



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Pastatų sandarumo tyrimų lyginamoji analizė
Baigiamasis magistro studijų projektas

Eglė Smilgytė
Projekto autorė

Doc. Dainius Vaičiulis
Vadovas

Panevėžys, 2021



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Pastatų sandarumo tyrimų lyginamoji analizė

Baigiamasis magistro studijų projektas
Statybos valdymas (6211EX007)

Eglė Smilgytė
Projekto autorė

Doc. Dainius Vaičiulis
Vadovas

Jovita Kaupienė
Konsultantė

Recenzentas / Recenzentė

Panevėžys, 2021



Kauno technologijos universitetas

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Eglė Smilgytė

Pastatų sandarumo tyrimų lyginamoji analizė

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Eglės Smilgytės, baigiamasis projektas tema „Pastatų sandarumo tyrimų lyginamoji analizė“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

TVIRTINU
TVKC vadovė
Doc. dr. Nida Kvedaraitė

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Diplomantei *Eglei Smilgytei*

Baigiamojo projekto tema lietuvių kalba

PASTATŲ SANDARUMO TYRIMŲ LYGINAMOJI ANALIZĖ

Baigiamojo projekto tema anglų kalba

COMPARATIVE ANALYSIS OF BUILDING TIGHTNESS STUDIES

Patvirtinta 2020 m. lapkričio 9 d. dekanı potvarkiu Nr. V25-13-20.

Parengto baigiamojo projekto įkėlimo į Lietuvos akademinės elektroninės bibliotekos informacinės sistemos (eLABa) talpyklą ir Moodle aplinką terminas iki 2021 m. sausio 4 d.

Duomenys, reikalavimai ir sąlygos baigiamajam projektui

Tyrime panaudoti ne mažiau kaip 4-ių maždaug vienodo tūrio, bet skirtingų aukščių A++ energinio efektyvumo klasės gyvenamosios paskirties pastatų sandarumo duomenys. Taikyti daugiakriterius SAW ir TOPSIS metodus. Tyrime panaudoti ne mažiau kaip 5-is pastato sandarumo rodiklius. Apklausti ne mažiau kaip 7-is statybos srities ekspertus (projektų vadovus, inžinierius ir pan.). Baigiamasis magistro projektas turi atitikti KTU Panevėžio technologijų ir verslo fakulteto baigiamųjų projektų rengimo metodinius reikalavimus.

Baigiamojo projekto užduotys/uždaviniai, kurie turi būti atskleisti projekte

- 1. Išnagrinėti Lietuvos ir užsienio mokslininkų atliktus tyrimus susijusius su pastatų sandarumo matavimais.*
- 2. Išanalizuoti daugiakriterius SAW ir TOPSIS vertinimo metodus.*
- 3. Atlikti statybos srities ekspertų apklausą pastatų sandarumo klausimais.*
- 4. Nustatyti kokią įtaką sandarumo rodikliams turi pastato aukštis, palyginti rezultatus, gautus SAW ir TOPSIS metodais.*

Vadovas / Vadovė:

Dainius Vaičiulis

(vadovo pareigos, vardas, pavardė, parašas)

Užduotį gavau:

Eglė Smilgytė

(studento vardas, pavardė, parašas)

2020 m. lapkričio 26 d.

Smilgytė, Eglė. Pastatų sandarumo tyrimų lyginamoji analizė. Magistro studijų baigiamasis projektas / vadovas doc. Dainius Vaičiulis; Kauno technologijos universitetas, Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): statybos inžinerija, technologijos mokslai (inžinerijos mokslai).

Reikšminiai žodžiai: Sandarumo tyrimai, pastatai, analizė, SAW metodas, TOPSIS metodas.

Panevėžys, 2021. 69 p.

Santrauka

Tobulėjant technologijoms ir statybos procesams, dažnai išgirstame sąvoką pastatų sandarumas. Ši sąvoka yra svarbi šiomis dienomis, norint pagerinti komfortišką gyvenimą bei prisidėti prie ekologijos vystymosi. Tokiu būdu, turime sumažinti pastatų šilumos nuostolius, kuriuos patiriame per nesandarius ir nekokybiškai pastatytus pastatus. Norint to išvengti, pastatuose turi būti atliekami sandarumo tyrimai.

Darbo tikslas – atlikti pastatų sandarumo tyrimų lyginamąją analizę.

Aktualumas ir naujumas - pasitelkiant durų pūstuvo eksperimentinius tyrimus nustatomas pastatų sandarumas, kurio metu išsiaiškinama pastato sandarumo būklė. Nuo 2021 metų įsigaliojo:

- naujas statybos įstatymas, kuris reglamentuoja pastatus statyti A++ klasės šilumos efektyvumo;
- reikalavimas naujos statybos pastatams atlikti sandarumo tyrimus. Tyrimo metu pasitelkiamas pūstuvo durų tyrimo mechanizmas, kuris atlieka visus skaičiavimus parodydamas sandarumo lygį pastatuose.

Problematika - pastatų sandarumas tampa vienas iš svarbiausių veiksnių, turinčių įtakos pastato kokybei, komfortiškam pastatų eksplotavimui ir investicijoms išsaugoti. Šiandien statybose susiduriama su vis didesne problema, kokių veiksmų reikia imtis, kad suprojektuoti, pastatyti ir renovuoti pastatai atitiktų pastatų energetinio efektyvumo standartus.

Magistro baigiamajame darbe naudojami tyrimų metodai: mokslinės literatūros analizė, ekspertų apklausa, SAW ir TOPSIS daugiakriteriai metodai.

Magistro baigiamasis darbas susideda iš trijų dalių: užsienio ir Lietuvos mokslininkų darbų apžvalga, tyrimų metodologija, praktinis tyrimas.

Pirmajame skyriuje analizuojama užsienio ir Lietuvos mokslininkų tyrimai susiję su sandarumo matavimo bandymais. Pastatų sandarumas laikomas svarbiu pastatų energijos vartojimo efektyvumo ir jų komforto gerinimo elementu. Pastatų energinis naudingumas skirstomas į klases, kurioms priskiriami galimi oro kaitos rodikliai, remiantis Europos standartu ISO 9972 [1], kuris reglamentuoja: nesandarus pastatas $n_{50} > 3 \text{ h}^{-1}$; mažai energijos naudojantis pastatas $n_{50} < 1,5 \text{ h}^{-1}$; pasyvūs namai $n_{50} < 0,6 \text{ h}^{-1}$. Didžioji dalis pastatų yra senos statybos, kuriuose atliekami sandarumo bandymai viršija normas. Energinio efektyvumo gerinimui yra siūloma daugiau dėmesio skirti pastatų geometrijai. Išsiaiškintos labiausiai nesandarios vietos: tai stogas, langai, durys, lubų ir

sienu jungtys. Taip pat, aptariama ventiliacijos svarba sandariuose pastatuose, kadangi didinant pastato sandarumą, turi būti užtikrinta tinkama ventiliacijos sistema. Gera patalpų ventiliacija ir šviežias oras patalpose yra labai didelis prioritetas ofisuose, mokymosi įstaigose, kur žmonės ilgą valandą praleidžia uždaroje patalpoje. Pastatų pralaidumas yra svarbus parametras, kuriuo reikia pasirūpinti, todėl ventiliacija turi būti vykdoma tinkamai įdiegta sistema.

Antrame skyriuje aptarta, kaip atliekamas sandarumo bandymas, kokio pasiruošimo reikia, norint atlikti sandarumo bandymą, aptartos bandymo sąlygos bei reikalinga įranga sandarumo bandymui atlikti. Aptartas sandarumo bandymo rodiklių skaičiavimas, taikant formules. Aprašomi daugiakriteriniai metodai. Išnagrinėjami SAW ir TOPSIS daugiakriteriniai skaičiavimo metodai.

Trečiajame skyriuje supažindinama su rodikliais, kurie naudojami sandarumo bandymo rezultatų priklausomybei nuo pastato aukščio daugiakriteriniam vertinimui atlikti. Atliekamas reikšmių reikšmingumo nustatymas, kurio metu atliekama statybos srities ekspertų apklausa dėl rodiklių reikšmingumo. Ekspertų nuomone svarbiausias reikšmingumo rodiklis yra oro apykaita, esant 50 Pa, n_{50} [h^{-1}]. Mažiausiai svarbus rodiklis savitoji skverbtis pastato grindų ploto vienetui, esant 50 Pa, q_{F50} [$\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$]. Apskaičiuoti sandarumo bandymo rodikliai, kurie naudojami tyrimui atlikti.

Atliktame tyrime sandarumo bandymo rezultatų priklausomybė nuo pastato aukščio daugiakriteriniais SAW ir TOPSIS metodais, nustatyta, kad pastatų aukštis turi įtakos sandarumo bandymo rodikliams. Geriausias prioritetinis variantas SAW metodu yra pastatas A. Labiausiai prioritetinis pastatas A, nuo labiausiai ne prioritetinio pastato E skiriasi 1,9 karto. Geriausias prioritetinis variantas TOPSIS metodu yra pastatas A. Labiausiai prioritetinis pastatas A, nuo labiausiai ne prioritetinio pastato E skiriasi 200 kartų. Tiek SAW, tiek TOPSIS metodu, vienodo tūrio pastatuose geriausias rezultatas gautas pastate A, aukščiausiam pastate, kuris yra 6,2 metrų. Prasčiausias rezultatas pastate E, kurio aukštis yra 3,4 metro. Didėjant pastato aukščiui, sandarumo bandymo rodikliai mažėja, t.y. pastate A oro apykaitos rodiklis nuo pastato E skiriasi 1,933 karto, o ekvivalentinio nesandarumo rodiklis skiriasi 1,911 karto. Didėjant pastato atitvarų plotui, atsiranda didesnė tikimybė atsirasti didesniai nesandarumui. To pačio tūrio pastatai, tik skirtingų aukščių, turi skirtingą stogo plotą. Žemesniuose pastatuose stogo plotas didesnis, vadinasi didėja pastato nesandarumo tikimybė per stogą. Jei tas pačias erdves suskirstytume į aukštus ir mažintume perimetrą, pastatas būtų efektyvesnis. Galima daryti išvadą, kad pastato aukštis turi įtakos pastato sandarumo rodikliams. Tai parodo, kad norint išsaugoti pastato efektyvumą, jie turėtų būti projektuojami ir statomi atsižvelgiant į pastato aukštį, bet ne į pastato perimetro dydį.

Smilgytė, Eglė. Comparative analysis of building tightness studies. Master's Final Degree Project / supervisor assoc. prof. Dainius Vaičiulis; Kaunas University of Technology, Panevėžys Faculty of Technology and Business.

Study field and area (study field group): Civil Engineering, Technology Sciences (Engineering Sciences).

Keywords: Leak tests, buildings, analysis, SAW method, TOPSIS method.

Panevėžys, 2021. 69 pages.

Summary

As technology and construction processes improve, we learn about the tightness of concept buildings. This concept is very important these days, and it is necessary to improve our comfortable life both by contributing to the development of ecology and from the heat loss of buildings that occur through leaky and poorly constructed buildings. To prevent this, leak tests must be carried out in buildings.

The aim of the work is to perform a comparative analysis of building tightness research.

Relevance and novelty - with the help of experimental research of the door blower to determine the tightness of buildings, during which the state of tightness of the building is clarified. From 2021 came into force:

- a new law on construction, which regulates the heat efficiency of a building with A ++ class construction;
- requirement for new construction buildings to be tested for leaks. The test uses a blower door test mechanism that performs all calculations showing the tightness conditions in buildings.

The problem is that the tightness of buildings is becoming one of the most important factors influencing the quality of the building, the comfortable operation of buildings and the preservation of investments. Today, construction is facing an increased problem: what actions need to be taken to ensure that designed, constructed and renovated buildings meet building energy efficiency standards.

Research methods that are used in the master's thesis: Analysis of scientific literature, expert survey, SAW and TOPSIS multi-criteria methods.

The master's thesis consists of three parts: an overview of the works of foreign and Lithuanian scientists, research methodology, practical research.

The first chapter analyses the part of foreign and Lithuanian scientist's research about tightness measurement assay. The energy efficiency of buildings and the improvement of their comfort are the most important elements in the tightness of buildings. The energy performance of buildings is divided into classes, which include possible air change indicators, according to the European standard ISO 9972 [1], which regulates: leaking building $n_{50} > 3 \text{ h}^{-1}$; low energy building $n_{50} < 1.5 \text{ h}^{-1}$; passive houses $n_{50} < 0.6 \text{ h}^{-1}$. Most of the buildings are old buildings with leak tests exceeding

the norm. For the improvement of energy efficiency, more attention is proposed to the geometry of buildings. The current locations identified are: the roof, windows, doors, ceiling and wall joints. The importance of ventilation in airtight buildings is also discussed, as a proper ventilation system must be ensured when increasing the tightness of a building. Good indoor ventilation and fresh indoor air are a very big priority in work offices, educational institutions where people spend a lot of time in enclosed spaces. The permeability of buildings is a very important parameter to be prepared for, so ventilation must be carried out using the installed system.

The second section discusses how the leak test is performed, what preparations are required, the test conditions and the equipment required to perform the test. The calculation of leak test parameters using formulas is also discussed. Multi-criteria methods are described. SAW and TOPSIS multi-criteria calculation methods are analysed.

The third chapter introduces the indicators used to make the dependence of the tightness test results on the height of the building for multi-criteria assessment. Also, the significance of the values is determined, during which a survey is conducted by interviewing construction experts on the significance of the indicators. According to experts, the most important significance indicator is air circulation at 50 Pa, n_{50} [h^{-1}]. The least important indicator is the specific penetration per unit floor area of the building at 50 Pa, q_{F50} [$\text{m}^3 / \text{h} / \text{m}^2$]. The tightness test parameters used to perform the study were calculated.

In the study, the dependence of the results of the tightness test on the height of the building by multi-criteria SAW and TOPSIS methods, it was found that the height of the buildings affects the indicators of the tightness test. The best priority option for the SAW method is building A. The most priority building A differs 1.9 times from the most non-priority building E. The best priority option using the TOPSIS method is building A. The most priority building A differs from the most non-priority building E by 200 times. In both the SAW and TOPSIS methods, in flat-volume buildings, the best result was obtained in building A, the tallest building, which is 6.2 meters. The worst result is in building E, which is 3.4 meters high. As the height of the building increases, the tightness test performance decreases, in building A, the air exchange rate differs from building E by 1.933 times and the equivalent leakage rate differs by 1.911 times. As the area of the building's partitions increases, there is a greater likelihood of a greater leak. Buildings of the same volume, only of different heights, have different roof areas. In lower buildings, the roof area is larger, which increases the likelihood of the building leaking through the roof. If we divided the same spaces into floors and reduced the perimeter, the building would be more efficient. It can be concluded that the height of the building affects the tightness of the building. This shows that in order to maintain the efficiency of a building, they should be designed and built according to the height of the building but not the size of the perimeter of the building.

Turinys

Lentelių sąrašas	11
Paveikslų sąrašas	12
Santrumpų ir terminų sąrašas	13
Įvadas	14
1. Pastatų sandarumas statyboje	16
1.1. Pastatų sandarumo svarba.....	16
1.1.1. Infiltracijos ir sandarumo skirtumai	17
1.2.1. Pastato geometrijos svarba	19
1.4. Pastatų sandarumo bandymas Lenkijoje	20
1.5. Senų pastatų sandarumo tyrimas.....	22
1.6. Patalpų ventiliacijos svarba	25
1.7. Didelių pastatų sandarumo tyrimas	25
1.8. Nesandarios vietos pastatuose	27
1.9. Pastate langų svarba ir sandarumas.....	28
1.10. Konstrukcinės ir nekonstrukcinės pastato charakteristikos	29
1.10.1. Koreliacijos analizė	29
1.11. Pirmo skyriaus išvados	30
2. Sandarumo bandymo rezultatų priklausomybės nuo pastato dydžio daugiakriterinio vertinimo skaičiavimo metodika	31
2.1. Sandarumo bandymas.....	31
2.1.1. Pasiruošimas sandarumo bandymui	31
2.2. Sandarumo bandymo rodiklių skaičiavimas	33
2.3. Daugiakriteriniai metodai	34
2.4. SAW metodo skaičiavimo metodika.....	34
2.5. TOPSIS metodo skaičiavimo metodika	35
2.6. Antro skyriaus išvados	37
3. Sandarumo bandymo rezultatų priklausomybė nuo pastato aukščio daugiakriterinis vertinimas	38
3.1. Rodiklių parinkimas daugiakriteriams metodams taikyti.....	38
3.2. Reikšmių reikšmingumo nustatymo metodika	38
3.3. Ekspertų nuomonių suderinamumo tikrinimas	39
3.4. Sandarumo bandymo rodiklių apskaičiavimas	42
3.5. Sandarumo bandymo rezultatų priklausomybė nuo pastato dydžio daugiakriterinis vertinimas SAW metodu	47
3.6. Sandarumo bandymo rezultatų priklausomybė nuo pastato dydžio daugiakriterinis vertinimas TOPSIS metodu	48
3.7. Skaičiavimo rezultatai	51
3.8. Trečio skyriaus išvados	56
Išvados	57
Priedai	62
1 priedas. Apklauskos forma ekspertams.....	62
2 priedas. Norminė x^2_{kr} reikšmė.....	63
3 priedas. Pastato A bandymo informacijos ir rezultatų protokolai	65
4 priedas. Pastato B bandymo informacijos ir rezultatų protokolai	66

5	priedas. Pastato C bandymo informacijos ir rezultatų protokolas	67
6	priedas. Pastato D bandymo informacijos ir rezultatų protokolas	68
7	priedas. Pastato E bandymo informacijos ir rezultatų protokolas	69

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Priimtinas oro nepralaidumo lygis Europos pastatuose [5]	17
2 lentelė. Pastatų energinio naudingumo klasės ir galimi oro kaitos rodikliai [1]	18
3 lentelė. Tyrimų rezultatų santrauka ir skaičiavimai [11]	21
4 lentelė. Tyrimų rezultatų santrauka ir skaičiavimai (tęsinys 3 lentelės) [11]	21
5 lentelė. Pūtiklio durų bandymo rezultatai ir projektinis šilumos pralaidumas [12]	23
6 lentelė. Koreliacinės analizės rezultatai [31]	30
7 lentelė. Daugiakriterinėje analizėje naudojami vertinimo kriterijai (rodikliai)	38
8 lentelė. Balų vertinimo sistema	39
9 lentelė. Apklauso formos pavyzdys	39
10 lentelė. Apklauso rezultatai	39
11 lentelė. Rangų suma ir vidutinio rango reikšmės	40
12 lentelė. Santykinis reikšmingumas ir prioritėtinė eilutė	42
13 lentelė. Pastato ir bandymo informacija – Pastatas A.....	42
14 lentelė. Pastato ir bandymo informacija – Pastatas B.....	43
15 lentelė. Pastato ir bandymo informacija – Pastatas C.....	44
16 lentelė. Pastato ir bandymo informacija – Pastatas D.....	45
17 lentelė. Pastato ir bandymo informacija – Pastatas E.....	45
18 lentelė. Apskaičiuotų rodiklių rezultatai	46
19 lentelė. Sprendimų priėmimo matrica P	47
20 lentelė. Normalizuota matrica \bar{P}	47
21 lentelė. Reikšmių matrica.....	48
22 lentelė. Sprendimų priėmimo matrica.....	49
23 lentelė. Normalizuota matrica \bar{P}	49
24 lentelė. Svertinė normalizuota matrica \bar{P}^*	49
25 lentelė. Idealiai geriausia ir blogiausia alternatyva	50
26 lentelė. Atstumai.....	50
27 lentelė. Santykiniai atstumai K_i	50
28 lentelė. SAW ir TOPSIS metodų skaičiavimo rezultatų palyginimas	51
29 lentelė. Reikšmingiausių rodiklių rezultatai.....	55

Paveikslų sąrašas

1 pav. Namų tipai ir jų formos veiksniai [9]	19
2 pav. Pastatų tipų išsklotinės [9]	20
3 pav. Pastatų sandarumo lygis [11].....	21
4 pav. Namų „Retrofit A“ išdėstymo planas [12]	22
5 pav. Namų „Retrofit B“ išdėstymo planas [12].....	23
6 pav. Gyvenamojo namo tipinių nuotėkio takų vietos [26].....	28
7 pav. Užsandarintos vėdinimo angos [Iš autoriaus asmeninio albumo]	32
8 pav. Orapūtės durelės [autoriaus sukurta].....	33
9 pav. Pastato A prototipas [autoriaus sukurta]	42
10 pav. Pastato B prototipas [autoriaus sukurta].....	43
11 pav. Pastato C prototipas [autoriaus sukurta].....	44
12 pav. Pastato D prototipas [autoriaus sukurta].....	45
13 pav. Pastato E prototipas [autoriaus sukurta].....	46
14 pav. Daugiakriterinio SAW metodo vertinimo racionaliausios alternatyvos parinkimo grafikas	48
15 pav. Daugiakriterinio SAW metodo vertinimo racionaliausios alternatyvos parinkimo grafikas	51
16 pav. SAW metodo rezultatai išreikšti procentais	52
17 pav. TOPSIS metodo rezultatai išreikšti procentais	52
18 pav. Oro apykaita skirtinguose pastatuose grafikas.....	53
19 pav. Savitoji skverbtis pastato atitvaros ploto vienetui skirtinguose pastatuose grafikas	53
20 pav. Savitoji skverbtis pastato grindų ploto vienetui skirtinguose pastatuose grafikas.....	54
21 pav. Ekvivalentinis nesandarumas skirtinguose pastatuose grafikas.....	54
22 pav. Normalizuotas nuotėkis skirtinguose pastatuose grafikas	55

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

EPBD – Europos Parlamento ir Europos tarybos direktyva;

EBPO – Ekonominio bendradarbiavimo ir plėtros organizacija;

ES – Europos Sąjunga;

MVHR – vėdinimo su rekuperacija įrenginys;

SAW – (angl. Simple Additive Weighting) paprastas adiktyvusis svorių metodas;

ŠVOK – šildymo, vėdinimo ir oro kondicionavimo sistema;

TOPSIS - (angl. Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution) kiekybinis vertinimo metodas;

Terminai:

Etaloninis slėgis – slėgio matavimo rodiklis;

Formaldehidas – jautrinanti cheminė medžiaga galinti turėti padarinių imuninei sistemai.

Mechaninė ventiliacija – gryno oro, švaros ir komforto palaikymas (rekuperatoriumi);

Pasyvus namas – energiją taupantis namas, taupus energijos suvartojimas;

Vienbutis namas – vieno arba dviejų butų namas;

Įvadas

Tobulėjant technologijoms ir statybos procesams, dažniau išgirstame sąvoką pastatų sandarumas. Ši sąvoka yra labai svarbi šiomis dienomis, norint pagerinti komfortišką gyvenimą ir prisidėti prie ekologijos vystymosi. Turime sumažinti pastatų šilumos nuostolius, kurie patiriami esant nesandariams ir nekokybiškiems pastatams. Norint išvengti pastatų šilumos nuostolius, pastatuose turi būti atliekami sandarumo tyrimai.

