



Kauno technologijos universitetas
Statybos ir architektūros fakultetas

**Nulinės energijos suvartojimo biurų pastatų projektavimo ir
ekonomiškumo analizė**
Baigiamasis magistro projektas

Monika Dobrovolskytė
Projekto autorė

Prof. Dr. Andrius Jurelionis
Vadovas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Nulinės energijos suvartojimo biuro pastatų projektavimo ir ekonomiškumo analizė

Baigiamasis magistro projektas

Darnūs ir energetiškai efektyvūs pastatai (6211EX006)

Monika Dobrovolskytė

Projekto autorė

Prof. Dr. Andrius Jurelionis

Vadovas

Lekt. Dr. Jurgita Černeckienė

Recenzentė

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Monika Dobrovolskytė

Nulinės energijos suvartojimo biurų pastatų projektavimo ir ekonomiškumo analizė

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Monikos Dobrovolskytės, baigiamasis projektas tema „Nulinės energijos suvartojimo biurų pastatų projektavimo ir ekonomiškumo analizė“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjusi.

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
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

Magistro baigiamojo projekto užduotis

Studijų programa: DARNŪS IR ENERGETIŠKAI EFEKTYVŪS PASTATAI

Baigiamojo projekto tema (lietuvių k.):
NULINĖS ENERGIJOS SUVARTOJIMO PASTATŲ PROJEKTAVIMO IR EKONOMIŠKUMO ANALIZĖ

Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanų potvarkiu Nr.: ST18-F-09-9

(lietuvių k.):
NULINĖS ENERGIJOS SUVARTOJIMO BIURŲ PASTATŲ PROJEKTAVIMO IR EKONOMIŠKUMO ANALIZĖ

(anglų k.):
ANALYSIS OF COST-OPTIMAL DESIGN FOR ZERO ENERGY OFFICE BUILDINGS

Pradiniai duomenys darbui (pagal poreikį):

Realaus objekto duomenys

Baigiamojo projekto dalys:	Atlikti
Įvadas	x
Literatūros apžvalga	x
Metodologija	x
Eksperimentiniai tyrimai	<input type="checkbox"/>
Analitiniai tyrimai	x
Skaitiniai tyrimai	x
Ekonominė dalis	x
Išvados	x

Kita informacija (pagal poreikį):

Vadovas:
(indėlis _____ %)

_____ *pareigos, vardas, pavardė* _____ *parašas*

Studentas:

_____ *vardas, pavardė* _____ *parašas*

Dobrovolskytė, Monika. Nulinės energijos suvartojimo biurų pastatų projektavimo ir ekonomiškumo analizė. Magistro studijų baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Andrius Jurelionis; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): inžinerija, statybos inžinerija (E05)

Reikšminiai žodžiai: nulinės energijos suvartojimo pastatai, dinaminis energinis modeliavimas, atsinaujinančios energijos šaltiniai

Kaunas, 2020. 43 p.

Santrauka

Magistro baigiamajame darbe nagrinėjamos nulinės energijos suvartojimo biurų pastatų projektavimo galimybės Lietuvoje. Atlikus literatūros analizę pastebėta, kad Lietuvoje ši tyrimų sritis nėra daug išplėtotą, nors nulinės energijos suvartojimo pastatų poreikis neišvengiamai didėja. Vieni svarbiausių parametru, kuriems reikia skirti ypatingą dėmesį projektuojant nulinės energijos suvartojimo pastatus yra skaidrių atitvarų parametrai, jų išdėstymas pasaulio šalių atžvilgiu, atsinaujinančių energijos šaltinių panaudojimas, ilginių šiluminių tiltelių minimizavimas bei efektyvus inžinerinių sistemų valdymas. Baigiamajame projekte atlikta biurų pastato Vilniuje ekonomiškumo bei energijos suvartojimo analizė. Naudojantis programine energijos sąnaudų modeliavimo įranga *IDA ICE* sukurtas tiriamojo objekto kompiuterinis modelis. Modelis kurtas pagal projektinius duomenis, vėliau jame integruoti atsinaujinantys energijos šaltiniai: saulės kolektoriai ir geoterminiai gręžiniai. Modeliui pritaikyta optimizavimo funkcija, siekiant išrinkti mažiausiai energijos vartojančius sprendinius. Įvertinta parenkamų sprendinių įtaka pastato statybos kainai.

Magistro baigiamojo projekto sudėtis: lentelių skaičius darbe – 18 vnt., paveikslų skaičius – 16 vnt., literatūros šaltinių skaičius – 13 vnt.

Dobrovolskytė, Monika. Analysis of Cost-Optimal Design for Zero Energy Office Buildings. Master's Final Degree Project / supervisor prof. dr. Andrius Jurelionis; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Engineering, Civil Engineering (E05)

Keywords: zero energy buildings, energy modelling, IDA ICE

Kaunas, 2020. 43 p.

Summary

The master thesis examines the possibilities of designing zero energy office buildings in Lithuania. Literature analysis has shown that this area of research is not well developed in Lithuania, although the need for zero-energy buildings is inevitably increasing. The most important parameters that should be considered when designing zero-energy buildings are window parameters and orientation, the parameters of transparent barriers, integration of renewable energy sources, minimisation of thermal bridges, as well as efficient control of building services system. In the final project the economical and energy consumption analysis of the office building in Vilnius was performed. A numerical model of the building has been created using IDA ICE dynamic energy simulation tool. Boundary conditions were based on design data and in the later stage – renewables, such as solar PV panels and geothermal boreholes were integrated in the model. Optimization function was used to select the most energy efficient solutions. The impact of the chosen solutions on the building construction price was estimated.

The composition of master's thesis: number of tables - 18, number of pictures - 16, number of literature sources - 13.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Įvadas.....	10
1. Literatūros apžvalga	11
1.1. Energijos nevirtojantis pastatas	11
1.2. Energijos nevirtojančio pastato projektavimo principai	13
1.3. Atsinaujinančių energijos šaltinių integravimas.....	17
1.4. Energijos vartojimo efektyvumas	18
2. Tyrimų metodologija.....	21
2.1. Tyrimo objektas.....	21
2.1.1. Pastato fasado projektiniai sprendiniai.....	21
2.1.2. Šildymo sistemos projektiniai sprendiniai.....	21
2.1.3. Vėdinimo sistemos projektiniai sprendiniai	22
2.1.4. Oro kondicionavimo sistemos projektiniai sprendiniai.....	22
2.2. Pastato energijos sąnaudų analizė	22
2.3. Kompiuterinis modeliavimas.....	25
2.3.1. Bandomojo modelio sudarymas	25
2.3.2. Tiriamo pastato kompiuterinio modelio sudarymas	27
2.3.3. Pastato modelis su atsinaujinančiais energijos šaltiniais.....	29
2.4. Parametrų optimizavimas	31
2.4.1. Vėdinimo sistemos optimizavimas.....	31
2.4.2. Skaidrių atitvarų parametrų optimizavimas.....	32
2.5. Rekomendacijos nulinio energijos suvartojimo pastatui pasiekti	36
3. Ekonominė dalis.....	37
4. Rezultatų apibendrinimas.....	39
Išvados	40
Literatūros sąrašas	41
Priedai.....	42

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Nulinės energijos suvartojimo pastatų apibrėžimų suvestinė (Torcellini et al. 2006)	11
2 lentelė. Keturi modelio detalumo lygiai ir jų skaičiavimų trukmė (Hilliaho et al., 2015)	16
3 lentelė. Buto energijos sąnaudos ir energijos taupymas (Hilliaho et al., 2015)	16
4 lentelė. Bendrieji pastato duomenys	21
5 lentelė. Tiriamojo pastato konstrukcijų šilumos perdavimo koeficientų palyginimas.....	23
6 lentelė. Bandomojo modelio pastato duomenys.....	26
7 lentelė. Modeliavimo rezultatai.....	26
8 lentelė. Tiriamojo pastato energijos poreikio, apskaičiuoto taikant dinaminį sąnaudų modeliavimą, palyginimas.....	28
9 lentelė. Modeliuojamo A++ klasės pastato atitvarų charakteristikos pagal STR 2.01.02:2016. ...	29
10 lentelė. Saulės kolektorių pagaminamas energijos kiekis	30
11 lentelė. A++ klasės modelio skaičiavimų rezultatai.....	30
12 lentelė. Per metus suvartojamas energijos kiekis pastatui įdiegus saulės šėšėliavimo priemones	30
13 lentelė. Optimizavimo skaičiavimų rezultatai	32
14 lentelė. Tiriamų langų tipų parametrai	32
15 lentelė. Langų optimizavimo skaičiavimų suvestinė	34
16 lentelė. Pastato statybos kaina su atsinaujinančiais energijos šaltiniais.....	37
17 lentelės tęsinys. Pastato statybos kaina su atsinaujinančiais energijos šaltiniais.....	38
18 lentelė. Realaus pastato bei modelio įrangos preliminarios kainos palyginimas	38

Paveikslų sąrašas

1 pav. Projektavimo principai energijos beveik nevartojančiam pastatui (Aelenei, 2012).....	14
2 pav. Pagrindinės tiriamo kambario geometrinės savybės ir vidutinis bendras šilumos perdavimo koeficientas (Murano, 2018).....	19
3 pav. Tyrimo objektas – biurų pastatas Vilniuje, Viršuliškių skg. 26	21
4 pav. Tiriamojo pastato atitvarų plotų pasiskirstymas.....	22
5 pav. Tiriamojo pastato atitvarų šilumos nuostolių balansas	23
6 pav. Bendra tiriamojo pastato priežiūros ir eksploataavimo išlaidų suvestinė	24
7 pav. Tiriamojo pastato 2018 m. elektros sąnaudos	24
8 pav. Tiriamojo pastato 2018 m. elektros sąnaudų pasiskirstymo diagrama.....	25
9 pav. Bandomasis modelis <i>IDA ICE</i> aplinkoje.....	25
10 pav. Tiriamojo pastato modelis <i>IDA ICE</i> aplinkoje ir vizualizacijoje	27
11 pav. Būdinga aukšto patalpa	28
12 pav. Modelių skirtumai	28
13 pav. Optimalios vėdinimo sistemos temperatūros grafikas.....	31
14 pav. Skaidrių atitvarų optimizavimo skaičiavimų rezultatų apibendrinimas	33
15 pav. Energijos sąnaudų palyginimas esant skirtingiems langų tipams	33
16 pav. Metinių išlaidų šildymui palyginimas	37

Ivadas

Darbo tikslas – nustatyti technines priemones administracinės paskirties pastatui pasiekti nulinės energijos suvartojimą (angl. *zero energy buildings - ZEB*) taikant dinaminį energijos sąnaudų modeliavimą, bei įvertinti ekonominį šių sprendimų pagrįstumą.

Darbo uždaviniai:

1. Atlikti literatūros apžvalgą beveik nulinės energijos pastatų projektavimo ir eksploatavimo srityje.
2. Atlikti tiriamo objekto energijos sąnaudų analizę, išanalizuoti sprendinių įtaką energijos suvartojimui.
3. Sukurti mažesnės apimties kompiuterinį modelį, išsiaiškinti programinės įrangos galimybes ir tinkamumą tyrimui.
4. Sukurti tiriamo pastato kompiuterinį modelį ir palyginti realius duomenis su modeliavimo rezultatais.
5. Pateikti rekomendacijas techninėms priemonėms nulinės energijos pastatui pasiekti, įvertinti šių priemonių ekonominį pagrįstumą.

Mokslinis naujumas

Europos šalyse, JAV bei Australijoje yra atlikta nemažai tyrimų nulinės energijos pastatų energijos suvartojimo ir projektavimo tematika. Apžvelgtos tokios temos kaip komfortiškų mikroklimato parametrų palaikymas, energijos taupymas, atsinaujinančių energijos šaltinių panaudojimas projektuojant pastato inžinerines sistemas. Mokslininkai naudojo įvairias metodikas tyrimams atlikti, tačiau vienas plačiausiai naudojamų buvo dinaminis energijos sąnaudų modeliavimas įvairiomis sąlygomis bei skirtingų projektinių sprendinių derinimas ir gautų rezultatų palyginimas.

Lietuvoje ši sritis kol kas nėra daug išplėta, tačiau nulinės energijos suvartojimo pastatų poreikis auga. Dėl to svarbu nustatyti, kokios galimybės nulinės energijos suvartojimo pastatą suprojektuoti Lietuvos klimato sąlygomis bei kaip galima efektyviausiai panaudoti atsinaujinančius energijos šaltinius energijos poreikiui padengti.

Praktinis pritaikomumas

Atlikus magistro baigiamąjį projektą tikimasi iš gautų kompiuterinio pastato modeliavimo rezultatų nustatyti, kokie optimalūs projektiniai sprendiniai gali būti pritaikyti projektuojant nulinės energijos suvartojimo pastatą Lietuvos sąlygomis bei įvertinti jų ekonominį pagrįstumą.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Energijos nevirtojantis pastatas

Nulinės energijos pastato apibrėžimai gali būti skirtingi atsižvelgiant į projekto tikslus, projektavimo komandos bei pastato savininko vertybes. Pastatų savininkams dažniausiai rūpi energijos sąnaudos. Projektuotojas gali būti suinteresuotas pastato energijos naudojimu, atsižvelgiant į energinio naudingumo reikalavimus. Užsakovai, kurie laikosi tvaraus vystymosi strategijos, gali būti suinteresuoti anglies pėdsako (angl. *carbon footprint*) ar išmetamų teršalų kiekio mažinimu. Kalbant apie energijos nevirtojančius pastatus, pasauliniame kontekste išskiriamos keturios dažniausiai naudojamos sąvokos: grynoji nulinė vietos energija (angl. *Net Zero Site Energy*), grynosios nulinės energijos šaltinis (angl. *Net Zero Source Energy*), grynosios nulinės energijos kainos (angl. *Net Zero Energy Cost*) ir grynosios nulinės energijos emisijos (angl. *Net Zero Energy Emissions*) [1].

Grynosios nulinės vietos energijos (angl. *Net Zero Site Energy*) apibrėžimas reiškia, kad metinis energijos balansas grindžiamas tinklo sąveika iki statybvietės ribos, t. y., statybvietėje pagaminama tiek pat energijos, kiek sunaudojama. Pavyzdžiui, automobilių stovėjimo aikštelėje sumontuotos saulės kolektorių sistemos arba mažosios vėjo jėgainės pagamina tiek energijos, kiek sunaudojama aikštelės reikmėms.

Grynosios nulinės energijos šaltinis (angl. *Net Zero Source Energy*) reiškia, kad šaltinis pagamina tiek energijos, kiek pastatas sunaudoja per metus. Šaltinio energija - pirminė energija, naudojama energijai generuoti ir tiekti. Norint apskaičiuoti bendrą pastato energijos kiekį, tiekiamą ir pagaminamą energija dauginamos iš energijos gamybos ir perdavimo koeficientų.

Grynosios nulinės energijos kainos (angl. *Net Zero Energy Cost*) tipas grindžiamas ekonomine pusiausvyra, kuomet pastato sąskaitos už per metus suvartotą energiją yra lygios pinigų sumai, kurią komunalinės įmonės sumoka pastato savininkui už atsinaujinančią energiją, tiekiamą tinklui. Vis dėlto, administracinės paskirties pastatų atveju nulinį suvartojimą labai sunku pasiekti, nes jis priklauso nuo komunalinių paslaugų tarifų. Taigi, vienais metais įvykdytas tikslas pasiekti nulinį sąnaudų balansą, kitais metais gali būti nebeįgyvendintas.

Ketvirtojo tipo grynosios nulinės energijos emisijos (angl. *Net Zero Energy Emissions*) atveju pastatai gamina tiek atsinaujinančios energijos, kiek sunaudoja iš energiją gaminančių šaltinių, kurie išskiria teršalus į aplinką. Pastato išskiriama CO₂ emisija kompensuojama naudojant atsinaujinančių energijos šaltinių pagamintą energiją.

Vienas pirmųjų šiuos apibrėžimus nagrinėjusių mokslininkų sudarė kiekvieno iš šių nulinės energijos suvartojimo pastatų tipų suvestinę (žr. 1 lentelę):

1 lentelė. Nulinės energijos suvartojimo pastatų apibrėžimų suvestinė (Torcellini et al. 2006)

Tipas	Privalumai	Trūkumai	Kylančios problemos
1	2	3	4
Grynosios nulinės vietos energijos	Lengva įgyvendinti; Patikrinamas atliekant matavimus objekte; Jokie išoriniai veiksniai neturi įtakos našumui; Lengvai suprantama statybininkų bendruomenei; Skatinami energiją tapančių pastatų projektai.	Norint kompensuoti gamtines dujas reikalinga daugiau saulės kolektorių; Atsižvelgiama ne į visas komunalines išlaidas; Neįmanoma palyginti kuro rūšių; Neatsižvelgiama į neenergetinius skirtumus tarp kuro rūšių (tiekimo galimybes, taršą).	

