

Mārtiņš Metāls

**KONSERVĒJOŠA MIKROKLIMATA
NODROŠINĀŠANAS METODOLOĢIJA
VĒSTURISKĀS KULTA ĒKĀS**

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Būvniecības un mašīnzinību fakultāte
Ilgtspējīgo būvmateriālu un inženiersistēmu institūts

Mārtiņš Metāls

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

**KONSERVĒJOŠA MIKROKLIMATA
NODROŠINĀŠANAS METODOLOĢIJA
VĒSTURISKĀS KULTA ĒKĀS**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji

emeritētais profesors *Dr. sc. ing.*
ARTURS LEŠINSKIS

profesors *Dr. sc. ing.*
ANATOLIJS BORODIŅECS

RTU Izdevniecība
Rīga 2026

Metāls, M. Konservējoša mikroklimata nodrošināšanas metodoloģija vēsturiskās kultūras ēkās. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2026. 31 lpp.

Publicēts saskaņā ar promocijas padomes "RTU P-06" 2026. gada 16. aprīļa lēmumu, protokols Nr. 04030-9.6/11.

Vāka attēla autors Vitolds Doze.

<https://doi.org/10.7250/9789934373046>
ISBN 978-9934-37-304-6 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2026. gada 15. jūnijā plkst. 13.00 Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības un mašīnzinību fakultātē, Ķīpsalas ielā 6A, 546. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Asociētais profesors *Ph. D.* Aleksandrs Zajacs,
Rīgas Tehniskā universitāte;

Vadošais pētnieks *Dr. phys.* Staņislavs Gendelis,
Latvijas Universitāte, Latvija

Profesore *Dr.* Violeta Motuziene,
Viļņas Gedimīna Tehniskā universitāte, Lietuva.

APSTIPRINĀJUMS

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

Mārtiņš Metāls (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā kā publikāciju kopa, tajā ir ievads, septiņas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 39 attēli, pieci pielikumi, kopā 111 lappušu, ieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 25 nosaukumi.



Nacionālā kultūras mantojuma pārvalde

Mazā Pils iela 19, Rīga, LV - 1050, tālr. 67229272, e-pasts pasts@nkmp.gov.lv, www.nkmp.gov.lv

Rīga

23.04.2025.

Mārtiņam Metālam

Nacionālā kultūras mantojuma pārvalde atzinīgi novērtē Mārtiņa Metāla veikto promocijas darbu, kas izstrādāts Rīgas Tehniskās universitātes, Būvniecības un mašīnzinību fakultātes Ilgtspējīgo būvmateriālu un inženiersistēmu institūtā, par konservējoša mikroklimata nodrošināšanu vēsturiskās ēkās.

Pētījuma rezultāti sniedz visaptverošu, praksē pielietojamu rīcības plānu vēsturisko ēku lietotājiem un uzturētājiem, palīdzot nodrošināt konservējošu mikroklimatu Latvijas klimatiskajos apstākļos. Šis pētījums būtiski veicina kultūras mantojuma saglabāšanu, piedāvājot risinājumus, kas ļauj vēsturiskajām vērtībām tikt saglabātām ilgtermiņā un nodotām nākamajām paaudzēm.

Vadītāja

Ināra Bula

24.04.2025. Nr.1-18/77

Mārtiņš Metāls

metaals@latnet.lv

Atsauksme

Īpaši aizsargājams kultūras -piemineklis - Turaidas muzejrezervāts atzinīgi novērtē Mārtiņa Metāla veikto promocijas darba pētījumu Rīgas Tehniskās Universitātes, Būvniecības un mašīnzinību fakultātes, Ilgtspējīgo būvmateriālu un inženiersistēmu institūtā par konservējoša mikroklimata nodrošināšanu vēsturiskās ēkās. Šī pētījuma rezultāti sniedz visaptverošu un skaidru rīcības plānu vēsturisko ēku lietotājiem un uzturētājiem, kā Latvijas klimatiskajos apstākļos nodrošināt konservējošu mikroklimatu vēsturiskās ēkās.

Mārtiņa Metāla pētījums dod iespēju arī Turaidas muzejrezervāta vēsturiskās ēkas kā vērtību saglabāt un nodot nākamajām paaudzēm.

Pieminekļu nodaļas vadītājs

Jānis Spila

Janis Spila
janis.spila@tmr.gov.lv



SATURS

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS	7
1. TEORĒTISKAIS PAMATOJUMS	10
2. PĒTĪJUMS	12
2.1. Metodes	12
2.2. Kulta ēku tipoloģija	13
2.3. Mērījumu rezultāti	15
3. SIMULĀCIJAS	22
4. METODOLOĢIJA KONSERVĒJOŠA MIKROKLIMATA UZTURĒŠANAI VĒSTURISKĀS ĒKĀS	25
5. PRAKTISKIE IETEIKUMI BANĪCU LIETOTĀJIEM.	28
SECINĀJUMI	29
ATSAUCES	30

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Pētījuma aktualitāte

Vēsturiskās baznīcas ir neatņemama Eiropas kultūras mantojuma sastāvdaļa, kurās glabājas vērtīgi liturģiskie un mākslas priekšmeti. Latvijā 226 baznīcām ir piešķirts valsts nozīmes pieminekļa statuss, un aptuveni 2378 valsts nozīmes kustamie un nekustamie pieminekļi atrodas šajās un citās baznīcās [1]. Baltijas reģionā galvenais apdraudējums šiem kultūras mantojuma objektiem ir nekontrolēta iekštelpu gaisa mitruma ietekme, kas izraisa kondensāciju un bioloģisko bojājumu, īpaši sēņu izraisītu. Lai arī standarts *NE 15759-1* nosaka vispārējus mērķus konservējošai apkurei [2], nav noteiktas konkrētas gaisa parametru robežvērtības konservējošam mikroklimatam, īpaši neapkurināmās vai periodiski apkurināmās vēsturiskās baznīcās.

Hipotēze

Neskatoties uz lielo kultūrvēsturisko reliģisko ēku daudzveidību, ir iespējams izstrādāt metodoloģiju konservējoša mikroklimata nodrošināšanai, kas uztur optimālus gaisa parametrus (temperatūras un mitruma robežvērtību ietvaros).

Pētījuma mērķis

Noteikt vēsturisko kulta ēku konservējoša mikroklimata gaisa parametru robežvērtības un nodrošināšanas vadlīnijas.

Pētījuma novitāte

Šis ir pirmais pētījums pārejas klimata zonā starp jūras un kontinentālo klimatu ar paaugstinātu gaisa mitruma saturu (parasti 3–6 g/kg ziemā un 10–14 g/kg vasarā), kurā, balstoties empīriskajos datos un simulācijās, ir noteiktas precīzas konservējoša mikroklimata robežvērtības (temperatūrai un mitruma saturam) dažāda tipa vēsturiskām kulta ēkām. Pētījuma rezultāts ir metodoloģija, ko kultūras mantojuma pārvaldītāji, arhitekti un inženieri var izmantot, lai nodrošinātu konservējošu mikroklimatu dažāda tipa vēsturiskajās baznīcās.

Galveno nodaļu un metodoloģijas apraksts

Promocijas darbs veidots kā tematiski vienota zinātnisko publikāciju kopa, tas ietver piecas zinātniskās publikācijas.

1. publikācija – “*Control of Indoor Climate of Historical Cult Buildings*”. Publicēta konferences rakstu krājumā *E3S Web of Conferences, Vol. 246: Cold Climate HVAC & Energy 2021*. Zinātniskā grāda pretendenta ieguldījums publikācijas sagatavošanā 90 %, eksperimentu plānojums un veikšana, paraugu ievākšana, apstrāde un analīze, rezultātu apkopošana un analīze, raksta pamatteksts, pārskatīšana un rediģēšana. Darbā aplūktas metodes un

tehnoloģijas, kas tiek izmantotas, lai regulētu iekštelpu klimatu vēsturiskās kulta ēkās. Tā ir būtiska, lai identificētu galvenās mikroklimata problēmas un noteiktu padziļināta pētījuma un tā struktūras nepieciešamību. Pētījumā uzsvēta nepieciešamība uzturēt stabilu temperatūru un mitrumu, lai saglabātu kultūras un vēsturiskās vērtības. Darbā analizētas dažādas AVK (apkure, ventilācija, kondicionēšana) sistēmas un to piemērotība vēsturiskām ēkām, kā arī sniegti virsmas temperatūras aprēķini dažādos āra un iekštelpu apstākļos, uzsverot adaptīvo sistēmu nozīmi.

2. publikācija – “*Typology of Latvian Churches and Preliminary Study on Indoor Air Temperature and Moisture Behavior*”. Publicēta žurnālā “*Buildings*” (MDPI) 2022. gadā. Zinātniskā grāda pretendenta ieguldījums publikācijas sagatavošanā 90 %, eksperimentu plānojums un veikšana, paraugu ievākšana, apstrāde un analīze, rezultātu apkopošana un analīze, raksta pamatteksts, pārskatīšana un rediģēšana. Rakstā izstrādāta Latvijas baznīcu tipoloģija, klasificējot tās pēc arhitektoniskām iezīmēm, būvmateriāliem un vēsturiskā konteksta. Tiek sniegta arī sākotnēja analīze par iekštelpu gaisa temperatūras un mitruma uzvedību dažāda tipa baznīcās. Pētījumā atklātas būtiskas atšķirības mikroklimatā starp baznīcu tipiem un uzsvēta pielāgotu saglabāšanas stratēģiju nepieciešamība.

3. publikācija – “*Preliminary Study on Indoor Air Temperature and Moisture Behaviour in 13th-Century Churches in Latvia*”. Publicēta žurnālā “*Sustainability*” (MDPI) 2023. gadā. Zinātniskā grāda pretendenta ieguldījums publikācijas sagatavošanā 90 %, eksperimentu plānojums un veikšana, paraugu ievākšana, apstrāde un analīze, rezultātu apkopošana un analīze, raksta pamatteksts, pārskatīšana un rediģēšana. Rakstā padziļināti analizēta iekštelpu temperatūras un mitruma uzvedība Latvijas 13. gadsimta baznīcās. Empīriskie dati iegūti visa gada garumā četros dažādos baznīcu tipos. Pētījumā iekļauti arī virsmas temperatūras aprēķini un salīdzinājums ar iespējamajiem rasas punktiem, kā arī mitruma satura aprēķini visiem mērījumu punktiem. Rezultāti liecina, ka baznīcas vecums un būvniecības metodes ietekmē mikroklimatu, tāpēc nepieciešami specifiski saglabāšanas risinājumi.

