



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

**Energijos beveik nevartojančio vienbučio karkasinio
gyvenamojo namo išorės sienų daugiakriteris vertinimas**
Baigiamasis magistro studijų projektas

Donata Zdanevičienė
Projekto autorė

dr. Donatas Aviža
Vadovas

Panevėžys, 2021



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Energijos beveik nevartojančio vienbučio karkasinio gyvenamojo namo išorės sienų daugiakriteris vertinimas

Baigiamasis magistro studijų projektas

Statybos valdymas (6211EX007)

Donata Zdanevičienė

Projekto autorė

dr. Donatas Aviža

Vadovas

Recenzentas / Recenzentė

Panevėžys, 2021



Kauno technologijos universitetas

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Donata Zdanevičienė

Energijos beveik nevartojančio vienbučio karkasinio gyvenamojo namo išorės sienų daugiakriteris vertinimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Donatos Zdanevičienės, baigiamasis projektas tema „Energijos beveik nevartojančio vienbučio karkasinio gyvenamojo namo išorės sienų daugiakriteris vertinimas“ 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

Diplomantui ***Donatai Zdanevičienei***

Baigiamojo projekto tema (lietuvių kalba)	<i>Energijos beveik nevartojančio vienbučio karkasinio gyvenamojo namo išorės sienų daugiakriteris vertinimas</i>
Baigiamojo projekto tema (anglų kalba)	<i>Multi-criteria Evaluation of External Walls of Net-zero Energy Wood-Framed Single-family Home</i>

Patvirtinta 2020 m. lapkričio 9 d. dekanų 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

Pastato paskirtis – gyvenamoji.

Baigiamojo projekto užduotys / uždaviniai, kurie turi būti atskleisti projekte

- 1. Apžvalginėje dalyje išanalizuoti Lietuvos ir užsienio reikalavimus energijos beveik nevartojantiems gyvenamiesiems pastatams ir jų atitvaroms.*
- 2. Atlikti mokslinės literatūros, susijusios su energijos beveik nevartojančiais gyvenamaisiais pastatais, analizę.*
- 3. Metodologinėje dalyje pateikti daugiakriterių vertinimo metodų klasifikaciją bei COPRAS, TOPSIS ir ARAS metodų vertinimo algoritmus.*
- 4. Išanalizuoti medinių-karkasinių namų statybos technologijas.*
- 5. Tiriamojoje dalyje pateikti energijos beveik nevartojančio vienbučio karkasinio gyvenamojo namo išorės sienų vertinamąsias alternatyvas bei parinkti racionaliausią variantą COPRAS, TOPSIS ir ARAS metodais. Nustatyti alternatyvų prioritetų eilutę, atsižvelgiant į spendimų matricos vertinamuosius rodiklius (sluoksnio rinkos kainą, degumo klasę, sluoksnio storį, sluoksnio šilumos laidumo koeficientą, ekologiškumą).*

Vadovas

dr. Donatas Aviža

(vadovo pareigos, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

Donata Zdanevičienė

(studento vardas, pavardė)

2020 m. lapkričio 27 d.

Zdanevičienė, Donata. Energijos beveik nevartojančio vienbučio karkasinio gyvenamojo namo išorės sienų daugiakriteris vertinimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas dr. Donatas Aviža; Kauno technologijos universitetas, Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Statybos inžinerija, Technologijos mokslai (Inžinerijos mokslai).

Reikšminiai žodžiai: išorės siena, medinis karkasas, energija artima nuliui, medinės konstrukcijos, daugiakriterinis vertinimas.

Panevėžys, 2021, 70 p.

Santrauka

Šiame darbe pateikiama energijos beveik nevartojančio vienbučio karkasinio gyvenamojo namo išorės sienų daugiakriterė analizė. Pagrindinis darbo tikslas – ištirti tinkamiausią šiltinimo sluoksnio alternatyvą, medinio-karkasinio beveik energijos nevartojančio vienbučio gyvenamojo namo išorės sienoms apšiltinti. Atrinktos penkios šiltinimo sluoksnio alternatyvos. Tyrimui naudoti kiekybiniai ir kokybiniai rodikliai. Kiekybiniai kriterijai išreikšti matavimo vienetais, o kokybiniams kriterijams pritaikyta balų sistema.

Šį darbą sudaro trys dalys – mokslinės literatūros analizė, tyrimo metodika ir tiriamoji dalis. Pirmoje dalyje analizuojami moksliniai straipsniai ir įvairūs mokslininkų atlikti tyrimai. Analizuojama karkasinių namų statybos technologija bei paplitimas Europos šalyse. Antroje dalyje aptariama tyrimo metodika bei tyrimui atrinktos alternatyvos. Trečioje dalyje aprašoma tyrimo eiga, sudaroma vertinimo kriterijų sistema, atliekamas alternatyvų daugiakriteris vertinimas taikant COPRAS, TOPSIS ir ARAS metodus.

Pirmojoje dalyje išanalizuoti Lietuvos ir užsienio šalių reikalavimai energijos beveik nevartojantiems gyvenamiesiems pastatams ir jų atitvaroms. Mokslinės literatūros analizės dalyje išanalizuoti 42 moksliniai straipsniai beveik energijos nevartojančių, skydinių-karkasinių, karkasinių-modulinių gyvenamųjų namų tematika. Apžvelgta medinių konstrukcijų istorija, paklausa ir plėtros planai Europos šalyse. Pristatomas medienos panaudojimas šiuolaikinėse statybinėse konstrukcijose. Šiame darbe aprašyta mokslininkų atliktų tyrimų eiga bei jų gauti rezultatai. Pateikti skydinių-karkasinių namų išorinių atitvarinių konstrukcijų pavyzdžiai bei skydinių-karkasinių ir modulinių namų kiekių ir statinė konstrukcijos analizė. Tarpusavyje palygintos dvi dažniausiai medinių konstrukcijų projektavimui naudojamos programos.

Antrojoje dalyje aprašoma tyrimo metodika bei taikomi daugiakriteriai vertinimo metodai ir jų taikymas statybos srityje. Sukurta daugiakriterio vertinimo etapų schema, kuria remiantis atliktas šis darbas. Paruošta diagrama, kuri grafiškai atvaizduoja, kiek straipsnių 2015-2020 metų laikotarpyje apie energijos beveik nevartojančius medinio karkaso gyvenamuosius namus galima rasti „Google Scholar“ duomenų bazėje. Pagrindinis tyrimo duomenų šaltinis – ekspertų apklausa, kurios gautais rezultatais remtasi renkantis tinkamiausią išorės sienos apšiltinimo medžiagos alternatyvą. Ekspertų apklausos vertinimui atlikti buvo sukurta anketa, kurioje statybos specialistai išreiškė savo nuomonę apie vienbučio karkasinio gyvenamojo namo išorės sienų apšiltinimo medžiagos pasirinkimo kriterijų reikšmingumą. Šiam tyrimui atlikti pasirinkti penki kriterijai. Ekspertų nuomonė išreikšta įvertinant kiekvieną kriterijų balais.

Trečioje dalyje pateikiama tyrimo eiga, kurioje sudaroma vertinimo kriterijų sistema, atliekamas alternatyvų daugiakriteris vertinimas taikant COPRAS, TOPSIS ir ARAS metodus. Analizei pasirinktos penkios alternatyvos, kurios tarpusavyje vertintos pagal penkis rodiklius :

- sluoksnio rinkos kainą;
- degumo klasę,
- sluoksnio storį,
- sluoksnio šilumos laidumo koeficientą,
- ekologiškumą.

Alternatyvos vertintos pagal kiekvieną metodą atskirai. Gauti rezultatai palyginti tarpusavyje. Jais remiantis pateikti pasiūlymai ir išvados. Gauti rezultatai gali būti informacijos šaltinis projektuotojams, ieškantiems šiltinimo sluoksnio alternatyvos A⁺⁺ gyvenamo namo išorės sienos energiniam efektyvumui pasiekti, gyventojams, kurie planuoja statyti savo nuosavą būstą, bet neturi konkretaus sprendimo dėl apšiltinimo sluoksnio pasirinkimo ar įmonėms, kurios atlieka medinių-karkasinių vienbučių gyvenamųjų namų statybos projektus.

Zdanevičienė, Donata. Multi-criteria evaluation of external walls of net-zero energy wood-framed single-family home. Master's Final Degree Project / supervisor dr. Donatas Aviža; Kaunas University of Technology, Panevėžys Faculty of Technology and Business.

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

Key words: external walls, timber frame, net-zero-energy, timber constructions, multi-criteria evaluation.

Panevėžys, 2021, 70 p.

Summary

This paper presents a multicriteria analysis of the external walls of net-zero-energy single-family frame residential building. The main goal of the work is to investigate the most suitable alternative of the insulation layer, wooden-frame lighting of the outer wall of a low-energy detached house. Five insulation layer alternatives were selected. Quantitative and qualitative indicators were used for the study. Quantitative criteria are expressed in units of measurement and a scoring system has been applied to the qualitative criteria.

This work consists of three parts - analysis of scientific literature, research methodology and research part. The first part analyzes scientific articles and various studies conducted by scientists. The technology and prevalence of frame house construction in European countries is analyzed. The second part discusses the research methodology and the alternatives selected for the research. The third part describes the course of the research, the system of evaluation criteria, the evaluation of alternative multi-criteria using COPRAS, TOPSIS and ARAS methods.

The first part analyzes the requirements of Lithuania and foreign countries for almost energy-free residential buildings and their partitions. In the part of the analysis of scientific literature, 42 scientific articles on the topics of almost energy-free, panel-frame, frame-modular residential houses were analyzed. The history of wooden structures, demand and development plans in European countries are reviewed. The use of wood in modern building constructions is presented. This work describes the course of research carried out by scientists and the results obtained by them. Examples of external partition structures of panel-frame houses and an analysis of the quantities and static structure of panel-frame and modular houses are presented. The two most commonly used programs for the design of wooden structures were compared.

The second part describes the research methodology and the applied multi-criteria evaluation methods and their application in the field of construction. A scheme of multi-criteria evaluation stages has been developed, on the basis of which this work has been carried out. A diagram has been prepared, which graphically depicts how many articles in the period of 2015-2020 about almost energy-free wooden frame residential houses can be found in the Google Scholar database. The main source of research data is an expert survey, the results of which were used to select the most suitable alternative for the external wall insulation material. A questionnaire was developed for the evaluation of the expert survey, in which construction specialists expressed their opinion on the significance of the

selection criteria for the insulation material of the external walls of a one-bedroom frame house. Five criteria were selected for this study. Expert opinion is expressed by scoring each criterion.

The third part presents the research process, which creates a system of evaluation criteria, multi-criteria evaluation of alternatives using COPRAS, TOPSIS and ARAS methods. Five alternatives were selected for the analysis, which were evaluated according to five indicators:

- the market price of the layer;
- flammability class,
- layer thickness,
- thermal conductivity of the layer,
- environmental friendliness.

Alternatives were evaluated for each method separately. The obtained results were compared with each other. Based on them, suggestions and conclusions are presented. The obtained results can be a source of information for designers looking for an insulation layer alternative to A⁺⁺ to achieve energy efficiency of the exterior wall of a house, residents who plan to build their own home but do not have a specific decision on the insulation layer or companies that build wooden-frame single-family homes projects.

Paveikslų sąrašas

1 pav. Energinio naudingumo klasės	15
2 pav. Straipsnių skaičius „Beveik energijos nevirtojančių pastatų“ tema „ScienceDirect“ duomenų bazėje	16
3 pav. Modulinio namo montavimo eiga	18
4 pav. Išorės sienos pavyzdys	19
5 pav. Stogo su bitumine danga pavyzdys	20
6 pav. Pagrindiniai medinio karkaso konstrukcijos posistemiai	20
7 pav. Sienos surinkimo pavyzdys iš kelių sienų elementų.	21
8 pav. Medinių konstrukcijų principai	22
9 pav. Medžiagų naudojimas pagal masę daugiaaukščiuose mediniuose pastatuose	25
10 pav. Modulinio elemento struktūros modelis.....	27
11 pav. Pastato modulis ir konstrukcijos elementų normalinių įtempių žemėlapis	27
12 pav. Likę medinio karkaso skerspjūviai po šiltinimo sluoksnio degumo bandymo	28
13 pav. Skydinės–karkasinės išorės sienos, projektuotas SEMA programa.....	29
14 pav. Skydinis–karkasinis gyvenamasis namas , projektuotas SEMA programa.....	29
15 pav. Gyvenamasis namas projektuotas Autodesk Revit programa	30
16 pav. Medienos kiekių žiniaraštis gyvenamojo namo antro aukšto sienų	31
17 pav. Gyvenamojo namo antro aukšto skydų kvadratūros lentelė.....	31
18 pav. Daugiakriterio vertinimo etapai	32
19 pav. Straipsnių skaičius 2015-2020 metų laikotarpyje apie beveik energijos nevirtojančius gyvenamuosius namus.....	34
20 pav. Mokslo sritys, kuriose paskelbti straipsniai COPRAS metodo tematika	34
21 pav. Mineralinės vatos bandiniai.....	41
22 pav. Biri celiuliozinė vata	42
23 pav. Atvirų porų poliuretano putos	42
24 pav. Išorės sienos mazgas	43
25 pav. Mineralinė vata Isover PREMIUM 33	46
26 pav. Akmens vata Paroc Ultra (eXtra).....	46
27 pav. Biri celiuliozinė vata WERROWOOL	46
28 pav. Poliuretano plokštės FF-PIR ALI.....	47
29 pav. Atvirų porų poliuretano putos	47
30 pav. Kriterijaus reikšmingumo svoris, procentais.....	48
31 pav. Šiltinimo sluoksnio alternatyvų palyginimas pagal rinkos kainą.....	53
32 pav. Šiltinimo sluoksnio alternatyvų palyginimas pagal degumo klasę	54
33 pav. Šiltinimo sluoksnio alternatyvų palyginimas pagal sluoksnio storį.....	55
34 pav. Šiltinimo sluoksnio alternatyvų palyginimas pagal šilumos laidumo koeficientą	56
35 pav. Šiltinimo sluoksnio alternatyvų palyginimas pagal ekologiškumą	57

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Išorės sienos sudėtis	19
2 lentelė. Stogo su bitumine danga sudėtis	19
3 lentelė. Apkrovos veikimo trukmės klasės.....	23
4 lentelė. „Delphi“ tyrimo apklausos rezultatai	24
5 lentelė. Gyvenamųjų namų rinkos plėtra Švedijoje	25
6 lentelė. Projekto A ir B kiekybinės analizės rezultatai	26
7 lentelė. Tyrimui pasirinktos medžiagos ir bandymo trukmė.....	28
8 lentelė. Deklaruojamos atvirų porų poliuretano putų eksploatacinės savybės.....	42
9 lentelė. Karkasinės sienos apšiltinimo medžiagų alternatyvos	44
10 lentelė. Alternatyvos vertinimo rodikliai	44
11 lentelė. Ekspertų apklausos duomenys.....	45
12 lentelė. Kriterijaus reikšmingumo svoris, procentinė išraiška	47
13 lentelė. Kriterijaus reikšmingumo svoris, procentinė išraiška	50
14 lentelė. Išorės sienos šiltinimo alternatyvų pradinė sprendimo priėmimo matrica.....	52
15 lentelė. Apšiltinimo medžiagų deklaruojamų degumo klasių balų sistema:.....	54
16 lentelė. Medienos kiekis, tenkantis 1 m ² išorės sienos, pagal pasirinktą alternatyvą	55
17 lentelė. Rezultatai, renkant alternatyvą pagal daugiakriterį vertinimo metodą COPRAS	58
18 lentelė. Rezultatai, renkant alternatyvą pagal daugiakriterį vertinimo metodą ARAS	58
19 lentelė. Rezultatai, renkant alternatyvą pagal daugiakriterį vertinimo metodą TOPSIS	58

Turinys

Lentelių sąrašas	10
Santrumpos	12
Įvadas.....	13
1. Literatūros analizė.....	15
1.1. Reikalavimai beveik energijos nevirtojantiems gyvenamiesiems pastatams ir jų atitvaroms Lietuvoje.....	15
1.2. Beveik energijos nevirtojantys pastatai	15
1.3. Moduliniai-karkasiniai namai ir jų statybos technologijos	17
1.4. Skydiniai-karkasiniai namai ir jų statybos technologijos.....	18
1.5. Medienos naudojimas pastatų konstrukcijose	22
1.6. Skydinių-karkasinių ir moduliinių namų kiekių analizė.....	26
1.7. Skydinių-karkasinių ir moduliinių namų statinė konstrukcijos analizė.....	27
1.8. Šiltinimo sluoksnių alternatyvos mediniam karkasui.....	27
1.9. Skydinių-karkasinių išorės sienų projektavimo programos	28
1.10. Medžiagų kiekių žiniaraščių kūrimas naudojant SEMA programą.....	31
2. Tyrimo metodika	32
2.1. Daugiakriteriai vertinimo metodai	32
2.2. Daugiakriterių vertinimo metodų taikymas statybos srityje.....	33
2.3. Daugiakriteris vertinimo metodas COPRAS.....	33
2.4. Daugiakriteris vertinimo metodas TOPSIS	36
2.5. Daugiakriteris vertinimo metodas ARAS.....	38
3. Tiriamaoji dalis.....	41
3.1. Tyrime analizuojamos apšiltinimo medžiagos	41
3.2. Alternatyvų pasirinkimas.....	43
3.3. Kriterijų reikšmingumo nustatymas	44
3.4. Ekspertų įverčių suderinamumas.....	48
3.5. Ekspertų nuomonių suderinamumo tyrimas	50
3.6. Pagrindiniai uždavinio duomenys	52
3.7. Šiltinimo sluoksnio alternatyvų analizė.....	53
3.8. Rezultatai, renkant alternatyvas pagal daugiakriterius vertinimo metodus.....	57
Išvados	59
Literatūros sąrašas	60
Priedai.....	64
1 priedas. Ekspertų nuomonių apklausa	64
2 priedas. Pranešimas konferencijoje „Technologijų ir verslo aktualijos“	65

Santrumpos

COPRAS – (angl. COmplex PROportional ASsessment) - kompleksinio proporcingumo vertinimo metodas;

TOPSIS – (angl. Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) – artumo idealiajam taškui metodas;

ARAS – (angl. Additive Ratio Assessment) - suminis santykių įvertinimo metodas;

MCDM (angl. MultipleCriteria Decision-Making) - daugiakriterinių sprendimų priėmimo metodas.

NZEB (angl. Nearly zero-energy buildings) – energijos beveik nevartojantys pastatai

LR – Lietuvos Respublika

Įvadas

Pastatų energijos vartojimo efektyvumo gerinimas yra vienas iš pagrindinių iššūkių, su kuriais susiduria Europa. Vienas iš būdų gyventi energetiškai taupiai ir suvartoti mažesnius CO₂ kiekius – statyti energetiškai efektyvius gyvenamuosius namus. Greta ekonominių iššūkių yra ne mažiau svarbių veiksnių, trukdančių atnaujinti esamą gyvenamųjų pastatų būklę ir vystyti energijos beveik nevirtojančių pastatų statybos plėtrą. Pastaruoju metu dažnai analizuojama esama situacija ir pateikiama apžvalga apie energijos beveik nevirtojančių pastatų ateities perspektyvas Europoje. Mediniai karkasiniai namai rinkoje vertinami dėl savo geros izoliacijos, nes visos konstrukcijoms naudojamos medžiagos yra sertifikuotos. A⁺⁺ gyvenamieji pastatai išsiskiria dideliu energijos efektyvumu. Pagal šiuo metu galiojančius ir keliamus reikalavimus, A⁺⁺ klasės gyvenamiesiems pastatams atitvarų šilumos perdavimo koeficientas turi būti, ne didesnis nei 0,11 W/(m² K). Kad pasiekti tokią šilumos perdavimo koeficiento reikšmę medinei karkasinei išorės sienai, turime ją apšiltinti tinkamo storio šilumos izoliacine medžiaga. Šilumos izoliacinės medžiagos reikalingo sluoksnio storis priklauso nuo šios medžiagos šilumos laidumo koeficiento. Norint įvertinti išorinių sienų karkasą užpildančias medžiagas, reikia pasirinkti kiekybinius ir kokybinius vertinimo rodiklius, pagal kuriuos būtų galima palyginti alternatyvas tarpusavyje. Šiam tikslui atlikti yra taikomi daugiakriteriniai vertinimo metodai, kurių pagalba nustatomas kiekvieno rodiklio reikšmingumas.

Darbo objektas - vienodos sudėties medinės karkasinės išorės sienos su skirtingomis apšiltinimo medžiagomis.

Darbo tikslas - atlikti energijos beveik nevirtojančio vienbučio karkasinio gyvenamojo namo išorės sienų daugiakriterinį vertinimą.

Darbo uždaviniai:

1. Apžvalginėje dalyje išanalizuoti Lietuvos ir užsienio reikalavimus energijos beveik nevirtojantiems gyvenamiesiems pastatams ir jų atitvaroms.
2. Atlikti mokslinės literatūros, susijusios su energijos beveik nevirtojančiais gyvenamaisiais pastatais, analizę.
3. Metodologinėje dalyje pateikti daugiakriterių vertinimo metodų klasifikaciją bei COPRAS, TOPSIS ir ARAS metodų vertinimo algoritmus.
4. Išanalizuoti medinių-karkasinių namų statybos technologijas ir karkaso šiltinimo medžiagų alternatyvas.
5. Tiriamojoje dalyje pateikti energijos beveik nevirtojančio vienbučio karkasinio gyvenamojo namo išorės sienų apšiltinimo alternatyvas bei parinkti racionaliausią variantą COPRAS, TOPSIS ir ARAS metodais. Nustatyti alternatyvų prioritetų eilutę, atsižvelgiant į spendimų matricos vertinamuosius rodiklius (sluoksnio rinkos kainą, degumo klasę, sluoksnio storį, sluoksnio šilumos laidumo koeficientą, ekologiškumą).

Praktinė darbo reikšmė. Atlikus tyrimą, kuriame analizuotos penkios alternatyvos, nustatoma efektyviausia išorės sienos apšiltinimo medžiaga, kuria gali būti apšiltinamas energiška efektyvus vienbutis gyvenamasis namas. Gauti rezultatai gali būti informacijos šaltinis projektuotojams,

gyventojams, kurie planuoja statyti savo nuosavą būstą, ar įmonėms, kurios atlieka medinių-karkasinių vienbučių gyvenamųjų namų statybos projektus.

Darbe taikyti metodai: mokslinės literatūros analizė, ekspertų anketinė apklausa ir rezultatų vertinimas COPRAS, TOPSIS, ARAS daugiakriteriais analizės metodais.

Darbo struktūra. Darbą sudaro trys dalys. Pirmoje dalyje analizuojami moksliniai straipsniai ir įvairūs mokslininkų atlikti tyrimai. Analizuojama karkasinių namų statybos technologija bei paplitimas Europos šalyse. Antroje dalyje aptariama tyrimo metodika bei tyrimui atrinktos alternatyvos. Trečioje dalyje aprašoma tyrimo eiga, sudaroma vertinimo kriterijų sistema, atliekamas alternatyvų daugiakriteris vertinimas taikant COPRAS, TOPSIS ir ARAS metodus.

Konferencijose skaityti pranešimai: Zdanevičienė, Donata. Medinių karkasinių išorės sienų apšiltinimo medžiagų daugiakriteris vertinimas. Studentų mokslinių darbų konferencija „Technologijų ir verslo aktualijos“. Panevėžys: KTU Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas 2020 m. balandžio 24 d. (žr. 2 priedą).

1. Literatūros analizė

1.1. Reikalavimai beveik energijos nevirtojantiems gyvenamiesiems pastatams ir jų atitvaroms Lietuvoje

Pagal šiuo metu Lietuvoje galiojančius norminius reikalavimus bei statybos techninio reglamento STR 2.01.02:2016 „Pastatų energinio naudingumo projektavimas ir sertifikavimas“ nuostatas pastatai klasifikuojami į 9 energinio naudingumo klases (žr. 1 pav.): A++, A+, A, B, C, D, E, F, G (G klasė – neefektyvūs, daug energijos suvartojantys pastatai) [1]. Tradiciniai naujos statybos ir modernizuojami pastatai Lietuvoje statomi bei projektuojami pagal statybos techninio reglamento STR 2.01.02:2016 nuostatas, o tai reiškia, kad dažniausiai pasiekiami tik minimalūs techniniai reikalavimai, tačiau neatsižvelgiama į atitvarų gyvavimo ciklą, globalias sąnaudas, optimalią tokio sprendinio kainą.

