma zudumi infiltrācijas veidā.

Ņemot vērā formulu (3.18.), iegūstam

$$Q_C = h_t \cdot A \cdot \Delta T, \quad (3.27.)$$

kur $h_t \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$ ir sienas vai citas virsmas (griesti, grīda) siltumpārejas koeficients, A ir laukums un ΔT ir iekšēja un ārēja gaisa temperatūru starpība. Turklāt

$$h_t = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{l}{\lambda_c} + \frac{1}{h_0}}, \quad (3.28.)$$

kur, h_i ir siltumatdeves koeficients starp iekšējo gaisu un iekšējo virsmu, h_0 ir siltumatdeves koeficients starp ārējo virsmu un ārējo gaisu, λ_c ir sienas materiala siltumvadītspējas koeficients un l ir sienas biezums. Siltuma zudumus infiltrācijas veidā var aprēķināt pēc formulas

$$Q_A = \rho c V_a \Delta T, \quad (3.29.)$$

kur ρ ir gaisa blīvums, c ir gaisa īpatnēja siltumietelpība un $V_a = NV$, N ir gaisa maiņas reižu

skaits kādā laika intervālā, V ir tilpums.

Tā kā mūsu mērķis atrast siltuma zudumu raksturojumu, kurš nav atkarīgs no laika apstākļiem noteiktā momentā, dalām visas izteiksme

$$L = \frac{\sum (Q_c)n + Q_A}{\Delta T} = \sum_n (h_t A)_n + \rho c V_a, \quad (3.30.)$$

kur n ir telts virsmu skaits, kuras jāapskata atsevišķi.

Laika apstākļu ietekme

Ne tikai temperatūra, bet arī citi laika apstākļi - vējš, mākoņi ietekmē siltuma zudumus no telts. Tādēļ mēs apskatīsim laika apstākļus, kad notiek maksimālie siltuma zudumi, un laika apstākļus, kad notiek minimālie siltuma zudumi. Pēc tam salīdzināsim aprēķinātos datus ar vērtībām, kuras bija iegūtas ar mērinstrumentiem [74], [76].

Par apstākļiem, kad notiek maksimālie siltuma zudumi, uzskatīsim nakts laika skaidras debesis un mērenu vēju. Šajos apstākļos var pieņemt, ka telts virsmas temperatūra ir vienāda ar ārējā gaisa temperatūru un tāad $\frac{1}{h_0} = 0$. Infiltrācija ir atkarīga no vēja ātruma. Infiltrācijā notiek gan caur necieši aizvērtām durvīm, gan caur telts materiālu.

Par apstākļiem, kad notiek minimālie siltuma zudumi, uzskatīsim mākoņainas debesis un bez vēja. Bezvējains laiks nozīmē, ka infiltrācija būs nenozīmīga un siltumātdēvēs koeficienti starp virsmu un ārējo un iekšējo gaisu būs vienādi, t.i., $h_0 = h_1$.

Telts grīda un temperatūras gradients

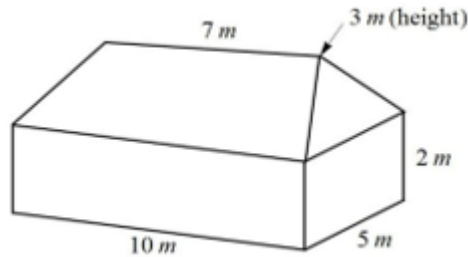
Telts grīda jāapskata atsevišķi. Mūsu piemērā telts grīda ir zeme un līdz ar to mums ir nepieciešams novērtēt to temperatūru un izmantot vajadzīgu siltumātdēvēs koeficientu. Ziemas laikā var pieņemt, ka zemes temperatūra ir 0°C .

Ir svarīgi saprast, ka teltij bez grīdas ir diezgan liels vertikāls temperatūras gradients un tāad siltuma zudumu aprēķināšanā caur zemi jāaizmanto temperatūra telts apakšējā daļā. Turklāt uzskatīsim, ka siltuma zudumi caur zemi praktiski sakrīt gan pie maksimālajiem siltuma zudumiem, gan pie minimālajiem siltuma zudumiem.

Siltuma zudumu aprēķināšanas piemērs

Telts apraksts un izmēri

Apskatīsim vispārīgā mērķa vidējo telti (3.10. att.).



3.10. att. Vispārīgā mērķa vidēja telts ar izmēriem

Telts grīda ir zeme, grīdas laukums ir $A_g = 50 \text{ m}^2$, sienas laukums ir $A_w = 60 \text{ m}^2$. Jumta laukums ir $A_r = 2 \cdot 4,5 + 2 \cdot 22,1 = 53,2 \text{ m}^2$.

Telts materiāla siltumvadītspējas koeficienta attiecība pret materiāla biezumu [76] ir $\frac{\lambda_c}{l} = 38 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$.

Siltuma zudumi caur zemi

Pieņemsim, ka vidējais iekšējās temperatūras un vidējās ārējās temperatūras starpība ir $\Delta T = 22,8^\circ\text{C}$. Savukārt vidējās iekšējās temperatūras un telts apakšējās daļas temperatūras starpība ir $\Delta T_g = 5,5^\circ\text{C}$. Siltumatdeves koeficients starp iekšējo gaisu un zemes virsmu šajā gadījumā [9] ir $h_g = 11,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$. Tātad siltuma zudumi caur zemi gan pie maksimālajiem, gan pie minimālajiem zudumiem ir

$$L_g = \frac{h_g + A_g + \Delta T_g}{\Delta T} = \frac{11,4 + 50 + 5,5}{22,8} = 137,5 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Minimālie siltuma zudumi

Siltumatdēvēs koeficienti starp telts virsmu un ārējo un iekšējo gaisu bezvējinātā laikā būs vienādi [77] $h_0 = h_1 = 8,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$. Tātad

$$h_t = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{l}{\lambda_c} + \frac{1}{h_0}} = \frac{1}{\frac{1}{8,5} + \frac{1}{38} + \frac{1}{8,5}} = 3,8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

un siltuma zudumi no sienām un no jumta ir

$$L_{w,r} = h_t (A_w + A_r) = 3,8 (60 + 53,2) = 430,2 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Tā kā pie minimālajiem siltuma zudumiem infiltrāciju var neievertot, iegūstām

$$L_{min} = L_g + L_{w,r} = 137,5 + 430,2 = 567,7 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Maksimālie siltuma zudumi

Šajā gadījumā jāņem vērā infiltrācija [78]

$$L_A = \frac{Q_A}{\Delta T} = \rho \cdot c \cdot V_a, \quad (3.30.)$$

kur

$$\rho \cdot c = 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1004,2 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}} = 1205 \frac{\text{J}}{\text{m}^3\text{K}}$$

Pieņemsim, ka telts materiāla gaisa caurlaidība [79] ir $0,0005 \frac{m}{s}$, telts virsmas laukums ir $A_w + A_r = 60 + 53,3 = 113,2 m^2$, bet šajā gadījumā ņemsim vērā tikai pusi no virsmas laukuma. Tālāk pieņemsim, ka gaisa noplūde caur spraugu starp telts sienām un zemi [79] ir $0,0045 \frac{m^2}{s}$, telts perimetrs ir 30m. Tātad iegūstam

$$V_a = \frac{0,005 \cdot 113,2}{2} + 0,0045 \cdot 30 = 0,163 \frac{m^3}{s}.$$

Līdz ar to

$$L_A = \rho \cdot c \cdot V_a = 1205 \cdot 0,163 = 196,4 \frac{W}{K}.$$

Pie maksimālajiem siltuma zudumiem $\frac{1}{h_0} = 0$ un

$$h_t = \frac{1}{\frac{1}{8,5} + \frac{1}{38}} = 6,9 \frac{W}{m^2 K}.$$

Līdz ar to siltuma zudumi no sienām un no jumta ir

$$L_{w,r} = h_t (A_w + A_r) = 6,9 (60 + 53,2) = 781,1 \frac{W}{K}.$$

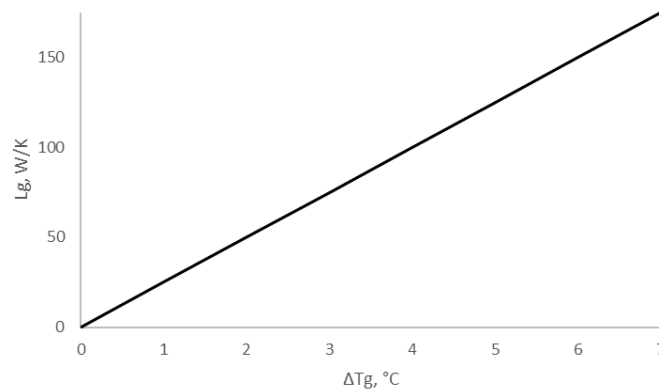
Tātad iegūstam maksimālos siltuma zudumus

$$L_{max} = L_g + L_a + L_{w,r} = 137,5 + 196,4 + 781,1 = 1115 \frac{W}{K}.$$

Iegūto datu īsa analīze un koriģēšana. Siltuma zudumu analīze

Siltuma zudumi caur zemi

Apskatīsim siltuma zudumu caur zemi L_g atkarību no starpības ΔT_g starp vidējo iekšējo temperatūru un telts apakšējās daļas temperatūru, t.i., apskatīsim funkciju $L_g(\Delta T_g)$, kur ΔT_g uzskatīsim par mainīgo. Acīmredzami, atkarība būs lineāra (3.11. att.).

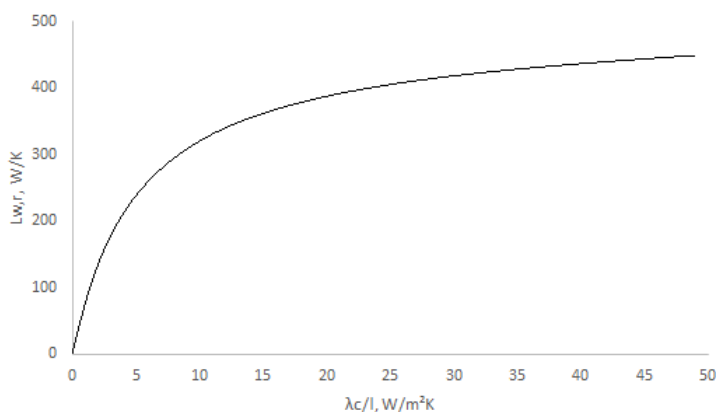


3.11. att. Atkarības $L_g(\Delta T_g)$ grafiks.

Kā redzams no grafika, jo lielāka ir starpība ΔT_g (jeb lielāks ir vertikālais temperatūras gradients), jo lielāki ir siltuma zudumi. Tātad lai samazinātu siltuma zudumus caur zemi, jāsamazina vertikālais gradients. To var panākt, piemēram, izmantojot piespiedu iekšējā gaisa kustību teltī.

Siltuma zudumi caur arējām konstrukcijām

Apskatīsim siltuma zudumu caur arējām konstrukcijām atkarību no attiecības $\frac{\lambda_c}{l}$ (materiāla siltumvadītspējas koeficienta attiecība pret materiāla biezumu), t.i., apskatīsim funkciju $L_{w,r}\left(\frac{\lambda_c}{l}\right)$ (gadījumā pie minimālajiem zudumiem). Šajā gadījumā atkarība nebūs lineāra (3.12. att.).



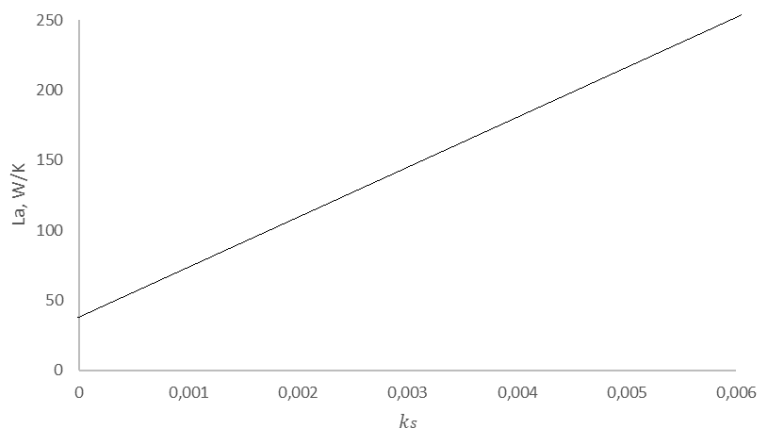
3.12. att. Atkarības $L_{w,r}\left(\frac{\lambda_c}{l}\right)$ grafiks.

Kā var redzēt no grafika, attiecības $\frac{\lambda_c}{l}$ vērtībām līdz ≈ 10 siltuma zudumi mainās diezgan strauji, bet, ja $\frac{\lambda_c}{l} > 20$, tad siltuma zudumu pieaugums ir neliels. Intervālu $10 < \frac{\lambda_c}{l} < 20$ var uzskatīt par parējas intervālu. Tātād, ja mērķis ir samazināt siltuma zudumus, jāsamazina attiecība $\frac{\lambda_c}{l}$. Īpaši tas ir būtiski intervālā $0 < \frac{\lambda_c}{l} < 10$. Acīmredzami, lai samazinātu attiecību $\frac{\lambda_c}{l}$, jāpalielina materiāla biezums l un/vai jāizmanto materiāls ar mazāku siltumvadītspējas koeficientu λ_c .

Siltuma zudumi infiltrācijas veidā caur spraugu

Apskatīsim siltuma zudumu infiltrācijas veidā atkarību no koeficienta, kurš raksturo gaisa noplūdi caur spraugu starp telts sienam un zemi. Ja šo koeficientu apzīmē ar k_s , tad jāapskata funkcija $L_a(k_s)$. Atkarība būs lineāra (3.13. att.), bet funkcijas grafiks neiet caur koordinātu sākuma punktu telts materiāla gaisa caurlaidības dēļ.

Acīmredzami, ja mērķis ir samazināt siltuma zudumus, jāsamazina koeficients k_s . To var panākt, piemēram, samazinot spraugu. Siltuma zudumus var arī samazināt, izvēloties materiālu ar mazāku gaisa caurlaidību.



3.13. att. Atkarības $L_a(k_s)$ grafiks.

Iegūto datu koriģēšana

Tagad salīdzināsim aprēķinātos datus

$$L_{min} = 567,7 \frac{W}{K} \text{ un } L_{max} = 1115 \frac{W}{K}$$

ar vērtībām, kuras bija iegūtas ar mērinstrumentiem [73], [74] attiecīgi

$$454 \frac{W}{K} \text{ un } 766 \frac{W}{K}.$$

Siltumatdēvēs koeficienti, kuri bija ņemti no tabulām, ietekme galīgo rezultātu. Tāpēc izmantojot datus, kuri bija iegūti ar mērinstrumentiem, koriģēsim siltumatdēvēs koeficientus gadījumā pie minimālajiem siltuma zudumiem.

Viens un tas pats siltu atdēvēs koeficients $8,5 \frac{W}{m^2K}$ bija izmantots gan telts sienam, gan jumtam, turklāt gan iekšpusē, gan ārpusē. Tomēr, silts gaiss sakrājas zem jumta virsmas un siltumatdēvēs intensitāte kļūst atšķirīga, jo slikta gaisa cirkulācija samazina konvekciju. Tātad mūsu mērķis ir koriģēt siltumatdēvēs koeficientu starp iekšējo gaisu un telts jumtu. No izteiksmes

$$L_{min} = 454 = L_g + L_{w,r} = 137,5 + L_{w,r}$$

Iegūstam

$$L_{w,r} = 454 - 137,5 = 316,5 \frac{W}{K}.$$

Var atsevišķi aprēķināt

$$L_w = 3,8 \cdot 60 = 228 \frac{W}{K}$$

un tātad

$$L_r = L_{w,r} - L_w = 316,5 - 228 = 88,5 \frac{W}{K}.$$

No šejienes var iegūt

$$h_{tr} = \frac{L_r}{A_r} = \frac{88,5}{53,2} = 1,66 \frac{W}{m^2K}.$$

No vienības

$$h_t = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{l}{\lambda_c} + \frac{1}{h_0}}$$

izteiksim h_{ir} . Tātad

$$h_{ir} = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{l}{\lambda_c} + \frac{1}{h_0}} = \frac{1}{\frac{1}{1,66} + \frac{1}{38} + \frac{1}{8,5}} = 2,18 \frac{W}{m^2K}$$

Secinājums. Tātad aprēķinos bija izmantota vērtība $h_{ir} = 8,5 \frac{W}{m^2K}$, bet, izmantojot izmērītos datus, šo koeficientu var koriģēt un iegūt vērtību $2,18 \frac{W}{m^2K}$. Līdzīgi var koriģēt jebkuru citu koeficientu.

3.4. Spēkā esošās likumdošanas prasību pielāgošana

Patreiz Latvijā nepastāv specifiska metodoloģija neklasificēto ēku energoefektivitātes noteikšanai, bet šādos gadījumos tiek pielietotas parastās aprēķina metodes.

Ēku energoaudita veikšanu un energoefektivitātes noteikšanu nosaka Latvijas “Ēku energoefektivitātes likums”. Vienlaicīgi Ministru kabineta noteikumi Nr.222 “Ēku energoefektivitātes aprēķina metodes un ēku energosertifikācijas noteikumi” nosaka ēkas energoefektivitātes aprēķina metodi. MK noteikumi tiek balstīti uz LVS EN ISO 13790:2009 L “Ēku energoefektivitāte. Telpu apsildīšanas un dzesēšanas energopatēriņa rēķināšana”. Šis standarts sniedza aprēķina metodi, lai novērtētu dzīvojamo un nedzīvojamo ēku apkurei un dzesēšanai nepieciešamo energopatēriņu gada laikā. Šis standarts vairs nav spēkā un to aizvieto LVS EN ISO 52016-1:2017 Ēku energoefektivitāte [75]. Apkurei un dzesēšanai nepieciešamās enerģijas, iekšējās temperatūras un sajūtamā un latentā siltuma slodzes nosaka atbilstoši likuma 1.daļa: Aprēķina procedūras (ISO 52016-1:2017).

Lai veiktu neklasificēto ēku korektu enerģijas patēriņa novērtējumu, ir nepieciešams veikt šādu ēku padziļinātu energoauditus, ņemot vērā to ekspluatācijas specifiku [76].

Promocijas darbu ietvaros par neklasificētām ēkām tiek uzskatītas tādas ēkas kā soda izciešanas iestādes, cietumi un apcietinājuma centri, aizsardzības spēku, policijas un ugunsdzēsības dienestu ēkas un šo iestāžu kazarmas, atsevišķi māsaimniecību saimniecības ēkas, individuālās garāžas, individuālās pirtis, pagrabi, vasaras virtuves, siltumnīcas, apsardzes ēkas, caurlaides ēkas, individuālās lapenes, citur neklasificētās nojumes u.tml.

Kā rāda veikto neklasificēto ēku energoauditu rezultātu salīdzinājums ar reāli izmērītajiem datiem, rezultāti būtiski atšķiras, ko var skaidrot ar neklasificēto ēku specifiku un ka šādu ēku energo izvērtējumam ir **jāpielieto specifiski izejas dati – siltuma izdalījumu lielums, mitruma režīms, gaisa apmaiņas daudzums, karstā ūdens patēriņš u.tml.**

Latvijas Republikā spēkā esošie normatīvi tieša veidā nenosaka energoauditā ievadāmos datus, kurus pielieto neklasificēto ēku energoauditu veikšanai, izvēloties aprēķina temperatūras, gaisa apmaiņas daudzumus, siltuma izdalījumus, darbības režīmus, apgaismojuma energopatēriņu, karstā ūdens patēriņu utt.

Tādējādi ir nepieciešams pielietot jau esošo datus kā arī adaptēt tos specifiskajām vajadzībām. 3.1. tabulā tiek parādīts Latvijas Republikā spēkā esošo normatīvu apskats un to pielietojums neklasificētām ēkām.

Spēkā esošo normatīvu apskats, kuri tiek pielietoti energopatēriņa aprēķinā

Normatīva nosaukums	Normatīvs reglamentē	Pielietojums neklasificētām ēkām
LBN 002-19 "Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika"	Normatīva 1.-4.2. tabulam nosaka Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnikas rādītājus un to vērtības; Normatīva IV pants.s nosaka Ēku gaiscaurlaidību un energoefektivitātes rādītājus	Kazarmas var tikt pieņemtas kā dzīvojamās ēkas; Administratīvās ēkas, štābi, mācību telpas, ēdnīcas var tikt pieņemtas kā publiskās ēkas; Garāžas, remontdarbnīcas kā ražošanas ēkas
Būvju vispārīgo prasību būvnormatīvs LBN 200-21	Normatīvs nosaka prasības, kādas ievēro, projektējot ēkas, stadionus, arēnas, brīvdabas estrādes un citas brīvdabas izklaides būves, kā arī prasības to novietošanai, jaunai būvniecībai, atjaunošanai, pārbūvei un restaurācijai.	Normatīvu var pielietot veicot energoauditus kazarmām vai personāla dzīvojamām telpām, kā arī atsevišķām palīgtelpām, kā sanmezglēm un dušu telpām. Normatīvu var pielietot aplēšot solāros pieplūdumus caur stiklojumu atkarībā no ēkas izmantošanas veida
LBN 231-15 "Dzīvojamo un publisko ēku apkure un ventilācija"	Normatīva 92. punkts nosaka, ka Gaisa kvalitāti un vēlamos parametrus attiecīgajās telpās nosaka atbilstoši standartam LVS EN ISO 7730:2006 Normatīva 96. punkts nosaka, ka Ventilācijas sistēmu ražīgumam jābūt pietiekamam, lai nodrošinātu svaiga gaisa padevi, apmierinošu komfortu vai tehnoloģiskos apstākļus apkalpojamā zonā. Telpas gaisa piesārņojuma avotus novērtē atbilstoši standartam LVS EN ISO 7730:2006 Normatīva 97. punkts nosaka, ka ja vienīgais telpas gaisa piesārņojuma avots ir cilvēki, svaigā gaisa padeves absolūtais minimums ir 15 m ³ /h uz cilvēku.	Normatīvu var pielietot visām neklasificētajām ēkām atkarībā no to izmantošanas veida, lai noteiktu to minimālo ventilācijas gaisa daudzumu, ja nav zināmi specifiski aprēķinātie gaisa daudzumi.
LBN 221-15 "Ēku iekšējais ūdensvads un kanalizācija"	Normatīva 4. pielikums nosaka vidējo un maksimālo karstā, aukstā un kopējā ūdens patēriņu atkarībā no ēkas izmantošanas veida	Normatīvu var pielietot nosakot patērēto enerģiju, karstā ūdens sagatavošanai pielīdzinot administratīvās ēkas, štābi, mācību telpas pārvaldes ēkām, bet kazarmas pielīdzinot gaidu un skautu nometnēm ar ēdnīcām, kur izmanto jēlproduktus, un ar automatiskajām veļas mazgājamajām mašīnām
LBN 003-19 "Būvklimatoloģija"	Normatīvs nosaka aprēķina un vidējās āra gaisa temperatūras apkures sezonā, apkures sezonas ilgumu, saules starojums uz dažādi orientētām virsmām skaidrā laikā jūlijā atkarībā no pilsētas	Normatīvu var pielietot visa veida neklasificētajām ēkām, ja to apkures periods ievērojami neatšķiras no standarta būvēm, dēļ specifiskiem konstruktīviem risinājumiem, piemēram, kazarmas kas veidotas kā teltis
LVS CR 1752:2008 "Ēku ventilācija – Iekštelpu vides projektēšanas kritēriji"	Normatīvs reglamentē nepieciešamās telpu temperatūras, ventilācijas gaisa daudzumus, gaisa plūsmas ātrumus darba zonā un pieļaujamo trokšņu līmeni. Tāpat tiek dotas vadlīnijas par	Standarta 1. tabula var tik pielietota, lai noteiktu nepieciešamos gaisa daudzumus neklasificēto ēku mācību telpās, kafetērijās, un štābos, pielīdzinot tos ofisu ēkām.

	metaboliski izdalītā siltuma daudzumu no personas un apģērbtības līmeni, atkarībā no uzvilktajām drēbēm	
LVS EN ISO 7730:2006 "Siltuma vides ergonomika. Termālā komforta analītiska noteikšana un interpretācija, izmantojot paredzamā vidējā balsojuma (PMV) un paredzamā neapmierināto personu procenta (PPD) indeksu kalkulāciju un lokālā termālā komforta kritērijus"	Normatīvs reglamentē, kā raksturot un noteikt termālā komforta līmeni cilvēkiem atkarībā no telpas gaisa temperatūras, starojuma temperatūras, gaisa plūsmas ātruma un gaisa mitruma.	Standarts var tikt pielietots visām neklasificētajām ēkām, lai prognozētu vai raksturotu iekštelpu termālā komforta līmeni.
ISO 9972:2015 Thermal performance of buildings Determination of air permeability of buildings Fan pressurization method"	Nosaka ēku vai ēku daļas gaiscaurlaidības pārbaūžu veikšanas metodiku, izmantojot kalibrētus ventilatorus, lai radītu spiedienu atšķirību starp iekštelpām un ārējo vidi. Neklasificēto ēku vajadzībām ir iespējams izmantot ASV Inženieru Armijas Korpusa publicēto ēku norobežojošo konstrukciju gaiscaurlaidības noteikšanas protokolu,	
ISO 6781-3:2015 Ēku energoefektivitāte. Siltuma, gaisa un mitruma noviržu noteikšana ēkās, izmantojot infrasarkanā starojuma metodes.	Nosaka kvalitatīvo metodes, izmantojot termogrāfisko pārbaudi (infrasarkanā metode), lai konstatētu termiskās anomālijas ēku norobežojošajās konstrukcijās. Šo metodes izmanto, lai identificētu ēku ārējo norobežojošo konstrukciju sastāvā esošo elementu siltuma īpašību, tostarp gaisa caurlaidības. Neattiecas uz konstrukciju siltumizolācijas un gaisa caurlaidības faktiskā lieluma noteikšanu.	

4. PĒTĪJUMS PAR ENERGOAUDITĀ IEVADĀMO DATU ROBEŽVĒRTĪBĀM

4.1. Metodoloģija

Vērtējot neklasificēto ēku energoefektivitātes raksturojumus jāpievērš arī uzmanību iekštelpu gaisa kvalitātei un iekštelpu komfortam (IAQ).

Tā, lai objektīvi noteiktu IAQ dislocētā kontingenta apmierinātības/neapmierinātības lielumus, militārajos objektos (speciālās nozīmes centros), tiek veikta karavīru rakstiskā aptauja par iekštelpas komfortu, kā arī tiek nodrošināts ilgstošs pētīto ēku iekštelpu gaisa kvalitātes, relatīvā mitruma un temperatūras monitorings.

Iekštelpu gaisa kvalitātes parametri tiek pētītas administratīvajā ēkā Nr.2, kazarmās Nr.6., Nr.9 un ēdnīcās ēkā Nr.7 (sk. 1.7. att.). Mērījumi tiek veikti apkures sezonas laikā.

Sensori tiek izvietoti telpās ar lielāko dienesta darbinieku koncentrāciju un tiek atstāti iekštelpās vismaz uz mēnesi. Pētīto gaisa parametru reālo vērtību nolasīšana tiek nodrošinātā ar sensora iestatījumiem un tiek veikta ar biežumu 5 minūtes.

4.2. Gaisa apmaiņas daudzuma noteikšana neklasificētās ēkās

Viens no pamata uzdevumiem energoauditu veikšanā ir precīzu siltuma enerģijas zudumu noteikšana. Parasti šis process sastāv no divām daļām – siltuma zudumu, kuri rodas caur norobežojošām konstrukcijām, aprēķins un enerģijas patēriņš kas tiek pazaudēts dēļ ēku ventilācijas. Ja pirmais no šiem ir salīdzinoši vienkārši aprēķināms, jo ir nepieciešams zināt tikai ēku norobežojošo konstrukciju specifiskos laukumus un siltumvadāmības koeficientus, tad ar otro ir sarežģītāk. Tas ir dēļ fakta, ka lai noteiktu cik enerģijas gada laikā tiek pazaudēts ar ventilācijas sistēmām ir jāzina vairāki parametri, kuri var dinamiski mainīties un nebūt vienādi ne tikai savstarpēji līdzīgām ēkām, bet arī ēkai, tās dzīves ciklā tajos var būt izmaiņas [80]. Šie parametri ir – ventilācijas gaisa paredzētais apjoms, ventilācijas iekārtu darbības režīms, ventilācijas iekārtu siltuma atgūšanas efektivitāte, kā arī ēkas vispārējā gaisa caurlaidība, kas ietekmē nekontrolēti infiltrētā gaisa apjomu.

Neklasificēto ēku definīcija ietver sevī ēkas ar ļoti dažādu izmantošanas veidu, kas nozīmē ka to ventilācijas gaisa apjomi var būt ļoti atšķirīgi. Jāņem vērā, ka daudzas neklasificētās ēkas sastāv no telpām ar lokālu gaisa piesārņojuma avotu, piemēram, garāžas, munīciju glabātavās, noliktavas, šautuves, rūpnīcdarbnīcas u.c. Ēku enerģijas patēriņa bilancē ventilācijas gaisa uzsildi un elektroenerģija tā pārvietošanai sastāda ļoti nozīmīgu daļu, sevišķi ēkām kuras ir ar labu siltumizolāciju. Dati par ventilācijas gaisa apjomu ir jāņem vērā veicot šādu ēku energoauditu vai izstrādājot ēkas energoefektivitātes novērtējumu.

Ņemot vērā, ka Latvijas būvnormatīvi nenosaka nepieciešamos minimālos ventilācijas gaisa daudzumus kā arī nedod norādes par lielumiem, kurus vajadzētu pieņemt, ir jāpielieto citu valstu normatīvi. Zemāk esošajā tabulā ir atspoguļoti ventilācijas gaisa daudzumi pēc telpu izmantošanas veida un pielietotā normatīva.

4.1. tabula

Nepieciešamās ventilācijas gaisa daudzums atkarībā no telpas veida, pēc dažādiem normatīviem

Telpas veids	Normatīvais dokuments		
	ASHARE standard 62.1-2010	LVS CR 1752:2008	D.2 National Building Code of Finland Indoor Climate and Ventilation of Buildings
Auto remontdarbnīcas	7,5 l/s/m ²	-	-
Cietuma kamera	4,9 l/s/pers.	-	8,0 l/s/pers. vai 2,5 l/s/m ²
Cietuma kamera ar tualeti	5,0 l/s/m ²	-	-
Ģērbtuves	1,25 l/s/m ²	-	5 l/s/m ²
Garāžas	3,7 l/s/m ²	-	7 l/s/m ²
Netīrās veļas glabātavas	5,0 l/s/m ²	-	5 l/s/m ²
Ķīmikāliju glabātavas	7.5 l/s/m ²	-	-
Publiskās tualetes	35 l/s/iekārtu	-	30 l/s/iekārtu
Kazarmu guļamtelpas	4,0 l/s/pers.	-	8 l/s/pers vai 2/l/s/m ²
Mācību telpa	4,3 l/s/pers.	4,2 l/s/m ²	6 l/s/pers vai 3 l/s/m ²
Noliktava	5 l/s/pers. + 0,3 l/s/m ²	-	-

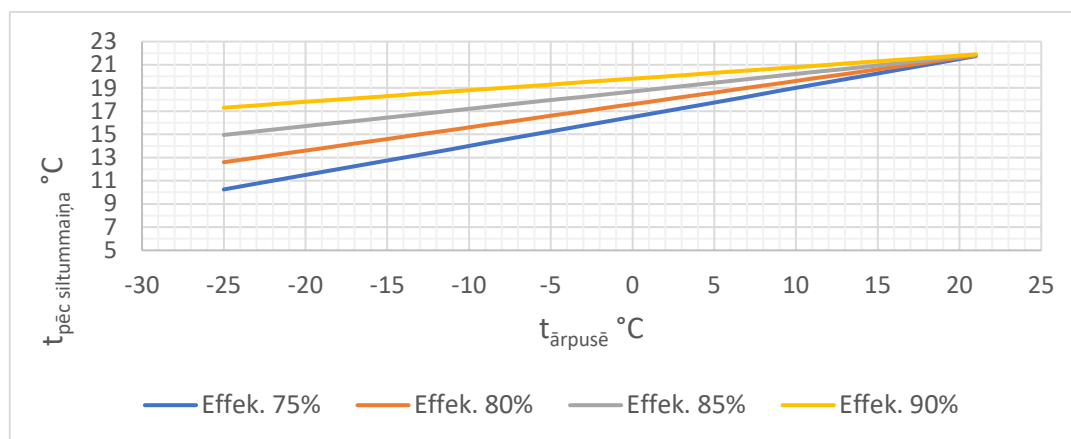
Normatīvs ASHARE standard 62.1-2007 (Tabula 4.2.) arī reglamentē nepieciešamo gaisa apmaiņas kārtu daudzumu mehānisko pārvietošanās līdzekļu telpām. Balstoties uz tiem, ir iespējams aptuveni aplēst, kādam būtu jābūt gaisa apmaiņas daudzumam tādās neklasificētās ēkās kā ugunsdzēsēju depo vai militārās tehnikas garāžai.

4.2. tabula

Nepieciešamais gaisa apmaiņas daudzums mehānisko pārvietošanās līdzekļu telpām atbilstoši ASHRAE 62.1-2007

Zona	R _p (cfm/cilv.)	R _a (cfm/sq ft)	Kopā (cfm)	Kopā (ACH)	Piezīmes
Remont telpa		1.5	33,408	2.6	Auto remonta telpas izputējs
Transportlīdzekļa koridors		1.5	9,216	4.5	Auto remonta telpas izputējs
Dušas		0.25	512	0.8	Skapīša / ģērbtuves izputējs
Noliktava 1		0.12	492	0.4	Noliktavas telpas ventilācija
Apvienotās telpas		1.5	4,608	4.5	Auto remonta telpas izputējs
Noliktava 2		0.12	369	0.4	Noliktavas telpas ventilācija
Birojs	5	0.06	733	0.3	Biroja telpas ventilācija

Ņemot vērā, ka mūsdienīgās ēkās, lai taupītu enerģiju ventilācijas sistēmas visbiežāk, tiek paredzētas kā mehāniskās pieplūdes-nosūces sistēmas ar siltuma atgūšanu. Zemāk dotajā grafikā (4.1. att.) ir parādīta pieplūdes temperatūra pēc siltuma atgūšanas iekārtas, pie dažādām āra gaisa temperatūrām un siltuma atgūšanas efektivitāti, ja telpas temperatūra ir +22 °C:



Attēls 4.1. Pieplūdes gaisa temperatūra pēc siltummaiņa pie dažādām āra gaisa temp., ja nosūces gaisa temperatūra ir +22°C

Lai parādītu, cik nozīmīgu daļu no kopējā enerģijas patēriņa var sastādīt ventilācijas sistēmas, promocijas darba ietvaros tika veikta gaisa apmaiņas daudzuma noteikšana šautuvēm un principiālas ventilācijas sistēmas shēmas izstrāde.