4. publikācija – “*Ventilation and Air Conditioning Design Approach Based on ASHRAE Psychrometric Chart and Mollier Diagram*”. Publicēta “*Frontiers Media SA*” 2024. gadā. Zinātniskā grāda pretendenta ieguldījums publikācijas sagatavošanā 10 %, rezultātu apkopošana, paraugu vākšana, pārskatīšana un rediģēšana. Rakstā piedāvāta ventilācijas un gaisa kondicionēšanas sistēmu projektēšanas pieeja, izmantojot ASHRAE psihrometrisko diagrammu un Moljē diagrammu. Pētījumā uzsvērta šo rīku lietojums precīzai klimata kontrolei vēsturiskās ēkās, līdzsvarojot energoefektivitāti un mantojuma saglabāšanu, iekļaujot piemērus no prakses.

5. publikācija – “*Study on Indoor Air Temperature and Moisture Behaviour in Historical Churches*”. Publicēta žurnālā “*Energy & Buildings*” (Elsevier) 2024. gadā. Zinātniskā grāda pretendenta ieguldījums publikācijas sagatavošanā 90 %, eksperimentu plānojums un veikšana, paraugu ievākšana, apstrāde un analīze, rezultātu apkopošana un analīze, raksta pamatteksts,

pārskatīšana un rediģēšana. Rakstā apkopota plaša datu analīze par iekštelpu temperatūras un mitruma uzvedību dažādās vēsturiskās baznīcās. Mērījumi veikti četru baznīcu tipu ietvaros gada garumā. Pētījumā analizēta apmeklētāju intensitātes un baznīcas lietošanas ietekme uz iekštelpu klimatu. Iekļauti arī mitruma satura aprēķini visiem mērījumu punktiem. Rakstā sniegti ieteikumi par klimata pārvaldību un uzsvērtā dinamisku kontroles sistēmu nepieciešamība, lai nodrošinātu konservējošu klimatu.

1. TEORĒTISKAIS PAMATOJUMS

Iekštelpu gaisa mitrināšanas un sausināšanas procesu teorētiskais skaidrojums [3], kas ir būtisks ventilācijas un gaisa kondicionēšanas sistēmu darbības izpratnei, ir sniegts 4. publikācijā. Šī publikācija veido nozīmīgu metodoloģisku balstu promocijas darba kopējā struktūrā, jo tā nodrošina fizikāli pamatotu un analītisku ietvaru iekštelpu gaisa parametru izmaiņu interpretācijai neatkarīgi no konkrēta ēkas tipa vai lietošanas scenārija.

Iepriekšējās promocijas darba publikācijas (1.–3. publikācija) galvenokārt koncentrējas uz empīriskiem mērījumiem, ēku tipoloģiju klasifikāciju un novēroto mikroklimata uzvedību, savukārt 4. publikācijā risināta būtiska metodoloģiska nepilnība – skaidra, fizikas likumos balstīta iekštelpu gaisa stāvokļa izmaiņu skaidrojuma nepieciešamība, ko iespējams tieši izmantot ventilācijas un gaisa kondicionēšanas sistēmu projektēšanas aprēķinos. Bez šāda teorētiska pamata mērītie gaisa parametri paliek aprakstoši, nevis prognozējoši, tādējādi ierobežojot to lietojamību sistēmu projektēšanā un konservācijai piemērota mikroklimata nodrošināšanā.

4. publikācijā piedāvāta strukturēta pieeja, kurā telpā notiekošie procesi tiek analizēti pirms gaisa apmaiņas apjoma noteikšanas. Tas ir būtisks metodoloģisks pavērsiens. Tā vietā, lai projektēšanu sāktu ar pieņemtu ventilācijas gaisa daudzumu, publikācijā tiek ierosināts vispirms identificēt telpā dominējošās jūtāmās un latentās slodzes. Pamatojoties uz šo analīzi, tiek noteikts iekštelpu gaisa stāvokļa izmaiņu procesa virziens (gaisa stāvokļa izmaiņu virziens ir gaisa parametru temperatūras un mitruma satura izmaiņu trajektorija psihrometriskajā vai *Mollier* diagrammā, kas raksturo gaisa apstrādes procesa veidu un virzību), kas tiek izteikts ar leņķisko procesa koeficientu ($\Delta h/\Delta x$). Šis koeficients nosaka procesa līnijas slīpumu gan *ASHRAE* psihrometriskajā diagrammā, gan Moljē ($h-x$) diagrammā (Moljē diagramma ir mitra gaisa stāvokļa grafisks attēlojums uz sausa gaisa vienību).

4. publikācijā ietvertās diagrammas (1. un 2. att.) ilustrē to, kā šī procesa līnija atspoguļo iekšējo siltuma pieaugumu, mitruma slodžu un gaisa sadales efektivitātes kopējo ietekmi. Kad procesa virziens ir noteikts, Moljē diagramma kļūst par jaudīgu projektēšanas un novērtēšanas rīku. Tā ļauj grafiski noteikt nepieciešamos pieplūdes gaisa parametrus konkrētā iekštelpu mērķa stāvoklī, kā arī izvērtēt, cik būtiski mainās attālums starp pieplūdes un nosūces gaisa stāvokļiem, samazinot gaisa apmaiņas apjomu.

Šī pieeja ir īpaši nozīmīga ēkām ar jutīgu iekštelpu vidi, piemēram, vēsturiskām baznīcām un kultūras mantojuma objektiem, kas tiek pētīti šajā promocijas darbā. Šādās ēkās ventilācijas apjomi bieži ir ierobežoti konservācijas prasību, enerģijas patēriņa vai neregulāras noslodzes dēļ. 4. publikācijā parādīts, ka, izmantojot procesa līniju Moljē diagrammā, jau projektēšanas stadijā ir iespējams kvantitatīvi novērtēt samazināta gaisa apmaiņas apjoma ietekmi uz iekštelpu temperatūru un mitrumu. Tas ļauj izvērtēt, vai iekštelpu komforta un saglabāšanas kritēriji joprojām var tikt nodrošināti arī ierobežotas ventilācijas apstākļos.

Turklāt 4. publikācijā uzsvērta gaisa sadales sistēmas nozīme, izmantojot gaisa sadales efektivitātes koeficientu (M_{ad}). Diagrammas parāda, kā dažādas gaisa sadales stratēģijas maina efektīvo iekštelpu procesa līniju, tādējādi ietekmējot nepieciešamos pieplūdes gaisa parametrus. Tas nodrošina tiešu sasaisti starp telpas gaisa procesiem un sistēmu līmeņa projektēšanas

lēmumiem, piemēram, difuzoru izvēli un gaisa padeves stratēģiju, nebalstoties tikai empīriskos korekcijas koeficientos.

Promocijas darba kopējā ietvarā 4. publikācija kalpo kā teorētiskais un metodoloģiskais tilts starp empīriskajiem mikroklimata novērojumiem un simulācijās balstītām analīzēm. Publikācijā izstrādātā procesu balstītā gaisa stāvokļa izmaiņu interpretācija veido pamatu turpmākajiem pētījuma posmiem, tostarp gaisa parametru robežvērtību noteikšanai un konservācijai piemērota mikroklimata nodrošināšanas metodoloģijas izstrādei dažādu baznīcu tipoloģijām. Balstot šos turpmākos pētījumus skaidri definētā psihrometriskā un Moljē diagrammu ietvarā, tiek nodrošināta konsekvence, caurspīdīgums un fizikāla pamatotība mērījumu, aprēķinu un simulāciju posmos.

4. publikācijas kopsavilkumā sniegts ne tikai teorētisku iekštelpu gaisa mitrināšanas un sausināšanas procesu skaidrojums, bet arī praktiska, uz projektēšanu orientēta metodoloģija. Nosakot gaisa stāvokļa izmaiņu procesa virzienu Moljē diagrammā, tā ļauj veikt tiešus ventilācijas projektēšanas aprēķinus, atbalsta pamatotu lēmumu pieņemšanu ierobežotas gaisa apmaiņas apstākļos un nodrošina vienotu analītisko valodu pētniekiem, projektētājiem un ēku ekspluatācijas speciālistiem, kas iesaistīti iekštelpu klimata regulēšanā.

2. PĒTĪJUMS

2.1. Metodes

Aprēķini

1. publikācijā tika apkopoti sākotnējie iekštelņu klimata mērījumi dažādās baznīcās, kā arī veikti aprēķini par siltumpretestību, siltuma uzkrāšanos un kondensāta veidošanās risku, lai noteiktu padziļināta turpmākā pētījuma nepieciešamību [1].

Balstoties šajos rezultātos, tika aprēķināta temperatūra uz sienām, ārējo sienu stūros, griestiem, kā arī stūrī starp griestiem un sienu un vietās, kur ārējā siena savienojas ar griestiem.

3. un 5. publikācijā aprēķinos tika izmantota apgriezta vidējā (*trimmed mean*) metode, lai samazinātu ekstrēmo vērtību un iespējamo mērījumu anomāliju ietekmi laika rindas datos. Metode pirms vidējās vērtības aprēķināšanas izslēdz noteiktu daļu no zemākajām un augstākajām vērtībām, nodrošinot robustāku centrālās tendences novērtējumu, kas ir mazāk jutīgs pret ekstremālām novirzēm.

Konkrēti, no datu kopas tika izslēgti 10 % vērtību no abiem sadalījuma galiem (t. i., zemākie un augstākie 10 %), un vidējā vērtība tika aprēķināta no atlikušajiem 80 %.

$$\bar{x}_{\text{trim}} = \frac{1}{n - 2k} \sum_{i=k+1}^{n-k} x_{(i)}, \quad (3.1)$$

kur n – mērījumu kopskaits; $x_{(i)}$ – i -to sakārtoto datu vērtība; $k = [0, 1n]$ – vērtību skaits, kas tiek izņemts no katra sadalījuma gala [4].

Metode tika izmantota, lai aprēķinātu vidējās gaisa temperatūras, relatīvā mitruma un virsmas temperatūras vērtības noteiktos laika periodos, nodrošinot to, ka rezultātus nepamatoti neietekmē īslaicīgas anomālijas vai sensora kļūdas.

3. un 5. publikācijā, pamatojoties uz gaisa temperatūras un relatīvā mitruma mērījumiem, tika aprēķināts ūdens tvaika daļējais spiediens mitrā gaisā P_w (kPa):

$$P_w = 6,112 \cdot e^{\left(\frac{17,67 \cdot T}{243,5+T}\right)} \cdot \frac{RH}{100}, \quad (3.2)$$

kur T – gaisa temperatūra (°C); e – Eilera skaitlis [5]; RH – relatīvais mitrums (%). Gaisa mitrums saturs W (g/kg) tiek aprēķināts no ūdens tvaika parciālā spiediena P_w :

$$W = 622 \frac{P_w}{P - P_w}, \quad (3.3)$$

kur P – kopējais spiediens (Pa) [6].