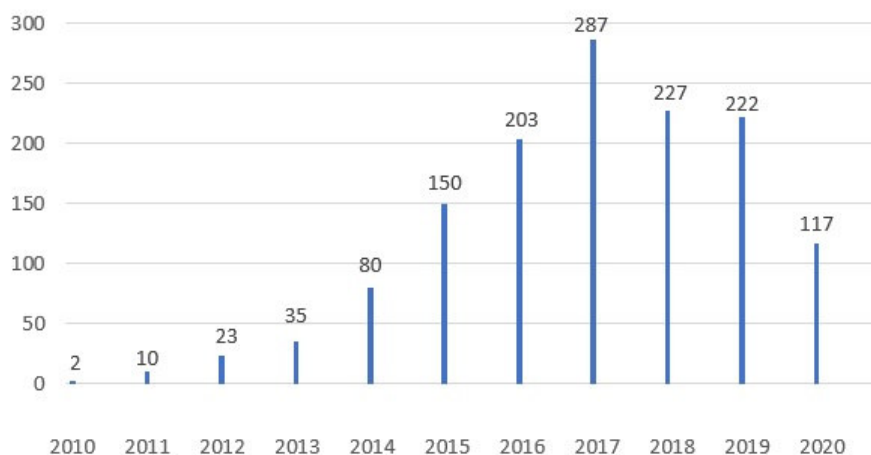


1 pav. Energinio naudingumo klasės [1]

R.Mikučionienė ir V.Žėkas [2] savo moksliniame tyrime teigia, kad energijos vartojimas nulinės energijos pastatuose yra paprastai padengiamas atsinaujinančiosios energijos gamyba. Pagrindiniai atsinaujinančiosios energijos šaltiniai pastatuose yra saulės energija, geoterminė energija ir bioenergija. Veiksmingas ir pagrįstas šių atsinaujinančiosios energijos šaltinių vartojimas yra galutinis nulinės energijos pastatų projektavimo etapas. Taikant modeliavimo ir optimizavimo priemones, įvertinamos skirtingos pastato aprūpinimo energija alternatyvos bei nustatoma optimali alternatyva atsižvelgiant į pasirinktus vertinimo rodiklius.

1.2. Beveik energijos nevirtojantys pastatai

Pastatų energijos vartojimo efektyvumo gerinimas yra vienas iš pagrindinių iššūkių, su kuriais susiduria Europa. Energijos efektyvumas pastatuose yra svarbiausias rodiklis regioninės, nacionalinės ir energetikos politikos tikslas, tarptautiniu lygiu, dėl globalinio atšilimo spartos bei iškastinio kuro išekvojimo [3]. Per praėjusį dešimtmetį galime pastebėti, kaip išaugo straipsnių skaičius šia tematika (žr. 2 pav.).



2 pav. Straipsnių skaičius „Beveik energijos nevirtojančių pastatų“ tema „ScienceDirect“ duomenų bazėje [sukurta autoriaus]

Pirmieji beveik energijos nevirtojančių pastatų apibrėžimus 2006 m. oficialiai pasiūlė Nacionalinės atsinaujinančios energijos mokslininkų laboratorija. Buvo pasiūlyti keturi, beveik energijos nenaudojančių pastatų tipai [4]:

1. grynoji nulinio vietos energija,
2. grynosios nulinės energijos šaltinis;
3. grynosios nulinės energijos sąnaudos;
4. grynosios nulinės energijos emisijos.

Tai tapo įprastu JAV naudojamų apibrėžimų rinkiniu. NZEB galima pasiekti trimis etapais [5]:

1. mažinant pastatų energijos sąnaudas pasyvaus dizaino strategijomis;
2. naudoti energiją taupančią įrangą, prietaisus ir pastatų sistemas;
3. generuoti energiją vietoje naudojant atsinaujinančius energijos išteklius.

Atsižvelgiant į natūralių žemės energijos išteklių išekvojimą ir aplinkos taršos augimą, siekiama sumažinti energijos poreikius tuose sektoriuose, kuriuos nustatyti aukščiausi energijos vartojimo efektyvumo rodikliai. Europos Sąjungoje gyvenamųjų namų statybos sektorius atsakingas už apytiksliai 25% galutinio energijos suvartojimo. Vis dėlto daugiausia energijos sunaudojama ne statybos proceso metu, o pastatų gyvavimo laikotarpiu [5]. Vienas iš būdų gyventi energetiškai taupiai ir suvartoti mažesnius CO₂ kiekius – statyti energetiškai efektyvius gyvenamuosius namus. Maksimalus energijos taupymas sumažina šalies ekonomikos priklausomybę nuo kitų šalių, tiekiančių natūralius gamtinės energijos išteklius [6].

Statybos sektoriui perėjus prie energetiškai efektyvių namų statybos būtų galima sumažinti pastatų energijos sąnaudas ir CO₂ išmetimą į mus supančią aplinką. Pagal pastato išorės sienų konstrukciją nustatomas energijos kiekis, reikalingas pastato šildymui ir vėsinimui, todėl ją reikia optimizuoti, kad šildymo ir vėsinimo išlaidos būtų kuo mažesnės [7]. Pagrindiniai energijos vartojimo pastatuose veiksniai yra namų ūkių skaičius, kiekviename namų ūkyje gyvenančių asmenų skaičius, vienam asmeniui tenkantis grindų plotas, specifinis energijos suvartojimas (žr. 1.1 ir 1.2 lygtis), galimybė naudotis šiuolaikinėmis energetikos paslaugomis, energetikos paslaugų, pastatų energinio naudingumo ir naudojamų energetikos technologijų bei įrangos pokyčiai :

$$E_{resid}[kWh] = h \cdot \frac{p}{h} \cdot \frac{A}{p} \cdot \frac{E}{A} \quad (1.1)$$

$$E_{com}[kWh] = BVP \cdot \frac{A}{BVP} \cdot \frac{E}{A}; \quad (1.2)$$

čia: E_{resid} – energijos suvartojimas gyvenamųjų pastatų šildymui ir vėsinimui, h – namų ūkių skaičius, (p/h) – kiekviename namų ūkyje gyvenančių asmenų skaičius, dar vadinamas namų ūkio dydžiu, (A/p) – grindų plotas (m^2), tenkantis vienam gyventojui, (E/A) yra energijos kiekis (kWh), sunaudotas, 1 m^2 šildyti arba vėsinti, dar vadinamas specifinėmis energijos sąnaudomis; E_{com} – energija, sunaudota komercinių pastatų šildymui ir vėsinimui, BVP – bendrasis vidaus produktas, (A/BVP) – grindų plotas tenkantis BVP [8].

Daugumoje šalių pastatų energinis naudingumas apibrėžiamas kaip viso pastato (pirminio) energijos naudojimas (šildymas, vėsinimas, vėdinimas, karštas vanduo, apšvietimas, pagalbinės ŠVOK, prietaisai). Šiame tyrime [9] analizuojama, kokie šilumos nuostolių reikalavimai taikomi pastato atitvaroms, kad jos atitiktų metinius tikslus: nZEB, t.y. nacionalinė beveik nulinės energijos apibrėžtis; gilus energijos atnaujinimas 80% sumažinus pirminę energiją; ZEB, t.y. grynas nulinės energijos pastatas = metinis pirminės energijos suvartojimas = 0 kWh / (m^2). Patalpų klimatas ir energijos skaičiavimai buvo atlikti remiantis nacionalinėmis energijos skaičiavimo metodikomis šešiose šalyse:

- Danijoje;
- Estijoje;
- Latvijoje;
- Čekijoje;
- Portugalijoje;
- Nyderlanduose.

Kiekvienoje šalyje reikalavimai pastato atitvarų šilumos nuostoliams skiriasi priklausomai nuo patalpų klimato ir energinio naudingumo, lauko klimato, atsinaujinančios energijos prieinamumo ir pastato tipologijos.

Vidutinis metinis visų tipų pastatų energijos suvartojimas Europos Sąjungoje buvo maždaug 180 kWh / m^2 . Konkretūs šalių skaičiai skiriasi nuo 55 kWh/ m^2 Maltoje ir 70 kWh/ m^2 Portugalijoje ar Kipre iki 300 kWh/ m^2 Rumunijoje (arba 285 kWh/ m^2 Latvija ir Estija), o tai yra žymiai daugiau nei ES vidurkis. Tačiau net ir šalims, kuriose vyrauja panašus klimatas, yra didelių neatitikimų (pvz., 200 kWh/ m^2 Švedijoje, kuris yra 18% mažesnis nei Suomijoje). 2015 m. Vokietijoje buvo apskaičiuota, kad vidutinis gyvenamosios energijos suvartojimas yra 136 kWh/ m^2 . Graikijoje, analizuotų gyvenamųjų ir negyvenamųjų pastatų vidutinis metinis energijos suvartojimas svyravo nuo 108 iki 189 kWh/ m^2 gyvenamuosiuose namuose ir nuo 167 iki 371 kWh/ m^2 negyvenamuosiuose pastatuose [10].

1.3. Moduliniai-karkasiniai namai ir jų statybos technologijos

Moduliniai pastatai ir namai yra sudaryti iš kelių segmentų, vadinamų moduliais. Modulio segmentai pristatomi į numatytą naudojimo vietą. Montavimui reikalingas kranas, kuris modulį uždeda ant pastato pamatų ir sujungia taip, kad būtų sukurtas vientisas pastatas (žr. 3 pav.). Modulių segmentų jungimas gali būti labai įvairus. Jungimas priklauso nuo projekto specifikos. Moduliniai namai neturi projektinių ašių ar rėmo. Dėl šių savybių, jie gali būti lengvai transportuojami.

Modulinių namų gamyba klesti šalyse, kuriose kvalifikuota darbo jėga yra brangi, aukštos žemės sklypų kainos ir trumpi statybai palankūs sezonai. Šie pagrindiniai veiksniai egzistuoja Škotijoje ir Švedijoje, kur didžioji būsto dalis gaminama gamyklose. Tam, kad išsiaiškinti, ar modulinė statyba turi daugiau teigiamų pusių nei neigiamų, buvo atliktas modulinės statybos technologijos palyginimas su tradicine statyba. Šios apklausos pagrindiniai tiksliai, buvo išsiaiškinti ekspertų nuomonę apie modulinę statybą, novatorišką statybos būdą bei pranašumus ir trūkumus, lyginant su tradiciniu statybos metodu. Apklausos rezultatai parodė, kad modulinės konstrukcijos turi daugiau privalumų nei trūkumų, lyginant su tradiciniu statybos metodu [11].

Švedijoje gyvenamieji pastatai užima mažą dalį statybos rinkos, tai sudaro mažiau nei 30 % visų naujų pastatų. Surenkamieji būstai buvo labiau pritaikyti kvartaluose. Iki šiol individualus būstas dominavo tarp naujai statomų būstų Vokietijoje. Svarbiausi kriterijai, parodantys aiškų modulinės statybos technologijos pranašumą, yra statybos trukmė, atliktų darbų kokybė ir darbų sauga. Lietuvos rinkoje pagrindinės įmonės gaminančios modulinius namus yra UAB „Scandi House“, UAB „Ryterna“, UAB „Kagesa“, UAB „Wilbergs Group“ [12]. Projektuojant modulinius namus, remiamasi tokiais pačiais statybos standartais, kurie taikomi ir įprastos statybos namams. To pasekoje, modulinės statybos technologijos namai yra tokios pat kokybės kaip ir vietoje pastatyti namai. Metams bėgant, moduliniai pastatai buvo suprojektuoti kruopščiai ir pastatyti taip, kad neįmanoma nustatyti skirtumo tarp modulinio ir įprasto pastato [13].



3 pav. Modulinio namo montavimo eiga [13]

1.4. Skydiniai karkasiniai namai ir jų statybos technologijos

Karkasinės statybų technologijos istorija siekia tolimiausią praeitį: pradėję statyti būstą savo rankomis, žmonės ėmė rėsti ne ką kita, o karkasinius statinius [14]. Skydinio-karkasinio tipo namų gamyba Europoje pradėjo vystytis prieš 50 metų. Būtent tokiuose namuose gyvena dauguma Vokietijos, Norvegijos, Suomijos ir kitų šalių gyventojų. Todėl tokio tipo namus kartais dar vadina XXI amžiaus namais. Per paskutinius dešimtmečius šių namų gamybos technologija pasikeitė į gerąją pusę dėl naudojamų įrengimų bei naujų statybinių medžiagų [15].

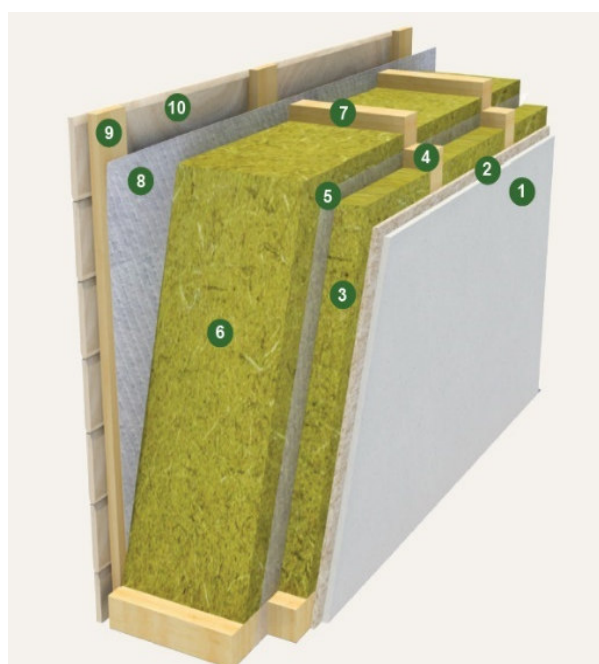
Namo konstrukcija susideda iš sluoksnių, kurių pagrindą sudaro medinis karkasas iš laukinės ir vidinės pusių apkaltas OSB (orientuotų skiedrų) plokšte. Skydo vidinė dalis yra užpildyta akmens vata, tai leidžia pasiekti reikiamą šiluminę varžą. Tokia konstrukcija garantuoja stabilias šiluminės

varžos charakteristikas bet kokių metų laiku. Namai, pastatyti pagal šias technologijas, ekologiški ir turi aukštas šilumos ir energijos taupymo charakteristikas bei skirti pastoviam gyvenimui [16].

Skydinio-karkasinio namo išorinių atitvarų pavyzdžiai (žr. 4 ir 5 pav.):

1 lentelė. Išorės sienos sudėtis (šiluminė varža (R) - nuo 6.1 m²K/W iki 9.1 m²K/W) [17]

Nr.	Sluoksnio pavadinimas
1.	Gipso kartono plokštė
2.	Medžio drožlių plokštė
3.	Šilumos/garso izoliacija
4.	Obliuota mediena papildomam karkasui
5.	Garų izoliacija
6.	Šilumos/garso izoliacija
7.	Obliuota mediena karkasui
8.	Difuzinė plėvelė
9.	Obliuotos medienos tašeliai (vėdinamas oro tarpas)
10.	Medinė dailylentė



4 pav. Išorės sienos pavyzdys [17]

2 lentelė. Stogo su bitumine danga sudėtis (šiluminė varža (R) - nuo 6.6 m²K/W iki 12.2 m²K/W)[18]

Nr.	Sluoksnio pavadinimas
1.	Bituminė stogo danga
2.	Dangos paklotas
3.	Medžio drožlių plokštė
4.	Obliuotos medienos tašeliai (vėdinamas oro tarpas)

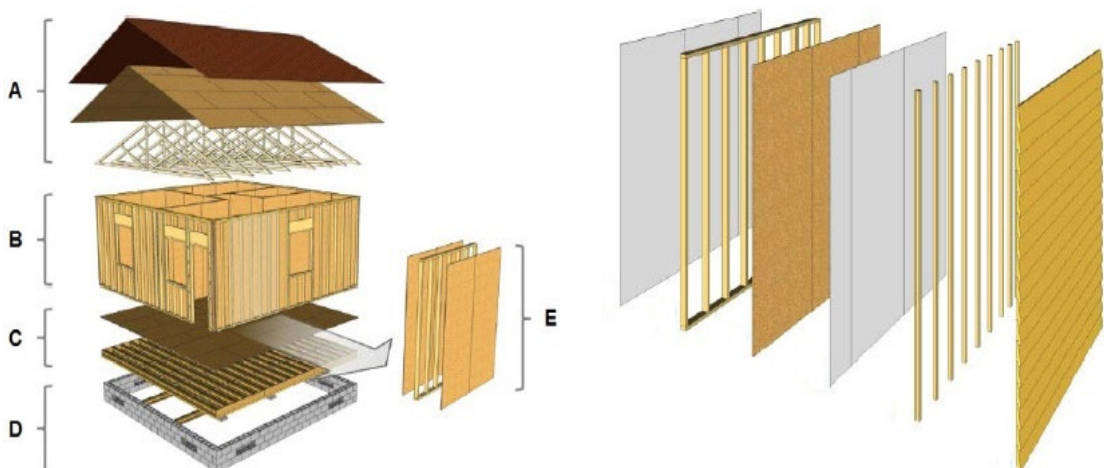
Nr.	Sluoksnių pavadinimas
5.	Difuzinė plėvelė
6.	Obliuotos medienos gegnės
7.	Šilumos/garso izoliacija
8.	Garo izoliacija
9.	Obliuota mediena karkasui
10.	Šilumos/garso izoliacija
11.	Gipso kartono plokštė



5 pav. Stogo su bitumine danga pavyzdys [18]

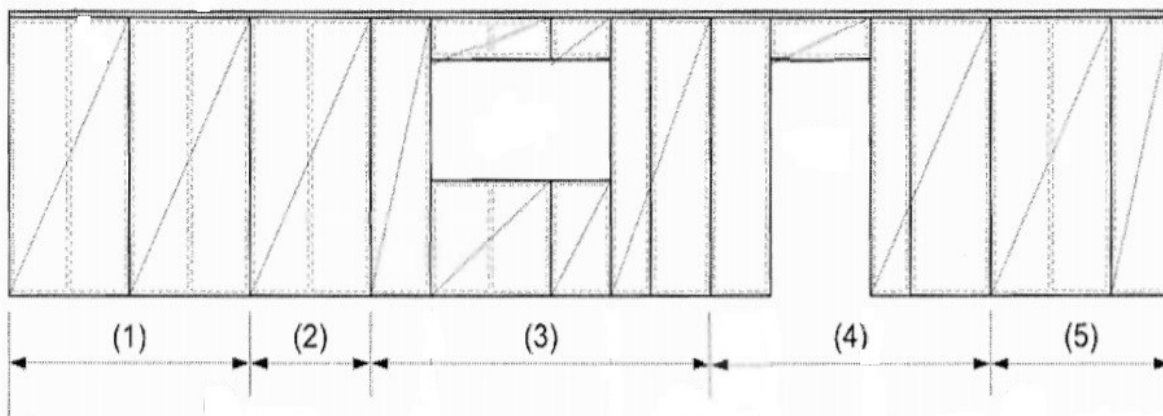
Skydinių-karkasinių sienų sandara gali būti labai įvairi, nepriklausanti nuo konstruktyvo. Mokslininkai V. A. De Araujo ir kiti teigia, kad šių namų konstruktyvas yra tarsi kai kurių medžiagų „sumuštinis“ [19].

Pagrindiniai įprastų medinio karkaso namų sluoksniai pavaizduoti 6 paveiksle.



6 pav. Pagrindiniai medinio karkaso konstrukcijos posistemiai (kairėje): A – stogo konstruktyvas; B – išorės sienos; C – grindys (perdanga); D – pamatas; E – vidinės sienos. Dešinėje – išorės sienos sluoksniai [19]

Skydinių-karkasinių ar modulinį namų kraštinę išorės sieną sudaro viena ar kelios tarpusavyje sujungtos sienos (žr. 7 pav.), kurių medinis karkasas yra sujungiamas drėgmei atsparia medienos drožlių plokšte ar kita lakštine medžiaga [20].



7 pav. Sienos surinkimo pavyzdys iš kelių sienų elementų [20] : 1) siena Nr. 1; 2) siena Nr. 2; 3) siena Nr. 3; 4) siena Nr. 4; 5) siena Nr. 5.

Norėdami, kad plokštė prisidėtų prie sienos tvirtumo plokštumoje, jos plotis turėtų būti bent skydo aukščio, padalyto iš 4, t.y. jeigu sienos aukštis yra 2400mm, plokštės plotis turėtų būti mažiausiai 600mm, kitu atveju plokštė nesuteiks sienos karkasui stabilumo. Lakštinių medžiagų pritvirtinimas prie medinio karkaso turėtų būti atliktas kabėmis arba medsraigčiais, o tvirtinimo detalės turėtų būti vienodai išdėstytos lakšto perimetru. Kai skydai sujungiami į vieną elementą [20] :

- atskirų skydų viršus turėtų būti sujungtas ištisine lenta ar kita tvirtinimo medžiaga;
- turėtų būti įvertintas reikalingas vertikalus dviejų skydų jungties stipris, kurio projektinis stipris ne mažesnis kaip 2,5 kN / m;
- skydai, sujungti į sieną, turėtų būti atsparūs apvirtimui.

Pagrindiniai skydinių-karkasinių namų privalumai:

- greita statyba – skydai gaminami fabrike, montavimo trukmė iki 2 savaičių, oro sąlygos neturi įtakos montavimui, dėl trumpos statybos trukmės sumažėja darbo jėgos poreikio laikas;
- patraukli išvaizda – nėra apribojimų patalpų matmenims, fasado išvaizdos sprendimams;
- paprasta priežiūra – fasado apdailos medžiagos nereikalauja papildomos priežiūros;
- ekologiškumas – platus ekologiškų statybinių medžiagų pasirinkimas sudaro visas galimybes sukurti ekologišką aplinką gyvenimui;
- sandarumas montavimo metu sandariai suklijuojamos visos garus ir vėją izoliuojančių plėvelių siūlės aplink langus ir duris, bei skydų sujungimo vietose;
- apšiltinimas – skydų karkasui naudojama mediena ir šiltinimo medžiagos pasižymi geromis šilumos izoliacinėmis savybėmis;
- priešgaisrinės savybės – apkrovas laikančios medinės konstrukcijos yra impregnuojamos priešgaisrinės medžiagos, todėl pagaminti sienų skydai atitinka visus LR priešgaisrinės saugos keliamus reikalavimus.

Pagrindiniai skydinių-karkasinių namų trūkumai:

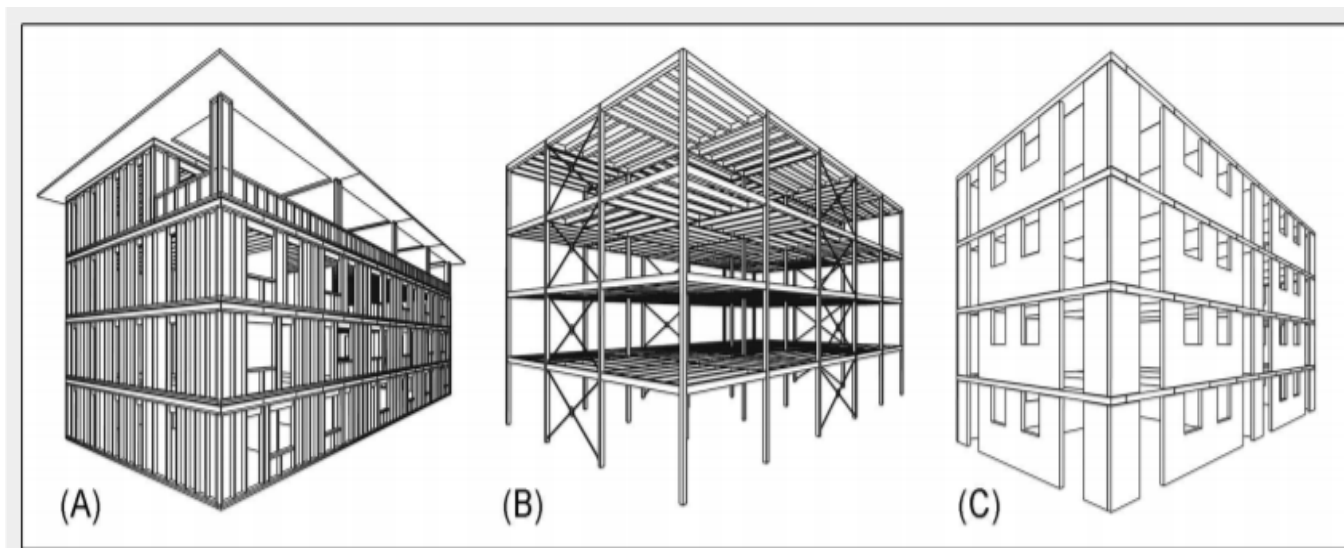
- ribotas atstumas tarp konstrukcijų tarpatriamių;
- reikalinga apsauga nuo graužikų;

- montavimo darbų metu būtinas ypatingas dėmesys elementų apsaugai nuo drėgmės.

1.5. Medienos naudojimas pastatų konstrukcijose

Medinių konstrukcijų statybomis žmonija užsiima nuo neatmenamų laikų. Iš tiesų, viduramžiais visi miestai ir miesteliai buvo pastatyti iš šios gamtinės medžiagos. Tačiau dėl didelio gaisringumo Europos miestuose, imtasi priešgaisrinės apsaugos priemonių, įskaitant XIX amžiaus pabaigoje keliose Europos šalyse priimtus įstatymus - neskatinti arba uždrausti naudoti medines konstrukcijas daugiaaukščiuose pastatuose.