Šautuves ir paaugstināta riska objekts attiecībā uz gaisa piesārņojuma līmeni, jo tajās tiek izdalīts svins. Saskare ar svina daļiņām un šaujampulvera dūmgāzēm, kuras rodas šaušanas laikā, var radīt nopietnas veselības problēmas pie ilgstošas saskares. Metāliskie svina putekļi nav vienīgie vaininieki, jo daļa no gāzēm, kuras rodas, degot šaujampulverim, ir kaitīgas cilvēka elpošanas sistēmai un lielos apjomos spēj nodarīt nopietnu apdraudējumu veselībai. Nepietiekamas gaisa apmaiņas un intensīvas šaušanas rezultātā, lielā daļā Latvijas iekštelpu šautuvēs gan šāvēji, gan apkalpojošais personāls mēdz valkāt gaisa filtrēšanas maskas jeb respiratorus.

Pamatā ir trīs galvenās zonas šaušanas sektoros, kur ir vislielākā svina koncentrācija un lielākais risks. Tās ir – šaušanas pozīcijas, zona aptuveni piecus metrus aiz šaušanas pozīcijām un mērķu zona. Katrā no šīm zonām ir savas atšķirības, kas ietekmē riskus. Šaušanas pozīcija ir vieta, kur bīstamo vielu koncentrācija gaisā sasniedz augstu punktu dēļ šāviena radītā piesārņojuma. Zona aptuveni piecus metrus aiz šaušanas pozīcijas - ir zona, kurā tiek konstatēts vislielākais gaisa piesārņojums, kurā bez aizsarglīdzekļiem nevajadzētu atrasties. Primārās bīstamības risks šajā zonā ir vislielākais. Iekštelpu šautuvēs obligāti ir nepieciešami ložu ķērāji jeb konstrukcijas, kurās tiek apturēts lodes lidojums pēc mērķa sasniegšanas. Kontakta rezultātā lode sadalās daudzos gabalos, veicinot svina oksīda rašanos lielos apjomos un radot bīstamus apstākļus ieelpošanas vai kontakta rezultātā.

Visbiežāk pielietotais risinājums ir pieplūdes gaisu izvietot šaušanas sektora aizmugurē aiz šāvēju pozīcijām, savukārt nosūci izvietot aiz mērķiem un ložu ķērājiem, nodrošinot lamināru plūsmu mērķu virzienā, kas tiek panākta ar neliela spiediena retinājuma palīdzību mērķu zonā. Tādējādi piesārņotais gaiss tiek konstanti virzīts prom no šāvēju atrašanās vietas. Ieteicamais gaisa plūsmas ātrums ir aptuveni 0,25 līdz 0,5 m/s. Cits risinājums ir izvietot gaisa pieplūdi tieši pie katra šāvēja pozīcijas, nodrošinot nelielu gaisa padevi. Jāņem vērā, ka šaušanas vingrinājumi sevī ietver dažādas pozīcijas, arī elpošanas zonas mainās. Stacionārās šaušanas laikā pamatā ir trīs šaušanas pozīcijas. Zemākā no tām ir guļus, kad šāvējs ir pilnībā nogūlies grīdas līmenī uz paklājiņa pie šaušanas līnijas, vidējā ir šaušanas pozīcija no ceļa un visbeidzot – stāvus.

4.3. tabula

Vācijā pieņemtie gaisa apmaiņas lielumi pēc izmantotās munīcijas [79]

Munīcijas veids		Gaisa apmaiņa stundā
Mazkalibra ieroči (.22RL)	=	2,5 x
Pistoles, triecienšautenes	=	10 -15 x
Dinamiskā šaušana dažādās distancēs	>	30x

Pētījumā ietvaros tika izstrādāts aprēķins un shematisks risinājums šautuvei ar trim šaušanas līnijām, katri, no kurām ir divas šaušanas pozīcijas – 50 un 25 m.

Šautuves tehniskie parametri ir sekojoši:

- Garums: 59,80 m;
- Platums: 5,50 m;
- Augstums: 3,00 m;
- Platība: 986,70 m²;
- Tilpums: 2960,10 m³.

Veicot gaisa daudzuma aprēķinu, tika pieņemts, ka gaisa plūsma šaušanas sektorā: 0,25 m/s kas iekļaujas NAFA rekomendācijās, nodrošina pietiekamu gaisa apmaiņu un lieki nesadārdzina sistēmas izmaksas, kā tas būtu tad, ja šī vērtība būtu lielāka. Līdz ar to seko:

$$Q_{\text{sektoram}} = H \times W \times V \times 3600 = 3 \times 5,5 \times 0,25 \times 3600 = 14\,850 \text{ m}^3/\text{h}.$$

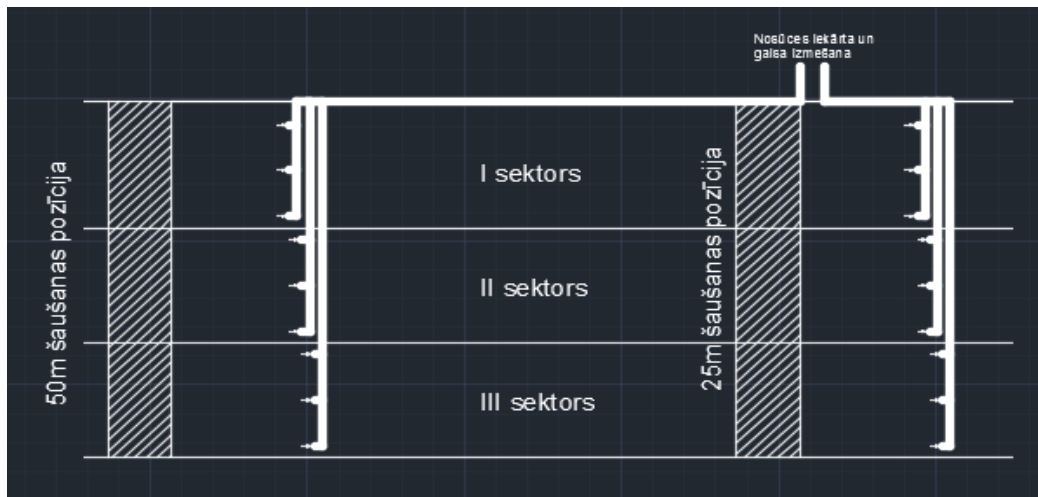
Ņemot vērā to, ka visi trīs šaušanas sektori pēc izmēriem ir vienādi, kopējā apmaināmā gaisa apjoms stundā ir sekojošs:

$$Q_{\text{kopējais}} = Q_{\text{sektoram}} \times 3 = 14\,850 \times 3 = 44\,550 \text{ m}^3/\text{h}.$$

Lielbritānijas normatīvie dokumenti rekomendē pieplūdes gaisa apjomu samazināt par desmit procentiem salīdzinājumā ar nosūces gaisu, lai nodrošinātu vienmērīgu, lamināru plūsmu. Līdz ar to pieplūdes gaisa apjoms (Q pieplūde) ir:

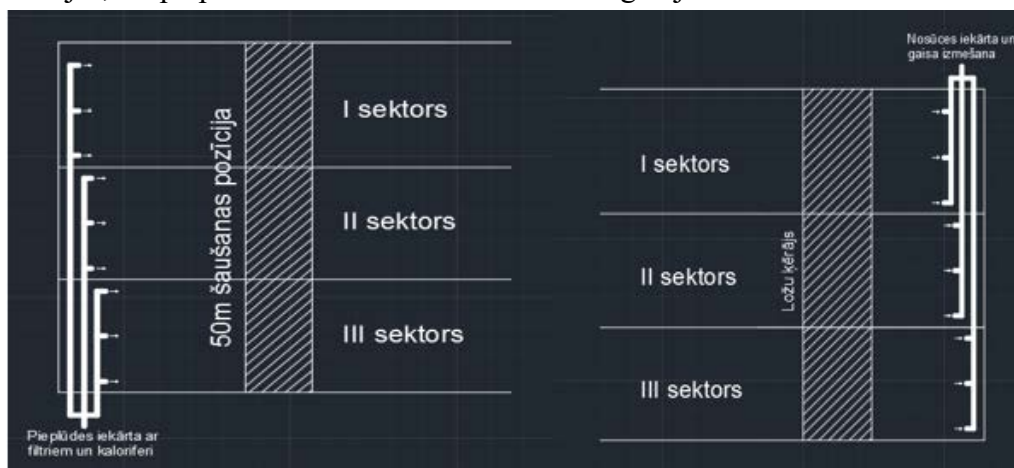
$$Q_{\text{pieplūde}} = Q_{\text{kopējais}} \times 0,9 = 44\,550 \times 0,9 = 40\,095 \text{ m}^3/\text{h}.$$

Gan piecdesmit metru, gan divdesmit piecu metru pozīcijās gaisa nosūces līnijas ir sadalītas trīs atzaros. Katrs atzars nonāk vienā no sektoriem, kā tas ir redzams 4.2. att.



4.2. att. Principiāla nosūces līniju shēma starp sektoriem divdesmit piecu un piecdesmit metru šaušanas pozīcijās.

Katrs atzars ir aprīkots ar elektroniski regulējamu vārstu. Šāds izkārtojums ir izvēlēts ar tādu domu, lai ērti varētu regulēt nosūces sistēmas darbību. Pozīcijās, kurās notiks šaušanas vingrinājumi, tiesnesis vai instruktors ieslēgs tur izvietotu slēdzi, kurš signalizēs automātiskai par tālākajām sistēmas darbībām. Uz abu šaušanas pozīciju atzariem ir viena nosūces iekārta, kura pēc vajadzības strādā ar trešdaļu, divu trešdaļu vai pilnu jaudu. Savukārt nosūce aiz mērķu zonas ir sazarota trīs daļās – katrs atzars nonāk vienā sektorā. Uzskatāmi tas ir parādīts 4.3. att. Līdzīgi kā šaušanas pozīciju nosūces sistēmai, arī šeit uz katra atzara ir izvietots vārsts, kurš regulē sektoru nosūces darbību. Arī ventiekārta uz visiem atzariem ir viena, kura var strādāt ar trešdaļu, divu trešdaļu vai pilnu jaudu atkarībā no situācijas šaušanas pozīcijās. Pieplūde ir izvietota šautuves sākumā. Ieņemtais gaiss tiek attīrīts un pēc nepieciešamības uz-sildīts ventiekartas kaloriferī. Tālāk gaiss tiek padots trīs atzaros uz sektoriem. Līdzīgi kā visās nosūces līnijās, arī pieplūdes atzariem ir elektroniski regulējami vārsti.



4.3. att. Principiālā gaisa pieplūdes shēma kreisajā pusē un nosūces shēma aiz mērķu zonas labajā pusē

Sekojoši tiek aprēķināts nepieciešamais siltums dotā gaisa daudzuma piesildīšanai, pieņemot, ka šautuves gaisa temperatūrai ir jābūt 18°C , lai nodrošinātu komfortablus apstākļus.

Savukārt par āra gaisa temperatūru ir izvēlēti $-20,7^{\circ}\text{C}$, kas atbilst LBN 003-19 “Būvklimatoloģija” visaukstāko piecu dienu vidējai gaisa temperatūrai Rīgā. Pie šādiem parametriem, nepieciešamais siltuma daudzums ir ap 608 kW.

4.3. Cilvēka ķermeņa termiskais līdzsvars

Cilvēka ķermeņa siltuma zudumu aprēķināšana ir sarežģīts īslaicīgas siltuma pārneses uzdevums, kas ietver izstarošanu, konvekciju, siltuma vadīšanu un iztvaikošanu, kā arī daudzus citus mainīgos faktorus, sākot no ādas mitruma un beidzot ar apģērba sastāvu. Mēs apskatīsim tikai vienkāršākos šī uzdevuma aspektus.

Ķermeņa kopējais enerģijas ražošanas ātrums ir siltuma daudzuma \dot{Q} un darba \dot{W} veikšanas ātrumu summa, un to var pierakstīt šādi:

(4.1.)

$$\dot{Q} + \dot{W} = \dot{M} \cdot A_{sk},$$

kur \dot{Q} – siltuma ražošanas ātrums,

\dot{W} – darba veikšanas ātrums,

\dot{M} – metabolisma ātrums,

A_{sk} – kopējais ādas laukums.

Metabolisma ātrumu parasti izsaka *met* (M) vienībās, kur

$$1 \dot{M} = 1 \text{ met} = 58.2 \text{ W/m}^2.$$

Metabolisma ātrums dažādu aktivitāšu laikā ir parādīts nākamajā tabulā.

4.4. tabula

Metabolisma ātrums dažādu aktivitāšu laikā [81]

Metabolisma ātrums dažādu aktivitāšu laikā		
Aktivitāte	Met	W/m ²
Gulēšana	0.7	40
Atpūta	0.8	45
Klusa sēdēšana	1.0	60
Mierīga stāvēšana	1.2	70
Staigāšana (0,9 m/s, 3,2 km/h, 2,0 mph)	2.0	115
Staigāšana (1,8 m/s, 6,8 km/h, 4,2 mph)	3.8	220
Lasīšana birojā, sēžot	1.0	55
Dars birojā, staigājot	1.7	100
Mājas uzkopšana	2.0 - 3.4	115 - 200
Savākšanas un rakšanas darbi	4.0 - 4.8	235 - 280
Dejas sabiedriskā pasākumā	2.4 - 4.4	140 - 255
Darbs ar smago tehniku	4.0	235

Tā kā ādas laukums A_{sk} pieaugušam cilvēkam ir aptuveni $1.5 - 2 \text{ m}^2$, siltuma ražošanas jauda ir aptuveni 100 W.

Lai analizētu siltuma \dot{Q} izkliedi vidē, ir ērti nošķirt vairākus galvenos siltuma pārnese režīmus, rakstot

(4.2.)

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{con} + \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{evap} + \dot{Q}_{res,sen} + \dot{Q}_{res,lat},$$

kur pirmie trīs vienādojuma locekļi attiecas uz ādu (konvekcija, izstarošana un iztvaikošana), bet pēdējie divi locekļi - uz elpošanu (apzināta un latentā). Siltuma zudumi elpošanas dēļ parasti ir mazāki par 10% no kopējiem siltuma zudumiem.

Konvektīvo siltuma pārnese no apģērba ķermeņa ādas var pierakstīt kā

$$\dot{Q}_{con} = A_{cl} \cdot h_{con}(T_{cl} - T_a), \quad (4.3.)$$

kur A_{cl} ir apģērba un ādas virsmas laukums, kas nonāk saskarē ar gaisu,

T_{cl} ir apģērba vidējā temperatūra,

h_{con} ir vidējais konvektīvās siltuma pārnese koeficients [$W/(m^2K)$],

T_a ir tieši piekļaujošā gaisa vai apkārtējā gaisa sausā termometra temperatūra.

Sēdošam cilvēkam

$$h_{con} = \begin{cases} 3.1, & \text{if } 0 \leq v \leq 0.2 \\ 8.3 \cdot v^{0.6}, & \text{if } 0.2 \leq v \leq 4.0 \end{cases} \quad (4.4.)$$

kur v ir gaisa kustības ātrums.

Aktīvam cilvēkam nekustīgā gaisā

$$h_{con} = 5.7 \times (\dot{M} - 0.85)^{0.39}, \quad 1.1 \leq \dot{M} \leq 3.0, \quad (4.5.)$$

(\dot{M} ir metaboliskais ātrums met vienībās).

Siltuma izstarošanas process ir sarežģītāks, jo dažādām vides virsmām var būt dažādas temperatūras.

Lai vienkāršotu analīzi, ir ērti definēt vides vidējo izstarošanas temperatūru (*mean radiant temperature (MRT)*) T_{mrt} kā tādu temperatūru, kas piemīt iedomātam izotermiskam ietvaram, ar kuru cilvēka ķermenis apmainītos ar tādu pašu izstarojuma daudzumu kā ar reālo vidi. Turklāt dažādu virsmu izstarojums iekšējās ir tuvu 0,9, kas ir pietiekami augsts, lai mēs varētu uzskatīt, ka virsmas ir melnas. Tādā gadījumā izstarotā siltuma zudumi uz ķermeņa virsmas laukuma vienību ir

$$\sigma(T_{cl}^4 - T_{mrt}^4) = \sigma \sum_n F_{cl-n}(T_{cl}^4 - T_n^4), \quad (4.6.)$$

kur notiek summēšana pa visām virsmām, ar kurām ķermenis var apmainīties ar tiešu starojumu F_{cl-n} ir starojuma formas koeficients no ķermeņa uz n-to apkārtējo virsmu un σ ir Stefana – Bolcmaņa konstante.

Tā kā starojuma formas koeficientu summa pa visu ietvaru ir vienāda ar vienu, T_{cl}^4 locekļi saīsinās un T_{mrt} ir

$$T_{mrt}^4 = \sum_n F_{cl-n} T_n^4. \quad (4.7.)$$

Tad ķermeņa izstarošanas siltuma zudumus var pierakstīt kā

$$\dot{Q}_{rad} = A_{cl} \cdot h_{rad}(T_{cl} - T_{mrt}), \quad (4.8.)$$

kur h_{rad} ir izstarošanas siltuma pārnese koeficients. Normālam vidējam apģērbam šim koeficientam rekomendētā skaitliskā vērtība ir $4.71 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Mēs definējam kopējo siltuma pārnese koeficientu

$$h_{c+r} = h_{con} + h_{rad}, \quad (4.9.)$$

un tā saukto operatīvo temperatūru T_{op}

$$T_{op} = \frac{h_{con}T_a + h_{rad}T_{mrt}}{h_{c+r}}. \quad (4.10.)$$

Tad mēs iegūstam

$$\dot{Q}_{con} + \dot{Q}_{rad} = A_{cl} \cdot h_{c+r}(T_{cl} - T_{op}). \quad (4.11.)$$

Izstarošanas un konvektīvās siltuma pārnese koeficientu vērtības bieži ir tuvas viena otrai.

Apģērbs rada termisko pretestību siltumam, kas plūst no ādas, un to ir jāiekļauj modelī. Apģērba izolācijas vērtība tiek mērīta clo vienībās, ko definē kā

$$1clo = 0.155 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}. \quad (4.12.)$$

4.5. tabula

Tipiskās apģērba izolācijas vērtības dažādiem apģērbu komplektiem [81]

Tipiskās apģērba izolācijas vērtības dažādiem apģērbu komplektiem			
Komplekts	I_{cl}	I_T	A_{cl}/A_{sk}
Šorti, krekls ar īsām piedurknēm	0.36	1.02	1.10
Bikses, krekls ar īsām piedurknēm	0.57	1.20	1.15
Bikses, krekls ar garām piedurknēm	0.61	1.21	1.20
Bikses, t-krekls, krekls ar garām piedurknēm, žakete	0.96	1.54	1.23
Bikses, krekls ar garām piedurknēm, džemperis ar garām piedurknēm	1.01	1.56	1.28
Sporta bikses, sporta krekls	0.74	1.35	1.19
Svārki līdz ceļiem, krekls ar īsām piedurknēm, zeķbikses, sandales	0.54	1.10	1.26
Svārki līdz ceļiem, krekls ar garām piedurknēm, apakškleita, zeķbikses	0.67	1.22	1.29
Svārki līdz ceļiem, krekls ar garām piedurknēm, apakšsvārki, zeķbikses, džemperis ar garām piedurknēm	1.10	1.59	1.46
Kombinezons ar garām piedurknēm, t-krekls	0.72	1.30	1.23

Tabulā norādītās izolācijas pretestības I_{cl} un I_T dotas clo vienībās un ietver konvektīvos un izstarošanas efektus, attiecīgi, tikai apģērbam un kopējai termiskajai pretestībai starp ādu un apkārtējo vidi. Tabulā norādīta arī virsmas laukuma attiecība A_{cl}/A_{sk} starp kopējo apģērba un ādas laukumu. Ādas temperatūra mainās atkarībā no metaboliskā ātruma, bet parasti tiek pieņemts, ka sēdošiem cilvēkiem, kas veic biroja darbu, tā ir $34,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Palielinoties aktivitātei, palielinās metaboliskais ātrums un ķermenis pazemina ādas temperatūru, lai enerģiju

izkļiedētu, ja vides temperatūra tiek uzturēta nemainīga. Lai noteiktu komfortu veicinošu ādas temperatūru, var izmantot sekojošu sakarību:

$$T_{sk} = 35.7 - 1.60 \times (\dot{M} - \dot{W}) \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (4.13.)$$

kur \dot{M} un \dot{W} ir, attiecīgi, metabolisma un darba veikšanas ātrums konsekventās vienībās W.

Līdzās konvekcijai un starojumam pastāv trīs papildu siltuma pārnese režīmi. Svarīgs faktors ir ādas siltuma zudumi iztvaikošanas dēļ \dot{Q}_{evap} . Palielinoties apkārtējās vides temperatūrai, mēs pamanām, ka iztvaikošanas siltuma zudumu relatīvais ieguldījums ievērojami palielinās, lai kompensētu konvektīvās un izstarošanas siltuma zudumu kritumu.

Iztvaikošanas siltuma zudumus var noteikt, novērtējot ūdens tvaiku masas pārnese koeficientu h_E kā

$$h_E = \frac{h_{con}}{Le \cdot c_{p,a}}, \quad (4.14.)$$

kur

Le ir Lūisa skaitlis (vairumam pielietojumu $Le = 0.895$)

$c_{p,a}$ ir apkārtējā gaisa īpatnējā siltumietilpība.

Iztvaikošanas jeb latentie siltuma zudumi var tik izteikti kā (ūdens iztvaikošanas ātrums)

$$\dot{m}_{evap} = A_{sk} \cdot h_E \cdot f_{w,sk} \cdot (W_{sk}^* - W_a), \quad (4.15.)$$

latentie siltuma zudumi

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_{evap} \cdot h_{evap,sk}, \quad (4.16.)$$

Kur iztvaikošanas jeb latentie siltuma zudumi var tik izteikti caur ūdens iztvaikošanas ātrumu

$$\dot{m}_{evap} = A_{sk} \cdot h_E \cdot f_{w,sk} \cdot (W_{sk}^* - W_a), \quad (4.17.)$$

Tad latentie siltuma zudumi ir

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_{evap} \cdot h_{evap,sk}, \quad (4.18.)$$

kur $f_{w,sk}$ ir mitrās ādas attiecība pret kopējo ādas laukumu (kas mainās no 0.06 normāla ādas mitruma gadījumā līdz aptuveni 0.5 komfortablos apstākļos), W_{sk}^* ir piesātināta gaisa mitrums pie ādas temperatūras, W_a ir apkārtējā gaisa mitrums, $h_{evap,sk}$ ir ūdens latentais iztvaikošanas siltums ādas temperatūrā.

Lai vienkāršotu aprēķinus, enerģiju, ko svīstot izkļiedē vidējais cilvēks (ādas laukums vidēji 1.8 m^2), lai saglabātu komfortu, aprēķina pēc formulas:

$$\dot{Q}_{iztv} = 24.3 \times (\dot{M} - \dot{W} - 1) \text{ W/m}^2. \quad (4.19.)$$

4.4. Militāro formu un to sastāvdaļu siltumizolācija

Ņemot vērā to, ka militārais apģērbs ir specifisks un krietni atšķiras no civila rakstura drēbēm, tad aprēķiniem ir nepieciešami konkrēti šī tipa apģērba CLO vērtības. Zemāk redzamajā tabulā ir redzami siltumizolācijas dati tipiskām ASV armijas formas sastāvdaļām dažādos apstākļos. Lielākoties šos datus var attiecināt arī uz citu valstu bruņoto spēku formām, lai gūtu aptuvenu priekšstatu par kopējo siltumizolācijas līmeni dažādās kombinācijās. Tabulā ar "i_m" ir attēlots apģērba mitruma caurlaidības indekss [82].

4.6. tabula

Dažādu militāro apģērbu aptuvenās CLO vērtības

DAŽĀDU MILITĀRO APĢĒRBU APTUVENĀS CLO VĒRTĪBAS (0.3 m/s air motion)			
CLOTHING	i_m	clo	i_m/clo
Cold-Dry	0.43	4.30	0.10
Cold-Wet	0.40	3.20	0.13
Utility Fatigues	0.41	1.40	0.29
Battle-Dress Uniform	0.41	1.34	0.31
Chem. Prot. Overgarment (without mask, hood, gloves)	0.34	1.97	0.17
(MOPP IV with mask, hood and gloves)	0.30	2.44	0.12
(MOPP IV, plus body armor, ground troops)	0.29	2.20	0.13

Avots: USARIEM copper manikin measurements

Attiecībā uz citām formas sastāvdaļām, kas neatšķiras pēc uzbūves, un izpildījuma no civila rakstura apģērba, piemēram: veļa, dažādu tipu krekli, apavi un galvassegas, var izmantot jebkurus citus informācijas avotus. Norādītās vērtības dažādos materiālos mēdz nedaudz atšķirties, tāpēc jāatceras, ka siltumizolāciju ietekmē materiāla veids un tā biezums, kā arī tas, cik ļoti tas pieguļ augumam.

Zemāk redzamajā tabulā var uzskatāmi redzēt dažādu civila apģērba slāņu CLO vērtības [81].

4.7. tabula

Dažādu civilā apģērba slāņu aptuvenās CLO vērtības

Apģērba apraksts	$I_{clu,v}clo^b$	Apģērba apraksts	$I_{clu,v}clo^b$	Apģērba apraksts	$I_{clu,v}clo^b$
Apakšveļa		Garpiedurkņu flaneļa krekls	0.34	Garpiedurkņu (plāns)	0.25
Vīriešu bokseršorti	0.04	Īspiedurkņu trikotāžas sporta krekls	0.17	Garpiedurkņu (biezs)	0.36
Sieviešu apakšbikses	0.03	Garpiedurkņu džemperis	0.34	Kleitas un svārki	
Krūšturis	0.01	Bikses un kombinezoni		Svārki (plāni)	0.14
T-krekls	0.08	Īsie šorti	0.06	Svārki (biezi)	0.23
Apakškleita	0.16	Pastaigu šorti	0.08	Garpiedurkņu krekkleita (plāna)	0.33
Apakšsvārki	0.14	Garās bikses(plānas)	0.15	Garpiedurkņu krekkleita (bieza)	0.47
Garpiedurkņu apakškrekls	0.20	Garās bikses (biezas)	0.24	Garpiedurkņu krekkleita	0.29
Garās apakšbikses	0.15	Sporta bikses	0.28	Bezpiedurkņu kleita ar laiviņveida izgriezumu	0.23
Zeķes un apavi		Bezpiedurkņu kombinezons	0.30	Bezpiedurkņu kleita ar laiviņveida izgriezumu	0.27
Sporta zeķes līdz potītei	0.02	Garpiedurkņu kombinezons	0.49	Naktsveļa un halāti	
Īsās zeķes	0.03	Ūzvalka žaketes un vestes (oderētas)		Bezpiedurkņu īsais naktskrekls (plāns)	0.18
Pusgarās zeķes	0.06	Vienrindas (plāna)	0.36	Bezpiedurkņu garais naktskrekls (plāns)	0.20

Zeķbikses	0.02	Vienrindas (bieza)	0.44	Īspiedurkņu slimnīcas krekls	0.31
Sandales/ siksniņkurpes	0.02	Divrindu (plāna)	0.42	Garpiedurkņu garais naktskrekls (biezs)	0.46
Čības (stepētas, ar pūkainu oderi)	0.03	Divrindu (bieza)	0.48	Garā pidžama (bieza)	0.57
Zābaki	0.10	Veste (plāna)	0.10	Īsā pidžama (plāna)	0.42
Krekli un blūzes		Veste (bieza)	0.17	Garpiedurkņu garais halāts	0.69
Bezspiedurkņu blūze ar laiviņvveida izgriezumu	0.12	Džemperī		Garpiedurkņu īsais halāts	0.48
Īspiedurkņu pogājams krekls	0.19	Veste (plāna)	0.13	Īspiedurkņu īsais halāts	0.34
Garpiedurkņu pogājams krekls	0.25	Veste (bieza)	0.22		




a "Plānie" ir vasaras; "biezie"- ziemas apģērbi.






b 1 clo = 0.155 (m²*K)/W

Zemāk apskatāmi attēli ar Latvijas Republikas Nacionālo bruņoto spēku karavīriem izsniegto apģērbu vairākiem līmeņiem. Šeit nav uzskaitīti cimdi, galvassegas un apavi.

4.8. tabula

Uniformas elementi

	<p>1. līmeņa apakšveļa Sastāvdaļas: T krekls, īsās apakšbikses (bokseršorti). Galvenās auduma īpašības: * izvada un atgrūž mitrumu, * nekairina ādu, * ātri žūstošs, * aizsargā pret UV starojumu, * antibakteriāls. Paredzēta: kā apakšveļa zem pārējiem lauka formas tērpa slāņiem.</p>
	<p>2. līmeņa apakšveļa Sastāvdaļas: krekls ar garām piedurknēm, garās apakšbikses. Galvenās auduma īpašības: * izvada un atgrūž mitrumu, * nekairina ādu, * ātri žūstošs, * aizsargā pret UV starojumu, * antibakteriāls. Paredzēta: kā apakšveļa zem pārējiem lauka formas tērpa slāņiem.</p>
	<p>3. līmeņa apakšveļa Sastāvdaļas: biezs krekls (ar rāvējslēdzēju) ar garām piedurknēm, biezas garās apakšbikses. Galvenās auduma īpašības: * izvada un atgrūž mitrumu, * nekairina ādu, * ātri žūstošs, * aizsargā pret UV starojumu, * saglabā ķermeņa siltumu. Paredzēta: kā apakšveļa zem pārējiem lauka formas tērpa slāņiem.</p>

	<p>Vēsa laika kostīms Sastāvdaļas: jaka, bikses. Galvenās auduma īpašības: * saglabā ķermeņa siltumu, * laba gaisa caurlaidība, * elastīgums, * aizsargā pret UV starojumu. Paredzēts: kā atsevišķs lauka formas tērps, kopā ar citiem lauka formas tērpa slāņiem.</p>
	<p>Lauka formas tērps Sastāvdaļas: lauka formas tērpa cepure, jaka, bikses. Galvenās īpašības: * kalpo kā pamata kaujas formas tērps, * ir ar vienotu maskēšanās rakstu, * nodrošina vizuālo maskēšanos un tuvā distancē norāda uz piederību LR, * nodrošina maskēšanos NIR diapazonā, * audums ir impregnēts pret insektiem (Valkāšanai starptautiskajās operācijās Afganistānā). Paredzēts: kā atsevišķs pamata lauka formas tērps, kopā ar citiem lauka formas tērpa slāņiem.</p>
	<p>Lietus kostīms Sastāvdaļas: jaka, bikses. Galvenās īpašības: * ūdensnecaurlaidīgs audums, * laba gaisa caurlaidība, * pasargā no vēja, * ir ar vienotu maskēšanās rakstu, * nodrošina vizuālo maskēšanos un tuvā distancē norāda uz piederību LR, * nodrošina maskēšanos NIR diapazonā. Paredzēts: kā atsevišķs pamata lauka formas tērps, kopā ar citiem lauka formas tērpa slāņiem.</p>
	<p>Ziemas virsjaka Sastāvdaļas: jaka. Galvenās īpašības: * saglabā ķermeņa siltumu, * aizsargā no lietus un sniega, * aizsargā no vēja. Paredzēta: kā atsevišķs lauka formas tērpa slānis, kopā ar citiem lauka formas tērpa slāņiem.</p>
	<p>Īpaši auksta laika kostīms Sastāvdaļas: jaka, bikses. Galvenās īpašības: * saglabā ķermeņa siltumu, * aizsargā no lietus un sniega, * aizsargā no vēja. Paredzēts: kā atsevišķs lauka formas tērps, kopā ar citiem lauka formas tērpa slāņiem.</p>

Normālos apstākļos, iekštelpās strādājoša karavīra apģērbs sastāv pamatā no 1. līmeņa apakšveļas un lauka kaujas formas tērpa.



4.4. att. Iekštelpās strādājoša karavīra apģērbs

Lai novērtētu militārā personāla termisko komfortu ofisa apstākļos, jāņem vērā militārā apģērba specifika un CLO vērtības. Šim nolūkam, Latvijas Republikas Nacionālo bruņoto spēku karavīru lauka kaujas formas tērpu var pielīdzināt ASV karavīru formas tērpiem, kura aptuvenā CLO vērtība ir 1.4 [82].

Kā jau tika minēts, ne mazāk svarīgi ir pievērst vērību arī karavīriem, kuri darbojas lauka apstākļos un ir pakļauti dažādu pakāpju slodzēm un laikapstākļiem. To apģērbu siltumizolācija tieši spēj ietekmēt karavīra sniegumu uzdevuma laikā.

Neskaitot formas tērpu un līdz pat 5-6 dažādu slāņu papildus apģērbiem atkarībā no laikapstākļiem, karavīriem ir jānēsā arī bruņu vestes un to vairākas sastāvdaļas, uzkabes, ķiveres, somas dažādos izmēros atkarībā no situācijas un jāvalkā zābaki un cimdi.

Viss minētais ekipējums un papildu svars, kas ir jānes līdzī, nodrošina to, ka īsā laika posmā cilvēks sāk pārkarst un svīst pat zemā āra gaisa temperatūrā. Lielākā daļa veselības problēmu, kuras var saistīt ar apģērpu, ir saistītas ar organisma pārkaršanu vai tieši pretēji – atdzišanu.