Aizvietojot ūdens tvaika parciālā spiediena P_w , izteiksmi, kas iegūta no gaisa temperatūras un relatīvā mitruma (3.3. vienādojums), tiek iegūta apvienota 3.4. formula, kas ļauj tieši aprēķināt gaisa mitruma saturu W , balstoties tikai temperatūras un relatīvā mitruma mērījumos.

$$W = \frac{622 \cdot \left(611,2 \cdot e^{\left(\frac{17,67 \cdot T}{243,5+T}\right)} \cdot \frac{RH}{100}\right)}{P - \left(611,2 \cdot e^{\left(\frac{17,67 \cdot T}{243,5+T}\right)} \cdot \frac{RH}{100}\right)}, \quad (3.4)$$

Balstoties temperatūras un relatīvā mitruma mērījumos, tiek aprēķināta absolūtā mitruma starpība starp iekštelpu un āra gaisu v (g/m^3), ko nosaka pēc 3.5. vienādojuma:

$$v = \frac{P_w \cdot M}{R \cdot T}, \quad (3.5.)$$

kur $M = 18,02$ – ūdens tvaika molmasa (g/mol); $R = 0,08314$ – universālā gāzes konstante ($\text{L} \cdot \text{bar}/\text{mol} \cdot \text{K}$) [7].

3.6. vienādojums iegūts, izsakot ūdens tvaika parciālo spiedienu kā funkciju no temperatūras un relatīvā mitruma un aizvietojot to vispārējā gāzu likumā balstītajā absolūtā mitruma aprēķina 3.5. vienādojumā.

$$v = \frac{RH}{100} \cdot \frac{6,112 \cdot e^{\left(\frac{17,67 \cdot T}{243,5 + T}\right)} \cdot 18,02}{(273,15 + T) \cdot 0,08314}, \quad (3.6.)$$

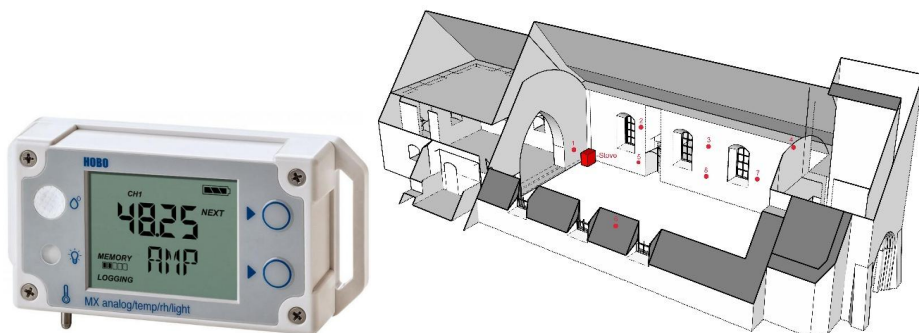
kur liekais mitruma daudzums Δv (g/m^3) tiek noteikts pēc 3.7. vienādojuma:

$$\Delta v = v_i - v_e, \quad (3.7.)$$

kur – iekštelpu gaisa absolūtais mitrums pēc tilpuma (g/m^3); – āra gaisa absolūtais mitrums (g/m^3) [8].

Mērījumi

Temp/RH/Light/Ext-Temp Kit (1. att.) tika izmantots ar mērījumu intervālu ik pēc 30 minūtēm, relatīvā mitruma mērījumu precizitātei esot $\pm 2,5\%$, temperatūras – $\pm 0,2\text{ }^\circ\text{C}$. Šie mērījumi tika veikti pētījumos, kas aprakstīti 3. un 5. publikācijā.



1. attēls. Mērīšanas ierīce un novietojuma piemērs Krimuldas baznīcā [9].

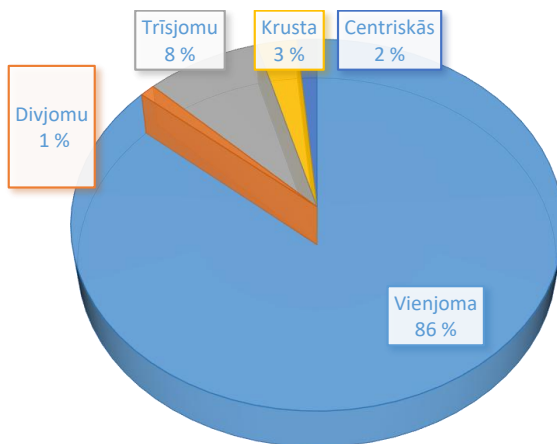
Mērīšanas ierīču izvietojums un to skaits baznīcās norādīts 3. un 5. publikācijā.

2.2. Kulta ēku tipoloģija

2. publikācijā atspoguļots kulta ēku tipoloģisks pētījums, balstoties to norobežojošo konstrukciju siltumpretestības veidos, ēku vecumā un telpiskajās formās, kas ietekmē iespējamās siltā gaisa plūsmas virzienus. Tipoloģija sniedz pārskatu par biežāk sastopamajiem kulta ēku tipiem pēc to skaita, tādējādi sniedzot pamatu turpmākajiem pētījumiem par to

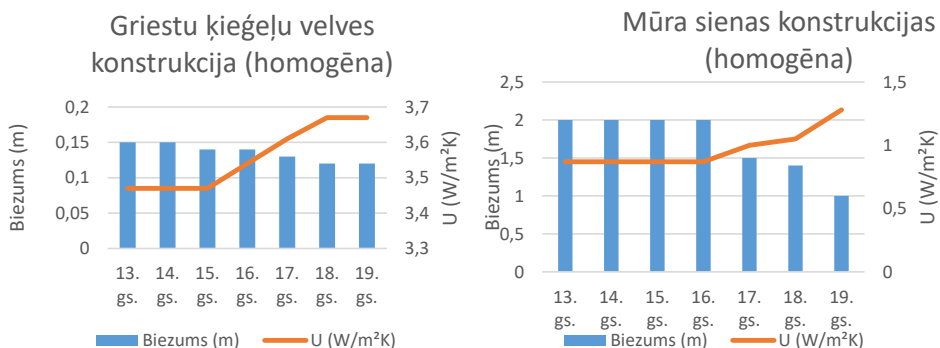
baznīcu tipiem, kurās būtu nepieciešams veikt papildu izpēti, lai aptvertu iespējami plašu baznīcu spektru.

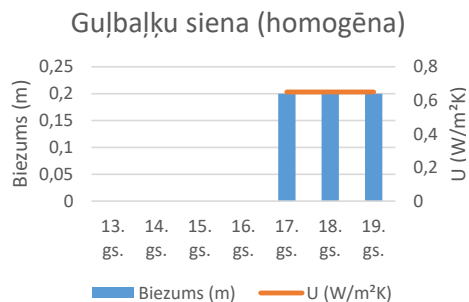
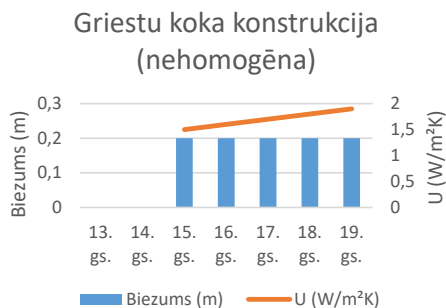
Šajā nodaļā, balstoties 2. publikācijā [10], tiek prezentēts tipoloģisks pētījums par Latvijas luterāņu baznīcu telpiskajām un konstruktīvajām īpašībām ar mērķi identificēt to ietekmi uz iespējamajiem gaisa plūsmas virzieniem un kondensāta veidošanās riskiem. Apsekojot 335 baznīcas, tika konstatēts, ka 276 no tām šobrīd tiek aktīvi izmantotas. Tās tika klasificētas pēc to telpiskā plānojuma un būvperioda, ņemot vērā sienu un griestu konstrukciju siltumtehnikās īpašības (2. att.).



2. attēls. Latvijas luterāņu baznīcu sadalījums pēc telpiskā plānojuma no otrās publikācijas.

Šo baznīcu konstrukciju analīze atklāja, ka sienu biezums ar katru nākamo gadsimtu samazinās no 1,5–2,0 m 13.–16. gadsimtā līdz 0,8–1,0 m 19. gadsimtā. Mūra sienu siltumvadītspējas koeficients (λ) visā šajā periodā saglabājās aptuveni 0,87 W/m•K, savukārt griestu materiāli bija atšķirīgi, tāpēc λ vērtības svārstījās no 0,1 W/m•K līdz 0,8 W/m•K, atkarībā no tā, vai izmantots ķieģeļu velvējums, koka velvējums vai vienkārša koka konstrukcija (3. att.).





3. attēls. Baznīcu konstrukciju tipi, dimensijas un siltuma caurlaidības koeficients U.

Īpaša uzmanība tika pievērsta baznīcām, kurās altāra zonu no galvenās zāles atdala starpsiena ar platu arku. Šāds plānojums, kas konstatēts 29 baznīcās, var būtiski ietekmēt gaisa cirkulāciju un mitruma sadalījumu.

Svarīgs novērojums attiecas uz telpiskā plānojuma ietekmi uz iekštelpu mikroklimatu ir šāds: tiek pieņemts, ka atšķirīgas telpiskās konfigurācijas (vienjoma, trīsjoma, centrāla u. c.) veido atšķirīgus gaisa plūsmas virzienus; šīs atšķirības ir būtiskas, analizējot apkures stratēģijas un iespējamus kondensāta veidošanās apstākļus.

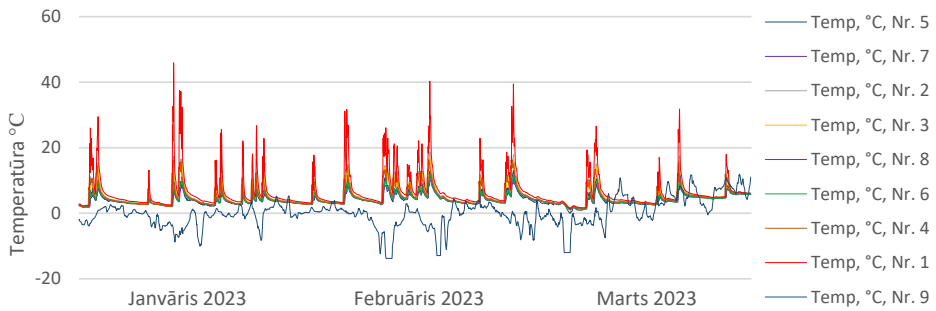
Nodaļā apkopotie novērojumi kalpo kā pamats turpmākajiem gaisa plūsmas modelēšanas pētījumiem, kas prezentēti 2. publikācijā.