Dabartinis medinių konstrukcijų statybos renesansas prasidėjo Dešimtajame dešimtmetyje. Be to, sistemingas specializuotų gamybos metodų, taip pat skaitmeninio dizaino kūrimas ir gamybos technika, iškėlė medienos statybą į naują statybų lygį neišeikvojant išteklių. Medienos formų gausa (žr. 8 pav.) suteikia architektams plačias idėjų įgyvendinimo galimybes, taip pat skatina ieškoti naujų statybinių sprendimų daugiaaukščiams mediniams pastatams. Šis laikotarpis – tai ypatingas metas architektūrai ir statybos inžinerijai, kuomet galime palyginti, kaip buvo statoma praėjusiame amžiuje ir kokius statybinius sprendimus turėtume priimti ateityje [21].



8 pav. Medinių konstrukcijų principai: a) skydinė-karkasinė sistema; b) karkasinė sistema; c) CLT plokščių sistema [21]

Jungtinėje Karalystėje Antrojo pasaulinio karo metu išaugo greitai pastatomų būstų paklausa. Vyriausybė buvo priversta ieškoti netradicinių statybos metodų, nes pokario metu trūko tradicinių statybinių medžiagų ir taip pat buvo mažai, galinčių dirbti tokį darbą. Buvo pasirinktas sprendimas importuoti surenkamuosius karkasinius namus iš Švedijos. Šiai dienai, būtent pokario metu pastatyti pirmieji „švedų“ namai Jungtinėje Karalystėje tapo reikšminga paveldo vertybe. Mokslininkai pabrėžia, kad Švedijoje surenkamųjų pastatų statybos tendencijos prasidėjo jau 1927 metais. Siekiant sumažinti išlaidas, pastatų konstruktyvas buvo standartizuotos ir elementai buvo gaminami masiškai. Architektai buvo samdomi išspręsti iškilusius klausimus dėl miesto planavimo ir dėl architektūrinių sprendimų bendrumo [22].

Pagrindinės šiuolaikinių pastatų konstrukcijų medžiagos – betonai ir plienas. Rečiau pasato konstrukcijai parenkamas medinis karkasas. Medienos produktų naudojimas yra techniškai,

ekonomiškai ir ekologiškai perspektyvi alternatyva. Mediena dažniausiai naudojama mažaukščiuose gyvenamuosiuose pastatuose, rečiau - statant daugiaaukščius negyvenamuosius pastatus [23].

Mokslininkas Q. Hu teigia, kad vartotojų sąmonėje vis dar egzistuoja išankstinis nusistatymas dėl medinių namų trūkumų tokių kaip, termoizoliacinių savybių, ilgaamžiškumo bei pačių konstrukcijų stabilumo. Pagrindiniai kriterijai, dėl kurių vartotojai renkasi medinius karkasinius namus – ekologiškumas ir jaukumo pojūtis. Bene labiausiai vertinamas medinių karkasinių namų privalumas – trumpas statybos laikotarpis [24].

Skaičiuojant medines konstrukcijas apkrovų poveikiai yra priskiriami vienai iš 3 lentelėje nurodytų apkrovos veikimo trukmės klasių. Apkrovos veikimo trukmės klasės yra apibūdinamos kaip nuolatinės apkrovos veikimo pasekmė per nustatytą konstrukcijos būvio laiką. Kintamąją apkrovos veikimą atitinkanti klasė nustatoma įvertinant sąveiką tarp tipinio apkrovos kitimo laike ir medžiagos reologinių savybių [25].

3 lentelė. Apkrovos veikimo trukmės klasės [25]

Apkrovos veikimo trukmės klasė	Bendroji charakteristinė apkrovos trukmė	Apkrovos pavyzdžiai
Nuolatinė	daugiau nei 10 metų	savasis svoris
Ilgalaikė	nuo 6 mėnesių iki 10 metų	sandėliuojamasis krūvis
Vidutinės trukmės	nuo 1 savaitės iki 6 mėnesių	krūvis ant grindų, sniegas
Trumpalaikė	mažiau nei savaitė	sniegas, vėjas
Momentinė	-	vėjas ir atsitiktinės apkrovos

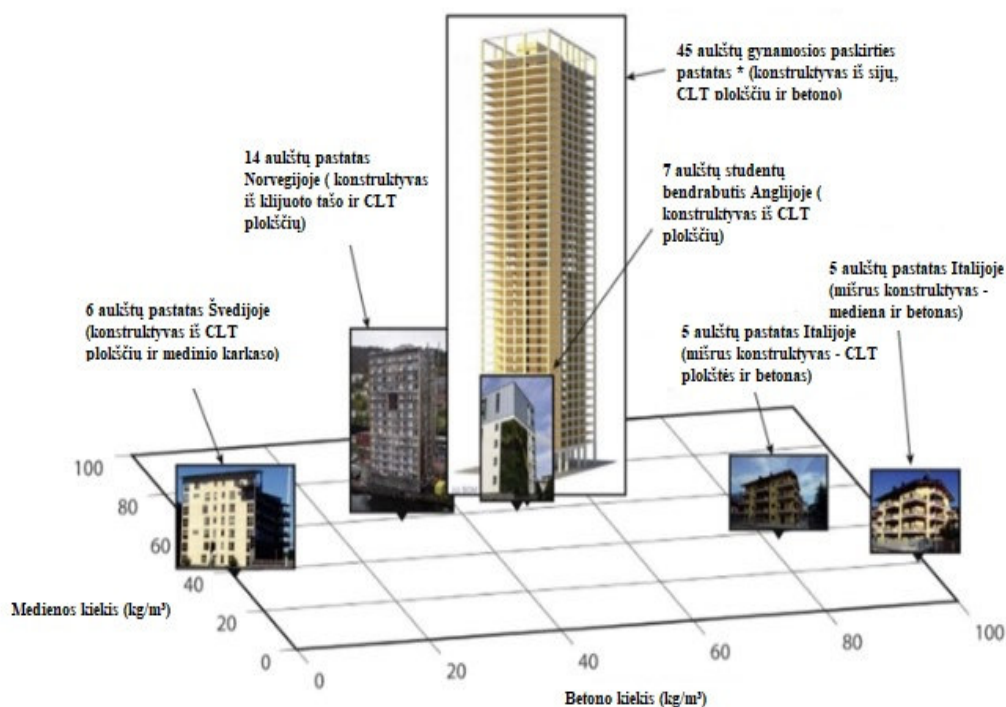
Mediena yra viena iš trijų konstrukcinių medžiagų, šiuo metu naudojama didelių konstrukcijų statybai kartu su plieniu ir sustiprintu betonu. Medienos stiprumas panašus į armuoto betono: kietmedis yra šiek tiek stipresnis, o spygliuočiai - šiek tiek silpnesni, tačiau mediena negali atitikti šių dienų aukšto stiprumo klasės betono. Mediena yra mažiau standi nei betonas, ir abi medžiagos yra daug mažiau standžios ir tvirtos nei plienas. Tačiau mediena pasižymi mažu tankiu, palyginti su šiomis kitomis įprastomis konstrukcinėmis medžiagomis [26].

Mokslininkai A. Toppinen ir kiti atliko tyrimą, pavadinimu „Delphi“. Šio tyrimo forma - internetinė apklausa. Apklausos rezultatai parodė, kad medinių konstrukcijų statyba įgaus tolesnį augimą link 2030 metų. Per šį laikotarpį išaugs tiek vartotojų paklausa tvariam gyvenimui, tiek poreikis gyventi mediniuose namuose, tai taps kaip šiuolaikinio gyvenimo būdas. Apklausoje dalyvavo statybos specialistai, kurių darbo patirtis statybos sektoriuje nuo 1 iki 36 metų, gyvenantys Suomijoje ir Švedijoje [27]. Apklausos rezultatai pateikti 4 lentelėje :

4 lentelė. „Delphi“ tyrimo apklausos rezultatai [27]

Tikimybės formuluotė :	Tikimybė, %:	
iki 2030 metų, vartotojų tvaraus gyvenimo poreikis taps žymiai stipresniu medinių statybų varikliu	Maža	0
	Vidutinė	24
	Didelė	76
Iki 2030 metų vartotojai medinių konstrukcijų statinius vertins kaip modernų statybos būdą	Maža	0
	Vidutinė	12
	Didelė	88
Iki 2030 metų didelio masto statinių projektuose pastatų gyvavimo ciklo sąnaudos turės žymiai didesnę įtaką sprendimų priėmimui nei pirkimo kaina	Maža	0
	Vidutinė	0
	Didelė	100
Iki 2030 m. Didelio masto medinės konstrukcijos, tokios kaip medinių daugiaaukščių pastatų projektai, taps svarbiausia medinių statybų sritimi	Maža	0
	Vidutinė	29
	Didelė	71
Iki 2030 m. tvari statyba būsto rinkoje taps "mada"	Maža	0
	Vidutinė	6
	Didelė	94
Medienų statybų ateitis - hibridiniai pastatai, kuriuose kartu naudojamos ir kitos medžiagos, tokios kaip betonai ir plienas, kurios bus naudojamos pagrindinėse, laikomosiose konstrukcijose	Maža	0
	Vidutinė	24
	Didelė	76
Medienos, kaip statybinės medžiagos, svarbą daugiausia lems jos poveikis aplinkai	Maža	41
	Vidutinė	24
	Didelė	35

Vienbalsiai manoma, kad iki 2030 metų didelio masto statinių projektuose pastatų gyvavimo ciklo sąnaudos turės žymiai didesnę įtaką sprendimų priėmimui nei pirkimo kaina. Taip pat specialistų nuomonės sutapo dėl tvarios statybos - net 94 % tikimybė skirta teiginiui, kad tvari statyba būsto rinkoje taps mada. Apklaustieji daugiausiai dvejonį turėjo dėl medienos paklausos augimo, dėl jos poveikis aplinkai. 88% tikimybę surinko teiginys, kad iki 2030 metų vartotojai medinių konstrukcijų statinius vertins kaip modernų statybos būdą.



9 pav. Medžiagų naudojimas pagal masę daugiaaukščiuose mediniuose pastatuose [27] : horizontalios ašys rodo sunaudotos medienos ar betono masę kiekvieno pastato 1m³. „*“ pažymėtas pastatas nebuvo pastatytas.

Švedijos gyvenamųjų namų rinką taip pat analizavo ir mokslininkas F. Lindblad [28]. Jo atlikto tyrimo tikslas – nustatyti priežastis, trukdančias medinių daugiabučių gyvenamųjų rinkos augimą Švedijos pramonėje. Svarbiausias tyrėjo uždavinys buvo rasti būdus, kaip mediniai daugiabučiai namai (žr. 9 pav.) galėtų pagerinti konkurencingumą, palyginti su nustatytais sprendimais ir padidinti savo užimamą rinkos dalį. Tyrimas buvo atliktas kartu su savivaldybių atstovais, statytojais, rangovais, architektais ir nekilnojamojo turto kompanijomis, teikiančiomis išvalgas apie naujas strategines galimybes statybų procese. Gyvenamųjų namų rinkos plėtros rezultatai pateikti 5 lentelėje :

5 lentelė. Gyvenamųjų namų rinkos plėtra Švedijoje [28]

Metai	Skaičius gyvenamųjų namų	Laikomoji konstrukcija				Medinių konstrukcijų dalis, %
		Medinė	Betoninė	Plieninė	Kita	
2007	16,310	1,190	15,675	356	89	7,3
2008	9,019	983	7,928	0	108	10,9
2009	6,961	859	6,005	27	70	12,3
2010	12,127	1,047	11,018	62	0	8,6
2011	13,398	882	12,258	129	129	6,6
2012	12,520	1,267	11,035	143	75	10,1
2013	16,951	1,711	14,917	293	30	10,1
2014	19,216	1,691	17,019	506	0	8,8
2015	26,727	2,322	23,916	489	0	8,7
2016	33,121	3,599	29,206	316	30	10,9

Remiantis gautais duomenimis, galime spręsti, kad medinis konstruktyvas gyvenamųjų namų rinkos plėtroje užima mažąją dalį visų tirtų konstrukcijų. Apklausti specialistai 2011 metams numatė tik 6,6 % medinių konstrukcijų kiekį. Didžiausio šios gamtinės medžiagos panaudojimo tikėtasi sulaukti 2008 ir 2016 metais.

1.6. Skydinių-karkasinių ir modulinų namų kiekių analizė

Mokslininkai D. Lopez ir T.M. Froese atliko tyrimą, kuriame pateikia išsamią skydinių ir modulinų kiekių analizę. Pagrindinis tikslas - nustatyti, kuris vienos šeimos gyvenamasis namas yra ekonomiškėnis [29].

Analizė atliekama vertinant du, panašių charakteristikų vienos šeimos namus, kurių vienas – skydinis-karkasinis, o kitas - modulinis.

Metodiką sudaro:

- kiekybinė analizė, kurioje lyginama jau užbaigtų projektų kaina už kvadratinį metrą.

6 lentelė. Projekto A ir B kiekybinės analizės rezultatai [29]

Tiriamąo projekto pavadinimas	Projektas A skydinis-karkasinis namas, eur/m ²	Projektas B modulinis namas, eur/m ²
Pagaminti elementai	66,85	68,01
Papildomos išlaidos, pagal užsakovo poreikį įrengiant vidų	4,30	5,20
Vidaus įrengimo darbai	26,52	11,11,
Išorės užbaigimo darbai	6,27	8,51
Iš viso :	103,94	92,83

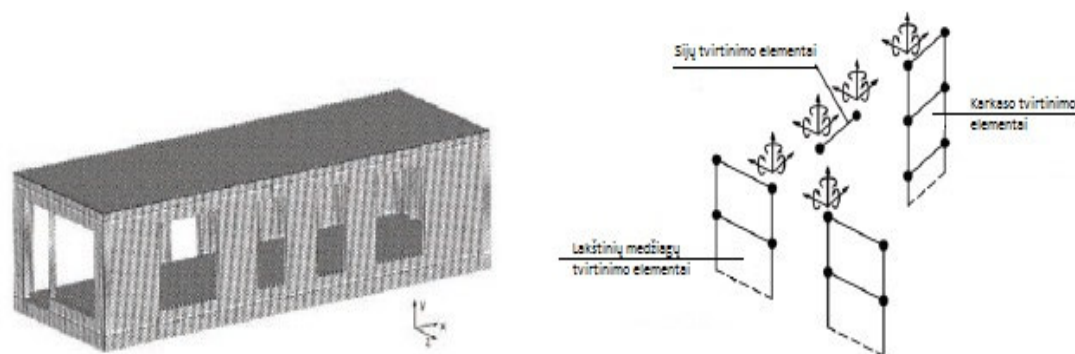
Lentelės [6] pirmąjį elementą „Pagaminti elementai“, skirtą A ir B projektui, sudaro skydų arba modulių, langų, durų, stogo, ŠVOK (šildymas, vėdinimas, oro kondicionavimas) įrangos, karšto vandens šildytuvo ir kitų elektrinių ir mechaninių įrenginių instaliacija, pristatymas ir montavimas. „Papildomos išlaidos, pagal užsakovo poreikį įrengiant vidų“ skiltyje įtraukta: geresnės kokybės durų ir langų, specialių prietaisų kaina (pvz., garų surinktuvas). Trečiajam elementui A projekte „Vidaus įrengimo darbai“ apima elektros instaliaciją ir vamzdyno išvedžiojimą bei prijungimą, vidaus patalpų pilną išbaigtumą; Projekte B - modulio prijungimą prie tinklų, transportavimo pažeidimų remontą, vidaus apdailą ir kitus generalinio rangovo darbus. Galiausiai punktas „Išorės užbaigimo darbai“ reiškia kitus darbus, atliktus objekte naudojant tradicinius statybos metodus. Projektui A tai apima betono, metalo ir medienos darbus, reikalingus konstrukcijų užbaigimui. Projekto B atveju tai yra priekinės verandos, kuri jau buvo įtraukta į projekto A architektūrą, montavimas.

Nustatyti tokie pagrindiniai skydinių namų privalumai:

- greita statyba;
- sandarumas;
- priešgaisrinės savybės.

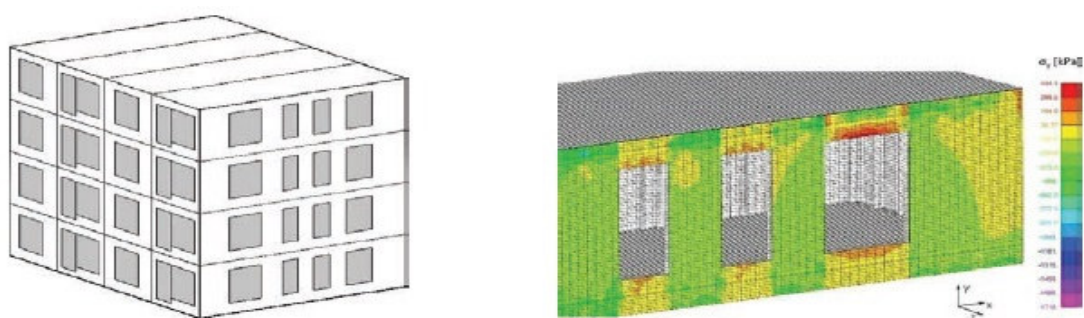
1.7. Skydinių-karkasinių ir modulinį namų statinė konstrukcijos analizė

Mokslininkai J. Malesza ir J. Miedzialovski ištyrė pramoniniu būdu pagamintų ir po to į statybvietyje pristatytų konstrukcinių elementų montavimą bei pateikė statinės analizės modelį, naudojamą analizuojant vidines jėgas konstruktyve. Skydų elementai buvo naudojami apibūdinant medinį konstruktyvą ir lakštines medžiagas, o sijos elementai buvo naudojami apibūdinant jungiamąsias tvirtinimo detales (žr. 10 pav.) [30].



10 pav. Modulio elemento struktūros modelis: kairėje skaitmeninis, dešinėje - tvirtinimo detalių modelis dešinėje [30]

Taip pat parengė vizualizaciją, kuri buvo naudojama analizuojant modulio, esančio daugiaaukščio pastato apatiniame aukšte, deformacijoms parodyti. Atliekant analizę buvo atsižvelgta į ilgą, dažniausiai ilgesnį nei 500km, elemento transportavimą bei pakrovimo ir iškrovimo metu atsirandančius įtempius. Gauti rezultatai parodyti normalinių įtempių žemėlapiu pavidalu (žr. 11 pav.).



11 pav. Pastato modulis (kairėje) ir konstrukcijos elementų normalinių įtempių žemėlapis (dešinėje) [30]

Didžiausios deformacijos matomos ties angomis, nes šiose vietose konstrukcijos siplniausios. Jų pažeidžiamumas transportavimo metu, dėl kėlimo darbų yra neišvengiamas.

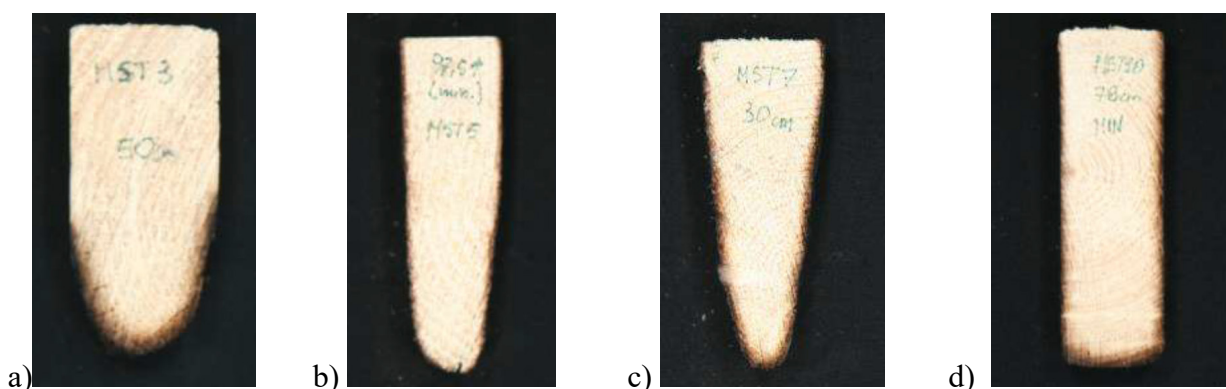
1.8. Šiltinimo sluoksnių alternatyvos mediniam karkasui

Mokslininkai M.Tiso ir A.Just [31] atliko tyrimą, kurio tikslas – nustatyti trukmę, per kurią sudega šiltinimo sluoksnis ir kiek šis procesas pažeidžia medinį karkasą. Bandymui atlikti buvo pasirinktos skirtingos šiltinimo medžiagos – akmens, stiklo, celiuliozės vata bei putų polistirolas. Visi elementai (7 lentelė) sukurti naudojant vienodo storio 45 mm karkasą ir taikant vienodą 60 minučių deginimo

trukmę. Medinio karkaso elementai buvo deginami horizontalioje padėtyje krosnyje, pagal dirbtinai sukurtas gaisro sąlygas. Visų skydų deginamoji pusė buvo apsukta ugniai atsparia gipso kartono plokšte. Bandymai buvo atlikti temperatūros diapazone nuo 20 ° C iki 1000 ° C, padidinant temperatūrą 10 K/min.

7 lentelė. Tyrimui pasirinktos medžiagos ir bandymo trukmė [31]

Karkaso šiltinimo sluoksnio rūšis	Apšiltinto karkaso storis, mm	Mėginio deginimo trukmė, min
Akmens vata	45	60
Stiklo vata	45	60
Celiuliozės vata	45	60
Polistireninis putplastis	45	60



12 pav. Likę medinio karkaso skerspjūviai po šiltinimo sluoksnio degumo bandymo: a) kai karkasas apšiltintas akmens vata; b) kai karkasas apšiltintas stiklo vata; c) kai karkasas apšiltintas celiuliozės vata; d) kai karkasas apšiltintas polistireniniu putplasčiu [31]

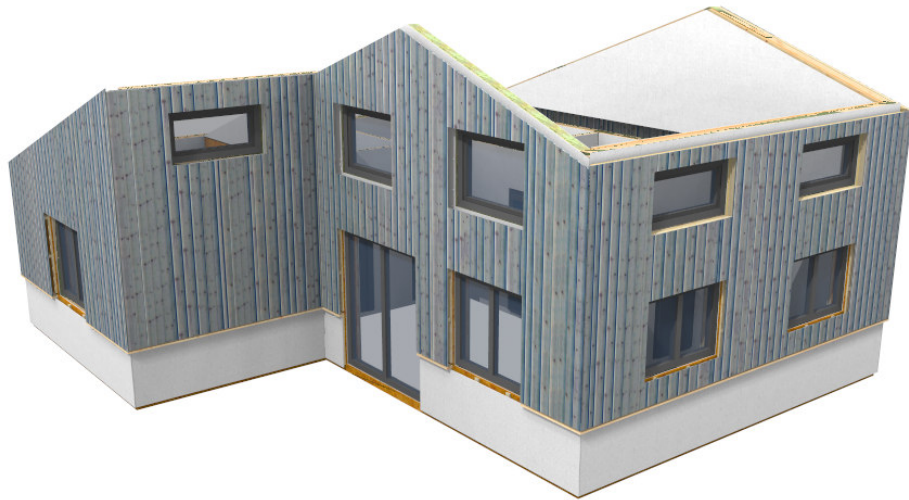
Remiantis gautų rezultatų nuotraukomis (žr. 12 pav.) matome, kad medinis karkasas, kuris buvo apsaugotas stiklo vata ir akmens vata ir degė 60 minučių, gali būti palyginamas su gautais celiuliozės pluošto rezultatais. Praėjus šiai bandymo trukmei, karkase buvo likę 10 % visos apšiltinimo medžiagos. Bandinys, kurio karkasą buvo pasirinkta užpildyti polistireniniu putplasčiu, jau 45 minutę degė atvira liepsna ir bandymą teko sustabdyti. Praėjus šiam laikui tarpui nuo bandymo pradžios, polistireninio putplasčio karkase jau nebuvo likę.

1.9. Skydinių-karkasinių išorės sienų projektavimo programos

Dažniausiai skydinių-karkasinių ir modulinų namų projektavimui naudojamos „SEMA GMBH“ ir „Autodesk Revit“ programos.

„SEMA“ – tai specializuota programa skydinių-karkasinių, karkasinių ir rąstinių namų projektavimui (žr. 13 ir 14 pav.). Šia programa rengiami pastatų išorės, vidinių sienų, pertvarų, perdangų ir stogo elementų gamybos brėžiniai. Taip pat su šia programa galima skaičiuoti pastatų apkrovas ir patikrinti konstrukcinius sprendimus.