Ieskatam par ekipējuma apjomu zemāk redzamas dažas attēli no Latvijas Republikas Nacionālo bruņoto spēku karavīra individuālās aizsardzības sistēmas dažām sastāvdaļām. Pārējo individuālo ekipējumu iespējams redzēt Aizsardzības ministrijas mājaslapā pieejamajā rokasgrāmatā.



4.5. att. Karavīra individuālās aizsardzības sistēmas elementi [83]

Vairākos materiālos ir plaši apskatītas problēmas ar vēl specifiskāku apģērbu militārajā nozarē, kas attiecas uz cilvēka pārkaršanu un darba spēju strauju krišanos. Runa ir par dažādiem ķīmiskā un bioloģiskā piesārņojuma aizsargtērpiem, respiratoriem un nesprāgušās munīcijas neitralizētāju aizsargtērpiem, kuri praktiski neelpo.

4.5. Formastērpa ietekme uz termisko komfortu

Siltuma zudumu noteikšanai, kas rodas transmisijas ceļā, ir nepieciešams zināt norobežojošo konstrukciju laukumus un siltumcaurlaidības koeficientus tiem. Sekojoši ir jāņem vērā āra gaisa temperatūra un uzstādītā iekšgaisa temperatūra. Ja āra gaisa temperatūru nav iespējams ietekmēt, tad iekštelpu temperatūru var uzstādīt atbilstoši ēkas izmantojuma veidam un cilvēku apģērba siltumizolācijas līmenim.

Galvenie mainīgie parametri, kuri ietekmē termālo komfortu, ir apkārtējās vides parametri un cilvēka individuālie parametri. Apkārtējās vides parametrus raksturo gaisa temperatūra, mitruma saturs, gaisa kustības ātrums un vidējā apkārtējo virsmu temperatūra. Cilvēka individuālie parametri ir atkarīgi no tā, fiziskās aktivitātes līmeņa un apģērba veida. Apģērba siltumizolācijai ir tieša ietekme uz vairākiem nozīmīgiem faktoriem. Kā galvenos ir vērts apskatīt – cilvēka labsajūta un ēkas energoefektivitāte. Pareizi izprotot šo faktoru saistību, tie savstarpēji ir cieši saistīti.

Pirmkārt, apģērbs ietekmē cilvēka labsajūtu jeb komfortu un līdz ar to arī produktivitāti darbā. Tādās nozarēs, kur darba specifika pieprasa valkāt speciālu apģērbu, noteikti ir jāpievērš pastiprinātu uzmanību darbinieku komforta līmenim telpās. Piemēram, reglamentam atbilstošā formā darbiniekam, vienkāršiem vārdiem runājot, ir siltāk nekā tas būtu civilā sektora ofisā, pie tādiem pašiem telpas temperatūras un relatīvā mitruma parametriem un ikdienišķu apģērbu. Tas ir izskaidrojams ar lielāku apģērba siltumizolāciju. **Ja darbiniekam nepārtraukti ir paaugstināta karstuma sajūta, ir grūtāk koncentrēties darbam un kvalitatīvi veikt savus pienākumus.**

Mūsdienās plaši pierādīts ir tas, ka komfortablos apstākļos darbinieka produktivitāte ir daudz augstāka. No citas puses skatoties, šādās ēkās, kur darbiniekiem ir pienākums valkāt formas tērpus ar augstāku siltumizolācijas līmeni, iespējams, **nav nepieciešams uzturēt standarta gaisa temperatūru.** Darbinieku komforta līmenis var saglabāties optimāls arī pie 2-3 grādiem zemākas telpu gaisa temperatūras, tādējādi ietaupot līdzekļus uz siltumenerģijas rēķina. Teorētiski šādi tiek iegūti divi pozitīvi efekti vienā piegājienā – uzlabotas darbinieku darba spējas un produktivitātē kā arī ietaupīti līdzekļi par apkuri.

Pretejs efekts varētu rasties, ja ēkas ir aprīkotas ar gaisa kondicionēšanas iekārtām un vasaras apstākļos telpas būtu nepieciešams papildus dzesēt. Ja iepriekš minētais vairāk ir attiecināms uz štābu darbiniekiem, kuriem ikdiena lielākoties ir jāpavada iekštelpās. tad ne mazāk svarīgi ir pievērst uzmanību arī karavīru apģērba komplektācijai, ar kuru tie dodas uzdevumos un ilgstošu laiku pavada apvidū ar mainīgām fiziskām slodzēm. Arī šajā gadījumā apģērba siltumizolācija tieši ietekmē cilvēka darba spējas un sniegumu.

Apģērba siltumizolācija tiek izteikta ar “CLO” mērvienību, kas vēsturiski tika noteikta pagājušā gadsimta četrdesmitajos gados. Šo eksperimentu pirmsākumos izmantojot uzkarsetu kapara manekenu, lai fiksētu siltuma pretestību apģērbos. Siltumpārnese ar konvekciju un radiāciju notika starp simulēto ādu un apģērba slāni [84]. Bez daudziem pētniekiem Kanādā, Lielbritānijā un citās valstīs, lielu ieguldījumu teorijas attīstībā deva Amerikas Savienoto Valstu armijas zinātnieki un laboratorijas 20. gadsimta četrdesmitajos un piecdesmitajos gados, kuru rezultātus un secinājumus ir apkopojis L. H. Ņūburgs.

1 clo tika pieņemts kā ekvivalents 1940. gadu tipiskam biznesa uzvalkam, kurš ierobežo siltumpārnesi līdz 6.45 vatiem uz viena kvadrātmetra virsmas viena Celsija grāda starpībai [85]. Izsakot to citā formā, sanāk sekojoši – $1\text{ clo} = 0.155 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ [86].

Pieņemts, ka cilvēku aktivitātes līmeni izsaka ar īpašu mērvienību – MET (Metabolic Equivalent of Task). Šo mērvienību izmanto, lai aprakstītu cilvēka ķermenī metabolisma ceļā radīto enerģiju. Viens MET vienāds ar $58,2 \text{ W/m}^2$. *Vidējā cilvēka ķermeņa laukums sastāda $1,8\text{ m}^2$.* Guļoša cilvēka metabolisma aktivitātes līmenis sastāda ap 0,7 MET, viegla darba laikā – no 1,1 līdz 2,2 MET, bet smaga fiziskā darba laikā – līdz 6 MET. Precīzāku informāciju par cilvēka siltuma izdalījumiem var atrast literatūras avotos par komforta parametriem telpās, piemēram, Eiropas un ASHRAE standartos.

Visbiežāk komforta temperatūra tiek saistīta ar zonu no 15 līdz 28 grādiem pēc Celsija. Tomēr cilvēka ķermenim šī zona ir daudz šaurāka. Šī zona sākas no brīža, kad ķermenis spēj savu temperatūru regulēt bez drebuļiem vai nepatīkami vēsiem pirkstgaliem, kas ir rezultāts zema siltumpārnesi ar asinsriti no ķermeņa kodola uz ekstremitātēm, līdz brīdim, kad cilvēka

ķermenis sāk svīst, lai sevi dzesētu. Katram indivīdam, protams, šīs zonas ir nedaudz atšķirīgas dažādu apstākļu dēļ.

ASHRAE nosaka, ka telpā, kurā atrodas cilvēki ar parastu, ofisam raksturīgu apģērbu (garo roku krekls un bikses, kuram pieņemtā siltumizolācija ir 0.6 clo) ir jānodrošina

- | | |
|--|--|
| (1) Klasiskā ASHRAE komforta skala | (4) Gaisa temperatūra (T_{db}) pie relatīvā mitruma 50% ar gaisa plūsmu = 0.14 m/s valkājot standarta garpiedurkņu kreklu vai garās bikses (1.4 clo kopā). |
| (2) Fangera modifikācija | (5) Vidējā svērtā ādas temperatūra |
| (3) Rolsa (<i>Rohles</i>) modifikācija | (6) Sasvīdušās ādas laukums = Ādas relatīvais mitrums = E_{req}/E_{max} |

temperatūra starp 22.2 °C un 25.5 °C. Šie dati parāda, ka cilvēka komforta zona optimālai ķermeņa termoregulācijai ir tikai ~3.3 °C robežās. Ārpus šīs zonas cilvēka termālais komforts tiek nodrošināts uzvelkot papildus drēbes vai tā novelkot. Jebkura siltumizolācijas izmaiņšana par 0.18 clo kompensē 1 °C gaisa temperatūras izmaiņās.

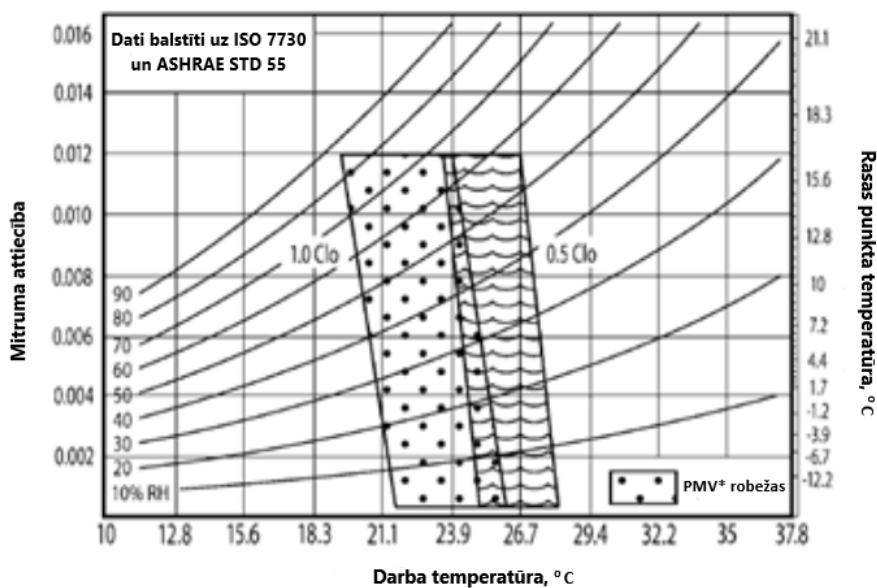
Pie 15°C gaisa temperatūras indivīdam vajadzētu būt apģērbtam ar drēbēm, kuru kopējā siltumizolācija ir aptuveni 1.9 clo līmenī, lai justos komfortabli. Savukārt pie 28°C gaisa temperatūras kopējā apģērba siltumizolācija ir aptuveni 0.15 clo, kas varētu būt plāns krekls un šorti [51].

Zemāk redzamajā 4.9. tabulā ir pieejama informācija par komforta līmeņiem un to salīdzinājumiem dažādos griezumos. Pirmajā kolonnā ir attēlota ASHRAE sadalījums komforta līmeņos no 1 (zemākā temperatūra) līdz 7 (augstākā temperatūra). Otrajā kolonnā attēlota Fangera modifikācija, bet trešajā – aprakstītas temperatūras sajūtas no “ļoti auksti” līdz “ļoti karsti”. Pretī šiem sajūtu aprakstiem ir redzamas aptuveni pieņemtās gaisa temperatūras un arī ādas temperatūra.

4.9. tabula

Komforta novērtējums un tam atbilstošās temperatūras sajūtas

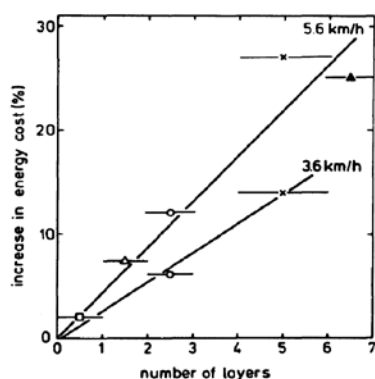
BALSU SKAITS		TEMPERATŪRAS SAJŪTA	$ET^{*(4)}$	KOMFORTA SAJŪTA	$\bar{T}_s^{(5)}$	% $A_{sw}^{(6)}$
(1)	(2)	(3)				
		1 Ļoti auksti	10 °C	Nekomfortabli	30 °C	
1	-3	2 Auksti	15 °C		30,5 °C	
2	-2	3 Vēsi	20 °C	Mazliet nekomfortabli	32 °C	
3	-1	4 Mazliet vēsi	25 °C	Komfortabli	32,5 °C	
4	0	5 Neitrāli	30 °C	Mazliet nekomfortabli	34 °C	6
5	+1	6 Mazliet silti	35 °C	Ļoti nekomfortabli	35 °C	
6	+2	7 Silti			-	20
7	+3	8 Karsti	40 °C		-	40
						60
		9 Ļoti karsti	45 °C		-	80
				Ierobežots	$(T_{core} - \bar{T}_s)$	100



4.6. att. ASHRAE noteiktās vasaras un ziemas komforta zonas [81].

Tipiskā laboratorijas testā ar mērījumu palīdzību tiek noteikta enerģiju starpība salīdzinot pētāmo apģērba kārtu ar stāvokli, kurā cilvēks būtu ģērbies tikai veļā. Enerģijas apjoms ir atkarīgs no tādiem apstākļiem kā apģērba specifika, tā svara, slāņu skaita un indivīda kustību īpatnībām. Apģērba svaram ir praktiski lineāra sakarība ar enerģijas patēriņu – jo smagāks apģērbs, jo vairāk enerģijas cilvēks patērēs un arī izdalīs [88].

Apģērba slāņu skaitam ir liela ietekme uz enerģijas patēriņu. Teitelbaums un Goldmans savā darbā salīdzināja 1-2 slāņu apģērbu ar 6-7 slāņu apģērbu, kur abos gadījumos kopējā apģērba svars bija vienāds. Metabolisms eksperimentā ar 6-7 slāņu apģērbu bija par 18% augstāks pie 5.6km/h liela soļošanas ātruma un par 14% augstāks pie forsētas iešanas ar 8km/h lielu ātrumu nekā 1-2 slāņu apģērbam [89]. Citā eksperimenta rezultātā tika iegūti salīdzināmi dati ar 0-1, 2-3, 4-6 slāņu apģērbiem, kur pēdējos divos metabolisms paaugstinājās attiecīgi par 8% un 21% pie dažādiem soļošanas ātrumiem no 3.6 līdz 6 km/h [90]. Abu eksperimentu rezultāti parāda to, ka apģērba slāņu daudzumam ir tieši proporcionāla sakarība ar enerģijas patēriņu. Ar katru papildus apģērba slāni metabolisms pieaug par 4% pie forsētas soļošanas un par 3% pie mierīga tempa. Šo sakarību var aplūkot zemāk redzamajā diagrammā.



4.7. att. Cilvēka saražotas enerģijas pieaugums atkarība no apģērbju slāņu daudzuma un darba intensitātes

Viegls darbs		Vidēji smags darbs		Smags darbs		Darba/atpūtas laiks un šķidruma atjaunošanas tilpums nodrošina darbaspējas un hidratāciju uz vismaz 4 darba stundām norādītajā karstuma kategorijā. Vajadzība pēc šķidruma var mainīties atkarībā no ķermeņa vajadzībām (+- ¼ litri/h) un darba saulē vai ēnā (+- ¼ litri/h).		
Ieroču apkope; Iešana pa cietu virsmu ar ātrumu 4 km/h, slodze <13,6 kg; Sausšanas treniņš; Ierindas mācība un parāde; Ieroču mācība		Iešana pa smiltīm ar ātrumu 4 km/h bez slodzes; Iešana pa cietu virsmu ar ātrumu 5,6 km/h, slodze <18 kg; Kalistētika; Patruļošana; Individuālās pārvietošanās tehnika (piem., rāpošana vai līšana); Aizsardzības pozīciju ierīkošana		Iešana pa cietu virsmu ar ātrumu 5,6 km/h, slodze >= 18 kg; Iešana pa smiltīm ar ātrumu 4 km/h ar slodzi; Lauka triecienuzbrukums		Darba/atpūtas laiks vienā stundā nav ierobežots		
Karstuma kategorija	WBGT indekss, °C	Viegls darbs		Vidēji smags darbs		Smags darbs		NL = darba laiks vienā stundā nav ierobežots
		Darbs/atpūta (minūtes)	Izdzertā ūdens daudzums (litri/h)	Darbs/atpūta (minūtes)	Izdzertā ūdens daudzums (litri/h)	Darbs/atpūta (minūtes)	Izdzertā ūdens daudzums (litri/h)	
1	25,5-27,7	NL	¼	NL	¾	40/20	1	Atpūta = Minimāla fiziskā aktivitāte - stāvēšana vai sēdēšana, ja iespējams – ēnā.
2 (ZAĻŠ)	27,8-29,4	NL	¾	50/10	¾	30/30	1	UZMANĪBU: Uzņemtais šķidruma daudzums stundā nedrīkst pārsniegt 1,4 litrus.
3(DZELTENS)	29,5-31	NL	¾	40/20	¾	30/30	1	Uzņemtais šķidruma daudzums dienā nedrīkst pārsniegt 11,4 litrus.
4(SARKANS)	31,1-32,2	NL	¾	30/30	¾	20/40	1	Ja tiek veikts viegls darbs un valkāts NBC (MOPP 4) apģērbs, WBGT indeksam jāpievieno 2,8 °C.
5(MELNS)	>32,2	50/10	1	20/40	1	10/50	1	Ja tiek veikts vidēji smags vai smags darbs un valkāts NBC (MOPP 4) apģērbs, WBGT indeksam jāpievieno 11,2 °C.

4.8. att. Karavīru darba intensitātes veidi un nepieciešamais atpūtas laiks un dzerama ūdens daudzums

WBGT (wet bulb, globe temperature index) ir mitrā termometra izstarojuma temperatūras indekss. Wet bulb globe temperature ir kopējā temperatūra, ko izmanto, lai novērtētu temperatūras, mitruma, vēja ātruma un redzamu un infrasarkanā starojuma ietekmi uz cilvēkiem.

4.6. Iekštelpu gaisa kvalitātes pētījums

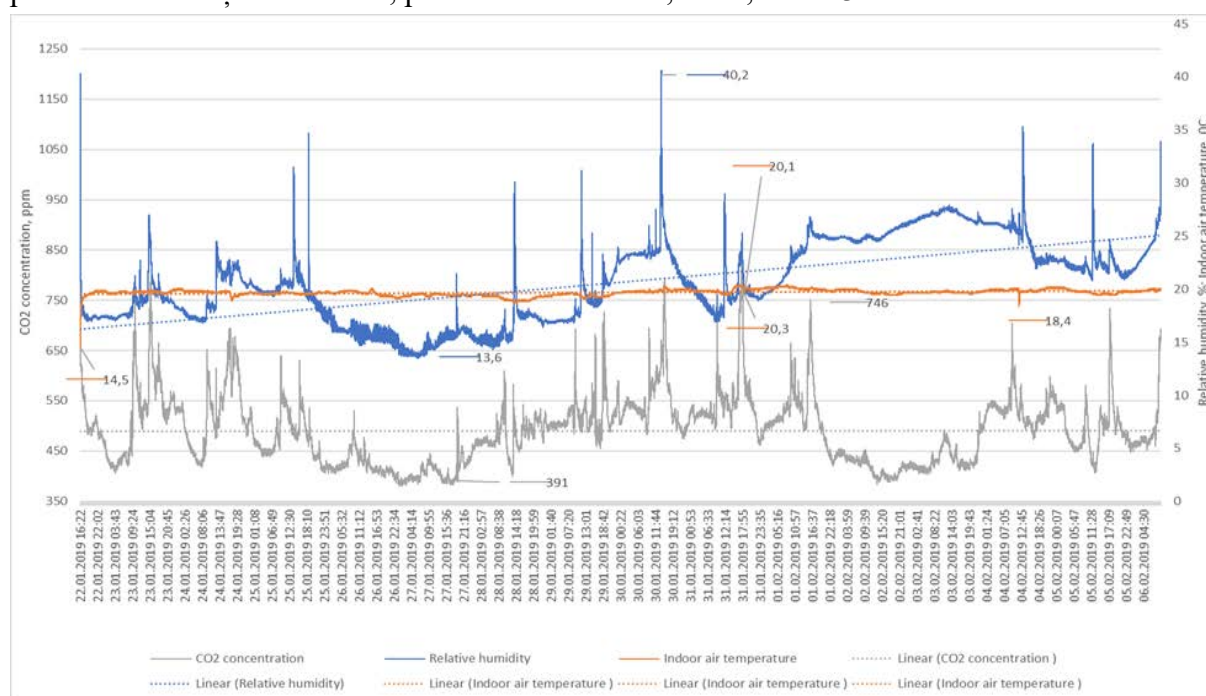
Lai uzraudzītu dažādu parametru, šajā gadījumā - gaisa temperatūras, relatīvā mitruma un CO₂ koncentrācijas, izmaiņas diennaktī, tika veiktas vairākas mērījumu sērijas.

No speciālās nozīmes centra kazarmām tika izvēlētas divas ēkas, ēka Nr.6 un ēka Nr.9 (skatīt attēlu 1.7.). Ēkā Nr.9 tika uzceltā Latvijas Republikas pirmās brīvvalsts laika periodā. Virszemes stāvu skaits ir 3, pazemes stāvu skaits -1. Ēkas kopēja platība – 2388m², būvtilpums -11530m³. Ēkā nav mehāniskās pieplūdes-nosūces ventilācijas.

Ēka Nr. 6 tika uzceltā 1910.g. Virszemes stāvu skaits ir 3, pazemes stāvu skaits -1. Ēkas kopēja platība – 2387m², būvtilpums -11990m³. Ēkas daļējas renovācijas veikšanas laikā tika nosiltinātas ēkas norobežojošās konstrukcijas, tika uzmontēta mehāniskā pieplūdes-nosūces ventilācijas sistēma. Apkure vienai un otrai ēkai ir nodrošināta, pieslēdzot ēku siltumzglus centralizētajai rajona siltumapgādes sistēmai. Ēkā Nr. 9 mērījumi tika veikti divās dažādās telpās, no kurām viena ir sardzes telpa, bet otra - sanāksmju telpa trešajā stāvā. Ēkā Nr. 6 mērījumi tika veikti trīs dažādās telpās: mācību centrā otrajā stāvā, bet trešajā stāvā - guļamtelpā un kopīgajā birojā. Pārbaudes notika janvārī, februārī un martā.

Rezultāti, kas parāda sardzes telpas un sanāksmju telpas iekšējās vides parametru izmaiņas diennaktī, apskatāmi attēlos 4.9. un 4.10.

Mērījumu rezultāti, kas attēlo mācību centra, guļamtelpas un koplietošanas telpas vides parametru izmaiņas diennaktī, parādīti attēlos 4.11., 4.12., un 4.13.



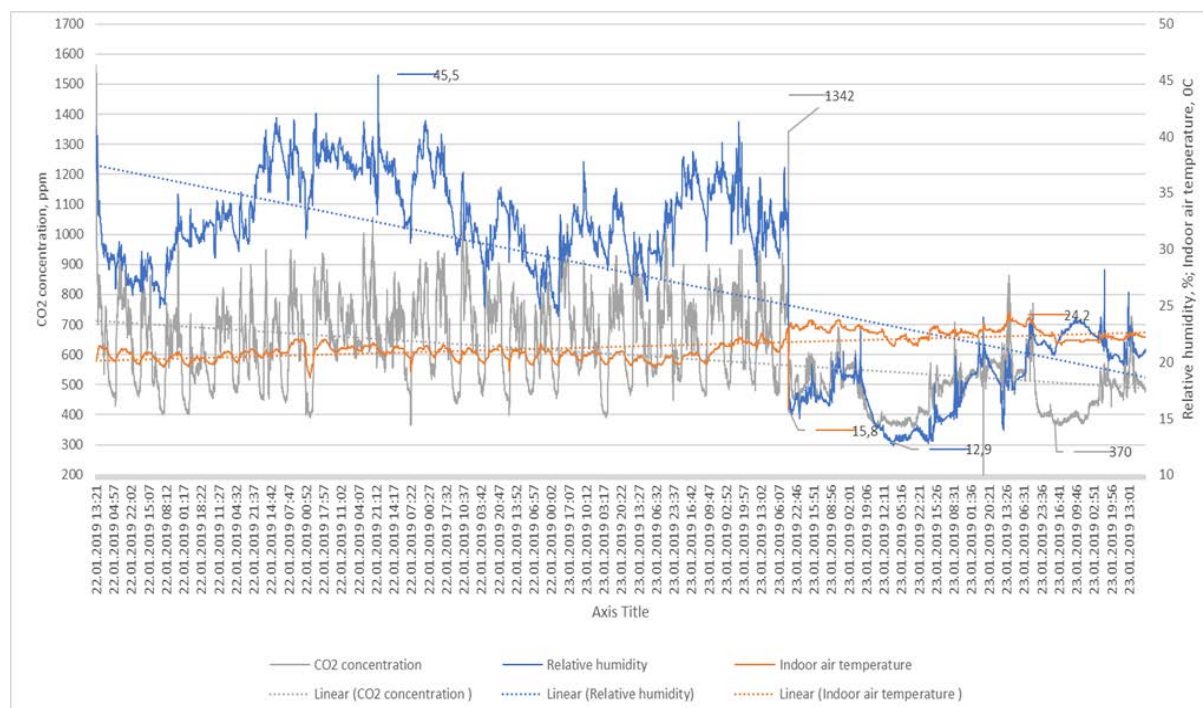
4.9. att. Mitruma, gaisa temperatūras un oglekškābās gāzes koncentrācijas (IAQ) parametri sardzes telpā.

Diagrammas (4.9. att.) analīze parāda, ka gaisa temperatūra telpās svārstās no 14.5°C līdz 20.3°C, ar vidējo temperatūru 19.7 °C. Var secināt, ka gaisa temperatūra telpās ir nedaudz zemāka par ieteikto temperatūras diapazonu cilvēka siltuma komfortam, kas noteikts Latvijas būvnormatīvos un nozares ieteikumos, piemēram, ASHRAE. Modelis, kas raksturotu iekštelpu gaisa temperatūras izmaiņas, nav skaidri izšķirams, taču redzams, ka iekštelpu gaisa temperatūra visu dienu paliek gandrīz nemainīga.

Relatīvais mitrums svārstās no 13.6 % līdz 40.2 % ar vidējo vērtību 20.6 %, kas ir zemāka par ieteiktajām cilvēka komforta vērtībām. Jāatzīmē, ka relatīvais mitrums parasti ir diapazonā no 15 līdz 27 procentiem, ar neregulāru gaisa mitruma paaugstināšanos līdz 40%. Relatīvā mitruma maksimums ir dienas vidusdaļas otrajā pusē (sk. attēlu 4.9.).

Konstatēts, ka vidējā ogļskābās gāzes koncentrācija ir 490 ppm, kas ir zemāka par nozares standartos noteikto robežu 1000–1200 ppm. CO₂ koncentrācija dienas otrajā pusē sasniedz maksimumu - aptuveni 700–800 ppm.

Rezultāti par iekštelpu vides parametru izmaiņām trešā stāva sanāksmju telpā ir redzami attēlā 4.10.



4.10. att. Mitruma, gaisa temperatūras un ogļskābās gāzes koncentrācijas (IAQ) parametri trešā stāva sanāksmju telpā

4.10. att. redzamās diagrammas analīze parāda, ka gaisa temperatūra telpās svārstās no 15.8 °C līdz 24.2 °C, ar vidējo temperatūru 21.4 °C, kas ir zemāka par ieteikto diapazonu no 19 °C līdz 22 °C, kas nepieciešams cilvēka termiskajam komfortam. Interesanti, ka gaisa temperatūra telpās visu dienu paliek gandrīz nemainīga.

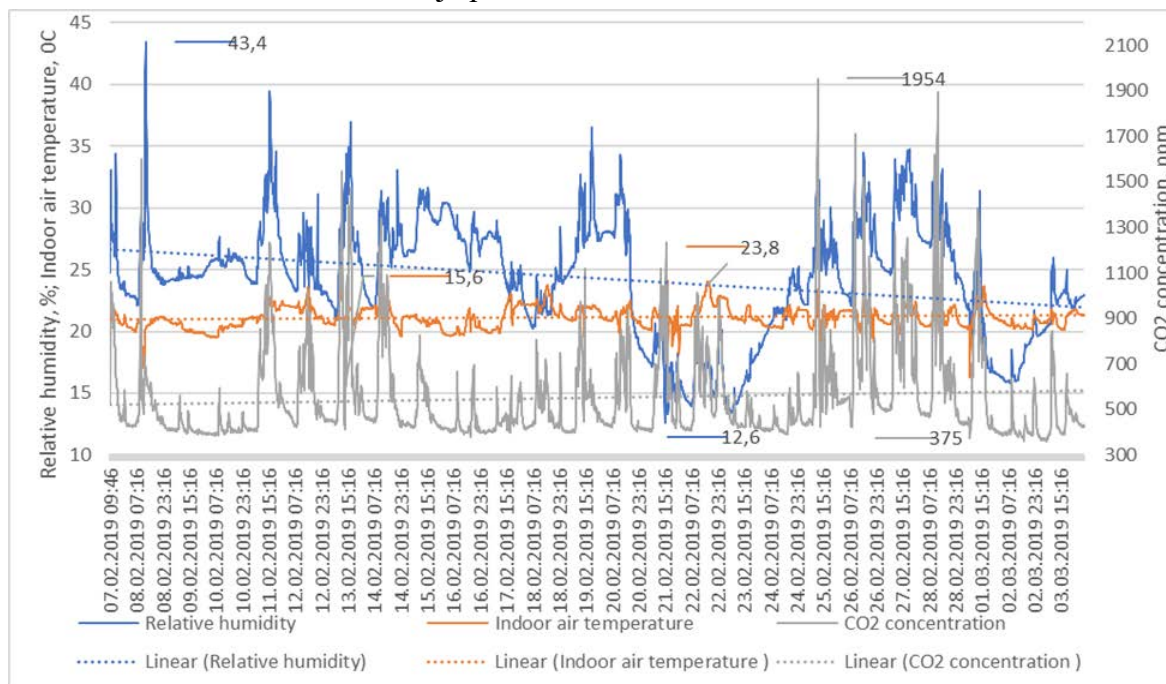
Relatīvais mitrums svārstās no 12.9% līdz 45.5% ar vidējo vērtību 28%, kas ir zemāka par cilvēka komfortam ieteicamajām vērtībām. Līdzīgi apstākļiem apsardzes telpā, relatīvā mitruma maksimums ir dienas vidusdaļas otrajā pusē.

Vidējā ogļskābās gāzes CO₂ koncentrācija izrādījās 600 ppm, kas ir zem robežas, kas noteikta nozares standartos. CO₂ koncentrācija svārstās no 370 līdz 1342 ppm laikā ar maksimumu dienas otrajā pusē.

4.11. att. redzamās diagrammas analīze parāda, ka gaisa temperatūra telpās svārstās no 15.6 °C līdz 23.8 °C ar vidējo vērtību 20.4 °C, kas ir zemāka par ieteikto diapazonu no 19 °C līdz 22 °C, kas nepieciešams cilvēka termiskajam komfortam. Atkal interesants ir fakts, ka gaisa temperatūra telpās visu dienu paliek gandrīz nemainīga.

Relatīvais mitrums svārstās no 12.6% līdz 43.4% ar vidējo vērtību 27%, kas ir zemāka par cilvēka komfortam ieteicamajām vērtībām. Līdzīgi apstākļiem apsardzes telpā, relatīvais mitrums sasniedz maksimumu dienas vidusdaļas otrajā pusē.

Vidējā ogļskābās gāzes CO₂ koncentrācija bija 600 ppm, kas ir zem robežas, kas noteikta nozares standartos. CO₂ koncentrācija svārstās no 375 līdz 1954 ppm diennakts laikā, sasniedzot maksimumu dienas otrajā pusē.

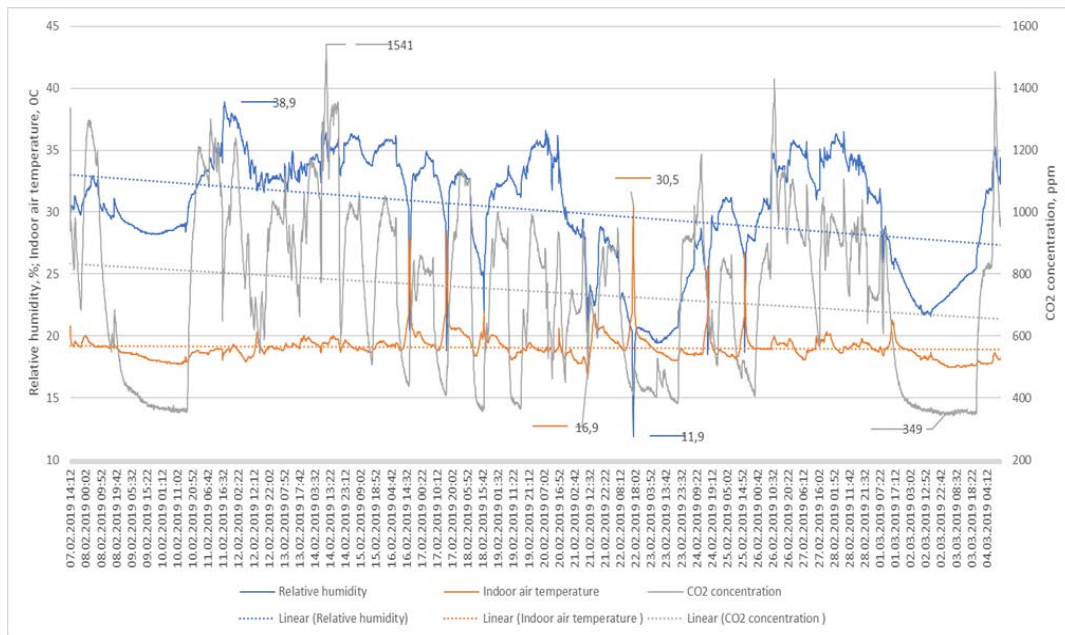


4.11. att. Mitruma, gaisa temperatūras un ogļskābās gāzes koncentrācijas (IAQ) parametri otrā stāva mācību centrā.

Rezultāti par iekštelpu vides parametru izmaiņām trešā stāva guļamtelpā ir redzami attēlā 4.12. Diagrammas analīze rāda, ka gaisa temperatūra telpās svārstās no 16.9 °C līdz 30.5 °C ar vidējo vērtību 19.0 °C. Var secināt, ka gaisa temperatūra telpās ir nedaudz zemāka par ieteikto temperatūras diapazonu cilvēka siltuma komfortam, kas noteikts Latvijas būvnormatīvos un nozares ieteikumos, piemēram, ASHRAE. Iekštelpu gaisa temperatūras izmaiņu modelis arī šajā gadījumā nav skaidri atšķirams, tomēr iekštelpu gaisa temperatūra visu dienu paliek gandrīz nemainīga.