2.3. Mērījumu rezultāti

Temperatūra un mitrums Krimuldas baznīcā

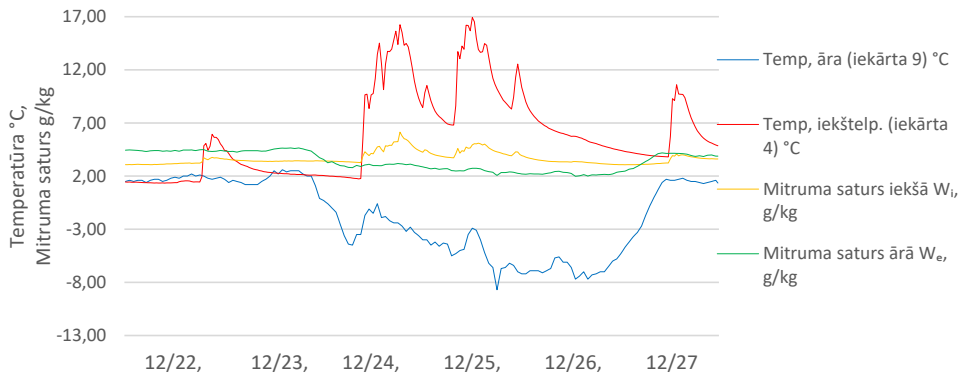
Apakšnodaļā prezentēti detalizētu iekštelpu temperatūras un mitruma mērījumu rezultāti Krimuldas baznīcā [4], īpašu uzmanību pievēršot siltuma uzvedībai apkures laikā un cilvēku klātbūtnes apstākļos.

Izvēloties vienotu siltuma avotu visai kulta ēkai, kā tas ir Krimuldas baznīcas gadījumā, var rasties nevienmērīga temperatūras sadale telpās. Rezultātā gan ēkas norobežojošo konstrukciju iekšējās virsmas, gan dažādu vērtīgu priekšmetu vai interjera detaļu virsmas var sasniegt rāsas punkta temperatūru. Var secināt, ka neregulāras apkures stratēģijas izraisa būtiskas temperatūras svārstības gan iekštelpu gaisā, gan ēkas virsmās (piemēram, sienās, griestos, grīdā, interjera priekšmetos), kas rada mitruma kondensāciju uz dažādām virsmām (4. att.). Tādēļ šāda apkures stratēģija nav uzskatāma par apkures sistēmu, kas nodrošina konservējošu mikroklimatu.



4. attēls. Temperatūra Krimuldas baznīcā.

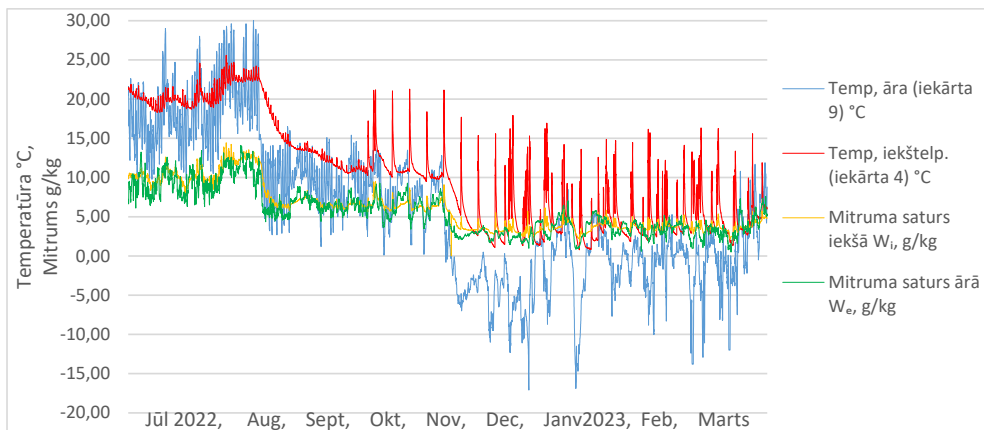
Krimuldas baznīcā veiktie iekštelpu gaisa parametru mērījumu un aprēķinu rezultāti liecina, ka mitruma iztvaikošana no ēkas konstrukcijām (tostarp norobežojošām konstrukcijām un interjera elementiem) var sasniegt līdz pat 2 g/kg (5. att.).



5. attēls. Āra un iekštelpu gaisa mitrums un temperatūra Krimuldas baznīcas balkonā laika posmā no 22.12.2022. līdz 28.12.2022.

Ja šāda veida ēka tiek regulāri izmantota siltajā sezonā, kad iekštelpu gaisa mitruma saturs palielinās, ir nepieciešams uzraudzīt gaisa parametrus un uzstādīt mitruma savācējus (gaisa sausinātājus), lai samazinātu iekštelpu mitruma koncentrāciju no 14,33 g/kg vismaz līdz 10 g/kg (6. att.).

Apkures sezonā straujš iekštelpu temperatūras pieaugums apkures ierīču darbības rezultātā, kā arī pēkšņš apmeklētāju skaita palielinājums rada būtisku kondensāta veidošanās risku. Šos potenciālos kondensācijas riskus iespējams novērst, vai nu nodrošinot nemainīgu minimālo iekštelpu temperatūru 7 °C, vai izmantojot gaisa sausināšanas metodes, lai samazinātu iekštelpu mitruma līmeni no 6,1 g/kg līdz 4,5 g/kg.



6. attēls. Āra un iekštelpu gaisa mitrums un temperatūra Krimuldas baznīcā “4. ierīce”.

Rezultāti papildina 1. publikācijā aprakstītos teorētiskos kondensāta veidošanās riska aprēķinus ar praktiskiem ilgtermiņa mērījumiem, apstiprinot, ka pat tad, ja virsmas temperatūra pietuvojas rasas punktam, kondensācija nenotiek ēkas norobežojošo konstrukciju termiskās inerces dēļ.

2. publikācijas kontekstā dati palīdz validēt tipoloģiskos secinājumus attiecībā uz vienjomu baznīcām, īpaši apstiprinot, ka apkures ietekme ir lokāla, savukārt siltā gaisa konvekcijas virziens ir paredzams, kas ir būtiski tipoloģiskajai modelēšanai.

Mitrums Turaidas baznīcā

Turaidas baznīcā [11] nav pastāvīgas apkures un ventilācijas sistēmas. Aukstajā sezonā tā tiek uzsildīta vienu reizi nedēļā pirms dievkalpojumiem, izmantojot elektriskos sildītājus. Ja iekštelpu relatīvais mitrums sasniedz 98–100 %, tiek uzstādīti gaisa sausinātāji. Āra gaisa parametri tika pieņemti, izmantojot tos pašus mērījumu datus kā Krimuldas baznīcā, ņemot vērā līdzīgus ģeogrāfiskos apstākļus.

Pamatojoties uz Turaidas baznīcā veikto gaisa parametru mērījumiem, var secināt, ka telpas vēdināšana siltajā sezonā pie augstām āra temperatūrām izraisa intensīvu āra gaisa un mitruma infiltrāciju, kas rada kondensācijas risku – gaisa mitruma saturs sasniedz 13,52 g/kg. Lai samazinātu šo potenciālo kondensācijas risku, ieteicams iekštelpu gaisa mitruma saturu samazināt no 13,52 g/kg līdz 10 g/kg.

Aukstajā sezonā, strauji paaugstinoties iekštelpu temperatūrai un vienlaikus atrodoties lielam apmeklētāju skaitam baznīcā (0,41 pers./m² jeb 0,14 pers./m³), gaisa mitruma saturs palielinās par 2,66 g/kg. Lai novērstu kondensācijas risku uz ēkas iekšējo konstrukciju un interjera virsmām, minimālajai pastāvīgajai iekštelpu temperatūrai šajā periodā jābūt vismaz 6,5 °C vai jāžāvē gaiss, samazinot tā mitruma saturu no 5,79 g/kg līdz 3,5 g/kg.

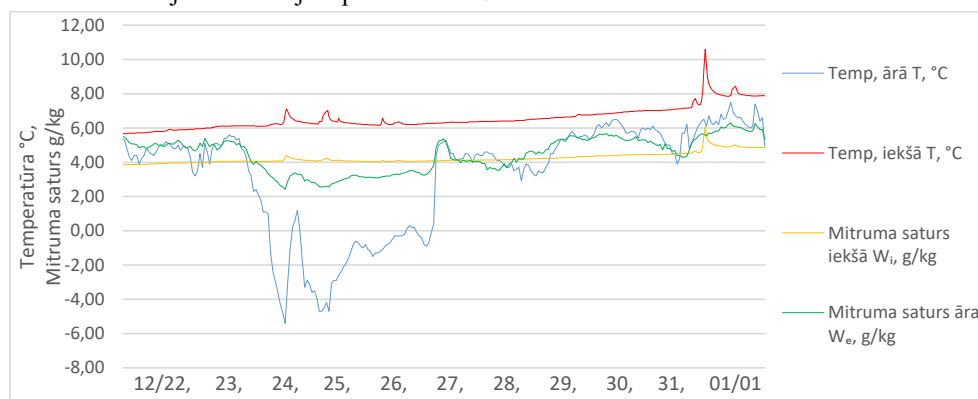
Mitrumis Liepājas Svētās Trīsvienības katedrālē

Liepājas Sv. Trīsvienības katedrālei [6] ir pastāvīga apkures sistēma, kas pieslēgta centralizētajam siltumtīklam, un tās siltummaiņa jauda ir 250 kW. Apkures sistēma nodrošina, ka apkures sezonā iekštelpu temperatūra tiek uzturēta robežās no 5 °C līdz 7 °C.

Salīdzinot Liepājas Sv. Trīsvienības katedrāles mikroklimatu ar Krimuldas un Turaidas baznīcām, kurām nav pastāvīgas apkures sistēmas, var secināt, ka Liepājas katedrāles mikroklimats ir ievērojami stabilāks (ar mazākām svārstībām). Apkures stratēģija, kas nodrošina pastāvīgu iekštelpu temperatūru 6 °C ar īslaicīgām svārstībām līdz 12 °C, ir uzskatāma par stratēģiju, kas veicina konservējoša mikroklimata saglabāšanu.

Aukstajā sezonā katedrālē uzturas līdz 410 cilvēkiem (0,46 pers./m² jeb 0,04 pers./m³), kas palielina gaisa mitruma saturu par 1,49 g/kg un temperatūru par 3,2 °C. Šīs izmaiņas neizraisa būtiskas mikroklimata svārstības, kā arī nerada kondensācijas riskus.