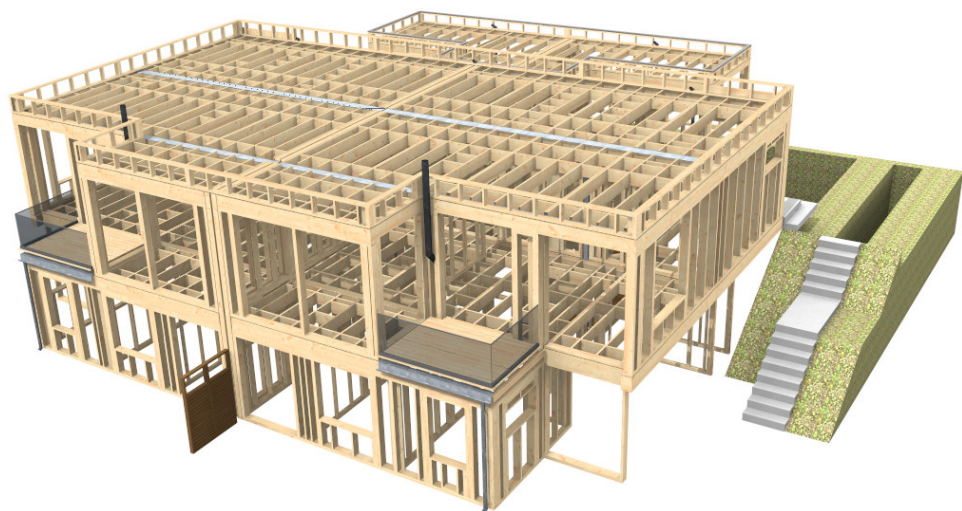
Programa leidžia eksportuoti ir importuoti į „AutoCAD“ programinės įrangos failus bei IFC failų formatus [32].



13 pav. Skydinės–karkasinės išorės sienos, projektuotas SEMA programa [sukurta autoriaus]

„SEMA“ privalumai :

- Platus panaudojimo pasirinkimas. Nesvarbu, ar tai bus naujas pastatas, ar esamo pastato renovacija, ar yra įstrižų kampų išdėstymai, skirtingi stogo šlaitai ar keičiami gegnių ir santvarų atstumai – ši programa automatiškai apskaičiuos visus atliktus atnaujinimo darbus bei pakeitimus.
- Gausios tvirtinimo elementų bibliotekos, apimančios tradicines medienos jungtis ir tvirtinimo detales / laikiklius.
- Automatizuotas medžiagų kiekių skaičiavimas pagreitina projekto sąmatų skaičiavimą bei medžiagų kiekių užsakymus gamybai.



14 pav. Skydinis–karkasinis gyvenamasis namas , projektuotas SEMA programa [sukurta autoriaus]

„SEMA“ trūkumai :

- Programa yra brangi ir kiekvienas papildomas modulis turi būti perkamas atskirai;

- Negalima automatiškai atnaujinti projekto, su kuriuo dirba keletas konstruktorių.

„Autodesk Revit“ - tai pastatų informacinio modeliavimo programinė įranga, kuria galima atlikti 3D objektų projektavimą (žr. pav. 15), sukurti medžiagų kiekių žiniaraščius, išsaugoti kiekvieno elemento technines charakteristikas.

Programa leidžia projektą eksportuoti į „AutoCAD“, „AutoCAD Civil 3D“, „Tekla BIMsight“, „Solibri“ ir kitą BIM programinę įrangą bei importuoti „Autodesk Inventor“, „AutoCAD“, IFC failų formatus ir nuotraukas. Su „Revit 2020“ versija galima importuoti PDF failus.



15 pav. Gyvenamasis namas projektuotas Autodesk Revit programa [33]

„Autodesk Revit“ privalumai:

- Failų dalinimasis tarpusavyje ir braižymo darbų mažinimas, padidina gamybos proceso efektyvumą naudojant 3D modeliu paremtą projektavimą;
- Analizės įrankis, BIM, padeda statybos inžinieriams skaitmeniniu būdu įvertinti projekto struktūrinius rezultatus.
- BIM kursai padeda konstruktoriams tinkamai koordinuoti veiksmus ir turėti nuoseklią informaciją dokumentuojant tobulus modelius. Tai dar labiau padeda optimizuoti gamintojų, rangovų ir detalių gamintojų bendradarbiavimą, kad būtų sutrumpintas statybos laikas.
- Statybos inžinieriai gali tvarkyti projekto duomenis per visą statybos projekto gyvavimo ciklą.
- Pasitelkę BIM kursų mokymus, konstrukcijų inžinieriai gali analizuoti ir suprojektuoti konstrukcijas ir kaupti intelektualią informaciją viso projekto gyvavimo ciklo metu.

„Autodesk Revit“ trūkumai:

- Programos valdymui reikia ganėtinai galingo kompiuterio, ypač tais atvejais, jeigu dirbama su dideliais projektais;
- Bazinė programos biblioteka nėra gausi, todėl pradedant dirbti reikia susikurti medžiagas arba ieškoti internete sukurtų gaminių bibliotekų [33].

1.10. Medžiagų kiekių žiniaraščių kūrimas naudojant SEMA programą

Skydinių-karkasinių ir modulinų namų gamybos procese reikalingi medžiagų kiekių žiniaraščiai. Šioje programoje galima apskaičiuoti visus, pagrindinius galimus kiekius, t. y. reikalingos medienos kiekį, projektuojamų sienų kvadratūrą bei kubatūrą (žr.16 pav.).

MLNo	TOT	ANO	PCS	Designation	Annotation	Width	Height	Length	TotalV
61	2a-S-	01	2	Auxiliary element	100	45	195	7240	0,127
62	2a-S-	01	1	Auxiliary element	102	45	195	7650	0,067
63	2a-S-	01	2	Auxiliary element	103	45	195	2030	0,036
64	2a-S-	01	3	Auxiliary element	103/2	45	195	1530	0,040
65	2a-S-	01	3	Auxiliary element	105	45	195	530	0,014
66	2a-S-	01	2	Auxiliary element	107	45	195	930	0,016
67	2a-S-	01	1	Auxiliary element	109	15	195	2030	0,006
68	2a-S-	01	1	Auxiliary element	111	15	195	930	0,003
69	2a-S-	01	1	Auxiliary element	111/1	15	195	530	0,002
70	2a-S-	01	1	Auxiliary element	111/2	15	195	1530	0,004
71	2a-S-	01	2	Auxiliary element	112	135	45	5629	0,068
72	2a-S-	01	8	Post	1-1	45	195	2214	0,155
73	2a-S-	01	2	Post	1-35	25	195	2214	0,022
74	2a-S-	01	9	Post	1-30	45	195	2270	0,179
75	2a-S-	01	13	Post	1-10	45	195	2136	0,244
76	2a-S-	01	6	Post	1-19	45	195	755	0,040
77	2a-S-	01	1	Post	1-21	24	195	2136	0,010
78	2a-S-	02	3	Auxiliary element	100	45	195	3721	0,098
79	2a-S-	02	1	Auxiliary element	103	28	195	530	0,003
80	2a-S-	02	1	Auxiliary element	103/1	28	195	930	0,005

16 pav. Medienos kiekių žiniaraštis gyvenamojo namo antro aukšto sienų [sukurta autoriaus]

Taip pat galima greitai apskaičiuoti reikalingų lakštinių medžiagų kiekį. Šiam darbui atliktų būtų reikalingi sienų, perdangų ir stogo elementų plotai, kurių plotų suma ir būtų lakštinių medžiagų kiekis (žr. 17 pav.)

MLNo	TOT	ANO	PCS	Designation	Width	Height	Length	GrossA	NetA
2a-S-	01	1	1	Wall shape	195	2405	7650	18,40	9,78
2a-S-	02	1	1	Wall shape	195	2388	3721	8,89	5,92
2a-S-	03	1	1	Wall shape	195	2310	2308	5,33	2,34
2a-S-	04	1	1	Wall shape	195	2717	700	1,76	1,76
2a-S-	05	1	1	Wall shape	195	2717	700	1,76	1,76
2a-S-	06	1	1	Wall shape	195	2284	7260	16,58	13,53
2a-S-	07	1	1	Wall shape	195	2717	6390	17,35	14,49
2a-S-	08	1	1	Wall shape	195	2388	3315	7,92	6,84
2a-S-	09	1	1	Wall shape	195	2717	3676	9,99	6,27
2a-S-	10	1	1	Wall shape	95	2339	3160	7,39	5,42
2a-S-	11	1	1	Wall shape	75	2339	945	2,21	2,21
2a-S-	12	1	1	Wall shape	95	2339	2511	5,87	5,87
2a-S-	13	1	1	Wall shape	95	2329	2606	6,07	6,07
2a-S-	13-1	1	1	Wall shape	95	1893	2606	2,97	2,97
2a-S-	14	1	1	Wall shape	95	2284	3255	7,43	7,43
2a-S-	15	1	1	Wall shape	95	2284	3160	7,22	5,25

17 pav. Gyvenamojo namo antro aukšto skydų kvadratūros lentelė [sukurta autoriaus]

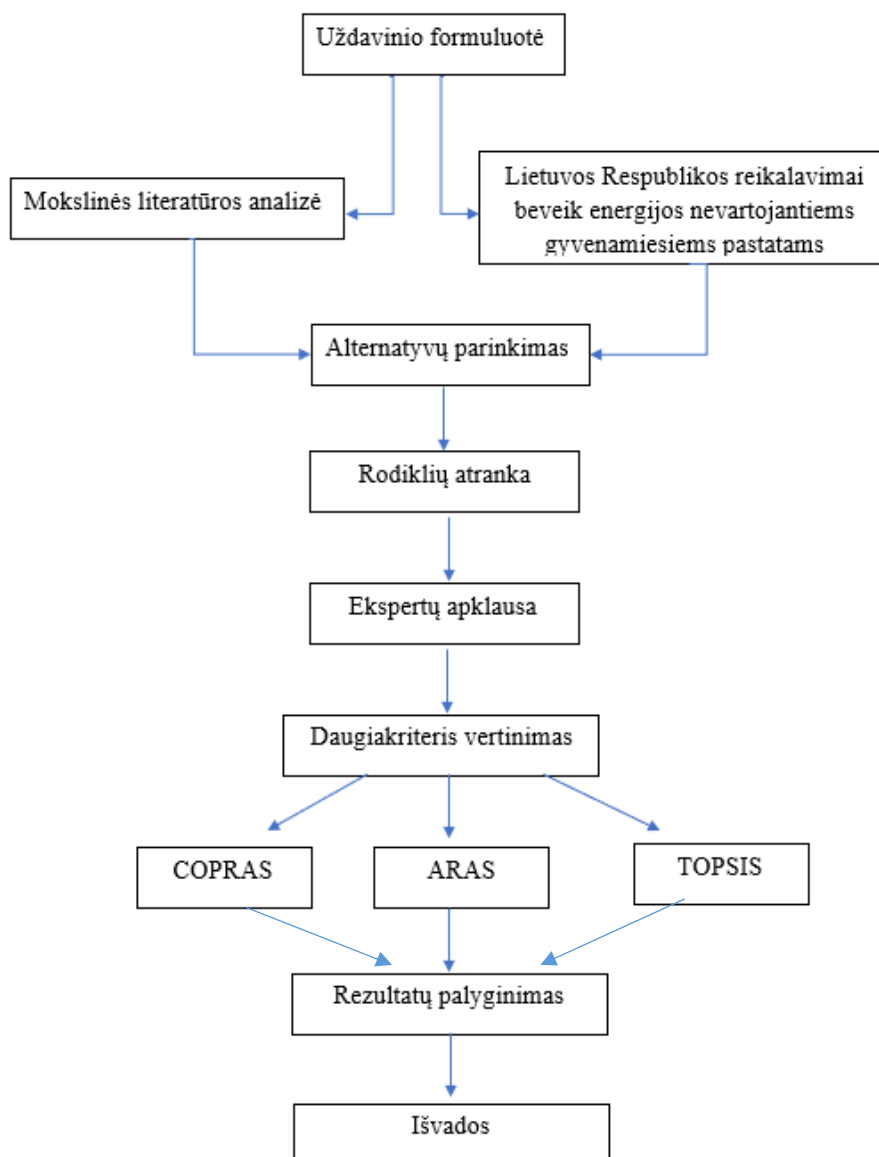
Šie kiekiai gali būti apdorojami naudojant MS Excel programą arba eksportuojami tiesiai į gamybos liniją. Medžiagų žiniaraščius gali valdyti visi, su projektu dirbantys žmonės.

2. Tyrimo metodika

2.1. Daugiakriteriai vertinimo metodai

Daugiakriterinių vertinimų pirmame etape yra formuluojama problema. Antrame etape išskiriamos nagrinėjamos alternatyvos, tada formuluojama kriterijų sistema ir nustatomas kriterijų reikšmingumas. Dauguma šiuo metu žinomų ir taikomų daugiakriterio vertinimo kriterijų reikšmingumo nustatymo metodų pagrįsti ekspertiniais vertinimais [34].

Autorės sukurtas vertinimo modelis (žr. 16 pav.), juo remiantis atliktas energijos beveik nevartojančio vienbučio karkasinio gyvenamojo namo išorės sienų daugiakriteris vertinimas.



18 pav. Daugiakriterio vertinimo etapai [sukurta autoriaus]

Šiam darbui atlikti naudoti trys, ganėtinai populiarūs ir tarpusavyje skirtingi, daugiakriteriai vertinimo metodai COPRAS, ARAS ir TOPSIS.

2.2. Daugiakriterių vertinimo metodų taikymas statybos srityje

Statybos inžinerija remiasi pagrindiniais mokslo laimėjimais. Mokslininkai teigia [35], kad projektuojant ir statant inžinerinius statinius bei pastatus, teoriniai metodai yra pagrįsti tiksliaisiais mokslais - matematika, fizika ir chemija. Per pastaruosius penkerius metus parengta keletas apžvalginių straipsnių, kuriuose kalbama apie šių mokslo sričių pasiekimus ir jų taikymą civilinėje inžinerijoje, taip pat statyboje. Pasak mokslininkų, tvarumas sukuria ekonominę vertę, kuri visais laikais naudinga pasaulyje. Tvari statyba pabrėžia moralės, etikos ir našumo ribas architektūros bei statybos sektoriuose ir numato, kad darbai būtų atliekami užtikrinant ekonomiškai pagrįstus procesus, mažinančius neigiamą poveikį aplinkai, taupant energiją ir gamtinius išteklius. Siekiant tvarumo, siūloma darni inžinerija kaip galimas sprendimas reiškiantis skirtingų metodų taikymą. Pavyzdžiui - energijos formų, kurios į aplinką neišskiria anglies dioksido į atmosfera paieškos; elektrinių transporto priemonių projektavimas ir kt. Pasak kai kurių autorių, tvari inžinerija reiškia žymiai rimtesnių aplinkos ir socialinių problemų svarstymus. Tokiu būdu tvari statyba stebi sistemą kaip pasaulinės ekosistemos dalį. Remiantis autoriais, galima nustatyti šiuos pagrindinius tvarios statybos principus [36]:

- sistemos analizės naudojimas ir poveikio aplinkai vertinimo priemonių integravimas;
- natūralių ekosistemų gerinimas;
- gyvenimo ciklo vertinimas;
- tik švarių ir saugių medžiagų naudojimas;
- gamtos išteklių suvartojimo mažinimas;
- atliekų kiekybinė analizė;
- inžinerinių sprendimų taikymas atsižvelgiant į geografinę sritį, kultūrą ir siekius;
- inovacijomis pagrįstų sprendimų kūrimas;
- visų suinteresuotųjų šalių ir bendruomenės įtraukimas į sprendimų kūrimo procesą.

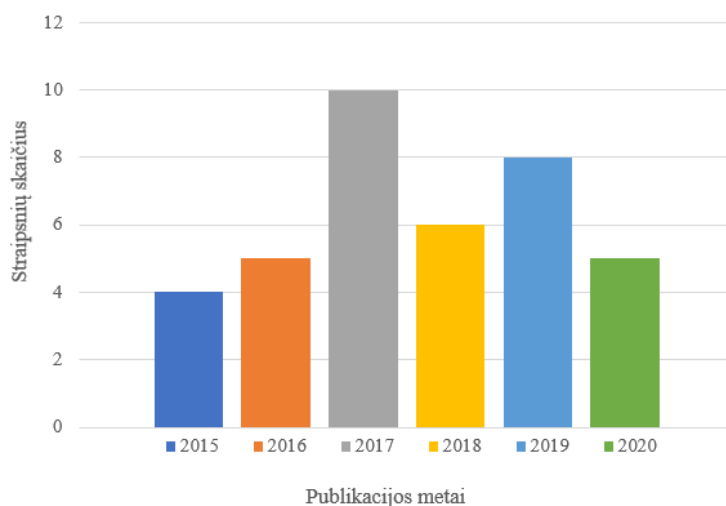
2.3. Daugiakriteris vertinimo metodas COPRAS

Teisingas problemos sprendimas yra susijęs su daugelio sprendimų priėmėjų kriterijų vertinimu atsižvelgiant į alternatyvas. Kompleksinio proporcingo vertinimo metodas COPRAS - tai metodas, kuris prisiima tiesioginę ir proporcingą reikšmės priklausomybę, ir tinkamai ištirtų naudingumo laipsnių kriterijų sistemoje apibūdinant alternatyvas ir kriterijų vertes bei svorį. Pateikiamas skaitinis pavyzdys, parodantis pritaikomumą ir siūlomo požiūrio veiksmingumą [37]. Mokslininkai Chatterjee ir Charaborty pritaikė šį metodą gamybos įmonei kaip veiksmingiausią būdą pasirinkti tinkamiausią lanksčią gamybos sistemą. Dėl savo atrankos paprastumo ir panašumų jis taip pat buvo pritaikytas pasirenkant tiekėjus. COPRAS taip pat sėkmingai pritaikytas statyboms ir turto valdymui [38].

COPRAS apibrėžiamas kaip kompleksinis proporcingas vertinimas. Pirmenybė apskaičiuojama atsižvelgiant į teigiamas ir neigiamas alternatyvų ypatybes. Zavadskas ir kiti tyrėjai sukūrė COPRAS metodą 1996 m. Šis metodas sukurtas greitai spręsti realias problemas. Metodas gali būti atliekamas be sunkumų net tada, kai atributas ir alternatyvos yra didelės. Taip pat jis gali atitikti tiek kokybinius, tiek kiekybinius kriterijus. Tačiau COPRAS metodas yra mažiau stabilus, kai atliekama jautrumo analizė, ir pateikiamas skirtingas reitingavimas, kai pasikeičia svoriai [39].

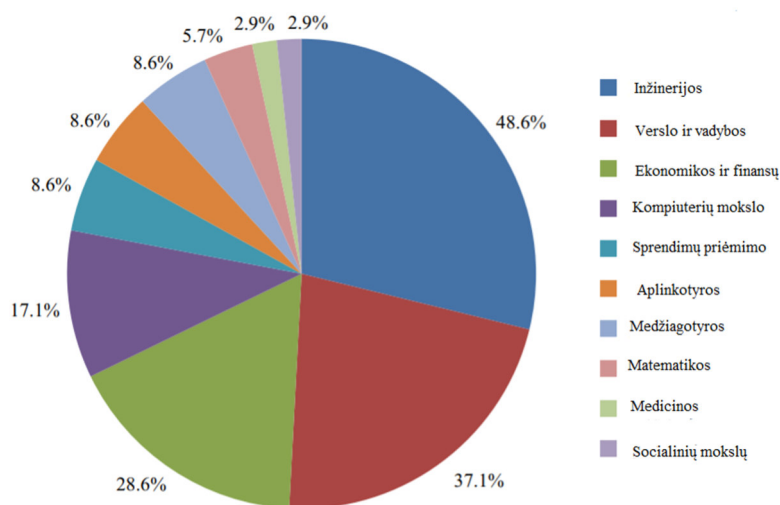
COPRAS yra vienas iš gerai žinomų MCDM metodų, kuris parenka geriausią alternatyvą tarp daugelio galimų alternatyvų. Klasikiniame COPRAS metode, į kriterijų svorius ir į alternatyvius reitingus atsižvelgiama kaip į aiškius skaitmeninius duomenis. Tačiau aiškūs duomenys yra nepakankami sprendimų priėmimo problemoms spręsti ir, kita vertus, tikslūs duomenys nėra lengvai prieinami. Dėl to sprendimų priėmimo problemos yra klaidingos ir netikslios [40].

Atliekant literatūros paiešką „Scopus“ duomenų bazėje apie COPRAS metodą, atrinkama 149 paskelbti straipsniai (visi laukai). Tarp jų 38-ių straipsnių pavadinime, santraukoje, raktiniuose žodžiuose minimas COPRAS metodas.



19 pav. Straipsnių skaičius 2015-2020 metų laikotarpyje apie beveik energijos nevartojančius gyvenamuosius namus [sukurta autoriaus]

Ši diagrama (žr. 19 pav.) grafiškai atvaizduoja, kiek straipsnių 2015-2020 metų laikotarpyje apie energijos beveik nevartojančius medinio karkaso gyvenamuosius namus galime rasti „Google Scholar“ duomenų bazėje.



20 pav. Mokslų sritys, kuriose paskelbti straipsniai COPRAS metodo tematika

Daugiausiai straipsnių COPRAS metodo tematika (žr. 20 pav.) rasta inžinerijos srityse – net 48,6 %. Antra, dažniausiai vyraujanti tema, kurioje gausu straipsnių apie šio metodo taikymą – verslas bei vadyba (37,1 %). Trečioji vyraujanti tema – ekonomika ir finansai, kurioje yra 28,6 % visų randamų straipsnių. Mažiausia straipsnių procentinė dalis tenka socialiniams mokslams. Socialinių mokslų srityje net 17 kartų mažiau straipsnių nei inžinerijos tematika.

Tyrimo rodiklių palyginimui naudojamas daugiatis kompleksinio proporcingo įvertinimo metodas – COPRAS (angl. *Complex Proportional Assessment*). Šis metodas sukurtas VGTU mokslininkų E.K. Zavadsko ir A. Kaklauskio, o jo pagrindinis principas – lyginamųjų alternatyvų santykinis reikšmingumas Q_i nustatomas remiantis juos apibūdinančiomis teigiamomis S_{+i} ir neigiamomis S_{-i} savybėmis. Kuo Q_i reikšmė didesnė, tuo alternatyva labiau atitinka sprendimą priimančio asmens poreikius [39].

Sukuriama sprendimo matrica X (2.1) [39]:

$$X = [x_{ij}] = \begin{matrix} a_1 & \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2.1)$$

čia: a_1 - a_m – lyginamieji variantai ($i=1, m$); x_1 - x_n – efektyvumo rodikliai ($j=1, n$); x_{11} - x_{mn} – efektyvumo rodiklių reikšmės.

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (2.2)$$

čia: $i=1..m, j=1..n$.

Ši matrica normalizuojama pagal formulę (2.2). Gaunama normalizuotoji matrica \bar{X} , kurios visos efektyvumo reikšmės – bedimensiai dydžiai (2.3):

$$\bar{X} = \bar{x}_{ij} = \begin{matrix} a_1 & \begin{bmatrix} \bar{x}_{11} & \bar{x}_{12} & \dots & \bar{x}_{1n} \\ \bar{x}_{21} & \bar{x}_{22} & \dots & \bar{x}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \bar{x}_{m1} & \bar{x}_{m2} & \dots & \bar{x}_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2.3)$$

Sudaroma svertinė normalizuotoji matrica \hat{X} (2.4):

$$\hat{X} = \hat{x}_{ij} = \begin{matrix} a_1 & \begin{bmatrix} \hat{x}_{11} & \hat{x}_{12} & \dots & \hat{x}_{1n} \\ \hat{x}_{21} & \hat{x}_{22} & \dots & \hat{x}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hat{x}_{m1} & \hat{x}_{m2} & \dots & \hat{x}_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2.4)$$

Atliekamas reikšmių minimizavimas pagal formulę (2.5):

$$S_i^+ = \sum_{j=k+1}^m \hat{x}_{ij} \quad (2.5)$$

Visų minimizuojamų reikšmių suma pagal formulę (2.6):

$$S^- = \sum_{i=1}^n S_i^- \quad (2.6)$$

Reikšmingumas randamas pagal formulę (2.7):

$$Q_i = S_i^+ + \frac{\sum_{i=1}^n S_i^-}{S_i^- \sum_{i=1}^n \frac{1}{S_i^-}} \quad (2.7)$$

Reikšmingumų santykis randamas pagal formulę (2.8):

$$N_i = \frac{Q_i}{\max Q_i} \cdot 100\% \quad (2.8)$$

2.4. Daugiakriteris vertinimo metodas TOPSIS

Šiame tyrime nagrinėjamas TOPSIS metodas, kuris priklauso determinitinių daugiakriterio vertinimo metodų grupei. Tokiuose metoduose variantų prioritetas nustatomas ne pagal neapibrėžtųjų aibių skaičių rangavimo taisyklės, o taikoma neapibrėžtųjų aibių elementų transformavimo į apibrėžtas reikšmes procedūra. Toks procedūros tikslas – nustatyti geriausiai neapibrėžtą skaičių atitinkančią apibrėžtą reikšmę [41]. Šis metodas vadinamas variantų racionalumo nustatymo artumo idealiajam taškui metodu (TOPSIS – Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution). Galime šį metodą apibrėžti taip, kad turime atvejį, kai kiekvieno rodiklio vertė pastoviai didėja arba pastoviai mažėja. Tokiu atveju nustatome „idealų“ sprendimą. Šis sprendimas sudaromas iš geriausių rodiklio reikšmių. „Neigiamai idealų“ nustatome iš blogiausių rodiklių reikšmių. Norint taikyti artumo idealiajam taškui metodą, būtina sudaryti sprendimų matricą X [42].

