



Kauno technologijos universitetas
Statybos ir architektūros fakultetas

**Pastato formos kompaktiškumo rodiklių analizė energijos
sąnaudų įvertinimui Lietuvos klimato sąlygoms**

Magistro baigiamasis projektas

Vytautas Garliauskas
Projekto autorius

Doc. Jurgita Černeckienė
Vadovė

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Pastato formos kompaktiškumo rodiklių analizė energijos šnaudų įvertinimui Lietuvos klimato sąlygoms

Magistro baigiamasis projektas

Darnūs ir energetiškai efektyvūs pastatai (6211EX006)

Vytautas Garliauskas

Projekto autorius

Doc. Jurgita Černeckienė

Vadovė

Prof. Tadas Ždankus

Recenzentas

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Vytautas Garliauskas

Pastato formos kompaktiškumo rodiklių analizė energijos sąnaudų įvertinimui Lietuvos klimato sąlygoms

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Vytautas Garliauskas

Patvirtinta elektroniniu būdu



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

Magistro baigiamojo projekto užduotis

Studijų programa: DARNŪS IR ENERGETIŠKAI EFEKTYVŪS PASTATAI

Baigiamojo projekto tema (lietuvių k.):
PASTATO FORMOS KOMPAKTIŠKUMO RODIKLIO SUKŪRIMAS LIETUVOS
KLIMATO SĄLYGOMS, TAIKANT MĖNESIO VIDUTINIŲ SĄLYGŲ IR DINAMINIŲ
MODELIAVIMĄ

Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanų potvarkiu Nr.: V25-09-16

(lietuvių k.):
PASTATO FORMOS KOMPAKTIŠKUMO RODIKLIŲ ANALIZĖ ENERGIJOS SĄNAUDŲ
ĮVERTINIMUI LIETUVOS KLIMATO SĄLYGOMS

(anglų k.):
ANALYSIS OF BUILDING FORM COMPACTNESS INDICATORS FOR ENERGY
CONSUMPTION ASSESSMENT ACCORDING TO LITHUANIAN CLIMATE CONDITIONS

Pradiniai duomenys darbui (pagal poreikį):

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

Kita informacija (pagal poreikį), susitikimų su vadovu savaitės diena (-os) bei laikas:
KONSULTACIJŲ LAIKAS PENKTADIENIAIS 8.30.

Vadovas: Doc. Jurgita Černeckienė parašas
(indėlis 100 %) pareigos, vardas, pavardė

Studentas: Vytautas Garliauskas parašas
vardas, pavardė

Garliauskas, Vytautas. Pastato formos kompaktiškumo rodiklių analizė energijos sąnaudų įvertinimui Lietuvos klimato sąlygoms. Magistro studijų baigiamasis projektas / vadovė doc. Jurgita Černeckienė; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptių grupė: inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: formos kompaktiškumo rodiklis, energijos sąnaudos, kompaktiškumas, ankstyvieji projektavimo etapai, energinis efektyvumas.

Kaunas, 2023. 51 p.

Santrauka

Didelę įtaką bendram pastato energijos vartojimo efektyvumo potencialui turi veiksniai, numatomi ankstyvosiose projekto stadijose. Ankstyvosiose projektų stadijose, projekto pasikeitimai yra ganėtinai dažni, todėl įprasti imlūs laikui optimalių pastato energinių savybių nustatymo metodai gali neįvertinti skirtingų sprendinių įtakos. Siekiant išvengti egzistuojančios kontradikcijos ir įvertinti pastato formos įtaką energijos vartojimo efektyvumui architektai bei inžinieriai gali naudoti nesudėtingos išraiškos lengvai suprantamus formos kompaktiškumo rodiklius. Magistro studijų baigiamajame projekte atliktas tyrimas realaus administracinio pastato Kauno mieste atveju. Tyrimo metodologija remiasi pradinio tyrimo metu suformuota tyrimo eiga ir rezultatais. Tyrimui suformuoti keturi realios, „I“, „L“ ir „U“ formos pastato modeliai, kuriems buvo atlikti dinaminiai skaičiavimai keturiose skirtingose orientacijose IDA-ICE dinaminio energinio modeliavimo programa. Nustatyta, jog šešėliuojančio ir šešėliuojamo fasadų ilgių santykis bei pastato orientacija pasaulio šalių atžvilgiu neturėjo pastebimos įtakos nei šiluminės, nei elektros energijos suvartojimui. Išorinių atitvarų ploto ir tūrio santykiui nustatyta tiesinė priklausomybė nuo šiluminės energijos sąnaudų, tačiau pastebimo sąryšio su elektros energijos suvartojimu nustatyta nebuvo.

Garliauskas, Vytautas. Analysis of Building Form Compactness Indicators for Energy Consumption Assessment According to Lithuanian Climate Conditions. Master's Final Degree / supervisor Assoc. Prof. Jurgita Černeckienė; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Study field group: Engineering Sciences.

Keywords: shape factor, energy demand, compactness, early design stages, energy efficiency.

Kaunas, 2023. 51 p.

Summary

Factors of significant impact on the overall energy efficiency potential of the building are decided in the early stages of the design. In the early stages of design, design modifications are quite frequent, therefore contemporary time-consuming methods for determining the optimal energy properties of a building may miscalculate the impact of the proposed solutions. In order to avoid the contradiction and to evaluate the impact of the building shape on the energy efficiency, architects and engineers may use simply expressed and perceived shape compactness indicators. The research of a real administrative building in the city of Kaunas was carried out in the master's thesis. The research methodology is based on the concept and results of the initial research. Dynamic energy simulations for energy models of real, I-, L- and U- shaped building alternatives in four different orientations were performed with IDA-ICE dynamic energy simulation software. It was determined that the length ratio of the shading and shaded facades and the orientation of the building have negligible impact on the consumption of thermal energy and electric power consumption. The ratio of the building envelope area to inner volume and thermal energy consumption were found to be linearly dependent, however, no significant correlation to electric power consumption was found.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Įvadas.....	10
1. Literatūros analizė.....	11
1.1. Pastato formos kompaktiškumo rodikliai	13
1.2. Mokslinių tyrimų metodologijos	16
1.3. Literatūros apžvalgos išvados.....	17
2. Metodologija	18
2.1. Pradinis tyrimas	18
2.2. Tyrimas realaus pastato atveju	20
2.2.1. Tyrimo metodologija	21
2.2.2. Architektūriniai sprendiniai.....	22
2.2.3. Konstrukciniai sprendiniai.....	24
2.2.4. Pastato inžinerinės sistemos	26
2.2.5. Menamos pastato alternatyvos	31
3. Rezultatai.....	33
3.1. Realaus pastato energinio modelio patvirtinimas	33
3.2. Tyrimo rezultatai ir interpretacija.....	36
3.3. Tyrimo hipotezių vertinimas	39
4. Diskusija	43
Išvados	46
Literatūros sąrašas	48