1 lentelės tęsinys. Nulinės energijos suvartojimo pastatų apibrėžimų suvestinė (Torcellini et al. 2006)

1	2	3	4
Grynosios nulinės energijos šaltinio	Galima palyginti kuro tipus; Lengviau pasiekti nulinį energijos suvartojimą.	Neatsižvelgiama į neenergetinius skirtumus tarp kuro rūšių (tiekinimo galimybes, taršą); Per platūs šaltinio skaičiavimai; Šaltinio energijos suvartojimo apskaita gali turėti didesnę poveikį, negu efektyvumo technologijos; Atsižvelgiama ne į visas energijos sąnaudas.	Atsiranda poreikis kurti energijos konvertavimo koeficientus, kuriems apibrėžti reikalingas didelis kiekis informacijos.
Grynosios nulinės energijos kainos	Lengva įgyvendinti; Rinkos jėgos lemia gerą pusiausvyrą tarp kuro rūšių; Galima valdyti paklausą; Tikrinama pagal komunalinius mokesčius.	Gali neatspindėti nacionalinių paklausos tinklų įtakos, nes papildoma saulės energijos gamyba gali būti vertingesnė norint sumažinti paklausą, naudojant vietos saugyklas nei eksportuojant į tinklą; Reikalaujama sudaryti apskaitos sutartis, kad eksportuota elektra galėtų kompensuoti mokesčius; Dėl labai nestabilių energijos verčių sunku sekti sąnaudas laikotarpyje.	Norint kompensuoti mėnesinius paslaugų ir infrastruktūros mokesčius, reikia peržengti nulinės energijos pastato ribas; Nėra gerai išvystytų matavimų.
Grynosios nulinės energijos emisijos	Geresnis atsinaujinančios energijos modelis; Lengviau pasiekti nulinį energijos suvartojimą; Skirtumų tarp kuro rūšių apskaita (tarša, šiltnamio efektą sukeliančios dujos)		Reikalingi tikslūs išmetamų teršalų faktoriai.

Energijos suvartojimas pastatuose kelia didelį susirūpinimą Europos lygiu. Europos komisijos duomenimis nustatyta [2], kad pastatai suvartoja maždaug 40 % pirminės energijos ir sudaro 36 % šiltnamio efektą sukeliančių dujų išsiskyrimų. Svarbu atkreipti dėmesį į tai, kad iškastinio kuro atsargos yra ribotos, o šiltnamio efektas veikia nusistovėjusią klimato pusiausvyrą ir sukelia visuotinį atšilimą. Dėl šių priežasčių 2018 metais buvo priimta Europos Parlamento ir Europos Sąjungos Tarybos direktyva 2018/844 (kuria iš dalies keičiama direktyva 2010/31/ES dėl pastatų energinio naudingumo ir direktyva 2012/27/ES dėl energijos vartojimo efektyvumo). Šios direktyvos 6 straipsnyje nurodyta, kad valstybės narės turi imtis būtinų priemonių, kad nauji pastatai atitiktų minimalius energinio naudingumo reikalavimus. Direktyvos 2010/31/ES 9 straipsnyje numatyta, kad valstybės narės ne vėliau kaip 2020 m. gruodžio 31 d. turi užtikrinti, kad visi nauji pastatai būtų beveik nulinės energijos [3]. Beveik energijos nevartojantis pastatas dažnai apibrėžiamas kaip toks, kurio energijos balansas yra 0 kWh/m² per metus. Beveik nulinis ar labai mažas energijos poreikis patenkinamas naudojant atsinaujinančius energijos šaltinius, tokius kaip saulės, vėjo, biomasės ar geoterminė energija. Kadangi direktyvoje nenurodomi tik minimalūs ar maksimalūs reikalavimai energijos suvartojimui, taip pat išsami informacija apie energinio naudingumo skaičiavimo sistemą, valstybės narės turi pačios nusistatyti aukšto energinio naudingumo ir iš atsinaujinančių šaltinių pagamintos energijos kiekio reikšmes pagal savo vietos klimato sąlygas bei strateginius interesus [4]. Daugelyje ES valstybių narių ši koncepcija yra įvairiai interpretuojama, dažniausiai priklausomai nuo klimato sąlygų. 2014 metų duomenimis, tik 13 ES valstybių narių pateikė pagal direktyvą pritaikytą

beveik energijos nevartojančio pastato apibrėžimą, ir tik 8 iš jų apibrėžė skaitinius pirminės energijos panaudojimo tikslus bei atsinaujinančių energijos šaltinių panaudojimą. Tarp šių šalių yra ir Lietuva.

Lietuvoje pagal šiuo metu galiojantį statybos techninį reglamentą [5], energijos beveik nevartojantys pastatai yra apibrėžiami kaip „atitinkantys A++ energinio naudingumo klasės reikalavimus, labai aukšto energinio naudingumo pastatai, kurių energijos suvartojimas beveik lygus nuliui, o didžiąją dalį suvartojamos energijos sudaro atsinaujinančių energijos šaltinių gaminama energija“. Įvairūs atsinaujinančių energijos šaltinių sistemų deriniai gali būti integruoti į pastato inžinerines sistemas, atsižvelgiant į pastato orientaciją pasaulio šalių atžvilgiu, vietovę bei klimatinės sąlygas.

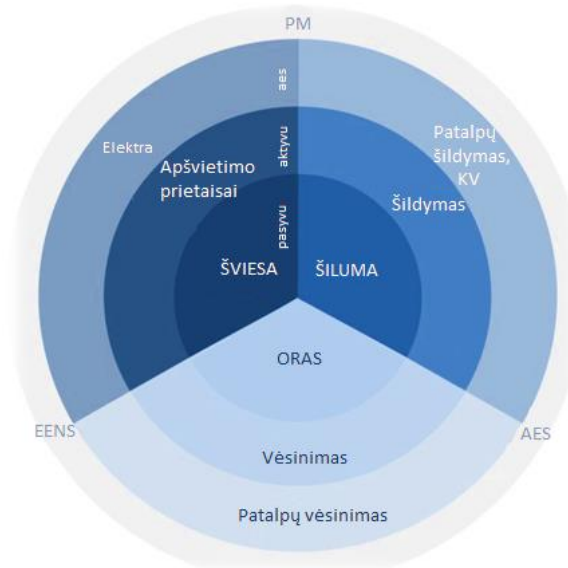
Mokslininkai nustatė [6], kad mažiausiai 9 valstybės narės labai aukštą energinį naudingumą pateikia kaip vieną geriausių energijos vartojimo efektyvumo sertifikato energijos klasių, o kitose šalyse tai reiškia, kad 2014 metų reikalavimais sumažėja nuo 10 % iki 25 % ir 50 % – 60 % energijos poreikio. Atsinaujinančios energijos suvartojimas svyruoja nuo 0 % iki 50 %, bet kai kurios valstybės nustatė specifinius minimalius atsinaujinančios energijos suvartojimo rodiklius. Beveik energijos nevartojančio pastato energijos efektyvumas kartais apibrėžiamas tik pirminės suvartojamos energijos kiekiu, tačiau kitais atvejais papildomi parametrai yra šilumos perdavimo koeficientai (U vertės), CO_2 išskyrimas, grynoji ir galutinė energija šildymui, vėsinimui ir galbūt kitam energijos naudojimui.

1.2. Energijos nevartojančio pastato projektavimo principai

Vienas pagrindinių pastato energijos suvartojimo rodiklių yra pastato šilumos nuostoliai. Jie parodo, koks energijos kiekis reikalingas šilumos nuostoliams padengti. Skaičiuojant pastato šilumos nuostolius svarbu atsižvelgti į šilumos nuostolius per atitvaras, ilginius šiluminius tiltelius bei šilumos nuostolius dėl oro infiltracijos.

Nulinės energijos suvartojimo pastatai turi būti labai sandarūs, o tai reiškia, kad šilumos nuostoliai per atitvaras, ilginius šiluminius tiltelius bei dėl oro infiltracijos turi būti kiek įmanoma mažesni. Tai galima pasiekti įstatant energetiškai efektyvius langus, naudojant šilumą išsaugančias priemones, tokias kaip rūsio perdangos ir kitų ilginių šiluminių tiltelių šiltinimas kokybiška šilumos izoliacija [7]. Kadangi pastatas yra labai sandarus, šviežias lauko oras į pastatą natūraliai nepatenka, todėl norint palaikyti tinkamą žmogui mikroklimatą, privaloma įrengti mechaninę vėdinimo sistemą, kuri tiekėtų ir šalintų reikalingą oro kiekį. Projektuojant mechaninę vėdinimo sistemą svarbu atsižvelgti į tai, kad ji būtų su šilumograža. Taip galima atgauti dalį patalpose išskiriamos šilumos per šalinamą orą, kuris yra šiltesnis už tiekiamą. Taip patalpoms užtikrinamas reikalingas oro kiekis bei neprarandama šiluma.

Projektavimo principai energijos nevartojančiam pastatui panašūs kaip ir pasyviajam pastatui bei susideda iš pasyviųjų metodų (PM), efektyviai energiją naudojančių sistemų (EENS) ir atsinaujinančiosios energijos sistemų (AES). Remiantis mokslininkų analize [4], buvo sudaryta schema (žr. 1 pav.).



1 pav. Projektavimo principai energijos beveik nevartojančiam pastatui (Aelenei, 2012)

Pirmasis beveik energijos nevartojančio pastato projektavimo principas yra skirtas sumažinti reikalingą energijos kiekį pasyviu būdu (diagramos vidinis ratas). Pasyvūs metodai daro tiesioginę įtaką pastato inžinerinėms sistemoms ir netiesioginę įtaką atsinaujinančios energijos gamybai, todėl nulinės energijos pastatų projektavimas turėtų prasidėti nuo pasyvaus ir tvaraus modeliavimo. Atsižvelgiant į tai, pirmoji charakteristika sutelkta į pastato apvalkalo šilumines savybes ir kompaktiškumą. Daugelis pastatų susiduria su šildymo iššūkiais, dėl to pasyvūs projektiniai sprendiniai yra orientuoti į efektyviausią saulės šilumos panaudojimą bei šilumos nuostolių sumažinimą. Mokslininkų atliktame tyrime [4] pastebėta, kad visiems pastatams, kurie susiduria su šildymo ir vėsinimo problemomis, būdingos didesnės U vertės, negu nurodyta pasyvaus namo standarte. Ištirtuose projektuose pastebėta, kad tiems pastatams, kurių energijos efektyvumas yra geriausias, būdinga mažesnė langų U vertė, negu likusiems pastatams. Taip pat svarbus langų charakteristikos parametras yra saulės faktorius (g koeficientas). Jis nusako, kokią dalį saulės energijos tiesiogiai ar netiesiogiai praleidžia stiklo paketas. Tyrime apžvelgiant g koeficientus, pastatams būdingos didesnės nei 50 % vertės. Šie du parametrai – šilumos laidumo koeficientas U bei saulės faktorius g – turi būti tinkamai subalansuoti ir pritaikyti pagal šalies klimatą. Šalto klimato zonai, į kurią patenka ir Lietuva, būdingas mažo šilumos perdavimo koeficiento ir aukšto saulės faktoriaus derinys. Taip padidinamas šildymo sistemų efektyvumas. Taip pat svarbus aspektas yra pastato apvalkalo ir šildomo tūrio santykis, kitaip vadinamas kompaktiškumas. Šilto klimato zonose rekomenduojamas didelis kompaktiškumas ($\leq 0,7 \text{ m}^2 / \text{m}^3$) todėl, kad mažai veikiamas paviršiaus plotas riboja šilumos nuostolius, o vidutinis ir didelis kompaktiškumas būdingas šalto klimato zonoms, kur vyrauja šildymas bei vėsinimas.

Atsižvelgiant į būdingus dirbtinio apšvietimo ir galimo šildymo arba vėsinimo poreikius, antruoju principu siekiama įgyvendinti energiją taupančias sistemas (antrasis diagramos ratas). Norint sumažinti pastatų energijos poreikį, reikia ne tik įgyvendinti pasyvaus namo strategijas, bet ir gerinti sistemų energijos efektyvumą. Daugiausia energijos pastatuose sunaudojama šildymui ir vėsinimui įrengtose sistemose bei karšto vandens ruošimui. Apšvietimas kartu su kitais elektros energiją vartojančiais prietaisais dažnai būna iki galo neapgalvotas projektavimo metu ir sudaro didelę dalį visos suvartojamos energijos.

Atsinaujinančios energijos sistemos reikalingos norint kompensuoti didelį apšvietimo, šildymo ir vėsinimo energijos poreikį (trečiasis diagramos ratas). Jų integravimas į pastato inžinerines sistemas yra paskutinis projektavimo žingsnis siekiant sumažinti energijos sąnaudas. Pagrindinis tikslas yra pasiekti nulinį energijos suvartojimą. Atsižvelgiant į specifinius pastatų energijos poreikius, atsinaujinančios energijos sistemos turėtų padengti tiek vėsinimo bei šildymo poreikius, tiek energijos kiekį, reikalingą patalpų šildymo ir vėsinimo, apšvietimo bei kitoms sistemoms eksploatuoti. Mokslininkai nustatė [4], kad dažniausiai naudojami atsinaujinančių energijos šaltinių deriniai yra saulės kolektoriai karšto vandens ruošimui bei fotovoltinės sistemos elektros gamybai. Patalpų šildymui, vėsinimui ir karšto vandens ruošimui taip pat gali būti naudojami geoterminiai arba biomasės energijos šaltiniai, atsižvelgiant į šių sistemų įgyvendinamumą bei eksploatacijos išlaidas. Šilumos siurbliai oras-oras, naudojami šilumai perduoti iki naudingos temperatūros lygio, taip pat yra galimi, jeigu atitinka šalyje taikomus energijos vartojimo efektyvumo reikalavimus.

Šiomis dienomis padidėjus išsamių energijos modeliavimo programų plėtrai ir prieinamumui, pastatų energinis modeliavimas gali būti panaudojamas nustatytiems tikslams kontroliuoti ir netgi stebėti pastato eksploatavimą. Buvo atliktos kelios išsamios analizės, susijusios su šiluminio komforto projektavimu bei energijos suvartojimo matavimu, naudojant dinaminę pastato modeliavimo programinę įrangą *IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE)* [8]. Šiame mokslininkų darbe pateikto tyrimo tikslas buvo parengti matuojamų energijos rodiklių vertinimo metodą atsižvelgiant į projektavimo metu gautus energijos suvartojimo rodiklius. Siekiant patikrinti mokslininkų sudarytą modelį buvo atliktas mėnesinio ir valandinio poreikio šildymui modeliavimas (angl. *simulation*). Tyrimui atlikti buvo panaudoti keli skirtingi metodai, vienas jų *PHPP* (angl. *Passive House Planning Package*), kuris naudoja *MS Office* skaičiuoklę *Excel* kaip programos pagrindą ir skaičiuoja mėnesinį bei metinį šilumos poreikius. Remiantis dinaminiais modeliais ir pastatų energinio naudingumo stebėjimu buvo nagrinėjamas faktinis energijos vartojimo efektyvumas pagal projektinius tikslus. Naudojant šį metodą vidiniai ir saulės šilumos pritekėjimai įvertinami pagal naudojimo koeficientą ir atskiriami nuo šilumos nuostolių. Trumpų bangų spinduliuotės pritekėjimai turėtų kompensuoti ilgųjų bangų spinduliuotės nuostolius ant išorinių nepermatomų pastato apvalkalo paviršių. Patalpų viduje bendras paviršiaus perdavimo koeficientas naudojamas modeliuoti laidų, konvekcinį ir spindulinį šilumos perdavimą tarp sienų ir patalpos temperatūros.

Konkretesnis rezultatas buvo pasiektas naudojant pastato energinio modeliavimo programinį paketą *IDA ICE*. Programa jungia komponentų modeliavimą su visu pastato energijos modeliavimo modeliu. Programinėje aplinkoje galima modeliuoti skirtingas zonas, šildymo, vėdinimo, oro kondicionavimo sistemas, vidaus ir saulės apkrovas, lauko klimata ir kartu atlikti dinaminio šilumos perdavimo ir oro srautų modeliavimą, optimizuoti sprendinius. Palyginus skirtingų metodų skaičiavimais gautus rezultatus nustatyta, kad *IDA ICE* modelis yra tikslesnis, kadangi energijos sąnaudos priklauso ir nuo žmonių elgesio, kuris buvo apibrėžtas apskaičiavus elgesio tikimybę. Palyginus skirtingus modelius nustatyta, jog visi metodai prognozuoja panašų energijos poreikį šildymui žiemos sezonu. *IDA ICE* programa sukurto modelio skaičiavimai standartinėmis realiomis sąlygomis suteikė adekvačius rezultatus ir pateikė išsamią šilumos srautų analizę. Šis metodas yra geras pagrindas siekiant optimizuoti energijos suvartojimo efektyvumą ir šiluminį komfortą, įskaitant ir nepagrindinių šilumos šaltinių veikimą.