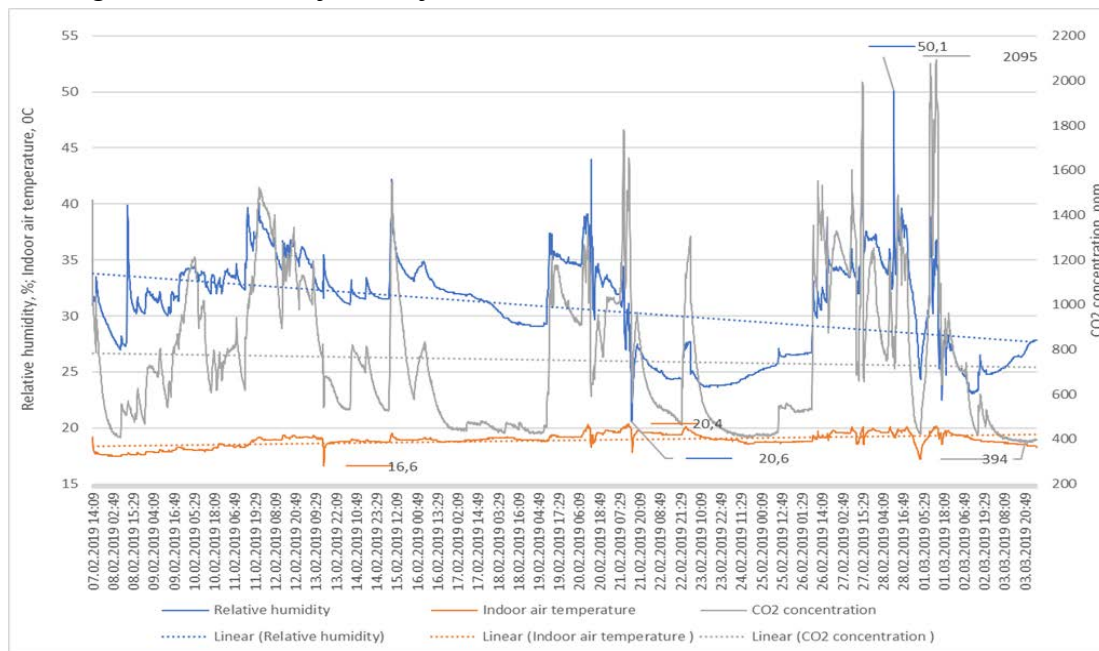
Relatīvais mitrums svārstās no 11.9% līdz 38.9% ar vidējo vērtību 30.2% un neregulāriem maksimumiem līdz 35%, kas ir zemāks par ieteiktajām cilvēka komforta vērtībām. Relatīvā mitruma maksimumi - pirmajā dienas daļā.

Vidējā ogļskābās gāzes CO₂ koncentrācija izrādījās 743.4 ppm, kas ir zemāka par nozares standartos noteikto robežu 1000–1200 ppm. CO₂ koncentrācija dienas otrajā pusē sasniedz maksimumu ap 1300 - 1500 ppm.



4.12. att. Mitruma, gaisa temperatūras un ogļskābās gāzes koncentrācijas (IAQ) parametri trešā stāva guļamtelpās

Trešā stāva koplietošanas birojā veikto iekštelpu gaisa temperatūras, relatīvā mitruma un ogļskābās gāzes koncentrācijas mērījumu rezultāti ir redzami attēlā 4.13.



4.13. att. Mitruma, gaisa temperatūras un ogļskābās gāzes koncentrācijas (IAQ) parametri trešā stāva koplietošanas biroja telpās

Tika konstatēts, ka vidējā ogļskābās gāzes CO₂ koncentrācija ir 753.4 ppm, kas ir zemāka par nozares standartiem noteikto robežu 1000–1200 ppm. CO₂ koncentrācija dienas otrajā pusē sasniedz maksimumu ap 1800 - 2095 ppm.

Gaisa temperatūra telpās svārstās no 16.6°C līdz 20.4°C ar vidējo temperatūru 18.9 °C, kas ir zemāka par ieteikto diapazonu no 19°C līdz 22°C, kas nepieciešama cilvēka termiskajam

komfortam. Arī koplietošanas biroja telpās gaisa temperatūra telpās visu dienu paliek gandrīz nemainīga.

Relatīvais mitrums svārstās no 20.6% līdz 50.1% ar vidējo vērtību 30,7%, kas ir zemāks par cilvēka komfortam ieteicamajām vērtībām.

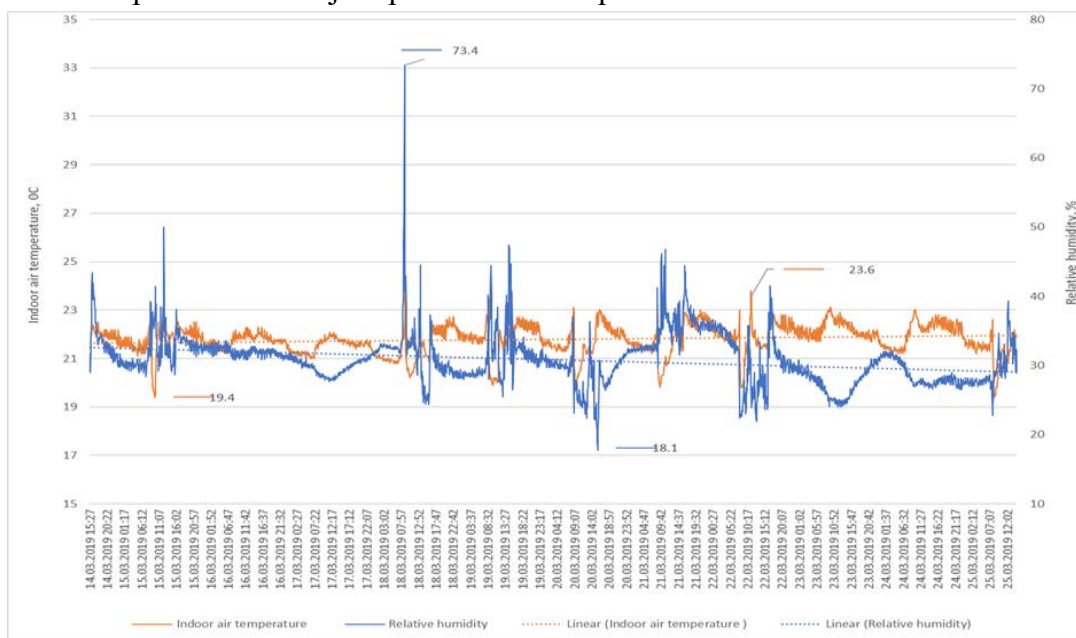
Iekštelpu temperatūras, relatīvā mitruma un gaisa kvalitātes mērījumi tika veikti pētījuma ietvaros speciālās nozīmes centra ēdnīcas ēkā, kur uzstādīti universāli sensori gaisa parametru mērīšanai - temperatūras, mitruma sensori un oglekļa dioksīda koncentrācijas sensori.

Ēdnīcas ēka tika nodota ekspluatācijā 1960. gadā. Tā ir divstāvu ķieģeļu būve ar dzelzsbetona pārsegumiem. Būvtilpums 5274 m³. Ēka tika daļēji renovēta – tika nomainīti logi, ēkas fasāde siltināta ar akmens vati un apšūta ar skārdu, uzstādīta mehāniskā pieplūdes-nosūces ventilācija. Ēka tiek ekspluatēta 5/12 režīmā. Apkure ēkai ir nodrošināta, pieslēdzot ēkas siltumapgādes centralizētajai rajona siltumapgādes sistēmai.

Gaisa parametru mērierīces tika uzstādītas ēkas pirmajā stāvā karsto ēdienu gatavošanas telpā, pusdienu zālē, kā arī sadales zonā. Mērījumi tika veikti 2019. gada martā.

Karsto ēdienu gatavošanas telpas mitruma un gaisa temperatūras izmērītie diennakts parametri ir redzami grafikā (4.14. att.), IAQ parametri, t.sk., oglekļa dioksīda koncentrācijas parametri pusdienu zālē un pirmā stāva sadales zonā ir attēloti grafikā (Attēls 4.15. un Attēls 4.16).

Grafikā (4.14. att.), redzams, ka temperatūras rādītāji svārstās robežā no 19.4°C līdz 23.6°C. Vidējie dienas un nakts temperatūras rādītāji ir 21.79°C. Izmērīto vidējo vērtību diapazonā temperatūras rādītāji telpā var tikt atzīti par normu.



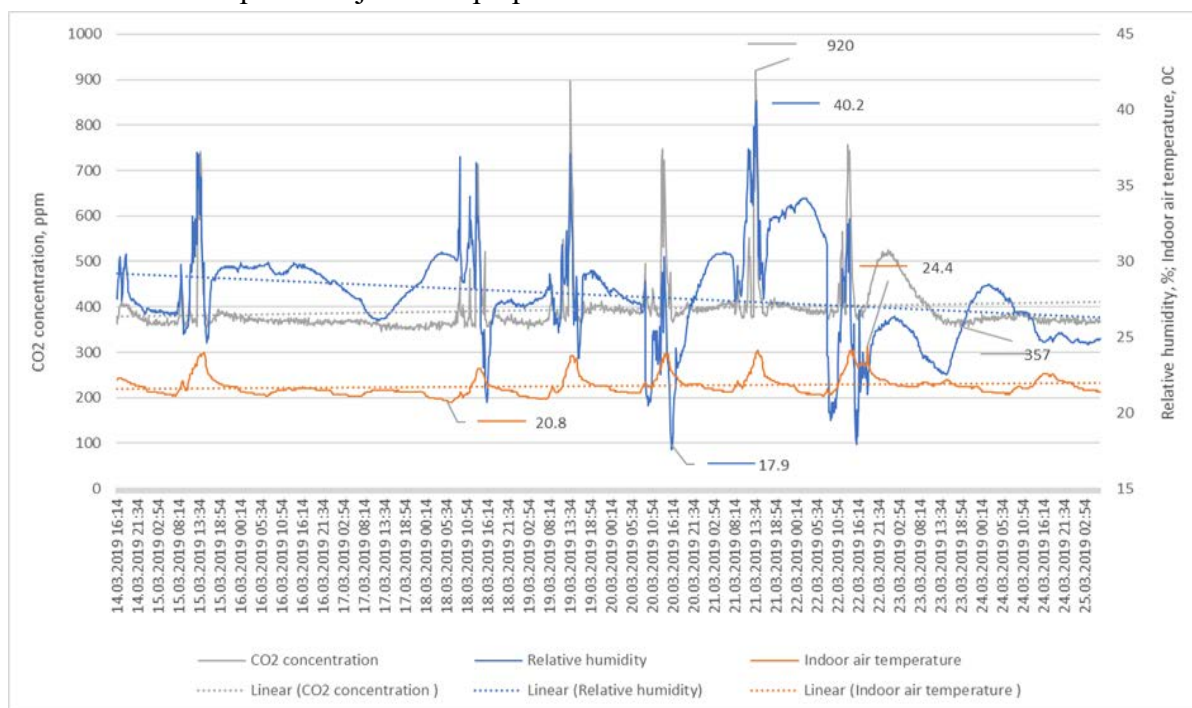
4.14. att. Karsto ēdienu gatavošanas telpa

Relatīvā mitruma rādītāji karsto ēdienu gatavošanas telpā svārstās robežā no 18.1% līdz 73.4%, ar vidējo vērtību 30.8%, kas ir zemāk par ieteicamajām komforta vērtībām. Jāatzīmē, ka relatīvais mitrums parasti ir diapazonā no 20% līdz 35%, ar periodisku palielinājumu līdz 45%. Kā redzams grafikā (4.14. att.) relatīvā mitruma rādītāju palielinājums ir novērojams

pusdienlaikā, kad notiek intensīva karsto ēdienu gatavošana un izdala lielum apmeklētāju skaitam.

Ogļskābās gāzes koncentrācijas parametru mērījumi karsto ēdienu gatavošanas telpā netika veikti.

Grafika (4.15. att.) analīze rāda, ka vidējā ogļskābās gāzes koncentrācija pusdienu zālē ir 394.7 ppm, kas ir pieņemams rādītājs. Mērītie ogļskābās gāzes koncentrācijas dati ir robežā no 357 ppm līdz 920 ppm. Relatīvā mitruma rādītāju palielināšanās tiek novērota pusdienlaikā un ir saistīta ar lielu apmeklētāju skaita pieplūdumu.

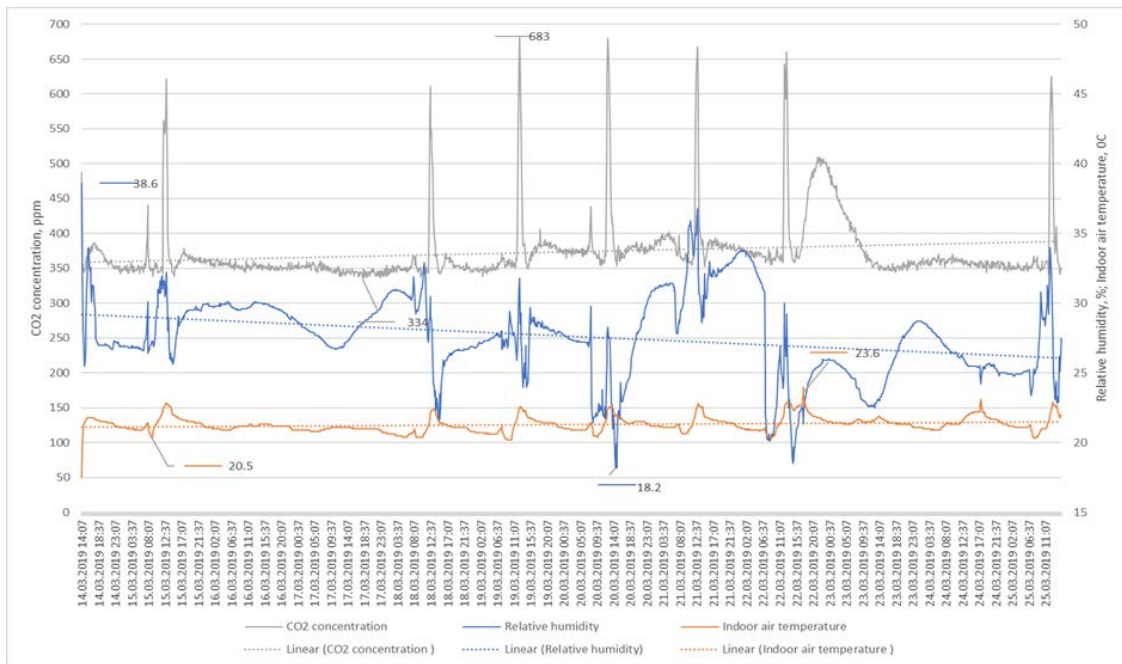


4.15. att. Pusdienu zāle

Mērītie diennakts vidējie temperatūras rādītāji atrodas ieteicamo normatīvo vērtību robežā un ir 21.7°C. Kopumā temperatūras rādītāji svārstās robežā no 20.8°C līdz 24.4°C. Straujš temperatūras paaugstinājums pusdienu telpā, tāpat kā ogļskābās gāzes saturs, skaidrojams ar liela apmeklētāju skaita atrašanos laikā no plkst.12:00 līdz 14:00.

Relatīvais mitrums svārstās robežā no 17.9% līdz 40.2% ar vidējo vērtību 27.7%, kas ir zemāks par cilvēka komfortam ieteicamajām vērtībām. Relatīvā mitruma rādītāju palielinājums ir novērojams pusdienlaikā.

Iegūtie dati sadales zonā attēloti grafikā (4.16. att.).



4.16. att. Sadale

Kā redzams grafikā (4.16. att.), maksimālās iegūtās ogļskābās gāzes koncentrācijas vērtības, maksimālās gaisa relatīvā mitruma un temperatūras vērtības sadales zonā, tāpat kā iepriekšējās divās ēdnīcas zonās tiek novērotas pusdienlaikā, bet iegūtās vērtības ir mazākas, salīdzinot ar pusdienu zālē iegūtajām. Tas ir skaidrojams ar telpas esošo plānojumu, kas ierobežo liela apmeklētāju skaita vienlaicīgu atrašanos sadales zonā, kā arī ar to, ka sadales un karsto ēdienu gatavošanas telpa ir savstarpēji savienotas.

Relatīvā mitruma rādītāji sadales zonā svārstās robežā no 18.2% līdz 38.6%, ar vidējo vērtību 27.6%, kas ir zemāki par cilvēka komfortam ieteicamajām vērtībām. Temperatūras rādītāji atrodas robežā no 20.8°C līdz 24.4°C, bet vidējā vērtība ir 21.3°C. Izmērīto vidējo vērtību diapazonā, sadales zonas temperatūras rādītāji var tikt atzīti par normu. Vidējā ogļskābās gāzes koncentrācija ir 373.5 ppm, kas ir pieņemami rādītāji. Izmērītie ogļskābās gāzes koncentrācijas dati atrodas robežā no 334 ppm līdz 683 ppm.

Veiktā pētījuma, kā arī papildus veiktās anketēšanas ietvaros, vienā no speciālās nozīmes centra administratīvajām ēkām tika uzstādīti universāli sensori gaisa parametru mērīšanai - temperatūras, mitruma sensori un ogļskābās gāzes koncentrācijas sensori.

No speciālās nozīmes centra administratīvajām ēkām tika izvēlēta 1977. gadā būvēta divstāvu ēka ar būvtilpumu 3666m³. Iepriekš ēka netika renovēta. Ēka tiek ekspluatēta 7/24. Ēkā nav mehāniskās pieplūdes-nosūces ventilācijas. Apkure ēkai ir nodrošināta, pieslēdzot ēkas siltumzglu centralizētajai rajona siltumapgādes sistēmai. Gaisa parametru mērierīces tika uzstādītas ēkas pirmajā un otrajā stāvā, darba zonās un atpūtas zonā. Mērījumi tika veikti no 2018.gada decembra līdz 2019.gada februārim (ieskaitot).

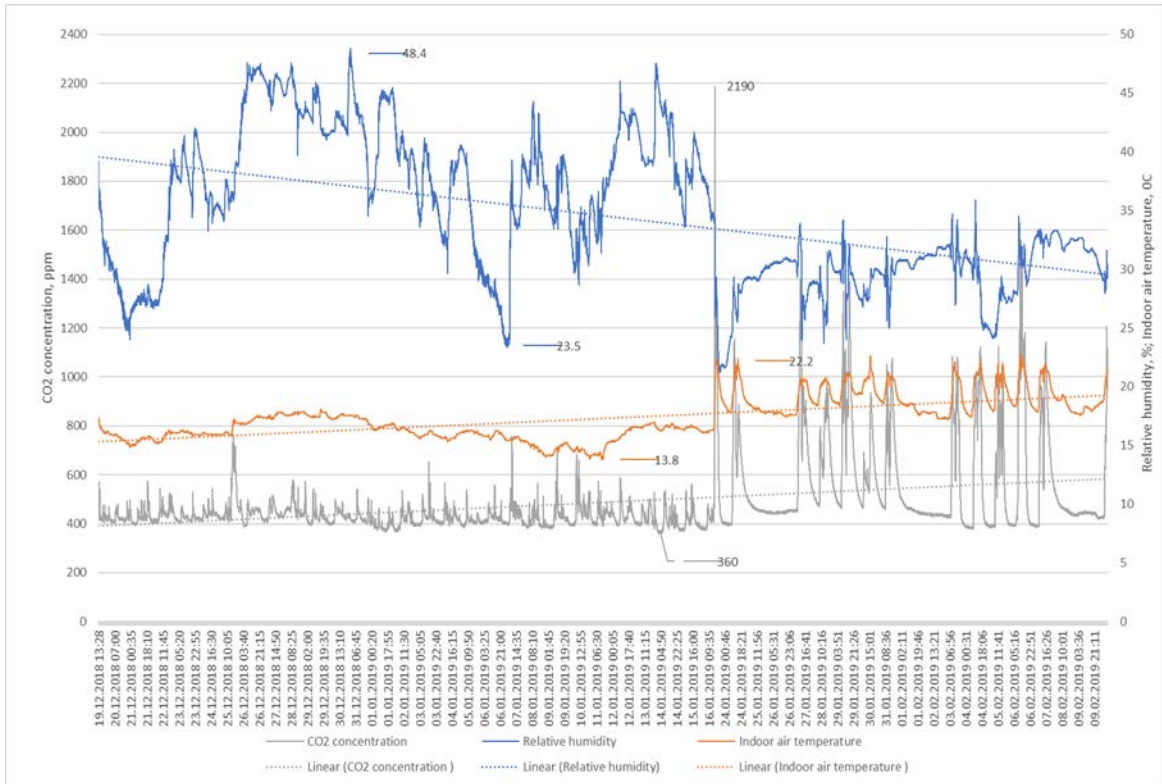
Pirmā stāva darba zonu mitruma, gaisa temperatūras un ogļskābās gāzes koncentrācijas izmērītie diennakts parametri ir redzami attēla 4.17., savukārt otrā stāva atpūtas zonas IAQ parametri redzami 4.17. att.

Attelā 4.17. ir redzams, ka ziemas laikā ogļskābās gāzes koncentrācija ēkās svārstās no 360 ppm līdz 2190 ppm, savukārt vidējā vērtība ir 487 ppm. Izmērīto vidējo vērtību diapazonā ogļskābās gāzes koncentrācija telpā var tikt atzīta par normu. Ogļskābās gāzes koncentrācijas maksimālās vērtības tiek skaidrotas ar sistemātisku, īslaicīgu administrācijas darbinieku skaita palielināšanos pētāmajā telpā.

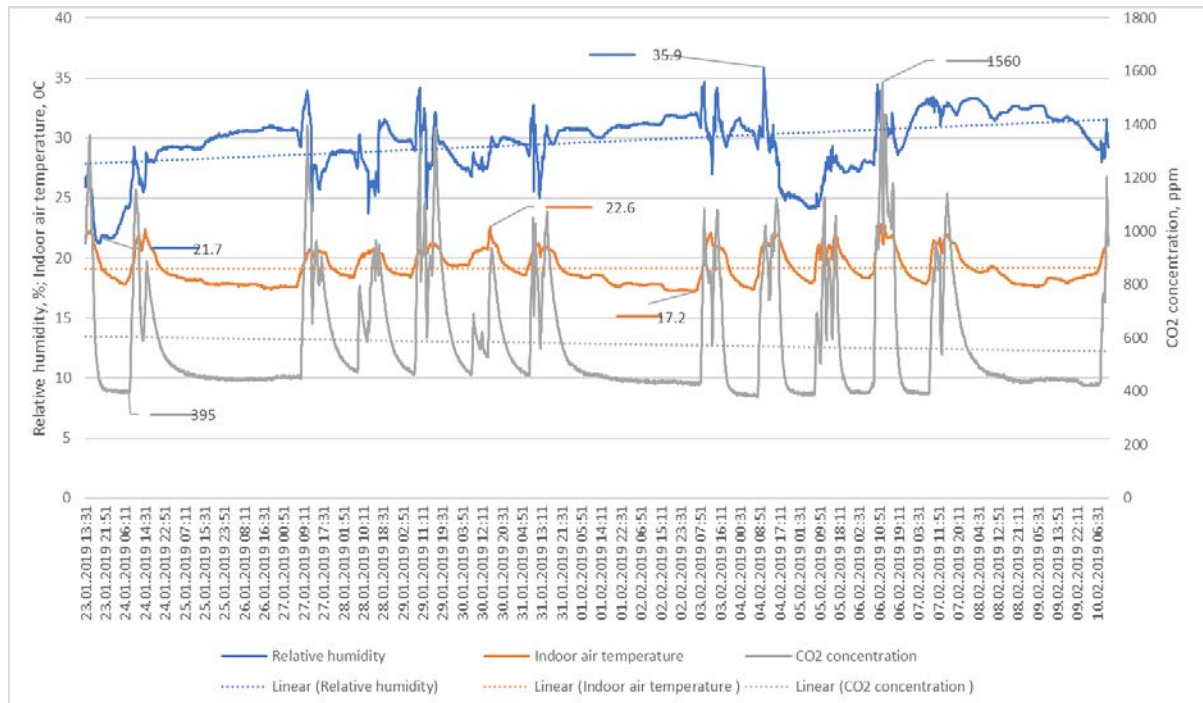
Ņemot vērā, kā ēkā nav mehāniskās pieplūdes-nosūces ventilācijas, lai telpā samazinātu ogļskābās gāzes koncentrāciju, personālam periodiski jāatver vai ilglaicīgi jātur atvērti logi, ne tikai tad, kad telpā palielinās darbinieku skaits, bet arī parastajā darba režīmā, kas savukārt izraisa telpas temperatūras un mitruma rādītāju maiņu, par ko 4.17. att. grafikā signalizē iegūtās gaisa relatīvā mitruma un temperatūras vērtības.

Temperatūras rādītāji svārstās no 13.8 °C līdz 22.2° grādiem. Vidējie dienas un nakts temperatūras rādītāji ir 17.3° C. Iegūtie temperatūras rādītāji ir zemāki par Latvijas Republikas būvnormatīvajos aktos ieteiktajiem, kā arī ir zemāki par Amerikas inženieru biedrības (saīsināti ASHRAE) normatīvajos aktos norādītajām apkures, dzesēšanas un gaisa kondicionēšanas vērtībām.

Relatīvais mitrums svārstās no 21% līdz 48.8%, vidēji 34.6%, kas ir zemāks par cilvēka komfortam ieteicamajām vērtībām. Jāatzīmē, ka relatīvais mitrums parasti ir diapazonā no 20 līdz 35 procentiem, ar periodisku palielinājumu līdz 48%. Relatīvā mitruma palielinājuma rādītāji tiek novēroti vakara, nakts un rīta laikā.



4.17. att. Mitruma, gaisa temperatūras un ogļskābās gāzes koncentrācijas (IAQ) parametri administratīvās ēkas pirmā stāva darba zonās



4.18. att. Mitruma, gaisa temperatūras un ogļskābās gāzes koncentrācijas (IAQ) parametri administratīvās ēkas otrā stāva darba zonās

Attēla 4.18. analīze norāda uz to, ka ziemas laikā vidējā ogļskābās gāzes koncentrācija ēkas otrā stāva atpūtas zonā nav ievērojami augstāka par pirmā stāva darba zonām un ir 576.9 ppm., kas ir pieņemami rādītāji. Mērītie ogļskābās gāzes koncentrācijas dati ir robežā no 395 ppm līdz 1560 ppm. Mērītie diennakts vidējie temperatūras rādītāji ir nedaudz zemāki par ieteiktajām normatīvajām vērtībām un ir 19.14° C. Kopumā temperatūras rādītāji ir robežā no 17.2 °C līdz 22.6 °C.

Relatīvais mitrums svārstās no 21.7% līdz 35.9%, vidēji 29,6%, kas ir zemāks par cilvēka komfortam ieteicamajām vērtībām. Relatīvā mitruma rādītāju palielināšanās tiek novērota no rīta.

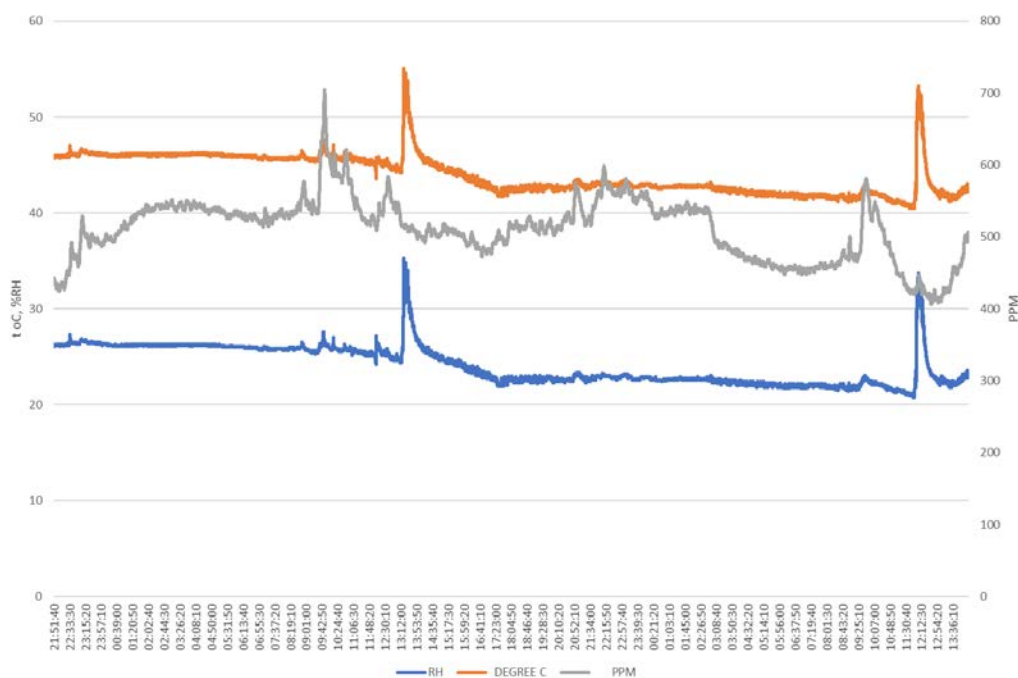
Otrā stāva atpūtas zonas telpas izmantošanas īpatnības (telpa tiek izmantota ar mazāku noslodzi, kā arī mazāku laika posmu, salīdzinot ar darba zonas telpām) nosaka stabilākus diennakts vidējos temperatūras rādītājus, kā arī samazina ogļskābās gāzes maksimālās koncentrācijas rašanās biežumu telpā, pat ņemot vērā to, ka ēkā nav pieplūdes – nosūces ventilācijas.

Relatīvā mitruma rādītāju samazinājums ir skaidrojams ar esošās apkures sistēmas konstruktīvo īpatnību, kā arī ar telpu vēdināšanas biežumu aukstā laika periodā, kas padara telpas gaisu vēl sausāku, jo ielas aukstais gaiss satur minimālu ūdens daudzumu, un pēc tam, kad tas iesilst, tam ir nepieciešams vēl lielāks mitrinājums.

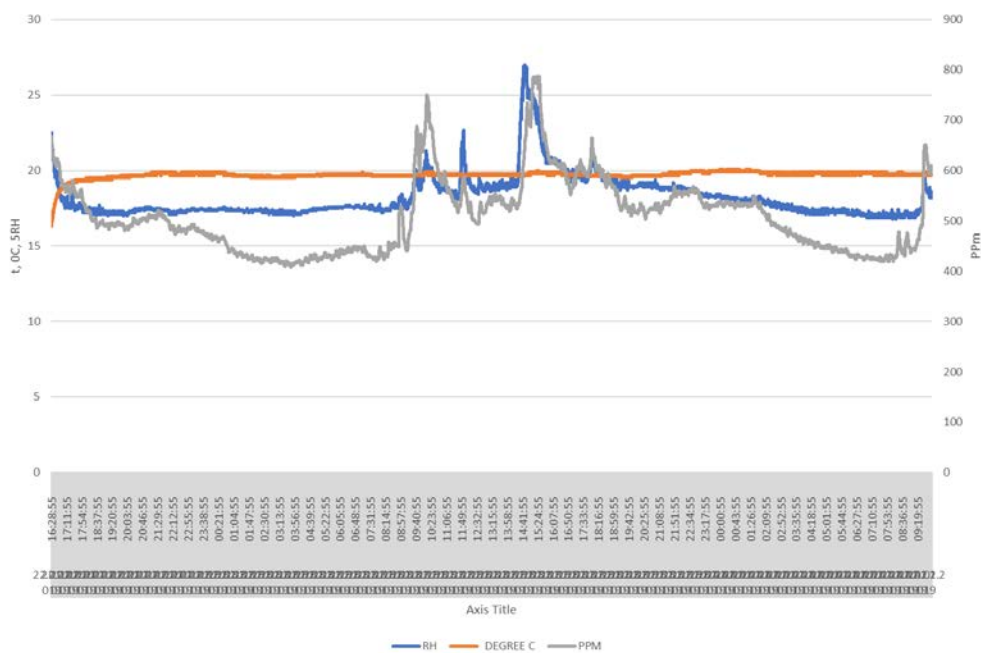
Zemāk atspoguļoti iekšēja gaisa parametru mērījumi kazarmās, izbūvētās pirms 1960.g. un 70. gadu vidū. Tiem ir raksturīgs zems apdzīvotības (noslodzes) līmenis – maz personāla un ļoti plašas telpas. *Kopsavilkums par veiktiem mērījumiem*

Pētījumā laikā veikti vairāk par 1 000 000 mērījumu, kazarmas atrašanas vietas un mērījumu datumu gadi apzināti noslēpti.