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Pastato energinio modelio išorinių atitvarų šilumos perdavimo koeficientai	24
2 lentelė. Pastato ilginių šiluminių tiltelių šilumos perdavimo koeficientų vertės	26
3 lentelė. Pastato energinio modelio zonų mikroklimato parametrai.....	26
4 lentelė. Modeliuojamų šviestuvų parametrai	27
5 lentelė. Realus pastato ir jo menamų alternatyvų charakteristikos	31
6 lentelė. Administracinio pastato energinio modelio metinės energijos sąnaudos 2021 metų laikotarpiu.....	33
7 lentelė. Administracinio pastato realios metinės energijos sąnaudos 2021 metų laikotarpiu	34
8 lentelė. Realus pastato ir jo modelio metinių energijos sąnaudų palyginimas.....	34
9 lentelė. Tyrimo objektų metinės energijos sąnaudos ir CO ₂ emisijos.....	36

Paveikslų sąrašas

1 pav. 14-os tiriųjų objektų formos [17]	13
2 pav. Pastato šešėliuojančio, šešėliuojamo ir atviro fasadų pozicijos [13].....	16
3 pav. „I“, „L“ ir „U“ formos modeliai naudoti pirminiame tyrime	19
4 pav. Pastatų modelių suminių energijos sąnaudų santykinių koeficientų grafikas	20
5 pav. Administracinio pastato energinis modelis <i>IDA-ICE</i> aplinkoje	21
6 pav. Tyrime nagrinėjamos menamų pastatų formos	22
7 pav. Tiriomojo pastato tūrių išdėstymo planas.....	23
8 pav. Tipinis realaus pastato energinio modelio administracinio aukšto planas	24
9 pav. Pastato įstiklinimo schema pagal stiklo paketų suminės saulės energijos praleisties koeficientų vertės: raudona – $g = 0,38$, žalia – $g = 0,50$	25
10 pav. Apšvietimo ir įrangos veikimo bei žmonių užimtumo grafikai pagal ASHRAE 90.1 standartą [35]	28
11 pav. Žmonių užimtumo grafikai pagal tyrimą Vokietijos biuruose [36]	29
12 pav. Modelyje taikomi žmonių užimtumo grafikai.....	29
13 pav. Modelyje taikomi įrangos veikimo grafikai	30
14 pav. Modelyje taikomi apšvietimo veikimo grafikai	30
15 pav. Menamų alternatyvų modelių architektūrinės vizualizacijos: a) „I“, b) „L“, c) „U“	31
16 pav. „I“, „L“ ir „U“ formų menamų alternatyvų tipinio administracinio aukšto planai	32
17 pav. Tiriųjų alternatyvų metinės šiluminės ir elektros energijos sąnaudos.....	37
18 pav. Tyrimo modelių vidutinių energijos sąnaudų pasiskirstymas	37
19 pav. Tyrimo modelių metinės CO ₂ emisijos	39
20 pav. Tyrimo modelių šiluminės energijos sąnaudų priklausomybės nuo <i>a/b</i> rodiklio grafikas... ..	40
21 pav. Tyrimo modelių elektros energijos sąnaudų priklausomybės nuo <i>a/b</i> rodiklio grafikas	40
22 pav. Tyrimo modelių šiluminės energijos sąnaudų priklausomybė nuo <i>S/V</i> rodiklio.....	41
23 pav. Tyrimo modelių suminių energijos sąnaudų priklausomybės nuo <i>S/V</i> rodiklio grafikas.....	42

Įvadas

Šilumos nuostoliai per pastato išorines atitvaras yra vienas iš pagrindinių veiksnių, nulemiančių eksploatacines energijos sąnaudas. Šios atitvaros yra riba, skirianti išorės klimatą ir patalpų vidaus mikroklimatą, kurio sukūrimui yra suvartojamas tam tikras šildymo, vėsinimo ir kt. energijos kiekis. Energijos gavyba generuoja šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas, kurios skatina klimato atšilimą. Dėl to eksploatacinės energijos suvartojimo minimizavimas tampa ne tik ekonominiu, bet ir aplinkosauginiu tikslu.

Išorinio klimato poveikis vidaus mikroklimatui priklauso nuo juos ribojančios terpės parametrų. Kita vertus, šiam poveikiui įtakos gali turėti ir išorės klimato sąveika su išorinėmis atitvaromis. Saulės spinduliuotės kritimo į žemės paviršių laipsnis priklauso nuo vietovės, tai nulemia saulės energijos kiekį tenkanti įvairiems paviršiams. Tačiau šį energijos kiekį gali sumažinti įvairūs šešėlių metantys objektai. Pastatą gali šešėliuoti įvairūs aplinkos objektai, taip pat ir jis pats, todėl išorinio klimato sąveiką su išorinėmis atitvaromis gali nulemti ir pastato konfigūracija.

Pastato forma dažniausiai yra pasirenkama dar pastato koncepcijos stadijoje, pasirinkimą gali nulemti skirtingi veiksniai, pavyzdžiui, žemės sklypo konfigūracija, pastato funkcinis išplanavimas, urbanistinis kontekstas ir kt. Pastato savybių, taip pat ir jo formos, įtaka jo energijos suvartojimo efektyvumui gali būti tiksliai įvertinama programine įranga atliekamais dinaminiais energiniais skaičiavimais, kurie yra imlūs laikui. Ankstyvosiose projektų stadijose pasikeitimų dažnis yra didelis, dėl to tokie energiniai skaičiavimai tampa sunkiai pritaikomi. Tai lemia atsirandantį lengvai apskaičiuojamo bei išreiškiamo rodiklio poreikį, galinčio pakankamai tiksliai palyginti tam tikrų pastato formų energijos suvartojimo efektyvumą, kuriuo galėtų pasinaudoti architektai bei inžinieriai.

Pastato formos įtaką energijos sąnaudoms nagrinėjantys tyrimai nėra nauji, naujaisi iš jų, paremti optimizavimo uždavinių sprendimu, stengiasi atrasti energiškausiai efektyviausius sprendinius. Visgi pastato formos kompaktiškumo rodiklių tyrimų spektras yra sąlyginai siauras, šie tyrimai neretai apsiriboja konkrečių aplinkybių, apibrėžtų specifinėmis sąlygomis, analize. Tyrimai, vertinantys pastato formos įtaką energijos sąnaudoms dažniausiai atliekami Vakarų Europos ar šiltesnių klimato zonų atvejais, kurių meteorologiniai parametrai skiriasi nuo Lietuvos klimato. Todėl magistro baigiamojo projekto **tikslas** yra išanalizuoti pastato formos kompaktiškumo sąryšį su pastato energijos sąnaudomis Lietuvos klimate.