Daugelis lengvai prieinamų pastatų energinio modeliavimo priemonių nėra tinkamos gausiai įstiklintų patalpų mikroklimato vertinimui, kadangi jose naudojamas supaprastintas skaičiavimo metodas saulės spinduliuotei per skaidrias atitvaras nustatyti. Dėl šios priežasties daug tyrėjų išreiškė

poreikį detalesnei modeliavimo programai, su kuria būtų galima tirti pastatus, kuriuose yra daug stiklinių atitvarų. Mokslininkų publikuotame straipsnyje [9] apžvelgiama *IDA ICE* programinė įranga bei jos tinkamumas tyrimams atlikti. Ši programinė įranga yra viena dažniausiai naudojamų energijos modeliavimo programų energiniams modeliams projektuoti. Kaip ir daugelis kitų programų, *IDA ICE* pagrįsta geometrinėmis pastato charakteristikomis, kurios suteikia pagrindą detalesniems šilumos mainų tarp patalpų skaičiavimams. Programoje atliekami šilumos balanso skaičiavimai pagal vartotojo sumodeliuotą patalpų geometriją, konstrukcinę dalį, šildymo, vėdinimo ir oro kondicionavimo sistemų sąlygas bei patalpų viduje atsirandančius šilumos išsiskyrimus. *IDA ICE* programinė įranga sėkmingai pritaikyta mokslininkų atliktame tyrime, kuriame nagrinėjamas buto su įstiklintu balkonu mikroklimatas. Tyrimo objektas buvo sukurtas naudojantis *ArchiCAD* programa ir perkeltas į *IDA ICE* aplinką *IFC* (angl. *Industry Foundation Classes*) formatu. Modeliavimai buvo atlikti naudojant keturis modelio detalumo lygius (2 lentelė):

2 lentelė. Keturi modelio detalumo lygiai ir jų skaičiavimų trukmė (Hilliaho et al., 2015)

Modeliai	Modelis ir lango konstrukcija	Skaičiavimų laikas
1 Labai detalus	Klimato modelis su detalizuotu langu	35 min. 23 s.
2 Detalus	Energijos modelis su detalizuotu langu	29 min. 29 s.
3 Supaprastintas	Klimato modelis su supaprastintu langu	34 min. 38 s.
4 Paprasčiausias	Energijos modelis su supaprastintu langu	29 min. 11 s.

Iš antros lentelės duomenų galima pastebėti, kad klimato modelio skaičiavimus atlikti užtrunkama ilgiau. Kuo aukštesnis modelio detalumo lygis, tuo ilgiau truks modeliavimas.

Tiriamas pastatas yra 7 aukštų daugiabutis urbanizuotoje Suomijos vietovėje, Tampere mieste. Daugiabutis prijungtas prie centralizuotų šilumos tiekimo tinklų ir vėdinamas mechanine vėdinimo sistema. Pastato fasadai 2004 metais buvo renovuoti, renovacijos metu pakeisti langai bei durys, įstiklinta daugiau negu 50 % balkonų. Taip pat buvo patikrinta šildymo, vėdinimo ir oro kondicionavimo sistemų būklė, subalansuotos vėdinimo ir šildymo sistemos. Ištraukiamojo vėdinimo įrenginys nepakeistas, tačiau jam buvo įrengtas automatinis valdymas. Energinio modeliavimo rezultatai pateikiami keliais būdais. Pirmiausia aprašytos buto bei įstiklinto balkono modelio ir išmatuotų temperatūrų vertės ir jų skirtumas. Žemiausia vidutinė temperatūra įstiklinto balkono viduje pasiekama klimato modelyje su detaliu langu ir didžiausia energijos modelio su supaprastintu langu. Temperatūros skirtumas tarp labiausiai detalizuoto ir paprasčiausio modeliavimo metodo per visą modeliavimo laikotarpį buvo maždaug 0,2 °C. Aukštesnė įstiklinto balkono temperatūra reiškia mažesnius šilumos nuostolius iš pastato vidaus į balkoną ir mažesnes energijos sąnaudas. Energijos taupymo poveikis detaliau pateikiamas 3 lentelėje:

3 lentelė. Buto energijos sąnaudos ir energijos taupymas (Hilliaho et al., 2015)

Modelių detalumo lygiai	Butas su įstiklintu balkonu, kWh	Butas su neįstiklintu balkonu, kWh	Sutaupyta energija, kWh	Sutaupytos energijos procentinė išraiška
1	4642,2	4824,5	200,3	4,1
2	4631,6	4833,6	202,0	4,2
3	4630,8	4866,5	235,7	4,8
4	4619,9	4858,4	238,5	4,9

Sutaupomos energijos procentinė išraiška kinta nuo 4,1 % iki 4,9 %, skirtumas tarp jų yra 0,8 %. Taip pat buvo atliktas detalus paviršiaus temperatūros modeliavimas. Rezultatai parodė, kad buto su įstiklintu balkonu modeliuota paviršiaus temperatūra buvo aukštesnė, negu atliekant natūrinius

tyrimus. Apie 4 / 5 paklaidų atsiranda dėl skirtumo tarp detalaus ir supaprastinto lango konstrukcijos. Tai reiškia, kad skaičiuojant įstiklinto paviršiaus temperatūrą rekomenduojama naudoti klimato modelį su detalio lango konstrukcija. Tyrimas taip pat atskleidė, kad neteisingi įvesties parametrai gali turėti tiek pat reikšmingą ar net didesnę poveikį skaičiavimų rezultatams, negu skirtingas modeliavimo metodas. Pavyzdžiui, skirtingas absorbcijos koeficiento 0,1 vertės pokytis daro didesnę poveikį rezultatams (0,28), negu modelio skirtumas tarp detalaus ir supaprastinto lygio (0,2). Svarbiausi įvesties parametrai šiame tyrime buvo tiekiamo ir šalinamo oro kiekis, šilumos nuostoliai, įstiklinto balkono sandarumas ir balkono vidinio paviršiaus absorbcijos koeficientai [9]. Šis tyrimas parodė, kad *IDA ICE* programinė įranga yra tinkama energijos efektyvumo vertinimui, tačiau svarbu teisingai paruošti įvesties duomenis skaičiavimams, kad būtų išvengta didelių paklaidų.

Projektuojant nulinės energijos suvartojimo pastatą svarbu atsižvelgti į jo orientaciją pasaulio šalių atžvilgiu bei skaidrių atitvarų išdėstymą. Šie aspektai daro tiesioginę įtaką pastato energijos suvartojimui. Teisingai orientuoti bei didelio energinio efektyvumo langai yra vienas svarbiausių nulinės energijos suvartojimo pastato elementų. Tinkamai suprojektavus ir įrengus langus galima reguliuoti natūralaus apšvietimo lygį, palaikyti tinkamą patalpų mikroklimatą ir sumažinti energijos kiekį pastato šildymui bei išlaidas apšvietimui. Taip pat svarbu atsižvelgti į pasaulio šalis projektuojant patalpų išsidėstymą viduje. Rekomenduojama pastato pagrindinę dalį projektuoti pietinėje pusėje, o technines patalpas planuoti šiaurinėje dalyje, nes ten visus metus bus šešėlis, todėl tikslinga vengti šiaurinėje pusėje išdėstyti kabinetus, kuriuose nuolat būna darbuotojai, ar sudėti didelius langus. Pasyvių saulės savybių integravimas į pastatą padeda sumažinti energijos apšvietimui suvartojimą, o tai galiausiai sumažina išmetamo CO₂ kiekį bei prisideda prie tvaraus vystymosi. Projektuojant pastatą ir laikantis šių principų, Lietuvos klimato sąlygomis galima sutaupyti iki 2 / 3 pastato šildymui reikalingo energijos kiekio [10].

1.3. Atsinaujinančių energijos šaltinių integravimas

Projektuojant nulinės energijos suvartojimo pastatus vienas iš reikalavimų yra panaudoti atsinaujinančius energijos šaltinius projektuojant pastato inžinerines sistemas. Atsinaujinančių energijos šaltinių gaminama energija turėtų padengti didžiąją dalį pastato energijos sąnaudų. Pagrindiniai atsinaujinantys energijos šaltiniai, kuriuos optimaliausia integruoti į pastato sistemas miesto aplinkoje, yra saulės ir geoterminė energija.

Apžvelgtuose tyrimuose [11] nustatyta, kad vienas iš labiausiai naudojamų atsinaujinančių energijos šaltinių yra saulės energija. Keičiant skaidrių arba neskaidrių atitvarų fizikines savybes galima nustatyti saulės energijos naudojimo sistemas, kurios gali būti tiesioginės (naudojant saulės kolektorius) arba pasyvios/netiesioginės (į pietinę pusę nukreiptos stiklinės atitvaros, terminės masės arba Trombė sienos). Pagrindiniai natūralūs procesai, naudojami pasyviose saulės energijos sistemose yra šilumos energijos srautai, susiję su spinduliavimu, laidumu ir natūralia konvekcija. Kai saulė apšviečia pastatą, statybinės medžiagos gali atspindėti, sugerti arba perduoti saulės spindulius. Be to, saulės šiluma sukelia oro judėjimą, kuris gali būti nuspėjamas suprojektuotose erdvėse pasitelkiant modeliavimo programas. Šie pagrindiniai aspektai lemia projektavimo ir architektūrinius elementus bei vietas, kurios gali suteikti šilumos arba vėsinimo poveikį pastate.

Kitame apžvelgtame tyrime [12] pateikiama informacija apie geoterminės energijos panaudojimą pastato energijos poreikiams padengti. Geoterminė energija gali būti efektyviai panaudota naudojant šilumos siurblių gruntas - vanduo, 2005 - 2010 metais šių siurblių bendra įdiegta galia padidėjo 2,15

karto, o tokių šilumos siurblių taikymas registruotas 78 pasaulio valstybėse. Aukštos metinės sezoninio naudingumo koeficiento vertės buvo gautos matuojant faktinį šilumos siurblių gruntas-vanduo veikimą. Daugeliu atvejų šilumos siurblio veikimą lydi nesubalansuota geoterminės energijos gavyba / atidavimas, dėl to sumažėja ilgalaikio eksploatavimo efektyvumas. Siekiant išlaikyti stabilų įrenginių eksploatavimą ir pagerinti geoterminės energijos išėigą su sezoniniu našumo koeficientu, įrenginio projektavimo metu svarbu atsižvelgti į šilumos saugojimo šaltinį. Geoterminio šilumos siurblio naudingumas taip pat priklauso nuo to, kaip išvedžiotas kontūras žemėje – horizontaliai ar vertikaliai. Horizontalus įrengimas pigesnis, tačiau jam reikalingas didesnis plotas. Taip pat jo gylis pakankamai mažas, truputį žemiau įšalo gylio, todėl jo naudingumas priklauso nuo lauko temperatūros, saulės spinduliuotės intensyvumo ir netgi sniego ant žemės paviršiaus buvimo. Be to, horizontalaus kontūro įrengimas nėra tikslingas įrengti, kai aplinka gausiai užstatyta kitais pastatais. Įrengus vertikalų kontūrą išorės poveikis kur kas mažesnis.

Mokslininkų atliktuose tyrimuose pastatas buvo modeliuojamas programa *IDA ICE*, siekiant ištirti įvairius geoterminio šilumos siurblio bei šilumos talpyklų derinius. Parengtas modeliavimas atsižvelgiant į vietines klimato sąlygas. Atsižvelgiant į skirtumą tarp grėžinių ir energijos sancaupų be terminio saugojimo, grėžinių specifinis gruntinis šilumos kiekis, tenkantis vienam metrui, buvo apie 60 % didesnis palyginus su energijos sancaupomis dėl geresnio uolienų šilumos laidumo ir šiluminės sąveikos. Saulės ir šalinamo oro šilumos saugojimo derinys tiriamu atveju sumažino geoterminio kontūro ilgį 2,6 karto. Šalinamo oro šiluminės talpos ribos yra nustatomos pagal šalinamo oro temperatūrą, kuri teoriškai yra tokia pati, kokią galima pasiekti dirvožemyje. Tyrimas taip pat atskleidė, kad geoterminio šilumos siurblio parinkimo ir projektavimo stadijoje svarbu atkreipti dėmesį į tai, kad būtų išvengta sistemos užšalimo grėžiniuose. Šis tyrimas parodė *IDA ICE* modeliavimo programos gebėjimą kurti detalius šildymo ir aušinimo geoterminius įrenginius, kad būtų galima atlikti išsamią skaitmeninę analizę [12].

1.4. Energijos vartojimo efektyvumas

Šiuolaikiniuose pastatuose skaidrios atitvaros sudaro didžiąją dalį statinio apvalkalo bei daro didelę įtaką pastato energijos suvartojimui. Mokslininkų atliktas tyrimas [13] parodė, kad nemažą poveikį pastatų energiniam naudingumui turi langų orientacija pagal pasaulio šalis šia tvarka: rytai ir vakarai, pietūs, šiaurė. Tyrimuose buvo atlikti kelių administracinės paskirties pastatų modeliavimai, kai lango ir sienos santykis yra nuo 30 % iki 100 %, atsižvelgiant į skirtingus langų ypatumus, šešėlius ir statinio orientaciją pasaulio šalių atžvilgiu šaltame Geteborgo rajone. Rezultatai parodė, kad biurų pastatas su mažesniu langų ir sienų santykiu rodo didelį energijos taupymą. Beveik nulinės energijos pastatuose padidėjus skaidraus paviršiaus plotui į rytus, vakarus ir pietus, vėsinimo energijos poreikis bus didesnis, nei energijos poreikis šildymui. Tyrime taip pat buvo nagrinėjami keli langų variantai su skirtingomis savybėmis (*U* ir *g* vertės deriniais). Mokslininkai pastebėjo, kad mažos *U* vertės langai ne visada yra veiksmingi vėsiamame klimate. Buvo nustatyti optimizavimo kriterijai biurų pastatams, esantiems vidutinio klimato zonoje, kurių energijos poreikis mažas ir yra svarbi vizualinė aplinka. Modeliavimo sudėtingumas priklauso nuo to, ar kartu vertinamos kitos komforto priemonės ir kriterijai, tokie kaip akustika, energinis efektyvumas, šiluminis ir apšvietimo komfortas. Tai parodė, kad lango dydžio optimizavimas gali trukdyti pasiekti papildomą naudą, pavyzdžiui, vien tik vizualiam patogumui optimizuoti langai sukuria didelius energijos suvartojimo kiekius.

Mokslininkai ieškojo optimalaus langų ir sienų santykio Europos klimato zonoje tirdami biurų pastatus, kurie pasižymėjo geriausiai pastato apvalkalo elementais ir įrengimo technologijomis.

Ištirta, kad optimalus sienos ir langų santykis svyruoja nuo 30 % iki 45 %, tačiau į pietus orientuotiems fasadams, esantiems arba labai šiltame, arba labai šaltame klimato, vertės išeina iš šio diapazono ribų. Atliekant modeliavimą pastato langų ir sienų santykis buvo sumažintas nuo 50 % iki 30 % ir gauti rezultatai parodė, kad šilumos poreikis sumažėjo net 83 %.

Pagrindiniu tyrimo objektu mokslininkai pasirinko gyvenamąjį butą. Langų ir sienų santykio optimizavimo tikslas – sumažinti bendrą pastato energijos poreikį. Jautrumo (angl. *sensitivity*) analizėje buvo tiriama 10 atvejų, pradedant nuo 10 % langų ir sienų santykio, baigiant 100 %. Tyrime taip pat buvo analizuojama skirtingų langų parametrų (U bei g vertės) įtaka energijos suvartojimui. Šešėliavimo prietaisų poveikis buvo tiriamas dviem atvejais: kai langas šešėliuojamas iš išorės ir kai šešėliuojamas iš vidaus. Analizė atliekama vienam kambariui, kadangi komforto sąlygos kiekvienoje aplinkoje gali smarkiai kisti, atsižvelgiant į saulės spinduliuotę. Atvejo analizė atlikta trijuose Italijos miestuose: Turine, Romoje ir Agrigente. Oro meteorologiniai duomenys buvo gauti iš Italijos termotechninio komiteto. Šilumos perdavimo koeficientai bei vėdinimo sistemos parametrai nustatyti pagal gyvenamųjų pastatų bendrąją specifikaciją. Pagal galiojančius Italijos normatyvus daroma prielaida, kad šildymo ir vėsinimo sezonai veikia nepertraukiamai. Saulės šešėliavimo įtaisai veikia pagal valandinę spinduliuotės vertę, kai ji viršija $300 \text{ W}\cdot\text{m}^2$. Atvejo analizės bendras energinis naudingumas buvo įvertintas neatsinaujinančios pirminės energijos sąlygomis. Atitinkančios reikalavimus konfigūracijos 2 paveikslėlyje paryškintos.

WWR	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
TO	0.37	0.49	0.60	0.72	0.83	0.94	1.06	1.17	1.29	1.40
RM	0.44	0.59	0.74	0.89	1.05	1.20	1.35	1.50	1.65	1.80
AG	0.69	0.94	1.20	1.46	1.72	1.97	2.23	2.49	2.74	3.00

2 pav. Pagrindinės tiriamo kambario geometrinės savybės ir vidutinis bendras šilumos perdavimo koeficientas (Murano, 2018)

Tyrimas parodė, kad langų ir sienų santykį (angl. *window to wall rate* - *WWR*) galima padidinti iki 40 % Turine (TO), 30 % Romoje (RM) ir 10 % Agrigento (AG) mieste. Skaidriai elemento daliai esant saulės energijos pralaidumo konfigūracijoje, kuomet šešėliavimo įtaiso g koeficientas yra 0,15 įmanoma padidinti įstiklintą plotą. Apibendrinant rezultatus, langų ir sienų santykis, atitinkantis Italijos reglamentus, yra nuo 10 % iki 20 %, kai saulės pralaidumo koeficientas g lygus 0,35. Tyrime apskaičiuotas energijos suvartojimas trims Italijos vietovėms, kurioms būdingos skirtingos klimato sąlygos. Modeliai sudaryti remiantis laipsnišku langų ir sienų santykio didėjimu ir dviejų skirtingų tipų šešėliavimo įtaisų charakteristikomis. Šildymo ir vėsinimo energijos vartojimo efektyvumo tendencijos stiklinimo ir šešėliavimo įtaisų atžvilgiu beveik visais atvejais vienodos. Tik vienam atvejui, kuomet langų ir sienų santykis 10 % vėsinimui reikia daugiau energijos, negu šildymui. Didelio našumo šešėliavimo įtaiso naudojimas teigiamai veikia aušinimo energijos poreikį. Apskritai, naudojant bet kokią langų ir sienų santykio konfigūraciją, geriausiai veikiantis šešėliavimo įtaisas sumažina energijos poreikį aušinimui: Agrigento mieste visomis pasaulio šalių kryptimis įtaisas padidina energijos efektyvumą dideliems įstiklintiems paviršiams.