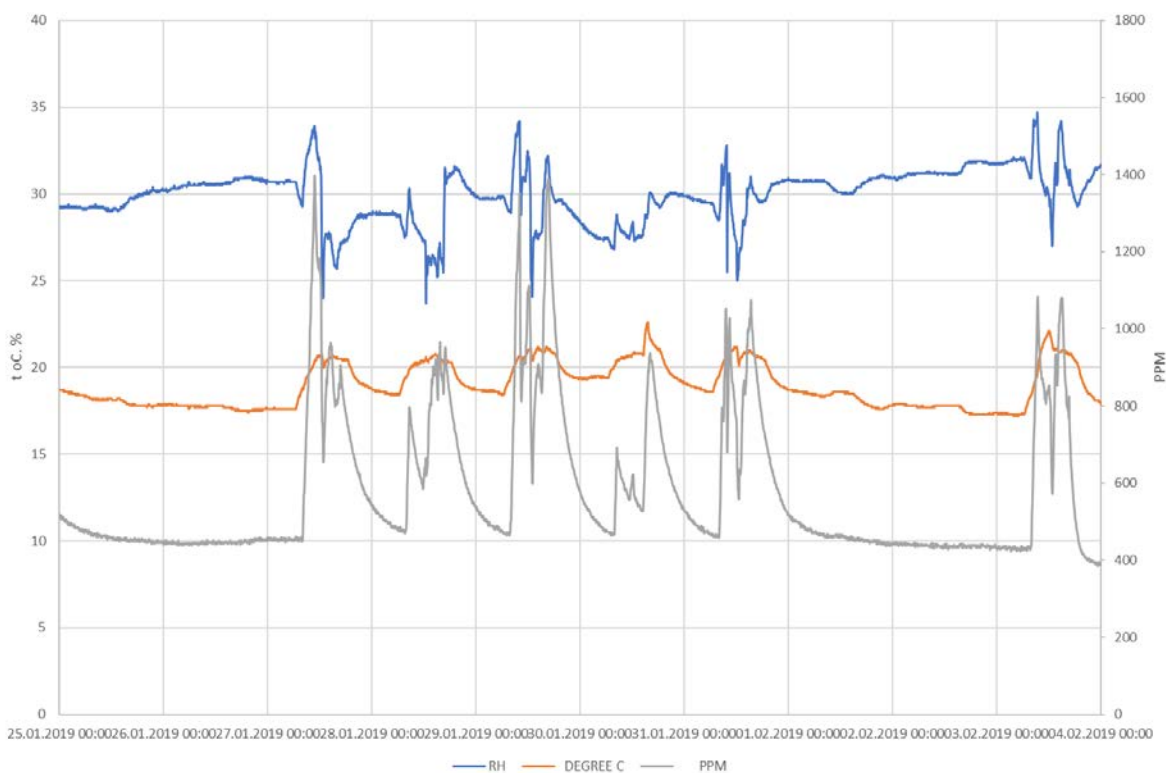
Apstrādājot mērījumu rezultātus, kazarmām izbūvētam pirms 1960.g., tika izveidoti sekojoši grafiki (skat. 4.19., 4.20., 4.21. att.)



4.19. att. Kazarma Nr.1: detalizēti mērījumi 03. februārī telpā, kur notiek mācības



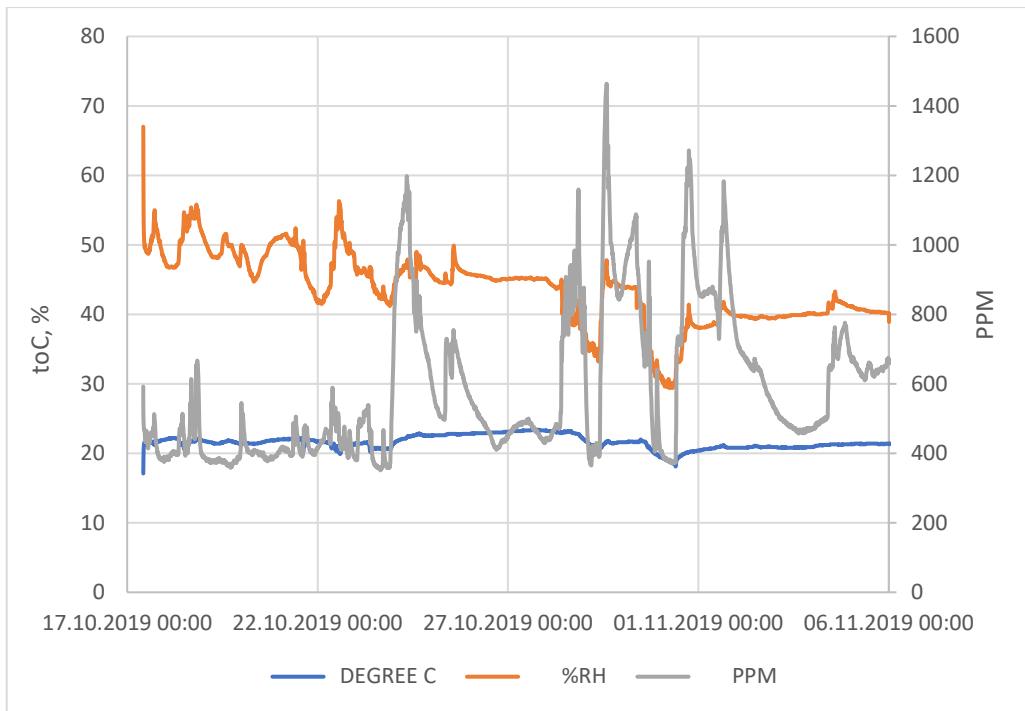
4.20. att. Kazarma Nr.2: detalizēti mērījumi 22. janvārī telpā, kur notiek mācības



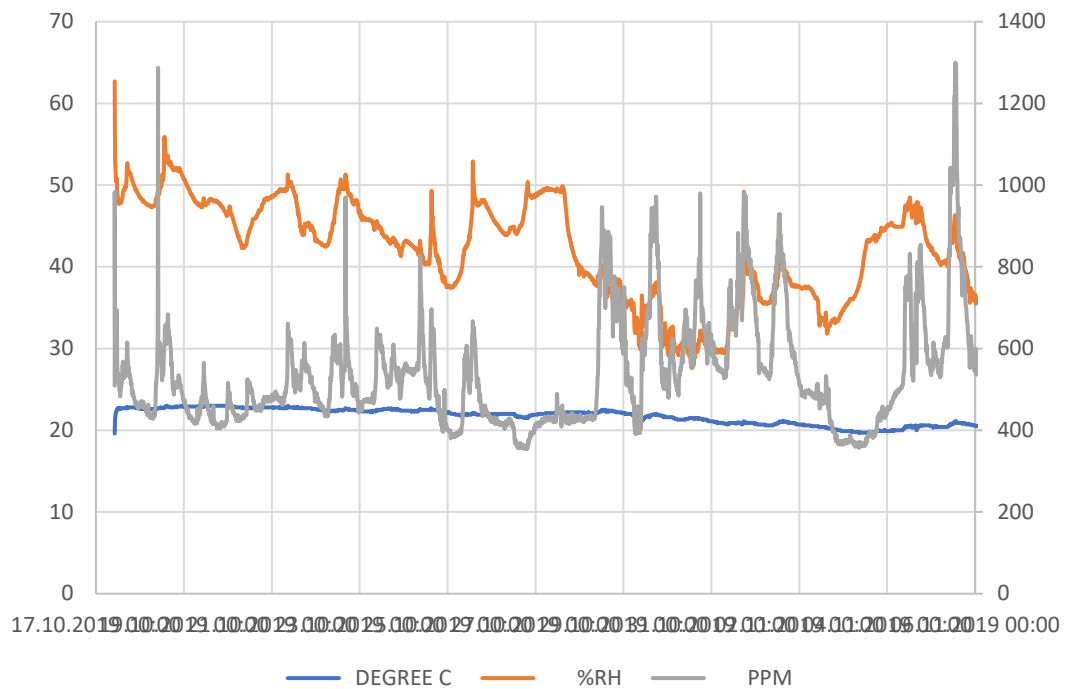
4.21. att. Iekšējā gaisa parametru mērījumi

Analizējot datus secināts, ka kazarmu iekšēja gaisa vidēji dati ir: relatīvais mitrums 29.7 %, temperatūra telpās 19.1 °C un CO₂ koncentrācija telpās 576.9 PPM.

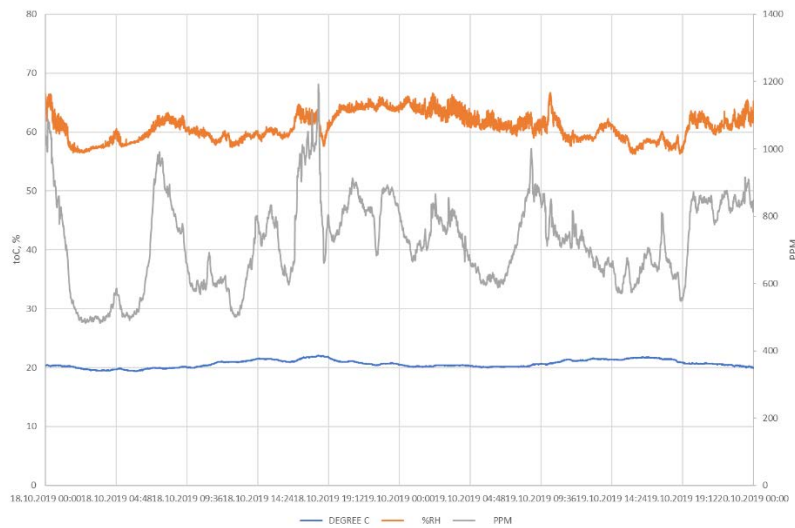
Tālāk tika atspoguļoti iekšēja gaisa parametru mērījumi kazarmās, būvētas 70. gadu vidū.



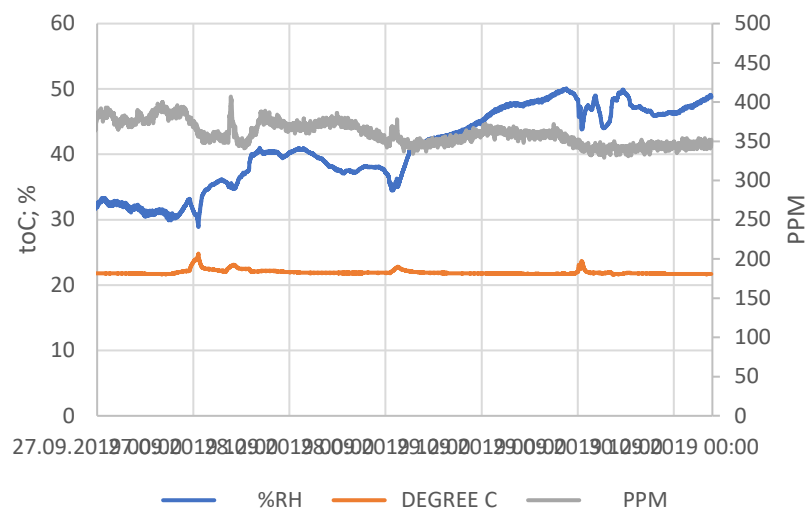
4.22. att. Kazarma 006_01: iekšējā gaisa parametru mērījumi



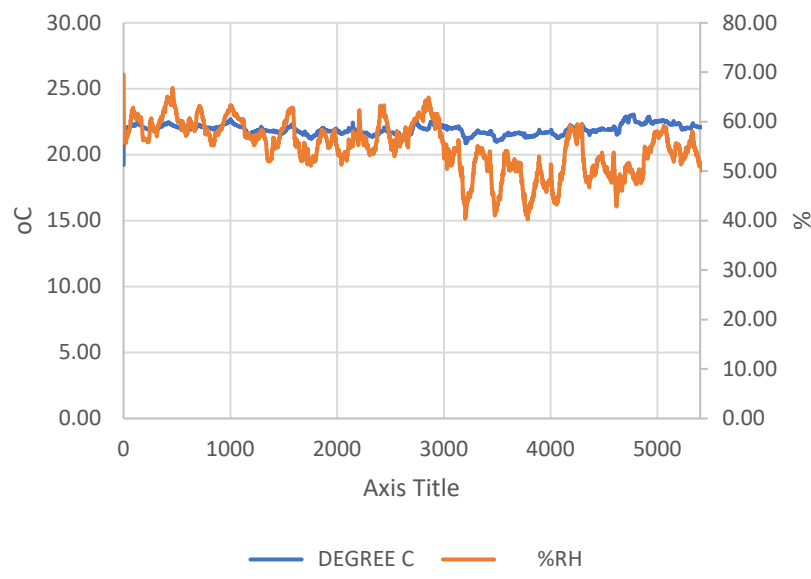
4.23. att. Kazarma 006_02: iekšējā gaisa parametru mērījumi



4.24. att. Kazarma 4_01: iekšējā gaisa parametru mērījumi



4.25. att. Kazarma 4_02: iekšējā gaisa parametru mērījumi



4.26. att. Kazarma 4_03: iekšējā gaisa parametru mērījumi

Mērījumu datu apkopoti 4.10. tabulā.

4.10. tabula

Vidēji dati

	Temperatūra telpās (t, °C)	Relatīvais mitrums (%)	CO ₂ koncentrācija telpās (PPM)
Kazarma 006_01	19.8	32.6	586
Kazarma 006_02	20.1	25.6	778
Kazarma 4_01	18.5	37.5	739
Kazarma 4_02	21.0	35.2	560
Kazarma 4_03	19.3	41.7	-
Kazarma 2_01	17.3	34.6	487
Kazarma 2_02	19.8	-	-
Kazarma 2_03	17.3	32.6	587
Kazarma 3_01	18.4	30.3	753
Kazarma 3_02	20.1	24.3	550
Kazarma 3_03	19.0	29.2	564
Kazarma 3_04	17.6	24.3	551
Kazarma 5_01 (virtuve)	20.3	19.2	-
Kazarma 5_02 virtuve pie ieejas	19.5	25.7	394
Kazarma 5_03 pie saņemšanas	18.9	23.6	374

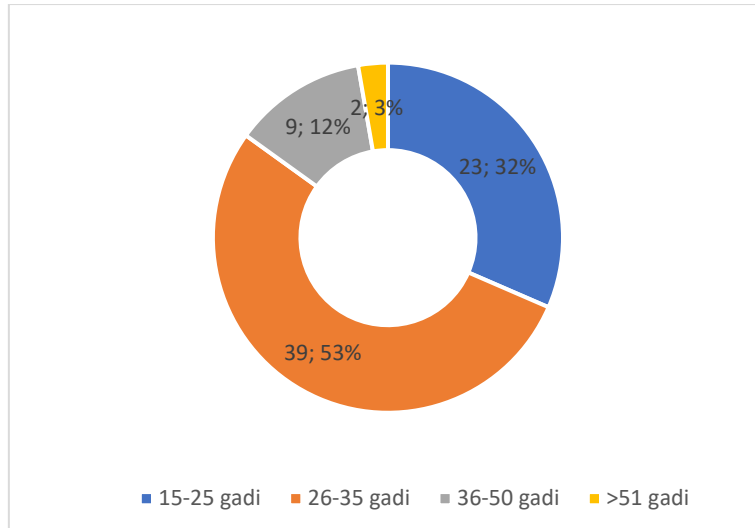
4.7. Aptauja par ēku iekštelpas komfortu militārajā objektā un tās rezultātu apkopojums

Aptaujā piedalījās 73 respondenti dažāda vecumā un dzimumā, atradoties savās darbavietās vai pildot ikdienas dienesta pienākumus. Tika apsekotas trīs ēku grupas.

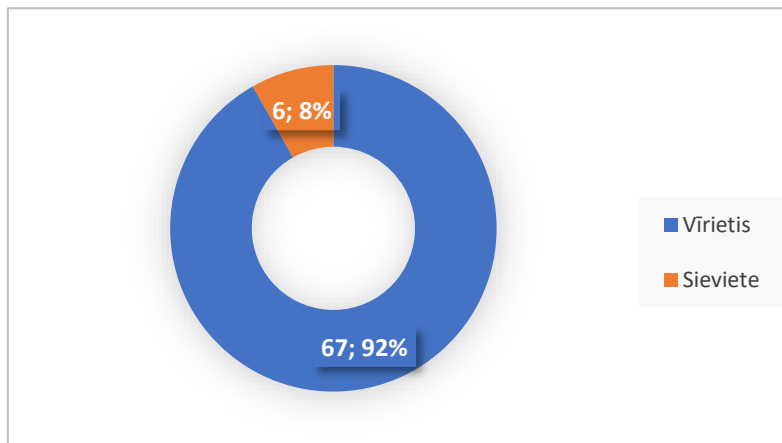
Respondentiem tiek piedāvāts aizpildīt anketas veidlapu, sniedzot atbildi uz jautājumiem, kuri kopumā varētu palīdzēt raksturot pētītas ēkas iekštelpas komfortu. Anketas sākumdaļā respondentiem jānorāda dzimumu un vecumu. Tālāk tiek piedāvāts atbildēt uz sekojošiem jautājumiem:

- ✓ Vai Jūs kopumā apmierina istabas gaisa temperatūra?
- ✓ Novērtējiet, cik lielā mērā Jūs apmierina telpas gaisa temperatūra?
- ✓ Vai istabā ir jūtama nevēlama gaisa kustība, caurvējš?
- ✓ Vai Jūs apmierina istabas gaisa kvalitāte?
- ✓ Novērtējiet, cik lielā mērā Jūs apmierina mitrums telpā?
- ✓ Vai istabā ir jūtamas nepatīkamas smakas?
- ✓ Vai Jūs apmierina istabas akustiskais stāvoklis?
- ✓ Raksturojiet trokšņa avotu/(-us)?

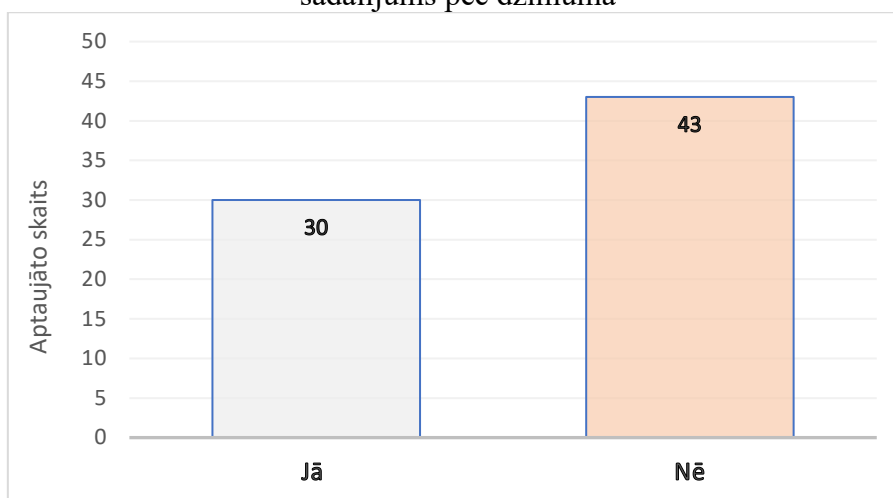
Respondentu atbildes tiek apkopoti un attēlotas grafikos 4.27. - 4.32.



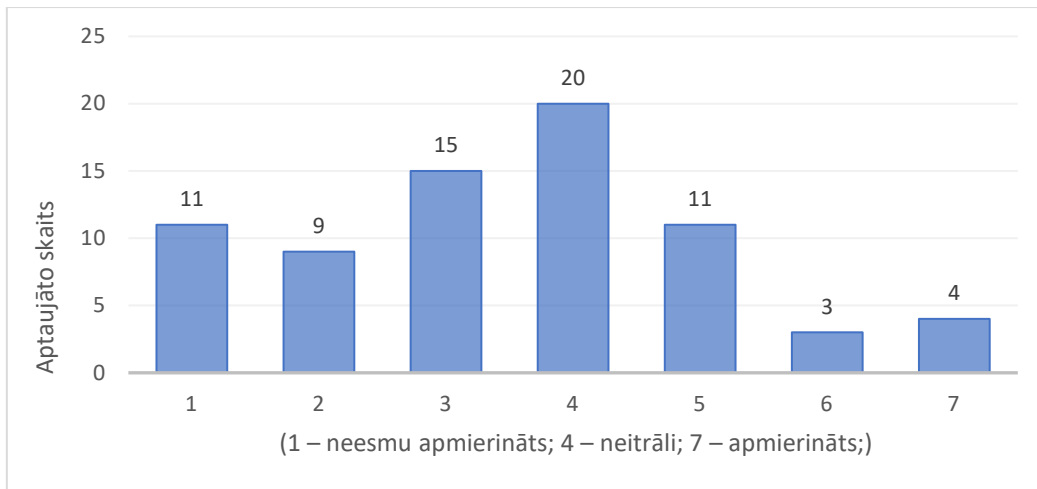
4.27. att. Militāra objekta aptaujas “par iekštelpas komfortu” respondentu sadalījums pēc vecuma



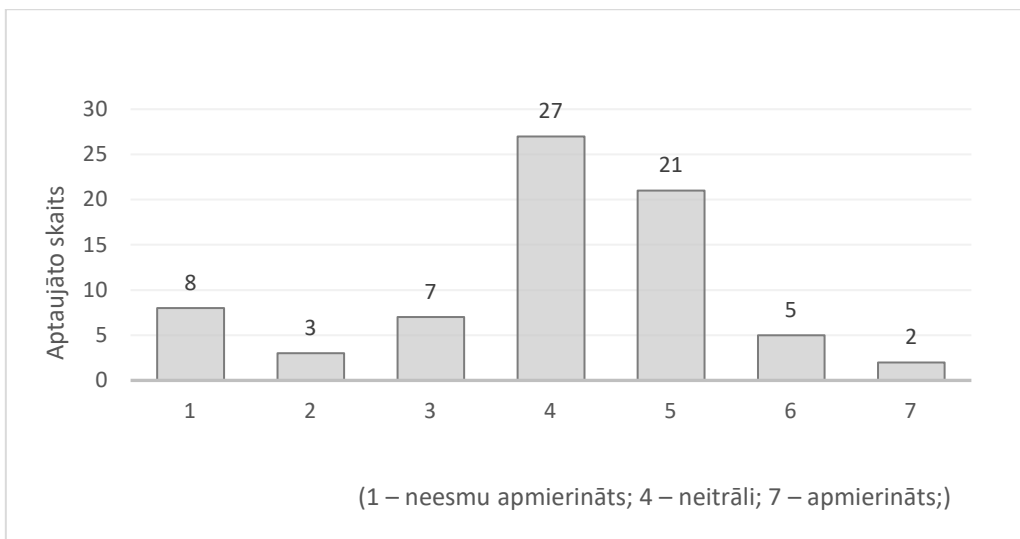
4.28. att. Militāra objekta ēku aptaujas “par iekštelpas komfortu” respondentu sadalījums pēc dzimumā



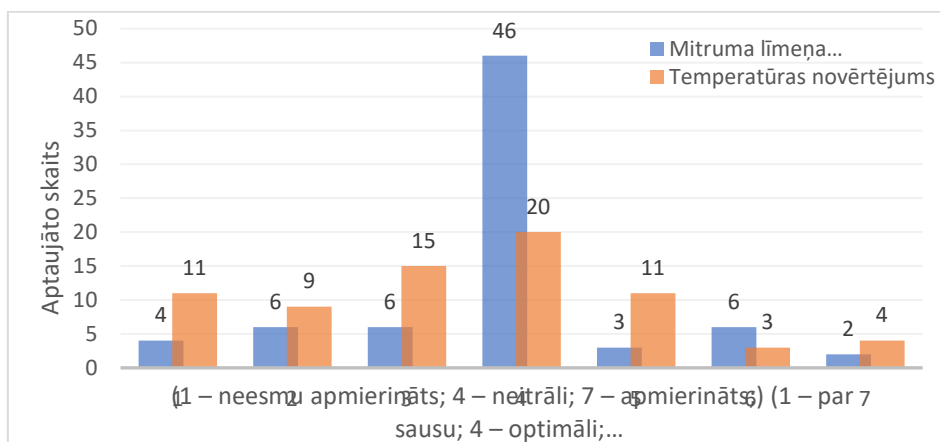
4.29. att. Militāra objekta ēku aptaujas “par iekštelpas komfortu” respondentu apmierinātības indikators



4.30. att. Militāra objekta ēku aptaujas “par iekštelpas komfortu” respondentu apmierinātības indikators iekštelpas gaisa temperatūrai



4.31. att. Militāra objekta ēku aptaujas “par iekštelpas komfortu” respondentu apmierinātības indikators iekštelpas gaisa kvalitātei

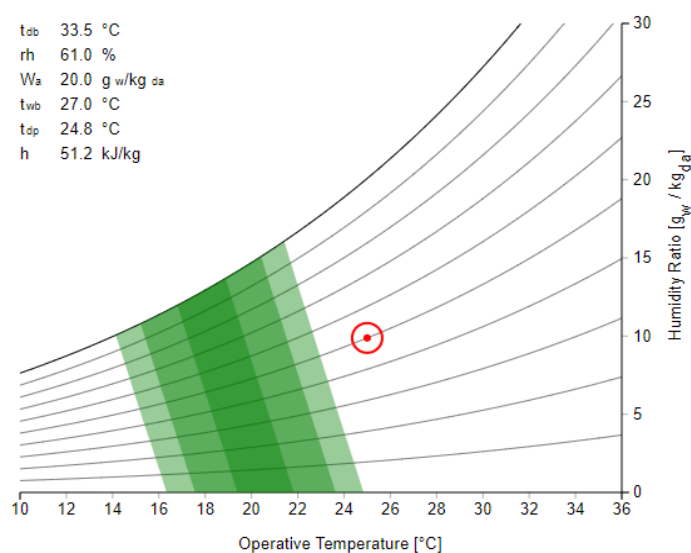


4.32. att. Militāra objekta ēku aptaujas “par iekštelpas komfortu” respondentu apmierinātības indikators iekštelpas gaisa temperatūrai

Veikto aptaujas grafiku analīze spilgti ilustrē problēmu ar iekštelpas komfortu pētījamās ēkās. Vairākums respondentu sniedz negatīvus vērtējumus par gaisa iekštelpu temperatūru, relatīvo mitrumu un gaisa kvalitāti. Darbā atsevišķi grafiskā veidā netiek ilustrēti respondentu atbildes par akustisko stāvokli un jūtamo nepatīkamo smaku iekštelpās, bet sniedzamas rakstiskās aptaujas atbildes atspoguļo lielā mērā respondentu neapmierinātību.

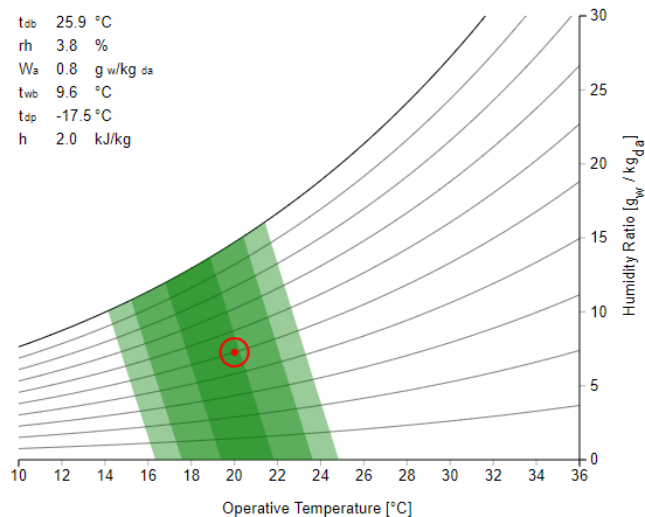
4.8. Termiskā komfortā teorētiskais novērtējums

Izmantojot Kalifornijas universitātes (Bērkli) izstrādāto termiskā komforta kalkulatoru [91], iespējams noteikt iekštelpu klimata un apģērba siltumizolācijas atbilstību ASHRAE 55/2020 [92] [un EN-15251 “Indoor Environmental Criteria” [94] prasībām. Pieņemot iekštelpu gaisa temperatūru 25°C un apģērba CLO vērtību 1.4 [82], redzams, ka dotie kritēji atrodas ārpus komforta zonas (skatīt 4.33. att.).



4.33. att. Komforta zona ar militāro apģērbu pie iekštelpu gaisa temperatūras 25°C, relatīvā mitruma 50% un apģērba CLO vērtības 1.4.

Samazinot iekštelpu gaisa temperatūru līdz 20°C, ASHRAE 55/2020 un EN-15251 “Indoor Environmental Criteria” prasības tiek izpildītas (skat. 4.34. attēlu).



4.34. att. Komforta zona ar militāro apģērbu pie iekštelpu gaisa temperatūras 20°C, relatīvā mitruma 50% un apģērba CLO vērtības 1.4.

4.9. Secinājumi

- Šajā nodaļā apkopoti visi faktori, kuri ietekmē kopējo ēkas energopatēriņu un kurus jāņem vērā, izstrādājot energoauditus. Atsevišķi ir izdalīti specifiskie faktori, kuri ir raksturīgi tieši neklasificēto ēku gadījumā. Tika definēti papildus faktori, kas netiek ņemti spēkā esošajā, tipveida aprēķina procedūrā, tādi kā:
 - papildus ventilācijas piesārņojumu izvadīšanai;
 - papildus izdalījumi no smagās auto tehnikas;
 - servera telpu un datortehnikas lielāks īpatsvars;
 - koriģētas iekštelpu temperatūras, ņemot vērā uniformu CLO līmeni;
 - papildus karstā ūdens patēriņš aktīvu treniņu un dienesta uzdevumu dēļ.
- Tika apskatītas metodes telpu siltuma zudumu aprēķināšanai ar konkrētu aprēķināšanas piemēru ar mērķi samazināt enerģijas patēriņu apkurei un uzlabot komfortu. Tika veikta aprēķināto datu salīdzināšana ar vērtībām, kuras bija iegūtas ar mērinstrumentiem, kā arī dažu koeficientu koriģēšana. Katras aprēķināšanas metodes pamatā ir neatgriezenisks process - siltumapmaiņa, kas var sastāvēt no trim atsevišķiem siltuma enerģijas izplatīšanās veidiem (siltumvadīšana, siltuma konvekcija un starošana) dažādās to kombinācijās.
- Siltuma zudumu caur zemi teltīs analīze parāda - jo lielāks ir vertikālais temperatūras gradients, jo lielāki ir siltuma zudumi. Tātad, lai samazinātu siltuma zudumus caur zemi, jāsamazina vertikālais gradients. To var panākt, piemēram, izmantojot piespiedu iekšējā gaisa kustību teltī.
- Siltuma zudumu analīze caur ārējām konstrukcijām parāda, ka materiāla siltumvadītspējas koeficienta attiecība pret materiāla biezumu ($\frac{\lambda_c}{l}$) nebūs lineāra, ka siltuma zudumu caur zemi analīzes gadījumā un attiecības $\frac{\lambda_c}{l}$ vērtībām līdz ≈ 10 siltuma zudumi mainās diezgan strauji, bet, ja $\frac{\lambda_c}{l} > 20$, tad siltuma zudumu pieaugums ir neliels. Intervālu $10 < \frac{\lambda_c}{l} < 20$ var uzskatīt par pārejas intervālu. Tātad, ja mērķis ir samazināt siltuma zudumus, jāsamazina

attiecība $\frac{\lambda_c}{l}$. Īpaši būtiski tas ir intervālā $0 < \frac{\lambda_c}{l} < 10$. Acīmredzami, lai samazinātu attiecību $\frac{\lambda_c}{l}$, jāpalielina materiāla biezums l un/vai jāizmanto materiāls ar mazāku siltumvadītspējas koeficientu λ_c .

5. Tika konstatēts, ka patreiz Latvijas Republikā nepastāv specifiska energoefektivitātes noteikšanas metodoloģija neklasificēto ēku energoauditu veikšanai, kā arī spēkā esošie normatīvi tiešā veidā nenosaka energoaudītā ievadāmos datus, kurus pielieto neklasificēto ēku energoauditu veikšanai, izvēloties aprēķina temperatūras, gaisa apmaiņas daudzumus, siltuma izdalījumus, darbības režīmus, apgaismojuma energopatēriņu, karstā ūdens patēriņu utt., bet šādos gadījumos tiek pielietotas parastās aprēķina metodes.
6. Ņemot vērā to, ka Latvijas būvnormatīvi nenosaka nepieciešamos minimālos ventilācijas gaisa daudzumus neklasificētās ēkās, kā arī nedod norādes par lielumiem, kurus vajadzētu pieņemt, ir jāpielieto citu valstu normatīvi. Šajā promocijas darba nodaļā ir apkopoti ventilācijas gaisa daudzumi pēc telpu izmantošanas veida un pielietotā normatīva, kuriem jābūt pielietojamiem nepieciešamo aprēķinu veikšanai.
7. Veicot aprēķinus, nevar ignorēt tādus jēdzienus kā „apgērba siltumizolācija” un „cilvēku aktivitātes līmenis”. Apgērba siltumizolācijai ir tieša ietekme uz vairākiem nozīmīgiem faktoriem. Kā galvenos ir vērts apskatīt cilvēka labsajūtu un ēkas energoefektivitāti. Pareizi izprotot šo faktoru sakarību, redzams, ka tie savstarpēji ir cieši saistīti. Pirmkārt, apgērbs ietekmē cilvēka labsajūtu jeb komfortu un līdz ar to arī produktivitāti darbā. Otrkārt, vairākumā neklasificēto ēku darbiniekiem ir pienākums valkāt formas tērpus (uniformu) ar augstāku siltumizolācijas līmeni, un tā rezultātā nepastāv nav nepieciešams uzturēt standarta gaisa temperatūru iekštelpās. Darbinieku komforta līmenis var saglabāties optimāls arī pie 2-3 grādiem zemākas telpu gaisa temperatūras, tādējādi ietaupot līdzekļus uz siltumenerģijas rēķina.
8. Cilvēku aktivitātes līmenis jeb MET (Metabolic Equivalent of Task). Šo mērvienību izmanto, lai aprakstītu cilvēka ķermenī metabolisma ceļā radīto enerģiju. Cilvēka ķermeņa “saražotais” enerģijas daudzums smaga fiziskā darba laikā var sasniegt 6 MET, un šim lielumam ir nopietna ietekme arī uz kopējo iekštelpas temperatūras raksturu.
9. Ņemot vērā to, ka militārais apgērbs ir specifisks un krietni atšķiras no civila rakstura drēbēm, tad aprēķiniem ir nepieciešamas konkrētas šī tipa apgērba clo vērtības. Lai novērtētu militārā personāla termisko komfortu ofisa apstākļos, jāņem vērā militārā apgērba specifika un CLO vērtības. Šim nolūkam Latvijas Republikas Nacionālo bruņoto spēku karavīru lauka kaujas formas tērpu var pielīdzināt ASV karavīru formas tērpiem, kura aptuvenā CLO vērtība ir 1.4.
10. Izmantojot Kalifornijas universitātes (Bērkli) izstrādāto termiskā komforta kalkulatoru, iespējams noteikt iekštelpu klimata un apgērba siltumizolācijas atbilstību ASHRAE 55/2020 un EN-15251 “Indoor Environmental Criteria” prasībām. Pieņemot iekštelpu gaisa temperatūru 25°C un apgērba CLO vērtību 1.4, skaidri redzams, ka dotie kritēriji atrodas ārpus komforta zonas. Savukārt, samazinot iekštelpu gaisa temperatūru līdz pat 18°C vērtībai, tiek izpildītas iepriekšminēto normatīvo aktu prasības un varētu tikt saglabāta komforta sajūta.