Aktualumas ir naujumas

Pasitelkiant durų pūstuvo eksperimentinius tyrimus nustatomas pastatų sandarumas, kurio metu išsiaiškinama pastato sandarumo būklė. Nuo 2021 metų įsigaliojo:

- naujas statybos įstatymas, kuris reglamentuoja pastatus statyti A++ klasės šilumos efektyvumo;
- reikalavimas naujos statybos pastatams atlikti sandarumo tyrimus. Tyrimo metu pasitelkiamas pūstuvo durų tyrimo mechanizmas, kuris atlieka visus skaičiavimus parodydamas sandarumo lygį pastatuose.

Problematika

Pastatų sandarumas tampa vienas iš svarbiausių veiksnių, turinčių įtakos pastato kokybei, komfortiškam pastatų eksploatavimui ir taip pat investicijoms išsaugoti. Šiandien statybose susiduriama su vis didesne problema, kokių veiksmų reikia imtis, kad suprojektuoti, pastatyti ir renovuoti pastatai atitiktų pastatų energetinio efektyvumo standartus.

Tyrimų objektas – pastatų sandarumo tyrimai.

Darbo tikslas – atlikti pastatų sandarumo tyrimų lyginamąją analizę.

Darbo uždaviniai:

1. Išnagrinėti Lietuvos ir užsienio mokslininkų atliktus tyrimus susijusius su pastatų sandarumo matavimais.
2. Išanalizuoti daugiakriterius SAW ir TOPSIS vertinimo metodus.
3. Atlikti statybos srities ekspertų apklausą pastatų sandarumo klausimais.
4. Nustatyti kokią įtaką sandarumo rodikliams turi pastato aukštis, palyginti rezultatus, gautus SAW ir TOPSIS metodais.

Tyrimų metodai:

1. Mokslinės literatūros analizė;
2. Ekspertų apklausa;
3. SAW, TOPSIS daugiakriteriniai metodai.

Darbo struktūra: baigiamąjį magistro darbą sudaro įvadas; trys skyriai: užsienio ir Lietuvos mokslininkų darbų apžvalga, tyrimų metodologija, praktinis tyrimas; išvados; literatūros sąrašas; priedai. Darbo apimtis – 69 puslapiai, iš kurių 7 priedai, panaudota 60 formulių, 29 lentelės, 22 paveiksiai, 44 literatūros šaltiniai.

Konferencijose skaityti pranešimai:

1. Smilgytė Eglė, Danas Garuckas. „Sandarumo bandymo rezultatų priklausomybė nuo pastato dydžio tyrimas“. Studentų mokslinių darbų konferencija. „Technologijų ir verslo aktualijos 2020“. Panevėžys: Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas, 2020 m. balandžio 24 d.

1. Pastatų sandarumas statyboje

1.1. Pastatų sandarumo svarba

Pastatų sandarumas laikomas svarbiu pastatų energijos vartojimo efektyvumo ir jų komforto gerinimo elementu. Atsižvelgiant į oro pralaidumo lygį pastatų sandarumas yra įtrauktas į statybų reglamentus [1,2]. Pastatai turi atitikti tam tikrą energinio naudingumo lygį ir nurodytą bendro oro srauto ribą. Terminas „sandarumas“ reiškia nekontroliuojamo oro srauto per pastatą intensyvumą, dėl slėgio skirtumų tarp vidinio ir išorinio oro. Pagerėjęs pastato sandarumas lemia žemą oro infiltraciją, kuri sumažina pastatų aušinimo apkrovą iš šilumos nuostolius. Minimalus pastato sandarumo lygis yra būtinas, norint efektyviai vėdinti orą ir oro šilumos sistemų veikiančių pastato energijos efektyvumą. Projektuojant pastatus neišku, kokio nutekėjimo galima tikėtis. Atlikus pūtiklio durų bandymą, galima išmatuoti oro srauto nutekėjimą, siekiant užtikrinti, kad maksimalus nekontroliuojamas oro srautas ar minimalus hermetiškumas yra tenkinami. Daugybe tyrimų bandyta numatyti pastatų sandarumą prieš atliekant pūtimo durų bandymą. Relanderis [3] padarė išvadą, kad nei vienas toks modelis negali iš esmės pakeisti pūstuvo durų bandymo.

Pastato hermetiškumui išreikšti yra naudojama:

1. Pastato atitvarų plotas.
2. Pastato tūris.
3. Grindų plotas.

Oro nutekėjimas

Atsitiktinis oro nutekėjimas paprastai vadinamas oro įsiskverbimu. Dažniausiai oro nutekėjimo priežastys būna šios:

- įtrūkimai aplink duris, langus;
- netinkamai pasirinktos medžiagos;
- nekokybiškai atlikti statybos darbai;
- blogai įrengti inžineriniai tinklai.

Oro nuotėkio matavimas

Norint nustatyti pastato sandarumą, atliekamas standartizuotas bandymas, kurio metu išmatuojamas praleidžiamo oro kiekis per pastatą, esant tam tikram slėgio skirtumui. Dažniausias metodas yra slėgio bandymas, kurio metu naudojamos pūstuvo durys. Šis metodas grindžiamas mechaniniu pastato ar jo dalies slėgio padidiniu arba mažinimu. Pūtiklis montuojamas į pastato priekinių arba galinių durų rėmą. Bandymo metu durys, langai ir ventiliacijos angos turi būti uždaryti.

Pastato sandarumas apibūdinamas kaip daugybė oro mainų pastate, kurie įvyksta per 1 valandą $n_{50} [h^{-1}]$ – tai oro nuotėkio srautas, esant 50 Pa (Q) slėgio skirtumui ir vidinio tūrio santykiui (V) (1).

$$n_{50} = \frac{Q}{V} \quad (1)$$

Relanderis, Holosas ir Thuesas [3], išskiria tris oro nuotėkio matavimo kategorijas, vertinant pastatų hermetiškumą:

1. Pastato charakteristikomis;
2. Pastato nuotėkiu;
3. Pastato geometrija.

1.1.1. Infiltracijos ir sandarumo skirtumai

Sandarumo nereikėtų painioti su infiltracija, teigia Prignon ir Van Moeseke [4]. Infiltracija yra fizinis reiškinys, kurio metu esant slėgio skirtumui (50 Pa), oras įsiskverbia į pastatą per pastato įtrūkimus ar netyčinius angas. Sandarumas yra pagrindinė pastato savybė turinti įtaką infiltracijai. Infiltracijos reiškinys priklauso nuo vėjo greičio, temperatūros ir vietos. O hermetiškumas yra numatomas nepriklausomai nuo klimato pokyčių. Nors sandarumas ir įsiskverbimas skiriasi, juos galima susieti matematiškai.

1.1.2. Tarptautiniai standartai

2002 m. gruodžio 16 d. Europos Sąjungos šalys pasirašė direktyvą [5]. EPBD direktyva nustato svarbius energetinio naudingumo rodiklius pastatuose. Pagrindinis tikslas – mažinti energijos suvartojimą ir didinti pastatų energinį naudingumą. 2010 m. gegužės 18 d. Europos Parlamente priimta direktyvos pataisa, kuri apibrėžia energijos taupymo nuostatas. Remiantis Europos Parlamento ir Tarybos direktyvos 2010/31/ES nuostatomis, pagrindinis dėmesys turi būti sutelktas į pastatų modernizaciją ir reikalavimus naujos statybos pastatams, kuriems nuo 2020 metų taikomas apibrėžimas „energijos suvartojimas artimas nuliui“.

Nuostatos taikomos naujos statybos ir renovuojamiems pastatams (renovacijos išlaidos turi siekti 25 % pastato vertės arba renovuojama pastato dalis turi sudaryti daugiau nei 25 % pastato ploto), o bendras plotas didesnis nei 50 m². Nuostatų tikslas – padidinti minimalius energetinio naudingumo reikalavimus atitinkančių pastatų skaičių bei sumažinti energijos sąnaudas ir anglies dvideginio išsiskyrimą į aplinką. Priimtinas oro nepralaidumo lygis Europos pastatuose pateikiamas 1 lentelėje.

1 lentelė. Priimtinas oro nepralaidumo lygis Europos pastatuose [5]

Reikalavimų sandarumas esant 50 Pa skirtumui		
Šalis	Gravitacinė ventilacija	Mechaninė ventilacija
Lenkija	3,0 h ⁻¹	1,5 h ⁻¹
Vokietija	3,0 h ⁻¹ arba 7,8 m ³ /h ant m ² paviršiaus grindų	1,5 h ⁻¹ arba 3,9 m ³ /h ant m ² paviršiaus grindų
Čekijos Respublika	4,5 h ⁻¹	Be šilumos atgavimo 1,5 h ⁻¹ Su šilumos atgavimu 1,0 h ⁻¹
Lietuva	3,0 h ⁻¹	1,5 h ⁻¹
Didžioji Britanija	Nauji pastatai, tarnybiniai pastatai ir viešieji pastatai didesni nei 500 m ² 10 m ³ /m ² × h	

Lenkijoje, Vokietijoje, Čekijoje taikomi skirtingi reikalavimai gravitacinei ir mechaninei sistemos ventilacijai.

Europos standarte ISO 9972:2015 [1], pristatyta metodika pastatų energiniam naudingumui didinti, kuria remiantis, turėtų būti atliekamas pastato sandarumo tyrimas. Atsižvelgiant į pastato paskirtį, reglamentuojama jo energetinio naudingumo klasė ir galima oro kaita pastate. Informacija pateikta 2 lentelėje. Pastato sandarumas pasyviai pastatui turi būti lygus $n_{50}0,6 h^{-1}$.

2 lentelė. Pastatų energinio naudingumo klasės ir galimi oro kaitos rodikliai [1]

Pastato paskirtis	Pastato energinio naudingumo klasė	Oro kaita pastate n_{50} [h^{-1}]
Gyvenamosios, administravimo, mokslo ir gydymo	C	2
	B	1,5
	A	1
	A+; A++	0,6
Maitinimo, prekybos, kultūros, viešbučių, paslaugų, sporto, transporto, specialioji ir poilsio	C; B	2
	A	1,5
	A+: A++	1

1.1.3. Sandarumo bandyme naudojami slėgiai

Visame pasaulyje sandarumo bandymams atlikti naudojami skirtingi slėgiai, kurie aptariami straipsnyje [6]:

75 Pa slėgis naudojamas nustatyti nuotėkį pro langus, sienas, duris. Gyvenamosios paskirties visam pastatui ištirti, esant tokiam slėgiui yra nepraktiška, nes bendra slėgio mažinimo įranga neturi pakankamai pajėgumų tam slėgiui pasiekti tiesiogiai.

50 Pa yra labiausiai paplitęs slėgis. Naudojamas pranešant apie pastato oro nuotėkį. Norint atlikti vieno taško matavimus paprastai naudojama 50 Pa slėgis.

10 Pa naudojamas kaip etaloninis slėgis ekvivalentinio nuotėkio plotui apibrėžti. Naudojamas netiesiogiai kaip srauto greitis.

4 Pa naudojamas kaip etaloninis slėgis efektyviam nuotėkiui apibrėžti.

Sandarumo bandymui atlikti dažniausiai naudojama 50 Pa slėgis. 50 Pa yra slėgis, kuris naudojamas norint išsiaiškinti gyvenamųjų namų nuotėkį. 50 Pa slėgis labiausiai naudojamas, dėl gaunamos duomenų kokybės ir mažesnės bandymų kainos.

1.2. Pastato sandarumas naujoje statyboje

Pastatų sandarumas yra svarbus pradedant naujos statybos darbus. Kuo sandarinimo darbai geriau atlikti, tuo mažesnė tikimybė kilti problemoms ateityje dėl namo sandarumo. Blogas sandarinimas ar jo nebuvimas, veikia pastato konstrukcijas, medžiagas, kadangi praleidžiama drėgmė.

Pasyvių namų sandarumo tyrimas

Pasyvių namų tikslas užtikrinti geras patalpų sąlygas ir sunaudoti kuo mažiau energijos šildymui ir vėdinimui. Pasyviems pastatams būdinga gera pastato izoliacija, langų kokybė, pastato forma, šildymas, vėdinimo ir oro kondicionavimo (ŠVOK) sistemos. Paprastai metinis energijos poreikis pasyviuose namuose yra 75-95 % mažesnis nei nesandaraus namo, kai pastato geometrijos yra tokios pat [7]. Pasyviuose pastatuose oro kokybė yra geresnė. Langer ir kiti mokslininkai [8] ištyrė, daugiau nei 20 naujų nepasyvių pastatų ir 21 pasyvų pastatą. Tyrimas parodė, kad formaldehido koncentracijos ir lakiųjų organinių junginių koncentracijos yra mažesnės pasyviuose pastatuose. Tai rodo, kad pastato oro pralaidumas turi poveikį energijos suvartojimui ir gyvenimo

kokybei. Sandarumas reikalingas ne tik sumažinti energijos kiekį ir išlaidas, bet ir svarbus faktorius, išsaugantis pastato kokybę. Teisingas pastato sandarinimas yra vienas svarbiausių aspektų statant pastatą.










1.2.1. Pastato geometrijos svarba

Norint pagerinti energinį efektyvumą didelis dėmesys skiriamas izoliacinėms, sandarinimo medžiagoms. Pastatų forma gali būti svarbi, teigia Briginshaw, Burke ir kiti [9]. Matematiniai modeliai naudojami numatant pastatų energijos suvartojimą. Šie modeliai teisingai atspindi formos koeficiento svarbą. Formos koeficientas yra pastato kompaktiškumo matas, išreikštas pastato atitvarų ploto ir pastato tūrio santykiu (2), turintis didelę įtaką pastato energijos poreikiui.

$$Formoskoef = \frac{S_A}{S_F} \quad (2)$$

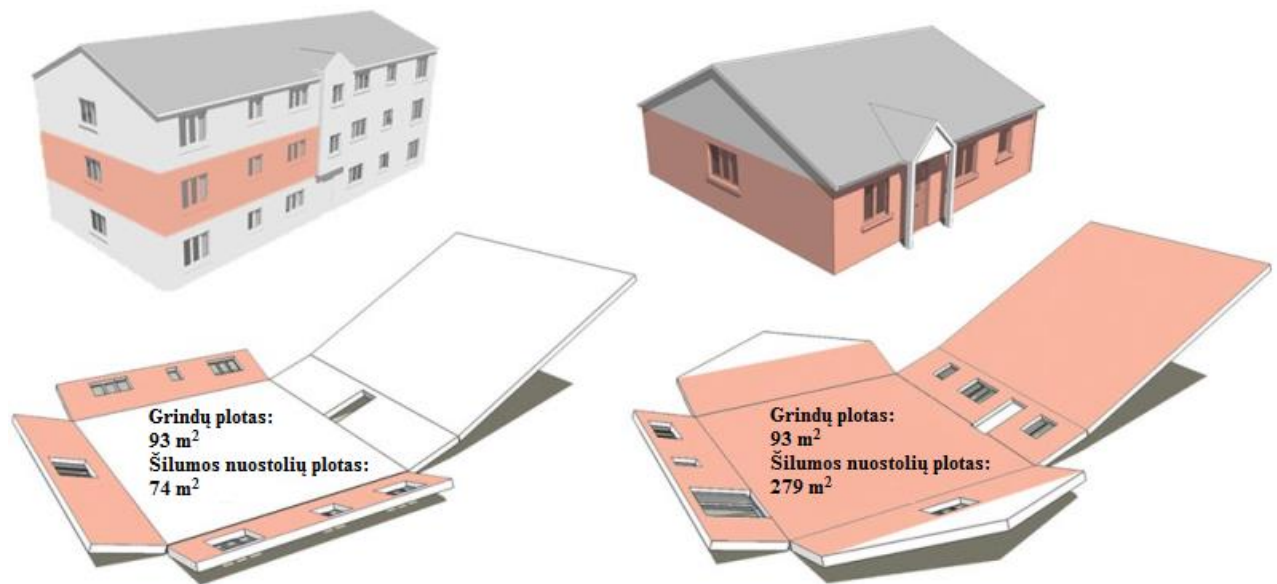
čia S_A - pastato išorės atitvarų plotas [m^2]; S_F - pastato grindų plotas [m^2];

Kuo mažesnis formos koeficientas gaunamas, tuo kompaktiškesnis ir efektyvesnis pastatas. Pastatų pavyzdžiai ir efektyvumas pateikiamas 1 paveiksle.

	TIPAS	FORMOS KOEFICIENTAS	EFEKTYVUMAS
	Vidurinis butas name	0,8	Labiausiai efektyvus 
	Vidurinis namas	1,7	
	Pusiau atskiras namas	2,1	
	Atskirtas namas	2,5	
	Vieno aukšto namas	3,0	Mažiausiai efektyvus

1 pav. Namų tipai ir jų formos veiksniai [9]

2 paveiksle pateikiama, kad vidurinis butas name yra tokio pat ploto kaip ir vieno aukšto pastatas, tačiau vidurinis butas name yra tris kartus efektyvesnis už vieno aukšto namą. Taigi, norint, kad pastatai būtų kuo efektyvesni reikėtų projektuojant dėmesį atkreipti ir į pastatų geometrijas.



2 pav. Pastatų tipų išsklotinės [9]

1.3. Pastatų sandarumas Lietuvoje

Šadauskienė, Šeduikytė ir kiti mokslininkai [10], savo darbe tyrė pastato sandarumo reikšmes 27 individualiuose namuose, kurie buvo pastatyti centrinėje Lietuvoje 2007–2011 metais. Tyrimo rezultatai parodė, kad A klasės pastatų sandarumas atitiko reikalavimus ir $n_{50} \leq 0,6, h^{-1}$. B ir C klasės pastatų sandarumo rezultatai gauti intervalu nuo 4,17 iki 8,05. Tai parodė, kad B ir E energinio naudingumo klasės tirtieji pastatai neatitinka reikalavimų ir viršija numatytas normas. Pastatai nebuvo pakankamai sandarūs. Vidutinis oro pokyčių greitis, kai oro slėgis 50 Pa, yra du kartus didesnis už norminę vertę $n_{50} \leq 3 h^{-1}$. Esamo pastato energinio naudingumo skaičiavimų rezultatai yra patikimi tik patikrinus, ar pastatas sandarus. Priešingu atveju, faktinės pastatų šildymo energijos sąnaudos gali gerokai skirtis nuo nustatytos vertės, jei nepaisoma oro sandarumo. Šis tyrimas parodo, kad Lietuvoje naujų pastatų statyba atitinka reglamentuojamus standartus, tačiau senesnės statybos pastatuose yra didelis nesandarumas, dėl kurio pastatai sunaudoja daugiau šilumos energijos.

1.4. Pastatų sandarumo bandymas Lenkijoje

Lenkijos mokslininkai atliko tyrimą [11], kuriame siekė patikrinti sandarumo lygį pastatuose remiantis ISO 9972:2005 standartu [1]. Tyrimui pasirinkti šie namai: vienbučiai namai, pasyvūs arba mažai energijos naudojančios, su mechanine ventiliacija, su šilumos atgavimu, eksploatuojami skirtingose Lenkijos klimato zonose, statybos metai nuo 2010 m. Tyrimų rezultatų santrauka ir skaičiavimai pateikti 3 lentelėje, o pastatų sandarumo lygis 3 pav.

Tyrimo eiga:

1. Patikrinama, ar oro sąlygos leidžia atlikti tyrimus.
2. Pastato paruošimas tyrimams (įskaitant atskirų skylių uždarymą ar užkimšimą).
3. Tikslinio matavimo atlikimas (slėgio skirtumo ir oro srauto matavimas).
4. Tyrimo ataskaitos parengimas.

Atlikti 22 pastatų sandarumo matavimai.

3 lentelė. Tyrimų rezultatų santrauka ir skaičiavimai [11]

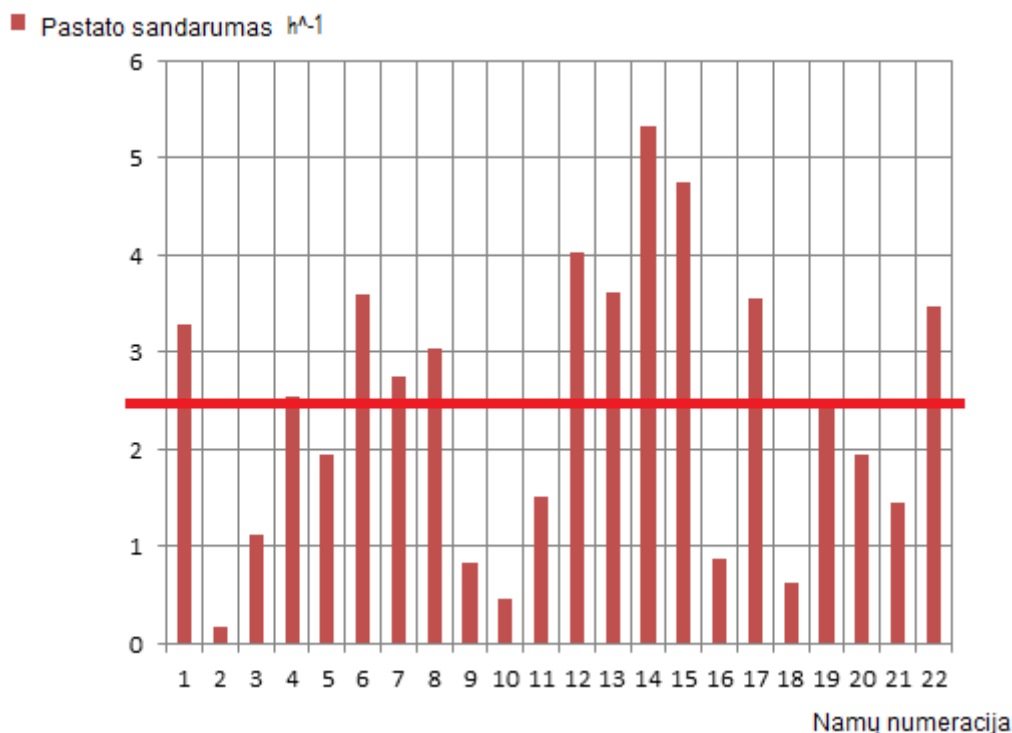
Pastatų numeracija	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Šildomas pastato paviršiaus plotas [m ²]	114	140	143	135	95	125	276	109	197	161	130
Pastato plotas [m ²]	266	336	373	414	295	502	366	457	409	604	388
Pastato sandarumas [h ⁻¹]	3,29	0,17	1,12	2,53	1,95	3,58	2,75	3,04	0,82	0,45	1,51

4 lentelė. Tyrimų rezultatų santrauka ir skaičiavimai (tęsinys 3 lentelės) [11]

Pastatų numeracija	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Šildomas pastato paviršiaus plotas [m ²]	145	145	113	168	141	133	102	214	140	172	138
Pastato plotas [m ²]	349	349	244	602	459	339	417	423	537	408	445
Pastato sandarumas [h ⁻¹]	4,02	3,62	5,33	4,74	0,86	3,55	0,63	2,43	1,93	1,44	3,46

Tyrimui atrinktų pastatų projektavimo sprendiniai:

- pamatai – 6, 8, 12, 13 pastatuose yra monolitiniai pamatai, kituose juostiniai pamatai;
- sienos – 1, 5, 10, 17 pastatuose yra lengvų konstrukcijų (medžio konstrukcijos užpildytos, šilumos izoliacija).