Parengiama sprendimo matrica (2.9):

$$X = [x_{ij}] = \begin{matrix} a_1 & \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \\ a_2 \\ \dots \\ a_m \end{matrix} \quad (2.9)$$

Čia: a_1 - a_m – lyginamieji variantai ($i=1, m$); x_1 - x_n – efektyvumo rodikliai ($j=1, n$); x_{11} - x_{mn} – efektyvumo rodiklių reikšmės.

Šios matricos normalizavimas atliekamas taikant formulę (2.10):

$$\bar{X}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} ; i=1..m, j=1..n \quad (2.10)$$

Gaunama normalizuotoji matrica P (2.11), kurios visos efektyvumo reikšmės – bedimensiniai dydžiai.

$$\bar{X} = \bar{x}_{ij} = \begin{matrix} & \begin{matrix} - & - & \dots & - \end{matrix} \\ \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix}. \quad (2.11)$$

Sudaroma svertinė normalizuotoji matrica P^* . Jei yra žinomi efektyvumo rodiklių reikšmingumai, tai matrica P^* apskaičiuojama pagal formulę (2.12):

$$X^* = \hat{x}_{ij} = \bar{x}_{ij} \cdot q_j. \quad (2.12)$$

Gauname pasvertą matricą (2.13):

$$\hat{X} = \hat{x}_{ij} = \begin{matrix} & \begin{matrix} \hat{} & \hat{} & \dots & \hat{} \end{matrix} \\ \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix}. \quad (2.13)$$

Idealiai geriausias variantas nustatomas pagal formulę (2.14):

$$a^+ = \left\{ \left[\left(\max_i x_{ij} \mid j \in J \right), \left(\min_i x_{ij} \mid j \in J' \right) \right] \mid i = 1 \dots m \right\} = \{a_1^+, a_2^+, \dots, a_n^+\}. \quad (2.14)$$

Čia: J – rodiklių, kurių didesnės reikšmės yra geresnės, indeksų aibė; J' – rodiklių, kurių mažesnės reikšmės yra geresnės, indeksų aibė.

Idealiai blogiausias variantas nustatomas pagal formulę (2.15):

$$a^- = \left\{ \left[\left(\min_i x_{ij} \mid j \in J \right), \left(\max_i x_{ij} \mid j \in J' \right) \right] \mid i = 1 \dots m \right\} = \{a_1^-, a_2^-, \dots, a_n^-\}. \quad (2.15)$$

Atstumas tarp lyginamojo i -tojo ir idealiai geriausio varianto nustatomas pagal formulę (2.16):

$$L_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - a_j^+)^2}; i = 1 \dots m, \quad (2.16)$$

o tarp i -tojo ir neigiamai idealaus pagal formulę (2.17):

$$L_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - a_j^-)^2}; i = 1 \dots m. \quad (2.17)$$

Nustatomos kiekvieno i -tojo varianto santykinis atstumas iki idealaus (2.18):

$$K_{BIT} = \frac{L_i^-}{L_i^+ + L_i^-}, i = 1 \dots m, \text{ kai } K_{BIT} \in [0, 1]. \quad (2.18)$$

Kuo K_{BIT} reikšmė artimesnė vienetui, tuo i – tasis variantas artimesnis a^+ , t.y. racionalus variantas bus tas, kurio K_{BIT} reikšmė yra didžiausia [].

2.5. Daugiakriteris vertinimo metodas ARAS

Priimant realius sprendimus, turi būti lyginamos visos naujos idėjos ir galimi sprendimų variantai pagal daugelį kriterijų [43]. Sprendėjo užduoties vykdymo eiga susideda iš baigtinio alternatyvų rinkinio įvertinimo, siekiant rasti geriausią pasirinkimą bei suskirstant juos į geriausius galimus variantus.

Yra daugybė metodų, kaip nustatyti alternatyvų rinkinio reitingą pagal sprendimo kriterijų rinkinį. Analitikas daugiakriterio tyrimo metodu siekia sukurti kelis kriterijus, pasitelkdamas kelis požiūrius. MCDM metodas yra vienas plačiausiai naudojamų mokslo, verslo ir vyriausybės sprendimų metodų, kurie gali padėti pagerinti kokybę bei sprendimų priėmimo procesą padaryti aiškesniu, racialesniu ir efektyvesniu [44]. Gyvenime, sprendimus priimantis asmuo pirmiausia turi suprasti ir apibūdinti situaciją. Šis etapas apima suinteresuotųjų šalių nustatymą ir vertinimą, įvairias galimas alternatyvas bei daug skirtingų ir svarbių sprendimų kriterijų, jų rūšis ir kokybinę informaciją. Mokslininkas Zeleny teigė, kad sprendimo kriterijai yra taisyklės, priemonės ir standartai, kuriais vadovaujasi priimant sprendimus.

Daugiakriteris metodas ARAS yra ganėtinai naujas. Mokslininkai Z. Turskis ir E. K. Zavadskas 2010 metais sukūrė adityvųjį santykio įvertinimo metodą. 2010 metais E. K. Zavadskas ir Z. Turskis sukūrė naują adityvųjį santykių įvertinimo metodą ARAS [45].

Kaip ir kituose metoduose, pradžioje skaičiavimų yra sukuriama matrica (2.19):

$$X = \begin{bmatrix} x_{01} & \dots & x_{0j} & \dots & x_{0n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mj} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}; i = \overline{0, m}; j = \overline{1, n}. \quad (2.19)$$

kur stulpelyje m pažymėtos – alternatyvos, eilutėje n – kriterijai.

Antrame žingsnyje sudaroma normalizuota matrica (2.20).

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} \bar{x}_{01} & \dots & \bar{x}_{0j} & \dots & \bar{x}_{0n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{x}_{i1} & \dots & \bar{x}_{ij} & \dots & \bar{x}_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{x}_{m1} & \dots & \bar{x}_{mj} & \dots & \bar{x}_{mn} \end{bmatrix}; i = \overline{0, m}; j = \overline{1, n}. \quad (2.20)$$

Atliekamas normalizavimas pagal formulę (2.21) jeigu kriterijus yra maksimizuojamas ir pagal formulę (2.22), jeigu kriterijus minimizuojamas.

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=0}^m x_{ij}} \quad (2.21)$$

$$\bar{x}_{ij} = \frac{1}{x^*_{ij}}; x_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=0}^m x_{ij}} \quad (2.22)$$

Būtina atlikti kriterijų svorių sumavimą, pagal (2.23) formulę. Pasvertoji matrica skaičiuojama pagal formulę (2.24):

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1. \quad (2.23)$$

$$\bar{\bar{X}} = \begin{bmatrix} \bar{\bar{x}}_{01} & \dots & \bar{\bar{x}}_{0j} & \dots & \bar{\bar{x}}_{0n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{\bar{x}}_{i1} & \dots & \bar{\bar{x}}_{ij} & \dots & \bar{\bar{x}}_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{\bar{x}}_{m1} & \dots & \bar{\bar{x}}_{mj} & \dots & \bar{\bar{x}}_{mn} \end{bmatrix}; i = \overline{0, m}; j = \overline{1, n}. \quad (2.24)$$

Paskutiniame žingsnyje ieškoma geriausios alternatyvos pasitelkus optimaliąją funkciją (2.25). Kuo S_i dydis didesnis, tuo alternatyva yra geresnė, ir atvirkščiai, kuo S_i dydis mažesnis tuo alternatyva prastesnė. S_i optimalioji funkcija turi tiesioginę priklausomybę nuo kriterijų bei jų svorių.

$$S_i = \sum_{j=1}^n \overline{x_{ij}}; i = \overline{0, m}. \quad (2.25)$$

$$K_i = \frac{S_i}{S_0}; i = \overline{0, m}. \quad (2.26)$$

(2.26) formulė naudojama sužinoti alternatyvų naudingumo laipsnį, palyginus su geriausia alternatyva.

Tolimesnėje darbo dalyje analizuojamos skirtingos apšiltinimo medžiagos, pateikiama tyrimo eiga, kurioje sudaroma vertinimo kriterijų sistema, atliekamas alternatyvų daugiakriteris vertinimas taikant COPRAS, TOPSIS ir ARAS metodus.

3. Tiriamoji dalis

3.1. Tyrime analizuojamos apšiltinimo medžiagos

Energiją taupantys pastatai neįsivaizduojami be itin gerų šiluminių savybių apšiltinimo sluoksnių. Mineralinė vata yra populiari medžiaga šilumos izoliacijai. Architektai ir inžinieriai dažniausiai naudoja gamintojo pateiktus duomenis jų pastato fizinio projekto medžiagos specifikacija [39]. Tyrėjai tokius duomenis gauna atlikę laboratorinius bandymus. Šie bandymai atliekami su sendintais ir sausais mėginiais. Tačiau drėgmė gali turėti įtakos izoliacinių medžiagų šiluminėms savybėms taip pat gali turėti įtakos ilgaamžiškumui.

Mokslininkai B. Nagy ir T.K.Simon [46] ištyrė šilumos izoliacijų mėginius, kurie buvo gauti iš išorės sienos elemento (žr. 21 pav.). Dalis mėginių buvo geros būklės ir išlaikė savo laikomąją galią, tačiau kai kurie buvo sugadinti ir minkšti. Tyrėjai išmatavo ir palygino naudotų mėginių šilumos laidumą, įdrėkį ir deformaciją, esant gniuždymo jėgai su naujais etaloniniais mėginiais.



21 pav. Mineralinės vatos bandiniai [46]: A – etaloninis mėginys; B – pakitusios mineralinės vatos mėginys; C – mineralinės vatos mėginys, paimtas iš gyvenamojo namo išorės sienos karkaso

Sugadintas mineralinės vatos mėginys turėjo mažesnę šiluminę laidumą. Jo šilumos laidumas buvo proporcingas mineralinės vatos tankiui ir drėgmės kiekiui. Mėginys, paimtas tyrimui iš jau pastatyto, gyvenamojo namo išorės sienos, pasižymėjo didesniu polinkiu kaupti drėgmę, nei naujas-etaloninis mėginys [46].

Biri celiuliozinė vata (žr. 22 pav.) - tai šilumos izoliacinė medžiaga, pagaminta iš perdirbto popieriaus. Ši šiltinimo medžiaga naudojama sunkiai prieinamiems pastatų plotams apšiltinti arba atitvarinių konstrukcijų šiltinimui. Celiuliozės vatos gamyba yra mažai energijos reikalaujantis procesas, o jo metu nesusidaro atliekos, išskyrus tik dulkes, kurios uždamos proceso metu ir filtruojamos iš aplinkos gautu oru. Mokslininkų nuomone [47], celiuliozinei vatai naudojamos ugniai atsparios medžiagos yra mažai toksiškos arba neturi savyje jokio toksiškumo. Laikui bėgant, imta tobulinti medžiagų sudėtį ir atkakliai dirbant buvo pasiektas mažas antipirenų kiekis bei neprarastas atsparumas ugniai.



22 pav. Biri celiuliozinė vata [45]

Dar viena medinių-karkasinių namų išorės sienų apšiltinimo alternatyva – atvirų porų poliuretano putos (žr. 23 pav.). Taip pat, dažnai renkama tarp atvirų ir uždarytų porų poliuretano putų. Šiuo atveju tinkamiausios yra atvirų porų poliuretano putos, nes karkasas būtų šiltinamas iš vidaus ir šios medžiagos savybės yra artimesnės mineralinei vatai. Apšiltinus karkasą atvirų porų poliuretano putomis, iš išorės sienų vidinės pusės būtina tvirtinti garo izoliacinę plėvelę [48].



23 pav. Atvirų porų poliuretano putos [48]

Atvirų porų putų izoliacija suteikia efektyvų sandarumą. Ši šiltinimo medžiaga užpildo kiekvieną atvirą tarpą, kuriame potencialiai gali atsirasti oro pralaidumas. Taip užtikrinamas maksimalus energijos taupymas.

8 lentelė. Deklaruojamos atvirų porų poliuretano putų eksploatacinės savybės [49]

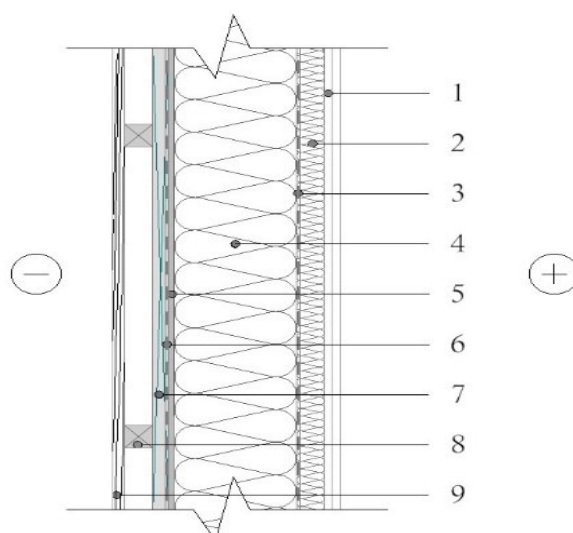
Esminės charakteristikos	Eksploatacinės savybės	Darnioji techninė specifikacija
Atsparumas ugniai	E klasė	PN-EN 14315-1:2013 PN-EN 13501-1+A1:2010 PN-EN 11925-2:2010
Šiluminė varža, λ	$\lambda_m=0,037$ W/mK $\lambda_{90,90}=0,038$ W/mK	PN-EN 14315-1:2013-06 PN-EN 12667:2002

Esminės charakteristikos	Eksploatacinės savybės	Darnioji techninė specifikacija
Trumpalaikis įmirkis iš dalies panardinant vandenyje	$W_p < 7 \text{ kg/m}^2$	PN-EN 14315-1:2013-06 PN-EN 1609:2013-07 met. B
Pralaidumas vandens garams: Vandens garų difuzinio pasipriešinimo koeficientas Vandens garų difuzinio pasipriešinimo faktorius	$\mu > 3,6$ $> 0,147 \text{ mg/ (m-h-Pa)}$	PN-EN 14315-1:2013-06 PN-EN 12086:2013-07
Matmenų stabilumas esant 70°C ir 90% santykinės drėgmės po 48 val.	$\Delta \varepsilon < 1\%$	PN-EN 14315-1:2013-06 PN-EN 1604:2013-07
Matmenų stabilumas esant -20°C po 48 val.	$\Delta \varepsilon < 0,5\%$	PN-EN 14315-1:2013-06 PN-EN 1604:2013-07
Lakiųjų organinių junginių emisijos	Atitinka nacionalinių reglamentų dėl pavojingų medžiagų išleidimo reikalavimus ir gali būti naudojami A ir B kategorijos gyvenamosiose patalpose.	PN-EN 14315-1:2013-06 PN-EN ISO 1600-9:2009 ISO 16000-6:2011 PB LS-002/4/09-1999 PB LS-012/2/09-2004

Atvirų porų purškiamos poliuretano putos nepakeičiamos nepageidaujamo garso pašalinimo srityje. Naudojant šią šiltinimo alternatyvą galima maksimaliai apsaugoti nuo vėjo, automobilių eismo ar kitų pašalinių garsų iš išorinės namo aplinkos [48].

3.2. Alternatyvų pasirinkimas

Šiame darbe tiriama vienodos sudėties medinė karkasinė išorės siena su skirtingomis apšiltinimo medžiagomis. Tyrimo objektas – šiltinimo sluoksnis (pažymėtas „X“). Tiriamasis modelis pažymėtas pateiktas 24 paveikslėlyje.



24 pav Išorės sienos mazgas: 1- gipso kartono plokštė 2 sl.; 2 – 50mm akmens vata bei vidinis medinis tašas 45mm storio; 3 – garo izoliacinė plėvelė; 4 – X tiriamasis sluoksnis; 5 – priešvėjinė gipso kartono plokštė; 6 – difuzinė plėvelė; vertikalūs tašas 25mm; horizontalus tašas 45x45mm, 600mm žingsnis; vertikalios fasadinės dailylentės [sukurta autoriaus]

Tyrimui bus analizuojamos penkios alternatyvos, kurios tarpusavyje skiriasi kaina, šilumos laidumo koeficiento verte, atsparumu ugnies poveikiui bei sudėtimi. Šios kriterijų alternatyvos yra kiekybinės ir kokybinės. Kiekybinės kriterijų alternatyvos vertinamos matavimo vienetais, o kokybinėms sukuriama vertinimo balų sistema. Apšiltinimo medžiagų alternatyvos pateiktos 5 lentelėje:

9 lentelė. Karkasinės sienos apšiltinimo medžiagų alternatyvos

Eil. Nr.	Alternatyva
1	Mineralinė vata Isover PREMIUM 33
2	Akmens vata Paroc Ultra (eXtra)
3	Biri celiuliozinė vata WERROWOOL
4	Poliuretano plokštės FF-PIR ALI
5	Atvirų porų poliuretano putos TermMax

Vertinant energijos beveik nevartojančio vienbučio karkasinio gyvenamojo namo išorės sienų apšiltinimo medžiagų alternatyvas, jos analizuojamos pagal šiuos pagrindinius 5 vertinimo rodiklius. Alternatyvų vertinimo rodikliai pateikiami 10 lentelėje:

10 lentelė. Alternatyvos vertinimo rodikliai

Eil. Nr.	Vertinimo rodikliai	Matavimo vienetai
1	Apšiltinimo sluoksnio rinkos kaina	€/m ²
2	Degumo klasė	balai
3	Sluoksnio storis	m
4	Sluoksnio šilumos laidumo koeficientas	W/m·K
5	Ekologiškumas	balai

Tai yra pagrindiniai rodikliai, kurie dažniausiai nulemia galutinį sprendimą pasirenkant vieną ar kitą medžiagą rengiant energijos beveik nevartojančių vienbučių karkasinių gyvenamųjų namų projektus.

3.3. Kriterijų reikšmingumo nustatymas

Kiekvienas ekspertas turi savo asmeninę nuomonę, todėl kriterijų reikšmingumas nėra subjektyvus vertinimas. Apklausoje metodas yra tinkamas būdas, kad kriterijų reikšmingumo pasirinkimas būtų objektyvesnis. Šiuo būdu gauti duomenys apdorojami ir remiantis gautais rezultatais, galima nustatyti rodiklių reikšmingumą.

Šiame magistro darbe buvo naudojama ekspertinė apklausa. Tyrimo metu apklausta 19 ekspertų – projekto vadovai, statybų techniniai prižiūrėtojai, projekto dalies vadovai. Iš visų apklaustųjų anketą (priedas Nr. 1) sutiko užpildyti 19 respondentų. Iš šių 19 anketų – 5 užpildytos neteisingai, t.y. buvo klaidingai suprastas kriterijų reikšmingumo paskirstymas balais. Apklausoje svorių vertinimui buvo naudojama 14 anketų.

Ekspertų apklausoje vertinimui atlikti buvo sukurta anketa, kurioje statybos specialistai išreiškė savo nuomonę, apie vienbučio karkasinio gyvenamojo namo išorės sienų apšiltinimo medžiagos

pasirinkimo kriterijų reikšmingumą. Šiam tyrimui atlikti pasirinkti penki kriterijai. Ekspertų nuomonė išreikšta įvertinant kiekvieną kriterijų balais nuo 5 iki 1 (kur „5“ – aukščiausias, „1“ – žemiausias įvertinimo balas). Svarbiausias kriterijus vertinamas 5 balų reikšme, o kiti lyginami su svarbiausiu, t.y. mažiau svarbus kriterijus vertinamas 4 balais, o visi kiti atitinkamai mažesniais. Mažiausiai svarbus kriterijus įvertinamas 1 balu.

Apklausoje gauti duomenys apdorojami ir pateikiami 11 lentelėje :

11 lentelė. Ekspertų apklausoje gauti duomenys

Ekspertas	Efektyvumo rodiklis				
	Sluoksnio rinkos kaina, €/m ²	Degumo klasė, balai	Sluoksnio storis, m	Sluoksnio šilumos laidumo koeficientas, W/m·K	Ekologiškumas, balai
Ekspertas Nr. 1	2	5	1	3	4
Ekspertas Nr. 2	5	2	3	4	1
Ekspertas Nr. 3	1	3	4	2	5
Ekspertas Nr. 4	2	3	1	4	5
Ekspertas Nr. 5	5	2	3	4	1
Ekspertas Nr. 6	5	3	1	2	4
Ekspertas Nr. 7	5	2	3	4	1
Ekspertas Nr. 8	2	5	1	3	4
Ekspertas Nr. 9	5	2	1	4	3
Ekspertas Nr. 10	5	1	2	4	3
Ekspertas Nr. 11	5	3	1	4	2
Ekspertas Nr. 12	4	3	1	5	2
Ekspertas Nr. 13	5	1	3	4	2
Ekspertas Nr. 14	2	3	1	4	5

Ekspertai turėjo išreikšti savo nuomonę, kiek jiems svarbi yra sluoksnio rinkos kaina, degumo klasė, apšiltinimo sluoksnio storis, sluoksnio šilumos laidumo koeficientas bei ekologiškumas.

Šioje apklausoje tiriama vienodos sudėties medinė karkasinė išorės siena su skirtingomis apšiltinimo medžiagomis. Pasirinktos penkios apšiltinimo medžiagų alternatyvos :

- mineralinė vata (žr. 25 pav.);



25 pav. Mineralinė vata Isover PREMIUM 33 [50]

- akmens vata Paroc Ultra (eXtra) (žr. 26 pav.);



26 pav. Akmens vata Paroc Ultra (eXtra) [51]

- biri celiuliozinė vata (žr. 27 pav.);



27 pav. Biri celiuliozinė vata WERROWOOL [52]

- poliuretano plokštės (žr. 28 pav.);



28 pav. Poliuretano plokštės FF-PIR ALI [53]

- Atvirų porų poliuretano putos (žr. 29 pav.);



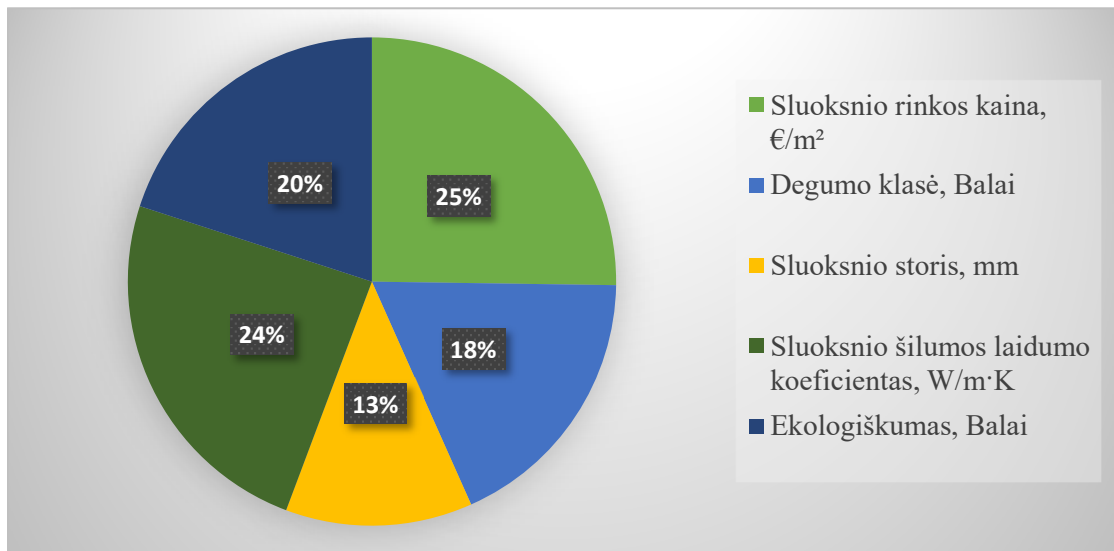
29 pav. Atvirų porų poliuretano putos [54]

Remiantis apklauso duomenimis buvo apskaičiuotas kiekvieno vertinimo kriterijaus (rodiklio) reikšmingumo svoris. Skaičiavimo rezultatai pateikti 12 lentelėje:

12 lentelė. Kriterijaus reikšmingumo svoris, procentinė išraiška

Eil. Nr.	Rodikliai	Kriterijus	Matavimo vnt.	Svoris, proc.
1	x ₁	Sluoksnių rinkos kaina	€/m ²	25,24
2	x ₂	Degumo klasė	Balai	18,10
3	x ₃	Sluoksnių storis	m	12,38
4	x ₄	Sluoksnių šilumos laidumo koeficientas	W/m·K	24,29
5	x ₅	Ekologiškumas	Balai	20,00

Pagal gautus duomenis sudaroma diagrama, kuri atvaizduoja kriterijaus reikšmingumo svorio procentinę išraišką (žr. 30 pav.) :



30 pav. Kriterijaus reikšmingumo svoris, procentais

Pagal kriterijų reikšmingumo svorių pasiskirstymą, diagramoje aiškiai matyti, kad svarbiausiais tapo du kriterijai – sluoksnio rinkos kaina ir sluoksnio šilumos laidumo koeficientas. Sluoksnio rinkos kainai net 8 anketose buvo paskirti 5 balai. Sluoksnio šilumos laidumo koeficientui 9 anketose buvo skirta po 4 balus. Apdorojus duomenis gauta, kad šių kriterijų reikšmingumas yra labai panašus. Vienas kriterijus surinko 25 %, o kitas – 24% ekspertų apklausos balų.