Palielinot iekštelpu temperatūru par 3 °C ar sildierīci bez cilvēku klātbūtnes, tiek novērots, ka gaisa mitruma saturs palielinās par 1,1 g/kg (7. att.), ko izskaidro mitruma iztvaikošana no ēkas konstrukcijām un interjera priekšmetiem.



7. attēls. Āra un iekštelpu gaisa mitrums un temperatūra Liepājas Sv. Trīsvienības katedrālē uz pults no 22.12.2022. līdz 02.01.2023.

Mitrumis Rīgas Jēzus baznīcā

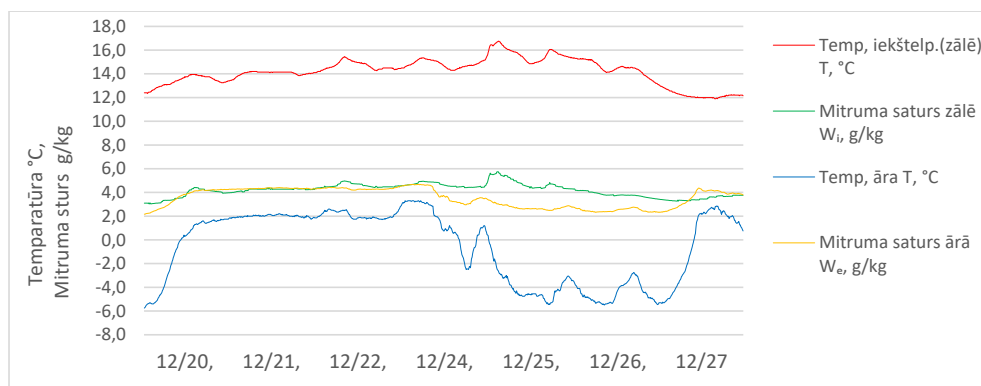
Rīgas Jēzus baznīcai [6] ir pastāvīga apkures sistēma, kas pieslēgta vietējai katlumājai ēkas pagrabstāvā, kur tiek izmantots 35 kW granulū apkures katls. Apkures sistēma nodrošina iekštelpu temperatūru no 12 °C līdz 17 °C apkures sezonas laikā, kad telpas tiek apsildītas reliģiskām un citām aktivitātēm.

Dabiskā ventilācija nodrošina, ka aukstajā sezonā vai apkures periodā vienlaikus 500 apmeklētāji (0,65 pers./m² jeb 0,087 pers./m³) nerada būtiskas mitruma svārstības, un

faktiskais iekštelpu mitruma pieaugums ir divreiz mazāks nekā aprēķinātais attiecīgajam apmeklētāju skaitam.

Siltajā sezonā Rīgas Jēzus baznīcas mikroklimats ir stabilāks nekā Turaidas baznīcā, jo Rīgas baznīcu ikdienā neapmeklē tik liels cilvēku skaits. Savukārt aukstajā sezonā Rīgas Jēzus baznīcas mikroklimats ir stabilāks nekā Turaidas baznīcā, pateicoties pastāvīgai apkrei.

Kopumā var secināt, ka aukstajā sezonā baznīcām ar lielu apmeklētāju skaitu būtu stabilāks iekštelpu klimats, ja tiktu nodrošināta pastāvīga iekštelpu temperatūra 5–10 °C robežās, kas ļautu pieļaut arī augstāku gaisa mitruma saturu līdz 7 g/kg (8. att.).



8. attēls. Āra un iekštelpu gaisa mitruma saturs un temperatūra Rīgas Jēzus baznīcas zālē no 20.12.2022. līdz 28.12.2022.

Tā kā koka baznīcās (Turaidas baznīca un Rīgas Jēzus baznīca), paaugstinoties iekštelpu temperatūrai, nav novērojams būtisks gaisa mitruma koncentrācijas pieaugums, kas savukārt tiek novērots mūra baznīcās kā mitruma izdalīšanās no konstrukcijām un interjera elementiem, tiek secināts, ka šāda parādība ir raksturīga tieši mūra ēkām.

Rezultāti rāda, ka maksimālais pieļaujama iekštelpu gaisa mitruma saturs vasaras periodā ir 10 g/kg, savukārt ziemas sezonā, kad baznīcās notiek aktivitātes, ir jānodrošina vai nu minimālā pastāvīgā iekštelpu temperatūra 6,5 °C, vai maksimālais gaisa mitruma saturs 3,5 g/kg.

Kopumā var secināt, ka baznīcās ar lielu apmeklētāju skaitu ziemas sezonā stabilāku iekštelpu klimatu iespējams nodrošināt, uzturot temperatūru no 5 °C līdz 10 °C, kas ļauj pieļaut augstāku mitruma saturu līdz 7 g/kg. Koka baznīcās, piemēram, Turaidas un Rīgas Jēzus baznīcā, iekštelpu temperatūras paaugstināšana nerada būtisku mitruma koncentrācijas palielināšanos atšķirībā no mūra baznīcām, kur novērojama mitruma izdalīšanās no konstrukcijām un interjera elementiem.

Visās četrās pētītajās baznīcās – Krimuldas, Turaidas, Rīgas Jēzus baznīcā un Liepājas Sv. Trīsvienības katedrālē – tika konstatēta vienota liekā mitruma uzvedības tendence. Visos gadījumos, kad āra temperatūra pazeminās zem 0 °C, liekais mitrums saglabājas pozitīvs, kas liecina, ka aukstā laikā iekštelpu gaisā ir vairāk mitruma nekā ārā.

Kad āra temperatūra paaugstinās virs 0 °C, liekā mitruma vērtības svārstās ap nulli, atspoguļojot būtiskas atšķirības starp iekštelpu un āra absolūto mitrumu. Šīs svārstības kļūst īpaši izteiktas starpsezonu periodos, kad iekštelpu gaisa inerce un āra gaisa infiltrācija savstarpēji mijiedarbojas.

Augstākie liekā mitruma rādītāji līdz 6 g/m³ tika novēroti Krimuldas un Turaidas baznīcās (9. att.), kad āra temperatūra bija ap 30 °C. Šie rādītāji fiksēti vēlā vasarā, īslaicīgos periodos, kad apmeklētājiem bija atvērtas durvis, un notika intensīva silta un mitra āra gaisa infiltrācija.

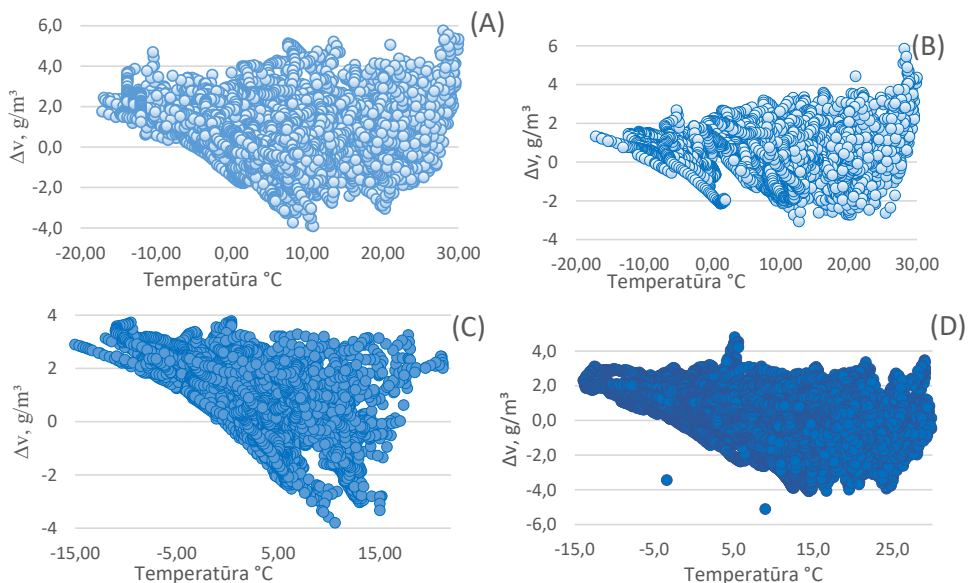
Krimuldas baznīcā (9. A att.) liekā mitruma pīķi fiksēti nestabilos vēlās vasaras laika apstākļos ar straujām āra mitruma un nokrišņu svārstībām.

Turaidas baznīcā (9. B att.) līdzīgi rādītāji saistīti galvenokārt ar atvērtām durvīm un klimata kontroles trūkumu.

Liepājas Sv. Trīsvienības katedrālē (9. C att.) augstākais liekā mitruma rādītājs 4 g/m³ tika fiksēts aukstajā sezonā (oktobris–aprīlis), kas nav tieši salīdzināms ar Krimuldas un Turaidas mērījumiem.

Rīgas Jēzus baznīcā (9. D att.) liekais mitrums sasniedza 5 g/m³, kad āra temperatūra bija 5 °C. Tomēr iekštelpu vide saglabājās salīdzinoši stabila, visticamāk, pateicoties kontrolētai pārtrauktai apkurei un zemākai āra gaisa infiltrācijai. Tāpat kā Turaidas baznīca, arī Rīgas Jēzus baznīca ir koka ēka un minimālā uzturētā iekštelpu temperatūra ziemā veicina mitruma saglabāšanos gaisā.

Novērojumi izceļ temperatūras un ēkas norobežojošo konstrukciju uzvedības nozīmi iekštelpu gaisa mitruma dinamikas veidošanā. Īpaši nevienmērīgi vai neapkurināmiem vēsturiskajiem dievnamiem infiltrācija un termiskā inerce ir galvenie faktori, kas ietekmē lieko mitrumu un potenciālos kondensācijas riskus.



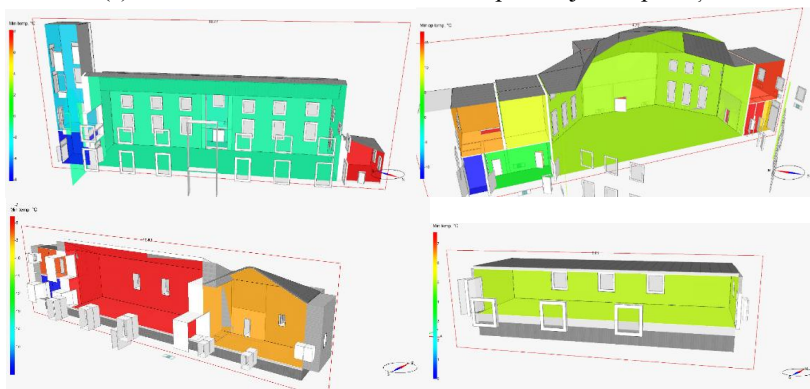
9. attēls. Liekā mitruma saturs: A) Krimuldas baznīcā uz balkona; B) Turaidas baznīcā uz lampas; C) Liepājas Sv. Trīsvienības katedrālē uz pults; D) Rīgas Jēzus baznīcā zālē.