3 pav. Pastatų sandarumo lygis [11]

Nagrinėti pastatai turi skirtingą sandarumo lygį (nuo $n_{50} = 0,17 h^{-1}$ iki $5,33 h^{-1}$). Didžioji dalis pastatų viršija rekomenduojamą pasyvaus pastato $n_{50} 0,6 h^{-1}$ rodiklį. Pastatams su mechanine oro infiltracijos ventiliacija rodiklis $n_{50} < 1,5 h^{-1}$. Vidutinė oro infiltracijos vertė buvo $n_{50} = 2,4 h^{-1}$. Ji daugiau kaip 1,5 karto viršija ribinę vertę.

Dažniausiai nesandarios vietos yra šios:

- langų, durų rėmai;
- sujungimai tarp grindų ir sienos, stogo ir sienos, lubų ir sienos;
- per sistemas: vandentiekio, elektros, ventiliacijos, šildymo ir kitas;
- pertvaros, kurios skiria šildomą dalį nuo nešildomos.

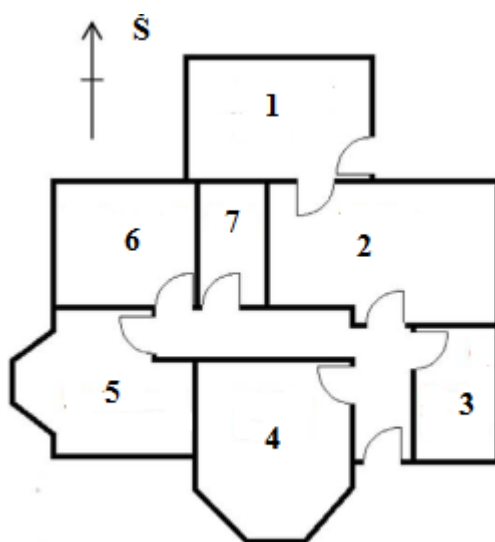
1.5. Senų pastatų sandarumo tyrimas

Didžiąją dalį pastatų sudaro senos statybos pastatai, kuriuose sandarumo lygis neatitinka energinio naudingumo rodiklių. Norint padidinti pastato energinį efektyvumą atliekami modernizacijos darbai.

Sandarumo tyrimo oro pasikeitimo reikšmės (n_{50}):

- nesandarus pastatas $n_{50} > 3 h^{-1}$;
- mažai energijos naudojantis pastatas $n_{50} < 1,5 h^{-1}$;
- pasyvūs namai $n_{50} < 0,6 h^{-1}$.

Mokslininkai Campbella, Mcgratha ir kiti atliko tyrimą [12], dviejų senų istorinių pastatų. Pirmasis namas yra „Retrofit A“, tai raudonų plytų vasarnamis, pastatytas 1885 metais Šiaurės Airijoje. 2005 metais pradėtos taikyti namo energijos vartojimo efektyvumo didinimo priemonės. Atnaujinta vidaus izoliacija (papildyta), palėpės izoliacijos modernizavimas ir mechaninio vėdinimo bei šilumos grąžinimo (papildyta) sistema. Namų išdėstymo planas pateiktas 4 pav.

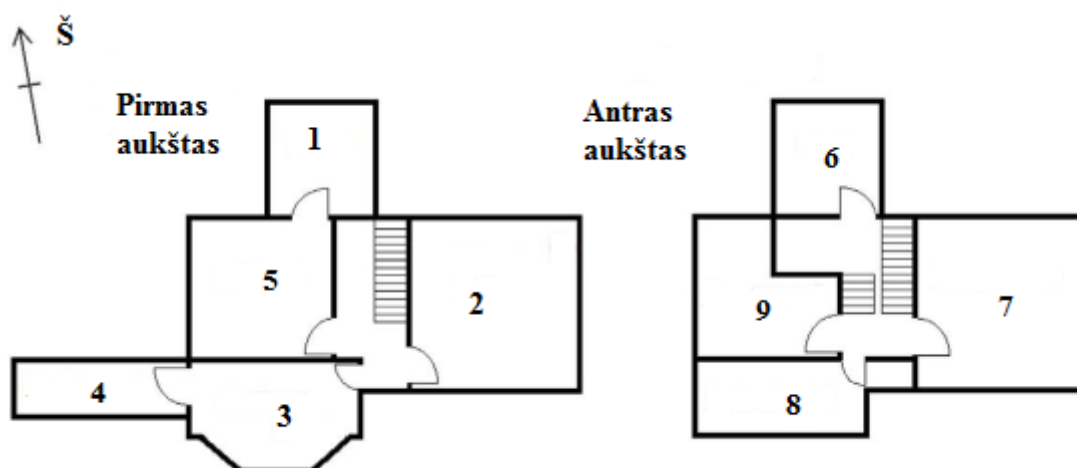


4 pav. Namų „Retrofit A“ išdėstymo planas [12]

(1 – uždaras kiemas; 2 – virtuvė; 3 – knygų kambarys; 4 – svetainė; 5, 6 – miegamieji; 7 – tualetas)

Antrasis „Retrofit B“ namas pastatytas 1878 metais iš raudonų plytų Šiaurės Airijoje. Prieš pradėdant renovacijos darbus pastatas buvo apleistas. 2007 metais buvo izoliuotos sienos iš vidaus,

sumontuotas dvigubas įstiklinimas, patalpų šildymas tiekiamas oro šilumos siurbliu ir vėdinimas per MVHR sistemą. Namų išdėstymo planas pateiktas 5 pav.



5 pav. Namų „Retrofit B“ išdėstymo planas [12]

(1 – sandėliukas; 2 – svetainė; 3, 4, 7, 8, 9 – miegamieji, 5 – virtuvė; 6 – tualetas)

Tyrimo sprendiniai

Šiems dviems namams buvo pritaikyti energijos taupymo sprendimai ir parinktas tyrimas, siekiant įgyti supratimą apie ilgalaikį pakeitimų poveikį pastato savybėms. Abiejų namų bandymai buvo atliekami tą patį pavasario mėnesį. Vidutinė šio regiono temperatūra buvo 6,5 °C. Pūtiklio durų bandymo rezultatai ir projektinis šilumos pralaidumas pateiktas 5 lentelėje.

5 lentelė. Pūtiklio durų bandymo rezultatai ir projektinis šilumos pralaidumas [12]

		„Retrofit A“		„Retrofit B“	
	Vienetai	Prieš	Po	Prieš	Po
Oro pokyčiai per valandą esant 50 Pa	h ⁻¹	N/A	8,9	N/A	2,0
Oro pralaidumas esant 50 Pa	m ³ /h/m ²	N/A	5,6	N/A	2,0
Pirmas aukštas	W/ m ² /K	1,5	1,5	1,5	0,21
Sienos	W/ m ² /K	2,09	1,05	2,09	0,24
Stogas	W/ m ² /K	1,7	0,19	1,7	0,19
Langai	W/ m ² /K	4,8	4,8	4,8	1,8

Mažesnis oro pralaidumas lemia mažesnę energijos poreikį. Pūtimo durų bandymai buvo atlikti abiemis savybėms oro pralaidumui nustatyti. Bandymas atliktas pagal BS EN 13829:2001 [13] standartą. Pūstovo durų sistema buvo įstatyta į pastato duris. Oro pralaidumas (q_{50}) buvo apskaičiuotas pagal interpoliuotą vertę (3):

$$q_{50} = \frac{Q}{S}; \quad (3)$$

Oro pokyčiai per valandą esant 50 Pa gali būti nustatomi naudojant formulę (4):

$$n_{50} = \frac{Q}{V}; \quad (4)$$

čia Q – oro nuotėkis esant 50 Pa slėgio skirtumui (m^3/h); S – pastato vidinis paviršiaus plotas (m^2); V – pastato tūris (m^3).

Pastatų sandarumas Australijoje

Oro pralaidumo ir gyvenamųjų pastatų eksploatacinių savybių ryšys seniai nustatytas tarptautiniu mastu. Australijoje mokslininkai Truong ir Garvie atliko oro pralaidumo bandymus [14]. Abroseo atliktas 129 namų, pastatytų po 2012 m. Australijos sostinėje tyrimas parodė, kad vidutinis pralaidumas yra $15,4 \text{ h}^{-1} 50 \text{ Pa}$. Biggas [6] išmatavo 32 namus, kurių statybos metai nuo 1956 iki 1986 metų ir nustatė vidutinį $26,3 \text{ h}^{-1} 50 \text{ Pa}$ pralaidumą. Tiriant 15 namų pastatytų tarp 1900 ir 1980 m. Viktorijoje, Morelande vidutinis pralaidumas buvo $29,1 \text{ h}^{-1} 50 \text{ Pa}$. Vidutinis pralaidumas, nustatytas visuose šiuose tyrimuose, laikomas aukštu pagal tarptautinius standartus [1] ir siūloma pagerinti gyvenamųjų pastatų efektyvumą Australijoje.

Pastatų sandarumas Didžiojoje Britanijoje

Didžiojoje Britanijoje mokslininkai Riffat, Tetlow ir kiti atliko tyrimą [15], kurio metu buvo matuojama pastatų sandarumas 35 namams. Gyvenamieji namai yra senos statybos, tačiau atlikta modernizacija. Visų pastatų sandarumo tyrimas buvo atliktas prieš modernizaciją ir po modernizacijos. Rezultatai parodė, kad daugelio bandomųjų būstų oro nuotėkis buvo sumažintas 8-50 %, tai parodo, kad modernizavimo priemonės turėjo teigiamą poveikį pastato atitvarų sandarumui.

Oro nutekėjimas fiksuotas:

- 16 % per langus ir duris;
- 13 % per palėpės liukus, langų ir durų apvadai bei nuolatinės angos;
- 71 % pastato sienų, siūlių įtrūkimai.

1.5.1. Pastatų sandarumo išsaugojimas

Pastato sandarumas palaiko aukščiausią oro cirkuliacijos ribą tarp vidaus ir išorės [16]. Mažas pastato sandarumas kelia daug problemų pastatui ir jį eksploatuojantiems žmonėms. Problemos, kurios atsiranda pastatuose su mažu sandarumu:

- vandens garų kondensacijos atsiradimas;
- pelėsio atsiradimo rizika;
- kambario akustikos sumažėjimas;
- didesnės šildymo išlaidos.

Šiais laikais sukurtas puikus sandarinimo medžiagų asortimentas, leidžia pastatą apsaugoti nuo nesandarumo. Statybos pradžioje architektai ir projektuotojai turi gerai numatyti, kokiomis sandarinimo medžiagomis ir kurias pastato vietas reikia užsandarinti, kad būtų išvengta oro nutekėjimo ir kaip sumažinti šiluminius tiltelius. Europos klimato sąlygomis – pastato atitvarų šilumos izoliacijos pakankamumas ir bendras pastato sandarumas su energija taupančia ventiliacija yra pagrindiniai reikalavimai pasyviai pastatui, teigia Chel ir kiti [17].

1.6. Patalpų ventiliacijos svarba

Didinant pastato sandarumą turi būti užtikrinta tinkama ventiliacijos sistema.

Gera patalpų ventiliacija ir šviežias oras patalpose yra labai didelis prioritetas darbo ofisuose, mokymosi įstaigose, kur žmonės ilgą valandą praleidžia uždaroje patalpose.

Pastatų pralaidumas yra labai svarbus parametras, kuriuo reikia pasirūpinti. Ventiliacija turi būti vykdoma tinkamai įdiegta sistema. Šis efektyvumas turi būti matuojamas atsižvelgiant į energijos suvartojimą ir į patalpų oro kokybę, nes vėdinimo sistemos tikslas yra užtikrinti tinkamą patalpų oro kokybę.

Priverstinis lauko oro įsiskverbimas į pastatą yra kvalifikuojamas į mechaninę ventiliaciją ir natūralią ventiliaciją. Mechaninė ventiliacija naudoja ventiliatorius, nukreipiančius lauko oro srautą į pastatą. Natūrali ventiliacija yra priverstinė, kai pasyviai pastate oro srautas planuotai patenka per duris ar langus.

Ventiliacija mokymo įstaigose

Atliktame tyrime [18], analizuojama pastato pralaidumo įtaka vidaus orui, kokybės ir energijos suvartojimui įprastose vėdinimo sistemose. EBPO paskaičiavo, kad vaikai nuo 7 iki 14 metų, vidutiniškai mokyklos klasėse praleidžia beveik 7000 valandų. Pagrindinis aspektas yra oro kokybė mokyklose. Naujausi tyrimai rodo, jog oro teršalai uždaroje patalpoje yra ženkliai pavojingesni, nei būnant lauke. Ilgalaikis teršalų poveikis gali padaryti didelę žalą mokinių sveikatai. Be to nustatyta, kad aukštas CO₂ koncentracijos lygis klasėse turi neigiamą poveikį studentų sveikatai ir mokymosi rezultatams, vaikai tampa mažiau budresni ir blogiau koncentruoja dėmesį. Norint pagerinti oro kokybę reikia garantuoti pakankamą vėdinimo greitį.

Ventiliacija senuose pastatuose

Mokslininkai Potter, Stephenas ir kiti [19] teigia, norint užtikrinti gryną orą pastatuose, reikalinga gera ventiliacija. Senos statybos pastatai dažniausiai yra nesandarūs ir tai užtikrina reikalingą ventiliaciją, tačiau tuo pačiu metu per nesandarias vietas išeina šiluma. Projektuojant ir statant šiuolaikinius pastatus, tikslas yra sukurti pastatų sandarumą ir pritaikyti vėdinimą. Ventiliacija gali būti natūrali arba mechaninė, arba gali būti taikoma abi kartu. Senuose pastatuose, kur pastatas yra nesandarus, dažnai būna didelė ventiliacija, dėl kurios galimi padariniai: didesnis energijos suvartojimas, skersvėjai, užterštas oras, patenkantis į pastatą, sumažėjęs konstrukcijos šilumos perdavimo koeficientas, atsirandanti drėgmė, pelėsis.

1.7. Didelių pastatų sandarumo tyrimas

Šiame tyrime atliktas matavimų eksperimentas didžiausiuose Europos šaldymo sandėliuose, -25 °C temperatūroje. Tyrimo metu [20], eksperimentiniai oro pralaidumo tyrimai buvo atliekami visame pasaulyje (JAV, Graikija, Suomija, Ispanija, Prancūzija, Italija, Australija, Kanada). Daugelis eksperimentinių ir modeliavimo tyrimų buvo orientuoti į Europos normas. Dažniausiai tokio tipo pastatams yra atliekamas pūstuvų durų eksperimentas. Šiam tyrimui buvo pasiūlytas naujas akustinis fasado hermetiškumo įvertinimo metodas [21]: tai greitas ir tikslus alternatyvus metodas. Šis ventiliatoriaus slėgio metodas nėra įprastas pramoniniams pastatams, dar mažiau tyrimų buvo atlikta oro pralaidumo „gilus užšalimo“ įvertinime. Sandėliai, kuriuose atliekamas tyrimas, yra

dideli, pramoniniai, konstrukcijos, paprastai be vidaus sienų ir pastatų, būdinga temperatūra -25 °C arba -75 °C. Šis tyrimas atliekant tokiam pastatui yra neįprastas dėl šių ypatumų:

1. Pastate nėra vidinių sienų ar durų.
2. Pastatas yra didelio tūrio (tyrimas pritaikytas mažesnio tūrio pastatams).
3. Apribojama sienų perforacija.
4. Yra didelė automatinė konvejerio juosta pagrindinio giliojo užšalimo sandėlio pakrovimas ir iškrovimas.
5. Yra slėgio vožtuvai, kurie palaiko slėgį patalpose mažesnę kaip 100 Pa, didesnę nei lauko slėgis.
6. Gretimos erdvės yra skirtingų temperatūrų.

Pastato charakteristikos

Pralaidumo matavimai buvo atliekami 2014 metų vasarą kai oro temperatūra buvo apie 35 °C. Matavimai vyko nuo 14 val. iki 18 val. (lauko temperatūra šiek tiek kinta per 4 matavimo kompanijos valandas). Vidinė pastato temperatūra kito nuo -18 °C iki -30 °C, priklausomai nuo ŠVOK padėties.

Tyrimo metu naudoti prietaisai

Buvo naudojamas pūtimo durų eksperimentinis stendas, kuriame buvo tik vienas ventiliatorius. Šis eksperimentas yra tikslus matuojant galutinę paklaidą namams, kuri mažesnė kaip 5%. Pūstuvo stendas buvo pastatytas duryse, kurios jungiasi tarp pagrindinio sandėlio ir plataus sandėlio, o ventiliatorius buvo sumontuotas taip, kad iš pagrindinio sandėlio būtų šalinamas oras link plataus sandėlio. Matavimai buvo atlikti slėgio neturinčioje erdvėje. Šio eksperimento matavimo tikslas buvo nustatyti įsiskverbimo greitį, kai pagrindinis sandėlys yra veikiamas 50 Pa slėgio skirtumui n_{50} Pa [h⁻¹]. Eksploatacinis pūstuvo durų stendas suteikia prieigą dviejų rūšių eksperimentams:

1. Oro srauto matavimas esant 50 Pa, ventiliatorius valdomas dimeriu (valdymo pultas), kuris savo ruožtu yra valdomas iš pūtimo durų stendo programinės įrangos „Tectite“.
2. Pralaidumo dėsnio (oro srauto esant skirtingiems slėgio skirtumams) įvertinimas.

Pasirinkta antroji eksperimento rūšis, kuri yra sudėtingesnė, bet kartu ir tikslesnė. Eksperimento metu įvertinamas pralaidumo dėsnis, interpoliuojami galios dėsniai ir nustatomas oro srautas esant 50 Pa slėgio skirtumui.

Oro pralaidumo matavimai

Eksperimento metu buvo atlikti:

1. Du slėgio skirtumai, didesnių kaip 50 Pa (55 Pa ir 60 Pa).
2. Vienas matavimas mažesniame kaip 50 Pa (27 Pa) slėgio skirtumui.

Remiantis šiais trimis eksperimentais nepakanka nustatyti pastato pralaidumo sandėlyje. Oro srauto prognozė Q (m³/h) apskaičiuojama kaip galios dėsnio funkcija, atsižvelgiant į slėgio skirtumus Δ_p (Pa). Prognozuojama vertė oro srauto greičio gali skirtis $\pm 5\%$. Toliau oro srauto greitis esant 50 Pa buvo apskaičiuotas kaip oro srautas esant 50 Pa, padalytam iš sandėlio tūrio (5)

$$n_{50} = \frac{Q}{V} = \frac{7074}{8800} = 0,08 \text{ [h}^{-1}\text{]}; \quad (5)$$

gali skirtis $\pm 5 \%$, tokiu būdu tarp $0,0764 \div 0,0844 \text{ [h}^{-1}\text{]}$. Palyginus su kitais pastatų tipais šis sandėlys iš esmės yra hermetiškesnis, mažiau pralaidus nei energetiniai pasyvūs namai. Taip yra dėl to, nes pastate nėra langų ir minimalus durų skaičius. Esant mažo oro srauto vertei, dideliems pastatams yra lengviau pasiekti reikiamą sandarumo lygį.

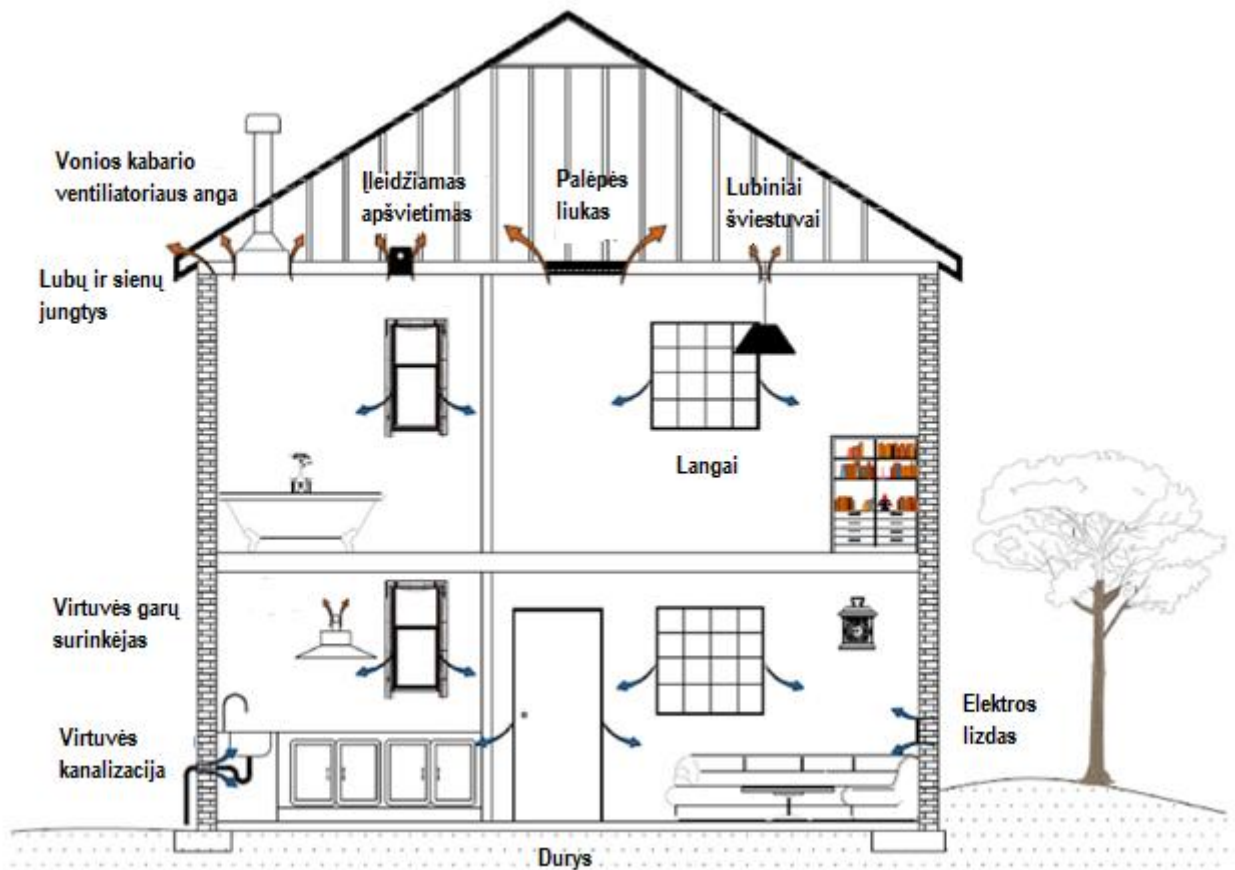
1.8. Nesandarios vietos pastatuose

Langmansas ir kiti mokslininkai tyrė klimato sąlygų įtaką užsandarintų siūlių sandarumui [22]. Šiame tyrime, pastato išorėje buvo suprojektuotas oro barjeras. Atlikus tyrimą rezultatai parodė, kad temperatūros, lietaus ir šalčio ciklai turėjo įtakos užklijuotojo oro barjero oro pralaidumui, tačiau padidėjimas buvo mažas. Pareira ir kiti [23], palygino pastatų konstrukcijos susijungimus. Prieš ir po sandarinimo, buvo matuojamas oro skverbimasis per tris skirtingas vietas: lango rėmą, plieninių kolonų sujungimus su grindimis ir per stogo kraigą. Didžiausią įtaką pastato sandarumui turėjo stogo kraigas, mažiausiai – langų jungtys.