Tyrimo rezultatai atskleidžia, kad langų ir sienų santykis yra glaudžiai susijęs su pastato energijos poreikiu. Norint pasiekti nulinį energijos suvartojimą sprendimas padidinti langų ir sienų santykį nėra geras, nes taip sumažėja energinis naudingumas [13].

Apibendrinant, projektuojant pastatą bet kurioje vietovėje ir neatsižvelgiant į jo orientaciją pasaulio šalių atžvilgiu, naudojant dideles stiklines atitvaras padidėja ir šildymo, ir vėsinimo energijos poreikiai bei didžiausia galia. Silpniausia energijos nevartojančio pastato konstrukcijos grandis yra susijusi su efektyviu vėsinimo energijos panaudojimu. Tyrimai parodė, kad tinkamas sprendimas yra naudoti didelio efektyvumo šėšėliavimo įtaisą, kad būtų sumažintas energijos poreikis, nepaisant to, kad jis neigiamai veikia pastato šiluminę energiją. Todėl projektuojant nulinės energijos pastatą svarbu atsižvelgti ir į istiklintų paviršių orientaciją, ir į šėšėliavimo priemonių savybes, taip siekiant sumažinti vidines šilumos apkrovas (apšvietimas, įranga ir pan.).

2. Tyrimų metodologija

2.1. Tyrimo objektas

Pagrindiniu tyrimo objektu pasirinktas naujos statybos administracinės paskirties pastatas (3 pav.) Viršuliškių skg. 26, Vilniuje. Pastatas yra dešimties aukštų, patalpos nuomojamos įvairioms įmonėms, pirmame aukšte įrengta kavinė. Visi pastato aukštai vėdinami mechaninėmis vėdinimo sistemomis.



3 pav. Tyrimo objektas – biurų pastatas Vilniuje, Viršuliškių skg. 26

Bendrieji pastato duomenys pateikiami 4 lentelėje:

4 lentelė. Bendrieji pastato duomenys

Nr.	Parametro pavadinimas	Parametro vertė
1	Pastato ilgis	32,7 m
2	Pastato plotis	30,5 m
3	Pastato aukštis	42,10 m
4	Aukštų skaičius	10
5	Pastato tūris	30839,39 m ³
6	Šildomas plotas	8931,95 m ²
7	Langų ir sienų santykis	26,5 %

2.1.1. Pastato fasado projektiniai sprendiniai

Pastato fasadinės surenkamos konstrukcijos pagamintos iš dažyto aliuminio profilio ir įstiklintos 54 milimetrų storio stiklo paketais bei užpildais iš aliuminio skardos lakšto ir skardos. Sienos fasadinės elementinės konstrukcijos yra iš dažyto aliuminio profilio ir užpildytos termoizoliaciniu užpildu iš vidinio ir išorinio aliuminio lakšto, vatos bei su išorės apdailos fibrocementine plokšte. Biurų pastato langai yra varstomi į vidų, pagaminti iš dažyto aliuminio profilio su šilumos izoliacija, įstiklinti stiklo paketais (U vertė – $1,3 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$).

2.1.2. Šildymo sistemos projektiniai sprendiniai

Pagrindinis pastato šilumos šaltinis – miesto šilumos tinklai. Pastate suprojektuota dvivamzdė šakotinė šildymo sistema. Šildymo prietaisai biuruose – apatinio pajungimo radiatoriai, statomi ant kojelių prie langų. Laiptinėse ir liftų hole suprojektuoti šoninio pajungimo radiatoriai, prijungti prie atskiro šildymo sistemos stovo. Pagrindiniame vestibulyje virš varstomų durų įrengta elektrinė oro

užuolaida. Automobilių stovėjimo aikštelės pirmame požeminiame aukšte įrengta kaloriferių šildymo sistema. Techninės patalpos, esančios žemesniuose aikštelės aukštuose, šildomos elektriniais šildymo prietaisais su termoregulatoriais.

2.1.3. Vėdinimo sistemos projektiniai sprendiniai

Patalpų vėdinimui įrengti du vėdinimo įrenginiai su rotaciniais šilumokaičiais. Pirmasis skirtas 1 - 5 aukštų vėdinimui, antrasis 6 - 10 aukštų vėdinimui. Įrenginiai sumontuoti techniniame aukšte esančioje techninėje patalpoje. Šviežias oras imamas per oro paėmimo groteles, esančias šiaurinėje pastato pusėje, o šalinamas virš stogo. Šalčio į vėdinimo įrenginius tiekimui numatyti kintamo šaltnešio tūrio (angl. *variable refrigerant volume* - VRV) tipo freoniniai aušinimo įrenginiai.

Kavinės patalpai vėdinti suprojektuotas atskiras vėdinimo įrenginys taip pat sumontuotas techniniame aukšte. Buitinių patalpų, tokių kaip tualetai, vėdinimui įrengtas atskiras vėdinimo įrenginys su plokšteliu šilumokaičiu ir šilumos atgavimo įrenginiu.

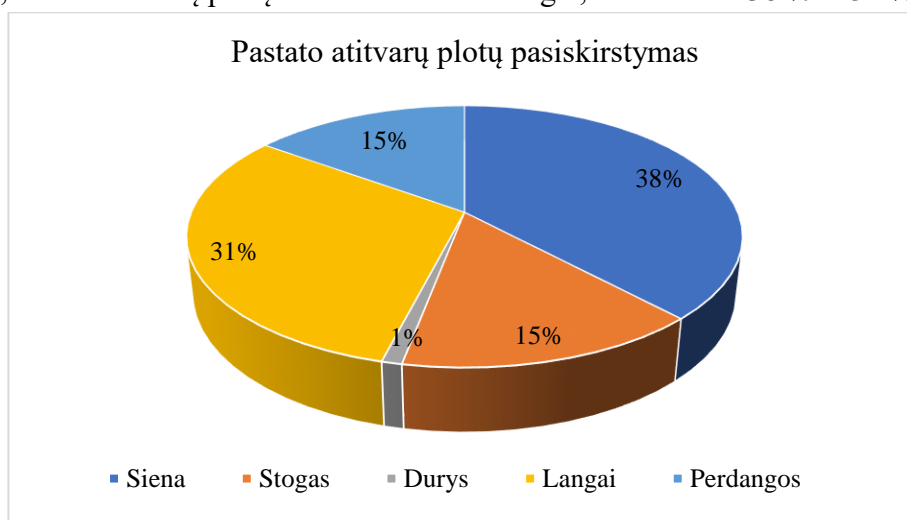
2.1.4. Oro kondicionavimo sistemos projektiniai sprendiniai

Patalpų vėsinimui vasaros sezonu numatyti du būdai: aušinant orą per vėdinimo įrenginių vėsinimo kaloriferius ir ortakiais tiekiant atvėsintą orą į patalpas, arba vėsinant orą vietiniais vėsinimo įrenginiais patalpose taip palaikant reikiamus patalpos parametrus. Kiekvienam aukštui yra suprojektuotas atskiras kintamo šaltnešio tūrio tipo trijų vamzdžių aušinimo įrenginys. Darbo kabinetuose įrengti kanaliniai oro kondicionieriai, paduodantys atvėsintą orą per oro tiekimo skirstytuvus. Šaltnešio tiekimui naudojami variniai vamzdeliai su sintetinio kaučiuko izoliacija.

2.2. Pastato energijos sąnaudų analizė

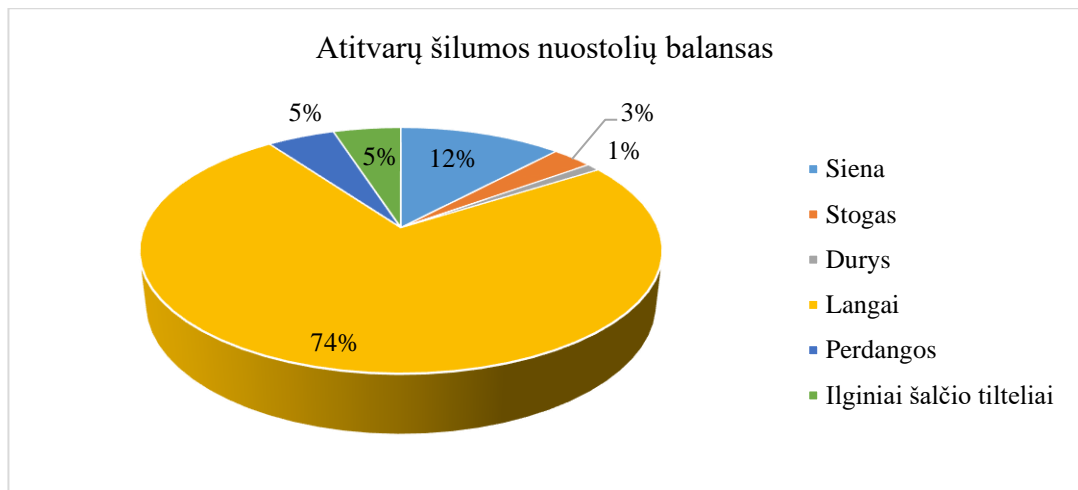
Pastato energijos sąnaudų analizė atliekama norint palyginti projektinį pastato energijos suvartojimą su realiu.

Pirmiausia buvo apskaičiuotas pastato atitvarų plotų pasiskirstymas procentais. Iš diagramos (žr. 4 pav.) matome, kad didžiausią plotą užima sienos bei langai, atitinkamai 38 % ir 31 %.



4 pav. Tiriamojo pastato atitvarų plotų pasiskirstymas

Projektinių atitvarų šilumos nuostolių grafikas papildoma plotų pasiskirstymo grafika, parodydamas didžiausią įtaką darančias išorines atitvaras bendrame pastato šilumos nuostolių per atitvaras balanse.



5 pav. Tiriamojo pastato atitvarų šilumos nuostolių balansas

Iš pateiktos diagramos (žr. 5 pav.) matyti, kad šilumos nuostoliai per skaidrias atitvaras sudaro didžiausią dalį (74 %) visų pastato šilumos nuostolių, nors jų plotas sudaro tik 31 % pastato išorinių atitvarų ploto, t. y. mažiau negu sienos.

Buvo palyginti projektiniai šilumos perdavimo koeficientai U su realiai sumontuotų konstrukcijų šilumos perdavimo koeficientais. Sumontuotų konstrukcijų šilumos perdavimo koeficientai gauti iš eksploatacinių savybių deklaracijų. Palyginimas pateikiamas 5 lentelėje:

5 lentelė. Tiriamojo pastato konstrukcijų šilumos perdavimo koeficientų palyginimas

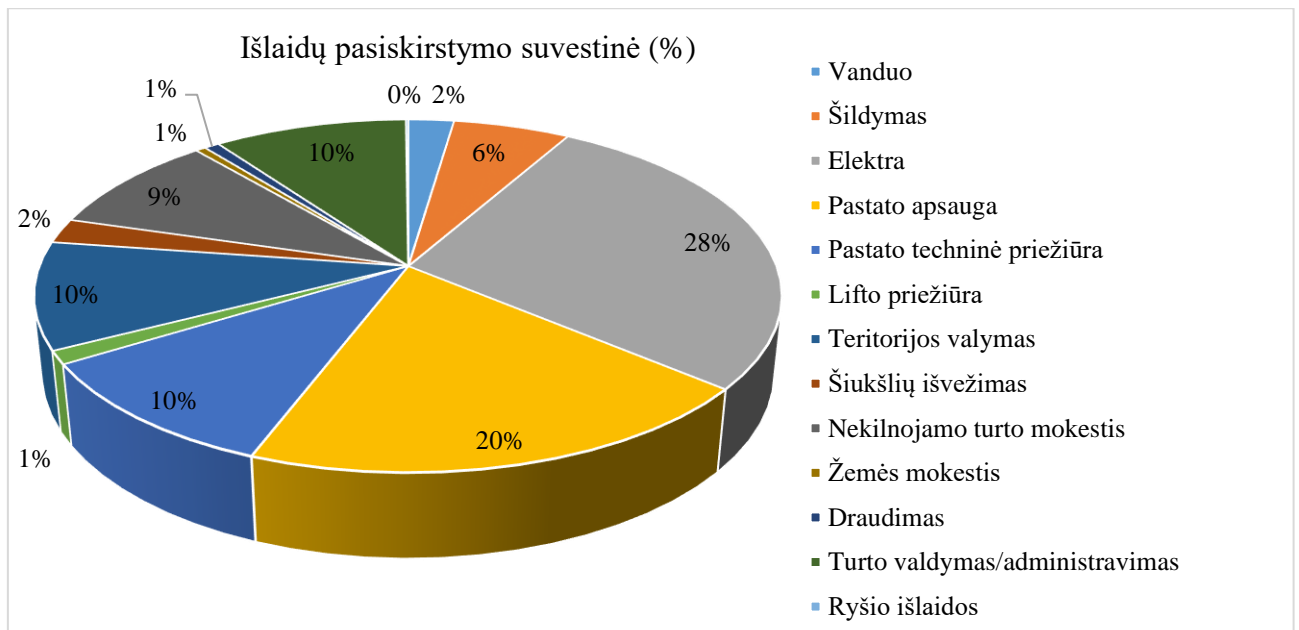
Elementas	Projektinė U vertė, W/m^2K	Sumontuotų konstrukcijų U vertė, W/m^2K
Stiklinės atitvaros	$\leq 1,20$	1,30
Duryys	$\leq 1,30$	1,40
Siena	$\leq 0,16$	0,49

Nors projektuojant pastatą buvo siekiama kuo aukštesnio energinio naudingumo, tačiau apžvelgus projektinius bei įgyvendintus sprendinius pastebėta, kad projektavimo metu parinkti atitvarų sprendiniai statybų metu nebuvo pilnai įgyvendinti.

Siekiant įvertinti, kokio efektyvumo yra įgyvendinti pastato konstrukciniai sprendiniai, buvo atlikta pastato energijos sąnaudų analizė.

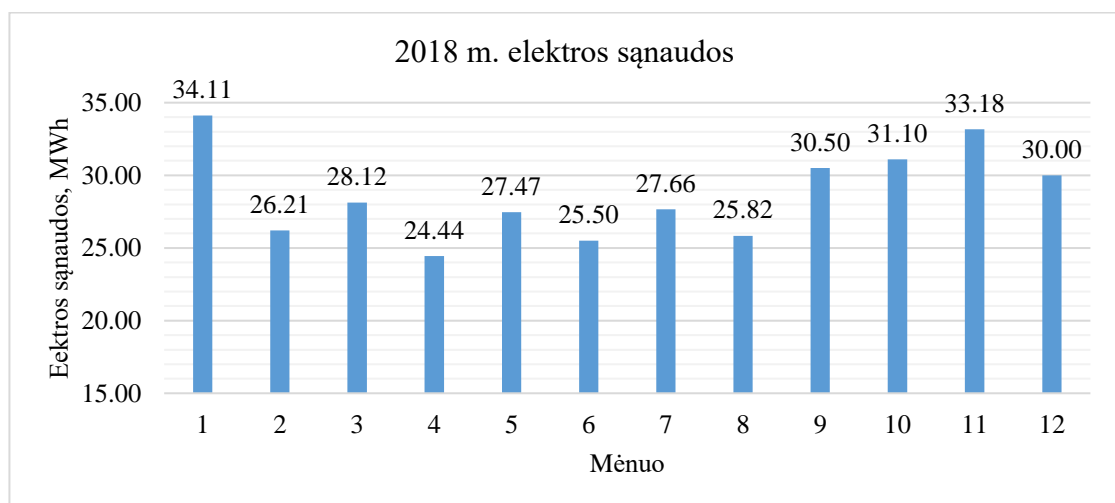
Iš įmonės turto valdytojo gautos metų laikotarpio pastato elektros, šildymo, vandens suvartojimo ataskaitos, kurios išskaidytos pagal patalpų nuomininkus. Elektros sąnaudos apima apšvietimą, vėsinimą bei sąnaudas karštam vandeniui, kadangi jis ruošiamas elektriniais šildytuvais.

Remiantis gautais duomenimis buvo sudaryta bendra išlaidų pastato poreikiams suvestinė. Analizės rezultatai rodo, kad didžiausios išlaidos kalbant apie statinio energijos suvartojimą yra elektrai (28 %). Pastebėta, kad šildymas sudaro nedidelę dalį, tik 6 procentus visų eksploatacijos išlaidų.