Magistro baigiamajam projektui yra keliami šie **uždaviniai**:

1. Remiantis temos mokslinės literatūros analize identifikuoti pastato formos kompaktiškumo rodiklius.
2. Sudaryti ir išbandyti pastato formos kompaktiškumo įtakos energijos sąnaudoms tyrimo metodiką, tiriant supaprastintos konstrukcijos pastatų skaitmeninius modelius.
3. Sudaryti realaus pastato energinį modelį bei įvertinti jo energinių savybių atitiktį istoriniams eksploatacijos duomenims.
4. Atlikti pastato energinio modeliavimo tyrimus, naudojant realaus pastato ir jo galimų konfigūracijų alternatyvius sprendimus.
5. Identifikuoti pastato formos kompaktiškumo rodiklį, tiksliausiai įvertinantį jo sąsają su pastato energijos sąnaudomis.

1. Literatūros analizė

Mokslinėje literatūroje yra plačiai nagrinėjama pastatų energijos taupymo bei jos vartojimo efektyvumo tema įvairiais aspektais. Praktiškai visų šioje literatūros analizėje nagrinėtų straipsnių autoriai sutaria, jog didelę įtaką bendram pastato energijos vartojimo efektyvumo potencialui turi veiksniai, numatyti jau ankstyvosiose projekto stadijose [1–3]. Vienas tokių veiksnių yra pastato forma, priklausomai nuo pastato paskirties, ji gali būti nustatyta pagal įvairius kriterijus: technologinių procesų poreikius, žemės sklypo ribas, architektūrinius ir estetinius sumanymus, bendras pastato funkcionalumo gaires, užsakovo poreikius ir kt. Tačiau, pastebima, jog statinio projekto pradžioje sukurta jo forma yra inertiška ir projekto metu išlieka praktiškai tokia pati [1]. Savo ruožtu, parinkta optimali pastato forma bei jo orientacija pasaulio šalių atžvilgiu gali sumažinti energijos sąnaudas 30–40 % [2]. Tai rodo, jog pastato konfigūracija, siekiant parengti kuo energetiškai taupesnę pastatą, turi būti teisingai parengta jau pačioje projekto pradžioje.

Kitas identifikuojamas ypatingos svarbos veiksnys yra pastato išorinių atitvarų paviršius. R. Gonzalo ir K. J. Habermann'o rašo [3], jog pastatų šilumos nuostolius lemia pagrindiniai trys veiksniai: šilumą perduodantis paviršius, jo šiluminiai parametrai bei vidaus ir išorės temperatūrų skirtumas. Skirtumas tarp pastato vidaus ir išorės temperatūrų yra parametras, kurio skaitinei išraiškai turėti įtakos yra ganėtinai sunku, kadangi pastato patalpų temperatūra turi atitikti nacionalines higienos normas, o išorės oro temperatūra yra nekontroliuojama dedamoji, nes priklauso nuo vietovės klimato. Šalto klimato regionuose šilumos nuostoliai per pastato išorines atitvaras sudaro apie 50 % viso pastato šildymo poreikio [4], todėl atitvarų šilumos perdavimo koeficientai yra reglamentuojami ir juos galima vertinti kaip nekintamą parametą. Pastato išorinių atitvarų parametrus, kaip pagrindinį šilumos nuostoliams darantį įtaką faktorių įvardija ir kiti mokslininkai [5–10]. V. Granadeiro ir kt. [7] taip pat pažymi, jog fasadai ir jų elementai yra numatomi ankstyvosiose projektų stadijose, o architektams tenka sudėtingas kompleksinis darbas parinkti tinkamus jų parametrus, kurie vėliau turės įtakos pastato energijos suvartojimui.

Atskiras pastatų išorinio paviršiaus parametras yra skaidrių atitvarų plotas (langai, stoglangiai, švieslangiai ir kt.). Langai yra labai svarbi pastatų dalis, turinti įtakos tiek šiuolaikinių fasadų estetikos kryptčiai, tiek funkcionalumui, tiek ir pastato energinėms savybėms [6–8, 11, 12]. Pagrindinė langų savybė, daranti įtaką pastatų energijos suvartojimui, yra gebėjimas praleisti tiek regimąją šviesą, tiek ir infraraudonąsias saulės spinduliuotės bangas, t.y. šiluminę energiją. Viena vertus, regimoji saulės šviesa pastato patalpoms suteikia natūralų apšvietimą, o tai leidžia sumažinti apšvietimo sistemos darbo apimtį ir tuo pačiu jos sunaudojamą energiją. Kita vertus, tiesioginės saulės infraraudonosios spinduliuotės pastato patalpoms suteikiama energija turi būti kompensuojama siekiant išlaikyti jose šiluminį balansą. Ši energija gali kompensuoti šaltuoju metų laikotarpiu susidarančius pastato šilumos nuostolius, tiek ir ji pati gali būti kompensuojama vėsinimo sistema. K. W. Chen'as ir kt. [11] nurodo, jog tropikų klimato sąlygomis, 50 % pastato energijos sąnaudų sudaro vėsinimo poreikis, kurio didžiąją dalį sudaro būtent šilumos pritekėjimai dėl saulės spinduliuotės. Dėl to, gebėjimas parinkti optimalų langų plotą, jų šešėliavimo objektus bei įvertinti pačio pastato formos savybes, darančias poveikį tiesioginės saulės spinduliuotės srauto, tenkančio langų plotui, energijos kiekiui, yra svarbus aspektas [6, 13].

Kuo tikslesnis šių pastato energinio efektyvumo potencialą lemiančių veiksnių nustatymas dar ankstyvose projektų stadijose yra viena iš mokslinėje literatūroje nagrinėjamų temų. Galima išskirti dvi skirtingas mokslinių tyrimų šioje sferoje kryptis: pastato savybių įtakos energijos sąnaudoms

optimizacinius tyrimus bei pastato formos kompaktiškumo rodiklių sąryšio su energijos sąnaudomis tyrimus. Abiejų sričių tyrimai remiasi optimizavimo uždavinių sprendiniais, visgi juos galima išskirti pagal optimizacijos rezultatų siekimo metodologiją. Tyrimai, besikoncentruojantys į pastato savybių optimizaciją naudoja optimizacinius algoritmus automatiniam geriausio tyrimo objekto varianto sugeneravimui [2, 6, 11, 14, 15], kai tyrimai, nagrinėjantys pastato kompaktiškumą, yra paremti skirtingų tyrimo objektų variantų tarpusavio lyginamąja analize, taip siekiant rasti tam tikrą sąryšį tarp nustatytų parametrų [5, 7, 8, 10, 16–18].