Ekologiškumas buvo pasirinktas kaip trečias pagal svarbą kriterijus. Trijose anketose ekologiškumas surinko po 5 balus ir 4 balus. Trims, anketą pildžiusiems ekspertams, šis kriterijus pasirodė mažiausiai svarbus.

Mažiausiai balų šioje apklausoje buvo skirta degumo klasei ir sluoksnio storiui konstrukcijoje. Tai ganėtinai stebina, nes medinėse konstrukcijose esanti šilumos izoliacinė medžiaga turėtų būti kuo atsparesnė ugnies poveikiui. Atsižvelgiant į tai, kad ekspertams nėra svarbus šilumos izoliacinio sluoksnio storis galima manyti, kad išorės sienų karkaso storis jų nuomone taip pat nėra svarbus.

3.4. Ekspertų įverčių suderinamumas

Subjektyvūs svorio nustatymo metodai yra pagrįsti ekspertų vertinimu. Jų patirtis ir žinios leidžia pateikti vertingiausią informaciją apie palyginamus objektus. Yra daugybė metodų, kaip nustatyti kriterijų svorį (reikšmę), įskaitant reitingavimą, t.y. suteikiant mažiausią vertę balu – „1“ ir didžiausią įmanomą reikšmę pagal mažiausiai reikšmingą kriterijų.

Dispersinį konkordacijos koeficientą apibrėžė M. Kendallas[55]. Koeficientas susietas su kiekvieno rodiklio rangų suma t_j visų ekspertų atžvilgiu:

$$t_j = \sum_{k=1}^r t_{jk}, (j = 1, \dots, n), \quad (3.1)$$

čia: t_{jk} – k-tojo eksperto j-ojo kriterijaus įvertinimas; r – apklaustų ekspertų skaičius, tiksliau, su dydžių t_j nuokrypiu nuo bendro vidurkio \bar{t}_j kvadratų suma L (dispersijos analogas):

$$L = \sum_{k=1}^r (t_{jk} - \bar{t}_j)^2. \quad (3.2)$$

Bendras vidurkis \bar{t}_j , skaičiuojamas pagal formulę (3.3):

$$\bar{t}_j = \frac{\sum_{k=1}^n t_k}{n}. \quad (3.3)$$

Ekspertų įvertinimo dispersija, apskaičiuojama (3.4):

$$\sigma^2 = \frac{1}{r-1} \sum_{k=1}^r (t_{jk} - \bar{t}_j)^2. \quad (3.4)$$

Variacijos dydis, apskaičiuojamas (3.5):

$$\beta_j = \frac{\sigma}{\bar{t}_j}. \quad (3.5)$$

Sumos vidurkis, apskaičiuojamas (3.6):

$$V = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^r t_{jk}. \quad (3.6)$$

Įvertinimo deviacija, apskaičiuojama (3.7):

$$S = \sum_{j=1}^n (\sum_{k=1}^r t_{jk} - V)^2. \quad (3.7)$$

Konkordacijos koeficientas, apskaičiuojamas (3.8):

$$W = \frac{12 \cdot S}{r^2(n^3 - n)}. \quad (3.8)$$

Konkordacijos koeficientas W kinta nuo 0 iki 1, t.y. $0 < W < 1$. Jeigu koeficiento reikšmė artima 0 – tai reiškia, kad gauname visišką nuomonių nesuderinamumą, o jeigu reikšmė artima 1 – gauname pilną suderinamumą.

Konkordacijos koeficiento svarba, apskaičiuojama (3.9):

$$\chi^2 = \frac{12 \cdot S}{r \cdot n \cdot (n+1)}. \quad (3.9)$$

Pagal pasirinktą reikšmingumo lygmenį α iš χ^2 skirsnio lentelės su $\nu = n - 1$ laisvės laipsniu randame kritinę reikšmę $\chi_{krit}^2(0.01; 4) = 13,28$ ir tai yra mažiau už χ^2 , todėl ekspertų įvertinimai šios apklausos metu yra suderinti.

3.5. Ekspertų nuomonių suderinamumo tyrimas

Nagrinėjant karkasinių išorės sienų apšiltinimo medžiagas buvo apklausta 19 ekspertų. Jų kvalifikacija buvo įvairi - projekto vadovai, statybų techniniai prižiūrėtojai, projekto dalies vadovai. Apklausos svorių vertinimui buvo naudojama 14 anketų. Ekspertų apklausos vertinimui atlikti buvo sukurta anketa, kurioje statybos specialistai išreiškė savo nuomonę apie vienbučio karkasinio gyvenamojo namo išorės sienų apšiltinimo medžiagos pasirinkimo kriterijų reikšmingumą.

Šiam tyrimui atlikti pasirinkti penki kriterijai. Ekspertų nuomonė išreikšta įvertinant kiekvieną kriterijų balais nuo 5 iki 1 (kur „5“ – aukščiausias, „1“ – žemiausias įvertinimo balas). Svarbiausias kriterijus vertinamas 5 balų reikšme, o kiti lyginami su svarbiausiu, t.y. mažiau svarbus kriterijus vertinamas 4 balais, o visi kiti atitinkamai mažesniais. Mažiausiai svarbus kriterijus įvertinamas 1 balu. Apklausos gauti duomenys apdorojami ir pateikiami 13 lentelėje :

13 lentelė. Kriterijaus reikšmingumo svoris, procentinė išraiška

Ekspertas	Kriterijai t_{jk} ; $j=1\dots n$; $n=5$				
	Sluoksniu rinkos kaina, €/m ²	Degumo klasė, balais	Sluoksniu storis, m	Sluoksniu šilumos laidumo koeficientas, W/m·K	Ekologiškumas, balais
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
Ekspertas Nr. 1	2	5	1	3	4
Ekspertas Nr. 2	5	2	3	4	1
Ekspertas Nr. 3	1	3	4	2	5
Ekspertas Nr. 4	2	3	1	4	5
Ekspertas Nr. 5	5	2	3	4	1
Ekspertas Nr. 6	5	3	1	2	4
Ekspertas Nr. 7	5	2	3	4	1
Ekspertas Nr. 8	2	5	1	3	4
Ekspertas Nr. 9	5	2	1	4	3
Ekspertas Nr. 10	5	1	2	4	3
Ekspertas Nr. 11	5	3	1	4	2
Ekspertas Nr. 12	4	3	1	5	2
Ekspertas Nr. 13	5	1	3	4	2
Ekspertas Nr. 14	2	3	1	4	5
Rangų suma	53	38	26	51	42
Vidutinis rangas	10,60	7,60	5,20	10,20	8,40
Rodiklio subjektyvus reikšmingumas (santykinis svoris)	0,252	0,181	0,141	0,243	0,200
Prioritetas	1	4	5	2	3

Sumos vidurkis, apskaičiuojamas (3.10):

$$V = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^{n=5} \sum_{k=1}^{r=14} t_{jk} = \frac{1}{14} \cdot 210 = 15. \quad (3.10)$$

Įvertinimo deviacija, apskaičiuojama (3.11):

$$S = \sum_{j=1}^{n=5} (\sum_{k=1}^{r=14} t_{jk} - V)^2 = 474. \quad (3.11)$$

Konkordacijos koeficientas, apskaičiuojamas (3.12):

$$W = \frac{12 \cdot S}{r^2(n^3 - n)} = \frac{12 \cdot 474}{14^2(5^3 - 5)} = 0.214. \quad (3.12)$$

Konkordacijos koeficiento svarba, apskaičiuojama (3.13):

$$\chi^2 = \frac{12 \cdot S}{r \cdot n \cdot (n+1)} = \frac{12 \cdot 474}{14 \cdot 5 \cdot (5+1)} = 13.54. \quad (3.13)$$

Pagal pasirinktą reikšmingumo lygmenį α iš χ^2 skirsnio lentelės su $\nu = n - 1$ laisvės laipsniu randame kritinę reikšmę $\chi^2_{krit}(0.01; 4) = 13.28$ tai yra mažiau už χ^2 , todėl ekspertų įvertinimai šios apklausos metu yra suderinti.

Tarpinė išvada: ekspertų nuomonės suderintos.

3.6. Pagrindiniai uždavinio duomenys

Naudojant pasirinktas alternatyvas ir vertinimo kriterijus sudaroma pirminė uždavinio lentelė su duomenimis. Ja remiantis atliekama apšiltinimo sluoksnio analizė ir vertinimas, duomenys pateikiami 14 lentelėje :

14 lentelė. Išorės sienos šiltinimo alternatyvų pradinė sprendimo priėmimo matrica

Alternatyva	Sluoksnio rinkos kaina, €/m ²	Degumo klasė, balai	Sluoksnio storis, m	Sluoksnio šilumos laidumo koeficientas, W/m·K	Ekologiškumas, balai
Mineralinė vata Isover PREMIUM 33	16,39	1	0,350	0,033	2
Akmens vata Paroc Ultra (eXtra)	9,08	1	0,350	0,035	2
Biri celiuliozinė vata WERROWOOL	10,85	2	0,450	0,039	1
Poliuretano plokštės FF-PIR ALI	15,44	5	0,250	0,022	5
Atvirų porų poliuretano putos TermMax	28,00	5	0,4	0,037	5

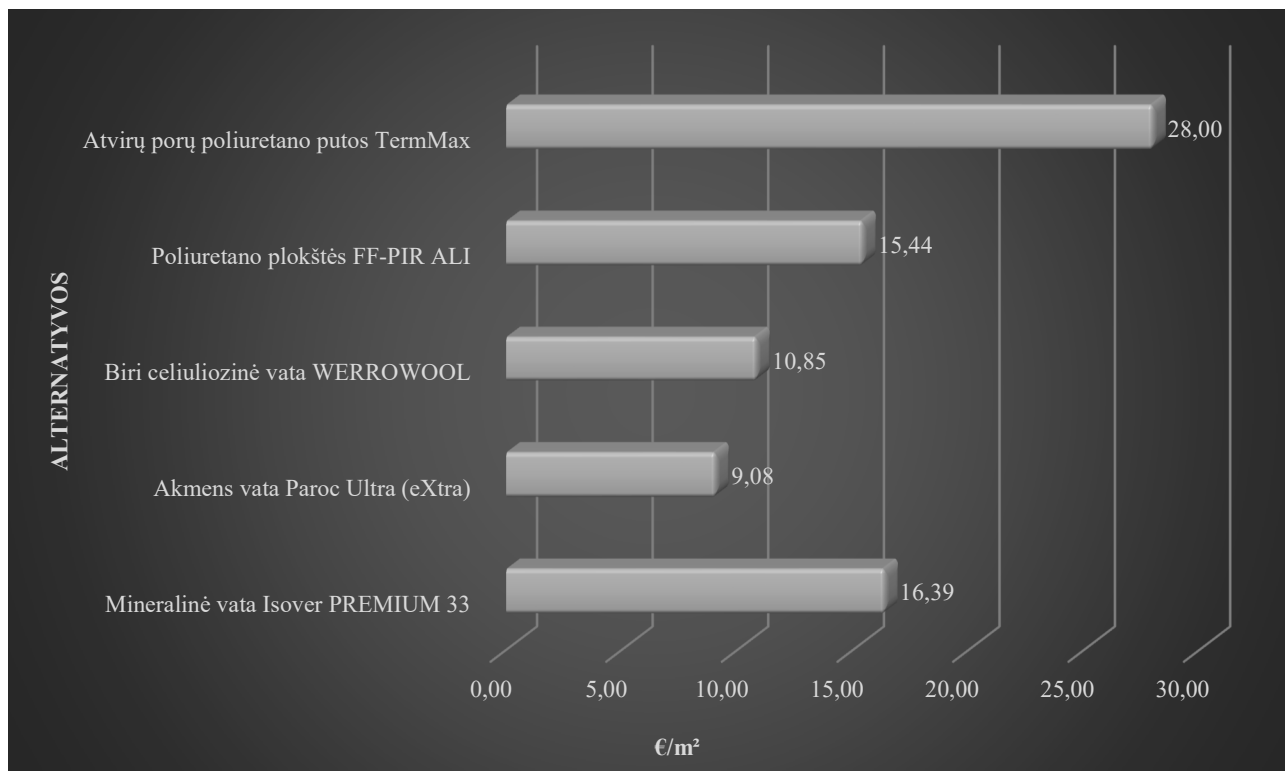
10 lentelėje pateikti 5 skirtingi kriterijai, iš kurių 3 kriterijai - kiekybiniai, o kiti 2 - kokybiniai. Kiekybiniai kriterijai išreikšti matavimo vienetais, o kokybiniais kriterijams pritaikyta balų sistema. Šiame tyrime taikyti kiekybiniai rodikliai - šilumos laidumo koeficientas, kurio matavimo vienetai W/mK, medžiagų kaina - eur/m², sluoksnio storis – metrais.

Degumo klasė ir ekologiškumas yra priskiriami prie kokybinių kriterijų ir jiems įvertinti sukurta balų sistema. Ekologiškumo balo dydis išreiškia medžiagos natūralumą, t.y. kuo balas mažesnis, tuo medžiaga yra natūralesnė, artimesnė mus supančiai aplinkai. Degumo klasei balo dydis lemia prastesnę elgseną ugnyje, t.y. kuo balas aukštesnis, tuo greičiau medžiaga būtų paveikta ugnies. Statybos sektoriuje naudojamos medinės konstrukcijos bei jų sudėtiniai elementai turi turėti specialius sertifikatus, kurie patvirtintų, jog šios konstrukcijos ir jų sudėtiniai elementai mažiausiai 15 minučių išlaikys tiesioginį ugnies poveikį ir konstrukcijos išliks nepakitusios.

3.7. Šiltinimo sluoksnio alternatyvų analizė

Sluoksnio rinkos kaina.

Kiekviena namo statyboje panaudota medžiaga turi savo kainą. Užsakovas rinkdamasis statybines, apšiltinimo ir kitas medžiagas savo būsimam projektui, didelį dėmesį skiria kainai. Dažnu atveju tai būna vienas iš pagrindinių kriterijų. Sluoksnio rinkos kaina - ekonominis rodiklis, kuris išreiškia medžiagos kiekio, tenkančio 1 m² įrengimui, kainą eurais. Šiame darbe tiriamos penkios alternatyvos, kurių kaina eurais už kvadratinį metrą tarpusavyje skiriasi net kelis kartus.



31 pav. Šiltinimo sluoksnio alternatyvų palyginimas pagal rinkos kainą

Kainų skirtumas grafiškai pavaizduotas 31 paveiksle. Brangiausia, iš šiame darbe tirtų medžiagų – atvirų porų poliuretano putos TermMax. Gretima alternatyva kainos atžvilgiu – poliuretano plokštės FF-PIR ALI. Šios abi medžiagos yra ne natūralios. Šių apšiltinimo medžiagų gamybos kaštai iškelia ir rinkos kainą.

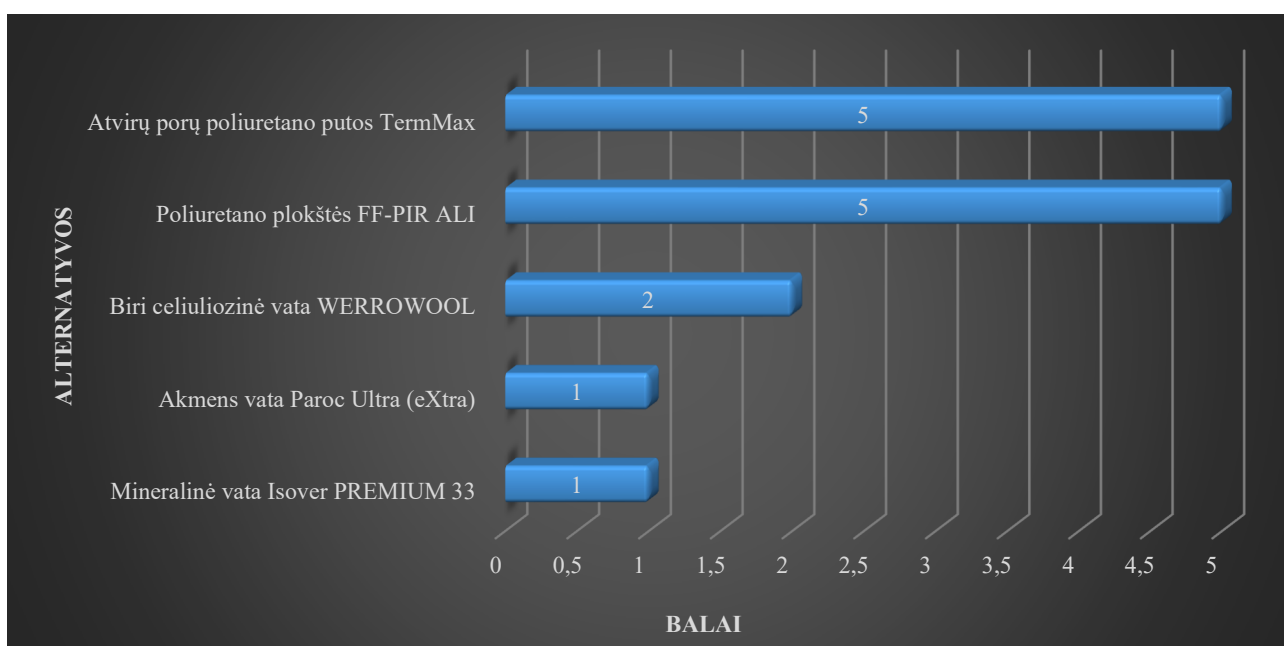
Degumo klasė.

Gyvenamųjų namų statyboje naudojamos įvairios medžiagos, kurių elgsena ugnyje yra ypatingai svarbi. Degumas - medžiagų savybė, apibūdinanti jų elgseną gaisro metu ir pagal tai izoliacinės medžiagos yra skirstomos į degumo klases EN 13 501-1. Pagrindiniai degumo kriterijai yra užsidegamumas, liepsnos sklidimas ir išskiriamos šilumos kiekis. Skiriamos septynios statybinių medžiagų degumo klasės [56]. Šios savybės pateikiamos medžiagų deklaracijose. Medžiagos elgsena ugnyje yra skirstoma į klases. Kuo klasė aukštesnė, tuo medžiaga mažiau atspari arba visiškai neatspari ir yra itin degi. Degumo klasės palyginimui sukuriama balų sistema. Kuo balas didesnis – tuo medžiaga mažiau atspari ugniai. Balų sistema pateikiama 15 lentelėje:

15 lentelė. Apšiltinimo medžiagų deklaruojamų degumo klasių balų sistema:

Degumo klasė	Degumo klasės vertinimas balais
A1 ir A2	1
B	2
C	3
D	4
E	5

A1 ir A2 klasei priskiriamos medžiagos yra nedegios ir visiškai nepalaiko degimo. B klasei priskiriamos medžiagos, kurio nežymiai palaiko degimą. E klasei priklauso medžiagos, kurios yra degios ir vidutiniškai užsiliepsnojančios [56].



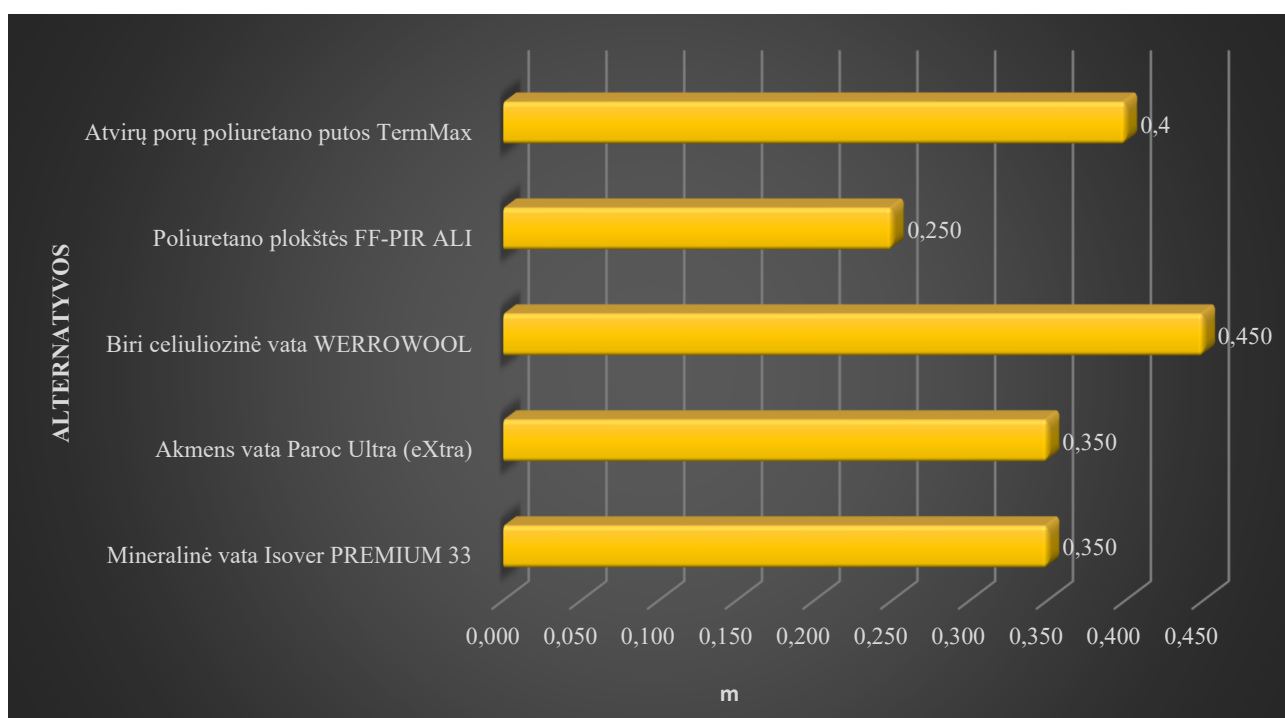
32 pav. Šiltinimo sluoksnio alternatyvų palyginimas pagal degumo klasę

Šiame tyrime pasirinktos penkios medžiagos, iš kurių dvi – itin degios. Tai yra sintetinės medžiagos – atvirų porų poliuretano putos TermMax ir poliuretano plokštės FF-PIR Ali. Iš nagrinėjamų alternatyvų (žr. 32 pav.) tik akmens vata Paroc Ultra ir mineralinė vata Isover PREMIUM 33 pasižymi atsparumu ugnies poveikiui. Šių abiejų medžiagų deklaruojama atsparumo ugniai klasė – A.

Sluoksnio storis.

A++ gyvenamieji pastatai išsiskiria dideliu energijos efektyvumu. Pagal šiuo metu galiojančius ir keliamus reikalavimus, A++ klasės gyvenamiesiems pastatams atitvarų šilumos perdavimo koeficientas turi būti, ne didesnis nei $0,11 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ [49]. Kad pasiekti tokią šilumos perdavimo koeficiento reikšmę medinei karkasinei išorės sienai, turime ją apšiltinti tinkamo storio šilumos izoliacine medžiaga. Šilumos izoliacinės medžiagos reikalingo sluoksnio storis priklauso nuo šios medžiagos šilumos laidumo koeficiento. 33 paveiksle pateikta alternatyvų diagrama pagal sluoksnio

storį, kuris reikalingas pasiekti A^{++} energetinio naudingumo išorės sienos šilumos perdavimo koeficientą.