5. REZULTĀTU VALIDĀCIJA PRAKTISKĀ IZMANTOŠANA

5.1. Neklasificētu ēku enerģijas patēriņa novērtējums dažādās Latvijas pilsētās

Lai apstiprinātu dinamiskos enerģijas aprēķinus un novērtētu dažādus modernizēšanas scenārijus, tika veikts enerģijas patēriņa teorētiskais novērtējums atbilstoši Latvijas klimatiskajiem apstākļiem, kas ir līdzīgi Baltijas reģionā. Šim nolūkam tika izvēlēta tipiska Latvijas ugunsdzēsēju depo ēka (2.10. att., 2.11. att.). Tipisks ugunsdzēsēju depo ir mazstāvu ēka. Ir vairāki izmaksu ziņā optimāli risinājumi attiecībā uz zemu ēku būvniecību un modernizēšanu [95], kurus var viegli piemērot ugunsdzēsēju depo. Tomēr, salīdzinot ar dzīvojamajām un sabiedriskajām ēkām, ugunsdzēsēju depo modernizēšana ir sarežģītāka. Šāda veida ēkām ir īpašas prasības attiecībā uz ventilāciju ugunsdzēsības mašīnu izplūdes un karstā ūdens patēriņa dēļ, kam ir skaidri noteiktas maksimālās slodzes uz personāla maiņu. Tam nepieciešams uzstādīt jaudīgāku karstā ūdens boileri (akumulācijas tvertnes). Modernizēšanas paketēs jāietver arī pasākumi mitruma kontrolei [96].

Vispirms tika analizēta nerenovēta ēka. 5.1. tabulā ir sniegti dati par nerenovētu ēku enerģijas patēriņu ar darbības līmeni 2.0 MET, 1.4CLO garāžā un 1.2 MET, 0.85 CLO biroja daļā. Netika ņemts vērā karstā krāna ūdens enerģijas patēriņš.

5.1. tabula

Nerenovētu ēku enerģijas patēriņš, kWh/m²

	Rīga	Liepāja	Gulbene	Daugavpils
Apkurei, ventilācijai un gaisa kondicionēšanai (HVAC) patērētā elektrība	0	0	0	0
Centralizētā apkure	136.2	123.2	160.7	151.5

Kā redzams tabulā, par Rīgu iegūtie rezultāti labi saskan ar mērījumu datiem. Nesakrītība ir mazāka par 10%. Var secināt, ka šo modeli var izmantot, lai sīkāk novērtētu modernizēšanas scenāriju ietekmi uz enerģijas galapatēriņu.

Pētījuma ietvaros tika analizēti trīs modernizēšanas scenāriji. 1. scenārijs - "pamata" - ietver norobežojošo konstrukciju siltumizolāciju saskaņā ar Latvijas normatīviem aktiem [97] un mehāniskās ventilācijas sistēmas uzstādīšanu bez izplūdes gaisa siltuma rekuperācijas. 2. scenārijs ir līdzīgs 1. scenārijam, tomēr to pastiprina izplūdes gaisa siltuma rekuperācijas iekārtas uzstādīšana. Trešais scenārijs ir nopietnas modernizēšanas pieeja, kas ir piemērota Latvijas klimatiskajiem apstākļiem [98], [99]. Tā ietver efektīvākas izplūdes gaisa siltuma rekuperācijas iekārtas uzstādīšanu, labāku norobežojošās konstrukcijas hermētiskumu un papildu siltumizolāciju, kas atbilst pasīvās mājas standartprasībām.

5.2. tabula

Modernizēšanas scenāriju apraksts

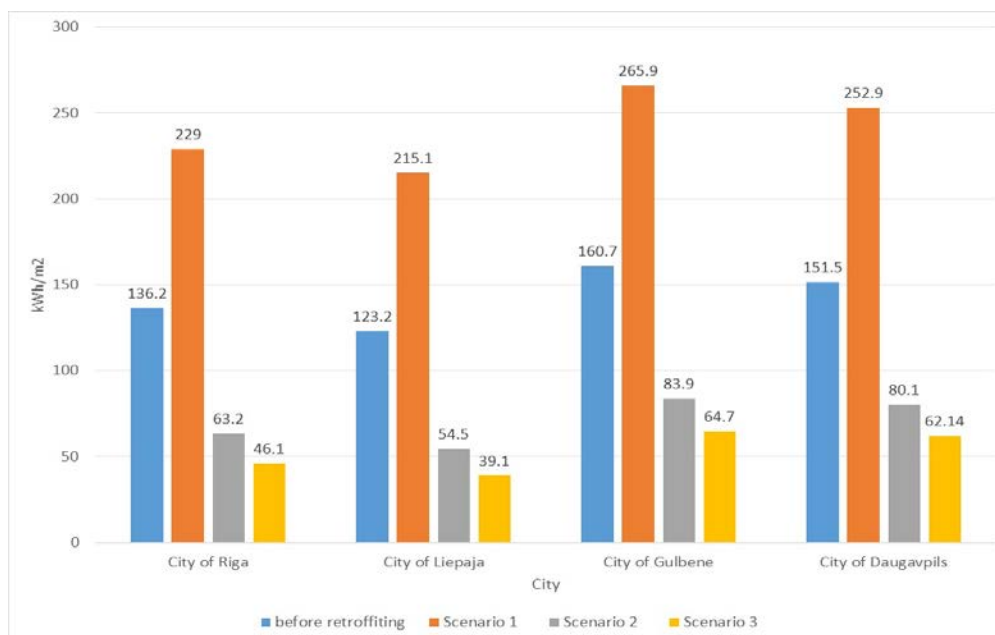
	U-vērtības, W/m ² K	Ventilācijas likme, n ⁻¹	Izplūdes gaisa siltuma rekuperācija, %	Ēku apvalku hermētiskums q ₅₀ , m ³ /(m ² h)
Scenārijs 1 - “pamata”	Necaurspīdīgi elementi – 0.2 Logi – 1.3 Durvis 1.8	Garāža – 2 Biroja daļa – 0.9	0	3.5
Scenārijs 2 - “pamata plus”	Necaurspīdīgi elementi – 0.2 Logi – 1.3 Durvis 1.8	Garāža – 2 Biroja daļa – 0.9	85	2
Scenārijs 3 - “paaugstināta līmeņa”	Necaurspīdīgi elementi – 0.10 Logi – 0.7 Durvis 1.2	Garāža – 2 Biroja daļa – 0.9	92	1

5.3. tabula

Renovēto ēku enerģijas patēriņš, kWh/m²

	Scenārijs 1				Scenārijs 2				Scenārijs 3			
	Rīga	Liepāja	Gulbene	Daugavpils	Rīga	Liepāja	Gulbene	Daugavpils	Rīga	Liepāja	Gulbene	Daugavpils
Apkurei, ventilācijai un gaisa kondicionē šanai (HVAC) patērētā elektrība	25.7	25.7	25.7	25.7	25.1	25.1	25.1	25.1	25	25	25	25
Centralizēt ā apkure	229.0	215.1	265.9	252.9	63.2	54.5	83.9	80.1	46.1	39.1	64.7	62.14

5.1. att. parādīts siltumenerģijas patēriņa gada salīdzinājums pirms un pēc modernizēšanas.



5.1. att. Siltumenerģijas patēriņa salīdzinājums apkurei pirms un pēc renovācijas

Šī pētījuma rezultāti liecina, ka mehāniskās ventilācijas sistēmas ierīkošana bez izplūdes gaisa siltuma rekuperācijas iekārtas būtiski palielina enerģijas patēriņu pat labi izolētai ēkai. Savukārt izplūdes gaisa siltuma rekuperācijas iekārtas uzstādīšana nodrošina siltumenerģijas patēriņa samazināšanos par 165,8 kWh/m² vai par 72%. Tomēr ir ievērojams elektroenerģijas patēriņa pieaugums, lai darbinātu gaisa apstrādes iekārtu, kas vidēji palielina patēriņu par 25 kWh/m². Vidējā centralizētās siltumapgādes cena Rīgā ir 62,8 eiro/MWh, kamēr elektroenerģijas cena ir 160 eiro/MWh. Ekonomiskais ieguvums šajā gadījumā nebūtu pamatots, jo finansiāls ieguvums no energotaupīšanas pasākumiem ar nopietnu modernizēšanu nepārsniegtu elektroenerģijas patēriņa izmaksas, lai darbinātu gaisa apstrādes iekārtu. Ietaupījums par siltumenerģiju ir 10,4 eiro/m² un pieaugums par izmantoto elektroenerģiju ir 4 eiro/m². Tādējādi kopējās enerģijas izmaksas samazinātos par 6,4 eiro/m².

5.2. Neklasificēto ēku renovācijas scenāriju izstrāde

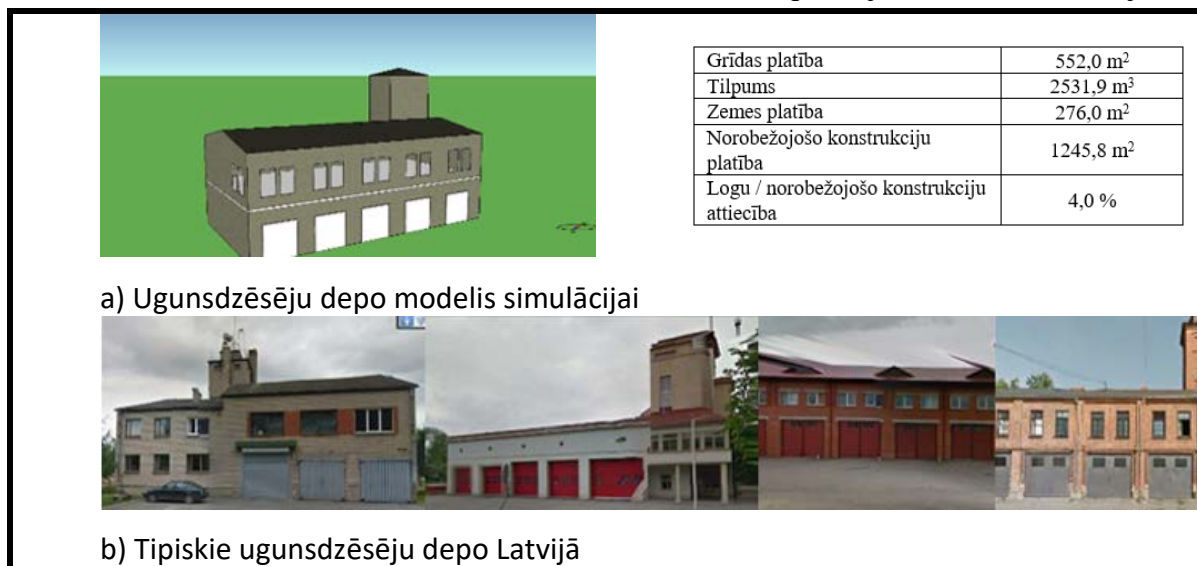
Kopumā izmērītais enerģijas patēriņš izvēlētajās neklasificētajās ēkās ir ievērojami lielāks nekā enerģijas patēriņš civilajās ēkās (dzīvojamās un sabiedriskās), kur kopējais siltumenerģijas patēriņš apkurei un karstā ūdens sagatavošanai ir 190 kWh/m². Šī ziņojuma mērķis ir definēt neklasificētu ēku galvenos parametrus, lai izstrādātu vadlīnijas neklasificētu ēku renovācijai reģionos, kuros ir pieprasījums pēc telpu apsildes. Iepriekšējais darbs šajā jautājumā liecina, ka energoefektivitātes uzlabošana neklasificētās ēkās var izraisīt enerģijas samazinājumu līdz 65% salīdzinājumā ar sākotnējo enerģijas patēriņu. Neklasificētu ēku vidējais enerģijas patēriņš Latvijā ir aptuveni 260 kWh/m² diapazonā.

Tika veikts pētījums par nerenovēto ugunsdzēsēju depo ēku enerģijas patēriņu, lai parādītu renovācijas pasākumu ietekmi (2 simulācijas scenāriji) [66]. Scenārijā 1 modifikācijas pakete ietvēra logu nomaiņu un papildu siltumizolācijas slāņa izmantošanu (+50 mm).

Scenārijā 2 modifikācijas pakete ietvēra 1. scenāriju ar izplūdes gaisa siltuma rekuperācijas sistēmu ventilācijai caur rotējošu siltummaini ar efektivitāti 86%. Gaisa infiltrācijas ātrums modernizētām ēkām: $1,5 \text{ m}^3/\text{h} \times \text{m}^2$; ārējo norobežojošo konstrukciju U vērtība: $0,29 \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$; mehāniskās ventilācijas ātrums: $n^{-1} = 2$ bez rekuperācijas.

SCENĀRIJS 1: Fasādes modernizēšana bez siltuma rekuperācijas sistēmas

SCENĀRIJS 2: Fasādes modernizēšana ar siltuma rekuperācijas sistēmu ventilācijai



5.4. att. Ugunsdzēsēju depo prototipa modelis, kas izstrādāts ar programmatūru IDA-ICE v4.8.

Divu scenāriju simulācija tika veikta ar IDA-ICE v 4.8 programmatūras palīdzību, pamatojoties uz izstrādāto prototipa modeli, kas pārstāv tipisku ugunsdzēsēju depo. 40 analizēto ugunsdzēsēju depo tipoloģija norāda uz kopējiem būvniecības principiem, proti, pirmais stāvs tiek izmantots ugunsdzēsības automobiļu novietošanai, savukārt otrais stāvs tiek izmantots personāla vajadzībām un pārvaldei. Lielākajai daļai ugunsdzēsēju staciju ir līdzīgs stāva iekārtojums un noslogojuma specifika.

Rezultāti parādīja, ka pastāv 30% ietaupījuma potenciāls, izmantojot tikai fasāžu modernizāciju, un līdz 83% ietaupījumu potenciāla, ja tiek veikta nopietna enerģijas modernizēšana, aprīkojot ēku ar izplūdes gaisa siltuma rekuperācijas ventilācijas sistēmu [66].

5.4. tabula

Enerģijas patēriņš ugunsdzēsēju depo dažādos scenārijos (gadījuma pētījums)

	Enerģija apkurei, kWh/m ²	Ietaupījums
REFERENCE	352.45	0%
SCENĀRIJS 1	247.28	30%
SCENĀRIJS 2	61.05	83%

Vēl viens pētījums, kas tika veikts, lai modelētu un salīdzinātu dažādo renovācijas pasākumu ietekmi militārajās kazarmās. Gada laikapstākļi dinamiskā simulācijas modelī tika veikti,

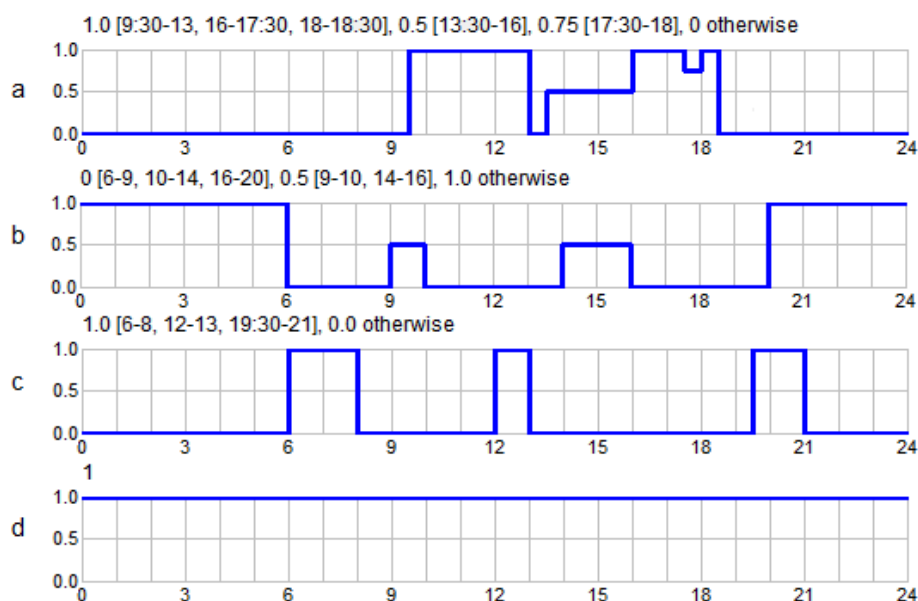
izmantojot klimata failu 3 pilsētām: DAUGAVPILS (WMO: 265440), RĪGA (WMO: 264220) un LIEPĀJA (WMO: 264060).

Visām simulācijām tika izmantots vienots ēkas modelis (5.5. att.), kura platība ir 618,0 m² un tilpums 1936,1 m³. Modeļa norobežojošo konstrukciju platība ir 1254,1 m², kur 7,0% ir logu laukums. Visām zonām ir identiski iestatītie temperatūras punkti: min temperatūra 21°C un max 25°C.



5.5. att. Ēkas modelis – kazarmas Latvijā

Šai simulācijai tika pieņemts, ka ir četras zonu grupas - dzīvojamās istabas zona, vannas istaba, mācību telpas, gaiteni un kāpņu telpa ar dažādiem noslogojuma un apgaismojuma grafikiem. Visi grafiki atbilst dienas režīmam un ir sadalīti divās maiņās (5.6. att.).



5.6. att. Izstrādāti grafiki noslogojumam un apgaismojumam.

Mācību telpas (5.6. a att.) ir noslogotas no pirmdienas līdz sestdienai no 9:30 līdz 18:00 ar 30 minūšu pārtraukumu no 13:00 līdz 13:30. Dzīvojamās istabas (5.6. b att.) ir 100% noslogotas no 21:00 līdz 6:00. Pārējā dienas laikā mācību telpas un dzīvojamās istabas

lietošanas laiki mainās viens ar otru. Vannas istabas (5.6. c att.) noslogojuma grafiks ir izveidots ar trim maksimumiem no 6:00 līdz 8:00, 12:00 līdz 13:00 un no 19:30 līdz 21:00. Tiek pieņemts, ka gaiteni un kāpņu telpa (5.6. c att.) ir bez iemītņiem, un apgaismojuma grafiks ir izveidots kā vienmēr ieslēgts.

Kā pirmais solis tika analizēta nerenovēta ēka tikai ar logu ventilāciju (1.scenārijs), nākamā simulācija attēlo situāciju, kad tika uzlabota ēkas norobežojošo konstrukciju energoefektivitāte (2.scenārijs), tad trešā simulācija pievieno mehānisko ventilāciju kopā ar siltuma rekuperāciju (3. scenārijs) un galīgā iestatīšana attiecas uz labāku ventilāciju dzīvojamās telpās (4. scenārijs). Scenāriju simulācijas un to rezultātu aprakstus skat. 5.5. tabulā.

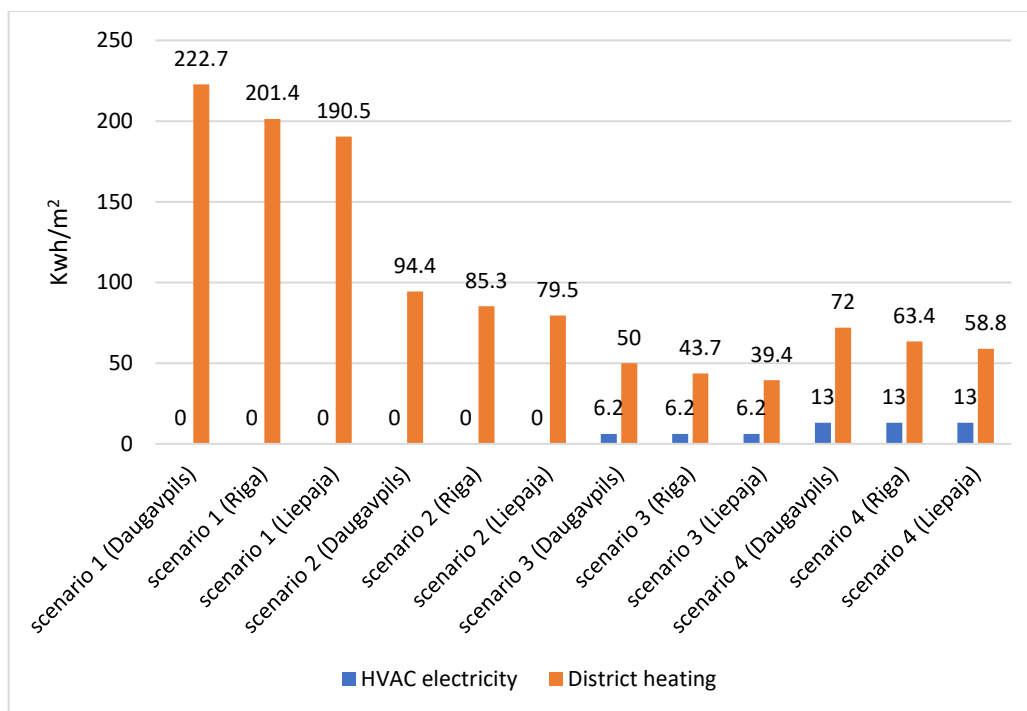
5.5. tabula

Renovācijas scenāriji un to simulācijas rezultātu apraksts

	U-vērtības, W/m ² K	No vēja atkarīgas infiltrācijas gaisa plūsma pie spiediena starpības 50 Pa, m ³ /(h*m ² ext.surf)	Izplūdes gaisa siltuma rekuperācija, %	Gaisa apmaiņas norma, ACH	Atrašanās vieta	HVAC elektrība, kWh/m ²	Centrālā siltumapgāde, kWh/m ²
1.scenārijs	Logi – 2.6 Sienas – 0.9 Grīda – 0.8 Jumts – 0.9	4	0	0.5	Daugavpils	0	222.7
					Rīga	0	201.4
					Liepāja	0	190.5
2.scenārijs	Logi – 1.1 Sienas – 0.16 Grīda – 0.16 Jumts – 0.10	1.5	0	0.5	Daugavpils	0	94.4
					Rīga	0	85.3
					Liepāja	0	79.5
3.scenārijs	Logi – 1.1 Sienas – 0.16 Grīda – 0.16 Jumts – 0.10	1.5	80	0.5	Daugavpils	6.2	50
					Rīga	6.2	43.7
					Liepāja	6.2	39.4
4.scenārijs	Logi – 1.1 Sienas – 0.16 Grīda – 0.16 Jumts – 0.10	1.5	80	0.5*	Daugavpils	13.0	72
					Rīga	13.0	63.4
					Liepāja	13.0	58.8

* Scenārijos astoņām kazarmu dzīvojamām istabām ir paaugstināta gaisa apmaiņas norma, kas ir 2,5 l/(s*m²) saskaņā ar Somijas nacionālo būvnormatīvu D2.

5.7. att. tika apkopoti scenāriju simulācijas iegūti dati.



5.7. att. Enerģijas patēriņa salīdzinājums dažādos scenārijos.

Acīmredzami, ka kazarmas atrodas maigā un piejūras klimatā, tas pozitīvi ietekmē ēkas apkurei nepieciešamās enerģijas daudzumu. Šis apstāklis palīdz ietaupīt no 14,5 % (1. scenārijs) līdz 21,2 % (3. scenārijs) enerģijas atkarībā no aplūkotā scenārija. Apsverot šādu ēku, kurā norobežojošās konstrukcijas raksturojas ar augstām U vērtībām, iespējams panākt enerģijas patēriņa samazinājumu līdz divām trešdaļām no sākotnējā daudzuma (2.scenārijs). Kad tiek piemēroti jaunie parametri pēc pabeigtiem renovācijas darbiem (3. scenārijs), apkures enerģijas patēriņš samazinās. Tas ļauj ietaupīt 77,6 % – 79,3 % no patērētās enerģijas (tas dod vislabāko rezultātu). Protams, šis scenārijs ir ideāla situācija, kad renovācija tiek veikta perfekti, iemītnieki vienmēr rīkojas pēc iepriekš noteiktiem grafikiem, bet citi apstākļi pilnībā sakrīt ar lietotāju paradumiem, lai gan, ņemot vērā 6,2 kWh/m² elektroenerģijas patēriņu, kas nepieciešama mehāniskās ventilācijas darbības uzturēšanai, tad rezultāts nedaudz pasliktinājās, neskatoties uz to, ka šī uzlabojuma pozitīvā ietekme ir acīmredzama. Analizējot 4.scenāriju, redzams vairāk nekā divkārtšs enerģijas patēriņa pieaugums gan apkurei, gan HVAC elektrībai katrā vietā (salīdzinājumā ar 3. scenāriju), bet enerģijas patēriņš apkurei samazinājās no 67,7 % līdz 69,1 % nekā scenārijā 1.

Veikti pētījumi par dažādo renovācijas pasākumu ietekmi militārajās kazarmās parādīja, ka ievērojamus ietaupījumus var panākt, apvienojot energoefektivitātes pasākumus (parādīts 5.6. tabulā).

5.6. tabula

Militāro kazarmu renovācijas potenciāls (gadījuma pētījums)

Infiltrācija,m ³	Sistēmas apraksts	Enerģijas patēriņš, kWh/m ²	
		Apkure	Elektrība

	Ar ventilāciju+siltuma rekuperāciju	86,5	
4	Ar ventilāciju+siltuma rekuperāciju+logu U vērtību 1,1	79,8	5,1
1,5	Ar ventilāciju+siltuma rekuperāciju+logu U vērtību 1,1	76,3	5,1
1,5	Ar ventilāciju+siltuma rekuperāciju+logu U vērtību 1,1/sienu U vērtību 0,17	25,5	5,1
	Ar ventilāciju+ bez siltuma rekuperācijas+logu U vērtību 1,1/sienu U vērtību 0,17	58,1	

5.3. Modulārā ballistiski izturīga koka karkasa siltināšanas risinājuma izstrāde

Personāla drošība ir galvenā prioritāte neklasificētās ēkās, īpaši militārās ēkas. Tomēr iekštelpu gaisa kvalitātei un siltuma komfortam ir tiešā ietekme uz personālā produktivitāti un spēju koncentrēties pienākumiem un ietekmēt lēmumu pieņemšanu stresa apstākļos [19]. Ēku būvniecībā arvien izplatītāka kļūst koka konstrukciju izmantošana, arvien izplatītāks ir arī koka karkasa konstrukciju lietojums jaunu ēku celtniecībā, kā arī esošo ēku modernizēšanā/renovācijā. Modulārā koka karkasa konstrukcija lieliski atbilst neklasificēto ēku vajadzībām, ļaujot būtiski samazināt būvniecības laiku un integrēt dažādus aktīvus un pasīvus elementus, piemēram, svaiga gaisa padeves kanālus. Promocijas darbā gaitā veikts pētījums par 12 mm bieza aramīda ballistisko paneli. Tika modelēti dažādu modulāro ārsienu risinājumi, analizēts ballistiskais koka konstrukcijas panelis ar iestrādātu gaisa vadu, pārbaudīta to siltumvadītspēja. Galvenā piedāvātās tehnoloģijas priekšrocība ir ātra un kvalitatīva neklasificētu ēku moduļu būvniecība, kas nodrošina visas mūsdienu prasības ne tikai drošībai, bet arī energoefektivitātei un iekštelpu gaisa kvalitātei.

Lai izstrādātu optimālāko ar ballistiskajiem paneļiem pastiprinātas koka karkasa sienas risinājumu, tika piedāvāti seši dažādi sienu komplekti, kas tika pārbaudīti klimatiskajā kamerā (skat. 5.7. tabulu). Vairāki risinājumi tika apvienoti vienā testa sienā. Ballistisko paneli var klasificēt kā ārējo vai iekšējo izvietojumu. Abiem veidiem ir vienādas ložu necaurlaidīgas aizsardzības īpašības.

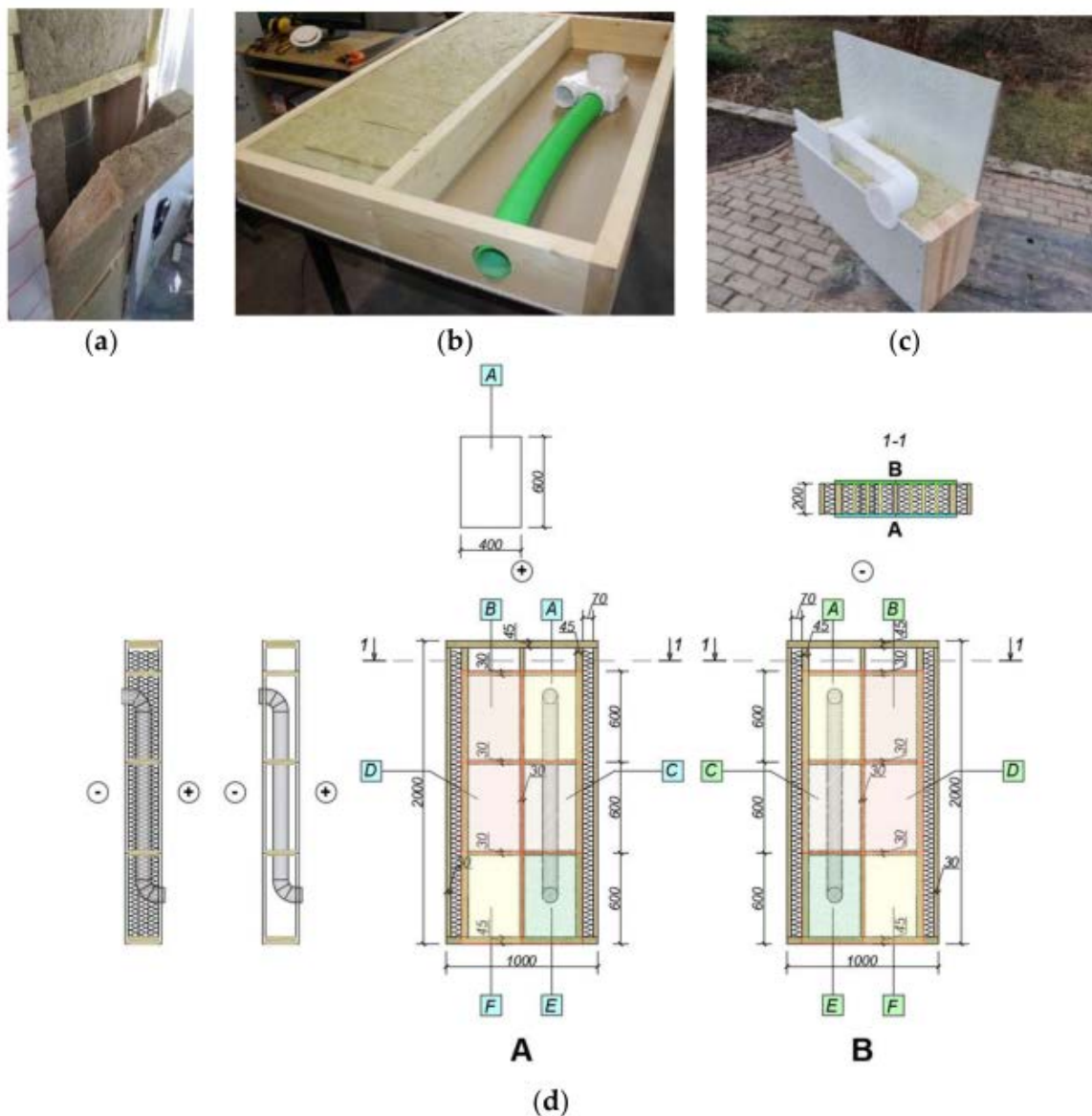
5.7. tabula

Paraugu apraksts

	Paraugs D	Paraugs F	Paraugs G
Iekšējā apdare:	Vieds ūdens tvaika palēninātājs	Vieds ūdens tvaika palēninātājs	Vieds ūdens tvaika palēninātājs
Siltumizolācija	Minerālvate	Ekstrudēts polistirols	Ekstrudēts polistirols
Ārējā apdare	Ballistiskie paneļi	Ballistiskie paneļi	Vēja barjeras
Iebūvēts ventilācijas kanāls	-	-	-
	Paraugs A	Paraugs B	Paraugs C
Iekšējā apdare:	Ūdens tvaika palēninātājs	Ūdens tvaika palēninātājs	Ūdens tvaika palēninātājs
Siltumizolācija	Minerālvate	Ekstrudēts polistirols	Ekstrudēts polistirols
Ārējā apdare	Ballistiskie paneļi	Ballistiskie paneļi	Vēja barjeras

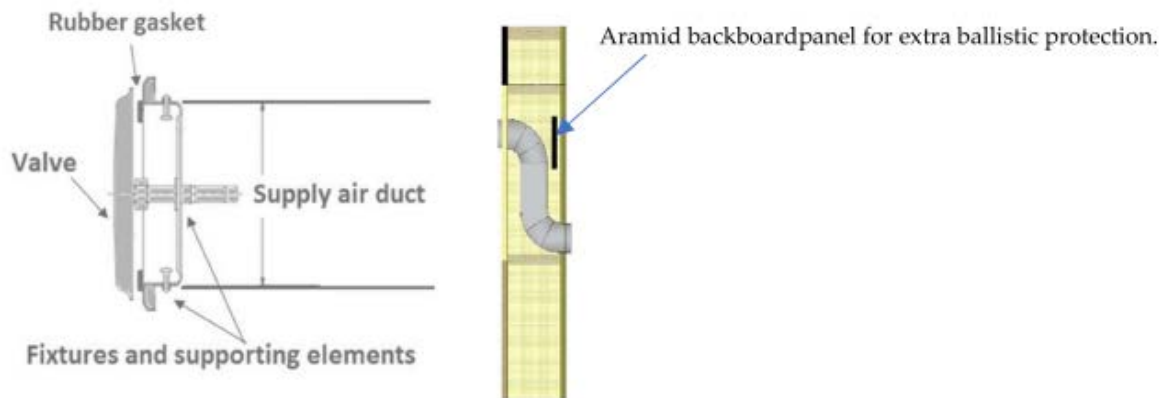
Iebūvēts ventilācijas kanāls	Ir	Ir	Ir
------------------------------	----	----	----

Pētījumu gaitā tika izgatavotas atsevišķas demonstrācijas sienas ar iebūvētiem kanāliem (skat. 5.8. att.). Tas ļāva pārbaudīt sienu montāžas kopējo efektivitāti un novērtēt papildu ballistisko aizsardzības integrāciju. Tika ņemti vērā dažādi ventilācijas kanāli. Galvenais mērķis bija izveidot izkārtojumu, kas novērstu lodes iespiešanos.