Pastato savybių, darančių įtaką, energijos sąnaudoms optimizacija gali būti plataus spektro, įvertinanti pastato formą, išorinių atitvarų šilumines charakteristikas, langų plotą bei jų matmenis, šešėliavimo priemones, inžinerines sistemas ir kt. Tai leidžia ištirti optimalius architektūrinius, konstrukcinius ar inžinerinius sprendinius atitinkamoms sąlygoms. Visgi tokie tyrimai dažnai yra pritaikomi konkrečioms situacijoms, pateikdami optimalius tam tikrų pastato detalių rinkinių rezultatus, o tai negali daryti esminės įtakos atitinkamoms energijos sąnaudoms darančių veiksnių parametrams. Kaip teigia K. Negendahl'as ir T. R. Nielsen'as [14], ankstyvosiose projektų stadijose, kai projekto pasikeitimai yra ganėtinai dažni, optimalių pastato energinių savybių nustatymo metodai bendrai apima šiluminių išorinių atitvarų bei sistemų reikalavimus, tai lemia, jog nėra įvertinami kiti reikšmingi sprendiniai. Taip pat pastato energinis modeliavimas bei energiniai skaičiavimai, kurių pagrindu optimizavimo algoritmai suformuluoja geriausius variantus, yra imlūs laikui procesai [1]. Kaip rašo K. W. Chen'as ir kt. [11], dauguma optimizacinių tyrimų naudoja gana detalius pastato energinių savybių skaičiavimus galinčią atlikti programinę įrangą, kuri modeliavimo procese reikalauja smulkių ir konkrečių sistemų parametrų, kurie ankstyvosiose projekto stadijose nebūna aiškūs, todėl energinių skaičiavimų rezultatai gali būti iškreipti.

Greitesniems ir preliminariems, nereikalaujantiems daug detalių žinių apie projektuojamą pastatą, pastato energijos sąnaudų skaičiavimams mokslinėje literatūroje yra bandoma atrasti įvairius pastato formos kompaktiškumo rodiklius arba įvertinti jau žinomus. Vienas iš pagrindinių pastato formos kompaktiškumo rodiklių reikalavimų yra galimybė jį lengvai išreikšti ir suprasti [17], jog būtų galima sumažinti skaičiavimams reikalingą didelį kintančių projekto dedamųjų, kurias inžinieriai ir architektai turi apsvarstyti, kiekį. Susidomėjimas tokiais esminiais energijos sąnaudoms įtaką darančiais veiksniais kaip pastato forma ar kt. nėra naujas, tačiau juntamas platesnių tyrimų trūkumas [5]. Dėl to paprasto rodiklio, nusakančio pastato formos ir jo energijos sąnaudų sąryšį, suformulavimas yra vienas iš mokslininkų tyrimų tikslų. Pastaraisiais dešimtmečiais mokslininkai tyrinėjo pastato ilgio bei pločio [10] bei išorinių atitvarų ploto ir jų ribojamo tūrio [2, 5, 7, 17, 18] ar referencinio kūno išorinio ploto [5] santykių įtaką pastato energijos sąnaudoms. Be šių įprastai randamų rodiklių mokslinėje literatūroje galima atrasti ir labiau detalizuotų skaičiavimo modelių [7] ar tyrimų, nagrinėjančių specifines pastatų savybes [8, 13, 16]. Pastato formos kompaktiškumo ir energinio efektyvumo nustatymo rodikliai plačiau apžvelgiami 1.2. poskyryje. Bendru atveju šių rodiklių sąsajos su energijos sąnaudomis tiriamos energiniais skaičiavimais įvertinant atskirai šiluminės, vėsinimo ar apšvietimo energijos poreikius arba vertinant šildymo ir vėsinimo energijos poreikį kartu. Visgi, kaip ir minėta, saulės spinduliuotė gali turėti ne tik teigiamą ar neigiamą įtaką patalpų šiluminiam balansui, tačiau ji gali ir apšviesti pačią patalpą taip mažindama energijos sąnaudas apšvietimui, minėtieji rodikliai negali kompleksiskai įvertinti šių atskirų dedamųjų. Dėl to šis darbas orientuojasi į vieno konkretaus pastato kompaktiškumo rodiklio, galinčio įvertinti šių atskirų energijos poreikių ir pastato formą, suformulavimą.

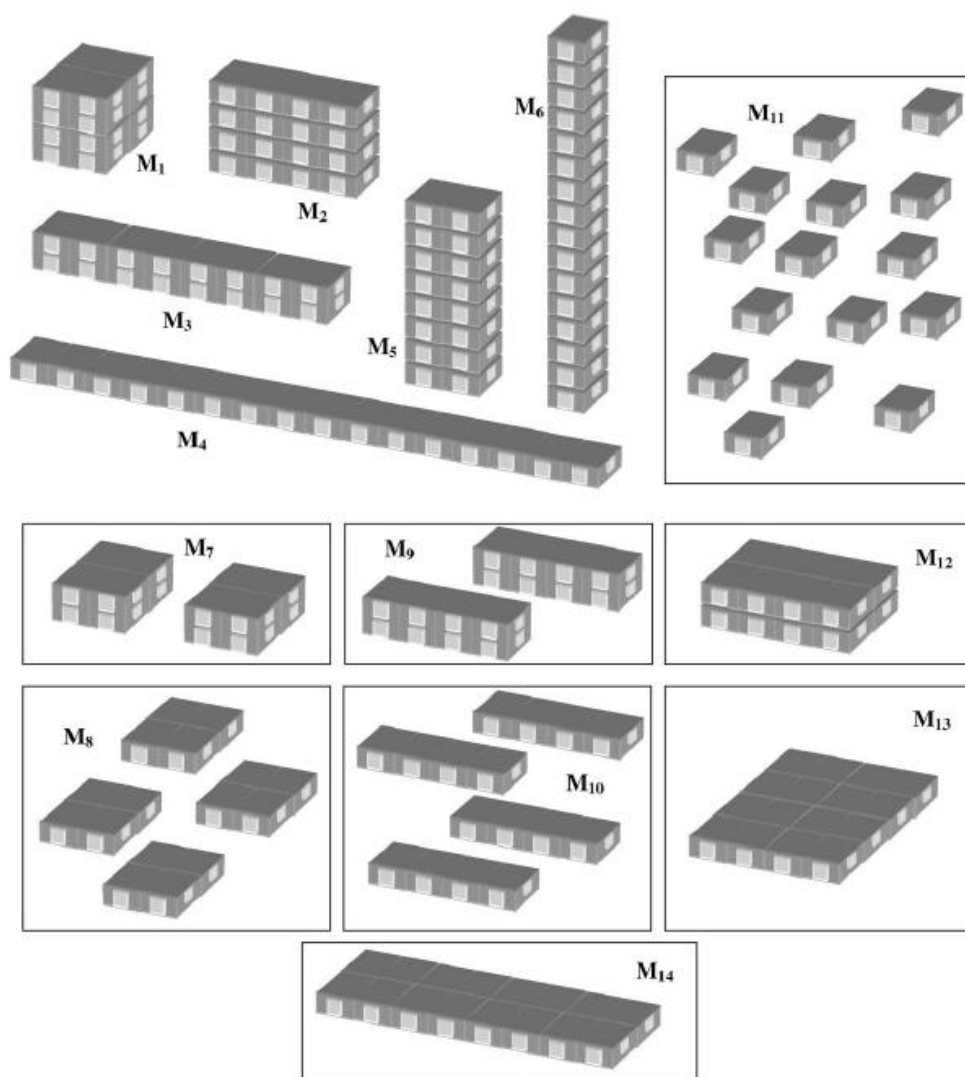
1.1. Pastato formos kompaktiškumo rodikliai