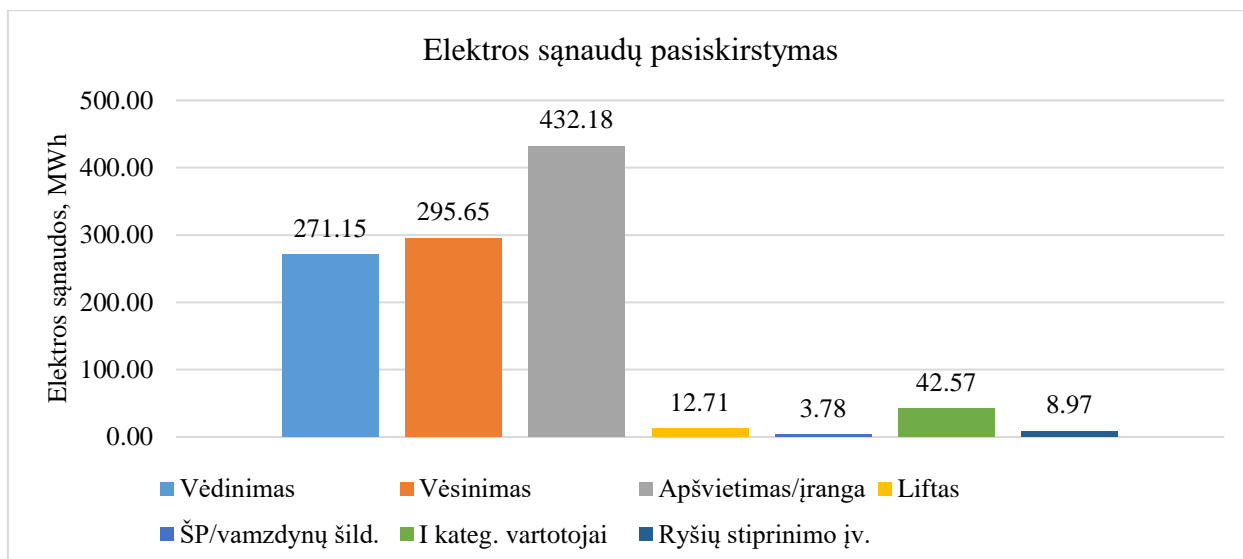
6 pav. Bendra tiriamojo pastato priežiūros ir eksploataavimo išlaidų suvestinė

Elektros sąnaudos sudaro didžiąją dalį viso pastato energijos suvartojimo (28 %), todėl jos buvo išskaidomos smulkiau, siekiant išsiaiškinti, kas suvartoja daugiausiai energijos. Apžvelgus gautus duomenis matyti, kad daugiausiai elektros suvartojama rudens ir žiemos laikotarpiu, kuomet išauga apšvietimo patalpoms poreikis bei sunaudojama daugiau karšto vandens. Didžiausios sąnaudos sausio mėnesį siekia 14,11 MWh, tai kainavo 3077,57 Eur.



7 pav. Tiriamojo pastato 2018 m. elektros sąnaudos

Naudojantis pastato valdymo sistemoje (angl. *Building Management System - BMS*) pateiktais sąnaudų grafikais, metinis pastato elektros suvartojimas buvo apskaičiuotas ir išskaidytas pagal poreikį vėdinimui, vėsinimui, apšvietimui bei kitai įrangai. Šie duomenys pateikiami diagramoje (žr. 8 pav.):



8 pav. Tiriamojo pastato 2018 m. elektros sąnaudų pasiskirstymo diagrama

Iš diagramos galima pastebėti, kad didžiausią dalį elektros sąnaudų suvartoja vėdinimo, vėsinimo, apšvietimo bei įrangos sistemos. Į pastarąją sistemą įeina ne tik apšvietimo prietaisai, bet ir kompiuteriniai įrenginiai, elektros prietaisai ir karštą vandenį ruošiantys elektriniai tūriniai šildytuvai.

2.3. Kompiuterinis modeliavimas

2.3.1. Bandomojo modelio sudarymas

Prieš atliekant tyrimą su realiu objektu, buvo kuriamas mažesnis administracinės paskirties pastato modelis. Šis modelis sukurtas siekiant susipažinti su programa, įvertinti jos pritaikomumo galimybes išskeltiems projekto uždaviniams pasiekti, susipažinti su išvesties duomenų apdorojimo funkcijomis. Taip pat buvo nagrinėjamas modeliavimo parametru, tokių kaip klimatinių duomenų nustatymas ir kt., norint pasiekti nulinių energijos suvartojimą. Kompiuterinio modeliavimo programos *IDA ICE* aplinkoje sukurtas dviejų aukštų pastato modelis (žr. 9 pav.).



9 pav. Bandomasis modelis *IDA ICE* aplinkoje

Modelis buvo kuriamas pritaikant jam realias klimatinės sąlygas, parinkta vietovė – Vilnius. Statinio atitvarų varžos parinktos pagal statybos techninio reglamento „Pastatų energinio naudingumo projektavimas ir sertifikavimas“ rekomendacijas. Vidaus patalpos buvo suskirstytos zonomis, kurioms parinkti atitinkami parametrai: oro kiekis, patalpos temperatūra, apšvietimo intensyvumas, šilumos išsiskyrimai, darbuotojų darbo grafikas. Zonos klasifikuojamos pagal jų paskirtį, erdvės suskirstytos į darbo kambarius, koridorius, posėdžių kabinetus, tualetų patalpas. Pastato bendrieji duomenys pateikiami 6 lentelėje:

6 lentelė. Bandomojo modelio pastato duomenys

Nr.	Parametro pavadinimas	Parametro vertė
1	Pastato skaidrių atitvarų dalis	16,1 %
2	Pastato apvalkalo plotas	484,1 m ²
3	Pastato aukštis	8,41 m
4	Aukštų skaičius	2
5	Pastato tūris	857,4 m ³
6	Šildomas plotas	317,6 m ²

Pirmajam modeliui parinkta šildymo sistema – miesto tinklai, sukurta mechaninio vėdinimo sistema. Šio modelio atitvarų šilumos perdavimo koeficientai parinkti taip, kad atitiktų minimalius A energinio naudingumo klasės pastatams keliamus reikalavimus.

Antrajam modeliui suprojektuoti atsinaujinantys energijos šaltiniai: saulės kolektoriai bei geoterminiai gręžiniai. Modeliavimu siekiama patikrinti, ar atsinaujinančios energijos sistemos geba padengti pastato energijos poreikius. Modeliavimų rezultatai pateikiami lentelėje:

7 lentelė. Modeliavimo rezultatai

	1 modelio skaičiavimo rezultatai	2 modelio skaičiavimo rezultatai	Skirtumas	Skirtumas, %
Bendras energijos poreikis, kW	54,6	51,2	3,4	-6,22
Energijos poreikis šildymui, kW	17,1	14,5	2,6	-15,20
Energijos poreikis vėsinimui, kW	37,5	36,7	0,8	-2,13
Per metus suvartojamas energijos kiekis šildymui, kWh	19904,7	11602,0	8302,7	-41,71
Per metus suvartojamas energijos kiekis vėsinimui, kWh	22526,3	28792,1	6265,8	+21,76
Atsinaujinančių energijos šaltinių pagaminama energija, kWh	-	16178,9	16178,9	-

Gauti modeliavimo rezultatai parodė, kad poreikis šildymui sumažėjo net 15 procentų, tačiau išaugo poreikis vėsinimui. Toks rezultatas galėjo atsirasti dėl pagerėjusių stiklinių atitvarų bei sienų savybių. Joms pasikeitus, pastatas pasidarė sandaresnis ir praranda mažiau šilumos, tačiau jį reikia daugiau vėsinti. Antrajame modelyje beveik per pusę sumažėjo per metus suvartojamas energijos kiekis šildymui, tačiau 20 procentų išaugo poreikis vėsinimui. Įterpus atsinaujinančių energijos šaltinių sistemas (saulės kolektorius bei geoterminius gręžinius) modeliavimo rezultatai parodė, kad jų per metus generuojamos energijos nepakaks viso pastato energijos poreikiams padengti, tačiau pagaminamos energijos užteks padengti pastato šildymo poreikius bei dalį vėsinimo poreikio. Vis dėlto, nulinio energijos suvartojimo šiais sprendiniais pasiekti nepavyko. Atlikus bandomuosius skaičiavimus su pirminiu modeliu ir įsisavinus programos veikimo principus buvo kuriamas pagrindinio tyrimo objekto kompiuterinis modelis.

Apibendrinant, atlikus modeliavimą metų laikotarpiui buvo gauti šildymo, vėsinimo poreikiai, energijos poreikis bei patalpų perkaitimo vasaros metu duomenys. Gautas ataskaitos pateikia daug detalios informacijos apie kiekvieną patalpą bei apibendrintus duomenis visam pastatui. Iš gautų duomenų galima daryti išvadą, kad pastato energijos poreikiai yra gana dideli ir nesiekia nulinės energijos suvartojimo. Šiam pastatui buvo sukurti du modeliai, siekiant patikrinti, ar pakeitus atitvarų parametrus bei suprojektavus atsinaujinančių energijos šaltinių sistemas bus pastebimas energijos sąnaudų sumažėjimas ir įmanoma pasiekti nulinį energijos suvartojimą. Bandomojo modelio skaičiavimai parodė, kad sandarinant pastatą gali stipriai išaugti energijos poreikis vėsinimui. Siekiant sumažinti energijos sąnaudas būtina skirti dėmesio saulės šešėliavimo priemonėms.

2.3.2. Tiriamo pastato kompiuterinio modelio sudarymas

Pagal tiriamo pastato architektūrinius brėžinius buvo sukurtas modelis programos *IDA ICE* aplinkoje. Kuriant modelį siekiama kuo tiksliau atkurti projektinius pastato sprendinius. Pastatas yra dešimties aukštų neskaitant techninio – vienuolikto aukšto, jam suprojektuotos 4 atskiros mechaninės vėdinimo sistemos.

Skaičiuojamojo modelio sudarymui paruoštas *IFC* pastato modelis. Programos *IDA ICE* skaičiavimams reikalingas supaprastintas modelis, dėl to projekto *IFC* failas buvo apdorotas naudojant programinę įrangą *Simple BIM*. Šios programos aplinkoje buvo pašalinti nesusiję su skaičiavimais parametrai, tokie, kaip informacija apie statytoją, tačiau paliekamas pastato konstrukcijų medžiagiškumas bei kita su konstrukciniais elementais susijusi informacija, kuri bus naudinga atliekant energinį modeliavimą. Paruošus modelį jis buvo importuotas į programą *IDA ICE* (žr. 10 pav.), jame buvo atliekamas detalus modeliavimas.



10 pav. Tiriamojo pastato modelis *IDA ICE* aplinkoje ir vizualizacijoje

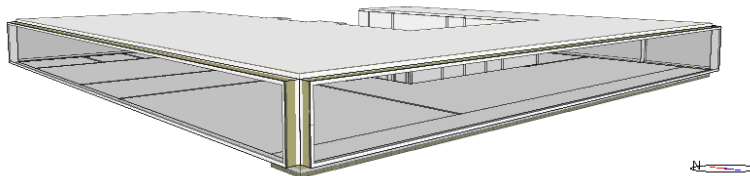
Detalizuojant modelį *IDA ICE* aplinkoje pirmiausia statiniui priskiriama geografinė padėtis, šiuo atveju - Vilnius. Pagal tai programa įvertina vietovės klimato parametrus, kurie gali turėti įtakos energijos suvartojimui (vidutinę lauko temperatūrą, saulės spinduliuotę, vėjo kryptį ir kt.). Tada aprašomi pastato konstrukcinių elementų parametrai: atitvarų sluoksniai ir jų storis, šilumos perdavimo koeficientai.

Detalizuojami konstrukciniai elementai: išorės sienos, vidaus pertvaros, stogas, perdangos, skaidrios atitvaros, durys – jie buvo atkurti kaip įmanoma tikslesni.

Tikslų modelį sukurti pavyko ne iš pirmo karto. Pirmųjų skaičiavimų rezultatai nuo projektinių skyrėsi net du kartus. Kadangi objektas yra didelės apimties, skaičiavimai truko labai ilgai. Siekiant patikslinti gautus rezultatus ir sumažinti esamą paklaidą modelyje buvo parinkti šildymo, vėdinimo ir vėsinimo prietaisai, kiek įmanoma labiau atitinkantys realiai esančios pastate įrangos parametrus.

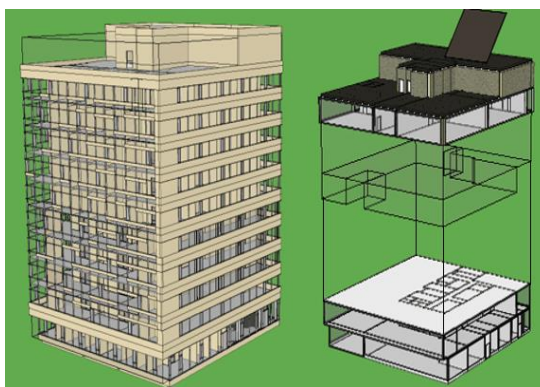
Taip pat, kad skaičiavimas būtų greitesnis, naudojama patalpų dauginimo (angl. *zone multiplier*) funkcija. Pastatai dažnai turi patalpas, kurios yra identiškos arba labai panašios.

Taip detalizavus vieną patalpą, parametrai pritaikomi kitoms prie tos pačios funkcinės grupės priskirtoms patalpoms. Tai padeda greičiau atlikti skaičiavimus bei apžvelgti įvairius variantus. Tyrimo objekte taip pat yra identiškų patalpų, kurios būdingos kiekvienam aukštui (11 pav.).



11 pav. Būdinga aukšto patalpa

Ši funkcija pritaikyta ir tyrimo objektui. Kaip pirminis modelis skiriasi nuo supaprastinto galima pamatyti 12 paveikslėlyje.



12 pav. Modelių skirtumai

Nors dešiniajame modelio vaizde pastebimas tarpas tarp pirmų ir viršutinių aukštų, tačiau programa tai vis tiek vertina kaip visą pastatą.

Modelyje patikslinta sienų struktūra pagal sluoksnius bei šilumos perdavimo koeficientai kiekvienai medžiagai. Skirtumas nuo projektinių energijos poreikių sumažėjo, tačiau vis dar nėra pakankamai tikslus, kad būtų galima tęsti tolimesnius skaičiavimus. Modeliui buvo patikslinti langų stiklo paketo duomenys, saulės spinduliuotės pralaidumo koeficientas. Supaprastintame modelyje paliekamas pirmas, antras, dešimtas ir techninis pastato aukštai. Pritaikius patalpų dauginimo funkciją gali atsirasti nedidelė paklaida, tačiau galutiniams skaičiavimų rezultatams didelės įtakos ji neturi.

Sukūrus pirminį modelio variantą bei atlikus simuliacijas buvo lyginami projektiniai ir modelyje apskaičiuoti energijos poreikiai. Projektiniai pastato energijos suvartojimo duomenys gauti iš techninio projekto. Siekiant sumodeliuoti pastatą, kurio energijos suvartojimas būtų kuo artimesnis projektiniams duomenims, buvo kuriami keli modeliai. Tiksliausio modelio skaičiavimų rezultatai lyginami su projektiniais, rezultatai pateikiami 8 lentelėje:

8 lentelė. Tiriamojo pastato energijos poreikio, apskaičiuoto taikant dinaminį sąnaudų modeliavimą, palyginimas

	Projektiniai duomenys	Kompiuterinio modeliavimo rezultatai	Skirtumas, kW	Skirtumas, %
1	2	3	4	5

8 lentelės tęsinys. Tiriamojo pastato energijos poreikio, apskaičiuoto taikant dinaminį sąnaudų modeliavimą, palyginimas

1	2	3	4	5
Bendras energijos poreikis, kW	571	654,8	83,8	14,6
Energijos poreikis šildymui, kW	300,0	304,9	4,9	1,6
Energijos poreikis vėsinimui, kW	271,0	349,9	78,9	29,1

Pagal gautus duomenis matome, kad modelio energijos poreikis šildymui nuo projekcinio skiriasi mažiausiai, vos 1,6 %. Vėsinimo poreikio tiksliai atkurti nepavyko. Šis skirtumas galėjo atsirasti dėl skirtingų projektuotojo ir programos vertinamų parametru, kadangi projektuotojas nevertina saulės spinduliuotės bei langų techninių savybių, taip pat klimato parametru. Bendras energijos poreikis tarp projektinių ir pirmojo modelio duomenų skiriasi 14,6 %. Priimama, kad modelis pakankamai tikslus ir yra tinkamas tolimesniems skaičiavimams atlikti.

2.3.3. Pastato modelis su atsinaujinančiais energijos šaltiniais

Vienas iš magistro baigiamojo projekto tikslų yra išsiaiškinti, ar Lietuvos klimato sąlygomis įmanoma pasiekti nulinį energijos suvartojimą. Statybos techninio reglamento reikalavimais, toks pastatas yra A++ energinio naudingumo klasės, jam būtina įdiegti atsinaujinančius energijos šaltinius.

Siekiant paversti pastatą nulinės energijos, keičiami atitvarų parametrai. Modelis koreguojamas taip, kad atitiktų statybos techninio reglamento STR 2.01.02:2016 „Pastatų energinio naudingumo projektavimas ir sertifikavimas“ nustatytus A++ energinės klasės reikalavimus. Atitvarų savybės pateikiamos lentelėje:

9 lentelė. Modeliuojamo A++ klasės pastato atitvarų charakteristikos pagal STR 2.01.02:2016.

Atitvara	Šilumos perdavimo koeficientas, W/m ² K
Siena	0,12
Stogas	0,11
Durys	1,4
Langai	0,9
Perdangos virš nešildomų pogrinių	0,14

Atlikus literatūros analizę pastebėta, kad miesto aplinkoje optimaliausia yra naudoti saulės arba geotermine energija. Remiantis literatūros analizės išvadamis modelyje buvo suprojektuoti saulės kolektoriai bei geoterminiai gręžiniai vertikaliai įrengtais kontūrais.