Kopumā var secināt, ka baznīcās ar lielu apmeklētāju skaitu ziemas periodā var nodrošināt stabilāku iekštelpu mikroklimatu, ja tiek uzturēta pastāvīga iekštelpu temperatūra 5 °C līdz 10 °C robežās, ļaujot arī paaugstināt gaisa mitruma saturu līdz 7 g/kg.

Koka baznīcās, piemēram, Turaidas un Rīgas Jēzus baznīcā, iekštelpu temperatūras paaugstināšana būtiski nepalielina gaisa mitruma koncentrāciju atšķirībā no mūra baznīcām, kur novērojama mitruma izdalīšanās no konstrukcijām un interjera priekšmetiem.

3. SIMULĀCIJAS

Ar *IDA ICE* programmatūru izstrādātie simulācijas modeļi Turaidas baznīcai, Krimuldas baznīcai, Rīgas Jēzus baznīcai un Liepājas Sv. Trīsvienības katedrālei (10. att.) bija vērsti uz ēkas norobežojošo konstrukciju virsmas temperatūru analīzi un iekštelpu gaisa stāvokļa izmaiņu virziena (ϵ) noteikšanu dažādos sezonālos un apmeklējuma apstākļos.

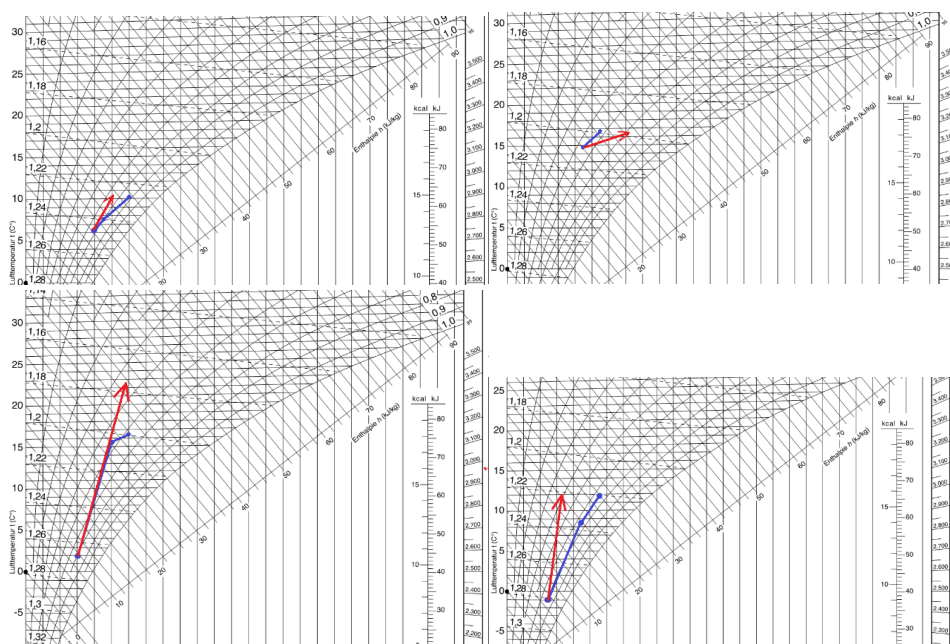


10. attēls. Iekštelpu virsmu temperatūra Liepājas katedrālē, Rīgas Jēzus baznīcā, Krimuldas un Turaidas baznīcā.

Visās četrās baznīcās simulācijas tika balstītas apmeklētāju slodzes un apkures grafiku mērījumos, kā aprakstīts 3. un 5. publikācijā. Mērķis bija izprast konstrukciju materiālu, apkures darbības un mitruma uzvedības mijiedarbību vēsturiskās telpās.

Liepājas Sv. Trīsvienības katedrālē *IDA ICE* modelī tika iekļauts faktiskais apkures grafiks. Lai gan mērītās gaisa temperatūras nerādīja kondensācijas risku, simulācija atklāja potenciāli riskantas zonas nepietiekami apsildītās vietās, piemēram, torņa telpā un ērģeļu balkonā, kur virsmas temperatūra pazeminājās zem $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Aprēķinātais iekštelpu gaisa stāvokļa izmaiņas virziens $\epsilon = 7,0\text{ kJ/kg}$ atšķīrās no mērītā (11. att.), liecinot par papildu mitrumu, kas nāk no ēkas konstrukcijām. Siltā gaisa pievades sistēma, kas apgādā ērģeļu zonu no vēsākām torņa telpām, ziemā vēl vairāk pastiprina šo risku.

Rīgas Jēzus baznīcā, kas būvēta no koka un tiek apkurināta periodiski, simulācijas uzrādīja, ka zaļes galvenajās zonās virsmas temperatūras visu gadu saglabājās virs $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ pat laikā, kad ēka bija neapdzīvota. Tomēr ziemā virsmas temperatūra ap durvīm un logiem pazeminājās zem $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Liela apmeklētāju skaita gadījumā gaisa stāvokļa izmaiņas virziens bija $\epsilon = 3,2\text{ kJ/kg}$. Moljē diagramma parādīja novirzi starp simulēto un mērīto datu līknēm (11. att.), iespējams, āra gaisa infiltrācijas vai mitruma uzkrāšanās dēļ koka konstrukcijās un augstākas iekštelpu temperatūras fona dēļ. No visām četrām baznīcām Rīgas Jēzus baznīcā tika novēroti visstabilākie ziemas iekštelpu apstākļi, neskatoties uz īslaicīgām svārstībām.



11. attēls. Gaisa izmaiņu procesa virziens Moljē diagrammā (sarkanā – ϵ , zilā – izmērītā) Liepājas katedrālē, Rīgas Jēzus baznīcā, Krimuldas un Turaidas baznīcā.

Simulācija Krimuldas baznīcai, kas ir būvēta no granīta mūra (sienas biezums – 1,6 m), neuzrādīja labu atbilstību mērījumu datiem. *IDA ICE* modelis par zemu novērtēja virsmas temperatūru, galvenokārt tāpēc, ka tas neņem vērā baznīcai raksturīgo augsto termisko inerģi un pārtrauktās apkures režīmu. Mērījumi parādīja, ka faktiskās sienu virsmas temperatūras saglabājās virs 0 °C, savukārt modelis prognozēja sasalšanas apstākļus. Aprēķinātais gaisa stāvokļa izmaiņas virziens $\epsilon = 6,33$ kJ/kg atšķirās no mērījumiem, vēlreiz apliecinot, ka mitruma izdalīšanās no konstrukcijām būtiski ietekmē rezultātus, ko modelis nespēj pienācīgi atainot.

Turaidas baznīcai, kas arī ir koka ēka ar pārtrauktu apkuri, simulācija norādīja augstāku virsmas temperatūru, nekā tika mērīts neapdzīvotajos ziemas periodos. Līdzīgi kā Krimuldā, arī šeit modelis pārvērtēja termisko veiktspēju, jo izmantotie vienkāršotie pieņēmumi neatspoguļo faktiskās ēkas uzvedību pārtrauktās apkures režīmā. 2022. gada 24. decembrī, kad baznīcā atradās 70 apmeklētāji, aprēķinātais gaisa stāvokļa izmaiņas virziens sasniedza $\epsilon = 17$ kJ/kg. Novirze no mērītajiem iekštelpu parametriem parādīja, kā siltuma uzkrāšanās un mitruma noturēšanās koka elementos izkropļo simulācijas rezultātus reālos apstākļos.

Kopumā visās četrās baznīcās veiktās simulācijas parādīja, ka vienkāršoti enerģijas modeļi, piemēram, *IDA ICE*, nespēj pilnībā attēlot mitruma dinamiku un termisko inerģi vēsturiskās ēkās, īpaši apstākļos, kad ir neregulāra apkure un masīvas konstrukcijas. Lai arī šādi modeļi ir noderīgi riska zonu identificēšanai un vispārējās gaisa uzvedības analīzei, tie nereti pārvērtē vai par zemu novērtē virsmas temperatūras un mitruma mijiedarbību, īpaši baznīcās ar neregulāru apkuri un ierobežotu ventilācijas kontroli.

Tāpēc, lai gan simulācijas ir vērtīgs atbalsta rīks, tās jālieto kopā ar empīriskiem mērījumiem un padziļinātu izpratni par ēkas fiziku, lai nodrošinātu precīzu klimata pārvaldību vēsturiskajos dievnamos.

4. METODOLOĢIJA KONSERVĒJOŠA MIKROKLIMATA UZTURĒŠANAI VĒSTURISKĀS ĒKĀS

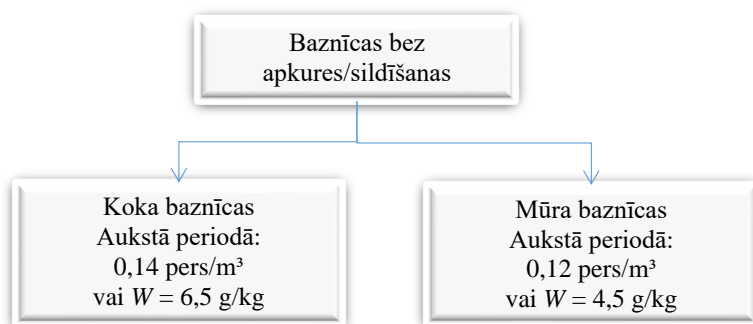
Nodaļā tiek piedāvāta metodoloģija konservējoša mikroklimata nodrošināšanai vēsturiskās kulta ēkās, kas izstrādāta, apvienojot apkures stratēģiju, izmantošanas intensitāti un ēku tipoloģiju. Balstoties 3. publikācijas (Krimuldas baznīca) un 5. publikācijas (Turaidas, Rīgas Jēzus baznīca un Liepājas katedrāle) datos, ēkas vispirms tiek klasificētas pēc apkures stratēģijas — bez apkures, ar pārtrauktu apkuri vai ar pastāvīgu apkuri – saskaņā ar standartu *NE 15759-1*.

Otrā klasifikācijas kārtā tiek ņemta vērā ēkas izmantošanas intensitāte, un katrā grupā baznīcas tiek iedalītas divos veidos pēc norobežojošo konstrukciju materiāla – koka vai mūra. Šīs konstrukciju atšķirības būtiski ietekmē termisko pretestību, siltuma inerci un mitruma dinamiku.