Mokslinėje literatūroje aptinkamos įvairios pastato formos kompaktiškumo rodiklių variacijos. Bene plačiausiai paplitęs pastato formos rodiklis (koeficientas), pateikiamas P. Depecker'io ir kolegų darbe [17], išreiškiantis pastato išorinių atitvarų, kaip pagrindinės šilumos mainų terpės, ir pastato tūrio, kaip pagrindinio šildymo sistemos objekto, santykį (1):

$$C_f = \frac{S_e}{V} \quad (1)$$

čia C_f – pastato formos koeficientas, m^2/m^3 ;
 S_e – visų pastato išorinių atitvarų plotas, m^2 ;
 V – pastato tūris, m^3 .

Tyrimo autoriai suformuoja 14 skirtingų pastatų variantų iš 8 vienetinių tūrių (žr. 1 paveikslą), pasižyminčių analogiškomis išorinių atitvarų savybėmis. Iš viso suformuojamos 7 vientiso tūrio ir 7 išskaidytų tūrių konfigūracijos taip išlaikant vienodą jų tūri ir keičiant išorinį plotą. Tyrimo metu kiekvienam variantui buvo atliekami šildymo energijos skaičiavimai šiaurinės ir pietinės Prancūzijos klimato sąlygomis.



1 pav. 14-os tiriųjų objektų formos [17]

Tyrimo rezultatai parodė, jog pastato išorinių atitvarų ploto ir pastato tūrio santykio priklausomybė nuo šildymo energijos sąnaudų Šiaurės Prancūzijoje yra praktiškai tiesinė su koreliacijos koeficientu lygiu 0,91. Tačiau šiltesniame klimato autoriai negalėjo atrasti jokios ženklios priklausomybės. Kita vertus, S. M. A. Bekkouche ir kt. [18], tirdami patalpų temperatūrų ir pastato paviršiaus ploto bei tūrio santykį sausam karštam (Sacharos) klimatui, nustatė, jog šio rodiklio padidėjimas gali pagerinti šiluminį komfortą patalpose, t.y. sumažinti temperatūrą.

M. Premrov'as ir kolegos taip pat analizavo šio rodiklio priklausomybę nuo klimato zonų, fasadų šešėliavimo ir langų ploto [8]. Iš šio darbo rezultatų galima pastebėti, jog įvairių konfigūracijų medinio karkaso pasyviems namams su langais į pietinę pusę suminėms šildymo ir vėsinimo energijos sąnaudoms turėjo tiek klimato zona, tiek ir formos rodiklis. Šildymo energijos sąnaudos, su nedidelėmis sisteminėmis paklaidomis, buvo tiesiogiai proporcingos pastatų išorinio paviršiaus ir jų tūrio santykiui, o priklausomybės tiesių posvyrio kampas didėjo vėstant pasirinktų miestų klimatui (Liubliana – šiltesnis klimatas, Miunchenas – vidutinis klimatas, Helsinkis – vėsus klimatas). Tiek Helsinkio, tiek ir Miuncheno miestams bendros šildymo ir vėsinimo energijos sąnaudos turėjo tiesinę priklausomybę nuo formos rodiklio, kai Liublianoje tam tikras proporciškumas nebuvo visiškai aiškus.

Nors pastato išorinių atitvarų ploto ir jo tūrio santykis vadinamas pastato formos rodikliu (koeficientu) ar pastato formos kompaktiškumo rodikliu, visgi šis rodiklis iš esmės nenusako pačio pastato formos, todėl gali būti įvardijamas tiesiog kaip pastato kompaktiškumas [12, 18]. Tai pastebi ir M. S. Geraldini ir kt. klasifikuodami apytiksliai 300 mokyklų pagal formą, atmesdami pastato išorinių atitvarų ploto ir tūrio santykį kaip klasifikavimo rodiklį, kadangi panašias šio rodiklio vertes įgudavo ganėtinai skirtingų formų pastatai [19]. Taip pat klasifikavimo, tačiau kitokią, problemą pažymi ir B. D'Amico ir F. Pomponi, mokslininkai teigia, jog vienas iš šio rodiklio ribotumų yra priklausomybė nuo mastelio, t.y. dviejų identiškų formų pastatų kompaktiškumas didės (išorinių atitvarų ploto ir jo tūrio santykis mažės) didėjant pačio pastato tūriui [5]. Autoriai nusprendžia pastato formos kompaktiškumą vertinti įvesdami santykinį išorinio atitvarų ploto rodiklį. Kaip teigia N. H. Roslan ir M. R. Ismail'as, pastato formos įtakos daugiaaukščių pastatų energinių savybių straipsnių apžvalgoje [12], santykinis kompaktiškumas yra vienas iš pagrindinių rodiklių nustatant pastato pavidalą.

Minėtas B. D'Amico ir F. Pomponi įvestas bedimensinis santykinis išorinių atitvarų ploto rodiklis remiasi pastato išorinių atitvarų ploto ir tą patį tūri galinčiu riboti minimaliu atitvarų plotu, santykis išreiškiamas (2) formule [5]. Referenciniu dydžiu čia laikomas rutulio tūrį apgaubiantis paviršiaus plotas, sfera iš visų geometrinių kūnų turi mažiausią paviršiaus plotą, kai tūris yra vienodas.

$$\frac{S}{S_{min}} = \frac{S}{\sqrt[3]{36\pi V^2}} \quad (2)$$

čia S – visų pastato išorinių atitvarų plotas, m^2 ;
 S_{min} – to paties tūrio pusrutulio paviršiaus plotas, m^2 ;
 V – pastato tūris, m^3 .

Autoriai toliau šį rodiklį pritaiko įprastesnių formų pastatams referenciniu dydžiu laikydami gretasienį su minimaliu paviršiaus plotu duotam tūriui. Atlikus algebrinius skaičiavimus atrasta, jog nevertinant grindų ant grunto užimamo ploto (gruntą ir išorės orą ribojančios atitvaros aplinkos yra veikiamos skirtingai), optimaliausia pastato forma yra kvadratinio pagrindo gretasienis, kurio aukštis

yra dvigubai mažesnis nei jo pagrindo kraštinės ilgis. Remdamiesi padaryta išvada, B. D'Amico ir F. Pomponi išveda pastato formos koeficientą, kuris yra gretasienio formos ilgio, gylio ir aukščio funkcija.