Saulės kolektoriai nukreipti į pietus bei pasvirę 45 laipsnių kampu. Priimama, kad saulės kolektoriaus panelės plotis 0,8 m., aukštis 1,6 m. Ant pastato stogo, plotas yra 998 m², preliminariais skaičiavimais ant jo telpa 200 saulės kolektorių panelių. Bendras saulės kolektorių panelių plotas 256 m².

Didžiausias energijos kiekis pagaminamas liepos mėnesį – 6981 kilovatvalandė. Palyginus šį rezultatą su anksčiau atlikta energijos sąnaudų analize, per metus pagaminamos saulės energijos padengti pastato poreikiams nepakaks.

Saulės kolektorių pagaminamos energijos kiekio rezultatai pateikiami 10 lentelėje:

10 lentelė. Saulės kolektorių pagaminamas energijos kiekis

Mėnuo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Viso:
Generuojama saulės energija, kWh	1809	2520	4424	5569	6390	6466	6981	5799	4586	3443	1752	1419	51158

Taip pat modelyje buvo suprojektuoti ir geoterminiai gręžiniai, kurie vertikaliai išsidėstę pastato plote. Vieno gręžinio gylis yra 150 metrų, iš viso projektuojami 25 gręžiniai. Apibendrinti modelio skaičiavimų rezultatai pateikiami lentelėje:

11 lentelė. A++ klasės modelio skaičiavimų rezultatai

	A ++ klasės modelio duomenys
Bendras energijos poreikis, kW	513,6
Energijos poreikis šildymui, kW	242,1
Energijos poreikis vėsinimui, kW	271,5
Per metus suvartojamas energijos kiekis patalpų šildymui, kWh	85645,3
Per metus suvartojamas energijos kiekis vėd. sistemų pašildymui, kWh	102149,5
Per metus suvartojamas energijos kiekis patalpų vėsinimui, kWh	108124,0
Per metus suvartojamas energijos kiekis vėd. sistemų vėsinimui, kWh	68421,1
Atsinaujinančių energijos šaltinių pagaminama energija, kWh	1036090

Atlikus literatūros analizę bei išnagrinėjus bandomąjį modelį pastebėta, kad gerinant pastato atitvarų šilumines savybes išauga energijos sąnaudos vėsinimui. Dėl šios priežasties pastato modeliui įdiegiamos saulės šešėliavimo priemonės - išorės žaliuzės. Atliekamas modeliavimas, norint sužinoti, kaip šis sprendinys paveiks vėsinimo bei kitus pastato poreikius. Per metus suvartojamos energijos kiekis pateikiamas lentelėje:

12 lentelė. Per metus suvartojamas energijos kiekis pastatui įdiegus saulės šešėliavimo priemones

	A ++ klasės modelio duomenys
Bendras energijos poreikis, kW	500,5
Energijos poreikis šildymui, kW	242,1
Energijos poreikis vėsinimui, kW	258,4
Per metus suvartojamas energijos kiekis patalpų šildymui, kWh	98004,4
Per metus suvartojamas energijos kiekis vėd. sistemų pašildymui, kWh	63421,0
Per metus suvartojamas energijos kiekis patalpų vėsinimui, kWh	104320,4
Per metus suvartojamas energijos kiekis vėd. sistemų vėsinimui, kWh	68115,3
Atsinaujinančių energijos šaltinių pagaminama energija, kWh	1036090

Atlikus simuliacijas pastebėta, kad modelyje įdiegus saulės šešėliavimo priemones per metus suvartojamos energijos poreikis vėsinimui sumažėjo 13,1 kW, o tai sudaro 4,8 % ankstesniame modelyje gauto suvartojamo energijos kiekio.

2.4. Parametrų optimizavimas

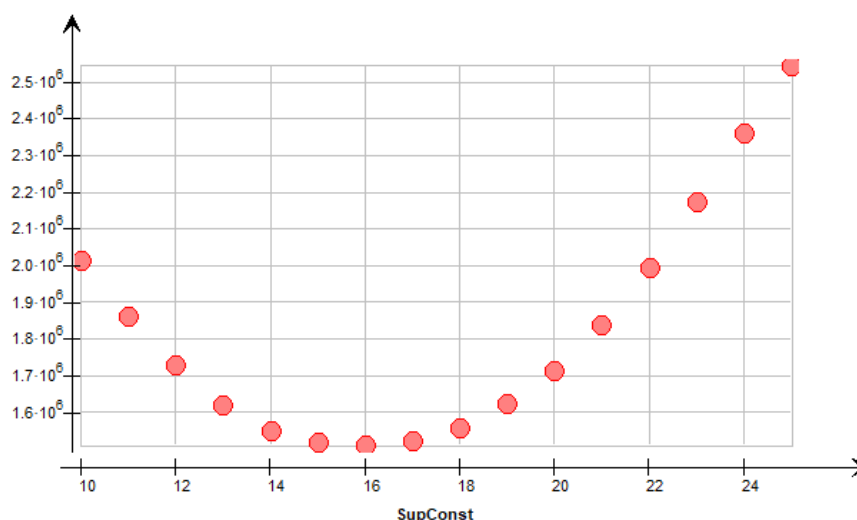
Projektuojant naujus pastatus ypatingai svarbu apžvelgti kuo daugiau įmanomų variantų, kuriuos įgyvendinus būtų kuo efektyviau naudojama energija bei palaikomas žmonėms tinkamas šiluminis komfortas. Tai atlikti galima naudojant optimizavimo funkciją. Naudojant šį metodą programinės įrangos pagalba galima iš kelių sprendinių išrinkti tinkamiausią, funkcijai apibrėžiant tam tikras ribas ir sąlygas.

2.4.1. Vėdinimo sistemos optimizavimas

Šildymo, vėdinimo ir oro kondicionavimo sistemos pastatuose suvartoja didelę energijos dalį ir yra glaudžiai susijusios su mikroklimato parametrų kokybe. Tyrime vienas iš optimizavimo parametrų – vėdinimo sistemos temperatūra. Daug energijos suvartoja oro pašildymas ar atvėsinimas iki tinkamos į patalpas tiekti temperatūros. Optimizavimo funkcijos tikslas – nustatyti, kokios temperatūros oras turi išeiti iš vėdinimo įrenginio prieš pašildymą, kad suvartojamas energijos kiekis būtų kuo mažesnis.

Aukštesnio nei B energinio naudingumo klasės pastatui reikalinga priverstinė mechaninio vėdinimo sistema su rekuperacija. Statybos techniniame reglamente STR 2.01.09:2012 nurodoma, kad A++ energinio naudingumo klasių pastatų mechaninio vėdinimo sistemos rekuperatoriaus naudingumo koeficientas turi būti ne mažesnis už 0,68 o rekuperatoriaus ventiliatoriaus naudojamos energijos kiekis turi neviršyti $0,45 \text{ Wh/m}^3$. Energetiškai efektyviame pastate, kuriame sumažinti laidumo nuostoliai ir užtikrintas sandarumas, didelę įtaką energijos sąnaudoms turi vėdinimo sistemos, oro kiekiai ir šilumogražos efektyvumas. Vėdinimo sistemai užtikrinant minimalią oro kaitą, pastato patalpose rekomenduojamas aukštesnio lygio šilumogražos įrenginio diegimas dėl galimybės išvengti arba sumažinti papildomas tiekiamo oro pašildymo sąnaudas.

Optimizavimo įvesties parametras šiuo atveju yra tiekiamo oro temperatūra. Nustatyti rėžiai, kuriuose gali kisti temperatūra, yra nuo $10 \text{ }^\circ\text{C}$ iki $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Parametras, kurį siekiama optimizuoti, yra bendras sistemos suvartojamos energijos kiekis. Optimizavimo skaičiavimų rezultatai pateikiami 13 pav.



13 pav. Optimalios vėdinimo sistemos temperatūros grafikas

13 paveikslėlyje matyti, kaip išsidėsto energijos suvartojimo taškai pagal temperatūros skalę. Tikslūs optimizavimo skaičiavimo rezultatai pateikiami 13 lentelėje:

13 lentelė. Optimizavimo skaičiavimų rezultatai

Skaičiavimo nr.	Temperatūra, °C	Suvartojamas bendras energijos kiekis, kWh
1	10	2013831
2	11	1863637
3	12	1730696
4	13	1622449
5	14	1551898
6	15	1519828
7	16	1511781
8	17	1524278
9	18	1559492
10	19	1622984
11	20	1715581
12	21	1838706
13	22	1993773
14	23	2173962
15	24	2360720
16	25	2545680

Skaičiavimo rezultatai parodė, jog tiekiamas oras turi būti palaikomas 16 °C temperatūros, kad suvartojamas bendras energijos kiekis būtų mažiausias, šiuo atveju gauname 1511781 kWh. Jei oro temperatūra siektų 25 °C, suvartojamos energijos kiekis siektų daugiau negu 25 tūkstančius kilovatvalandžių.

2.4.2. Skaidrių atitvarų parametų optimizavimas

Skaidrios atitvaros yra vienas svarbiausių pastato elementų, kurių parametrus svarbu numatyti projektavimo pradžioje. Per langus prarandama daugiausiai šilumos šaltuoju metų laikotarpiu, tačiau esant dideliame įstiklinimo plotui patalpos perkaista šiltuoju sezonu. Kadangi gamintojai siūlo daug ir įvairių parametų langų, projektavimo stadijoje atlikus energinį modeliavimą galima numatyti ir kontroliuoti šilumos srautus patalpose bei prognozuoti energijos suvartojimą. Tyrimo objektui buvo ieškomas optimaliausias skaidrių atitvarų sprendimas, renkantis iš keturių langų tipų. Parenkamų langų parametrai pateikiami lentelėje:

14 lentelė. Tiriamų langų tipų parametrai

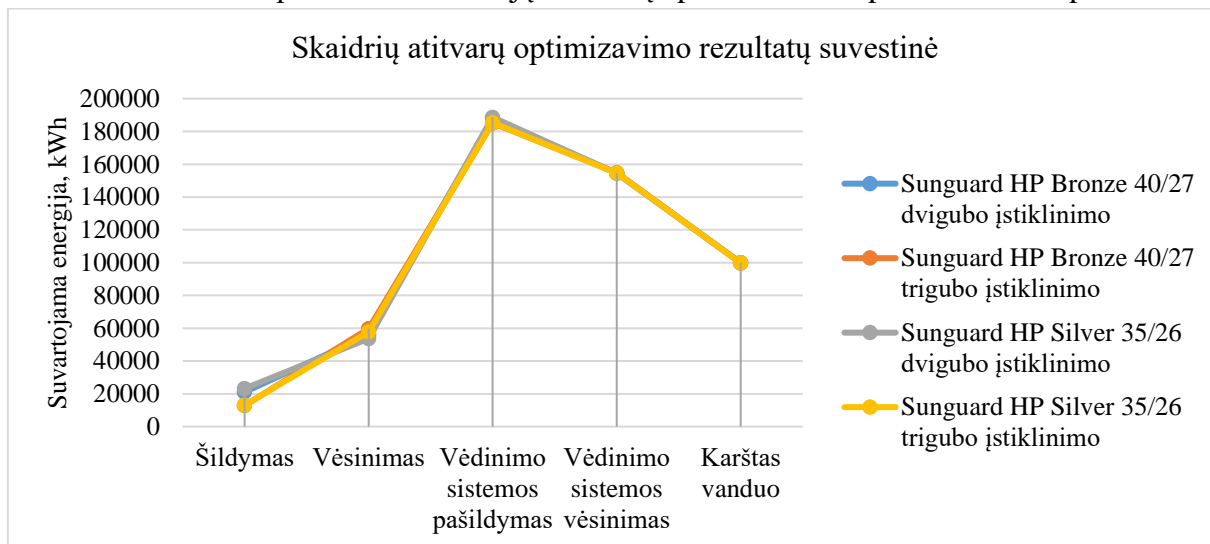
Tipas	1	2	3	4
Parametras	Sunguard HP Bronze 40/27	Sunguard HP Bronze 40/27	Sunguard HP Silver 35/26	Sunguard HP Silver 35/26
Stiklo konstrukcija	Dvigubo stiklo paketo	Trigubo stiklo paketo	Dvigubo stiklo paketo	Trigubo stiklo paketo
Saulės šilumos laidumo koeficientas g	0,27	0,24	0,26	0,22
Šilumos laidumo koeficientas U, W/m ² ·K	1,1	0,6	1,2	0,6

15 lentelės tęsinys. Tiriamų langų tipų parametrai

Saulės laidumo koeficientas T	24,3 %	20,4 %	24,1 %	19,4 %
Matomas pralaidumas, T _{vis}	39,8 %	36,2 %	34,8 %	31,7 %

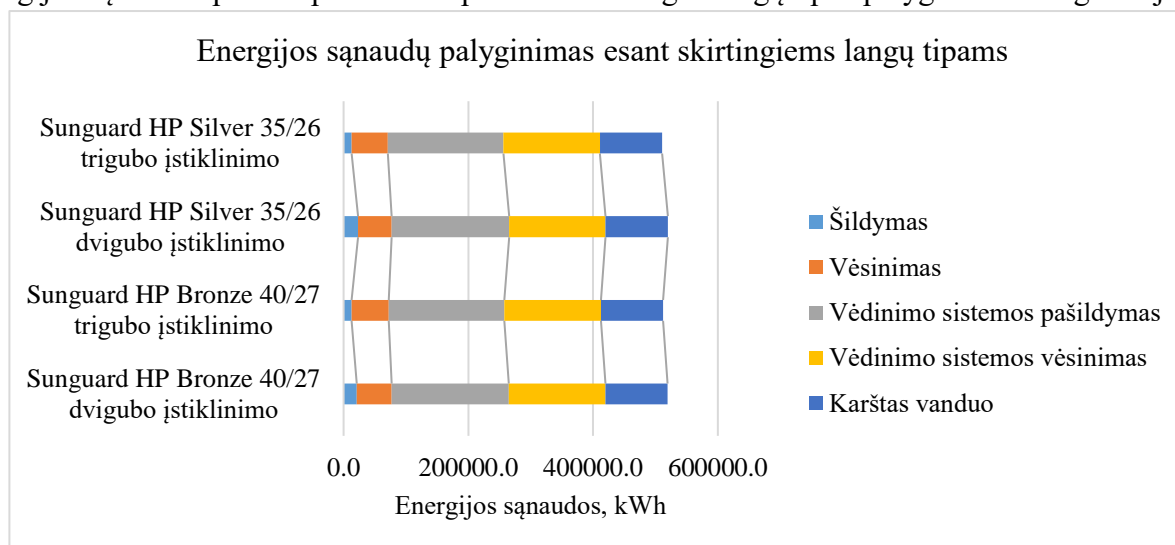
Optimizavimo skaičiavimo metu modeliui apskaičiuotos metinės energijos sąnaudos, kurios būtų suvartojamos, jeigu pastatui būtų sumontuoti kiekvieno iš keturių tipų langai.

Pritaikius modeliui optimizavimo funkciją rezultatų apibendrinimas pateikiamas 14 pav.