Poveikis pastatams dėl nesandarumo

Sandarumas lemia nereikalingą vėdinimą ir mažesnius energijos suvartojimo nuostolius. Mokslininkai Sharples, Closs, Orme ir kiti ištyrė [24,25], kad daugiau kaip 60 % energijos išvaistoma nereikalingam vėdinimui, prarandant kondicionuotą orą. Sandarumas pastatuose jau seniai pripažintas kaip galimas didelis energijos taupymas susijęs su geru pastato sandarinimu. Sandariuose pastatuose teršalai iš lauko nepatenka. Dėl gero pastato sandarinimo lengva pasiekti veiksmingą vėdinimą ir kontroliuoti vidaus aplinką, nes tam yra skirta ventiliacijos sistema, kuri įrengiama taip, kad eksploatacijos metu būtų pakankamai gryno oro ir būtų sunaudojama minimalus energijos poreikis.

Kitas svarbus faktorius, kuris iš esmės lemia sandarumo svarbą yra kondensato susidarymas pastate. Sandariame pastate drėgmė nesikaupia, todėl pastato ilgaamžiškumas pailgėja. Pastate kuriame yra prastas sandarumas galimas kondensato susidarymas, kuris lemia pastato konstrukcijų ir statybinių medžiagų pablogėjimą. Atlikus tyrimą, apie 90 % pastato atitvarų medžiagoms, žalos sukelia temperatūros ir drėgmės poveikis, ypač naudojant iš medžio pagamintas konstrukcines sienų sistemas. Atsiranda pelėsių augimo aplinka, kuri ne tik pažeidžia statybinių medžiagų paviršius, bet ir tampa potencialiu teršalų šaltiniu.



6 pav. Gyvenamojo namo tipinių nuotėkio takų vietos [26]

Mokslininkai Zeng, Cooper ir kiti [26], 6 paveiksle pavaizdavo oro nuotėkio kelius šildymo sezonu. Šiltas patalpų oras iš namo vidaus išeina per nuotėkio kelius, dažniausiai iš viršutinių pastato sluoksnių, tai vadinama – vėdinimu. Šaltas oras iš lauko prasiskverbia pro nuotėkio kelius esančiuose žemesniuose namo sluoksniuose ir patenka į namą vadinama – infiltracija. Aušinimo sezonu, srauto kryptis pasikeičia, dėl temperatūros skirtumo, tačiau ji gali skirtis ir nuo oro sąlygų, vėjo.

1.9. Pastate langų svarba ir sandarumas

Langas yra svarbi pastato dalis, kuri turi didelę įtaką patalpų šilumai ir natūraliai šviesai. Langas turi didelę reikšmę, pavyzdžiui, sustiprinus lango sandarumą – galima sumažinti oro pralaidumą pastate ir sumažinami šilumos nuostoliai. Technologijoms sparčiai tobulėjant, kuriamos technologijos, kurių dėka labai pagerėjo šiluminės savybės.

Eksperimentui [27] buvo pasirinktas nulinės energijos pastatas Šenjange, šaltame Kinijos regione. Pastato langai buvo pagaminti iš triplekso, žemo E stiklo klasės, o tarpas užpildytas argonu. Nauja lango montavimo technologija taikoma nulinės energijos pastatuose. Šilumos izoliacinių medžiagų šilumos perdavimo koeficientas yra daug mažesnis nei betono konstrukcijos, pertvarų, išorinių langų ir betono šilumos izoliacinė medžiaga. Konstrukcijos kontaktinė dalis yra su sandarinimo gumine juoste, kad būtų pašalintas kanalo įsiskverbimas į orą, taip yra pagerinamas sandarumas.

1.10. Konstrukcinės ir nekonstrukcinės pastato charakteristikos

Literatūroje [28,29,30,31,32] pateikiama daugybė priežasčių, turinčių įtakos pastato hermetiškumui. Statybos metai laikomi viena iš pagrindinių priežasčių, vertinant pastatų hermetiškumą. Konstrukcinės ir nekonstrukcinės pastato savybės, į kurias reikia atkreipti dėmesį:

Konstrukcijų charakteristikos:

- būsto tipas;
- konstrukcijos tipas;
- pamato tipas;
- statybos metodas.

Nekonstrukcinės charakteristikos:

- grindų plotas;
- namo aukštis;
- aukštų skaičius;
- vėdinimo sistema;
- izoliacijos tipas.

Statybos būdas atitinka kaip pastatas buvo pastatytas statybos vietoje, surenkant ar derinant abu būdus. Konstrukcijos tipas atitinka pagrindines medžiagas, naudojamas statybose, pvz.: betonas, mediena, mūras, plienas. Į šį tyrimą įtraukti kintamieji, susiję su nekonstrukcinėmis pastato charakteristikomis, yra būsto tipas (BT), stogo tipas (stogas), projektavimo tikslas (Q_p) ir grindų plotas (grindys). Stogo tipai tokie kaip šlaitinis ar sutapdintas. Skirtingų tipų stogai turi skirtingas konstrukcijos detales. Tyrimas buvo atliekamas pūstuvo durų bandymu. Tyrimo metu iš viso išmatuoti 320 olandų būstai ir visų savitasis nuotėkio koeficientas esant 10 Pa yra $0,55 \text{ dm}^3/\text{s}\cdot\text{m}^2$. Atrinkti devyni ekstremalūs atvejai, kai savitasis nuotėkio greitis yra didesnis nei $2,0 \text{ dm}^3/\text{s}\cdot\text{m}^2$. Privalomas w_{10} energinis naudingumas būstams, kuriems dažnai nustatomi $0,625 \text{ dm}^3/\text{s}\cdot\text{m}^2$. Atliktų tyrimų duomenimis 77,2 % gyvenamųjų būstų atitinka šį maksimumą.

1.10.1. Koreliacijos analizė

Atliekant koreliacijos analizę yra vertinamas koreliacijos (r) stiprumas ir statistinis reikšmingumas. Koreliacijos stiprumas vertinamas nuo 0 iki 1 arba nuo 0 iki -1. Jeigu $r = 0$, priklausomybės tarp kintamųjų nėra, $r = 1$ arba $r = -1$ – kintamieji priklausomi. Kuo r artėja arčiau 1 arba -1, tuo kintamieji labiau priklausomi. Norint išsiaiškinti, kad koreliacija nėra sutapimas, apskaičiuojama p reikšmė, tai parodo ar koreliacija statistiškai reikšminga. Gauta p reikšmė palyginama su α (reikšmingumo lygmuo). Koreliacija statistiškai reikšminga, jei p reikšmė mažesnė už α reikšmę.

Atlikta koreliacijos analizė tarp priklausomų kintamųjų w_{10} ir w_{50} (w_{10} – savitasis nuotėkio greitis, esant 10 Pa skirtumui, w_{50} – savitasis nuotėkio greitis, esant 50 Pa skirtumui) ir kitų nepriklausomų kintamųjų. Reikšmė rodo koreliacijos tipą ir kokia stipri koreliacija yra. Šiuo atveju reikšminga koreliacija yra $\alpha = 0,01$. N parodo kiek pagrįstų duomenų buvo panaudota koreliacijai analizuoti. Trūkstami duomenys neįtraukti į analizę. Koreliacijos analizės rezultatai pateikiami 6 lentelėje.

6 lentelė. Koreliacinės analizės rezultatai [31]

	<i>N</i>	<i>r</i> (<i>w</i> ₁₀)	<i>p</i> ₁₀	<i>r</i> (<i>w</i> ₅₀)	<i>p</i> ₅₀
Bendras nuotėkis (LK iš viso)	230	0,437 *	0,000	0,426 *	0,000
Projektavimo tikslas (Q _P)	293	0,064	0,272	0,073	0,212
Aukštas (grindys)	320	-0,097	0,083	-0,073	0,0192
Statybos metai (metai)	317	-0,543 *	0,000	-0,531 *	0,000
Būsto tipas (BT)	320	-0,086	0,125	-0,060	0,288
Konstravimo metodas (KM)	320	-0,230 *	0,000	-0,204 *	0,000
Statybos tipologija (ST)	320	-0,160 *	0,004	-0,119 *	0,033
Stogo tipas (stogas)	320	-0,088	0,117	-0,074	0,187

čia * - reikšmingas $\alpha = 0,05$; w_{10} – savitasis nuotėkio greitis, esant 10 Pa skirtumui (r - koreliacija); w_{50} – savitasis nuotėkio greitis, esant 50 Pa skirtumui (r - koreliacija); N – galiojančių atvejų skaičius, p_{10}, p_{50} – p reikšmė.

6 lentelė rodo, kad kintamieji pastatymo metai, konstrukcijos metodas, konstrukcijos tipologija ir bendras nuotėkis yra reikšmingi ir gali būti geras numatomasis specifinis nuotėkio greitis esant 10 Pa. Dėl jų reikšmių, -0,543 ir 0,437, kintamieji pastatymo metai ir bendras nuotėkis atrodo geriausi numatytajai. Remiantis specifiniu 50 Pa nuotėkio greičiu, kintamieji metai: statyba, statybos būdas ir bendras nuotėkis taip pat yra reikšmingi.

Nustatyta teigiama koreliacija tarp išmatuoto nuotėkio ir bendro nuotėkio, kur $r = 0,437$, $p < 0,05$ 10 Pa skirtumui. Tolesni statistiniai testai atskleidė išmatuotam nuotėkio greičiui esant 50 Pa ir visam nuotėkiui, kur $r = 0,426$, $p < 0,05$. Šis rezultatas rodo, kad tarp kintamųjų yra statistiškai reikšmingas ryšys.

1.11. Pirmo skyriaus išvados

Pirmajame skyriuje analizuojama Lietuvos ir užsienio mokslininkų tyrimus susijusius su sandarumo matavimo bandymais. Pastatų sandarumas laikomas svarbiu pastatų energijos vartojimo efektyvumo ir jų komforto gerinimo elementu. Pastatų energinis naudingumas skirstomas į klases, kurioms priskiriami galimi oro kaitos rodikliai, remiantis Europos standartu ISO 9972 [1], kuris reglamentuoja: nesandarus pastatas $n_{50} > 3 \text{ h}^{-1}$; mažai energijos naudojantis pastatas $n_{50} < 1,5 \text{ h}^{-1}$; pasyvūs namai $n_{50} < 0,6 \text{ h}^{-1}$. Didžioji dalis pastatų yra senos statybos pastatai, kuriuose atliekami sandarumo bandymai viršija normas. Energinio efektyvumo gerinimui yra siūloma daugiau dėmesio skirti pastatų geometrijai. Išsiaiškintos labiausiai nesandarios vietos, tai stogas, langai, durys, lubų ir sienų jungtys. Aptariama ventiliacijos svarba sandariuose pastatuose, kadangi didinant pastato sandarumą, turi būti užtikrinta tinkama ventiliacijos sistema. Gera patalpų ventiliacija ir šviežias oras patalpose yra prioritetas ofisuose, mokymosi įstaigose, kur žmonės ilgas valandas praleidžia uždaroje patalpose. Pastatų pralaidumas yra labai svarbus parametras, kuriuo reikia pasirūpinti, todėl ventiliacija turi būti vykdoma tinkamai įdiegta sistema.

2. Sandarumo bandymo rezultatų priklausomybės nuo pastato dydžio daugiakriterinio vertinimo skaičiavimo metodika

2.1. Sandarumo bandymas

Durų pūstuvo bandymą atlieka sertifikuoti darbuotojai. Pastatų sandarumo bandymo tikslas – nustatyti kiek pastatai yra sandarūs. Pastatų sandarumas yra atliekamas montuojant durų pūstuvą su galingu ventiliatoriumi į lauko durų rėmą. Pirmiausia, ventiliatorius ištraukia orą iš namo, taip sumažindamas oro slėgį pastato viduje. Didesnis lauko oro slėgis teka per visas nesandarias vietas, įtrūkimus ar angas. Norint išsiaiškinti nesandarias pastato vietas, yra naudojamas dūmų generatorius. Pastato viduje yra pučiami dūmai, kurie per nesandarias vietas išeina iš pastato. Nesandarios vietos yra matomos išėjus iš pastato, pro kurias skverbiasi dūmai.

Ventiliatoriaus duris sudaro rėmas ir lankstus skydelis, tinkantis tarpduryje, kintamo greičio ventiliatorius, slėgio matuoklis, slėgio skirtumams namuose ir išorėje išmatuoti, oro srauto manometras, žarnos oro srautui matuoti.

Pūtimo durys yra dviejų tipų: kalibruotos ir nekalibruotos. Norint tinkamai atlikti sandarumo bandymą reikia naudoti kalibruotas duris. Šio tipo orapūtės durys turi keletą matuoklių, kurie matuoja ventiliatoriaus iš namo ištraukiamą oro kiekį. Nekalibruotos orapūtės durys gali nustatyti tik nuotėkį namuose. Tai yra nepateikia jokio būdo nustatyti bendrą pastato sandarumą. Kalibruoti ventiliatoriaus durelių duomenys leidžia įvertinti oro nutekėjimo kiekį ir oro sandarinimo darbo efektyvumą.

2.1.1. Pasiruošimas sandarumo bandymui

Prieš atliekant sandarumo bandymą atliekami veiksmai:

- įmontuojamos orapūtės durelės į lauko durų rėmą;
- visos lauko durys (išskyrus tas, kuriose yra įmontuotas durų pūstuvai), langai ir liukai uždaromi;
- atitvarose esančios vėdinimo angos užsandarinamos;
- visos bandomojoje pastato dalyje esančios jungiančiosios angos atidaromos;
- apžiūrima ar įrengtos šildymo, vėdinimo ir oro kondicionavimo sistemos;
- paskaičiuojamas pastato tūris ir atitvarų plotas, kuris paskaičiuojamas pagal LST EN ISO 9972:2015 [1] reikalavimus;



7 pav. Užsandarintos vėdinimo angos [Iš autoriaus asmeninio albumo]

Bandymo sąlygos:

- atliekamas pastato slėgio mažinimas ir slėgio didinimo bandymas;
- pamatuojamas vėjo greitis prie pastato;
- pamatuojama temperatūra lauke ir pastato viduje;
- pamatuojamas barometrinis slėgis.

Reikalinga sandarumo bandymui atlikti įranga:

- ventiliatorius;
- slėgio matuoklis;
- programinė įranga;
- temperatūros ir drėgmės matuoklis;
- anemometras.



8 pav. Orapūtės durelės [autoriaus sukurta]

2.2. Sandarumo bandymo rodiklių skaičiavimas

Pastato sandarumas yra apibūdinamas [14] kaip daugybė oro mainų pastate, kurie įvyksta per 1 valandą n_{50} [h^{-1}] – tai oro nuotėkio srautas Q , esant 50 Pa slėgio skirtumui, ir vidinio tūrio V [m^3] santykis (6):

$$n_{50} = \frac{Q}{V}; \quad (6)$$

Savitoji skverbtis pastato atitvaros ploto vienetui, esant 50 Pa, [$\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$] – tai oro nuotėkio srautas Q , esant 50 Pa slėgio skirtumui, ir pastato išorės atitvarų ploto S_A [m^2] santykis (7):

$$q_{A50} = \frac{Q}{S_A}; \quad (7)$$

Savitoji skverbtis pastato grindų ploto vienetui, esant 50 Pa, [$\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$] – tai oro nuotėkio srautas Q , esant 50 Pa slėgio skirtumui, ir grindų ploto S_F [m^2] santykis (8):

$$q_{F50} = \frac{Q}{S_F}; \quad (8)$$

Efektyvi nuotėkio zona naudojama norint sužinoti bendrą nutekėjimą.

Ekvivalentinis nesandarumas [cm^2] – tai oro nuotėkio srautas Q , esant 50 Pa slėgio skirtumui, santykiu kvadratinė šaknis, 2 sandaugoje su matavimo slėgiu p_r [Pa] ir dalinant iš oro tankio p [kg/m^3] (9):

$$ELA = \frac{Q}{\frac{\sqrt{2 \cdot p_r}}{p}}; \quad (9)$$

Norint išsamiau sužinoti sandarumo bandymo matavimo metodiką, kuri naudojama oro nuotėkio duomenims rinkti. Oro nuotėkio matavimai konvertuojami į normalizuotą nuotėkį [28].

Normalizuotas nuotėkis – tai 1000 sandauga su ekvivalentiniu nesandarumu ELA [cm²] ir grindų ploto S_F [m²] santykis sandaugoje su pastato aukščiu H [m] dalintu iš 2,5 ir pakelta 0,3 laipsniu (10):

$$NL = 1000 \cdot \frac{ELA}{S_F} \cdot \left(\frac{H}{2,5} \right)^{0,3}; \quad (10)$$

čia Q – oro nuotėkis esant 50 Pa slėgio skirtumui [m³/h]; S_A – pastato išorės atitvarų plotas [m²]; S_F – grindų plotas [m²]; V – pastato tūris [m³]; p_r – slėgis matavimo [Pa]; p – oro tankis [kg/m³]; H – pastato aukštis [m].

2.3. Daugiakriteriniai metodai

Daugiakriteriniai vertinimo metodai (*angl. Multiple Criteria Decision Making, t.y. MCDM*) skirstomi į dvi grupes: daugiaobjekčius ir daugiatislius metodus. Daugiatisliai (*angl. Multiple Attribute Decision Making, t.y. MADM*) metodai yra taikomi, kai reikia išrinkti racionaliausią alternatyvą iš esamų alternatyvų sąrašo. Daugiakriteriniai vertinimo metodai nagrinėjami mokslininkų [34,35]. MADM – nagrinėja problemas, kur sprendinių aibė sudaro galimas alternatyvas žymimas $A = (A_1, A_2, \dots, A_n)$. Alternatyvas gali sudaryti skirtingi ir tikslingi sprendimai, kurie apibūdinami tam tikrais rodikliais, žymimais (x_1, x_2, \dots, x_n) . Rodikliai apibūdina alternatyvų nagrinėjimo aspektus. Kiekvienas rodiklis apibūdina vieną alternatyvos savybę. Rodikliai gali būti prieštaringi vienas kitam, kadangi atspindi skirtingus požiūrius į alternatyvas ir gali būti matuojami skirtingais matavimo vienetais. Rodiklius būtina normalizuoti, kad taptų bedimensiais dydžiais. Rodiklių reikšmingumo svarbai nustatyti, nustatomi santykiniai rodiklių reikšmingumai, kurie parodo, kiek vienas rodiklis yra svaresnis už kitą rodiklį. Taikant daugiakriterinius vertinimo metodus, svarbu yra nustatyti kriterijų, tai yra rodiklių svorius. Daugiakriteriniai vertinimo rodiklių svoriai nustatomi remiantis ekspertų nuomone.

Daugiakriteriniai metodai taikomi įvairiose mokslinėse srityse. Dažniausiai moksliniuose straipsniuose naudojami SAW, TOPSIS, COPRAS, ARAS, MOORA, VIKOR metodai. Šie metodai sukurti padėti priimti sprendimus atsižvelgiant į tikslus. Dažniausiai daugiakriterinių vertinimo metodikų skaičiavimai yra skirstomi į etapus. Naudojami matematiniai modeliai siekiant nustatyti geriausias alternatyvas.

2.4. SAW metodo skaičiavimo metodika

SAW – (*angl. Simple Additive Weighting*) (*Harsanyi, 1955*) – paprastasis adityvus svorių metodas yra visame pasaulyje žinomas, pats seniausias metodas ir plačiai naudojamas įvairiose srityse. Šis metodas yra vienas paprasčiausių daugiakriterinių vertinimo metodų [36].

Daugelyje straipsnių [36,37,38] SAW metodas yra suskirstytas žingsniais:

1. Sudaroma matrica.

Sudaroma sprendimų matrica P . Eilutės šioje matricoje žymi nagrinėjamas alternatyvas, o stulpeliai – efektyvumo rodiklius (12).

2. Matricos normalizavimas:

Normalizavus matricą turi būti tenkinama sąlyga (11):

$$\sum_{j=1}^n q_j = 1; \quad (11)$$

$$P = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}; \quad (12)$$

čia m – alternatyvų skaičius; n – efektyvumo rodiklių skaičius, q_j – integruotasis reikšmingumas.

3. Matricos P nariai, kuriuos reikia minimizuoti yra normalizuojami (13):

$$\overline{x_{ij}} = \frac{x_j^{\min}}{x_{ij}}; \quad (13)$$

čia x_{ij} – sprendimų priėmimo matricos nariai; $\overline{x_{ij}}$ – normalizuotos matricos nariai; i – alternatyva; j – rodiklis; x_j^{\min} – minimali rodiklio reikšmė.

4. Alternatyvaus racionalumo nustatymas:

Atitinkami normalizuotosios matricos nariai yra dauginami iš efektyvumo rodiklių reikšmingumo reikšmių ir gautos sandaugos susumuojamos (14):

$$A = \left\{ A_i \left| \max_i \sum_{j=1}^n q_j \cdot \overline{x_{ij}} / \sum_{j=1}^n q_j \right. \right\}; \quad (14)$$

2.5. TOPSIS metodo skaičiavimo metodika

TOPSIS – (*angl. Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution*). Hwangas ir Yoonas 1981 [39] – sukūrė variantų prioritetiškumo nustatymo metodiką su pagrįsta koncepcija, kad optimali alternatyva turi mažiausią atstumą nuo idealaus sprendinio ir didžiausią atstumą nuo neigiamai idealaus sprendinio. Metodo taikymas nagrinėjamas daugelyje straipsnių [37, 39, 40, 41], kurių metodika taikoma aprašyti metodą.