Pastato geometriją vertinantys rodikliai tik ganėtinai supaprastinti yra taip pat sutinkami mokslinėje literatūroje, vienas iš plačiau pastebimų yra pastato ilgio bei pločio santykis [8, 10, 18]. Remiantis atliktais šio rodiklio sąryšio su pastato energijos sąnaudomis tyrimais, labiausiai šildymo sistemos energiją taupantis ilgio ir pločio santykis yra artimas 1:1 [10], tai atliepia ir prieš tai minėto kompaktiškiausio gretasienio formai [5], o toks santykis energijos sąnaudų prasme pasirodo geriausiai vėsiamame klimate [15]. Kita vertus, vėsinimo energijos sąnaudų prasme geriausiai pasirodo didesnės šio rodiklio vertės [16], o šiltesniame klimate paprastų formų namams geriausiai energiją taupanti forma yra artima santykiui 2:1 [15]. Visgi, vienas pagrindinių šio rodiklio minusų yra jo pritaikomumas, šis rodiklis skirtas apibūdinti tik pastatų, kurių projekcijos į žemės paviršių forma yra stačiakampis arba artima jam. Taip pat šis rodiklis neįvertina pastato aukščio, o, kaip teigia L. Wei ir kt. [9], pastato aukštingumas yra vienas iš daugiausiai įtakos turinčių veiksmų pastato šildymo energijos sąnaudoms.

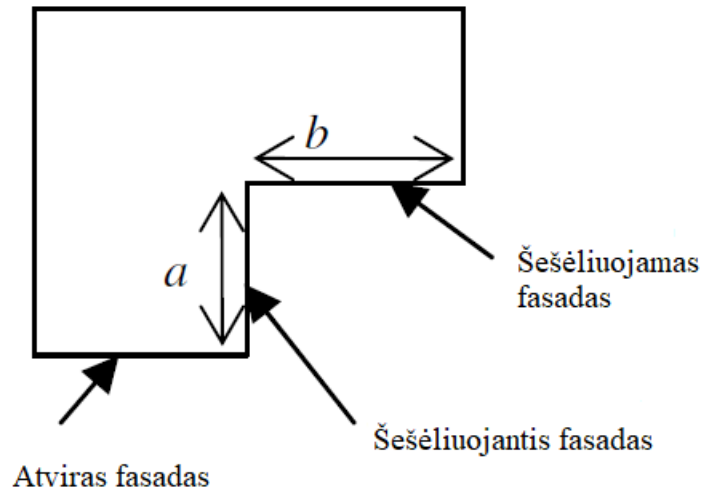
Atsižvelgdami į prieš tai minėtų pastato išorinių atitvarų ploto ir tūrių bei pastato ilgio bei pločio santykių trūkumus įvertinant sudėtingesnes pastatų formas, M. Premrov'as ir kolegos [8] įtraukė šešėlių metančio ir šešėliuojamo fasadų ilgių santykį į savo tyrimą. Šis santykis, vaizduojamas 2 paveiksle, buvo pasiūlytas C. Hachem ir kt. [13] pastato formos įtakos fotovoltinių saulės modulių generuojamam elektros energijos kiekiui. Mokslininkai tyrimo metu nustatė, jog per šešėliuojamą langą perduodamas saulės spinduliuotės energijos kiekis sumažėja priklausomai nuo pastato formos ir metų laiko. Žiemos laikotarpiu lyginant su atviro (nešešėliuojamo) lango perduodamas energijos kiekis sumažėja:

- 26 % L formos pastatui;
- 46 % U formos pastatui;
- 10 % T formos pastatui (kiekvienai iš dviejų šešėliuojamų fasado dalių tenkančios energijos kiekis neženkliai skiriasi).

Vasaros laikotarpiu šis energijos kiekis taip pat sumažėja:

- 19 % L formos pastatui;
- 40 % U formos pastatui;
- 15 % T formos pastatui (kiekvienai iš dviejų šešėliuojamų fasado dalių tenkančios energijos kiekis neženkliai skiriasi).

Tyrimo rezultatai parodė, jog didinant šešėliuojančio ir šešėliuojamo fasadų ilgių santykį, galima ženkliai sumažinti fasadui tenkančios bei per langą perduodamos saulės spinduliuotės energijos kiekį: šiam santykiui esant 3/2, L ir U formų pastatų šešėliuojamiems fasadams tenkančios saulės spinduliuotės kiekis sumažėjo atitinkamai 34 % ir 53 % lyginant su nešešėliuojamu fasadu. Tai tik parodo, jog pastato forma turi daug įtakos kompleksinę reikšmę energijos sąnaudoms turinčių veiksmų. Atliktas tyrimas medinio karkaso pastatams [8], iš esmės nenustatinėjo šio rodiklio sąryšio su pastato energijos sąnaudomis, todėl yra sudėtinga daryti išvadas dėl jo pritaikymo racionalumo.



2 pav. Pastato šešėliuojančio, šešėliuojamo ir atviro fasadų pozicijos [13]

Šešėliuojantys fasadai sumažina saulės spinduliuotės perduodamą energiją šešėliuojamiems pastato fasadams bei jos dalį, patenkančią tiesiai į patalpas. Langai bei įstiklintos atitvaros yra šią pastato šiluminės energijos pritekėjimų dedamąją įgalinanti terpė. Optimalaus langų ir sienų plotų santykio administraciniams pastatams tyrime Francesco Goia pažymi, jog pastato energijos sąnaudoms įtakos turi permatomų ir nepermatomų atitvarų balansas, o šią įtaką galima kontroliuoti pasitelkiant įvairius šešėliavimo sprendimus bei tinkamai pasirinkus medžiagas pagal jų optines bei šilumines savybes [20]. L. Troupe'as ir kolegos taip pat teigia, jog langų bei sienų plotų santykis, charakterizuojantis įstiklintų fasadų plotus, turi įtakos ir pastato energijos sąnaudoms dėl išorės oro infiltracijos [21]. F. Goia atliktas tyrimas [20] parodė, jog šalto klimato zonoje, t.y. Oslo mieste, kuris pagal klimato klasifikaciją priskiriamas tai pačiai *Dfb* grupei kaip ir Lietuvos miestai [22], pietinio fasado langų ir sienų ploto santykio poveikis pastato energijos šildymui sąnaudoms ženkliai skyrėsi nuo kitų fasadų. Pastebima, jog įstiklinimo plotas pietiniame fasade leidžia pasinaudoti saulės spinduliuotės perduodama šilumine energija ir taip sumažinti energijos sąnaudas šildymui, kuomet permatomo ploto didinimas šiauriniame, rytiniame bei vakariniame fasaduose negali sudaryti tokio efekto. Išvestas optimalus langų ir sienų ploto santykis Oslo miestui buvo apie 37-43 % šiauriniame, rytiniame bei vakariniame fasaduose, kai pietinio fasado optimalus šio rodiklio dydis siekė apie 50-60 %.