Baznīcām bez apkures, kā tas novērots Turaidas (koka) un Krimuldas (mūra) baznīcās, mērījumi liecina, ka apmeklētāju skaits un iekšējā mitruma slodze pasākumu laikā var radīt kondensācijas riskus.

Koka baznīcām ziemas periodā gaisa mitruma saturs nedrīkst pārsniegt 3,5 g/kg, vasarā — 10 g/kg, un apmeklētāju blīvums jā saglabā zem 0,14 pers./m³.

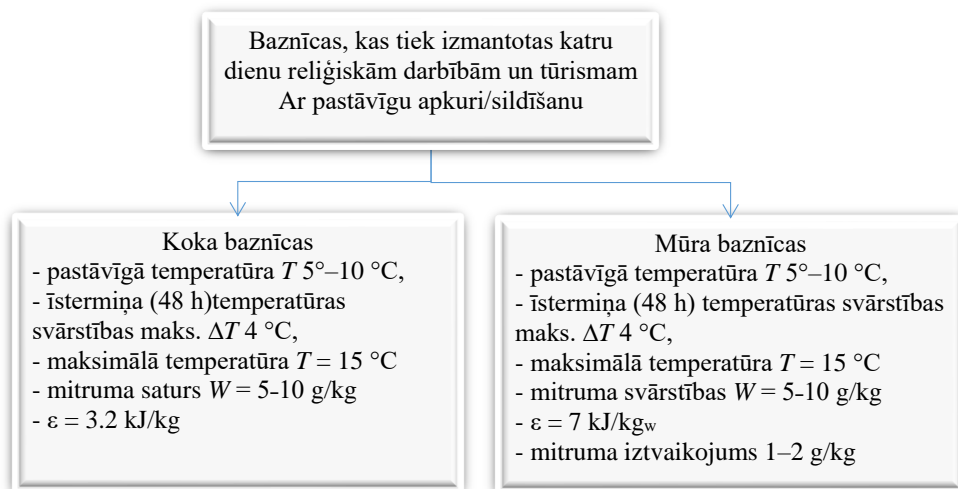
Mūra baznīcām iekštelpu temperatūra nedrīkst pazemināties zem 7 °C, vai arī gaiss jāžāvē līdz zemākam mitruma saturam – zem 6,1 g/kg, lai izvairītos no kondensācijas (12. att.).



12. attēls. Gaisa parametru robežvērtības baznīcas bez apkures/sildīšanas.

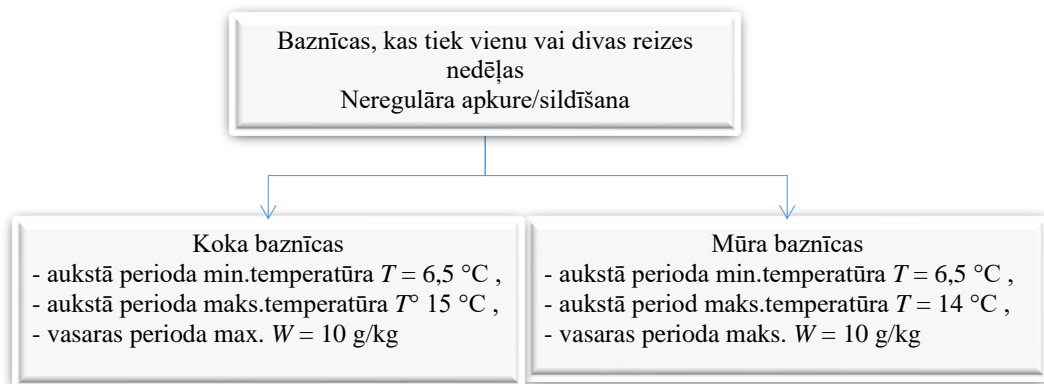
Baznīcās ar apkuri/sildīšanu tiek izceltas divas stratēģijas.

I. Rīgas Jēzus baznīca, Liepājas katedrāle izmanto pastāvīga apkure/sildīšana stratēģiju. Simulācijas un mērījumi rāda, ka ziemas periodā augstas siltumenerģijas dēļ notiek materiālu izžūšana, savukārt vasaras periodos var būt nepieciešama gaisa žāvēšana, ja relatīvais mitruma saturs pārsniedz 10 g/kg, bet ziemā – mitrināšana, ja tas nokrītas zem 5 g/kg. Atļauts maksimālais īslaicīgs iekštelpu temperatūras pieaugums ir 4 °C (13. att.).



13. attēls. Gaisa parametru robežvērtības baznīcām ar pastāvīgu apkuri/sildīšanu.

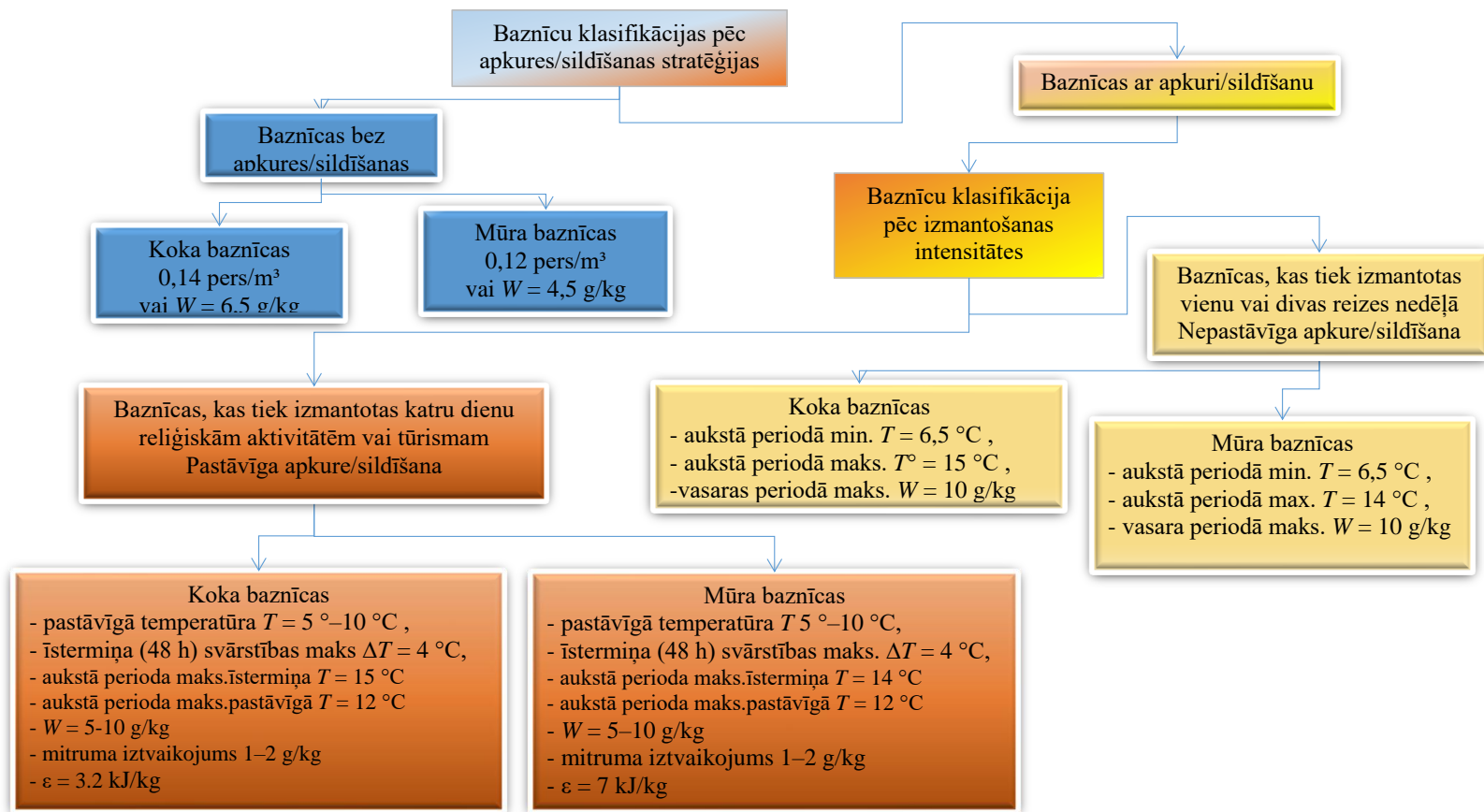
II. Turaidas un Krimuldas baznīcās izmanto neregulāru apkures/sildīšanas stratēģiju. Straujšs temperatūras pieaugums izraisa strauju gaisa mitruma palielināšanos, jo no virsmām izdalās uzkrātais mitrums. Lai novērstu kondensācijas riskus un nodrošinātu konservējošu mikroklimatu, ir būtiski uzturēt minimālo temperatūru ap 6 °C un kontrolēt gaisa mitruma saturu robežās no 4.5 līdz 10 g/kg (14. attēls).



14. attēls. Gaisa parametru robežvērtības baznīcām ar neregulāru apkuri/sildīšanu.

Galametodoloģija (15. att.) apvieno minētās klasifikācijas un piedāvā praktiskas robežvērtības temperatūras un mitruma regulēšanai vēsturiskās baznīcās atkarībā no to apkures stratēģijas, konstrukciju materiāla un lietošanas intensitātes.

Šī pieeja veicina ilgtermiņa ēku un interjera vērtību saglabāšanu, samazinot kondensācijas un materiālu bojājumu risku.



15. attēls. Konservējošas mikroklimata nodrošināšanas metodoloģija.