5.8. att. Koka karkasa testa konstrukcija ar iestrādātu gaisa vadu: a) tērauda kanāls; b) elastīgs plastmasas kanāls; c) plastmasas kanāli; d) pārbaudes sienas izmēri

Lai avārijas gadījumā (dūmi, ugunsgrēks) nodrošinātu hermētiskumu, gaisa padeves vārstam jānodrošina pietiekama hermēticitāte, kas jāpanāk uzreiz pēc avārijas notikuma konstatēšanas. Iespējamais risinājums parādīts 5.9. att.



5.9. att. Iespējamie risinājumi iebūvētām ventilācijas sistēmām ar papildus ballistisko aizsardzību un dūmu noplūdi

Sienas konstrukcijai, kurā ir uzstādīts gaisa vārsts, jāatbilst minimālajai ugunsizturības klasei EI 60 (skat. 5.8. tabulu).

5.8.tabula

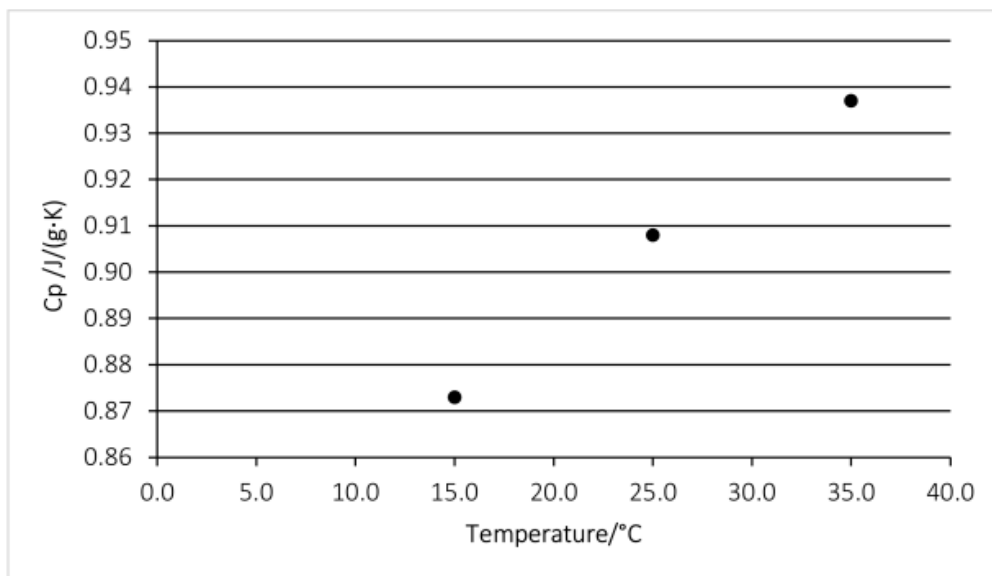
Pārskats par hermētiskā padeves vārsta īpašībām

Vispārīgie raksturlielumi		Materiāli			Tehniskā atbilstība		
Funkcija	Pielietojums	Korpusa materiāls	Blīvējuma materiāls	Stiprinājumi un skrūves	Gaisa necaur laidības klase	Uguns izturība	Uguns izturības I klases sienai
Āra gaisa padeve dabiskās ventilācijas sistēmās	Militārie: pagaidu un pārnēsājamas konstrukcijas	Pārklāts cinkots lokšņu metāls	Neoprēna salikts elastomērs	Alumīnijs, dzelzs	klase 4, EN 1751:2014	EI 15	EI 60

Koka karkasa konstrukcijas ar integrētiem ventilācijas kanāliem U-vērtība

Visos gadījumos U-vērtība koka karkasa konstrukcijai ir $0,27 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Bez integrētajiem kanāliem U vērtība samazinās līdz $0,26 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. U vērtība ir atkarīga no galvenā siltumizolācijas slāņa siltumvadītspējas, un aprakstītajos gadījumos siltumvadītspēja tika pieņemta $0,042 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Aizvietojot materiālus ar siltumvadītspēju $0,034 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, U vērtību var samazināt līdz $0,22 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Šī vērtība varētu būt apmierinoša pagaidu ēku celtniecībai. Precīzākus datus varētu aprēķināt, pamatojoties uz paredzamo pagaidu ēkas ekspluatācijas laiku un projektētajiem iekštelpu gaisa parametriem.

Papildus siltumvadītspējai tika mērīts īpatnējais siltums (5.10 att.). Īpatnējā siltumietilpība C_{p10} ir $860 \text{ K}/\text{kg}/\text{K}$.



5.10. att. Īpatnējā siltuma mērījumi

Jāņem vērā, ka vieglo konstrukciju gadījumā iestrādātajiem kanāliem var būt negatīva ietekme, salīdzinot ar esošo smagsvara konstrukciju modernizēšanu. Trīs gadījumu analīze ir parādīta 5.9. tabulā. Aprēķina modelim iekštelpu un āra temperatūras tika iestatītas šādi: iekštelpu (+20 °C) un āra (-10 °C).

5.9.tabula

Integrētā kanāla ietekme uz vieglās konstrukcijas veiktspēju

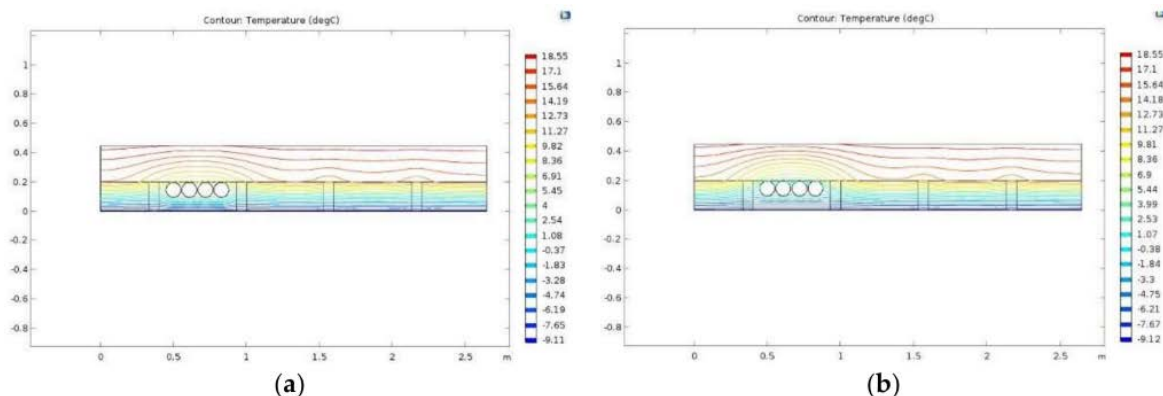
Shēma	Temperatūras sadalījums	Virsmas temperatūra uz iekšējās virsmas aiz kanāla
		17.5 °C
		18.8 °C
		18.8 °C

Color Legend: -9.9° -6.2° -2.6° 1.1° 4.7° 8.4° 12.0° 15.6° 19.3° C

Konstatēts, ka nav negatīvas ietekmes uz ārējo ēkas elementu siltuma caurlaidību kad siltais izplūdes gaiss cirkulē pa iegultajiem kanāliem. Tomēr, ja tiek izslēgta mehāniskā ventilācija, tas izraisa siltuma caurlaidības koeficienta pieaugumu.

Kopējā siltuma plūsma cauri iepriekš minēto konstrukciju ir 16,8750 W. Apskatītie gadījumi atspoguļo esošo ārējo ēkas norobežojošo konstrukciju modernizācijas risinājumus. Vispārējā gadījumā pielietojot piecreiz samazinātu ārsienas siltuma caurlaidības koeficientu, lai atvieglotu jaunas ēkas būvniecības procesu, šī pētījuma ietvaros tiek aplūkotas koka karkasa konstrukcijas. Šādas konstrukcijas ļauj precīzi kontrolēt materiālus un augstu montāžas kvalitāti rūpnīcā ražošanas laikā.

Papildu priekšrocība ir samazinātais uz vietas strādājošo skaits, kas ir ļoti svarīgi neklasificētu ēku celtniecībā, kur ir noteikti papildu drošības un pieejamības ierobežojumi. Vienkāršots sienas risinājums pagaidu ēku celtniecībai varētu aizstāt teltis, tādējādi nodrošinot labāku norobežojuma energoefektivitāti. Papildu simulācija tika veikta programmatūrā COMSOL Multiphysics, lai novērtētu āra gaisa cirkulācijas ietekmi. Simulācijas rezultāti parādīti 5.11. attēlā.



5.11.att. Izotermu sadalījums programmā COMSOL Multiphysics: (a) cirkulācijas gaisa temperatūra +5 °C; (b) cirkulācijas gaisa temperatūra +0 °C

5.10. tabulā parādīta gaisa temperatūras ietekme kanālā uz siltuma zudumiem, kas aprēķināti, izmantojot THERM programmatūru.

5.10. tabula

Cirkulējošā gaisa temperatūras ietekme uz siltuma zudumiem

Cirkulējošā gaisa temperatūra	Izotermas	Siltuma plūsma, W/m	U vērtība, W/m ² K
- 10 °C		27.662	0.346
0 °C		22.666	0.2836
+ 5 °C		20.167	0.2525
+ 20 °C		12.673	0.1586

Kā jau tika minēts iepriekš, integrēto ventilācijas kanālu vājākais punkts ir lodes iekļūšanas risks ballistikajā panelī un kanāla krustpunktā. Papildu ballistikās aizsardzības izvēle lielā mērā ir atkarīga no šaušanas leņķa un attāluma. Iespējamās šaušanas pozīcijas, leņķa projekcijas un ietekme uz papildu ballistikā paneļa izmēru izvēli ir parādīta 5.11. attēlā.

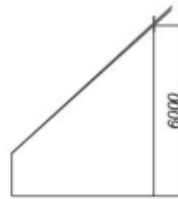
Zemāk esošajā attēlā parādīta viena šāviena ietekme uz ballistisko paneļa fragmentu un nodarītie bojājumi paneļa integritātei. "Sektors" atspoguļo horizontālo iespiešanās dziļumu (x ass), "paaugstinājums" atspoguļo vertikālo iespiešanās dziļumu (y ass).

Shooter initial distance 5000 mm

Height: 9 m
Sector: 77 mm
Elevation: 827 mm



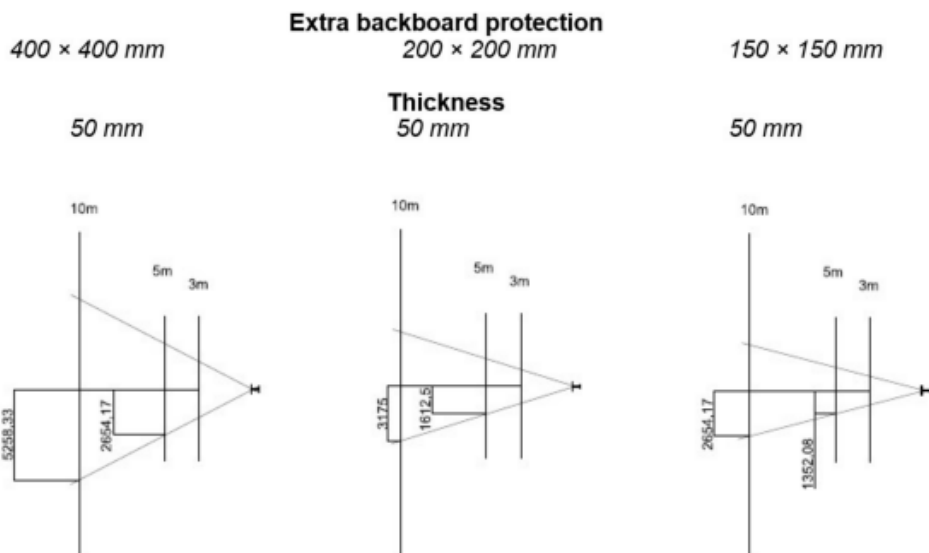
Height: 6 m
Sector: 90 mm
Elevation: 540 mm



Height: 3 m
Sector: 103 mm
Elevation: 253 mm



Height: 1.5 m
Sector: 110 mm
Elevation: 110 mm



5.11. att. Iespējamās šaušanas pozīcijas, leņķa projekcijas

Ložu izturīgas koka karkasa konstrukcijas var nodrošināt gan cilvēku aizsardzību nejaušas apšaudes vai uzbrukuma gadījumā, gan nodrošināt visas ēkas energoefektivitāti. Veiktas simulācijas ir parādījuši, ka iebūvētajam gaisa kanālam nav negatīvas ietekmes uz sienas siltuma pārnese koeficientu. Tomēr cirkulācijas gaisa temperatūra nedrīkst būt zemāka par +20 °C. Siltuma pārnese koeficients samazinās līdz 0,346 W/(m²·K), ja gaisa temperatūra pazeminās līdz -5°C. Šādu risinājumu var izmantot kombinācijā ar mehānisko ventilāciju, kas aprīkota ar rekuperācijas iekārtu. Citos gadījumos to var izmantot kā lokālās āra gaisa padeves atveres ar garumu 0,5 m vai īsāku.

Ložu necaurīdīgu paneli var novietot tikai vienā pusē, kas ievērojami samazina būvniecības izmaksas, vienlaikus nedaudz apdraudot ballistisko drošību. Papildu aramīda pamatne samazina šo risku. Telpas plānojumā jāņem vērā iespējamie negadījumi un jānovērš darba galdu novietošana tuvu ventilācijas atverēm. Droša vieta šādu lokālo ventilācijas atveru uzstādīšanai zem griestiem. Vieglu koka karkasa konstrukciju ar ballistisku aizsardzību var

ieteikt izmantot pagaidu militārajās vai citās pilsētiņās, tādējādi nodrošinot energoefektivitāti un cilvēku drošību nejaušas apšaudes gadījumā.

5.4. Saules enerģijas izmantošanas potenciāla novērtējums

Viena no NEKP 2021.–2030. gada galvenajiem prioritātēm ir energoefektivitātes pasākumu īstenošana ēkās un atjaunojamo energoresursu (AER) tehnoloģiju integrēšana ēkās. Darbā tika aprēķināts enerģijas ražošanas potenciāls (izmantojot saules enerģiju) neklasificēto ēku energoefektivitātes paaugstināšanai.

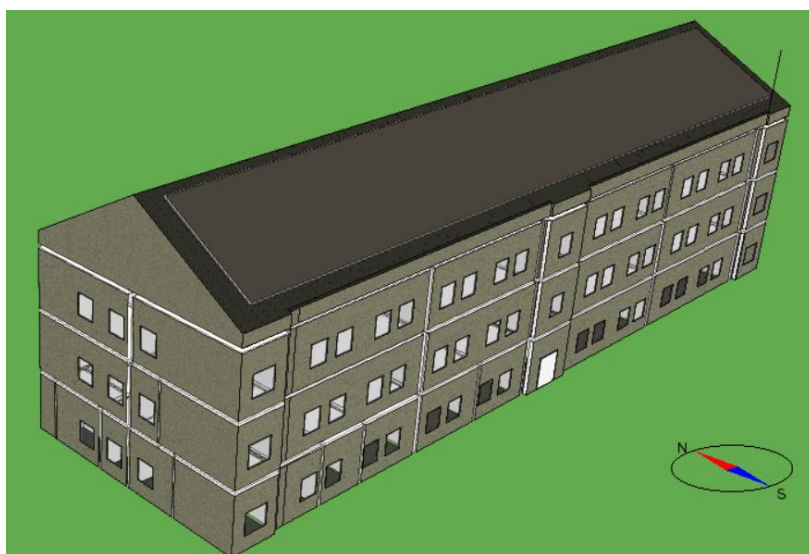
Neklasificēto ēku energoefektivitātes paaugstināšanai tika izskatīti scenāriji enerģijas ražošanai uz vietas, izmantojot atjaunojamus enerģijas avotus – saules kolektorus un paneļus.

Scenāriju simulācijai tika izmantoti divi simulācijas rīki T*Sol un IDA ICE.

T*SOL ir dinamiska simulācijas programma saules kolektoru sistēmu projektēšanai, optimizācijai un aprēķināšanai. IDA ICE ir ēkas veiktspējas simulācijas (BPS) programmatūra. IDA ICE ir simulācijas lietojumprogramma iekštelpu klimata un enerģijas izmantošanas daudzzonu un dinamiskai izpētei. IDA ICE tika pievienoti lokalizācijas paketi, lai efektīvāk izstrādātu simulācijas modeli. Papildus lietotāja saskarei, reģionālajām atrašanās vietām un klimata failiem dažas lokalizācijas pakotnes atbalsta arī reģionālos būvniecības noteikumus un ietver pielāgotus ziņojumus.

1. scenārijs: saules kolektori - siltuma un karsta ūdens sagatavošanai. Modelēta un simulēta reāla ēka (skat. attēlu 5.12.), tās parametri doti tabulā 5.11. un saules kolektoru parametri Tabula 5.11. Ņemot vērā, ka šī ir pilsētiņa un katra ēka novietota citādāk (skat. att. 1.6), tika veiktas dažādas simulācijas dažādām ēku orientācijām (pret debespusēm), saules kolektoru orientācija bija nosimulēta uz visam debespusēm, tas tika darīts, lai noteiktu visaugstāko saules kolektoru veiktspēju.

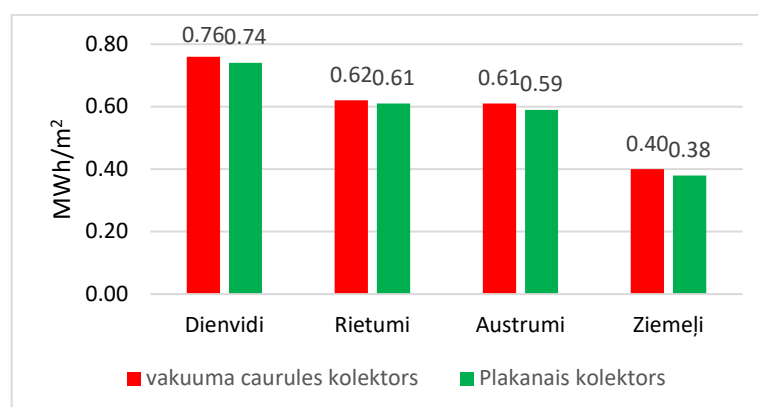
2. scenārijs: PV - elektroenerģijas ražošanai. Visi ēkas parametri ir līdzīgi kā pirmajā gadījumā (skat. tabulu 5.11).



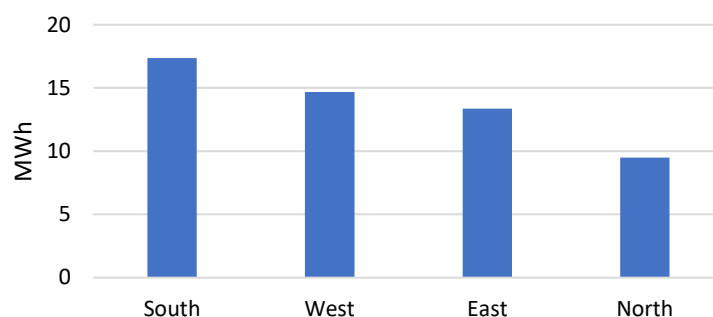
5.12. att. Ēkas modelis

Modelētas ēkas parametri

Ēkas parametri	
Atrašanās vieta	Rīga
Apkurināmo grīdu laukums	3297,2 m ²
Tilpums	11664,5 m ³
Zemes platība	832,1 m ²
Logu / norobežojošo konstrukciju attiecība	6,4 %
Vidējā U - vērtība	0,9682 W/(m ² K)
Jumta sānu zona	504 m ²
Jumta slīpums	30°
1.scenārijs: Saules kolektoru parametri	
Kolektoru platība	385 m ²
Kolektoru daudzums	180
Platība aizņemtā ar kolektoriem	76
2. scenārijs: PV parametri	
PV paneļu daudzums	32
Nominālā jauda	576 W
MPP spriegums	132 V
MPP strāva	4,37 A
Kopējā jauda	18,43 kWp
PV platība	371,2 m ²



5.13. att. Saules starojuma daudzums uz kolektoru aktīvās virsmas gada laikā



5.14. att. Elektroenerģijas daudzums saražotais gada laikā

Simulācijas rezultātus ir iespējams izmantot militāro pašpietiekamo kopienu (militāras pilsētiņas, militāras bāzes utt.) energoapgādes risinājumu izstrādei. Piemēram, paredzot saražotas enerģijas daudzumu dienas laikā un salāgojot to ar enerģijas izmantošanas profilu.

5.5. Iespējamās ekonomiskās ietekmes aprēķins, realizējot neklasificēto ēku energoefektivitātes paaugstināšanas programmas

Mūsdienu apstākļos, sakarā ar neklasificēto ēku novecojušā fonda morālā un fiziskā nolietojuma pieaugumu, rodas steidzama nepieciešamība tā renovācijā. Renovācijas mērķis ir nodrošināt esošā morāli un fiziski novecojušā fonda atbilstību sociālajām un tehniskajām normām, standartiem un pagaidu atrašanās vai uzturēšanās nosacījumiem šajās ēkās. Alternatīva iespēja neklasificēto ēku novecojušā fonda rekonstrukcijai ir tā nojaukšana un jaunas ēkas būvniecība atbrīvotajā teritorijā.

Tomēr, ņemot vērā to, ka pašlaik neklasificēto ēku būvniecības attīstībai trūkst pietiekamu tehnisko un materiālo resursu, renovācija ir vienīgais veids, kā saglabāt un palielināt esošo fondu.

Ēku renovācija galvenokārt ir vērsta uz to energoefektivitātes paaugstināšanu [101].

Būtiska energoresursu ietaupīšana ir ēkas ārējo norobežojošo konstrukciju siltināšanas paaugstināšana, pieplūdes – izplūdes ventilācijas uzstādīšana ar gaisa siltuma rekuperatoru, kas ļauj samazināt ēkas apkures sistēmas slodzi, apkures sistēmas modernizācija, energoefektīva apgaismojuma uzstādīšana, kā arī Saules siltumenerģijas iekārtu izmantošana - saules kolektori.

Tāpat arī nozīmīga loma energoresursu ietaupīšanā ir iepriekš minēto inženiersistēmu un ierīču darba vadības procesu automatizācija.

Iespējamās ekonomiskās ietekmes aprēķins, realizējot neklasificēto ēku energoefektivitātes paaugstināšanas programmas, balstījās uz 2019. gada novembrī realizēto administratīvās ēkas, kas sastāvēja no divām blakus esošām ēkām – galvenā un jaunizbūvētā korpusa, renovācijas projektu. Ēkas pamatdaļa tika uzbūvēta 1930. gadā – viena divstāvu ķieģeļu ēka ar cokola stāvu. 1989. gadā tika piebūvēts jauns korpus – trīs stāvu ķieģeļu mūra ēka ar pagrabstāvu. Administratīvās ēkas kopējā izmantojamā platība ir 2288,10 m².

Lai caur ēkas fasādēm samazinātu siltuma zudumus, projektēšanas dokumentācijā tika paredzēta ēku kompleksā siltumizolācija, izmantojot 150 mm biezu siltumizolācijas materiālu ar īpatnējo siltumvadītspēju 0.036 W/mK.

Bēniņu pārseguma siltināšanas projektēšanā tika paredzēts izmantot 350 mm biezu siltumizolācijas materiālu ar īpatnējo siltumvadītspēju 0.035 W/mK. Tāpat arī projekta realizācijas ietvaros tika pilnīgi nomainīts renovēto ēku jumta segums un veikta ēkas pamatu siltināšana.

Viencauruļu apkures sistēma tika nomainīta ar divcauruļu. Visās ēkas telpās tika uzstādīti jauni radiatoru ar regulēšanas armatūru. Tika veikta daļēja ēkas siltummezgla rekonstrukcija. Pilnībā tika rekonstruēta pieplūdes – izplūdes ventilācija. Tika ierīkota ventilācijas sistēma ar nosūces gaisa siltuma utilizāciju (85% efektivitāte).

Tāpat arī tika ierīkota saules kolektoru sistēma, lai nodrošinātu aukstā ūdens priekšsildīšanu, kas tiek izmantots karstā ūdens apgādes sistēmā. Visā ēkā tika uzstādīta LED armatūra. Automatizēti uzstādīto inženiersistēmu kontroles un vadības procesi ar online monitoringa iespēju.

Darbu veikšanas laikā tika izpildītas visas pamatmetodes, kas ļauj maksimāli samazināt energoresursu patēriņu, uzlabot siltuma komfortu un gaisa kvalitāti, kā arī renovētās ēkas kopējo tehnisko stāvokli, kas savukārt var būt nepieciešamo veicamo pasākumu minimums, īstenojot energoefektivitātes projektus neklasificētās ēkās un nosakot (aprēķinot) iespējamo ekonomisko ietekmi.

Projekta kopējās izmaksas bija 706 859,80 EUR, ņemot vērā valsts nodokļu slogu vai pārrēķinot uz ēkas izmantojamās platības vienu kvadrātmetru: 706 859.80 EUR / 2288.10 m² = 308.93 EUR/m².

Projekts tika realizēts pēc iepriekš saskaņotas tāmes, kurā tika norādītas būvniecības materiālu, mehānismu cenas, kā arī darbinieku darba samaksas izmaksas 2018. gada sākumā.

Lai noteiktu energoefektivitātes projektu realizācijas prognozēto ekonomisko efektu neklasificētajās ēkās, gadījumā, ja tiks turpināta projekta realizācija, uz laika posmu no 2018. gada līdz 2022. gadam viena kvadrātmetra izmaksas nepieciešams pārskatīt uz augšu, ņemot vērā 2019. gadā jau noteikto un prognozēto būvniecības cenu pieaugumu nākamajos gados un līdz 2022. gadam. Protams, ņemot vērā ģeopolitisko situāciju pasaulē jau tagad novērojamas būvniecības cenu kāpums, bet tas ir parejoša parādība, tāpēc darbā visi aprēķini tika veikti pamatojoties uz 2018. gadā veiktā INK ANALYTICS zinātniskā statistikas pētījuma iegūtajiem datiem pēc Latvijas Republikas Ekonomikas ministrijas pasūtījuma „Pētījums par prognozētām izmaiņām darbaspēka un būvmateriālu izmaksās būvniecības nozarē Latvijā laika periodā no 2018. līdz 2022. gadam”, prognozētais cenu pieaugums būvniecības nozarē vidēji var sasniegt 5% gadā, t.i., uz projekta realizācijas brīdi 2022. gadā viena kvadrātmetra izmaksas (Pm²) var sasniegt jau 370,71 EUR un vairāk.

Būvniecības nozares pakalpojumu cenu pieauguma dati ir norādīti tabulā 5.6. Veicot prognožu aprēķinu, pētījumā būtiski ir noteikt laika periodu, par kuru izmantot pagātnes datus. ņemot vērā, ka būvniecības nozarē Latvijā tika novērotas ļoti būtiskas izmaiņas ekonomiskās krīzes periodā, tika izmantoti dati no 2009. gada, lai attēlotu pēdējo stabilās attīstības periodu. Uzskatāmībai tiek uzrādīti pagātnes dati par pēdējiem 5 gadiem un prognozes par nākamajiem 5 gadiem [102] (5.12. tabula).

5.12. tabula

Būvniecības izmaksu izmaiņu prognozes (ekstrapolācija) būvniecības nozarē pavisam un pa resursu veidiem procentos pret iepriekšējo periodu. Mērvienība- % izmaiņas pret iepriekšējo gadu

Gads	Būvniecība - pavisam	Būvmateriāli	Strādnieku darba samaksa	Mašīnu un mehānismu uzturēšana un ekspluatācija
Pagātnes dati (fragments)				
2013.	+2,5	+1,0	+5,8	+2,3
2014.	+0,4	-3,4	+3,1	+0,4
2015.	+0,1	-1,8	+6,7	+0,0
2016.	-0,5	-3,2	+4,8	+1,1
2017.	+1,9	+1,4	+4,5	+1,0
Prognoze pēc piemērotākā ekstrapolācijas modeļa				
2018.	+3,82	+0,87	+11,36	+2,77
2019.	+4,31	+1,16	+12,53	+2,84
2020.	+4,76	+1,42	+13,60	+2,91
2021.	+5,16	+1,65	+14,58	+2,97
2022.	+5,54	+1,87	+15,47	+3,02

Avots: no 2009. līdz 2017. gadam CSP statistikas dati. [103] Laika periodam 2018.-2022. darba autoru (INK ANALYTICS) veikta prognoze, balstoties uz vēsturiskajiem CSP datiem.

Kopumā šī zinātniskā darba ietvaros tika izskatītas 92 neklasificētas ēkas, no kurām 27 ēkas pieder Valsts policijai (VP), 40 ēkas pieder Ugunsdzēsības dienestam (VUGD), un 25 ēkas atrodas LR Aizsardzības ministrijas (AM) valdījumā. Analizēto ēku kopējā izmantojamā platība (S_Σ) bija **127 466,9 m²**. Dati par analizēto neklasificēto ēku platībām un darbības gadiem, kas pieder noteiktai ministrijai, ir norādīti 5.13, 5.14., 5.15. tabulās.

5.13. tabula

Zinātniskajā darbā izskatītas Latvijas Republikas Aizsardzības ministrijas (AM) valdījumā esošo ēku ekspluatācijas uzsākšanas gads un kopējā platība

Nr.p.k.	Ēkas nosacīts apzīmējums*	Ekspluatācijas uzsākšanas gads	Ēkas kopējā platība, m ²
1.	AM ēka Nr.1	1985	385.9
2.	AM ēka Nr.2	1910	2387.4
3.	AM ēka Nr.3	1910	2388.3
4.	AM ēka Nr.4	1982	8558.5
5.	AM ēka Nr.5	1926	3354.9
6.	AM ēka Nr.6	1952	1784.7
7.	AM ēka Nr.7	1960	727.3
8.	AM ēka Nr.8	1972	3820.1
9.	AM ēka Nr.9	1970	3768.1
10.	AM ēka Nr.10	1972	3812.7

11.	AM ēka Nr.11	1973	3763.1
12.	AM ēka Nr.12	1910	2537.7
13.	AM ēka Nr.13	1925	1293.4
14.	AM ēka Nr.14	1982	541.9
15.	AM ēka Nr.15	1976	1012.1
16.	AM ēka Nr.16	1926	7671.3
17.	AM ēka Nr.17	1972	2674.1
18.	AM ēka Nr.18	1973	794.7
19.	AM ēka Nr.19	1968	4041.7
20.	AM ēka Nr.20	1968	1859.7
21.	AM ēka Nr.21	1965	6249
22.	AM ēka Nr.22	1978	2098.9
23.	AM ēka Nr.23	2016	3005.3
24.	AM ēka Nr.24	2016	1844.6
25.	AM ēka Nr.25	1994	5843.8
Kopā, m²			76219.2

*informācija par adresēm ir apzināti slēpta. Dati varētu būt publiski pieejami pēc saskaņošanas ar atbildīgajām institūcijām.

5.14. tabula

Zinātniskajā darbā izskatītas Latvijas Republikas Iekšlietu ministrijas (IeM) valdījumā esošo ēku ekspluatācijas uzsākšanas gads un kopējā platība.

Ugunsdzēsības iecirkņi.

Nr.p.k.	Ēkas nosacīts apzīmējums*	Ekspluatācijas uzsākšanas gads	Ēkas kopējā platība, m ²
1.	VUGD ēka Nr.1	1967	900.0
2.	VUGD ēka Nr.2	1982	471.6
3.	VUGD ēka Nr.3	1987	563.1
4.	VUGD ēka Nr.4	1980	1125.5
5.	VUGD ēka Nr.5	1963	409.2
6.	VUGD ēka Nr.6	1936	357.0
7.	VUGD ēka Nr.7	1999	301.3
8.	VUGD ēka Nr.8	1989	876.8
9.	VUGD ēka Nr.9	1992	352.5
10.	VUGD ēka Nr.10	1963	537.1
11.	VUGD ēka Nr.11	1993	1912.1
12.	VUGD ēka Nr.12	1961	323.0
13.	VUGD ēka Nr.13	1965	295.0
14.	VUGD ēka Nr.14	1986	414.6
15.	VUGD ēka Nr.15	1898	278.1
16.	VUGD ēka Nr.16	1986	1680.2
17.	VUGD ēka Nr.17	1960	348.5
18.	VUGD ēka Nr.18	1970	799.1
19.	VUGD ēka Nr.19	1900	323.8
20.	VUGD ēka Nr.20	1960	816.0
21.	VUGD ēka Nr.21	1960	590.9
22.	VUGD ēka Nr.22	1960	790.2
23.	VUGD ēka Nr.23	1971	693.7
24.	VUGD ēka Nr.24	1965	1589.9
25.	VUGD ēka Nr.25	1965	646.1
26.	VUGD ēka Nr.26	1958	418.6
27.	VUGD ēka Nr.27	1973	851.0
28.	VUGD ēka Nr.28	1969	534.2
29.	VUGD ēka Nr.29	1964	823.0

30.	VUGD ēka Nr.30	1900	301.2
31.	VUGD ēka Nr.31	1960	642.6
32.	VUGD ēka Nr.32	1920	273.4
33.	VUGD ēka Nr.33	1952	462.8
34.	VUGD ēka Nr.34	1934	761.5
35.	VUGD ēka Nr.35	1900	536.8
36.	VUGD ēka Nr.36	1962	324.9
37.	VUGD ēka Nr.37	1986	1000.1
38.	VUGD ēka Nr.38	1997	621.2
39.	VUGD ēka Nr.39	1990	531.4
40.	VUGD ēka Nr.40	1995	632.9
	Kopā, m²		26110.9

*informācija par adresēm ir apzināti slēpta. Dati varētu būt publiski pieejami pēc saskaņošanas ar atbildīgajām institūcijām.

5.15. tabula

Zinātniskajā darbā izskatīts Latvijas Republikas Iekšlietu ministrijas (IeM) valdījumā esošo ēku ekspluatācijas uzsākšanas gads un kopējā platība.

Policijas iecirkņi.