1.2. Mokslinių tyrimų metodologijos

Mokslinių tyrimų, nagrinėjančių pastato formų ir išorinių atitvarų kompaktiškumo ryšį su pastato energijos sąnaudomis, rezultatų nustatymui darbų autoriai naudoja įvairius skaičiavimų metodus. Atsižvelgiant į tai, jog dauguma analizuotų straipsnių aiškinasi energijos suvartojimus kaip šildymo ar vėsinimo ar jų kombinuotas sąnaudas, skaičiavimai dažniausiai yra paremti šilumos nuostolių bei saulės spinduliuotės energijos skaičiavimų modeliais.

P. Depecker'is ir kt. [17] tirdami pastato išorinių atitvarų ploto ir tūrio santykį naudoja savo sukurtą matematinį skaičiavimo modelį, kuris buvo validuotas laboratoriniais tyrimais. Savo energijos balanso skaičiavimo modelį pritaikė ir U. T. Aksoy bei M. Inalli [10] pastato formos ir orientacijos įtakos šildymo sąnaudoms šaltame klimato tyrime, kuris buvo validuotas ankstesniuose tyrimuose.

Kaip ir minėtieji autoriai, V. Granadeiro ir kolegos [7] pastato energijos skaičiavimams taiko matematinį lygčių modelį, kurio validumą pagrindžia anksčiau atliktais kitų mokslininkų tyrimais.

Naujesni tyrimai dažniausiai naudojami dinaminio energinio modeliavimo programine įranga. Štai H. S. Lim'as ir G. Kim'as [16] tirdami pastato energijos sąnaudų sąryšį su patalpų matmenų santykiu naudojo IES VE programinę įrangą. Pastato savybių optimizavimo tyrimai energijos sąnaudų rezultatus taip pat dažniausiai nustato naudodamiesi EnergyPlus dinaminio energinio skaičiavimo varikliu paremtomis programomis [1, 2, 6, 13, 15, 19]. Tokio tipo tyrimai inkorporuoja įvairus optimizavimo algoritmus, kaip genetinius [15], evoliucinius NSGA II [2, 6] ir kitus [1, 14]. Bendra pastebima tendencija mokslinėje literatūroje yra dinaminio energinio modeliavimo programinės įrangos taikymas naujesniuose tyrimuose pastato energinių sąnaudų nustatymui. Matematiniai modeliai bei metodai yra dažniau taikomi senesniuose tyrimuose arba naujesniuose, kurių tikslas yra jų vystymas.

Matematiniai skaičiavimo modeliai ir energinio modeliavimo programos, kurių skaičiavimai irgi yra paremti matematiniais modeliais, gali būti lengvai suderinami su kita programine įranga, leidžiančia atlikti platesnės apimties ir greitesnius skaičiavimus. Todėl galima teigti, jog pastato formos kompaktiškumo bei jo konstrukcinių ir architektūrinių sprendinių įtakos energijos sąnaudoms naudojami sąlyginai greitai rezultatus pateikiantys metodai. Tai leidžia aprėpti platesnį pastato formų, matmenų, fasado elementų, konstrukcijų ir kt. energijos sąnaudas galinčių veikti aspektų spektrą.

1.3. Literatūros apžvalgos išvados

Atlikus mokslinės literatūros analizę buvo nustatyta temos problematika, apžvelgti pastato formos kompaktiškumo rodikliai bei optimalios pastato formos tyrimų metodologijos. Šiame poskyryje pateikiamos esminiai literatūros analizės teiginiai.

1. Mokslininkai pastebi, jog bendram pastato energijos vartojimo efektyvumo potencialui didelę įtaką turi veiksniai, apsprendžiami jau ankstyvosiose projekto stadijose [1-3].
2. Pastato dinaminis energinis modeliavimas, leidžiantis identifikuoti energiškai efektyviausius pastatų variantus, yra imlus laikui procesas [1].
3. Dauguma mokslinių tyrimų naudoja gana detalius pastato energinių savybių skaičiavimus galinčią atlikti programinę įrangą, reikalaujančią konkrečių sistemų parametrų [11].
4. Ankstyvosiose projektų stadijose, kai projekto pasikeitimai yra ganėtinai dažni, optimalių pastato energinių savybių nustatymo metodai gali neįvertinti reikšmingų sprendinių [14].
5. Skaičiavimams reikalingą kintančių projekto dedamųjų kiekį mažinti įmanoma įvedant pastato formos kompaktiškumo rodiklius, kuriems keliami nesudėtingos išraiškos bei supratimo reikalavimai [17].
6. Identifikuotas šešėliuojančio ir šešėliuojamo fasadų ilgių santykis a/b , turintis potencialo daryti įtaką pastato energijos suvartojimui [13].
7. Šešėliuojančio ir šešėliuojamo fasadų ilgių santykio apibrėžimas yra priklausomas nuo pastato orientacijos pasaulio šalių atžvilgiu, šis parametras taip pat gali turėti ženkliai įtaką pastato energijos sąnaudoms [2, 8, 13].
8. Plačiausiai mokslinėje literatūroje nagrinėjamas pastato formos kompaktiškumo rodiklis energijos sąnaudų įvertinimui yra išorinių atitvarų ploto ir tūrio santykis. Šis rodiklis gali būti išreiškiamas ilgio ir pločio, išorinių atitvarų ploto bei referenciniu išorinių atitvarų ploto santykiu, ir kitais rodikliais, kurie yra pritaikomi specifiniais atvejais [2, 5, 7, 10, 17, 18].

2. Metodologija

Šis magistro baigiamasis projektas yra atliekamas kaip pastato formos kompaktiškumo koeficiento energijos sąnaudų įvertinimui sukūrimo tyrimo, atlikto magistro studijų metu, tęsinys. Tyrimas orientuotas į menamų pastatų modelių energijos sąnaudų įvertinimo patikrinimą realaus pastato atveju. Šiame skyriuje yra aprašoma magistro baigiamojo projekto tyrimo eiga, supažindinama su esminiais tyrimo objekto parametrais bei priimtomis prielaidomis. Taip pat pateikiama pirminio tyrimo eigos bei naudotų metodų aprašymų santrauka.

2.1. Pradinis tyrimas

Pradinio tyrimo metu buvo siekiama suformuoti rodiklių optimaliai pastato formai nustatyti, galinti palyginti skirtingų formų pastatų energijos sąnaudas tarpusavyje Lietuvos klimato sąlygomis. Atlikus esamų pastato kompaktiškumo rodiklių bei preliminarių energijos sąnaudų nustatymo tyrimų analizę, tyrimui buvo iškeltos trys hipotezės.