TOPSI metodas suskirstytas žingsniais:

1. Sukuriama pradinė vertinimo matrica (15):

$$P = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}; \quad (15)$$

2. Matrica P normalizuojama (16):

$$\overline{x_{ij}} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}; \quad i = \overline{1, m}; \quad j = \overline{1, n}; \quad (16)$$

čia $\overline{x_{ij}}$ – normalizuotos matricos nariai; x_{ij} – sprendimų priėmimo matricos nariai; i – alternatyva; m – alternatyvų skaičius; j – rodiklis; n – rodiklių skaičius;

Gauta normalizuota matrica \overline{P} (17):

$$\overline{P} = \begin{bmatrix} \overline{x_{11}} & \overline{x_{12}} & \cdots & \overline{x_{1n}} \\ \overline{x_{21}} & \overline{x_{22}} & \cdots & \overline{x_{2n}} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \overline{x_{m1}} & \overline{x_{m2}} & \cdots & \overline{x_{mn}} \end{bmatrix}; \quad (17)$$

3. Svertinės normalizuotos matricos sudarymas (18,19):

$$\overline{P}^* = \overline{P} \cdot [q]; \quad (18)$$

$$\overline{P}^* = \begin{bmatrix} \overline{v_{11}} & \overline{v_{12}} & \cdots & \overline{v_{1n}} \\ \overline{v_{21}} & \overline{v_{22}} & \cdots & \overline{v_{2n}} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \overline{v_{m1}} & \overline{v_{m2}} & \cdots & \overline{v_{mn}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 \cdot \overline{x_{11}} & q_2 \cdot \overline{x_{12}} & \cdots & q_n \cdot \overline{x_{1n}} \\ q_1 \cdot \overline{x_{21}} & q_2 \cdot \overline{x_{22}} & \cdots & q_n \cdot \overline{x_{2n}} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ q_1 \cdot \overline{x_{m1}} & q_2 \cdot \overline{x_{m2}} & \cdots & q_n \cdot \overline{x_{mn}} \end{bmatrix}; \quad (19)$$

čia q – integruotasis reikšmingumas;

4. Idealiai geriausios ir blogiausios alternatyvos nustatymas (20,21):

$$a^+ = \left\{ \left[\left(\min_i \overline{x_{ij}} \mid j \in J' \right) \right]_{i=\overline{1, m}} \right\} = \left\{ a_1^+, a_2^+, \dots, a_n^+ \right\}; \quad (20)$$

$$a^- = \left\{ \left[\left(\max_i \overline{x_{ij}} \mid j \in J' \right) \right]_{i=\overline{1, m}} \right\} = \left\{ a_1^-, a_2^-, \dots, a_n^- \right\}; \quad (21)$$

čia a^+ – idealiai geriausia alternatyva; a^- – blogiausia alternatyva; J' – rodiklių, kurių mažesnės reikšmės yra geresnės, indeksų aibė.

5. Atstumų tarp lyginamųjų ir idealiai geriausių bei blogiausių alternatyvų nustatymas (22,23):

$$L_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (\overline{x_{ij}} - a_j^+)^2}; i = \overline{1, m}; \quad (22)$$

$$L_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (\overline{x_{ij}} - a_j^-)^2}; i = \overline{1, m}; \quad (23)$$

čia L_i^+ – tarp lyginamųjų idealiai geriausia; L_i^- – tarp lyginamųjų blogiausia.

6. Alternatyvos santykinio atstumo iki idealaus nustatymas (24):

$$K_i = \frac{L_i^-}{L_i^+ + L_i^-}, i = \overline{1, m}; \quad (24)$$

čia K_i – alternatyvos santykinis atstumas iki idealaus.

2.6. Antro skyriaus išvados

Antrame skyriuje aptarta kaip atliekamas sandarumo bandymas, kokio pasiruošimo reikia, bandymo sąlygų, kokia reikalinga įranga sandarumo bandymui atlikti. Aptartas sandarumo bandymo rodiklių skaičiavimas, taikant formules. Aprašomi daugiakriteriniai metodai. Išnagrinėjami SAW ir TOPSIS daugiakriteriniai skaičiavimo metodai.

3. Sandarumo bandymo rezultatų priklausomybė nuo pastato aukščio daugiakriterinis vertinimas

Tyrimui atlikti pasirinkti penki vienodo tūrio (364 m^3), skirtingų aukščių, gyvenamosios paskirties pastatai, A++ klasės.

3.1. Rodiklių parinkimas daugiakriteriams metodams taikyti

- Oro apykaita esant 50 Pa, n_{50} , [h^{-1}] – tai oro apykaitos pastate nustatymas, esant 50 Pa slėgiui, tarp pastato patalpų ir išorės. Šis rodiklis gaunamas atlikus sandarumo bandymą, dirbtinai sukuriant slėgį. Ventilatoriaus pagalba sudaromas slėgių skirtumas tarp vidaus ir išorės, remiantis LST EN ISO 9972:2015 [1] standartu. Šis rodiklis parodo, kiek kartų per valandą pasikeitė oras pastate. Remiantis n_{50} galima įvertinti kokia energinio efektyvumo klasę pastatas pasiekia.
- Savitoji skverbtis pastato atitvaros ploto vienetui, esant 50 Pa, q_{E50} [$\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$] – tai nesandarumas per pastato atitvaras t.y pamatus, stogą, duris, langus, lubas, įvairias jungtis. Šis dydis parodo oro judėjimą per atitvaras. Tai lemia pastato atitvarų efektyvumą ir ilgaamžiškumą.
- Savitoji skverbtis pastato grindų ploto vienetui, esant 50 Pa, q_{F50} [$\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$] – tai nesandarumas per pastato grindis. Šis dydis parodo oro judėjimą per grindis.
- Ekvivalentinis nesandarumas ELA [cm^2] – tai efektyvus nuotėkio plotas t.y skylės dydis. Šis dydis parodo viso pastato nesandarumo angos plotą.
- Normalizuotas nuotėkis NL [-] – tai pastato gaubto sandarumo palyginimas su pastato dydžiu. Šis dydis padeda apibūdinti santykinį nuotėkį įvairiems pastatų dydžiams.

Į rodiklių sąrašą neįtraukti kaina ir laikas, kadangi vienodo tūrio pastatuose sandarumo bandymo kaina ir laikas nesiskiria.

7 lentelė. Daugiakriterinėje analizėje naudojami vertinimo kriterijai (rodikliai)

Eil. Nr.	Rodikliai	Kriterijus	Matavimo vienetai
1	x_1	Oro apykaita esant 50 Pa, n_{50}	h^{-1}
2	x_2	Savitoji skverbtis pastato atitvaros ploto vienetui, esant 50 Pa, q_{E50}	$\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$
3	x_3	Savitoji skverbtis pastato grindų ploto vienetui, esant 50 Pa, q_{F50}	$\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$
4	x_4	Ekvivalentinis nesandarumas ELA	cm^2
5	x_5	Normalizuotas nuotėkis NL	-

3.2. Reikšmių reikšmingumo nustatymo metodika

Pasirinktas apklausos būdas nustatyti rodiklių reikšmių reikšmingumus. Rodikliai pasirinkti: oro apykaita, esant 50 Pa, n_{50} , [h^{-1}], savitoji skverbtis pastato atitvaros ploto vienetui, esant 50 Pa, q_{E50} [$\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$]; savitoji skverbtis pastato grindų ploto vienetui, esant 50 Pa, q_{F50} [$\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$], ekvivalentinis nesandarumas ELA [cm^2], normalizuotas nuotėkis NL . Apklausos metu kiekvienas respondentas kiekvieną rodiklį įvertino balu nuo 1 iki 5, kur 5 aukščiausias, 1 žemiausias įvertinimo balas. Bendra rodiklių verčių suma yra lygi 1. Apklausos formos pavyzdys pateikiamas 8 lentelėje

8 lentelė. Balų vertinimo sistema

Balas	Vertinimo reikšmė
1	Nesvarbus
2	Mažai svarbus
3	Vidutiniškai svarbus
4	Mažiau svarbus
5	Svarbiausias

9 lentelė. Apklausos formos pavyzdys

Pastato sandarumo bandymo rodikliai	Rodikliai				
	Oro apykaita esant 50 Pa, n_{50} , [h ⁻¹]	Savitoji skverbtis pastato atitvaros ploto vienetui, esant 50 Pa, q_{E50} [m ³ /h/m ²]	Savitoji skverbtis pastato grindų ploto vienetui, esant 50 Pa, q_{F50} [m ³ /h/m ²]	Ekvivalentinis nesandarumas ELA [cm ²]	Normalizuotas nuotėkis NL
Vertinimas balais nuo 1 iki 5 (sveikas teigiamas skaičius)	5	2	1	4	3

Apklausus statybos srities ekspertus (projektų vadovus, inžinierius ir pan.) Apdorojami duomenys MS Office Excel programa. Apdoroti duomenys pateikiami 10 lentelėje.

10 lentelė. Apklausos rezultatai

Ekspertas	Efektyvumo rodiklis				
	Oro apykaita esant 50 Pa, n_{50} , [h ⁻¹]	Savitoji skverbtis pastato atitvaros ploto vienetui, esant 50 Pa, q_{E50} [m ³ /h/m ²]	Savitoji skverbtis pastato grindų ploto vienetui, esant 50 Pa, q_{F50} [m ³ /h/m ²]	Ekvivalentinis nesandarumas ELA [cm ²]	Normalizuotas nuotėkis NL
Ekspertas 1	5	4	3	2	1
Ekspertas 2	5	2	3	1	4
Ekspertas 3	3	4	1	5	2
Ekspertas 4	2	3	5	4	1
Ekspertas 5	5	4	1	3	2
Ekspertas 6	5	3	1	4	2
Ekspertas 7	4	2	1	5	3
Ekspertas 8	2	1	3	5	4
Ekspertas 9	5	1	2	4	3
Ekspertas 10	5	2	1	4	3
Ekspertas 11	4	2	3	5	1
Ekspertas 12	5	3	1	4	2

Gauti dvylikos ekspertų vertinimų rezultatai.

3.3. Ekspertų nuomonių suderinamumo tikrinimas

Apklausus ekspertus dėl rodiklių reikšmingumo, kitas labai svarbus ir reikalingas žingsnis yra ekspertų nuomonių suderinamumo tikrinimas. Šis tikrinimas parodo ar ekspertų nuomonės sutampa.

Ekspertų nuomonių suderinamumo tikrinimas skaičiuojamas remiantis Podvezko [42,43] rekomendacijomis. Skaičiavimas suskirstytas etapais.

Tolimesniems skaičiavimas bus reikalinga rangų suma ir vidutinė rangų reikšmė, šiems rodikliams apskaičiuoti taikomos formulės (25,26) gautos reikšmės pateikiamos 11 lentelėje.

1. Rangų suma apskaičiuojama sudedant visų ekspertų vertinimus (25):

$$\sum_{k=1}^r t_{jk}; \quad (25)$$

2. Vidutinė rango suma apskaičiuojama rangų sumą dalinat iš ekspertų skaičiaus (26):

$$\bar{t}_j = \frac{\sum_{k=1}^r t_{jk}}{r}; \quad (26)$$

čia t_{jk} – k eksperto j -ojo rodiklio įvertinamas balas; r – apklaustų ekspertų skaičius.

11 lentelė. Rangų suma ir vidutinio rango reikšmės

	Efektyvumo rodiklis				
	Oro apykaita esant 50 Pa, n_{50} , [h ⁻¹]	Savitoji skverbtis pastato atitvaros ploto vienetui, esant 50 Pa, q_{E50} [m ³ /h/m ²]	Savitoji skverbtis pastato grindų ploto vienetui, esant 50 Pa, q_{F50} [m ³ /h/m ²]	Ekvivalentinis nesandarumas ELA [cm ²]	Normalizuotas nuotėkis NL
Rangų suma	50,000	31,000	25,000	46,000	28,000
Vidutinė rango reikšmė	4,167	2,583	2,083	3,833	2,333

Ekspertų apklausos patikimumas išreiškiamas Kendalo konkordacijos (suderinamumo) koeficientu, nusako atskirų nuomonių suderinamumo lygį. Kendalo konkordacijos koeficientą apibrėžė M. Kendall 1990 [44]. Naudojant W skaičiavimo metodiką. Ši metodika taikoma, kai yra daugiau nei du ekspertai ($r > 2$), tai leidžia tikrinti ar ekspertų nuomonės sutampa.

3. Kiekvieno efektyvumo rodiklio nuokrypio kvadratų sumos nustatymas (27):

$$S = \sum_{j=1}^n \left[\sum_{k=1}^r t_{jk} - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^r t_{jk} \right]^2; \quad (27)$$

Apskaičiuojama S (28):

$$S = \left(50 - \frac{1}{5} \cdot 180 \right)^2 + \left(31 - \frac{1}{5} \cdot 180 \right)^2 + \left(25 - \frac{1}{5} \cdot 180 \right)^2 + \left(46 - \frac{1}{5} \cdot 180 \right)^2 + \left(28 - \frac{1}{5} \cdot 180 \right)^2 = 506; \quad (28)$$

čia n – efektyvumo (tiriamųjų) rodiklių skaičius.

4. Konkordacijos koeficiento nustatymas (29):

$$\bar{W} = \frac{12S}{r^2 \cdot (n^3 - n)}; \quad (29)$$

Apskaičiuojamas \bar{W} (30):

$$\bar{W} = \frac{12 \cdot 506}{12^2 \cdot (5^3 - 5)} = 0,351; \quad (30)$$

Konkordacijos koeficientas sudaro reikšmių aibę, kuri yra [0,1] tai $0 \leq W \leq 1$. Kuo didesnis konkordacijos koeficientas \bar{W} , tuo ekspertų nuomonės yra labiau suderintos.

5. Konkordacijos koeficiento reikšmės nustatymas (31):

$$x^2 = \frac{12S}{r \cdot n \cdot (n+1)}; \quad (31)$$

Apskaičiuojamas x^2 (32):

$$x^2 = \frac{12 \cdot 506}{12 \cdot 5 \cdot (5+1)} = 16,867 \quad (32)$$

6. Tikrinama ar sąlyga yra tenkinama (33):

Gauta x^2 reikšmė turi būti didesnė negu norminė x^2_{kr} reikšmė (2 priedas), kuri priklauso nuo laisvumo laipsnio ($\nu = n-1 = 5-1 = 4$) ir pasirinkto reikšmingumo lygio $\alpha = 0,01$. Jei yra tenkinama sąlyga $x^2 > x^2_{kr}$, tai laikoma, kad ekspertų nuomonės suderintos.

$$x^2 > x^2_{kr}; \quad (33)$$

Sąlygos tikrinimas (34):

$$16,87 > 13,28 \quad (34)$$

čia x^2_{kr} - norminė reikšmė priklausanti nuo laisvumo laipsnio ($\nu = n - 1$) ir reikšmingumo lygio laikoma, kad ekspertų nuomonės suderintos.

Išvada: Ekspertų nuomonės suderintos.

Kadangi ekspertų nuomonės suderintos, apskaičiuojamas santykinis reikšmingumas.

7. Santykinis reikšmingumas apskaičiuojamas rodiklio rango sumą dalijant iš visų rodiklių rangų sumos (35), gautos reikšmės pateikiamos 12 lentelėje:

$$q = \frac{\sum_{k=1}^r t_{jk}}{\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^r t_{jk}} \quad (35)$$

Santykinio reikšmingumo sumos vertė turi būti lygi 1, tada santykinis reikšmingumas apskaičiuotas teisingai. Šiuo atveju: $0,278 + 0,172 + 0,139 + 0,256 + 0,156 = 1$

Išvada: santykinis reikšmingumas suskaičiuotas teisingai.

Taip pat, apskaičiavus santykinius reikšmingumus, sudaroma prioritetų eilutė (pateikiama 12 lentelėje), kur reitinguojami rodikliai (kur 1 – didžiausią reitingumą turintis rodiklis, 5 – mažiausią reitingumą turintis rodiklis).

12 lentelė. Santykinis reikšmingumas ir prioritetinė eilutė

	Efektyvumo rodiklis				
	Oro apykaita esant 50 Pa, n_{50} , [h ⁻¹]	Savitoji skverbtis pastato atitvaros ploto vienetui, esant 50 Pa, q_{E50} [m ³ /h/m ²]	Savitoji skverbtis pastato grindų ploto vienetui, esant 50 Pa, q_{F50} [m ³ /h/m ²]	Ekvivalentinis nesandarumas ELA [cm ²]	Normalizuotas nuotėkis NL
Santykinis reikšmingumas	0,278	0,172	0,139	0,256	0,156
Prioritetas	1	3	5	2	4

3.4. Sandarumo bandymo rodiklių apskaičiavimas

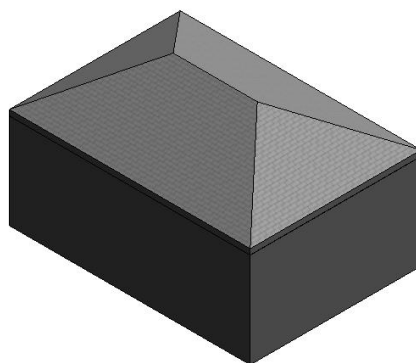
Taikant sandarumo bandymų rodiklių apskaičiavimo metodiką, kuri pateikiama 2.2 skyriuje, apskaičiuojami rodikliai. Remiantis (3-7) priedų informacija. Taikomos (6-10) formulės.

13 lentelė. Pastato ir bandymo informacija – Pastatas A

Pastatas A	V [m ³]	H [m]	Q [m ³ /h]	S_A [m ²]	S_F [m ²]	p_r [Pa]	p [kg/m ³]
	364	6,2	109,95	389	129,4	50	1,2

čia: V – pastato tūris [m³]; H – pastato aukštis [m]; Q - oro srautas, esant 50 Pa [m³/h]; S_A - pastato išorės atitvarų plotas [m²]; S_F – pastato grindų plotas [m²]; p_r – etaloninis slėgis; p – oro tankis [kg/m³];

Sukurti pastatų prototipai *Autodesk Revit* programa. Šiais prototipais norima parodyti kaip atrodo tokių pat tūrių tik skirtingų aukščių pastatai. Pateikiami (9-13) paveiksluose.



9 pav. Pastato A prototipas [autoriaus sukurta]

Sprendimas:

$$n_{50} = \frac{Q}{V} = \frac{109,95}{364} = 0,300 \text{ [1/h];} \quad (36)$$

$$q_{A50} = \frac{Q}{S_A} = \frac{109,95}{389} = 0,283 \text{ [m}^3\text{/h/m}^2\text{];} \quad (37)$$

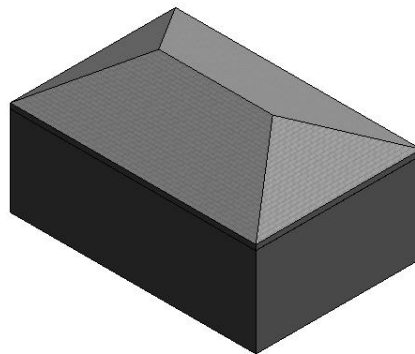
$$q_{F50} = \frac{Q}{S_F} = \frac{109,95}{129,4} = 0,850 \text{ [m}^3\text{/h/m}^2\text{];} \quad (38)$$

$$ELA = \frac{Q}{\frac{\sqrt{2 \cdot p_r}}{p}} = \frac{109,95}{\frac{\sqrt{2 \cdot 50}}{1,2}} = 11,951 \text{ [cm}^2\text{];} \quad (39)$$

$$NL = 1000 \cdot \frac{ELA}{S_F} \cdot \left(\frac{H^{0,3}}{2,5} \right) = 1000 \cdot \frac{11,95}{129,4} \cdot \left(\frac{6,2}{2,5} \right)^{0,3} = 121,285 ; \quad (40)$$

14 lentelė. Pastato ir bandymo informacija – Pastatas B

Pastatas B	V [m ³]	H [m]	Q [m ³ /h]	S _A [m ²]	S _F [m ²]	p _r [Pa]	p [kg/m ³]
	364	5,9	154,65	390	129	50	1,2



10 pav. Pastato B prototipas [autoriaus sukurta]

Sprendimas:

$$n_{50} = \frac{Q}{V} = \frac{154,65}{364} = 0,420 \text{ [1/h];} \quad (41)$$

$$q_{A50} = \frac{Q}{S_A} = \frac{154,65}{390} = 0,397 \text{ [m}^3\text{/h/m}^2\text{];} \quad (42)$$

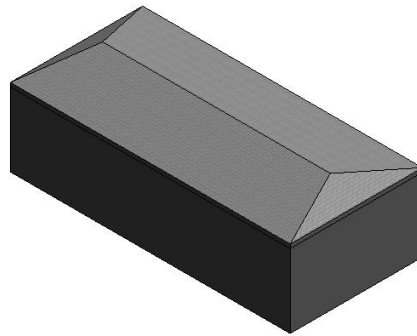
$$q_{F50} = \frac{Q}{S_F} = \frac{109,95}{129} = 1,199 \text{ [m}^3\text{/h/m}^2\text{];} \quad (43)$$

$$ELA = \frac{Q}{\frac{\sqrt{2 \cdot p_r}}{p}} = \frac{154,65}{\frac{\sqrt{2 \cdot 50}}{1,2}} = 16,810 \text{ [cm}^2\text{]}; \quad (44)$$

$$NL = 1000 \cdot \frac{ELA}{S_F} \cdot \left(\frac{H}{2,5}\right)^{0,3} = 1000 \cdot \frac{16,810}{129} \cdot \left(\frac{5,9}{2,5}\right)^{0,3} = 168,596; \quad (45)$$

15 lentelė. Pastato ir bandymo informacija – Pastatas C

Pastatas C	V [m ³]	H [m]	Q [m ³ /h]	S _A [m ²]	S _F [m ²]	p _r [Pa]	p [kg/m ³]
	364	5,5	175,5	405	117	50	1,2



11 pav. Pastato C prototipas [autoriaus sukurta]

Sprendimas:

$$n_{50} = \frac{Q}{V} = \frac{175,5}{364} = 0,480 \text{ [1/h]}; \quad (46)$$

$$q_{A50} = \frac{Q}{S_A} = \frac{175,5}{405} = 0,433 \text{ [m}^3\text{/h/m}^2\text{]}; \quad (47)$$

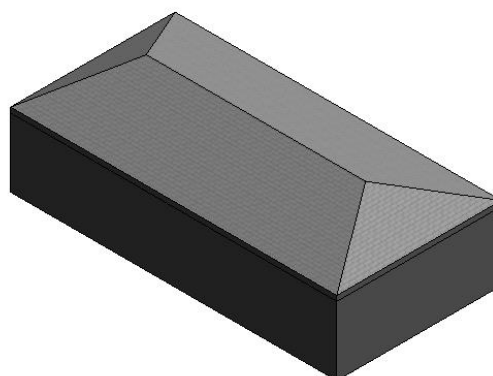
$$q_{F50} = \frac{Q}{S_F} = \frac{175,5}{117} = 1,500 \text{ [m}^3\text{/h/m}^2\text{]}; \quad (48)$$

$$ELA = \frac{Q}{\frac{\sqrt{2 \cdot p_r}}{p}} = \frac{175,5}{\frac{\sqrt{2 \cdot 50}}{1,2}} = 19,076 \text{ [cm}^2\text{]}; \quad (49)$$

$$NL = 1000 \cdot \frac{ELA}{S_F} \cdot \left(\frac{H}{2,5}\right)^{0,3} = 1000 \cdot \frac{19,076}{117} \cdot \left(\frac{5,5}{2,5}\right)^{0,3} = 206,552; \quad (50)$$