Nr.p.k.	Ēkas nosacīts apzīmējums*	Ekspluatācijas uzsākšanas gads	Ēkas kopējā platība, m ²
1.	VP ēka Nr.1	1966	543.5
2.	VP ēka Nr.2	1990	1134.3
3.	VP ēka Nr.3	1977	569.0
4.	VP ēka Nr.4	2000	1158.7
5.	VP ēka Nr.5	1984	254.5
6.	VP ēka Nr.6	2000	2152.9
7.	VP ēka Nr.7	2000	545.7
8.	VP ēka Nr.8	1976	1490.7
9.	VP ēka Nr.9	2001	500.8
10.	VP ēka Nr.10	1970	823.3
11.	VP ēka Nr.11	1930	496.2
12.	VP ēka Nr.12	1800	1310.4
13.	VP ēka Nr.13	1969	738.8
14.	VP ēka Nr.14	1992	1980.7
15.	VP ēka Nr.15	1972	1587.0
16.	VP ēka Nr.16	1900	544.0
17.	VP ēka Nr.17	1980	535.2
18.	VP ēka Nr.18	1970	268.8
19.	VP ēka Nr.19	1937	2282.7
20.	VP ēka Nr.20	1950	544.4
21.	VP ēka Nr.21	1970	839.2
22.	VP ēka Nr.22	1997	400.0
23.	VP ēka Nr.23	1999	1206.8
24.	VP ēka Nr.24	1989	1047.3
25.	VP ēka Nr.25	1999	392.0
26.	VP ēka Nr.26	1930	1327.9
27.	VP ēka Nr.27	1995	462.0
		Kopā, m²	25136.8

*informācija par adresēm ir apzināti slēpta. Dati varētu būt publiski pieejami pēc saskaņošanas ar atbildīgajām institūcijām.

Zinot apskatāmo renovēto neklasificēto ēku kopējo platību S_{Σ} , kā arī iespējamās viena kvadrātmetra izmaksas (P_m^2) 2022. gadā, var aprēķināt iespējamo kopējo izdevumu budžetu,

kas ir paredzēts neklasificētu ēku energoefektivitātes paaugstināšanas projektu īstenošanai, kas, ievērojot iepriekš noteiktos nosacījumus var sastādīt:

$$TC = S_{\Sigma} \times P_m^2 = 127\,466,9\text{m}^2 \times 370,71\text{ EUR} = 47\,253\,254,50\text{ EUR}.$$

Pēc renovācijas pabeigšanas ēkas energoefektivitātes rādītāji (apkure, karstā ūdens sagatavošana, mehāniskā ventilācija, apgaismojums un gaisa kondicionēšana) tika samazināti no 188.30 kWh/m² gadā līdz 85.49 kWh/m² gadā vai par 54.59%. Saskaņā ar šajā zinātniskajā darbā 1.2. un 1.3. nodaļā norādītajām vērtībām, vidējais īpatnējais patēriņš Latvijas Republikas Aizsardzības ministrijas (AM) valdījumā esošajām ēkām ir 230 kWh/m² gadā, vidējais īpatnējais enerģijas patēriņš Latvijas Republikas Iekšlietu ministrijas (IeM) valdījumā esošajām ēkām, - policijas iecirkņos izmērītais vidējais gada enerģijas patēriņš ir 252 kWh/m², bet ugunsdzēsības iecirkņos - 317 kWh/m². Lai noteiktu prognozēto ekonomisko ietekmi, tiek ņemta vērā vidējā aritmētiskā enerģijas patēriņa vērtība neklasificētajās ēkās:

$$Q_{\text{vid. AM, IeM}} = (230\text{ kWh/m}^2 + 252\text{ kWh/m}^2 + 317\text{ kWh/m}^2) / 3 = 266.33\text{ kWh/m}^2\text{ gadā}.$$

Saskaņā ar Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisijas datiem, siltumenerģijas apgādes pakalpojumu tarifi Latvijā 2019. gadā svārstījās no maksimālās vērtības 69.98 EUR/MWh (bez PVN) Zvejniekciema un Saulkrastu darbības teritorijā līdz minimālajai vērtībai 45.01 EUR/MWh (bez PVN) Zebrenes pagastā [104].

Vidēji Latvijā siltumenerģijas apgādes pakalpojumu tarifi 2019. gadā (C_{2019}) bija 58 EUR/MWh (vai 0,058 EUR/kWh). Prognozētās ekonomiskās ietekmes noteikšanai tiek pieņemta vērtība 0,058 EUR/kWh.

Zinot $Q_{\text{vid. AM, IeM}}$, C_{2019} un S_{Σ} vērtības, noteiksim iespējamās kopējās apkures pakalpojumu izmaksas ($C_{\text{kopējas } 2019}$) 2019. gadā nekvalificētām ēkām:

$$C_{\text{kopējas } 2019} = (Q_{\text{vid. AM, IeM}} \times C_{2019}) \times S_{\Sigma} = (266.33\text{ kWh/m}^2 \times 0,058\text{ EUR/kWh}) \times 127\,466,9\text{m}^2 = 1\,968\,999,05\text{ EUR}\text{ gadā}.$$

Pieņemot, ka nekvalificētu ēku renovācijas beigās var uzlabot energoefektivitātes rādītājus un samazināt enerģijas izmaksas par 54,59%, mēs iegūstam **kopējo iespējamo izmaksu ietaupījumu 1074876,58 EUR gadā vai 8,43 EUR/m²**.

5.6. Secinājumi

1. Lai gan arvien lielāka uzmanība tiek pievērsta energoefektīvu pasākumu ieviešanai ēkās, pasaules enerģijas patēriņš pastāvīgi palielinās. Galvenā mērķa grupa energoefektivitātes pasākumu ieviešanā būvniecības nozarē ir daudzdzīvokļu un sabiedriskās ēkas. Tikmēr nepietiekami tiek risināts jautājums par energoefektivitāti neklasificētās ēkās, jo šīs ēkas nav valsts subsidētas. Tomēr nevajadzētu atstāt novārtā arī tādu ēku kā ugunsdzēsības depo un militāro ēku enerģijas patēriņu. Pirmkārt, vairums, šo ēku tikušas, uzceltas pirms 1990. gadiem bez būtiskas siltumizolācijas. Otrkārt, ugunsdzēsības depo un militārās ēkas darbojas visu diennakti, un to personālam jānodrošina pietiekams siltuma komforts un iekštelpu gaisa kvalitāte. Pašlaik termiskā komforta apstākļus var nodrošināt tikai atjaunotās hermētiskās ēkās.

2. Šī pētījuma rezultāti parāda, ka mehāniskās ventilācijas sistēmas uzstādīšana bez izplūdes gaisa siltuma rekuperācijas vienības ievērojami palielina enerģijas patēriņu pat labi izolētai ēkai.
3. Dinamiska enerģijas modelēšana tipiskam ugunsdzēsības depo ir parādījusi labu korelāciju ar izmērītajiem datiem. Balstoties uz dinamisko enerģijas modelēšanu, teorētiskie enerģijas ietaupījumi tika novērtēti trīs dažādiem scenārijiem. Tipiska dziļas modernizācijas pasākumu pakete ļauj par 66% samazināt siltumenerģiju telpas apsildīšanai. Mehāniskās ventilācijas sistēmas uzstādīšana bez siltuma rekuperācijas palielina enerģijas patēriņu par 72%, salīdzinot ar atjaunotu ēku bez mehāniskas ventilācijas.
4. Militārajās ēkās enerģijas patēriņš samazinās atbilstoši ēkas celtniecības datumam, norādot uz laika gaitā pakāpenisku uzlabošanu labākas ēku siltumtehnikas prakses ieviešanā.
5. Kopējais vidējais izmērītais militāro ēku enerģijas patēriņš gadā bija 230 kWh /m², bet vidējās aprēķinātās (teorētiskās) enerģijas patēriņa vērtības militārajām ēkām bija 153 kWh /m² (par 33% zemākas nekā izmērīts). Šī neatbilstība skaidri norādīja uz militāro ēku faktiski sliktu veiktspēju salīdzinājumā ar teorētiski pieņemamo energoefektivitāti, kas balstās uz pašreiz spēkā esošajām ēku energoefektivitātes prasībām.
6. Veiktā programmatūras modelēšana un dažādu militāro kazarmu atjaunošanas metožu salīdzinājums parādīja, ka, izmantojot dažādus instrumentus, kas var palielināt ēkas energoefektivitāti, kā arī to apvienojumus, enerģijas patēriņš ievērojami samazinās - līdz pat 25,5 kWh/m².
7. Policijas iecirkņos izmērītais vidējais gada enerģijas patēriņš ir 252 kWh/m², bet ugunsdzēsības punktos - 317 kWh/m². Policijas departamenta ēku enerģijas profils parādīja līdzīgu tendenci kā militārām ēkām (ar enerģijas patēriņa samazinājumu, palielinoties celtniecības gada skaitlim). Savukārt analizētās ugunsdzēsības depo ēkas parādīja dažas pretējas tendences - ar nelielu enerģijas patēriņa pieaugumu telpu apsildīšanai un karstajam ūdenim ēkām no vēlākiem būvniecības gadiem.
8. Tā kā ievades dati par neklasificētām ēkām Latvijas normatīvajos aktos nav definēti, energoauditori parasti ņem vērā vienkāršotus ievades datus, ko izmanto civilām (dzīvojamajām un/vai sabiedriskajām) ēkām, kas var izraisīt lielu neatbilstību starp faktisko un teorētisko sniegumu.
9. Balstoties uz iegūtajiem reālajiem fizikālajiem un ekonomiskajiem datiem, tika aprēķināts iespējamais ekonomiskais efekts, ko var iegūt ar nosacījumu, ka neklasificētajās ēkās tiek īstenotas 54,59% energoefektivitātes programmas, un tika sasniegts kopējo potenciālo izmaksu ietaupījums EUR 1 074 876,58 apmērā gadā jeb 8,43 EUR/m².

SECINĀJUMI

Veiktā promocijas darba sākumposmā neklasificēto ēku segmentā detalizētā enerģijas patēriņa datu analīze un pētāmo objektu saņemtie praktiskie rādītāji spilgti norādīja uz promocijas darbā izskatīto jautājumu aktualitāti, pētītās tematikas izvēles pareizību, kā arī iespējamo turpmāko ekonomisko ieguvumu, ņemot vērā promocijas darbā sniegtos norādījumus un skaidrojumus.

1. Klimata pārmaiņu jautājumi, t.sk., siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisiju samazināšana un oglekļa dioksīda (CO₂) piesaiste, ir Eiropas Savienības (ES) uzmanības centrā un ir ļoti būtiski arī Latvijai. Latvijas Ilgtspējīgas attīstības stratēģijā līdz 2030. gadam Latvija 2030 noteikts, ka „Latvija – mūsu mājas – zaļa un sakopta, radoša un ērti sasniedzama vieta pasaules telpā, par kuras ilgtspējīgu attīstību mēs esam atbildīgi nākamo paaudžu priekšā”.
2. Pieņemot Energoefektivitātes direktīvu 2012/27/ES, Eiropas Savienības valstis, arī Latvija ir nolēmušas veikt dažādus pasākumus, lai uzlabotu gan enerģijas ražošanas un piegādes, gan patērēšanas efektivitāti. Direktīva paredz arī obligātu mērķi – katrai valstij katru gadu ir jānodrošina galapatērētāju energoefektivitātes pasākumi, kas ļautu ietaupīt 1,5% no visas valstī galapatērētājiem piegādātās enerģijas.
3. Atbilstoši Energoefektivitātes direktīvai, sākot ar 2014. gadu, dalībvalstīm katru gadu jārenovē 3% no to valstij piederošo ēku, to vidū arī neklasificētas ēkas, tādas kā militārās ēkas, policijas ēkas un ugunsdzēsēju depo. Apkopojot promocijas darbā veiktās izpētes, konstatēts, ka neklasificēto ēku energoefektivitāte varētu būt un vajadzētu būt paaugstināma. Energoefektivitātes uzlabošanu var sasniegt gan sistematizējot datus, gan ar izmaiņām normatīvajos aktos, nosakot dažādas prasības, tehnoloģiskām izmaiņām, gan vadības un organizatoriskiem uzlabojumiem valsts īpašumā (neklasificētas ēkas) esošajām ēkām, gan ar individuālo patērētāju uzvedības maiņu, kas panākta, patērētājus izglītojot un informējot, neizmirstot pētījumā sektora specifiku.
4. Darbs aplūko neklasificēto ēku portfolio Latvijā, proti, salīdzinot ēku vecumu dažādu dienestu ietvaros. Balstoties uz pētījuma rezultātiem tika piedāvāta optimālākā ēku energoefektivitātes noteikšanas metodoloģija. Metodoloģijas pamatā ir statistiskās un mašīnmācīšanās metodes – hibrīdmetode, kas ietver gan inženiertehnisko, gan statistisko modeļu apvienojumu, un kā ieejas datus statistiskajiem modeļiem izmanto inženiertehnisko modeļu izejas datus. Šo modeļu mērķis ir kompensēt dažus ierobežojumus, kas saistīti ar fizisko modelēšanu, izmantojot elastīgo statistisko pieeju. Modeļu izstrādes darbpļūsmas, kas paredzētas atsevišķām ēkām, prasa ievērojamu piepūli, kas būtu pārāk dārgi laika un izmaksu dēļ, piemērojot šo metodi centros, kuros bieži ietilpst simtiem daudzveidīga lietojuma ēku. Kamēr mazāki centri var efektīvi izmantot tradicionālo BEM pieeju, lai pētītu modernizācijas scenārijus, lielākajiem centriem šī iespēja nav pielietojama. Statistisko un izklājlapu modeļu kombināciju, kas, iespējams, pilnībā neaptver atsevišķu pilsētiņas ēku unikālās arhitektūras iezīmes, programmnodrošinājuma prasības un sistēmu

konfigurācijas, joprojām var izmantot, lai precīzi prognozētu ietaupījumus no dažādu modernizēšanas pasākumu ieviešanas. Neklasificētu ēku, kas galvenokārt atrodas ziemeļu klimatā, izpēte rāda, ka enerģijas patēriņš lielākoties ir saistīts ar apkures, dzesēšanas un karstā ūdens sagatavošanas mērķiem. Par enerģijas patēriņu mākslīgajam apgaismojumam var pieņemt tā vidējās vērtības sabiedriskām ēkām atkarībā no cilvēku aktivitātes un nepieciešamā apgaismojuma luksos, kas norādītas Eiropas un valstu standartos un būvnormatīvos. Apsverot iespējamus enerģijas avotus, ir svarīgi atzīmēt, ka enerģijas avotus (fosilo vai atjaunojamo kurināmo) apkurei, dzesēšanai un karstā ūdens sagatavošanai neklasificētām ēkām var izvēlēties, pamatojoties uz esošajām vajadzībām un iespējām, atkarībā no ēkas veida (stacionāras vai pārvietojamas) un citiem dažādiem tehniski ekonomiskiem parametriem.

5. Balstoties uz promocijas darbā iegūtajiem reālajiem fizikālajiem un ekonomiskajiem datiem, tika aprēķināts iespējamais ekonomiskais efekts, ko var iegūt ar nosacījumu, ka neklasificētajās ēkās tiek īstenotas 54,59% energoefektivitātes programmas, un tika sasniegts kopējo potenciālo izmaksu ietaupījums EUR 1 074 876,58 apmērā gadā jeb 8,43 EUR/m².
6. Neklasificētu ēku energoefektivitātes risinājumi ir aktuāls jautājums, it īpaši tāpēc, ka liela daļa neklasificēto ēku tiek uzturēta par publiskiem līdzekļiem un uzturēšanās izmaksu samazinājums dot iespēju ietaupīto līdzekļu pārdalīšanai un novirzīšanai neklasificēto ēku segmentu attīstībai, kā arī sniedz savu atbalstu klimata pārmaiņu problēmu risināšanā.

LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] F. Ascione, R. F. De Masi, M. Mastellone, and G. P. Vanoli, "Building rating systems: A novel review about capabilities, current limits and open issues," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 76, 2022, doi: 10.1016/j.scs.2021.103498.
- [2] UNEP, "2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction," *Glob. Status Rep.*, 2020.
- [3] European Commission, "Energy Efficiency Directive," *Ec.Europa.Eu*, 2015.
- [4] *DIRECTIVE 2010/31/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the energy performance of buildings*. 2010, p. 23.
- [5] M. Rubīna and A. Cers, *Siltumapgādes optimizācija*. 2016.
- [6] Ministru kabinets, *MK noteikumi Nr. 348 "Ēkas energoefektivitātes aprēķināšanas metodika."* 2013.
- [7] M. MacCracken, "Better than Batteries: Creating Resiliency in District Energy Systems Utilizing Thermal Energy Storage," 2018.
- [8] A. Zajacs, "Assessment of Development Scenarios of District Heating Systems.," 2017.
- [9] A. Borodinecs, A. Rodriguez-Gabriel, O. Tatarchenko, and E. Al., *Handbook on Buildings Renovation in Central Baltic Region*. 2015.
- [10] *LBN 221-15 Ēku iekšējais ūdensvads un kanalizācija*. 2015.
- [11] K. Tumanova and A. Borodinecs, "The Extensive Analysis of Circumstances between Heat Consumption of Multi-apartment Buildings and Information Campaigns," in *Energy Procedia*, 2016, vol. 96, doi: 10.1016/j.egypro.2016.09.171.
- [12] K. Ahmed, P. Pylysy, and J. Kurnitski, "Monthly domestic hot water profiles for energy calculation in Finnish apartment buildings," *Energy Build.*, vol. 97, 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.03.051.
- [13] D. Grasmanis, D. O. Sovetnikov, and D. V. Baranova, "Energy performance of domestic hot water systems," *Mag. Civ. Eng.*, 2017, doi: 10.18720/MCE.76.13.
- [14] Ž. Budjko and V. Zēbergs, "Investigation of the domestic hot water consumption in the apartment building," *Sci. J. Riga Tech. Univ. Constr. Sci.*, vol. 10, no. 10, 2010, doi: 10.2478/v10137-009-0003-3.
- [15] *BS EN 15316-3-1:2007 Heating systems in buildings. Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies. Domestic hot water systems, characterisation of needs (tapping requirements)*. 2007.
- [16] Telkonet, "Achieving Military Precision in Energy Efficiency," 2014.
- [17] "Energy consumption," *Energy Information Administration*, 2015. <https://www.eia.gov/>.
- [18] U.S. Energy Flow, "U.S. Energy Information Administration." https://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/pdf/flow/total_energy.pdf.
- [19] EC, "European Commission Buildings," 2017. <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings>.
- [20] IPCC, *Summary for Policymakers, In: Climate Change 2014, Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2014.
- [21] H. X. Zhao and F. Magoulès, "A review on the prediction of building energy consumption," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 6. 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.02.049.
- [22] Z. Li, Y. Han, and P. Xu, "Methods for benchmarking building energy consumption against its past or intended performance: An overview," *Applied Energy*, vol. 124. 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.03.020.
- [23] G. Tardioli, R. Kerrigan, M. Oates, J. O'Donnell, and D. Finn, "Data driven approaches

- for prediction of building energy consumption at urban level,” in *Energy Procedia*, 2015, vol. 78, doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.754.
- [24] I. Korolija, L. Marjanovic-Halburd, Y. Zhang, and V. I. Hanby, “UK office buildings archetypal model as methodological approach in development of regression models for predicting building energy consumption from heating and cooling demands,” *Energy Build.*, vol. 60, 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.12.032.
- [25] H. A. Nielsen and H. Madsen, “Modelling the heat consumption in district heating systems using a grey-box approach,” *Energy Build.*, 2006, doi: 10.1016/j.enbuild.2005.05.002.
- [26] T. Ahmad, H. Chen, Y. Guo, and J. Wang, “A comprehensive overview on the data driven and large scale based approaches for forecasting of building energy demand: A review,” *Energy and Buildings*, vol. 165. 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.01.017.
- [27] T. Catalina, V. Iordache, and B. Caracaleanu, “Multiple regression model for fast prediction of the heating energy demand,” *Energy Build.*, vol. 57, 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.11.010.
- [28] Z. Wang and R. S. Srinivasan, “A review of artificial intelligence based building energy use prediction: Contrasting the capabilities of single and ensemble prediction models,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 75. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.10.079.
- [29] M. Caldera, S. P. Corgnati, and M. Filippi, “Energy demand for space heating through a statistical approach: application to residential buildings,” *Energy Build.*, vol. 40, no. 10, 2008, doi: 10.1016/j.enbuild.2008.05.005.
- [30] “NATO SMART ENERGY CAPABLE LOGISTICIAN 2015,” 2015.
- [31] C. Robinson *et al.*, “Machine learning approaches for estimating commercial building energy consumption,” *Appl. Energy*, vol. 208, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.09.060.
- [32] C. E. Kontokosta, “Modeling the energy retrofit decision in commercial office buildings,” *Energy Build.*, vol. 131, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.08.062.
- [33] B. Griffith and E. Al., “Methodology for Modeling Building Energy Performance across the Commercial Sector,” 2008. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/docs/fy08osti/41956.pdf>.
- [34] G. K. F. Tso and K. K. W. Yau, “Predicting electricity energy consumption: A comparison of regression analysis, decision tree and neural networks,” *Energy*, vol. 32, no. 9, 2007, doi: 10.1016/j.energy.2006.11.010.
- [35] I. Turiel *et al.*, “Estimation of energy intensity by end-use for commercial buildings,” *Energy*, vol. 12, no. 6, 1987, doi: 10.1016/0360-5442(87)90003-X.
- [36] W. Chung, Y. V. Hui, and Y. M. Lam, “Benchmarking the energy efficiency of commercial buildings,” *Appl. Energy*, vol. 83, no. 1, 2006, doi: 10.1016/j.apenergy.2004.11.003.
- [37] P. Hernandez, K. Burke, and J. O. Lewis, “Development of energy performance benchmarks and building energy ratings for non-domestic buildings: An example for Irish primary schools,” *Energy Build.*, vol. 40, no. 3, 2008, doi: 10.1016/j.enbuild.2007.02.020.
- [38] C. Fan, F. Xiao, and S. Wang, “Development of prediction models for next-day building energy consumption and peak power demand using data mining techniques,” *Appl. Energy*, vol. 127, 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.04.016.
- [39] L. Wei, W. Tian, E. A. Silva, R. Choudhary, Q. Meng, and S. Yang, “Comparative Study on Machine Learning for Urban Building Energy Analysis,” in *Procedia Engineering*, 2015, vol. 121, doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.1070.
- [40] M. Yalcintas and U. A. Ozturk, “An energy benchmarking model based on artificial

- neural network method utilizing US Commercial Buildings Energy Consumption Survey (CBECS) database,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 31, no. 4, 2007, doi: 10.1002/er.1232.
- [41] “Net Zero Planner — An Integrated Modeling Tool.” <https://www.rti.org/impact/net-zero-planner-integrated-modeling-tool>.
- [42] S. Booth, J. Barnett, K. Burman, J. Hambrick, and R. Westby, “Net Zero Energy Military Installations : A Guide to Assessment and Planning,” *NREL Tech. Rep.*, no. August, 2010.
- [43] S. Nagpal and C. F. Reinhart, “A comparison of two modeling approaches for establishing and implementing energy use reduction targets for a university campus,” *Energy Build.*, vol. 173, 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.05.035.
- [44] Army NET ZERO, “Guide to Renewable Energy Conservation Investment Program,” 2015.
- [45] Ministru kabinets, “*Ministru kabineta noteikumi Nr. 326 ‘Būvju klasifikācijas noteikumi.*” 2018.
- [46] A. Zhivov, D. Herron, and M. Deru, “Achieving energy efficiency and improving indoor air quality in army maintenance facilities,” in *ASHRAE Transactions*, 2009, vol. 115 PART 2.
- [47] D. Herron, A. Zhivov, and M. Deru, “Energy design guides for army barracks,” in *ASHRAE Transactions*, 2009, vol. 115 PART 2.
- [48] R. Liesen, P. Ellis, A. Zhivov, and D. Herron, “Extremely low energy design for army buildings: Barracks,” in *ASHRAE Transactions*, 2012, vol. 118, no. PART 1.
- [49] M. Case, R. Liesen, A. Zhivov, and M. Zhivov, “A parametric study of energy efficiency measures used in deep energy retrofits for two building types and U.S. Climate zones,” in *ASHRAE Conference-Papers*, 2016, vol. 122.
- [50] “The Engineering ToolBox.” https://www.engineeringtoolbox.com/metabolic-heat-persons-d_706.html.
- [51] A. Pagan-Vazquez *et al.*, “Thermal bridge mitigation in army buildings,” in *ASHRAE Conference-Papers*, 2016, vol. 122.
- [52] B. E. Performance, T. Maile, M. Fischer, and V. Bazjanac, “Building Energy Performance Simulation Tools - a Life-Cycle and Interoperable Perspective,” *Cent. Integr. Facil. Eng.*, no. December, pp. 1–49, 2007.
- [53] Saeima, *Būvniecības likums*. 2014.
- [54] M. Deru, D. Fisher, A. M. Zhivov, V. A. Smith, and D. Herron, “Improving energy performance of army dining facilities,” in *ASHRAE Transactions*, 2009, vol. 115 PART 2.
- [55] R. Potangaroa and M. Hynds, “Thermal Comfort Tools for Emergency Shelter in Major Disasters,” in *Proceedings from International Conference on Building Education and Research (BEAR)*, 2008, pp. 1457–1472.
- [56] RUBB, “PVC fabric cladding,” *the efass covering membrane forms the protective barrier between the environment and the valuable equipment and personnel inside*, 2017. <https://www.rubbusa.com/rubb-quality/fabric-cladding/>.
- [57] A. Rivera, “Cost benefit analysis of integrated cots energy-related technologies for Army’s force provider module,” 2009.
- [58] N. Riemer and D. Johnson, “Designing Transportable Collectively Protective Shelters for Thermal Efficiency,” 2006.
- [59] R. J. Marsh, “Cost benefit analysis: closed-cell polyurethane foam use in DoD forward-deployed structures, and as an alternative building material, to reduce operational fuel demand and associated costs,” 2015.
- [60] A. Borodinecs, J. Zemitis, M. Dobelis, M. Kalinka, and A. Geikins, “Development of

- prefabricated modular retrofitting solution for post-world War II buildings,” 2017, doi: 10.3846/enviro.2017.252.
- [61] Arčers, “Projekti,” 2017. https://www.arcers.lv/lv/aktualitates/get/nid/217?nid=217&glo_template=print%0Ahttp://www.delfi.lv/news/national/politics/foto-ka-izskatas-jaunas-adazu-bazes-kazarmas.d?id=45251016%0A.
- [62] Cabinet of Ministers Republic of Latvia, *Regulations Regarding the Latvian Construction Standard LBN 002-19, Thermotechnics of Building Envelopes*. .
- [63] LVS EN ISO 52016-1:2017, *Energy performance of buildings - Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads - Part 1: Calculation procedures (ISO 52016-1:2017)*. 2017.
- [64] A. Borodinecs, A. Geikins, and A. Prozuments, “Energy consumption and retrofitting potential of Latvian unclassified buildings,” *Smart Innov. Syst. Technol.*, vol. 163, pp. 319–326, 2020.
- [65] A. Geikins, A. Borodinecs, G. Daksa, R. Bogdanovics, and D. Zajecs, “Typology of Unclassified Buildings and Specifics of Input Parameters for Energy Audits in Latvia,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 290, no. 1, doi: 10.1088/1755-1315/290/1/012131.
- [66] A. Borodinecs, A. Prozuments, A. Zajacs, and J. Zemitis, “Magazine of Civil Engineering Retrofitting of fire stations in cold climate regions,” vol. 90, no. 6, pp. 85–92, 2019, doi: 10.18720/MCE.90.8.
- [67] N. Malcolm and J. Pilsworth, “The Calculation of Heat Loss from Tents,” 1978.
- [68] T. Agami Reddy, J. F. Kreider, S. C. Peter, and A. Rabl, *Heating and Cooling of Buildings. Principles and Practice of Energy Efficient Design*. 2016.
- [69] M. G. Davies, *Building heat transfer*. 2006.
- [70] K. J. Moss, *Heat and Mass Transfer in Buildings*. 2007.
- [71] Y. Cengel and A. Ghajar, *Heat and Mass Transfer. Fundamentals and Applications*. 2015.
- [72] T. Bergman, L. A. S. Lavine, F. P. Incropera, and D. P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 2011.
- [73] P. N. Chaloux, “Heat Retention Test on Tent Liners. AMXRE-MED-896, Mechanical Engineering Division, US Army Natick Laboratories,” 1964.
- [74] C. J. Monego and H. J. Rasor, “Heat Retention Properties of Tent Liners. Textile Series Report No. 122; US Army Quartermaster Research and Engineering Center, Natick, MA, AD 292050.,” 1962.
- [75] S. V. Korniyenko, N. I. Vatin, and A. S. Gorshkov, “Thermophysical field testing of residential buildings made of autoclaved aerated concrete blocks,” *Mag. Civ. Eng.*, vol. 64, no. 4, 2016, doi: 10.5862/MCE.64.2.
- [76] J. L. Sanders, “A Field Test of Heat Requirements for General Purpose Tents. Technical Report T-21, Quartmaster Field Evaluation Agency, Fort Lee, VA. FEA 55097-F.,” 1957.
- [77] ASHRAE, *ASHRAE Guide and Data Book: Fundamentals and Equipment*. .
- [78] R. Langner, M. Deru, A. Zhivov, R. Liesen, and D. Herron, “Extremely low-energy design for army buildings: Tactical equipment maintenance facility,” in *ASHRAE Transactions*, 2012, vol. 118, no. PART 1.
- [79] C. Peroni *et al.*, “Proceedings of the Workshop on Indoor Shooting Ranges.,” 2005, p. 206.
- [80] J. Zemitis, A. Borodinecs, A. Geikins, T. Kalamees, and K. Kuusk, “Ventilation System Design in Three European Geo Cluster,” in *Energy Procedia*, 2016, vol. 96, doi: 10.1016/j.egypro.2016.09.151.

- [81] ASHRAE, "2013 ASHRAE Handbook - Fundamentals (SI Edition)," *2013 ASHRAE Handbook—Fundamentals*, vol. 2013, no. 38, 2013.
- [82] R. F. Goldman and B. Kampmann, "Handbook on clothing - biomedical effects of military clothing and equipment systems," p. 321, 2007.
- [83] Aizsardzības ministrija, "Karavīra individuālās aizsardzības sistēmas elementi," 2008. .
- [84] A. P. Gagge, A. C. Burton, and H. C. Bazett, "A practical system of units for the description of the heat exchange of man with his environment," *Science (80-)*, 1941, doi: 10.1126/science.94.2445.428.
- [85] R. Goldman and B. Kampman, "Handbook on clothing. Biomedical effects of military clothing and equipment systems. Report of NATO Research Study Group 7 on Biomedical research aspects of military protective clothing. 2nd edn. International Society for Environmental Ergonomics.," 2007.
- [86] S. K. W. Chang and W. R. Santee, "Clothing insulation in a hypobaric environment," *Aviat. Sp. Environ. Med.*, vol. 67, no. 9, pp. 827–834, 1996.
- [87] ASHRAE, "ASHRAE Handbook-Fundamentals," *ASHRAE Handbook-Fundamentals*, 2005.
- [88] R. G. Soule and R. F. Goldman, "Energy cost of loads carried on the head, hands, or feet.," *J. Appl. Physiol.*, 1969.
- [89] A. Teitlebaum and R. F. Goldman, "Increased energy cost with multiple clothing layers.," *J. Appl. Physiol.*, vol. 32, no. 6, 1972, doi: 10.1152/jappl.1972.32.6.743.
- [90] Amor A. F., J. A. Vogel, and D. E. Worsley, "The Energy Cost of Wearing Multilayer Clothing," 1973, p. 18.
- [91] Hoyt Tyler, Schiafon Stefano, Piccioli Alberto, Cheung Toby, Moon Dustin, and Steinfeld Kyle, "CBE Thermal Comfort Tool for ASHRAE-55," *University of California Berkeley*, 2017. .
- [92] ASHRAE, *ANSI/ASHRAE Standard 55-2020*, vol. 2, no. 1. 2020.
- [93] ASHRAE, "ANSI/ASHRAE Standard 55-2017 : Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy," *ASHRAE Inc.*, vol. 2017, 2017.
- [94] BS EN 15251, "BS EN 15251," *Indoor Environ. input parameters Des. Assess. energy Perform. Build.*, 2007.
- [95] T. Golova and A. Denisova, "Energy efficiency of the Rural Wall multi-layer structure in lowrise building design," *Build. walling. Energy Effic. Build.*, vol. 8, no. 52, pp. 9–19, 2014.
- [96] I. Peregrine Energy Group and M. Boston, "Energy Efficiency Opportunities For Fire Department Facilities West Ossipee, New Hampshire," 2011.
- [97] A. Borodinecs, J. Zemitis, J. Sorokins, D. V. Baranova, and D. O. Sovetnikov, "Renovation need for apartment buildings in Latvia," *Mag. Civ. Eng.*, 2016, doi: 10.5862/MCE.68.6.
- [98] T. Kalamees *et al.*, "What kind of heat loss requirements NZEB and deep renovation sets for building envelope?," 2016.
- [99] D. D'Agostino and L. Mazzarella, "Data on energy consumption and Nearly zero energy buildings (NZEBs) in Europe," *Data Br.*, 2018, doi: 10.1016/j.dib.2018.11.094.
- [100] A. Borodinecs, A. Geikins, E. Barone, V. Jacnevs, and A. Prozuments, "Solution of Bullet Proof Wooden Frame Construction Panel with a Built-In Air Duct," *Buildings*, vol. 12, no. 1, 2022, doi: 10.3390/buildings12010030.
- [101] K. Tumanova, A. Borodinecs, and A. Geikins, "The analysis of the hot water consumption and energy performance before and after renovation in multi-Apartment buildings," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 251, no. 1, doi: 10.1088/1757-899X/251/1/012058.
- [102] "Latvijas Republikas Ekonomikas ministrijas pasūtījuma „Pētījums par prognozētām

izmaiņām darbaspēka un būvmateriālu izmaksās būvniecības nozarē Latvijā laika periodā no 2018. līdz 2022. gadam”,” [Online]. Available: http://petijumi.mk.gov.lv/sites/default/files/file/Petijuma_par_darbaspeka_un_buvmaterialu_izmaksam_Kopsavilkums.pdf.

[103] “Centrālās statistikas pārvaldes dati.” www.csb.gov.lv.

[104] SPRK, “Tarifi,” *Siltumtarifi*, 2020. <https://www.sprk.gov.lv/content/tarifi-4>.