14 pav. Skaidrių atitvarų optimizavimo skaičiavimų rezultatų apibendrinimas

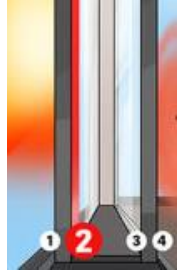
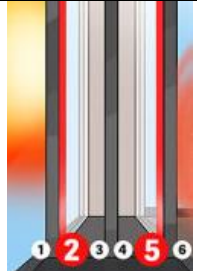
Iš grafiko galima pastebėti, kad nors langų parametrai skirtingi, tačiau energijos suvartojimo rezultatai ženkliai neišsiskiria. Vis dėlto mažiausiai energijos pastatas suvartotų, jeigu būtų parinkti ketvirtojo tipo (Sunguard HP Silver 35/26) langai su trigubu įstiklinimu. Išlieka tendencija, kad daugiausiai energijos suvartoja vėdinimo sistemos įrangos pašildymas bei vėsinimas, tačiau ženkliai sumažėja poreikis patalpų šildymui. Šio tipo lango saulės šviesos laidumo koeficientas T, saulės šilumos laidumo koeficientas g bei matomas pralaidumas T_{vis} yra mažiausi iš tiriamų langų tipų. Energijos sąnaudos pastato poreikiams parinkus skirtingus langų tipus palyginamos diagramoje:



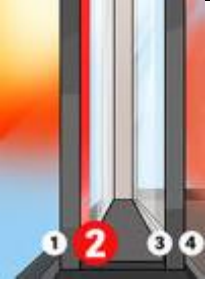
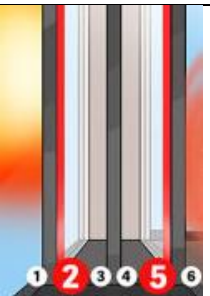
15 pav. Energijos sąnaudų palyginimas esant skirtingiems langų tipams

Detalesni skaičiavimų rezultatai pateikiami 15 lentelėje:

16 lentelė. Langų optimizavimo skaičiavimų suvestinė

Tipas	Lango konstrukcija	Lango parametrai	Per metus suvartojamas energijos kiekis (lentelė), kWh (IDA ICE duomenys)																																																																																										
1	 <p>Sunguard HP Bronze 40/27</p>	<ul style="list-style-type: none"> Dvigubo įstiklinimo Šilumos laidumo koeficientas $U 1,1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ Didžiausias saulės laidumo koeficientas iš visų tiriamų langų 	<p>kWh (sensible and latent)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Month</th> <th>Zone heating</th> <th>Zone cooling</th> <th>AHU heating</th> <th>AHU cooling</th> <th>Dom. hot water</th> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>5191.0</td><td>2214.0</td><td>48261.0</td><td>0.0</td><td>8743.0</td></tr> <tr><td>2</td><td>3734.0</td><td>2216.0</td><td>36993.0</td><td>0.0</td><td>7635.0</td></tr> <tr><td>3</td><td>2143.0</td><td>3023.0</td><td>23911.0</td><td>0.0</td><td>8027.0</td></tr> <tr><td>4</td><td>794.8</td><td>4081.0</td><td>9201.0</td><td>866.4</td><td>8337.0</td></tr> <tr><td>5</td><td>222.6</td><td>6647.0</td><td>1951.0</td><td>13122.0</td><td>8795.0</td></tr> <tr><td>6</td><td>94.2</td><td>7396.0</td><td>422.6</td><td>25680.0</td><td>7799.0</td></tr> <tr><td>7</td><td>64.8</td><td>8832.0</td><td>101.6</td><td>55281.0</td><td>8856.0</td></tr> <tr><td>8</td><td>59.5</td><td>7768.0</td><td>170.3</td><td>53708.0</td><td>8514.0</td></tr> <tr><td>9</td><td>251.6</td><td>4996.0</td><td>1881.0</td><td>5466.0</td><td>8092.0</td></tr> <tr><td>10</td><td>924.1</td><td>3781.0</td><td>6761.0</td><td>417.5</td><td>8754.0</td></tr> <tr><td>11</td><td>2931.0</td><td>2623.0</td><td>21474.0</td><td>9.9</td><td>8014.0</td></tr> <tr><td>12</td><td>4700.0</td><td>2364.0</td><td>36867.0</td><td>0.0</td><td>8415.0</td></tr> <tr> <td>Total</td> <td>21110.6</td> <td>55941.0</td> <td>187994.5</td> <td>154550.8</td> <td>99981.0</td> </tr> </tbody> </table>	Month	Zone heating	Zone cooling	AHU heating	AHU cooling	Dom. hot water							1	5191.0	2214.0	48261.0	0.0	8743.0	2	3734.0	2216.0	36993.0	0.0	7635.0	3	2143.0	3023.0	23911.0	0.0	8027.0	4	794.8	4081.0	9201.0	866.4	8337.0	5	222.6	6647.0	1951.0	13122.0	8795.0	6	94.2	7396.0	422.6	25680.0	7799.0	7	64.8	8832.0	101.6	55281.0	8856.0	8	59.5	7768.0	170.3	53708.0	8514.0	9	251.6	4996.0	1881.0	5466.0	8092.0	10	924.1	3781.0	6761.0	417.5	8754.0	11	2931.0	2623.0	21474.0	9.9	8014.0	12	4700.0	2364.0	36867.0	0.0	8415.0	Total	21110.6	55941.0	187994.5	154550.8	99981.0
Month	Zone heating	Zone cooling	AHU heating	AHU cooling	Dom. hot water																																																																																								
1	5191.0	2214.0	48261.0	0.0	8743.0																																																																																								
2	3734.0	2216.0	36993.0	0.0	7635.0																																																																																								
3	2143.0	3023.0	23911.0	0.0	8027.0																																																																																								
4	794.8	4081.0	9201.0	866.4	8337.0																																																																																								
5	222.6	6647.0	1951.0	13122.0	8795.0																																																																																								
6	94.2	7396.0	422.6	25680.0	7799.0																																																																																								
7	64.8	8832.0	101.6	55281.0	8856.0																																																																																								
8	59.5	7768.0	170.3	53708.0	8514.0																																																																																								
9	251.6	4996.0	1881.0	5466.0	8092.0																																																																																								
10	924.1	3781.0	6761.0	417.5	8754.0																																																																																								
11	2931.0	2623.0	21474.0	9.9	8014.0																																																																																								
12	4700.0	2364.0	36867.0	0.0	8415.0																																																																																								
Total	21110.6	55941.0	187994.5	154550.8	99981.0																																																																																								
2	 <p>Sunguard HP Bronze 40/27 trigubo įstiklinimo</p>	<ul style="list-style-type: none"> Trigubo įstiklinimo Šilumos laidumo koeficientas $U 0,6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 	<p>kWh (sensible and latent)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Month</th> <th>Zone heating</th> <th>Zone cooling</th> <th>AHU heating</th> <th>AHU cooling</th> <th>Dom. hot water</th> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>3225.0</td><td>2481.0</td><td>47716.0</td><td>0.0</td><td>8722.0</td></tr> <tr><td>2</td><td>2232.0</td><td>2454.0</td><td>36490.0</td><td>0.0</td><td>7609.0</td></tr> <tr><td>3</td><td>1125.0</td><td>3379.0</td><td>23460.0</td><td>0.0</td><td>7990.0</td></tr> <tr><td>4</td><td>500.2</td><td>4612.0</td><td>9031.0</td><td>868.4</td><td>8298.0</td></tr> <tr><td>5</td><td>190.5</td><td>7133.0</td><td>1926.0</td><td>13145.0</td><td>8789.0</td></tr> <tr><td>6</td><td>89.5</td><td>7676.0</td><td>416.1</td><td>25698.0</td><td>7798.0</td></tr> <tr><td>7</td><td>64.6</td><td>8969.0</td><td>100.6</td><td>55330.0</td><td>8855.0</td></tr> <tr><td>8</td><td>56.2</td><td>7922.0</td><td>167.5</td><td>53745.0</td><td>8514.0</td></tr> <tr><td>9</td><td>164.1</td><td>5431.0</td><td>1842.0</td><td>5525.0</td><td>8068.0</td></tr> <tr><td>10</td><td>522.0</td><td>4137.0</td><td>6597.0</td><td>428.5</td><td>8707.0</td></tr> <tr><td>11</td><td>1706.0</td><td>2853.0</td><td>21062.0</td><td>9.8</td><td>7990.0</td></tr> <tr><td>12</td><td>2952.0</td><td>2617.0</td><td>36372.0</td><td>0.0</td><td>8398.0</td></tr> <tr> <td>Total</td> <td>12827.1</td> <td>59664.0</td> <td>185180.2</td> <td>154749.7</td> <td>99738.0</td> </tr> </tbody> </table>	Month	Zone heating	Zone cooling	AHU heating	AHU cooling	Dom. hot water							1	3225.0	2481.0	47716.0	0.0	8722.0	2	2232.0	2454.0	36490.0	0.0	7609.0	3	1125.0	3379.0	23460.0	0.0	7990.0	4	500.2	4612.0	9031.0	868.4	8298.0	5	190.5	7133.0	1926.0	13145.0	8789.0	6	89.5	7676.0	416.1	25698.0	7798.0	7	64.6	8969.0	100.6	55330.0	8855.0	8	56.2	7922.0	167.5	53745.0	8514.0	9	164.1	5431.0	1842.0	5525.0	8068.0	10	522.0	4137.0	6597.0	428.5	8707.0	11	1706.0	2853.0	21062.0	9.8	7990.0	12	2952.0	2617.0	36372.0	0.0	8398.0	Total	12827.1	59664.0	185180.2	154749.7	99738.0
Month	Zone heating	Zone cooling	AHU heating	AHU cooling	Dom. hot water																																																																																								
1	3225.0	2481.0	47716.0	0.0	8722.0																																																																																								
2	2232.0	2454.0	36490.0	0.0	7609.0																																																																																								
3	1125.0	3379.0	23460.0	0.0	7990.0																																																																																								
4	500.2	4612.0	9031.0	868.4	8298.0																																																																																								
5	190.5	7133.0	1926.0	13145.0	8789.0																																																																																								
6	89.5	7676.0	416.1	25698.0	7798.0																																																																																								
7	64.6	8969.0	100.6	55330.0	8855.0																																																																																								
8	56.2	7922.0	167.5	53745.0	8514.0																																																																																								
9	164.1	5431.0	1842.0	5525.0	8068.0																																																																																								
10	522.0	4137.0	6597.0	428.5	8707.0																																																																																								
11	1706.0	2853.0	21062.0	9.8	7990.0																																																																																								
12	2952.0	2617.0	36372.0	0.0	8398.0																																																																																								
Total	12827.1	59664.0	185180.2	154749.7	99738.0																																																																																								

15 lentelės tęsinys. Langų optimizavimo skaičiavimų suvestinė

3	 <p>Sunguard HP Silver 35/26 įstiklinimo</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Dvigubo įstiklinimo • Šilumos laidumo koeficientas U 1,2 W/m²·K 	<p>kWh (sensible and latent)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Month</th> <th>Zone heating</th> <th>Zone cooling</th> <th>AHU heating</th> <th>AHU cooling</th> <th>Dom. hot water</th> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>5630.0</td><td>2161.0</td><td>48378.0</td><td>0.0</td><td>8746.0</td></tr> <tr><td>2</td><td>4111.0</td><td>2164.0</td><td>37105.0</td><td>0.0</td><td>7638.0</td></tr> <tr><td>3</td><td>2451.0</td><td>2919.0</td><td>24032.0</td><td>0.0</td><td>8037.0</td></tr> <tr><td>4</td><td>912.8</td><td>3865.0</td><td>9266.0</td><td>864.6</td><td>8352.0</td></tr> <tr><td>5</td><td>242.1</td><td>6255.0</td><td>1964.0</td><td>13096.0</td><td>8799.0</td></tr> <tr><td>6</td><td>98.4</td><td>7042.0</td><td>426.3</td><td>25657.0</td><td>7800.0</td></tr> <tr><td>7</td><td>65.4</td><td>8465.0</td><td>101.9</td><td>55224.0</td><td>8856.0</td></tr> <tr><td>8</td><td>61.6</td><td>7465.0</td><td>171.2</td><td>53662.0</td><td>8514.0</td></tr> <tr><td>9</td><td>287.9</td><td>4748.0</td><td>1896.0</td><td>5425.0</td><td>8099.0</td></tr> <tr><td>10</td><td>1041.0</td><td>3640.0</td><td>6812.0</td><td>413.3</td><td>8764.0</td></tr> <tr><td>11</td><td>3225.0</td><td>2574.0</td><td>21569.0</td><td>10.5</td><td>8016.0</td></tr> <tr><td>12</td><td>5081.0</td><td>2315.0</td><td>36966.0</td><td>0.0</td><td>8417.0</td></tr> <tr><td>Total</td><td>23207.2</td><td>53613.0</td><td>188687.4</td><td>154352.4</td><td>100038.0</td></tr> </tbody> </table>	Month	Zone heating	Zone cooling	AHU heating	AHU cooling	Dom. hot water							1	5630.0	2161.0	48378.0	0.0	8746.0	2	4111.0	2164.0	37105.0	0.0	7638.0	3	2451.0	2919.0	24032.0	0.0	8037.0	4	912.8	3865.0	9266.0	864.6	8352.0	5	242.1	6255.0	1964.0	13096.0	8799.0	6	98.4	7042.0	426.3	25657.0	7800.0	7	65.4	8465.0	101.9	55224.0	8856.0	8	61.6	7465.0	171.2	53662.0	8514.0	9	287.9	4748.0	1896.0	5425.0	8099.0	10	1041.0	3640.0	6812.0	413.3	8764.0	11	3225.0	2574.0	21569.0	10.5	8016.0	12	5081.0	2315.0	36966.0	0.0	8417.0	Total	23207.2	53613.0	188687.4	154352.4	100038.0
Month	Zone heating	Zone cooling	AHU heating	AHU cooling	Dom. hot water																																																																																								
1	5630.0	2161.0	48378.0	0.0	8746.0																																																																																								
2	4111.0	2164.0	37105.0	0.0	7638.0																																																																																								
3	2451.0	2919.0	24032.0	0.0	8037.0																																																																																								
4	912.8	3865.0	9266.0	864.6	8352.0																																																																																								
5	242.1	6255.0	1964.0	13096.0	8799.0																																																																																								
6	98.4	7042.0	426.3	25657.0	7800.0																																																																																								
7	65.4	8465.0	101.9	55224.0	8856.0																																																																																								
8	61.6	7465.0	171.2	53662.0	8514.0																																																																																								
9	287.9	4748.0	1896.0	5425.0	8099.0																																																																																								
10	1041.0	3640.0	6812.0	413.3	8764.0																																																																																								
11	3225.0	2574.0	21569.0	10.5	8016.0																																																																																								
12	5081.0	2315.0	36966.0	0.0	8417.0																																																																																								
Total	23207.2	53613.0	188687.4	154352.4	100038.0																																																																																								
4	 <p>Sunguard HP Silver 35/26 trigubo įstiklinimo</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Trigubo įstiklinimo • Šilumos laidumo koeficientas U 0,6 W/m²·K 	<p>kWh (sensible and latent)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Month</th> <th>Zone heating</th> <th>Zone cooling</th> <th>AHU heating</th> <th>AHU cooling</th> <th>Dom. hot water</th> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>3274.0</td><td>2475.0</td><td>47747.0</td><td>0.0</td><td>8723.0</td></tr> <tr><td>2</td><td>2278.0</td><td>2445.0</td><td>36509.0</td><td>0.0</td><td>7611.0</td></tr> <tr><td>3</td><td>1179.0</td><td>3300.0</td><td>23505.0</td><td>0.0</td><td>7992.0</td></tr> <tr><td>4</td><td>514.3</td><td>4413.0</td><td>9048.0</td><td>866.9</td><td>8299.0</td></tr> <tr><td>5</td><td>191.0</td><td>6831.0</td><td>1928.0</td><td>13132.0</td><td>8789.0</td></tr> <tr><td>6</td><td>89.3</td><td>7378.0</td><td>416.8</td><td>25678.0</td><td>7798.0</td></tr> <tr><td>7</td><td>64.3</td><td>8636.0</td><td>101.2</td><td>55281.0</td><td>8856.0</td></tr> <tr><td>8</td><td>56.0</td><td>7649.0</td><td>168.2</td><td>53721.0</td><td>8514.0</td></tr> <tr><td>9</td><td>167.6</td><td>5247.0</td><td>1846.0</td><td>5499.0</td><td>8069.0</td></tr> <tr><td>10</td><td>537.6</td><td>4040.0</td><td>6611.0</td><td>424.5</td><td>8710.0</td></tr> <tr><td>11</td><td>1743.0</td><td>2844.0</td><td>21079.0</td><td>9.8</td><td>7991.0</td></tr> <tr><td>12</td><td>2987.0</td><td>2612.0</td><td>36384.0</td><td>0.0</td><td>8399.0</td></tr> <tr><td>Total</td><td>13081.2</td><td>57870.0</td><td>185343.2</td><td>154612.2</td><td>99751.0</td></tr> </tbody> </table>	Month	Zone heating	Zone cooling	AHU heating	AHU cooling	Dom. hot water							1	3274.0	2475.0	47747.0	0.0	8723.0	2	2278.0	2445.0	36509.0	0.0	7611.0	3	1179.0	3300.0	23505.0	0.0	7992.0	4	514.3	4413.0	9048.0	866.9	8299.0	5	191.0	6831.0	1928.0	13132.0	8789.0	6	89.3	7378.0	416.8	25678.0	7798.0	7	64.3	8636.0	101.2	55281.0	8856.0	8	56.0	7649.0	168.2	53721.0	8514.0	9	167.6	5247.0	1846.0	5499.0	8069.0	10	537.6	4040.0	6611.0	424.5	8710.0	11	1743.0	2844.0	21079.0	9.8	7991.0	12	2987.0	2612.0	36384.0	0.0	8399.0	Total	13081.2	57870.0	185343.2	154612.2	99751.0
Month	Zone heating	Zone cooling	AHU heating	AHU cooling	Dom. hot water																																																																																								
1	3274.0	2475.0	47747.0	0.0	8723.0																																																																																								
2	2278.0	2445.0	36509.0	0.0	7611.0																																																																																								
3	1179.0	3300.0	23505.0	0.0	7992.0																																																																																								
4	514.3	4413.0	9048.0	866.9	8299.0																																																																																								
5	191.0	6831.0	1928.0	13132.0	8789.0																																																																																								
6	89.3	7378.0	416.8	25678.0	7798.0																																																																																								
7	64.3	8636.0	101.2	55281.0	8856.0																																																																																								
8	56.0	7649.0	168.2	53721.0	8514.0																																																																																								
9	167.6	5247.0	1846.0	5499.0	8069.0																																																																																								
10	537.6	4040.0	6611.0	424.5	8710.0																																																																																								
11	1743.0	2844.0	21079.0	9.8	7991.0																																																																																								
12	2987.0	2612.0	36384.0	0.0	8399.0																																																																																								
Total	13081.2	57870.0	185343.2	154612.2	99751.0																																																																																								

2.5. Rekomendacijos nulinio energijos suvartojimo pastatui pasiekti

Atlikus literatūros analizę bei kompiuterinį energijos sąnaudų modeliavimą pastebėtos tam tikros sprendinių tendencijos, kurias reikia pritaikyti pastato projektavimui, kad jis pasiektų kuo mažesnę energijos suvartojimą.