16 lentelė. Pastato ir bandymo informacija – Pastatas D

Pastatas D	V [m ³]	H [m]	Q [m ³ /h]	S _A [m ²]	S _F [m ²]	p _r [Pa]	p [kg/m ³]
	364	5,1	192,65	423	129	50	1,2



12 pav. Pastato D prototipas [autoriaus sukurta]

Sprendimas:

$$n_{50} = \frac{Q}{V} = \frac{192,65}{364} = 0,530 \text{ [1/h];} \quad (51)$$

$$q_{A50} = \frac{Q}{S_A} = \frac{192,65}{423} = 0,456 \text{ [m}^3\text{/h/m}^2\text{];} \quad (52)$$

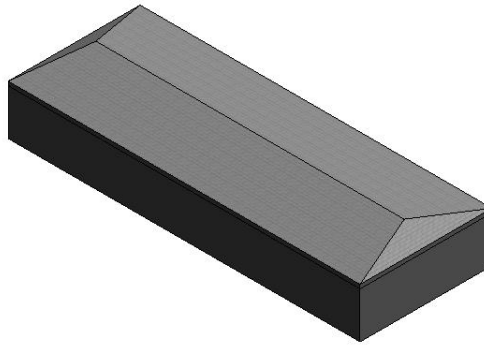
$$q_{F50} = \frac{Q}{S_F} = \frac{192,65}{129} = 1,494 \text{ [m}^3\text{/h/m}^2\text{];} \quad (53)$$

$$ELA = \frac{Q}{\frac{\sqrt{2} \cdot p_r}{p}} = \frac{192,65}{\frac{\sqrt{2} \cdot 50}{1,2}} = 20,940 \text{ [cm}^2\text{];} \quad (54)$$

$$NL = 1000 \cdot \frac{ELA}{S_F} \cdot \left(\frac{H}{2,5}\right)^{0,3} = 1000 \cdot \frac{20,940}{129} \cdot \left(\frac{5,1}{2,5}\right)^{0,3} = 201,039 ; \quad (55)$$

17 lentelė. Pastato ir bandymo informacija – Pastatas E

Pastatas E	V [m ³]	H [m]	Q [m ³ /h]	S _A [m ²]	S _F [m ²]	p _r [Pa]	p [kg/m ³]
	364	3,4	210,15	464	110	50	1,2



13 pav. Pastato E prototipas [autoriaus sukurta]

Sprendimas:

$$n_{50} = \frac{Q}{V} = \frac{210,15}{364} = 0,580 \text{ [1/h];} \quad (56)$$

$$q_{A50} = \frac{Q}{S_A} = \frac{210,15}{464} = 0,453 \text{ [m}^3\text{/h/m}^2\text{];} \quad (57)$$

$$q_{F50} = \frac{Q}{S_F} = \frac{210,15}{110} = 1,911 \text{ [m}^3\text{/h/m}^2\text{];} \quad (58)$$

$$ELA = \frac{Q}{\frac{\sqrt{2 \cdot p_r}}{p}} = \frac{210,15}{\frac{\sqrt{2 \cdot 50}}{1,2}} = 22,842 \text{ [cm}^2\text{];} \quad (59)$$

$$NL = 1000 \cdot \frac{ELA}{S_F} \cdot \left(\frac{H}{2,5} \right)^{0,3} = 1000 \cdot \frac{22,842}{110} \cdot \left(\frac{3,4}{2,5} \right)^{0,3} = 227,725 ; \quad (60)$$

Apskaičiuotų rodiklių duomenys apdorojami *MS Office Excel* programa. Pateikiami 18 lentelėje.

18 lentelė. Apskaičiuotų rodiklių rezultatai

	Oro apykaita esant 50 Pa, n_{50} , [h ⁻¹]	Savitoji skverbtis pastato atitvaros ploto vienetui, esant 50 Pa, q_{E50} [m ³ /h/m ²]	Savitoji skverbtis pastato grindų ploto vienetui, esant 50 Pa, q_{F50} [m ³ /h/m ²]	Ekvivalentinis nesandarumas ELA [cm ²]	Normalizuotas nuotėkis NL
Pastatas A	0,300	0,283	0,850	11,951	121,285
Pastatas B	0,420	0,397	1,199	16,810	168,596
Pastatas C	0,480	0,433	1,500	19,076	206,552
Pastatas D	0,530	0,456	1,494	20,940	201,039
Pastatas E	0,580	0,453	1,911	22,842	227,725

3.5. Sandarumo bandymo rezultatų priklausomybė nuo pastato dydžio daugiakriterinis vertinimas SAW metodu

Naudojant *MS Office Excel* programą sukurtos skaičiuoklės paremtos SAW metodu metodologijomis kurios aprašomos 2.4 skyriuje.

Atliekant daugiakriterinį vertinimą SAW metodu, pirmiausia yra sudaroma sprendimo matrica P , remiantis 18 lentelės duomenimis. Nustatomos rodiklių reikšmės. Kiekvieno rodiklio racionalumas nustatomas pagal tai, kada skaitinė reikšmė yra minimali, ar maksimali. Šiuo atveju, visų rodiklių skaitinė reikšmė yra minimali. Apskaičiuota sprendinių priėmimo matrica P pateikiama 19 lentelėje.

19 lentelė. Sprendimų priėmimo matrica P

Projekto alternatyvos (variantai)	Rodikliai				
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
Pastatas A	0,300	0,283	0,850	11,951	121,285
Pastatas B	0,420	0,397	1,199	16,810	168,596
Pastatas C	0,480	0,433	1,500	19,076	206,552
Pastatas D	0,530	0,456	1,494	20,940	201,039
Pastatas E	0,580	0,453	1,911	22,842	227,725
Min. ar max. rodiklis	min.	min.	min.	min.	min.
Rodiklio geriausia reikšmė	0,300	0,283	0,850	11,951	121,285

Gauta matrica P yra normalizuojama, taikant 13 formulę, sprendimo matricos P nariai yra minimalizuojami. Taip gaunama normalizuota matrica, kuri pateikiama 20 lentelėje. Rodiklių reikšmingumai, q_j gauti atlikus ekspertų apklausą ir ekspertų apklausos suderinamumo tikrinimą.

20 lentelė. Normalizuota matrica \bar{P}

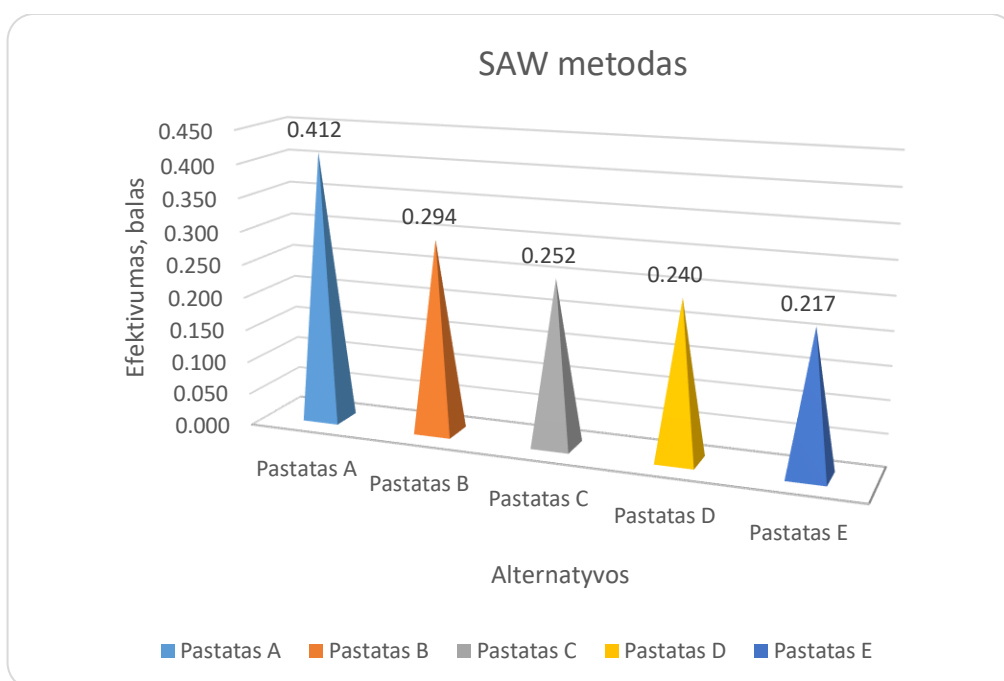
Projekto alternatyvos (variantai)	Rodikliai				
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
Pastatas A	39,837	42,230	14,060	1,000	1,000
Pastatas B	28,455	30,103	9,968	0,711	0,719
Pastatas C	24,898	27,601	7,967	0,626	0,587
Pastatas D	22,549	26,209	7,999	0,571	0,603
Pastatas E	20,605	26,382	6,254	0,523	0,533
Min. ar max. rodiklis	min.	min.	min.	min.	min.
Rodiklių reikšmingumai, q_j	0,278	0,172	0,139	0,256	0,156

Gavus normalizuotą matricą \bar{P} , toliau yra nustatoma, kuris pateiktų alternatyvos variantų yra racionaliausias. Naudojama 14 formulė, kur atitinkami normalizuotosios matricos nariai yra dauginami iš efektyvumo rodiklių reikšmingumo reikšmių ir gautos sandaugos susumuojamos. Racionaliausia alternatyva ta, kurios skaitinė reikšmė didžiausia. Pagal šias skaitines reikšmes yra

sudaroma prioritetų eilutė, kuri parodo alternatyvų prioritetų išsidėstymą, nuo geriausios iki blogiausios, pateikta 21 lentelėje.

21 lentelė. Reikšmių matrica

Projekto alternatyvos (variantai)	Rodikliai					Rodiklių verčių suma	Prioritetų eilutė
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅		
Pastatas A	10,198	10,811	3,599	0,256	0,156	0,412	1
Pastatas B	7,284	7,706	2,552	0,182	0,112	0,294	2
Pastatas C	6,374	7,066	2,040	0,160	0,092	0,252	3
Pastatas D	5,773	6,709	2,048	0,146	0,094	0,240	4
Pastatas E	5,275	6,754	1,601	0,134	0,083	0,217	5
Min. ar max. rodiklis	min.	min.	min.	min.	min.		



14 pav. Daugikriterinio SAW metodo vertinimo racionaliausios alternatyvos parinkimo grafikas

Taigi, atlikus visus skaičiavimus yra nustatyta, kad geriausias prioritetinis variantas SAW metodu yra pastatas A. Labiausiai prioritetinis pastatas A, nuo labiausiai ne prioritetinio pastato E skiriasi 1,9 karto.

3.6. Sandarumo bandymo rezultatų priklausomybė nuo pastato dydžio daugiakriterinis vertinimas TOPSIS metodu

Naudojant *MS Office Excel* programa sukurtos skaičiuoklės, paremtos TOPSIS metodų metodologijomis, kurios aprašomos 2.5 skyriuje.

Kaip ir SAW, taip ir TOPSIS metodu sudaroma sprendinių priėmimo matrica remiantis 18 lentelės duomenimis. Rodiklių reikšmės minimalizuojamos. Sprendimų priėmimo matrica pateikiama 22 lentelėje.

22 lentelė. Sprendimų priėmimo matrica

Projekto alternatyvos (variantai)	Rodikliai				
	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅
Pastatas A	0,300	0,283	0,850	11,951	121,285
Pastatas B	0,420	0,397	1,199	16,810	168,596
Pastatas C	0,480	0,433	1,500	19,076	206,552
Pastatas D	0,530	0,456	1,494	20,940	201,039
Pastatas E	0,580	0,453	1,911	22,842	227,725
Min. ar max. rodiklis	min.	min.	min.	min.	min.

Sprendimų priėmimo matrica yra normalizuojama taikant 16 formulę. Normalizuotos matricos nariai dalinami iš sprendimų priėmimo matricos narių sumos. Gauta Normalizuota matrica P pateikta 23 lentelėje.

23 lentelė. Normalizuota matrica \bar{P}

Projekto alternatyvos (variantai)	Rodikliai				
	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅
Pastatas A	0,284	0,309	0,265	0,286	0,287
Pastatas B	0,398	0,434	0,374	0,402	0,400
Pastatas C	0,455	0,473	0,468	0,456	0,489
Pastatas D	0,502	0,498	0,466	0,501	0,476
Pastatas E	0,549	0,495	0,596	0,546	0,540
Rodiklių reikšmingumai, q	0,278	0,172	0,139	0,256	0,156

Normalizuota matrica \bar{P} taikant 18 formulę dauginama iš integruotojo reikšmingumo ir gaunama svertinė normalizuota matrica \bar{P}^* kuri pateikiama 24 lentelėje.

24 lentelė. Svertinė normalizuota matrica \bar{P}^*

Projekto alternatyvos (variantai)	Rodikliai				
	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅
Pastatas A	0,079	0,053	0,037	0,073	0,045
Pastatas B	0,111	0,075	0,052	0,103	0,062
Pastatas C	0,126	0,081	0,065	0,117	0,076
Pastatas D	0,140	0,086	0,065	0,128	0,074
Pastatas E	0,153	0,085	0,083	0,140	0,084

Gavus svertinę normalizuotą matricą iš gautų rezultatų, taikant 20,21 formules, išrenkama idealiai geriausia a^+ ir blogiausia a^- alternatyva, pateikta 25 lentelėje.

25 lentelė. Idealiai geriausia ir blogiausia alternatyva

Idealus variantas	Rodikliai				
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
a^+	0,079	0,053	0,037	0,073	0,045
a^-	0,153	0,086	0,083	0,140	0,084

Nustačius idealiai geriausias ir blogiausias alternatyvas, yra nustatomi atstumai tarp geriausių L^+ alternatyvų ir L^- blogiausių alternatyvų. Taikant 22,23 formules. Rezultatai pateikti 26 lentelėje.

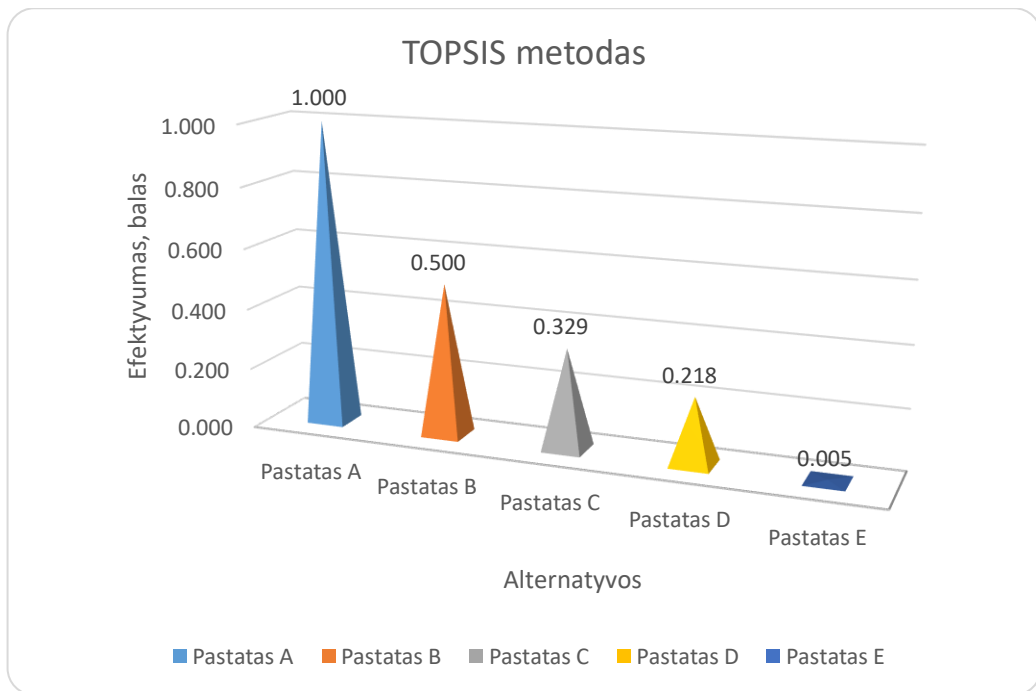
26 lentelė. Atstumai

$L_1^+ =$	0,000	$L_1^- =$	0,121
$L_2^+ =$	0,068	$L_2^- =$	0,068
$L_3^+ =$	0,082	$L_3^- =$	0,040
$L_4^+ =$	0,097	$L_4^- =$	0,027
$L_5^+ =$	0,121	$L_5^- =$	0,001

Paskutinis žingsnis išsiaiškinti kiekvieno i – tojo varianto santykinius atstumus K_i iki idealiai geriausio varianto, taikant 24 formulę. Kuo skaitinė reikšmė yra artimesnė vienetui, tuo variantas racionalesnis. Santykiniai atstumai K_i pateikiami 27 lentelėje. Pagal šias skaitines reikšmes yra sudaroma prioritetų eilutė, kuri parodo alternatyvų prioritetų išsidėstymą nuo geriausios iki blogiausios.

27 lentelė. Santykiniai atstumai K_i

		Prioritetų eilutė
$K_1 =$	1,000	1
$K_2 =$	0,500	2
$K_3 =$	0,329	3
$K_4 =$	0,218	4
$K_5 =$	0,005	5



15 pav. Daugiakriterinio SAW metodo vertinimo racionaliausios alternatyvos parinkimo grafikas

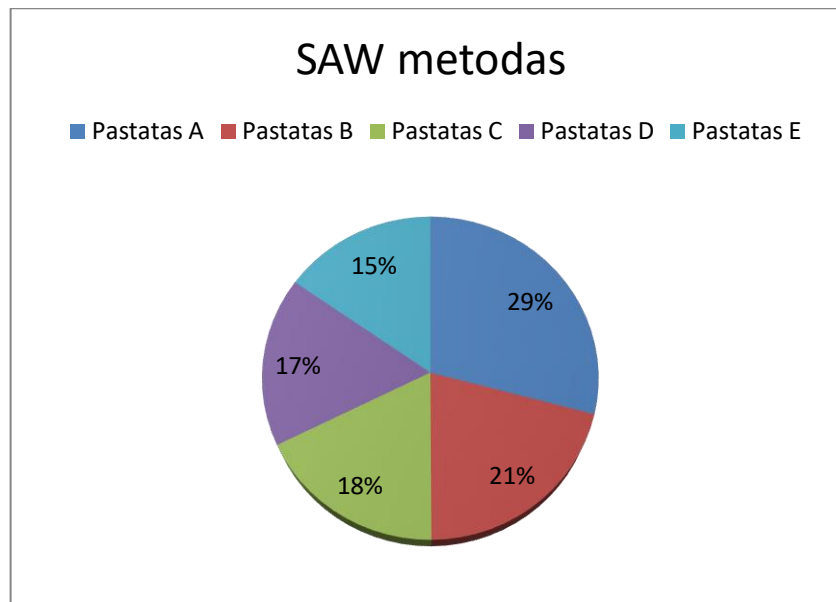
Taigi, atlikus visus skaičiavimus yra nustatyta, kad geriausias prioritetinis variantas TOPSIS metodu yra pastatas A. Labiausiai prioritetinis pastatas A, nuo labiausiai ne prioritetinio pastato E skiriasi 200 kartų.

3.7. Skaičiavimo rezultatai

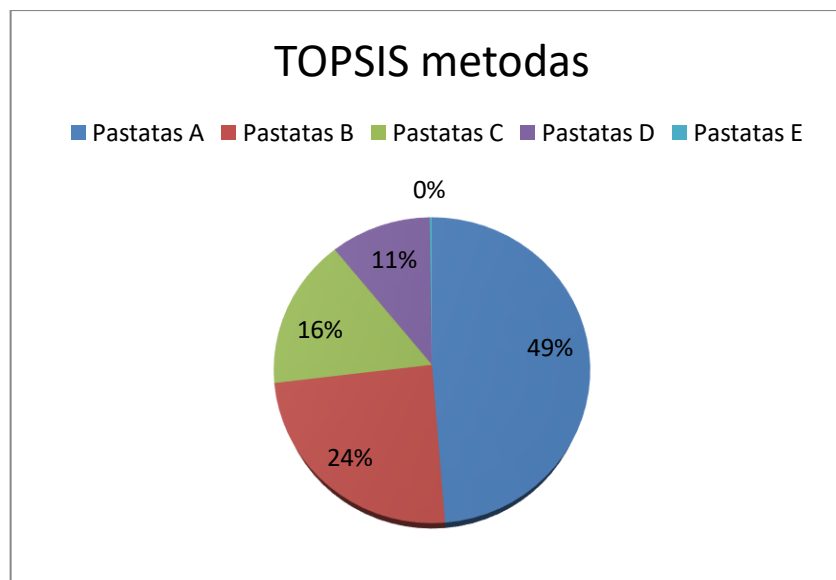
Apskaičiavus SAW ir TOPSIS vertinimo metodais, skaičiavimo rezultatai išreiškiami procentais (%). Matoma, kad tiek SAW, tiek TOPSIS metodu prioritetinis variantas yra pastatas A. Ne prioritetinis variantas yra pastatas E. SAW ir TOPSIS metodų skaičiavimo rezultatų palyginimas pateikiamas 28 lentelėje. Ryškiausi skirtumai tarp metodų apskaičiavimų matomi su pastatu A t.y 20 % skirtumas ir su pastatu E t.y 15 %. Pastatų B, C ir D nėra ženklaus skirtumo, skiriasi vos 2 – 6 %. Skaičiavimo rezultatai procentais išreikšti ir pateikti 11 ir 12 paveiksluose.