33 pav. Šiltinimo sluoksnio alternatyvų palyginimas pagal sluoksnio storį

Medinio karkaso storis yra tiesiogiai proporcingas apšiltinimo sluoksnio storiui, kuris yra reikalingas, kad būtų pasiekta A^{++} šilumos perdavimo koeficiento minimali vertė. 16 lentelėje pateikiamas medienos kiekis reikalingas apšiltinti 1m^2 išorės sienos pagal pasirinktą apšiltinimo sluoksnio alternatyvą:

16 lentelė. Medienos kiekis, tenkantis 1m^2 išorės sienos, pagal pasirinktą alternatyvą

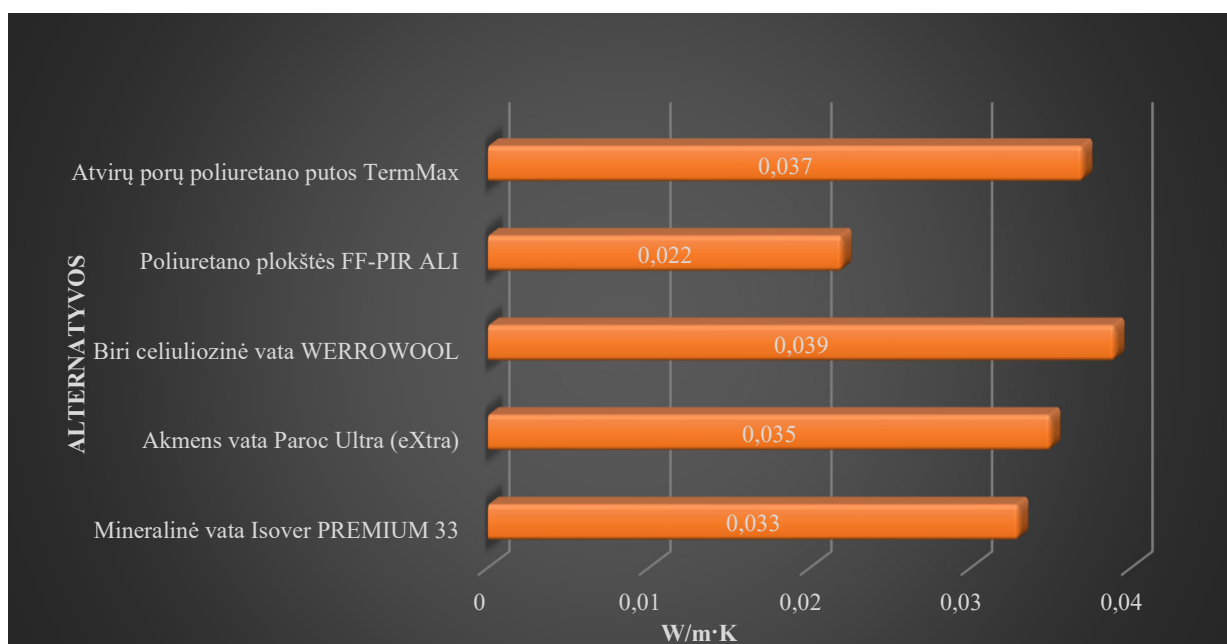
Eil. Nr.	Alternatyva	Kiekis, vnt	Storis, mm	Plotis, mm	Ilgis, mm	Medienos kiekis, m^3	Suminis medienos kiekis, m^3
1.	Mineralinė vata Isover PREMIUM 33	3	45	350	1000	0,047	0,115
		5	45	350	865	0,068	
2.	Akmens vata Paroc Ultra (eXtra)	3	45	350	1000	0,047	0,115
		5	45	350	865	0,068	
3.	Biri celiuliozinė vata WERROWOOL	3	45	450	1000	0,061	0,148
		5	45	450	865	0,088	
4.	Poliuretano plokštės FF-PIR ALI	3	45	250	1000	0,034	0,082
		5	45	250	865	0,049	
5.	Atvirų porų poliuretano putos	3	45	350	1000	0,047	0,115
		5	45	350	865	0,068	

Pagal pateiktus duomenis 16 lentelėje, galima teigti, kad daugiausiai medienos sunaudosime pasirinkdami karkasinę išorės sieną apšiltinant biria celiuliozine vata. Naudojant šią šiltinimo

sluoksnio alternatyvą, 1m² mediniam karkasiniam 0,45 m storio išorės sienos skydai sunaudotume 0,148 m³ klijuotos medienos, o mažiausiai medienos sunaudosime rinkdamiesi šiltinimą poliuretano plokštėmis. Šiai alternatyvai reikalingas mažiausio skerspjūvio medinis karkasas, t.y. 0,25m storio išorės siena, kurios 1m² skydai reikėtų 0,082 m³ kalibruotos medienos.

Sluoksnio šilumos laidumo koeficientas.

Rengiant gyvenamojo namo projektą svarbu pasirinkti apšiltinimo sluoksnį su geromis terminėmis savybėmis, nes tai yra praktiškas ir ekonomišką būdas sukurti energetiškai efektyvų namą. Taip vasaros mėnesiais bus vėsiau, o žiemos metu - šilčiau. Pagrindinis beveik energijos nenaudojančių pastatų bruožas yra tas, kad juose yra labai aukšti šilumos izoliacinio sluoksnio rodikliai. Tai sumažina šiluminius nuostolius per išorės atitvaras iki labai žemo lygio. Šilumos laidumas, dar žinomas kaip „Lamda“ (žymimas graikų simboliu λ), yra matas, kaip lengvai šiluma teka per tam tikros rūšies medžiagą, nepriklausomai nuo nagrinėjamos medžiagos storio. Kuo mažesnis medžiagos šilumos laidumas, tuo geresni šiluminiai rodikliai (t.y., lėčiau judės šiluma per šią medžiagą).



34 pav. Šiltinimo sluoksnio alternatyvų palyginimas pagal šilumos laidumo koeficientą

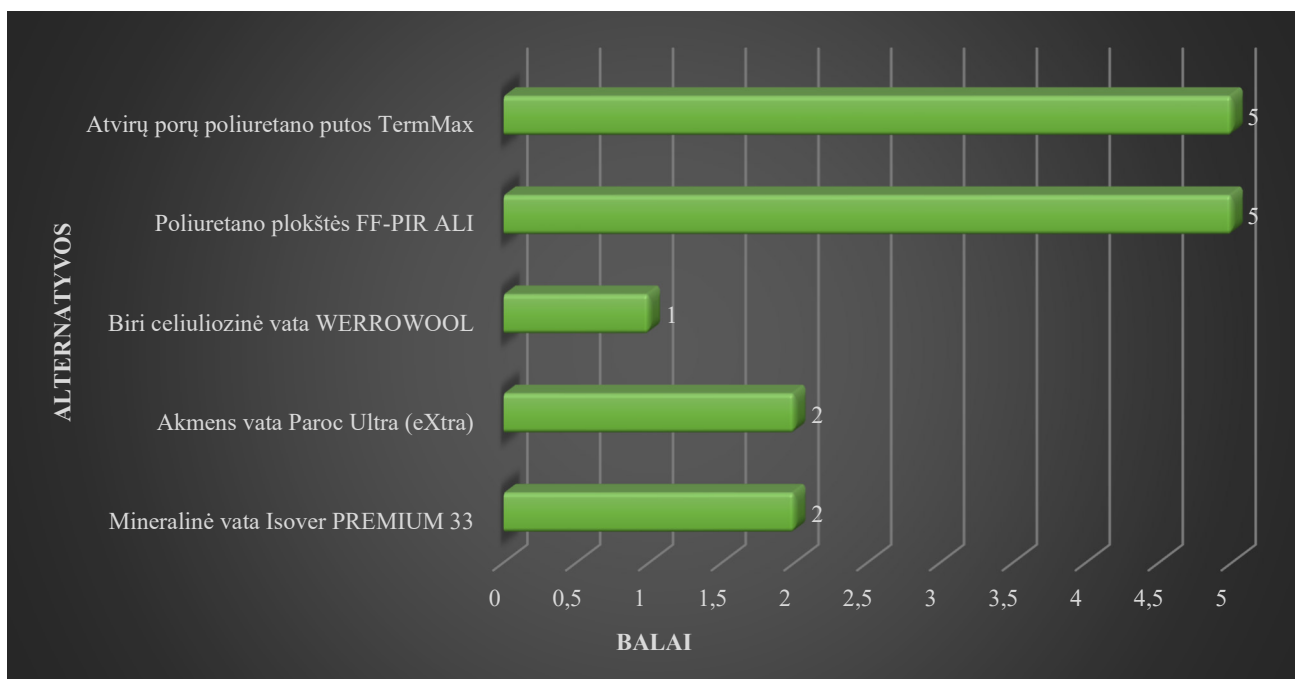
Iš pasirinktų penkių alternatyvų (žr. 34 pav.), geriausiomis šilumos izoliacinėmis savybėmis pasižymi poliuretano plokštės FF-PIR ALI. Šių plokščių šilumos laidumo koeficientas - 0,022 W/m·K. FF-PIR izoliacija gali būti naudojama kuriant labai plonas ir sandarias konstrukcijas. Statant mažai energijos naudojančius, pasyvius ar be energijos naudojančius namus, konstrukcijos storis vos padidės, palyginti su įprastais namais, pastatytais naudojant tradicinius šiltinimo produktus. Tačiau ši medžiaga yra sintetinė ir nenatūrali. Tai ir yra priežastis, kodėl šios medžiagos tokie aukšti šiluminių savybių rodikliai.

Ekologiškumas.

Paskutiniu metu, žmonės labai dažnai mini žodį – ekologija. Šis žodis tapo dažnas ir statybos srityje.

Ekologiškas namas - tai namas, pagamintas iš medžiagų, turinčių mažą poveikį aplinkai, neteršiančių aplinkos ir kuo labiau ribojančių energijos sąnaudas. Ekologiško namo sąvoka yra glaudžiai susijusi su „ pasyvaus namo “ sąvoka. Taip yra todėl, kad ekologiškas namas pastatytas naudojant didelio efektyvumo energetines sistemas ir sistemas, kurios maksimaliai naudoja atsinaujinančius išteklius. Norint patikrinti, ar ekologiškumas yra svarbus kriterijus priimant sprendimus dėl apšildino sluoksnio, ekspertų apklausoje buvo prašyta tai įvertinti balais nuo 1 iki 5. Ekspertas skyrė balą 5, jeigu jam mažiausiai aktuali medžiagų sudėtis, jos natūralumas bei poveikis aplinkai.

Atsižvelgiant į pasirinktas alternatyvas, jos suskirstytos pagal balus, t.y. natūraliausia medžiaga – 1 balas, o mažiausiai ekologiška – 5 balai.



35 pav. Šiltinimo sluoksnio alternatyvų palyginimas pagal ekologiškumą

Šioje diagramoje (žr. 35 pav.) akivaizdžiai išsiskiria biri celiuliozinė vata ir poliuretano putos bei plokštės. Biri celiuliozinė vata gaminama iš medžio pluošto, kuris gautas iš perdirbto popieriaus. Dėl šios natūralios sudėties, ši šiltinimo medžiaga tinka gyvenamiesiems pastatams. Dažnai statybinės medžiagos gali sukelti alergines reakcijas gyventojams, todėl būtent ši medžiaga gali būti kaip ekologiška alternatyva šiltinti gyvenamojo namo karkasą ir išvengti susirgimų autoimuninėmis ligomis.

3.8. Rezultatai, renkant alternatyvas pagal daugiakriterius vertinimo metodus

Lentelėse pateikti gauti tyrimo rezultatai, vertinant alternatyvas pagal daugiakriterius vertinimo metodus – COPRAS, ARAS ir TOPSIS. Analizei pasirinktos penkios alternatyvos:

- mineralinė vata Isover PREMIUM 33;
- akmens vata Paroc Ultra (eXtra);
- biri celiuliozinė vata WERROWOOL;
- poliuretano plokštės FF-PIR ALI;
- atvirų porų poliuretano putos TermMax.

Šios išorės sienos karkaso šiltinimo medžiagos tarpusavyje vertintos pagal penkis rodiklius - sluoksnio rinkos kainą, degumo klasę, sluoksnio storį, sluoksnio šilumos laidumo koeficientą, ekologiskumą. Alternatyvos vertintos pagal kiekvieną metodą atskirai. Gauti rezultatai palyginti tarpusavyje pagal daugiakriterių vertinimo metodus.

17 lentelė. Rezultatai, renkant alternatyvą pagal daugiakriterių vertinimo metodą COPRAS

Alternatyva	Prioritetų eiliškumas
Mineralinė vata Isover PREMIUM 33	3
Akmens vata Paroc Ultra (eXtra)	1
Biri celiuliozinė vata WERROWOOL	2
Poliuretano plokštės FF-PIR ALI	5
Atvirų porų poliuretano putos TermMax	4

Skaičiuojant pagal COPRAS metodą, gariausia alternatyva atrinkta akmens vata Paroc Ultra (eXtra). Blogiausia iš pateiktų šiltinimo medžiagų – poliuretano plokštės FF-PIR ALI.

18 lentelė. Rezultatai, renkant alternatyvą pagal daugiakriterių vertinimo metodą ARAS

Alternatyva	Prioritetų eiliškumas
Mineralinė vata Isover PREMIUM 33	2
Akmens vata Paroc Ultra (eXtra)	1
Biri celiuliozinė vata WERROWOOL	3
Poliuretano plokštės FF-PIR ALI	5
Atvirų porų poliuretano putos TermMax	4

Atliekant skaičiavimus pagal ARAS metodą, gariausia alternatyva atrinkta akmens vata Paroc Ultra (eXtra). Blogiausia iš pateiktų šiltinimo medžiagų – poliuretano plokštės FF-PIR ALI.

19 lentelė. Rezultatai, renkant alternatyvą pagal daugiakriterių vertinimo metodą TOPSIS

Alternatyva	Prioritetų eiliškumas
Mineralinė vata Isover PREMIUM 33	2
Akmens vata Paroc Ultra (eXtra)	1
Biri celiuliozinė vata WERROWOOL	3
Poliuretano plokštės FF-PIR ALI	4
Atvirų porų poliuretano putos TermMax	5

Skaičiuojant pagal TOPSIS metodą, gariausia alternatyva atrinkta akmens vata Paroc Ultra (eXtra). Blogiausia iš pateiktų šiltinimo medžiagų – atvirų porų poliuretano putos TermMax. Taikant COPRAS, ARAS ir TOPSIS vertinimo metodus, geriausia alternatyva išrinkta akmens vata Paroc Ultra (eXtra).

Išvados

1. Statybos sektorius turėtų pereiti prie energetiškai efektyvių namų statybos, kad būtų galima sumažinti pastatų energijos sąnaudas ir CO₂ išmetimą į mus supančią aplinką.
2. Mokslinės literatūros analizės dalyje išanalizuoti moksliniai straipsniai beveik energijos nevartojančių, skydinių-karkasinių, karkasinių-modulinių gyvenamųjų namų tematika. Apžvelgta medinių konstrukcijų istorija, paklausa ir plėtros planai Europos šalyse. Šiame darbe aprašyta mokslininkų atliktų tyrimų eiga bei jų gauti rezultatai. Pateikti skydinių-karkasinių namų išorinių atitvarinių konstrukcijų pavyzdžiai bei skydinių-karkasinių ir modulinių namų kiekių ir statinė konstrukcijos analizė.
3. Šiame darbe pateikta trijų daugiakriterių vertinimo metodų analizė. Sukurta daugiakriterio vertinimo etapų schema, kuria remiantis atliktas šis darbas.
4. Tarpusavyje palygintos dvi dažniausiai medinių konstrukcijų projektavimui naudojamos programos. „Autodesk Revit“ yra pranašesnė nei „SEMA“ dėl savo pritaikymo rengiant projektus, kuriuose taikomas pastato informacinis modeliavimas. „SEMA“ pranašesnė nei „Autodesk Revit“ projektuojant skydinius, skydinius-karkasinius ir rąstinius namus.
5. Sluoksnio rinkos kainą ekspertai pasirinko kaip svarbiausią kriterijų. Gautas kriterijaus svoris – 25,24 %. Brangiausia, iš šiame darbe tirtų apšiltinimo medžiagų, alternatyva – atvirų porų poliuretano putos TermMax (28,00 eur/m²). Pigiausia apšiltinimo medžiaga – akmens vata Paroc Ultra (eXtra) (9,08 eur/m²).
6. Antras pagal svarbumą ekspertų pasirinktas kriterijus – sluoksnio šilumos laidumo koeficientas. Gautas šio kriterijaus svoris – 24,29 %. Iš pasirinktų penkių alternatyvų, geriausiomis šilumos izoliacinėmis savybėmis pasižymi poliuretano plokštės FF-PIR ALI. Šių plokščių šilumos laidumo koeficientas - 0,022 W/m·K. Blogiausiomis šilumos izoliacinėmis savybėmis pasižymi biri celiuliozinė vata WERROWOOL – 0,039 W/m·K.
7. Trečias pagal svarbumą kriterijus – degumo klasė. Gautas šio kriterijaus svoris – 18,10 %. Dvi iš tirtų alternatyvų yra itin degios, t. y. atvirų porų poliuretano putos TermMax ir poliuretano plokštės FF-PIR Ali. Šių medžiagų deklaruojama degumo klasė – E (degios ir vidutiniškai užsiliepsnojančios). Akmens vata Paroc Ultra ir mineralinė vata Isover PREMIUM 33 pasižymi atsparumu ugnies poveikiui. Šių abiejų medžiagų deklaruojama atsparumo ugniai klasė – A1 (nedejos ir visiškai degimo nepalaikančios).
8. Mažiausiai balų šioje apklausoje buvo skirta degumo klasei ir sluoksnio storiui konstrukcijoje. Degumo klasė surinko 13 % , o sluoksnio storis – 18 % visų ekspertų nuomonių. Atsižvelgiant į tai, kad ekspertams nėra svarbus šilumos izoliacinio sluoksnio storis galima manyti, kad išorės sienų karkaso storis jų nuomone taip pat nėra svarbus. Degumo klasės svarba skiriasi net 7% nuo ekspertams didžiausią prioritetą keliančio prioriteto – sluoksnio rinkos kainos.
9. Taikant COPRAS, ARAS TOPSIS vertinimo metodus, geriausia alternatyva išrinkta akmens vata Paroc Ultra (eXtra) – efektyvumo balas 0,814 iš 1. Blogiausia alternatyva vertinant TOPSIS metodu - atvirų porų poliuretano putos TermMax5, o COPRAS ir ARAS metodu - poliuretano plokštės FF-PIR ALI.

Literatūros sąrašas

1. Energetinis sertifikavimas. [žiūrėta 2020-12-03] Prieiga per internetą: < http://www.energinis-sertifikavimas.lt/lt/energinis_sertifikavimas>
2. MIKUČIONIENĖ, R. et al. Energijos šaltinių parinkimo įtaka pastato energiniam naudingumui. *Science-Future of Lithuania*, 2018, 10: 1ac-1ac. [žiūrėta 2019-12-03] Prieiga per internetą: Google Scholar.
3. LAPINSKIENĖ, V. Pastatų energinio funkcionalumo vertinimas integruotame pastato projektavime. 2019. PhD Thesis. VGTU leidykla „Technika“. [žiūrėta 2019-10-05] Prieiga per internetą: Google Scholar.
4. TAMENE, Y. Thermal and economic study on building external walls for improving energy efficiency // *International Journal of Heat and Technology* [interaktyvus], 37(1), 2019, 219-228. [žiūrėta 2019-11-20]. Prieiga per : Science Direct
5. HU, M. Cost-Effective Options for the Renovation of an Existing Education Building toward the Nearly Net-Zero Energy Goal—Life-Cycle Cost Analysis. *Sustainability* 11, 2444. 2019. [žiūrėta 2019-11-16]. Prieiga per : Google Scholar.
6. Філоненко, О. Thermal modernization of the panel buildings external walls // *International Journal of Engineering and Technology* [interaktyvus], 7(3.2), 2018, 116-122.
7. KISILEWICZ, T. Active thermal insulation as an element limiting heat loss through external walls // *Energy and Buildings* [interaktyvus], 205, 2019, 109541. [žiūrėta 2020-03-21]. Prieiga per : Science Direct
8. SIMONA, P. L. Increasing the energy efficiency of buildings by thermal insulation // *Energy Procedia*, 128, 2017, 393-399. [žiūrėta 2019-11-16]. Prieiga per : Science Direct
9. ÜRGE-VORSATZ, D. et al. Advances Toward a Net-Zero Global Building Sector. *Annual Review of Environment and Resources*, 2020, 45. [žiūrėta 2019-11-16]. Prieiga per : Science Direct
10. KALAMEES, T. What kind of heat loss requirements NZEB and deep renovation sets for building envelope. 2016. [žiūrėta 2019-12-04]. Prieiga per : Google Scholar
11. SMITH, R. E. Connect Homes: Modular Housing Patent and Architect Led Business Model: Jared Levy and Gordon Stott, architects, USP: patented module to module connection system, 2011. *Journal of Architectural Education*, 2016, 70.1: 168-171 [žiūrėta 2019-09-25]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1080/10464883.2016.1123068>
12. GANIRON, Jr. Prefabricated technology in a modular house. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2014, 73(1), 51-74. [žiūrėta 2019-11-07]. Prieiga per : doi: <http://dx.doi.org/10.14257/ijast.2014.73.04>
13. STEINHARDT, D. A. Adoption of prefabricated housing—the role of country context. *Sustainable cities and society*. 2016, 22, 126-135. [žiūrėta 2020-11-08]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.02.008>
14. ENDZELIS, J. Comparison between modular building technology and traditional construction. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, 2018 vol. 23(2), 86-95. [žiūrėta 2019-11-07]. Prieiga per : doi: <https://doi.org/10.5755/j01.sace.23.2.21579>
15. BOAFO, F. E. Performance of modular prefabricated architecture: case study-based review and future pathways. *Sustainability*, 2016, 8.6: 558. [žiūrėta 2020-11-16]. Prieiga per : Google Scholar.
16. Skydiniai-karkasiniai namai. Privalumai ir trūkumai. [žiūrėta 2019-12-01]. Prieiga per internetą: <<http://aktyvusnamai.lt/skydiniai-karkasiniai-namai-privalumai-bei-trukumai>>

17. Skydiniai namai. [žiūrėta 2019-12-05]. Prieiga per internetą: <<http://www.kriaute.lt/lt/skydiniai-namai/apie-skydinius-karkasinius-namus>>
18. Skydiniai namai. [žiūrėta 2019-12-20]. Prieiga per internetą: <<https://straipsniai.org/skydiniai-namai>>
19. DE ARAUJO, V. A. Woodframe: light framing houses for developing countries. *Revista de la Construcción. Journal of Construction*. 2016, 15.2: 78-87. [žiūrėta 2019-11-16]. Prieiga per : Science Direct.
20. EN 1995-1-1: 2004. Eurocode 5: Design of Timber Structures–Part 1-1: General–Common Rules and Rules for Buildings. [žiūrėta 2019-10-05]. Prieiga per : Google Scholar.
21. XIA, B. Perceived obstacles to multi-storey timber-frame construction: an Australian study. *Architectural science review*. 2014, 57(3), 169-176. [žiūrėta 2019-11-07]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1080/00038628.2014.912198>
22. KITEK KUZMAN, M. Comparison of timber-house technologies and initiatives supporting use of timber in Slovenia and in Sweden-the state of the art. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 2017, 10.6: 930. [žiūrėta 2020-10-24]. Prieiga per : Google Scholar.
23. NANDI, S. Evolution of prefab timber swedish houses in UK from prototype in Sweden [2020-12-01] Prieiga per internetą: <<https://www.prefabmuseum.uk/content/new-contributions/evolution-prefab-timber-swedish-houses-uk-prototype-sweden>>
24. HU, Q. Consumer attitudes towards timber frame houses in China. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*. 2016, 216, 841-849. [žiūrėta 2019-11-08]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.12.081>
25. Statybos techninis reglamentas STR 2.05.07:2005 „MEDINIŲ KONSTRUKCIJŲ PROJEKTAVIMAS“. Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija, 2005. [žiūrėta 2020-09-12]. Prieiga per : Google Scholar.
26. SANTI, S. Massive wood material for sustainable building design: the Massiv–Holz–Mauer wall system. *Journal of wood science*, 2016, 62.5: 416-428. [žiūrėta 2019-11-16]. Prieiga per : Google Scholar.
27. TOPPINEN, A. The future of wooden multistory construction in the forest bioeconomy–A Delphi study from Finland and Sweden. *Journal of forest economics*, 2018, 31: 3-10. [žiūrėta 2019-11-12]. Prieiga per : Science Direct.
28. LINDBLAD, F. Market development barriers for the Swedish wooden multi-family house industry. *International Journal of Engineering and Technology*, 2019, 11.3: 187-195
29. LOPEZ, D., FROESE, T. M. Analysis of costs and benefits of panelized and modular prefabricated homes. *Procedia engineering*. 2016, 145, 1291-1297. [žiūrėta 2019-11-08]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.166>
30. MALESZA, J., MIEDZIAŁOWSKI, C. Current directions in development of modern wood-framed houses. *Procedia Engineering*, 2017, 172: 701-705. [žiūrėta 2019-11-19]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.084>
31. TISO, M. Behaviour of insulation materials in timber frame assemblies exposed to fire. *EPS*, 2016, 45: 45. . [žiūrėta 2020-09-19]. Prieiga per : Science Direct.
32. Timber construction. [žiūrėta 2019-12-01]. Prieiga per internetą: <<https://www.sema-soft.de/en/software/timber-construction>>
33. Revit overview. [žiūrėta 2020-01-07]. Prieiga per internetą: <<https://www.autodesk.com/products/revit/overview>>
34. LAURINAVIČIŪTĖ, R. Naujos statybos daugiabučių namų projektų Vilniaus mieste daugiakriteris vertinimas prieinamumo gyventojams aspektu/Multiple criteria assessment of the