Literatūros analizė parodė, kad energijos sąnaudų modeliavimas yra privalomas norint prognozuoti šilumos srautus. Ankstyvoje projektavimo stadijoje atlikti skaičiavimai padės parinkti sprendinius, padedančius pastatui suvartoti kuo mažiau energijos.

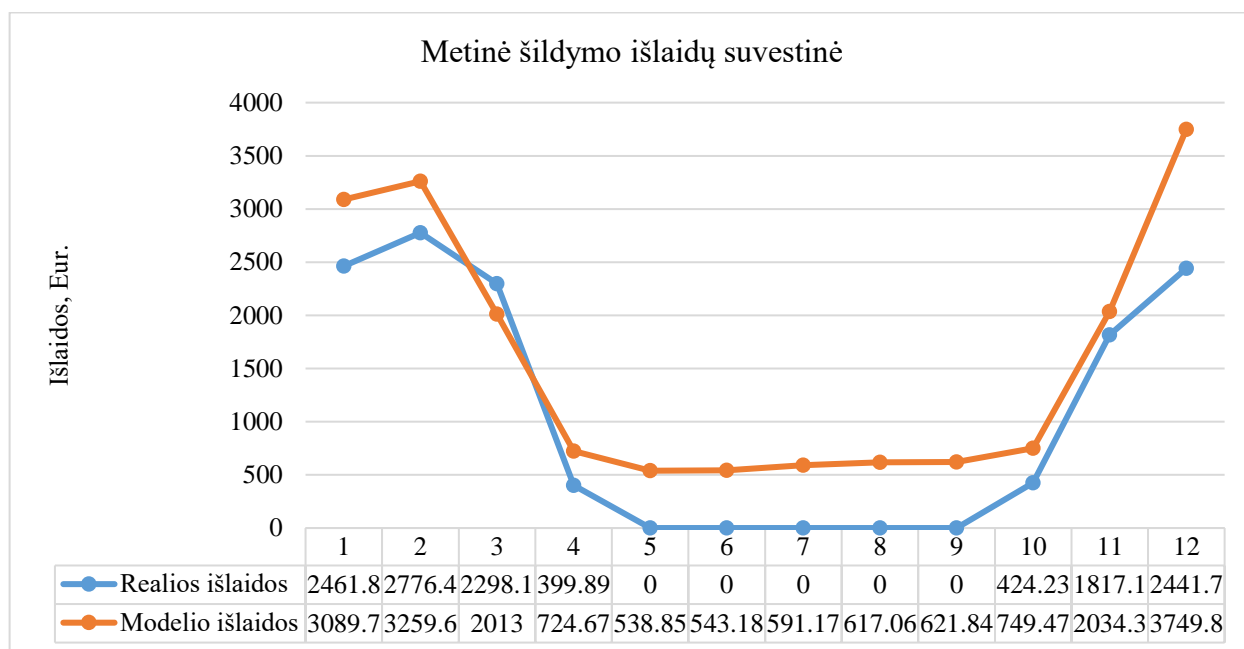
Minimizavus šilumos nuostolius per pastato atitvaras padidėja pastato sandarumas. Ir literatūros analizė, ir tiriamieji kompiuteriniai modeliai atskleidė, kad tuomet išauga poreikis pastato vėsinimui. Įtaką pastato energijos suvartojimui turi langų šešėliavimo priemonės. Jos gali sumažinti energijos poreikį patalpų vėsinimui.

Vėdinimo sistemai užtikrinant minimalią oro kaitą, pastato patalpose rekomenduojamas aukštesnio lygio šilumogražos įrenginio diegimas dėl galimybės išvengti arba sumažinti papildomas tiekiamo oro pašildymo sąnaudas.

Svarbu skirti dėmesį stiklinių pastato atitvarų savybėms, pritaikius optimizavimo funkciją galima išrinkti konstrukcinius sprendinius, padėsiančius ateityje suvartoti mažiau energijos pastato poreikiams.

3. Ekonominė dalis

Atliktas ekonominis sąnaudų palyginimas tarp realių ir sukurto projekcinio modelio išlaidų. Grafike (žr. 16 pav.) matoma panaši išlaidų tendencija, nors modelio paskaičiuotos išlaidos šildymui yra truputį didesnės.



16 pav. Metinių išlaidų šildymui palyginimas

Šis neatitikimas galėjo susidaryti dėl to, kad eksploatuojamame pastate yra laisvų, nuomininkams neišnuomotų biurų, todėl realios išlaidos yra mažesnės. Modelyje skaičiuojama visų patalpų eksploatavimo kaina. Naudojantis programine įranga *RIB iTWO*, įvertinta, kiek kainuoja pastato antžeminės dalies statyba su atsinaujinančių energijos šaltinių įrengimu.

17 lentelė. Pastato statybos kaina su atsinaujinančiais energijos šaltiniais

Antžeminė dalis	Kaina, Eur
Konstrukcijos	2 640 290,96
Apdailos darbai	1 128 292,43
Vidaus apdaila	513 712,54
Liftų įrengimas	149 940,00
Grindų įrengimas	135 288,70
Stogo įrengimas	62 412,29
Inžinerinės sistemos	
Vėdinimo ir dūmų šalinimo sistemos įrengimas	55 998,58
Stacionari gaisro gesinimo sistema	74 172,00
Lietaus nuotekos	37 619,46
Šildymo sistema	103 616,49
Šilumos punktas	11 027,13
Vėdinimo sistema	703 398,25
Oro kondicionavimo sistema	112 193,79
Vandentiekio sistema	61 360,05
Buitinių nuotekų sistema	50 176,44
Sanitariniai prietaisai	52 000,00
Elektrotechnika	748 630,63
VISO:	6 759 491,54

18 lentelės tęsinys. Pastato statybos kaina su atsinaujinančiais energijos šaltiniais

Saulės kolektoriai	30 000,00
Geoterminiai gręžiniai	102 000,00
Išorinės žaliuzės	65 362,88
VISO:	197 362,88

Atliktas modeliuojamo pastato įrangos kainų įvertinimas:

19 lentelė. Realus pastato bei modelio įrangos preliminarios kainos palyginimas

	Realus pastato sąmatinė kaina	Priimama kuriamo modelio sąmatinė kaina	Pastabos
	Kaina, eur.	Kaina, eur.	
Šildymo sistema	103 616,49	103 616,49	
Šilumos punktas	11 027,13	-	
Vėdinimo sistema	703 398,25	703 398,25	
Oro kondicionavimo sistema	112 193,79	112 193,79	
Saulės kolektoriai	-	30 000,00	Daroma prielaida, kad saulės kolektorių tarnavimo laikas 20 metų, išlaidos eksploatacijai per metus 3 % (900 eur.) Išlaidos per 20 metų 18 tūkst. eur.
Geoterminiai gręžiniai	-	102 000,00	Daroma prielaida, kad tarnavimo laikas 50 metų, išlaidos eksploatacijai per metus 2 % (2040 eur.). Išlaidos per 50 metų 102 tūkst. eur.
Išorinės žaliuzės	-	65362,88	Daroma prielaida, kad tarnavimo laikas 35 metai, išlaidos eksploatacijai per metus 2 % (1307 eur.). Išlaidos per 35 metus 45,7 tūkst. eur.
Viso:	930235,66	1056121,39	

Atliktas palyginimas parodė, kad pastato sistemų įrengimas pabrangtų beveik 126 tūkst. eurų, tai sudaro 11,91 % pabrangimą nuo pirminės sistemų įrengimo kainos. Vertinime priimta, kad modeliui įdiegti išorines žaliuzes, proporcingai sumažėja išlaidos oro kondicionavimo sistemai.

4. Rezultatų apibendrinimas

Tiriamąjį objekto energijos sąnaudų analizė parodė, kad neįgyvendinti projektiniai sprendiniai turėjo įtakos pastato energijos suvartojimui. Didžiausi šilumos nuostoliai susidaro per stiklines atitvaras, kurios sudaro 31 % nuo viso pastato išorinių atitvarų ploto. Elektros sąnaudos sudaro didžiąją dalį viso pastato energijos suvartojimo (28 %), sausio mėnesį tai siekia 14,11 MWh ir kainuoja 3077,57 Eur. Didžiausią dalį elektros sąnaudų suvartoja vėdinimo, vėsinimo, apšvietimo sistemos bei biuro įranga (998,98 MWh).

Sukurto mažesnės apimties modelio skaičiavimai parodė, kad nulinio energijos suvartojimo pasiekti nepavyko, tačiau atsinaujinančių energijos šaltinių generuojamos energijos įmanoma padengti šildymo poreikį (11,602 MWh) bei dalį vėsinimo poreikio (4,57 MWh) per metus.

Tiriamąjį biurų pastato projektinis energijos poreikis palygintas su dinaminio energijos sąnaudų modeliavimo programos *IDA ICE* gautais rezultatais. Atlikus modelio skaičiavimus nustatyta, kad modelio energijos poreikis šildymui yra 304,9 kW, vėsinimui 349,9 kW, o projektinės vertės šildymui siekia 300,0 kW, o vėsinimui 271,0 kW. Palyginus bendrą energijos poreikį gautas 14,6 % skirtumas tarp projektinio ir modelio energijos poreikio, taigi priimta, jog modelis yra patikimas tolimesniems skaičiavimams atlikti.

Siekiant A++ energinio naudingumo klasės, modeliui buvo pakeisti atitvarų parametrai, įdiegtos atsinaujinančių energijos šaltinių sistemos – saulės kolektoriai, kurių panelių plotas 256 m², ir geoterminiai gręžiniai (vieno gręžinio gylis 150 m, iš viso 25 gręžiniai). Modeliavimo rezultatai parodė, kad atsinaujinančių energijos šaltinių nepakanka pastato energijos poreikiams padengti, pastatas nepasiekia nulinio energijos suvartojimo.

Pritaikius optimizavimo funkciją vėdinimo sistemai apskaičiuota, kad optimali temperatūra, išeinanti iš vėdinimo įrenginio prieš pašildymą yra 16 °C, tada suvartojama mažiausiai energijos (1,51 MWh). Pritaikius optimizavimo funkciją skaidrioms atitvaroms nustatytas optimaliausias langų tipas modeliuojamam pastatui. Šio tipo lango saulės šviesos laidumo koeficientas T , saulės šilumos laidumo koeficientas g bei matomas pralaidumas T_{vis} yra mažiausi iš tiriamų langų tipų. Galima daryti išvadą, kad šie parametrai yra reikšmingi ir turi įtakos pastato energijos suvartojimui.

Modeliui suprojektavus saulės šešėliavimo priemones – išorines žaliuzes – 5 % sumažėjo suvartojamos energijos poreikis vėsinimui.

Išvados

1. Atlikus literatūros analizę nulinio energijos suvartojimo pastatų srityje pastebėta, kad nulinės energijos pastatų projektavimo principai susideda iš pasyviųjų metodų, efektyviai energiją naudojančių sistemų panaudojimo ir atsinaujinančiosios energijos sistemų integravimo. Miesto aplinkoje optimaliausi atsinaujinančiosios energijos šaltiniai yra saulės ir geoterminė energija dėl patogaus įrengimo.
2. Tiriamojo objekto energijos sąnaudų analizė parodė, kad didžiausios komunalinės išlaidos tenka elektrai (28 % visų išlaidų), o daugiausiai elektros energijos suvartoja vėdinimo, vėsinimo, apšvietimo bei įrangos sistemos.
3. Atlikus bandomojo modelio modeliavimą *IDA ICE* programine įranga pastebėta, kad kuo pastatas sandaresnis ir kuo atitvarų šilumos perdavimo koeficientai artimesni A++ energinio naudingumo klasės pastatų konstrukcijoms, tuo labiau išauga energijos sąnaudos vėsinimui (šiuo atveju 41,71 %).
4. Bendras energijos poreikis tarp realaus tiriamojo pastato projektinių ir sukurto modelio duomenų skiriasi 14,6 %, priimta, kad modelis pakankamai tikslus ir yra tinkamas tolimesniems skaičiavimams atlikti. Modeliui *IDA ICE* aplinkoje pritaikius optimizavimo funkciją vėdinimo sistemai apskaičiuota, kad optimali temperatūra, išeinanti iš vėdinimo įrenginio prieš pašildymą yra 16 °C, tada suvartojama mažiausiai energijos (1,51 GWh per metus). Tiriamojo pastato modeliui suprojektavus saulės šėšėliavimo priemones – išorines žaliuzes – 5 % sumažėjo suvartojamos energijos poreikis vėsinimui.
5. Tyrimas parodė, kad projektavimo stadijoje atliktas energinis modeliavimas gali padėti parinkti optimalius konstrukcinius sprendinius, numatyti pastato energijos poreikius, atsinaujinančių energijos šaltinių gaminamą energijos kiekį. Atliktas ekonominis palyginimas parodė, kad įrengus saulės kolektorius, geoterminius gręžinius ir išorines žaliuzes pastato sistemų įrengimas pabrangtų beveik 126 tūkst. Eurų, tai sudaro 11,91 % pabrangimą nuo pirminės sistemų sąmatinės kainos.

Literatūros sąrašas





















1. TORCELLINI, P., PLESS, S., DERU, M. *Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition*. National Renewable Energy Laboratory (NREL), USA [interaktyvus] 2006, [žiūrėta 2019-11-06]
2. European Commission: *Energy performance of buildings* [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2019-05-08]. Prieiga per: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/energy-performance-of-buildings>
3. EUROPOS PARLAMENTO IR TARYBOS DIREKTYVA 2010/31/ES 2010 m. gegužės 19 d. dėl pastatų energinio naudingumo (nauja redakcija)
4. AELENEI L., AELENEI D., GONCALVES H., LOLLINI R., MUSSAL E., SCOGNAMIGLIO A., CUBI E., NOGUCHI M. Design issues for net zero-energy buildings. *Open House International · January 2012* [interaktyvus] 2012, [žiūrėta 2019-11-04] Prieiga per: ResearchGate
5. Statybos techninis reglamentas STR 2.01.02:2016 „Pastatų energinio naudingumo projektavimas ir sertifikavimas“
6. PADUOS S. CORRADO V. Cost-optimal approach to transform the public buildings into nzeb: an European cross-country comparison. *Energy Procedia 140* [interaktyvus] 2017, 314-324 [žiūrėta 2019-05-10]. Prieiga per: doi:10.1016/j.egypro.2017.11.145
7. MOLDOVAN M. D., VISA I., NEAGOE M., BURDUHOS B., Solar heating & cooling energy mixes to transform low energy buildings in nearly zero energy buildings. *Energy Procedia 48* [interaktyvus] 2013, 924-937 [žiūrėta 2018-11-15]. Prieiga per: doi:10.1016/j.egypro.2014.02.106
8. ŠIJANEC M., STEGNAR G. Comparison of Simulated and Monitored Energy Performance Indicators on NZEB case study Eco Silver House. *Procedia Environmental Sciences 38* [interaktyvus] 2017, 52-59 [žiūrėta 2019-03-17]. Prieiga per: doi:10.1016/j.proenv.2017.03.074
9. HILLIAHO K., LAHDENSIVU J., VINHA J. Glazed space thermal simulation with IDA-ICE 4.61 software - Suitability analysis with case study. *Energy and buildings 89* [interaktyvus] 2015, 132 – 141 [žiūrėta 2019-11-29]. Prieiga per: doi: 10.1016/j.enbuild.2014.12.041
10. VALANČIUS K., MAŽULAITYTĖ G. Nulinės energijos vienbučių namų galimybės Lietuvoje. 19-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminė konferencija [interaktyvus] 2017, [žiūrėta 2019-03-02] ISSN 2029-7157. Prieiga per: ResearchGate
11. TESTI D., SCHITO E. Cost – optimal sizing of solar thermal and photovoltaic systems for the heating and cooling needs of a nearly Zero – Energy Building: design methodology and model description. *Energy Procedia 91* [interaktyvus] 2016, 517-527 [žiūrėta 2019-04-28]. Prieiga per: doi:10.1016/j.egypro.2016.06.191
12. FADEJEV J., SIMSON R., KURNITSKI J., KESTI J., MONONEN T., LAUTSO P. Geothermal heat pump plant performance in a nearly zero – energy building. *Energy Procedia 96* [interaktyvus] 2016, 489-502 [žiūrėta 2019-03-21]. Prieiga per: doi:10.1016/j.egypro.2016.09.087
13. MURANO G., PRIMO E., CORRADO V. The effect of glazing on nZEB performance. *Energy Procedia 148* [interaktyvus] 2018, 320-327 [žiūrėta 2019-10-25]. Prieiga per: doi: 10.1016/j.egypro.2018.08.084

Priedai

1 priedas. Pastato konstrukcinių detalių įvestis *IDA ICE* aplinkoje

Building defaults

Elements of Construction

 External walls	 Duetto wall A++	▼	▶
 Internal walls	 © Interior wall with insulation (example)	▼	▶
 Internal floors	 Perdanga A++	▼	▶
 Roof	 Stogas A++	▼	▶
 External floor	 Concrete floor against ground (example)1	▼	▶
 Basement wall towards ground	 grindys virs grunto A++	▼	▶
 Slab towards ground	 Concrete floor against ground (example)1	▼	▶
 Glazing	 3 pane glazing, clear, 4-12-4-12-4	▼	▶
 Door construction	 [use wall construction]	▼	▶
 Integrated window shading	 © External blind (BRIS)	▼	▶

2 priedas. Modeliuojamo pastato sistemų pavyzdys