28 lentelė. SAW ir TOPSIS metodų skaičiavimo rezultatų palyginimas

Alternatyva	Efektyvumas balais		Procentais %		Skirtumai procentais %
	SAW metodu	TOPSIS metodu	SAW metodu	TOPSIS metodu	Tarp SAW ir TOPSIS
Pastatas A	0,412	1,000	29	49	20
Pastatas B	0,294	0,500	21	24	3
Pastatas C	0,252	0,329	18	16	2
Pastatas D	0,240	0,218	17	11	6
Pastatas E	0,217	0,005	15	0	15

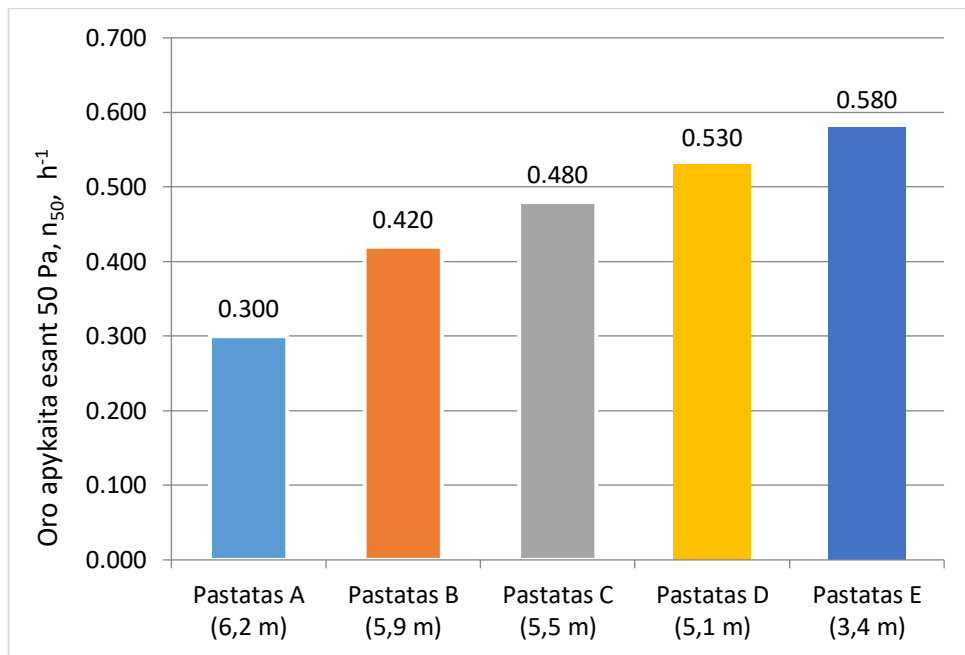


16 pav. SAW metodo rezultatai išreikšti procentais

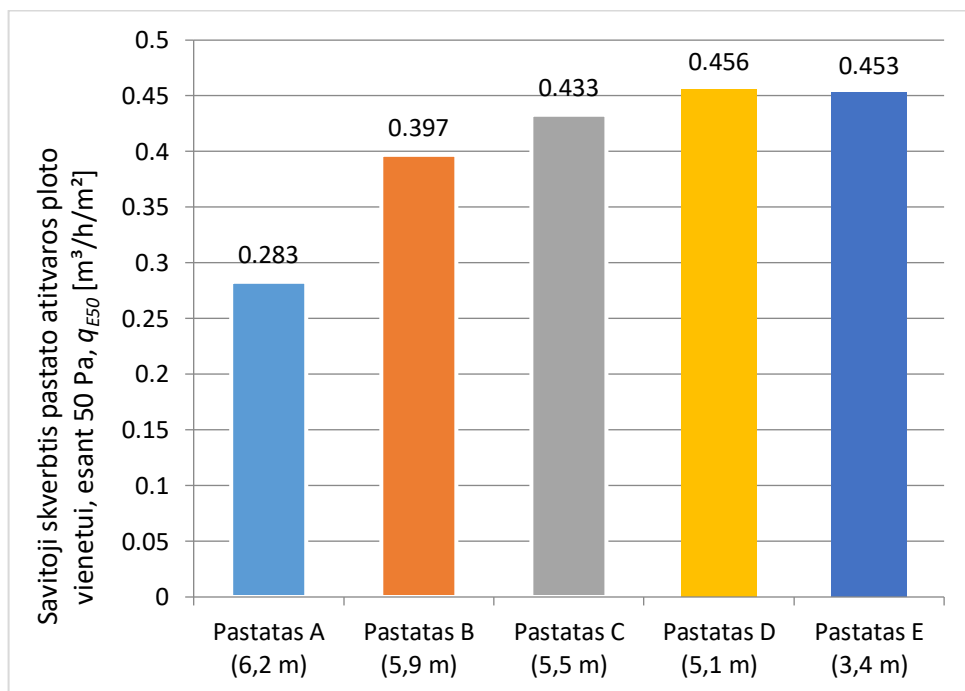


17 pav. TOPSIS metodo rezultatai išreikšti procentais

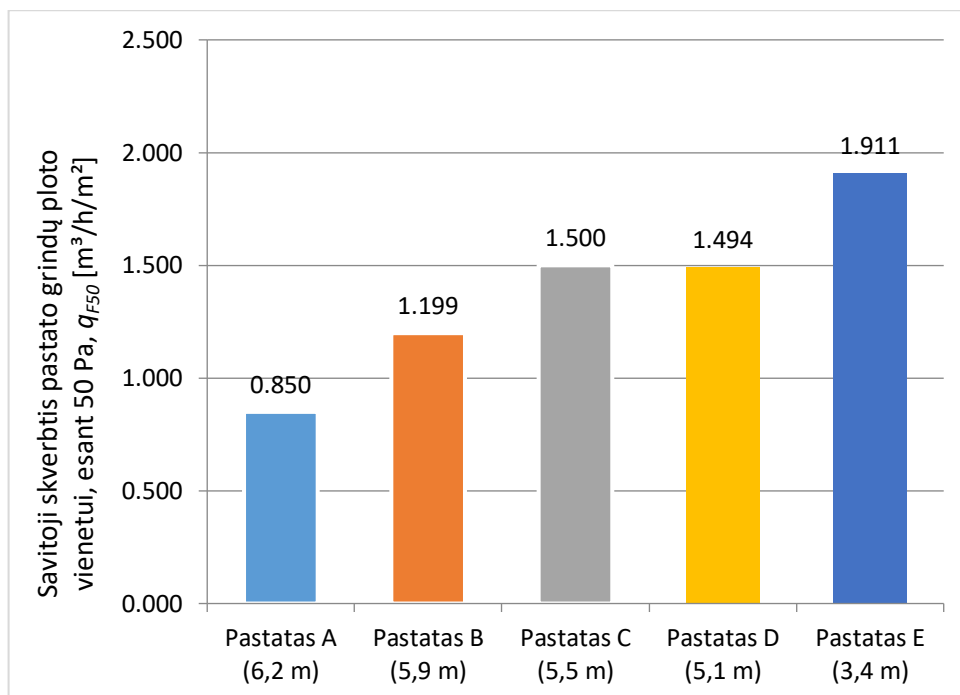
Atlikus tyrimą daugiakriteriais SAW ir TOPSIS vertinimo metodais apibendrinama pastato aukščio įtaka, pastato sandarumo rodikliams. 18 – 22 paveiksluose pateikiama kaip sandarumo bandymo rodikliai kinta nuo pastato aukščio. Pastebima, kad aukščiausias pastatas A turi geriausias sandarumo bandymo rodiklius. Visuose sandarumo bandymuose matoma rodiklių didėjimo priklausomybė nuo pastato aukščio. Kuo pastatas žemesnis, tuo rodiklis didesnis – pastatas mažiau efektyvus.



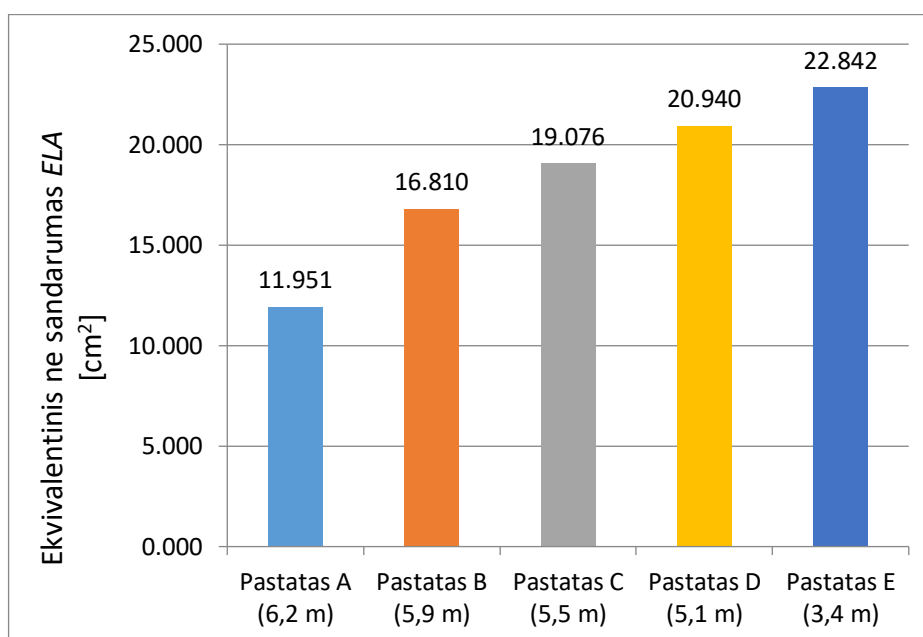
18 pav. Oro apykaita skirtinguose pastatuose grafikas



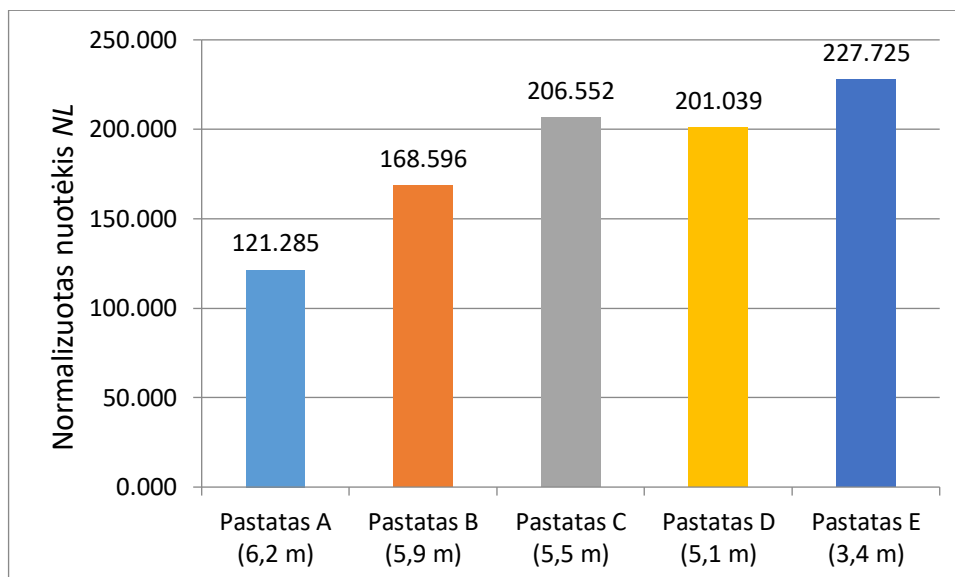
19 pav. Savitoji skverbtis pastato atitvaros ploto vienetui skirtinguose pastatuose grafikas



20 pav. Savitoji skverbtis pastato grindų ploto vienetui skirtinguose pastatuose grafikas



21 pav. Ekvivalentinis nesandarumas skirtinguose pastatuose grafikas



22 pav. Normalizuotas nuotėkis skirtinguose pastatuose grafikas

Ekspertų nuomone, reikšmingiausi rodikliai sandarumo bandyme yra oro apykaita esant 50 Pa ir ekvivalentinis nesandarumas. Šių rodiklių rezultatai pateikiami 29 lentelėje.

29 lentelė. Reikšmingiausių rodiklių rezultatai

	Oro apykaita esant 50 Pa, n_{50} , [h ⁻¹]	Ekvivalentinis nesandarumas ELA [cm ²]
Projektas A	0,300	11,951
Projektas B	0,420	16,810
Projektas C	0,480	19,076
Projektas D	0,530	20,940
Projektas E	0,580	22,842

Prioritetiniu laikomas pastatas A nuo labiausiai ne prioritetinio pastato E pagal oro apykaitos, esant 50 Pa, rodiklį skiriasi 1,933 karto. O ekvivalentinio nesandarumo rodiklis skiriasi 1,911 karto. Rodikliai pastatų aukščio atžvilgiu didėja, mažėjant pastato aukščiui.

Taigi, atlikus tyrimą, sandarumo bandymo rezultatų priklausomybė nuo pastato aukščio daugiakriteriniais SAW ir TOPSIS metodais, nustatyta, kad pastatų aukštis turi įtakos sandarumo bandymo rodikliams. Geriausias prioritetinis variantas SAW metodu yra pastatas A. Labiausiai prioritetinis pastatas A, nuo labiausiai ne prioritetinio pastato E skiriasi 1,9 karto. Geriausias prioritetinis variantas TOPSIS metodu yra pastatas A. Labiausiai prioritetinis pastatas A, nuo labiausiai ne prioritetinio pastato E skiriasi 200 kartų. Tiek SAW, tiek TOPSIS metodu, vienodo tūrio pastatuose geriausias rezultatas gautas pastate A, aukščiausiame pastate, kuris yra 6,2 metrų. Prasčiausias rezultatas pastate E, kurio aukštis yra 3,4 metro. Didėjant pastato aukščiui, sandarumo bandymo rodikliai mažėja, t.y. pastate A oro apykaitos rodiklis nuo pastato E skiriasi 1,933 karto, o ekvivalentinio nesandarumo rodiklis skiriasi 1,911 karto. Didėjant pastato atitvarų plotui, atsiranda didesnė tikimybė atsirasti didesniai nesandarumui. To pačio tūrio pastatai, tik skirtingų aukščių, turi skirtingą stogo plotą. Žemesniuose pastatuose stogo plotas didesnis, vadinasi didėja pastato nesandarumo tikimybė per stogą. Jei tas pačias erdves suskirstytume į aukštus ir mažintume perimetrą, pastatas būtų efektyvesnis. Galima daryti išvadą, kad pastato aukštis turi įtakos pastato

sandarumo rodikliams. Tai parodo, kad norint išsaugoti pastato efektyvumą, jie turėtų būti projektuojami ir statomi atsižvelgiant į pastato aukštį, bet ne į pastato perimetro dydį.

3.8. Trečio skyriaus išvados

Trečiajame skyriuje supažindinama su rodikliais, kurie naudojami tyrimui atlikti. Taip pat, reikšmių reikšmingumo nustatymas, kurio metu atliekama statybos srities ekspertų apklausa dėl rodiklių reikšmingumo. Ekspertų nuomone, svarbiausias reikšmingumo rodiklis yra oro apykaita esant 50 Pa, n_{50} [h^{-1}]. Mažiausiai svarbus rodiklis savitoji skverbti pastato grindų ploto vienetui, esant 50 Pa, q_{F50} [$\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$]. Apskaičiuoti sandarumo bandymo rodikliai, kurie naudojami tyrimui atlikti. Atliktas tyrimas sandarumo bandymo rezultatų priklausomybei nuo pastato dydžio įvertinti daugiakriteriniais SAW ir TOPSIS metodais. Tyrimo metu nustatyta, kad prioritetinis variantas visais atvejais yra pastatas A, kurio aukštis yra 6,2 metro.

Išvados

1. Atlikus mokslinių šaltinių analizę nustatyta, kad pagrindinės problemos, kurios atsiranda naujos statybos pastatuose su mažu sandarumu yra: vandens garų kondensacija, pelėsis, kambario akustikos sumažėjimas. Europos Sąjungos šalys pasirašė direktyvą, kuria nustato reikalavimą modernizuoti senus pastatus ir taikyti naujiems pastatams „suvartojimas artimo nuliui“ apibrėžimą.
2. Išanalizavus SAW ir TOPSIS vertinimo metodus aptariamos skaičiavimo formulės, aprašomi skaičiavimo metodai, skaičiavimo metodika suskirstyta etapais. Šie daugiakriteriniai vertinimo metodai leidžia išrinkti vieną optimaliausią alternatyvą.
3. Atlikus dvylikos statybos srities ekspertų apklausą svarbiausias reikšmingumo rodiklis yra oro apykaita esant 50 Pa, n_{50} [h^{-1}]. Mažiausiai svarbus rodiklis savitoji skverbti pastato grindų ploto vienetui, esant 50 Pa, q_{F50} [$\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$]. Ekspertų nuomonės suderinamumas patikrintas, kadangi konkordacijos koeficiento reikšmė didesnė už norminę reikšmę, t.y. $16,87 > 13,28$.
4. Atliktame tyrime daugiakriteriniais SAW ir TOPSIS metodais, nustatyta sandarumo bandymo priklausomybė nuo pastato aukščio. Didėjant pastato aukščiui, sandarumo bandymo rodikliai mažėja t.y. pastate A oro apykaitos rodiklis nuo pastato E skiriasi 1,933 karto, o ekvivalentinio nesandarumo rodiklis skiriasi 1,911 karto. Abiem metodais prioritetas yra pastatas A (aukštis 6,2 m) ir labiausiai neprioritetinis pastatas E (aukštis 3,4 m). SAW metodu pastatas A nuo pastato E skiriasi 1,9 karto, TOPSIS metodu – 200 kartų.

Informacijos šaltinių sąrašas

1. LST EN ISO - 9972 Pastatų energinio naudingumo projektavimas ir sertifikavimas (ISO 9972:2015) Design and certification of energy performance of buildings (ISO 9972-2015): Lietuvos Standartas. Vilnius: Lietuvos departamentas 2016.
2. STR 2.01.02:2016 „Pastatų energinio naudingumo projektavimas ir sertifikavimas. Statybos techninis reglamentas Vilnius.
3. RELANDER T, HOLOS S, THUE JV. Airtightness estimation - A state of the art review and an en route upper limit evaluation principle to increase the chances that wood-frame houses with a vapour- and wind-barrier comply with the airtightness requirements. Energy Build [interaktyvus]. (2012) 54:444–52 [žiūrėta 2019-11-16]. Prieiga per: Science Direct.
4. PRIGNON M., G. VAN MOESEKE. Factors Influencing Airtightness and Airtightness Predictive Models: A Literature Review. Energy and Buildings [interaktyvus]. 2017(87–97) [žiūrėta 2020-11-13]. Prieiga per: ResearchGate.
5. Buildings Directive 2010/31/EU (EPBD) and the Energy Efficiency Directive 2012/27/EU.
6. CLARK J., M. S. MAXWELL. Air Tightness Metrics to Improve Australian Building Envelope Integrity. Australia, 2017. [žiūrėta 2020-11-11].
7. SCHNIEDERSA J, FEISTA W, RONGENC L. Passive Houses for different climate zones. Energy and Buildings [interaktyvus].Germany, 2015 (71-87). [žiūrėta 2020-10-30]. Prieiga per: Science Direct.
8. LANGERA S, BEKOC G, BLOOMD E, WIDHEDENA A, EKBERGE L. Indoor air quality in passive and conventional new houses in Sweden. Building and Environmen [interaktyvus]. Sweden, 2015 (92–100). [žiūrėta 2020-11-13]. Prieiga per: Science Direct.
9. BRIGINSHAW J., A.BURKE, R COOKAS. The challenge of shape and form. Understanding the benefits of efficient design. [interaktyvus]. United Kingdom 2016. [žiūrėta 2020-12-16].
10. J. ŠADAUSKIENĖ, L. ŠEDUIKYTĖ, V. PAUKŠTYS, K. BANIONIS, A. GAILIUS. The role of air tightness in assessment of building energy performance: case study of Lithuania. Energy Sustain [interaktyvus]. Lithuania, 2016 (31–39) [žiūrėta 2020-11-13]. Prieiga per: Science Direct.
11. MISZCZUK A. The level of airtightness in energy-efficient single-family houses in Poland. Procedia Engineering [interaktyvus]. Warsaw, Poland. 153 (2016) 461 – 466 [žiūrėta 2019-11-03]. Prieiga per: Science Direct.
12. N. CAMPBELLA, T. MCGRATHA, S. NANUKUTTANA, S. BROWN. Monitoring the hygrothermal and ventilation performance of retrofitted clay brick solid wall houses with internal insulation: Two UK case studies. Case Studies in Construction Materials [interaktyvus]. United Kingdom 7 (2017) 163–179 [žiūrėta 2019-11-03]. Prieiga per: Science Direct
13. BS EN 13829:2001. Thermal performance of buildings. Determination of air permeability of buildings. Fan pressurization method. 2015. [žiūrėta 2019-11-03].
14. TRUONGA H., ANDREW M GARVIE. Chifley Passive House: A Case Study in Energy Efficiency and Comfort. Energy Procedia [interaktyvus]. Australia 121 (2017) 214–221 [žiūrėta 2019-11-06]. Prieiga per: Science Direct.
15. X.F. ZHENG, D. TETLOW, S. RIFFAT, C. WOOD, E.COOPER, M. GILLOT, S.K. LEE. Utilisation of the Pulse technique in the energy retrofitting to a range of European dwellings.

- 18th International Conference on Sustainable Energy Technologies – SET 2019. [interaktyvus]. United Kingdom, 2019. [žiūrėta 2020-11-15]. Prieiga per: Google Scholar.
16. IORDACHEA V., T. CATALIN, R. TEODOSIUA, T. CATALINA. Permeability measurements of a passive house during two. Energy Procedia [interaktyvus]. Bucharest, Romania 85 (2016) 279 – 287 [žiūrėta 2019-11-03]. Prieiga per: Science Direct.
 17. RAMAN G, CHELLIAH K, PRAHASH M, MUEHLEISEN RT. Detection and quantification of building air infiltration using remote acoustic methods. Australia, 2014 [žiūrėta 2020-11-10]. Prieiga per: Science Direct.
 18. ODRIOZOLA-MARITORENA M., C. GARCÍA-GAFARO, C. ESCUDERO, K. MARTIN, E. IRIBAR. Analysis of the influence of the permeability of the envelope in the performance of different types of mechanical ventilation systems. Energy Procedia [interaktyvus]. Spain 8 (2015) 1263 – 1268 [žiūrėta 2019-11-14]. Prieiga per: Science Direct.
 19. POTTER N., R. STEPHEN, S. BORLAND, D. LAWSON, P. JACKMAN. Testing buildings for air leakage. The Chartered Institution of Building Services Engineers. United Kingdom, 2000. [žiūrėta 2020-11-11].
 20. IORDACHE V. FLORIN IORDACHE. Air permeability measurements in a Deep Freeze Warehouse. Energy Procedia [interaktyvus]. Romania 112 (2017) 489 – 496 [žiūrėta 2019-11-12]. Prieiga per: Science Direct.
 21. IORDACHE V., T. CATALINA , Acoustic approach for building air permeability estimation, Building and Environment [interaktyvus]. Australia 57 (2012) 18-27 [žiūrėta 2019-11-11]. Prieiga per: Science Direct.
 22. LANGMANS, J.; DESTA, T.Z.; ALDERWEIRELDT, L.; ROELS, S. Durability of self-adhesive tapes for exterior air barrier applications: A laboratory investigation. [interaktyvus]. 2016, (30–41). [žiūrėta 2020-11-13]. Prieiga per: Google Scholar
 23. PEREIRA, P.F.; ALMEIDA, R.M.S.F.; RAMOS, N.M.M.; SOUSA, R. Ventilation and Airtightness in Transforming the Building Stock to High Performance. In Proceedings of the 35th AIVC Conference. [interaktyvus]. Poland, 2014, (24–25). [žiūrėta 2020-11-13]. Prieiga per: Google Scholar
 24. SHARPLES S, CLOSS S, CHILENGWE. Airtightness testing of very large buildings: a case study. Build Serv Eng Technol. [interaktyvus]. 2005 (167–72). [žiūrėta 2020-11-15]. Prieiga per: Google Scholar.
 25. ORME M. Estimates of the energy impact of ventilation and associated financial expenditures. Energy Build [interaktyvus]. 2001 (199–205). [žiūrėta 2020-11-15]. Prieiga per: Google Scholar.
 26. X. ZHENG, E. COOPER, M. GILLOTT, C.R WOOD. A practical review of alternatives to the steady pressurisation method for determining building airtightness. Renewable and Sustainable Energy Reviews. [interaktyvus]. China, 2020, (132). [žiūrėta 2020-11-15]. Prieiga per: Science Direct.
 27. HUI-XING L., ZHANG RANB, FENG GUO-HUIA, HUANG KAI-LIANGA, CAO CHI-HONGA. The Test and Analysis of Air Tightness for Zero Energy Building in Cold Region. Procedia Engineering [interaktyvus]. China 146 (2016) 239 – 243 [žiūrėta 2019-11-14]. Prieiga per: Science Direct.