- new residential projects in Vilnius: affordability aspect. *Mokslas: Lietuvos Ateitis*, 2018, 10. . [žiūrėta 2020-10-19].
35. ORGAN, A., YALCIN, E. Performance evaluation of research assistants by COPRAS method. *European Scientific Journal*, 2016, 12.10: 102-109. [žiūrėta 2020-10-17]. Prieiga per: Google Scholar.
 36. TURANOGLU B. Fuzzy COPRAS method for performance measurement in total productive maintenance: a comparative analysis. *Journal of Business Economics and Management*, 2016, 17.5: 663-684. [žiūrėta 2020-10-17]. Prieiga per: <https://doi.org/10.3846/16111699.2016.1202314>
 37. BALOYI, V. D.; MEYER, L. D. The development of a mining method selection model through a detailed assessment of multi-criteria decision methods. *Results in Engineering*, 2020, 100172. [žiūrėta 2020-10-17]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100172>
 38. CHATTERJEE, N. COPRAS-F base multi-criteria group decision making approach for site selection of wind farm. *Decision Science Letters*, 2013, 2.1: 1-10. [žiūrėta 2020-10-17]. Prieiga per: Growing science
 39. ZAVADSKAS, E. K. ir kiti. Sustainable decision-making in civil engineering, construction and building technology. *Sustainability*, 2018, 10.1: 14. [žiūrėta 2020-10-18]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.3390/su10010014>
 40. STOJČIĆ, M. Application of MCDM methods in sustainability engineering: A literature review 2008–2018. *Symmetry*, 2019, 11.3: 350. [žiūrėta 2020-10-18]. Prieiga per: doi : <https://doi.org/10.3390/sym11030350>
 41. KUTLU GÜNDOĞDU, F. Spherical fuzzy sets and spherical fuzzy TOPSIS method. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2019, 36.1: 337-352.
 42. SIMANACIČIENĖ, R. Kiekybinių daugiakriterijų sprendimo priėmimo metodų jautrumo analizė. Daktaro disertacija. Vilnius: VGTU leidykla „Technika“, 2011, 21-23. [žiūrėta 2020-11-07]. Prieiga per: Google Scholar
 43. KAREIVAITĖ, R. Daugiakriterijų metodų panaudojimas vertinant darnų vystymąsi // *Journal of Management*, 20(1), 2012, 121-127. ISSN 1648-7974. [žiūrėta 2020-10-17]. Prieiga per: Google Scholar.
 44. GINEVIČIUS, R. Objective and subjective approaches to determining the criterion weight in multicriteria models. *Transport and telecommunication*, 2005, 6.1: 133-137. [žiūrėta 2020-09-28]. Prieiga per: Google Scholar
 45. ZAVADSKAS, E. K. A new additive ratio assessment (ARAS) method in multicriteria decision-making / Naujas adityvinis kriterijų santykių įvertinimo metodas (aras) daugiakriteriniams uždaviniams spręsti. *Technological and Economic Development of Economy*, 16(2), 159-172. <https://doi.org/10.3846/tede.2010.10> [žiūrėta 2020-10-05]. Prieiga per: Google Scholar.
 46. NAGY, B. Effect of built-in mineral wool insulations durability on its thermal and mechanical performance. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2020, 139.1: 169-181. [žiūrėta 2020-10-17]. Prieiga per: Science Direct.
 47. GEORGESCU, S.V. Experimental thermal characterization of timber frame exterior wall using reed straws as heat insulation materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2019, 138.4: 2505-2513. [žiūrėta 2020-10-17]. Prieiga per: Science Direct.
 48. Atvirų porų poliuretano putos. [žiūrėta 2020-12-05]. Prieiga per internetą: <<https://termmax.lt/paslaugos/vidiniam-siltinimui-atviru-duru-poliuretano-putos/>>

49. Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija. STR 2.01.02:2016 „Pastatų energinio naudingumo projektavimas ir sertifikavimas“ 2016 m. gruodžio 1 d. Nr. 27896. Prieiga per: <<https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/2c182f10b6b11e6aae49c0b9525cbbb/asr>> [žiūrėta 2020-04-16].
50. Šiltinimo medžiagos. Isover premium. [žiūrėta 2020-12-08]. Prieiga per internetą: <<https://www.mimeta.lt/lt/statybines-medziagos/apsiltinimo-medziagos/siltinimo-vata/plokste-silumos-ir-garso-izolacijai-isover-premium-33-560x870-mm.htm>>
51. Mineralinė vata. [žiūrėta 2020-12-08] Prieiga per internetą: <<https://lemora.lt/izoliacija-sandarinimas/silumos-garso-izoliacija/mineraline-vata/1768-universali-akmens-vatos-plokste-paroc-extra>>
52. Biri celiuliozinė vata. [žiūrėta 2020-12-08] Prieiga per internetą: <http://kokybiskassiltinimas.blogspot.com/2019/02/siltinimo-sprendimai-biri-celiuliozine_87.html>
53. Šilumos izoliacinės plokštės. [žiūrėta 2020-12-08] Prieiga per internetą: <https://finnfoam.lt/produktai/ff-pir/ff-pir-al/>
54. Atvirų porų poliuretano putas. [žiūrėta 2020-12-08] Prieiga per internetą: <https://www.comfortgroup.lt/poliuretano-putos.html>
55. KENDALL, M. Correlation Methods. Publishing House: New York, 1955. [žiūrėta 2020-11-05]. Prieiga per: Google Scholar.
56. ŽUKAS, A. Statybos produktų panaudojimo gaisrinė sauga. Mokomoji knyga. Vilnius: Technika, 2007, 112. [žiūrėta 2020-11-07]. Prieiga per: Google Scholar

Priedai

1 priedas. Ekspertų nuomonių apklausa

KAUNO TEHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

APKLAUSA

Energijos beveik nevartojančio vienbučio karkasinio gyvenamojo namo išorės sienų daugiakriteris vertinimas

Donata Zdanevičienė

Sveiki, esu Donata Zdanevičienė, Statybos valdymo magistrantė Kauno technologijos universitete, Panevėžio technologijų ir verslo fakultete. Savo baigiamąjį magistro darbą rašau tema: Energijos beveik nevartojančio vienbučio karkasinio gyvenamojo namo išorės sienų daugiakriteris vertinimas. Šiam darbui atlikti man yra reikalinga statybos specialistų nuomonė apie vienbučio karkasinio gyvenamojo namo išorės sienų apšiltinimo medžiagos pasirinkimo kriterijų reikšmingumą. Šiam tyrimui atlikti pasirinkau penkis kriterijus.

Prašau Jūsų išreikšti savo nuomonę įvertinant kiekvieną kriterijų balais nuo 0 iki 1. Bendrame rezultate visų rodiklių balų suma turi būti lygi 1.

Šiame darbe tiriama vienodos sudėties medinė karkasinė išorės siena su skirtingomis apšiltinimo medžiagomis. Pasirinktos penkios apšiltinimo medžiagų alternatyvos : mineralinė vata, biri celiuliozinė vata, poliuretano plokštės, atvirų porų poliuretano putos ir akmens vata.

Vienbučio karkasinio gyvenamojo namo išorės sienų apšiltinimo medžiagos pasirinkimo vertinimas, pagal reikšmingumą	Rodikliai					Rodiklių verčių suma
	Sluoksnių rinkos kaina, €/m ²	Degumo klasė, balais	Sluoksnių storis, m	Sluoksnių šilumos laidumo koeficientas, W/m·K	Ekologiškumas, balai	
vertinimas balais nuo 0 iki 1 (suma lygi 1)						= 1

Informacija apie respondento užimamas pareigas: _____

Ačiū už Jūsų atsakymus!

2 priedas. Pranešimas konferencijoje „Technologijų ir verslo aktualijos“

KTU Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas 2020 m. balandžio 24 d., Panevėžys



TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO AKTUALIJOS

MEDINIŲ KARKASINIŲ IŠORĖS SIENŲ APŠILTINIMO MEDŽIAGŲ

DAUGIAKRITERIS VERTINIMAS

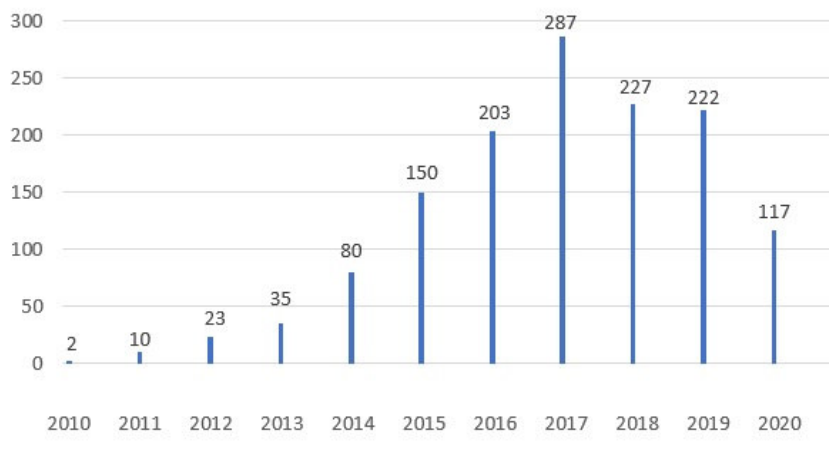
Zdanevičienė D.¹, Aviža D.¹, Zacharovienė E.¹.

¹Kauno technologijos universitetas

Raktiniai žodžiai: beveik energijos nenaudojantys pastatai, COPRAS metodas, vienbutis gyvenamas pastatas.

1. Įvadas

Pastatų energijos vartojimo efektyvumo gerinimas yra vienas iš pagrindinių iššūkių, su kuriais susiduria Europa. Energijos efektyvumas pastatuose yra svarbiausias rodiklis regioninės, nacionalinės ir energetikos politikos tikslas, tarptautiniu lygiu, dėl globalinio atšilimo spartos bei iškastinio kuro išekvojimo [1]. Per praėjusį dešimtmetį galime pastebėti, kaip išaugo straipsnių skaičius šia tematika (žr. 1 pav.).



1 pav. Straipsnių skaičius „Beveik energijos nenaudojančių pastatų“ tema „ScienceDirect“ duomenų bazėje

Atsižvelgiant į natūralių žemės energijos išteklių išekvojimą ir aplinkos taršos augimą, siekiama sumažinti energijos poreikius tuose sektoriuose, kuriuos nustatyti aukščiausi energijos vartojimo efektyvumo rodikliai. Europos Sąjungoje gyvenamųjų namų statybos sektorius atsakingas už apytiksliai 25% galutinio energijos suvartojimo. Vis dėlto daugiausia energijos sunaudojama ne statybos proceso metu, o pastatų gyvavimo laikotarpiu [2].

Vienas iš būdų gyventi energetiškai taupiai ir suvartoti mažesnius CO₂ kiekius – statyti energetiškai efektyvius gyvenamuosius namus. Maksimalus energijos taupymas sumažina šalies ekonomikos

priklausomybę nuo kitų šalių, tiekiančių natūralius gamtinės energijos išteklius. Statybos sektoriui perėjus prie energetiškai efektyvių namų statybos būtų galima sumažinti pastatų energijos sąnaudas ir CO₂ išmetimą į mus supančią aplinką. Pagal pastato išorės sienų konstrukciją nustatomas energijos kiekis, reikalingas pastato šildymui ir vėsinimui, todėl ją reikia optimizuoti, kad šildymo ir vėsinimo išlaidos būtų kuo mažesnės[3].

Darbo tikslas: atlikti A++ energetinio naudingumo klasės vienbučio gyvenamojo pastato medinių karkasinių išorės sienų apšiltinimo daugiakriterį efektyvumo vertinimą COPRAS metodu.

2. Tyrimo metodika

Šiame darbe tiriamos medinės karkasinės A++ klasės išorės sienos su skirtingomis apšiltinimo medžiagomis:

- mineralinė vata „Isover PREMIUM 33“;
- biri celiuliozinė vata „WERROWOOL“;
- poliuretano plokštės „FF-PIR ALI“.

Tyrimo rodiklių palyginimui naudojamas daugiakivslis kompleksinio proporcingo įvertinimo metodas – COPRAS (angl. *Complex Proportional Assessment*).

Šis metodas sukurtas VGTU mokslininkų E.K. Zavadsko ir A. Kaklauskos, o jo pagrindinis principas – lyginamųjų alternatyvų santykinis reikšmingumas Q_i nustatomas remiantis juos apibūdinančiomis teigiamomis S_{+i} ir neigiamomis S_{-i} savybėmis. Kuo Q_i reikšmė didesnė, tuo alternatyva labiau atitinka sprendimą priimančio asmens poreikius [4].

Sukuriama sprendimo matrica $X(1)$ [5]:

$$X = [x_{ij}] = \begin{matrix} a_1 & \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \\ a_2 & \\ \dots & \\ a_m & \end{matrix} \quad (1)$$

čia: a_1 - a_m – lyginamieji variantai ($i=1, m$); x_1 - x_n – efektyvumo rodikliai ($j=1, n$); x_{11} - x_{mn} – efektyvumo rodiklių reikšmės.

$$\overline{x_{ij}} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (2)$$

čia: $i=1..m, j=1..n$.

Ši matrica normalizuojama pagal formulę (2). Gaunama normalizuotoji matrica \bar{X} , kurios visos efektyvumo reikšmės – bedimensiniai dydžiai (3):

$$\bar{X} = \overline{x_{ij}} = \begin{matrix} a_1 & \begin{bmatrix} \overline{x_{11}} & \overline{x_{12}} & \dots & \overline{x_{1n}} \\ \overline{x_{21}} & \overline{x_{22}} & \dots & \overline{x_{2n}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \overline{x_{m1}} & \overline{x_{m2}} & \dots & \overline{x_{mn}} \end{bmatrix} \\ a_2 & \\ \dots & \\ a_m & \end{matrix} \quad (3)$$

Sudaroma svertinė normalizuotoji matrica \hat{X} (4):

$$\hat{X} = \hat{x}_{ij} = \begin{matrix} a_1 & \begin{bmatrix} \hat{x}_{11} & \hat{x}_{12} & \dots & \hat{x}_{1n} \\ \hat{x}_{21} & \hat{x}_{22} & \dots & \hat{x}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hat{x}_{m1} & \hat{x}_{m2} & \dots & \hat{x}_{mn} \end{bmatrix} \\ a_2 & \\ \dots & \\ a_m & \end{matrix} \quad (4)$$

Atliekamas reikšmių minimizavimas pagal formulę[6] (5):

$$S_i^+ = \sum_{j=k+1}^m \hat{x}_{ij}. \quad (5)$$

Visų minimizuojamų reikšmių suma pagal formulę (6):

$$S^- = \sum_{i=1}^n S_i^-. \quad (6)$$

Reikšmingumas randamas pagal formulę (7):

$$Q_i = S_i^+ + \frac{\sum_{i=1}^n S_i^-}{S_i^- \sum_{i=1}^n \frac{1}{S_i^-}}. \quad (7)$$

Reikšmingumų santykis randamas pagal formulę (8):

$$N_i = \frac{Q_i}{\max Q_i} \cdot 100\%. \quad (8)$$

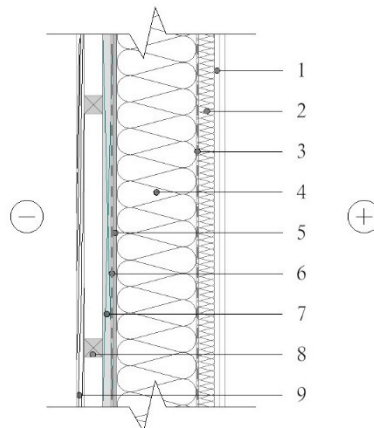
3. Tyrimo eiga ir rezultatai

Šiame darbe tiriama vienodos sudėties medinė karkasinė išorės siena su skirtingomis apšiltinimo medžiagomis. Tiriamasis modelis pateiktas 2 paveikslėlyje. Tyrimui bus naudojami keturi rodikliai: sluoksnio šilumos laidumo koeficientas, reikalingas storis bei kaina. Šie pagrindiniai rodikliai dažniausiai nulemia galutinį sprendimą pasirenkant vieną ar kitą medžiagą.

„ISOVER PREMIUM 33“ - nedegi, šilumą ir garsą izoliuojanti mineralinės vatos plokštė. Pagaminta pagal naują technologiją, iš pilkos spalvos vatos pluošto; plokštės paviršius be padengimo. Standi, elastinga, lengvai montuojama. Skirta naudoti gyvenamosios, visuomeninės ir pramoninės paskirties pastatuose [7].

Celiuliozė naudojama kaip izoliacinė medžiaga daugiau nei 70 metų. „Werrowool“ ekovata sudaro popieriaus atliekos, todėl šios vatos gamyba reikšmingai prisideda prie atliekų perdirbimo ir ekonominio ciklo. „Werrowool“ ekovata gali būti perdirbama - ji gali būti surenkama iš senos namo konstrukcijos ir pakartotinai panaudota kaip izoliacija [8].

FF-PIR šilumos izoliacinės plokštės pagamintos iš standžių poliizocianurato putų šerdies ir iš abiejų pusių padengtos daugiasluoksne aliuminio folija (ar kita difuzijai nelaidžia danga). Poliizocianuratas - tai izoliacinė medžiaga, pasižyminti itin mažu šilumos laidumo koeficientu, todėl sukuriama labai efektyvi šilumos izoliacija, kuri yra iki dviejų kartų plonesnė lyginant su kitomis izoliacinėmis medžiagomis [9].



2 pav. Išorės sienos mazgas: 1- gipso kartono plokštė 2 sl.; 2 – 50mm akmens vata bei vidinis medinis tašas 45mm storio; 3 – garo izoliacinė plėvelė; 4 – X tiriamasis sluoksnis; 5 – priešvėjinė gipso kartono plokštė; 6 – difuzinė plėvelė; vertikalus tašas 25mm; horizontalus tašas 45x45mm, 600mm žingsnis; vertikalios fasadinės dailylentės

Norint pasiekti A++ energetinio naudingumo klasę, vienbučio gyvenamo pastato išorės sienų apšiltinimo sluoksnio storis turėtų būti :

- naudojant mineralinę vatą Isover PREMIUM 33 - 350mm;
- naudojant birią celiuliozinę vatą WERROWOOL – 450mm;
- naudojant poliuretano plokštės FF-PIR ALI – 250mm.

Degumo klasės palyginimui sukuriama balų sistema, t. y. A klasei yra skiriamas 1 balas, B klasei – 2 balai, C klasei – 3 balai, D klasei – 4 balai, E klasei – 5 balai. Kuo balas didesnis – tuo medžiaga mažiau atspari ugniai.

A++ gyvenamieji pastatai išsiskiria dideliu energijos efektyvumu. Pagal šiuo metu galiojančius ir keliamus reikalavimus, A++ klasės gyvenamiesiems pastatams atitvarų šilumos perdavimo koeficientas turi būti, ne didesnis nei $0,11 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ [10].

Pirmajame vertinimo etape yra suformuojama sprendimų priėmimo matrica (1 lentelė).

1 lentelė

Sprendimų priėmimo matrica

Apšiltinimo medžiagos alternatyvos	Rodikliai			
	Sluoksnio šilumos laidumo koeficientas, $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$	Sluoksnio storis, m	Degumo klasė, balais	Sluoksnio rinkos kaina, €/m ²
Mineralinė vata Isover PREMIUM 33	0,033	0,350	1	16,39
Biri celiuliozinė vata WERROWOOL	0,039	0,450	2	10,85
Poliuretano plokštės FF-PIR ALI	0,022	0,250	5	30,10
Min. ar max. rodiklis	min.	min.	min.	min.
Rodiklių reikšmingumai, q_j	0,250	0,250	0,250	0,250

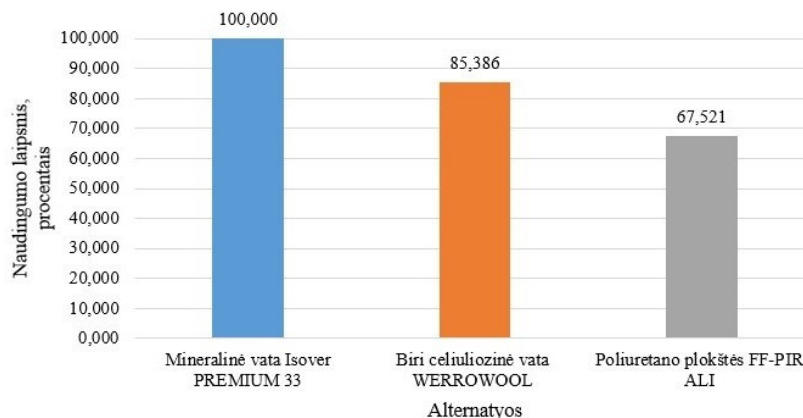
Antrajame etape yra atliekama pradinės matricos normalizacija (2 lentelė).

2 lentelė

Normalizuota matrica

Apšiltinimo medžiagos alternatyvos	Rodikliai			
	Sluoksnio šilumos laidumo koeficientas, $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$	Sluoksnio storis, m	Degumo klasė, balais	Sluoksnio rinkos kaina, €/m ²
Mineralinė vata Isover PREMIUM 33	0,088	0,083	0,031	0,071
Biri celiuliozinė vata WERROWOOL	0,104	0,107	0,063	0,047
Poliuretano plokštės FF-PIR ALI	0,059	0,060	0,156	0,131
Min. ar max. rodiklis	min.	min.	min.	min.

Sekančiuose COPRAS metodo etapuose yra atliekami skaičiavimai ir nustatoma vertinamų alternatyvų prioriteto eilutė.



3 pav. Šilumos izoliacijos naudingumo laipsnis

Taigi atlikus empirinį tyrimą COPRAS metodu nustatyta, kad efektyviausia A++ energinio naudingumo klasės vienbučio gyvenamo pastato medinę karkasinę išorės sieną šiltinti mineralinės vatos plokštėmis (žr. 3 pav.). Ši alternatyva yra 32,48 procentais efektyvesnė lyginant ją su poliuretano plokščių alternatyva.

Išvados

1. Atlikus A++ energetinio naudingumo klasės vienbučio gyvenamojo pastato medinių karkasinių išorės sienų apšiltinimo daugiakriterį efektyvumo vertinimą COPRAS metodu, nustatyta, kad iš pateiktų alternatyvų racionaliausia apšiltinimui naudoti mineralinę vatą.
2. Antroje vietoje liko biri celiuliozinė vata ir ši alternatyva yra 14,61 procento mažiau efektyvi lyginant ją su pirmąja alternatyva. Šios apšiltinimo medžiagos šilumos laidumo koeficientas yra didžiausias, bet atsparumas ugniai didesnis nei poliuretano plokščių FF-PIR.
3. Poliuretano plokštės „FF-PIR ALI“ liko trečiojoje vietoje. Šios plokštės atsparumas ugniai yra pats mažiausias. Šiltinimas „FF-PIR ALI“ plokšte yra 1,84 karto brangesnis nei renkantis apšiltinimą mineraline vata „Isover PREMIUM 33“.

Literatūra

1. **Tamene, Y.** Thermal and economic study on building external walls for improving energy efficiency // *International Journal of Heat and Technology* [interaktyvus], 37(1), 2019, 219-228.
2. **Філоненко, О.** Thermal modernization of the panel buildings external walls // *International Journal of Engineering and Technology* [interaktyvus], 7(3.2), 2018, 116-122.
3. **Kisilewicz, T.** Active thermal insulation as an element limiting heat loss through external walls // *Energy and Buildings* [interaktyvus], 205, 2019, 109541.
4. **Aviža, D.** Pastato atitvarų racionalaus termoizoliacinio sluoksnio daugiakislė selektonovacija. Daktaro disertacija. Vilnius: VGTU leidykla „Technika“, 2016, 68-69.
5. **Simanavičienė, R.** Kiekybinių daugiakislių sprendimo priėmimo metodų jautrumo analizė. Daktaro disertacija. Vilnius: VGTU leidykla „Technika“, 2011, 21-23.
6. **Kareivaitė, R.** Daugiakriterių metodų panaudojimas vertinant darnų vystymąsi // *Journal of Management*, 20(1), 2012, 121-127. ISSN 1648-7974.
7. Mineralinės vatos plokštės. Prieiga per internetą: < <https://www.isover.lt/products/naujienaisover-premium-33> > [žiūrėta 2020-04-02]

8. Celiuliozės vata. Prieiga per internetą: <<http://werrowool.eu/celiulioz-s-pluosto-vilna/savyb-s-ir-privalumai>> [žiūrėta 2020-04-10].
9. Poliuretano plokščių specifikacijos. Prieiga per internetą: <<https://www.finnfoam.lt/produktai/ff-pir/specifikacijos>> [žiūrėta 2020-04-11].
10. Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija. STR 2.01.02:2016 „Pastatų energinio naudingumo projektavimas ir sertifikavimas“ 2016 m. gruodžio 1 d. Nr. 27896. Prieiga per:<<https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/2c182f10b6bf11e6aae49c0b9525cbbb/asr>> [žiūrėta 2020-04-16].
11. **Thiel, C.** A materials life cycle assessment of a net-zero energy building // *Energies*, 6(2), 2013, 1125-1141.
12. **Sørensen, Å.** Energy measurements at Skarpnes zero energy homes in Southern Norway: Do the loads match up with the on-site energy production? // *Energy Procedia*, 132, 2017, 567-573.
13. Arcuri, N. The role of the thermal mass in nZEB with different energy systems // *Energy Procedia*, 101, 2016, 121-128.
14. **Tumminia, G.** Life cycle energy performances of a Net Zero Energy prefabricated building in Sicily // *Energy Procedia*, 140, 2017, 486-494.
15. **Sørensen, Å.** Zero emission office building in Bergen: Experiences from first year of operation // *Energy Procedia*, 132, 2017, 580-585.
16. **Simona, P. L.** Increasing the energy efficiency of buildings by thermal insulation // *Energy Procedia*, 128, 2017, 393-399.