5. PRAKTISKIE IETEIKUMI BANĪCU LIETOTĀJIEM

1. Uzstādīt gaisa parametru mērīšanas ierīces (temperatūra, relatīvais mitrums).
 2. Reģistrēt mērījumus žurnālā reizi dienā, bet intensīvākas ēkas izmantošanas laikā – vismaz divas reizes dienā.
 3. Viduslaiku mūra ēkās bez pastāvīgas apkures vai mehāniskās ventilācijas gadījumā uzstādīt mobilos gaisa sausinātājus, ja relatīvais mitrums sasniedz 95 %.
 4. Ja ziemas periodā tiek izmantota īslaicīga gaisa apsildīšana, to nepieciešams atkārtot vismaz ik pēc divām dienām arī laikā, kad ēka netiek lietota, lai uzturētu minimālo gaisa temperatūru +4 °C līdz +6 °C. Apkures laikā gaisa temperatūra nedrīkst pārsniegt +14 °C mūra ēkās un +15 °C koka ēkās, gaisa mitruma saturs nedrīkst pārsniegt 10 g/kg.
 5. Ja ziemā viduslaiku baznīca tiek izmantota bez apkures vai mitruma kontroles ierīcēm, apmeklētāju skaits jāierobežo līdz 0,12–0,14 personām uz 1 m³.
 6. Vasaras periodā (jūlijā un augustā) baznīcās bez gaisa sausināšanas iekārtām nav ieteicama ventilācija.
 7. Projektējot un uzstādot mehāniskās ventilācijas vai pastāvīgās apkures sistēmas, jāievēro šajā pētījumā noteiktās konservējoša mikroklimata robežvērtības.
- Koka baznīcām
 - Ziemas perioda pastāvīga temperatūra: 5–10 °C,
 - Īstermiņa (48 h) svārstības: maks. $\Delta T = 4$ °C,
 - Ziemas maksimālā īstermiņa temperatūra: 15 °C,
 - Gaisa mitruma saturs: 5–10 g/kg,
 - Mitruma izdalījumi no konstrukcijām: 1–2 g/kg,
 - Gaisa stāvokļa izmaiņas virziens: $\varepsilon = 3,2$ kJ/kg.
 - Mūra baznīcām
 - Ziemas periodā pastāvīga temperatūra: 5–10 °C,
 - Īstermiņa (48 h) svārstības: maks. $\Delta T = 4$ °C,
 - Ziemas perioda maksimālā īstermiņa temperatūra: 14 °C,
 - Gaisa mitruma saturs: 5–10 g/kg,
 - Mitruma izdalījumi no konstrukcijām: 1–2 g/kg,
 - Gaisa stāvokļa izmaiņas virziens: $\varepsilon = 7$ kJ/kg.

SECINĀJUMI

Pētījuma rezultātā sākotnēji izvirzītā hipotēze ir apstiprināta, pamatojoties uz salīdzinošiem mērījumu, aprēķinu un simulāciju datiem.

Papildu hipotēzes apstiprināšanai pētījumā iegūti vairāki būtiski zinātniskie rezultāti, kas balstīti 2.–5. publikācijā un šī promocijas darba 5. un 6. nodaļā aprakstītajā analizē, ko autors veicis promocijas darba izstrādes gaitā.

2. publikācijā, analizējot baznīcas ar atšķirīgām norobežojošajām konstrukcijām, konstatēts, ka iekštelpu gaisa pārmērīgais mitrums sasniedz līdz $+6,0 \text{ g/m}^3$ (90 % likne), savukārt aukstajā periodā tas ir $1\text{--}2 \text{ g/m}^3$ robežās.

3. publikācijā, balstoties mērījumos, kas veikti Krimuldas baznīcā, noteikts, ka mitruma emisija no būvkonstrukcijām var sasniegt līdz 2 g/kg . Šajā publikācijā aprakstīts arī veiktais 264 Latvijas baznīcu apkopojums, uz kura pamata izstrādāta baznīcu tipoloģija.

4. publikācijā pierādīts, ka gaisa procesu analīze psihrometriskajās un Moljē diagrammās ir būtiska gaisa apstrādes procesu noteikšanai un ilgtspējīgu HVAC sistēmu projektēšanai.

5. publikācijā noteiktas kritiskās mikroklimata robežvērtības, parādot, ka iekštelpu mitruma saturs var sasniegt līdz $13,52 \text{ g/kg}$, kas rada kondensācijas riskus. Tika noteikts, ka drošs mitruma līmenis siltajā periodā nepārsniedz 10 g/kg , savukārt aukstajā periodā nepieciešams uzturēt vai nu minimālo temperatūru $6\text{--}7 \text{ }^\circ\text{C}$, vai samazināt mitruma saturu līdz $3,5\text{--}4,5 \text{ g/kg}$.

Promocijas darba 5. nodaļā aprakstītā simulāciju analīze parāda, ka *IDA ICE* programmatūra pilnvērtīgi neņem vērā masīvo mūra konstrukciju siltuma akumulācijas efektu, kā rezultātā simulācijas rezultāti var atšķirties no mērījumu datiem, īpaši periodiskās apkures gadījumā.

Savukārt 6. nodaļā pirmo reizi sistemātiski noteiktas gaisa parametru robežvērtības vēsturisku reliģisko ēku konservējošam mikro klimatam, kā arī izstrādāta metodoloģija to nodrošināšanai.

Izstrādātā metodoloģija konservējoša mikroklimata nodrošināšanai vēsturiskās kulta ēkās sniedz būtiskus ieguvumus gan ēku lietotājiem, gan AVK sistēmu projektētājiem.

Vadlīnijas ēku lietotājiem

- Optimizētas apkures stratēģijas. Lietotāji var ieviest apkures stratēģijas, pamatojoties uz ēku klasifikāciju – bez apkures, ar pārtrauktu apkuri un ar pastāvīgu apkuri. Tas ļauj uzturēt piemērotus iekštelpu apstākļus, vienlaikus samazinot enerģijas patēriņu un vides ietekmi.
- Kondensācijas risku mazināšana. Metodoloģijā sniegtas skaidras vadlīnijas kondensācijas risku novēršanai gan aukstajā, gan siltajā sezonā, tādējādi nodrošinot būvkonstrukciju un interjera elementu saglabāšanu.

Ieguvumi AVK sistēmu projektētājiem

- Pielāgota sistēmu projektēšana. AVK projektētāji var izstrādāt risinājumus, kas atbilst katra kulta ēkas veida (koka vai mūra) un tās apkures stratēģijas (pārtraukta vai pastāvīga) specifiskajām vajadzībām. Ieteikumi par temperatūras un mitruma kontroli ir saskaņoti ar kultūras mantojuma saglabāšanas principiem.

- Konservācijas mērķu integrācija. Metodoloģija palīdz integrēt konservācijas mērķus AVK sistēmu projektēšanā, veicinot ilgtspējīgu pieeju, kas apvieno kultūras vērtību saglabāšanu ar energoefektivitāti.

Ieguvumi ēku ilgtermiņa saglabāšanā

- Uzlabota saglabāšana, ievērojot metodoloģiju, ēku lietotāji un inženieri var būtiski samazināt mitruma vai temperatūras svārstību izraisīto materiālu bojājumu risku un veicināt kultūras vērtību ilglaicīgu saglabāšanu.
- Ilgtspējīga apsaimniekošana. Kontrolētas apkures un mitruma regulēšanas prakses nodrošina to, ka ēkas ilgstoši saglabā savu konstruktīvo integritāti un kultūrvēsturisko nozīmi.

Kopsavilkums

Metodoloģija sniedz praktiskas un pierādījumos balstītas vadlīnijas, kas ļauj ēku lietotājiem un AVK projektētājiem efektīvi sadarboties vēsturisko kulta ēku saglabāšanā. Stratēģiju ieviešana uzlabo šo ēku ilgmūžību un kultūras vērtību, vienlaikus veicinot ilgtspējīgu ēku apsaimniekošanas praksi.

ATSAUCES

- [1] M. Metals, A. Lesinskis, and K. Turauskis, “Control of Indoor climate of Historical cult buildings,” in *E3S Web of Conferences*, vol. 246, 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202124601005.
- [2] “Standard, LVS EN 15759-1 Conservation of cultural property - Indoor climate - Part 1: Guidelines for heating churches, chapels and places of worship,” 2012.
- [3] A. Lesinskis, U. Strauts, M. Metals, R. Millers, and V. Afonicevs, “Ventilation and air conditioning design approach based on ASHRAE psychrometric chart and Mollier diagram,” no. March, pp. 1–9, 2024, doi: 10.3389/fbuil.2024.1372288.
- [4] R. I. Oliveira, P. Orenstein, and Z. F. Rico, “Finite-sample properties of the trimmed mean,” pp. 1–37, 2022.
- [5] O. A. Alduchov and R. E. Eskridge, “Improved Magnus’ from aproximation of saturation vapor pressure.” 1997, [Online]. Available: <http://www.osti.gov/servlets/purl/548871-PjpxAP/webviewable/>.
- [6] M. Poljak and R. Ponechal, “Microclimatic Monitoring—The Beginning of Saving Historical Sacral Buildings in Europe,” *Energies*, vol. 16, no. 3, p. 1156, 2023, doi: 10.3390/en16031156.
- [7] S. Emperhoff, M. Eberl, T. Dwertmann, and J. Wöllenstein, “On the Influence of Humidity on a Thermal Conductivity Sensor for the Detection of Hydrogen,” pp. 1–13, 2024.
- [8] “Standard, EN ISO 13788:2013 Hygrothermal performance of building components and building elements – Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation – Calculation methods,” 2020.
- [9] M. Metals, A. Lesinskis, A. Borodinecs, and K. Turauskis, “Preliminary Study on Indoor Air Temperature and Moisture Behaviour in 13th-Century Churches in Latvia,” *sustainability*, vol. 15, no. 18, 2023, doi: 10.3390/su151813965.
- [10] M. Metals, A. Palcikovskis, A. Borodinecs, and A. Lesinskis, “Typology of Latvian Churches and Preliminary Study on Indoor Air Temperature and Moisture Behavior,” *Buildings*, vol. 12, no. 9, 2022, doi: 10.3390/buildings12091396.
- [11] M. Metals, A. Lesinskis, A. Borodinecs, and K. Turauskis, “Energy & Buildings Study on indoor air temperature and moisture behaviour in historical churches,” *Energy Build.*, vol. 310, no. November 2023, p. 114083, 2024, doi: 10.1016/j.enbuild.2024.114083.



Mārtiņš Metāls dzimis 1976. gadā Rīgā. Rīgas Tehniskajā universitātē ieguvis bakalaura (2011) un maģistra (2012) grādu siltuma, gāzes un ūdens inženiersistēmās. Strādājis vairākos lielos būvprojektos objekta inženiera amatā. Kopš 2010. gada ir SIA "Akords U" valdes priekšsēdētājs un vadošais inženieris, piedalās valstiski nozīmīgos kultūrvēsturisko ēku restaurācijas/rekonstrukcijas projektos. Par realizētajiem objektiem kā atbildīgais būvuzraugs saņēmis vairākus apbalvojumus konkursos:

- "Latvijas būvniecības gada balva" 1. vieta (2022) un 1. vieta (2023) nominācijā "Restaurācija";
- "Gada labākā būve" 1. un 3. vieta (2022) un 1. vieta (2023) nominācijā "Restaurācija";
- "Energoefektīvākā atjaunojamā ēka" 2. vieta (2020) un 1. vieta (2021) nominācijā "Energoefektīvākā atjaunotā daudzdzīvokļu ēka".

2024. gada decembrī pieteikts patents "Paņēmienam karkasa ēku būvniecībai" pēc SIA "Akords U" ražošanas principa.