28. WANYU R. CHAN, JEFFREY J., MAX H. SHERMAN. Analysis of air leakage measurements of US houses. *Energy Build* [interaktyvus]. USA, 2013. [žiūrėta 2020-10-14]. Prieiga per: Science Direct.
29. MONTOYA MI, PASTOR E, CARRIÉ FR, GUYOT G, PLANAS E. Air leakage in Catalan dwellings: Developing an airtightness model and leakage airflow predictions. *Build. Environ* [interaktyvus]. Netherlands, 2010. [žiūrėta 2020-10-15]. Prieiga per: Science Direct.
30. PINTO M, VIEGAS J, DE FREITAS VP. Air permeability measurements of dwellings and building components in Portugal. *Build. Environ* [interaktyvus]. Portugal, 2011. [žiūrėta 2020-10-17]. Prieiga per: Semantic scholar.
31. BOSSCHE NVD, HUYGHE W, MOENS J, JANSSENS A, DEPAEPE M. Airtightness of the window-wall interface in cavity brick walls. *Energy Build* [interaktyvus]. Belgium, 2012. [žiūrėta 2020-10-19]. Prieiga per: Semantic scholar.
32. LANGMANS J, KLEIN R, DE PAEPE M, ROELS S. Potential of wind barriers to assure airtightness of wood-frame low energy constructions. *Energy Build* [interaktyvus]. Belgium, 2011. [žiūrėta 2020-10-19]. Prieiga per: Semantic scholar.
33. WANYU R. CHAN, JEFFREY JOH, MAX H. SHERMAN. Analysis of air leakage measurements of US houses. *Energy and Buildings* [interaktyvus]. USA, 2013. [žiūrėta 2020-11-05].
34. PODVEZKO, V. Neapibrėžtumo įtaka daugiakriteriniams vertinimams. Verslas: teorija ir praktika. [interaktyvus]. Lietuva 2006 [žiūrėta 2020-12-03].
35. KABIR B.,S., REHAN , T. SOLOMON. A review of multi-criteria decision-making methods for infrastructure management. *Structure and Infrastructure Engineering*. [interaktyvus]. 2014 [žiūrėta 2020-12-16]. Prieiga per: Google Scholar.
36. PODVEZKO V. The Comparative Analysis of MCDA Methods SAW and COPRAS. *Inzinerine Ekonomika-Engineering Economics*, 2011, 22(2), 134-146. Vilnius, Lietuva [žiūrėta 2020-03-15]. Prieiga per: Science Direct
37. TING-YU C. Comparative Analysis of SAW and TOPSIS Based on Interval-valued Fuzzy Sets: Discussions on Score Functions and Weight Constraints. *Expert Systems with Applications*. [žiūrėta 2020-03-31]. Prieiga per: Science Direct
38. SIMANAVICIENE R., USTINOVICHUS L. Sensitivity Analysis for Quantitative Decision Making Methods: TOPSIS and SAW, in Proc. of the 16th International Conference on Information and Software Technologies 2010, Kaunas, Lithuania, Proceedings. 33–38. [žiūrėta 2020-03-24].
39. ŠERĖJIENĖ S., N. GORANIN, I. TUMASONIENĖ. Topsis metodo pritaikomumas šalies ypatingos svarbos infrastruktūros objektams. *Mokslas – Lietuvos ateitis / Science – Future of Lithuania* [interaktyvus]. Lithuania, 2019. [žiūrėta 2020-10-14].
40. WIECKOWSKI J., S. WOJCIECH. How to handling with uncertain data in the TOPSIS technique? *Energy Proced* 24th International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems [interaktyvus]. Poland, 2020. [žiūrėta 2020-10-14]. Prieiga per: Science Direct.
41. NING M., H. JINGYU, P. DONGMEI, D. JING, S. MENGJIE. A multi-objective study on the operation of task/ambient air conditioning systems in subtropics. *Energy Proced. International Conference on Applied Energy* [interaktyvus]. United Kingdom 2017. [žiūrėta 2020-10-14]. Prieiga per: Science Direct.

42. PODVEZKO, V. Ekspertų įverčių suderinamumas. Ūkio technologinis ir ekonominis vystymas. [interaktyvus]. Lietuva 2005. [žiūrėta 2020-12-03].
43. PODVEZKO, V. Neapibrėžtumo įtaka daugiakriteriniams vertinimams. Verslas: teorija ir praktika. [interaktyvus]. Lietuva 2006 [žiūrėta 2020-12-03].
44. KENDALL M. Rank correlation methods. [interaktyvus]. United Kingdom 1970. [žiūrėta 2020-12-03].

Priedai

1 priedas. Apklausos forma ekspertams

KAUNO TEHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

APKLAUSA

Sveiki, esu Eglė Smilgytė statybos valdymo magistrantė Kauno technologijos universitete, Panevėžio technologijų ir verslo fakultete. Savo baigiamąjį magistro darbą rašau tema: Pastatų sandarumo tyrimų lyginamoji analizė. Šiame darbe atlieku tyrimą: Sandarumo bandymo rezultatų priklausomybė nuo pastato dydžio. Šiam tyrimui atlikti yra reikalinga statybos specialistų nuomonė apie pastato sandarumo bandymo rodiklius. Šiam tyrimui vertinti pasirinkau penkis kriterijus. Prašau, Jūsų išreikšti savo nuomonę įvertinant kiekvieną kriterijų balais nuo 1 iki 5, kur 5 aukščiausias, 1 žemiausias įvertinimo balas.

Tyrimui atlikti pasirinkti penki veिनodo tūrio, skirtingų aukščių gyvenamosios paskirties pastatai, A++ energinio naudingumo klasės, kuriuose durų pūstuvu atlikti sandarumo bandymai. Gauti duomenys bus naudojami nustatyti kaip tiriamos charakteristikos priklauso nuo pastato dydžio.

	Rodikliai				
	Oro apykaita esant 50 Pa, n_{50} , [h ⁻¹]	Savitoji skverbti pastato atitvaros ploto vienetui, esant 50 Pa, q_{E50} [m ³ /h/m ²]	Savitoji skverbti pastato grindų ploto vienetui, esant 50 Pa, q_{F50} [m ³ /h/m ²]	Ekvivalentinis nesandarumas ELA [cm ²]	Normalizuotas nuotėkis NL
Vertinimas balais nuo 1 iki 5 (sveikas teigiamas skaičius)					

Informacija apie respondento užimamas pareigas: _____

Ačiū už Jūsų atsakymus!

2 priedas. Norminē χ^2_{kr} reikšmē

ν	0,995	0,99	0,975	0,95	0,9	0,1	0,05	0,025	0,01
1	0	0	0	0	0,02	2,71	3,84	5,02	6,63
2	0,01	0,02	0,05	0,1	0,21	4,61	5,99	7,38	9,21
3	0,07	0,11	0,22	0,35	0,58	6,25	7,81	9,35	11,34
4	0,21	0,3	0,48	0,71	1,06	7,78	9,49	11,14	13,28
5	0,41	0,55	0,83	1,15	1,61	9,24	11,07	12,83	15,09
6	0,68	0,87	1,24	1,64	2,2	10,64	12,59	14,45	16,81
7	0,99	1,24	1,69	2,17	2,83	12,02	14,07	16,01	18,48
8	1,34	1,65	2,18	2,73	3,49	13,36	15,51	17,53	20,09
9	1,73	2,09	2,7	3,33	4,17	14,68	16,92	19,02	21,67
10	2,16	2,56	3,25	3,94	4,87	15,99	18,31	20,48	23,21
11	2,6	3,05	3,82	4,57	5,58	17,28	19,68	21,92	24,72
12	3,07	3,57	4,4	5,23	6,3	18,55	21,03	23,34	26,22
13	3,57	4,11	5,01	5,89	7,04	19,81	22,36	24,74	27,69
14	4,07	4,66	5,63	6,57	7,79	21,06	23,68	26,12	29,14
15	4,6	5,23	6,26	7,26	8,55	22,31	25	27,49	30,58
16	5,14	5,81	6,91	7,96	9,31	23,54	26,3	28,85	32
17	5,7	6,41	7,56	8,67	10,09	24,77	27,59	30,19	33,41
18	6,26	7,01	8,23	9,39	10,86	25,99	28,87	31,53	34,81
19	6,84	7,63	8,91	10,12	11,65	27,2	30,14	32,85	36,19
20	7,43	8,26	9,59	10,85	12,44	28,41	31,41	34,17	37,57
22	8,64	9,54	10,98	12,34	14,04	30,81	33,92	36,78	40,29
24	9,89	10,86	12,4	13,85	15,66	33,2	36,42	39,36	42,98
26	11,16	12,2	13,84	15,38	17,29	35,56	38,89	41,92	45,64
28	12,46	13,56	15,31	16,93	18,94	37,92	41,34	44,46	48,28
30	13,79	14,95	16,79	18,49	20,6	40,26	43,77	46,98	50,89
32	15,13	16,36	18,29	20,07	22,27	42,58	46,19	49,48	53,49
34	16,5	17,79	19,81	21,66	23,95	44,9	48,6	51,97	56,06
38	19,29	20,69	22,88	24,88	27,34	49,51	53,38	56,9	61,16
42	22,14	23,65	26	28,14	30,77	54,09	58,12	61,78	66,21
46	25,04	26,66	29,16	31,44	34,22	58,64	62,83	66,62	71,2
50	27,99	29,71	32,36	34,76	37,69	63,17	67,5	71,42	76,15
55	31,73	33,57	36,4	38,96	42,06	68,8	73,31	77,38	82,29
60	35,53	37,48	40,48	43,19	46,46	74,4	79,08	83,3	88,38
65	39,38	41,44	44,6	47,45	50,88	79,97	84,82	89,18	94,42
70	43,28	45,44	48,76	51,74	55,33	85,53	90,53	95,02	100,43
75	47,21	49,48	52,94	56,05	59,79	91,06	96,22	100,84	106,39
80	51,17	53,54	57,15	60,39	64,28	96,58	101,88	106,63	112,33
85	55,17	57,63	61,39	64,75	68,78	102,08	107,52	112,39	118,24

90	59,2	61,75	65,65	69,13	73,29	107,57	113,15	118,14	124,12
95	63,25	65,9	69,92	73,52	77,82	113,04	118,75	123,86	129,97
100	67,33	70,06	74,22	77,93	82,36	118,5	124,34	129,56	135,81

3 priedas. Pastato A bandymo informacijos ir rezultatų protokolas

Pastato ir bandymo informacija	
Bandymo failas:	
Pastato vidinis tūris [m ³]:	364
Pastato išorės atitvarų plotas [m ²]:	389
Grindų plotas [m ²]:	129,4
Pastato aukštis (nuo grindų iki lubų) [m]:	6,2
Altitudė [m]:	149,7
Tūrio matavimo tikslumas:	3%
Išorės atitvarų ploto matavimo tikslumas:	3%
Grindų ploto matavimo tikslumas:	3%
Pastato aukštų skaičius:	1 (su mansarda)

Rezultatai	
Oro apykaita esant 50 Pa, n_{50} [1/h]	0,30
Oro srautas esant 50 Pa, [m ³ /h]	109,95
Oro srautas esant 10 Pa, [m ³ /h]	35,895
Savitoji skverbtis pastato atitvaros ploto vienetui, esant 50 Pa, [m ³ /h/m ²]	0,283
Savitoji skverbtis pastato grindų ploto vienetui, esant 50 Pa, [m ³ /h/m ²]	0,850
Efektyvusis skverbties plotas, esant 10 Pa, [cm ²]	24,45
Savitasis efektyvusis skverbties plotas pastato atitvaros ploto vienetui, esant 10 Pa, [cm ² /m ²]	0,063060
Savitasis efektyvusis skverbties plotas grindų ploto vienetui, esant 10 Pa, [cm ² /m ²]	0,189

Informacija apie pastato paruošimą ir bandymo sąlygas

1. Visi atitvarose esantys langai, durys ir liukai uždaryti.
2. Atitvarose esančios vėdinimo angos, skirtos natūraliam vėdinimui, užsandarintos.
3. Mechaninio vėdinimo ir oro kondicionavimo sistemų angos užsandarintos.
4. Pastato tūris ir atitvarų plotas paskaičiuotas pagal standarto LST EN ISO 9972:2015 skyrių 6.1.1 ir 6.1.2 reikalavimus, remiantis užsakovo pateiktais brėžiniais.
5. Atliktas pastato slėgio mažinimo iki -60,0 Pa ir slėgio didinimo iki 64,6 Pa bandymas.
6. Vėjo greitis prie pastato 0,6 m/s.
7. Temperatūra – lauke – 19,4 C, pastato viduje – 18,7° C.
8. Barometrinis slėgis – 101,3 kPa.

Visos bandomojoje pastato dalyje esančios jungiančiosios angos atidarytos.

4 priedas. Pastato B bandymo informacijos ir rezultatų protokolas

Pastato ir bandymo informacija	
Bandymo failas:	
Pastato vidinis tūris [m ³]:	364
Pastato išorės atitvarų plotas [m ²]:	390
Grindų plotas [m ²]:	129
Pastato aukštis (nuo grindų iki lubų) [m]:	5,9
Altitudė [m]:	116,6
Tūrio matavimo tikslumas:	3%
Išorės atitvarų ploto matavimo tikslumas:	3%
Grindų ploto matavimo tikslumas:	3%
Pastato aukštų skaičius:	1 (su mansarda)

Rezultatai	
Oro apykaita esant 50 Pa, n_{50} [1/h]	0,42
Oro srautas esant 50 Pa, [m ³ /h]	154,65
Oro srautas esant 10 Pa, [m ³ /h]	48,041
Savitoji skverbtis pastato atitvaros ploto vienetui, esant 50 Pa, [m ³ /h/m ²]	0,397
Savitoji skverbtis pastato grindų ploto vienetui, esant 50 Pa, [m ³ /h/m ²]	1,199
Efektyvusis skverbties plotas, esant 10 Pa, [cm ²]	32,75
Savitasis efektyvusis skverbties plotas pastato atitvaros ploto vienetui, esant 10 Pa, [cm ² /m ²]	0,083960
Savitasis efektyvusis skverbties plotas grindų ploto vienetui, esant 10 Pa, [cm ² /m ²]	0,254

Informacija apie pastato paruošimą ir bandymo sąlygas

1. Visi atitvarose esantys langai, durys ir liukai uždaryti.
2. Atitvarose esančios vėdinimo angos, skirtos natūraliam vėdinimui, užsandarintos.
3. Mechaninio vėdinimo ir oro kondicionavimo sistemų angos užsandarintos.
4. Pastato tūris ir atitvarų plotas paskaičiuotas pagal standarto LST EN ISO 9972:2015 skyrių 6.1.1 ir 6.1.2 reikalavimus, remiantis užsakovo pateiktais brėžiniais.
5. Atliktas pastato slėgio mažinimo iki -65,7 Pa ir slėgio didinimo iki 66,6 Pa bandymas.
6. Vėjo greitis prie pastato 1,1 m/s.
7. Temperatūra – lauke – 19,1 C, pastato viduje – 18,1°C.
8. Barometrinis slėgis – 101,3 kPa.

Visos bandomojoje pastato dalyje esančios jungiančiosios angos atidarytos.

5 priedas. Pastato C bandymo informacijos ir rezultatų protokolas

Pastato ir bandymo informacija	
Bandymo failas:	
Pastato vidinis tūris [m ³]:	364
Pastato išorės atitvarų plotas [m ²]:	405
Grindų plotas [m ²]:	117
Pastato aukštis (nuo grindų iki lubų) [m]:	5,5
Altitudė [m]:	57,1
Tūrio matavimo tikslumas:	3%
Išorės atitvarų ploto matavimo tikslumas:	3%
Grindų ploto matavimo tikslumas:	3%
Pastato aukštų skaičius:	1

Rezultatai	
Oro apykaita esant 50 Pa, n_{50} [1/h]	0,48
Oro srautas esant 50 Pa, [m ³ /h]	175,50
Oro srautas esant 10 Pa, [m ³ /h]	73,490
Savitoji skverbtis pastato atitvaros ploto vienetui, esant 50 Pa, [m ³ /h/m ²]	0,433
Savitoji skverbtis pastato grindų ploto vienetui, esant 50 Pa, [m ³ /h/m ²]	1,500
Efektyvusis skverbties plotas, esant 10 Pa, [cm ²]	50,10
Savitasis efektyvusis skverbties plotas pastato atitvaros ploto vienetui, esant 10 Pa, [cm ² /m ²]	0,12368
Savitasis efektyvusis skverbties plotas grindų ploto vienetui, esant 10 Pa, [cm ² /m ²]	0,428

Informacija apie pastato paruošimą ir bandymo sąlygas

1. Visi atitvarose esantys langai, durys ir liukai uždaryti.
2. Atitvarose esančios vėdinimo angos, skirtos natūraliam vėdinimui, užsandarintos.
3. Mechaninio vėdinimo ir oro kondicionavimo sistemų angos užsandarintos.
4. Pastato tūris ir atitvarų plotas paskaičiuotas pagal standarto LST EN ISO 9972:2015 skyrių 6.1.1 ir 6.1.2 reikalavimus, remiantis užsakovo pateiktais brėžiniais.
5. Atliktas pastato slėgio mažinimo iki -65,1 Pa ir slėgio didinimo iki 63,9 Pa bandymas.
6. Vėjo greitis prie pastato 0,6 m/s.
7. Temperatūra – lauke – 18,4° C, pastato viduje – 19,3° C.
8. Barometrinis slėgis – 101,3 kPa.

Visos bandomojoje pastato dalyje esančios jungiančiosios angos atidarytos

6 priedas. Pastato D bandymo informacijos ir rezultatų protokolas

Pastato ir bandymo informacija	
Bandymo failas:	
Pastato vidinis tūris [m ³]:	364
Pastato išorės atitvarų plotas [m ²]:	423
Grindų plotas [m ²]:	129
Pastato aukštis (nuo grindų iki lubų) [m]:	5,1
Altitudė [m]:	164
Tūrio matavimo tikslumas:	3%
Išorės atitvarų ploto matavimo tikslumas:	3%
Grindų ploto matavimo tikslumas:	3%
Pastato aukštų skaičius:	1

Rezultatai	
Oro apykaita esant 50 Pa, n_{50} [1/h]	0,53
Oro srautas esant 50 Pa, [m ³ /h]	192,65
Oro srautas esant 10 Pa, [m ³ /h]	57,490
Savitoji skverbtis pastato atitvaros ploto vienetui, esant 50 Pa, [m ³ /h/m ²]	0,456
Savitoji skverbtis pastato grindų ploto vienetui, esant 50 Pa, [m ³ /h/m ²]	1,494
Efektyvusis skverbties plotas, esant 10 Pa, [cm ²]	39,20
Savitasis efektyvusis skverbties plotas pastato atitvaros ploto vienetui, esant 10 Pa, [cm ² /m ²]	0,092630

Informacija apie pastato paruošimą ir bandymo sąlygas

1. Visi atitvarose esantys langai, durys ir liukai uždaryti.
2. Atitvarose esančios vėdinimo angos, skirtos natūraliam vėdinimui, užsandarintos.
3. Mechaninio vėdinimo ir oro kondicionavimo sistemų angos užsandarintos.
4. Pastato tūris ir atitvarų plotas paskaičiuotas pagal standarto LST EN ISO 9972:2015 skyrių 6.1.1 ir 6.1.2 reikalavimus, remiantis užsakovo pateiktais brėžiniais.
5. Atliktas pastato slėgio mažinimo iki -63,8 Pa ir slėgio didinimo iki 64,2 Pa bandymas.
6. Vėjo greitis prie pastato 0,4 m/s.
7. Temperatūra – lauke – 20,4° C, pastato viduje – 21,5° C.
8. Barometrinis slėgis – 101,3 kPa.

Visos bandomojoje pastato dalyje esančios jungiančiosios angos atidarytos.

7 priedas. Pastato E bandymo informacijos ir rezultatų protokolas

Pastato ir bandymo informacija	
Bandymo failas:	
Pastato vidinis tūris [m ³]:	364
Pastato išorės atitvarų plotas [m ²]:	464
Grindų plotas [m ²]:	110
Pastato aukštis (nuo grindų iki lubų) [m]:	3,4
Altitudė [m]:	57,4
Tūrio matavimo tikslumas:	3%
Išorės atitvarų ploto matavimo tikslumas:	3%
Grindų ploto matavimo tikslumas:	3%
Pastato aukštų skaičius:	1

Rezultatai	
Oro apykaita esant 50 Pa, n_{50} [h]	0,58
Oro srautas esant 50 Pa, [m ³ /h]	210,15
Oro srautas esant 10 Pa, [m ³ /h]	55,950
Savitoji skverbtis pastato atitvaros ploto vienetui, esant 50 Pa, [m ³ /h/m ²]	0,453
Savitoji skverbtis pastato grindų ploto vienetui, esant 50 Pa, [m ³ /h/m ²]	1,911
Efektyvusis skverbties plotas, esant 10 Pa, [cm ²]	38,15
Savitasis efektyvusis skverbties plotas pastato atitvaros ploto vienetui, esant 10 Pa, [cm ² /m ²]	0,082180
Savitasis efektyvusis skverbties plotas grindų ploto vienetui, esant 10 Pa, [cm ² /m ²]	0,347

Informacija apie pastato paruošimą ir bandymo sąlygas

1. Visi atitvarose esantys langai, durys ir liukai uždaryti.
2. Atitvarose esančios vėdinimo angos, skirtos natūraliam vėdinimui, užsandarintos.
3. Mechaninio vėdinimo ir oro kondicionavimo sistemų angos užsandarintos.
4. Pastato tūris ir atitvarų plotas paskaičiuotas pagal standarto LST EN ISO 9972:2015 skyrių 6.1.1 ir 6.1.2 reikalavimus, remiantis užsakovo pateiktais brėžiniais.
5. Atliktas pastato slėgio mažinimo iki -64,2 Pa ir slėgio didinimo iki 63,1 Pa bandymas.
6. Vėjo greitis prie pastato m/s.
7. Temperatūra – lauke – 16,8° C, pastato viduje – 23,9° C.
8. Barometrinis slėgis – 101,3 kPa.
9. Visos bandomojoje pastato dalyje esančios jungiančiosios angos atidarytos.
10. Pastate sumontuoti lubų laikikliai, išvedžiota rekuperacijos sistemos vamzdžiai.