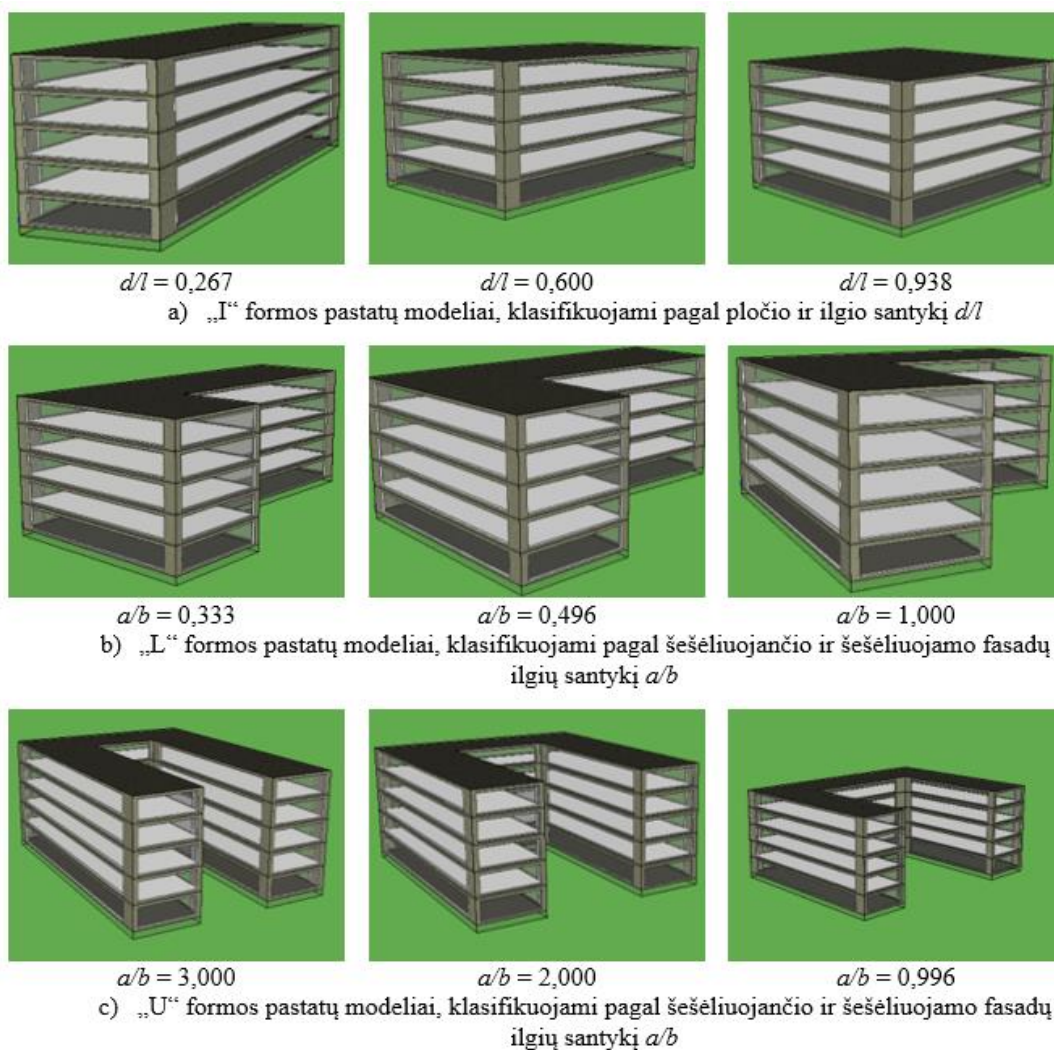
9. Pastato energijos sąnaudoms įtaką daro pastato šešėliuojančio ir šešėliuojamo fasadų ilgių santykis a/b [13].
10. Pastato fasadų tarpusavio šešėliavimui įtaką daro jo orientacija pasaulio šalių atžvilgiu.
11. Pastato energijos sąnaudoms įtaką daro jo išorinių atitvarų ploto su vidiniu tūriu santykis S/V [17].

Šios hipotezės buvo tikrinamos *IDA-ICE* dinaminio energinio modeliavimo kompiuterine įranga [23], atitinkanti *ASHRAE 140-2004* standarto keliamus reikalavimus [24], suformuotiems menamiems pastatų modeliams. Tyrimui buvo suformuotos 9 pastatų modelių alternatyvos, kurias sudarė vienodo ploto, bet skirtingų išorinių matmenų „I“, „L“ ir „U“ formos pastatų modeliai pateikiami 3 paveiksle.

Remiantis Statybos sektoriaus vystymo agentūros registrų duomenimis [25], pastato plotas buvo parinktas pagal A, A+ ir A++ energinio naudingumo klasei sertifikuotų administracinės paskirties pastatų vidurkį, tai sudarė 4803,51 m². Paprastesniam pastato formų sudarymui plotas buvo suapvalintas iki 4800 m² ir keičiant pastato gabaritus pagal šešėliuojančio ir šešėliuojamo fasadų ilgių santykį a/b („L“ ir „U“ formos pastatams) bei pločio ir ilgio santykį („I“ formos pastatams).

Pastatų išorinių atitvarų parametrai buvo parinkti remiantis A++ energinio efektyvumo klasės reikalavimais [26] (grindų ant grunto konstrukcinė detalė buvo parinkta vienoda visiems modeliams, tačiau šilumos perdavimo koeficientas šiai konstrukcijai skyrėsi dėl pastato formos parametru). Patalpų mikroklimato parametrai buvo nustatyti pagal Lietuvos higienos normų reikalavimus [27, 28]. Visų pastatų energinių modelių šilumos šaltinių pasirinkti miesto šilumos tinklai, vėsos šaltinis – oras-oras šilumos siurblys, šviestuvų efektyvumas pasirinktas remiantis statybos techninio reglamento numatytais vertėmis [26].

Devynių menamų pastatų modelių energiniai skaičiavimai buvo atlikti skirtingai pasukus modelius pasaulio šalių atžvilgiu, naudojant Kauno miesto tipinių meteorologinių metų klimatinių duomenų failą. Pastatų energiniai skaičiavimai atlikti orientuojant juos 8 skirtingomis kryptimis, kai posūkio kampo kitimo dažnis yra 45°. Skaičiavimų metu buvo fiksuojami keturi išvesties duomenys: vėsinimo energijos sąnaudos, šildymo energijos sąnaudos, energijos sąnaudos apšvietimui bei suminės energijos sąnaudos. Šie keturi parametrai leido išnagrinėti pastato kompaktiškumą pagal iškeltas hipotezes.



3 pav. „I“, „L“ ir „U“ formos modeliai naudoti pirminiame tyrime

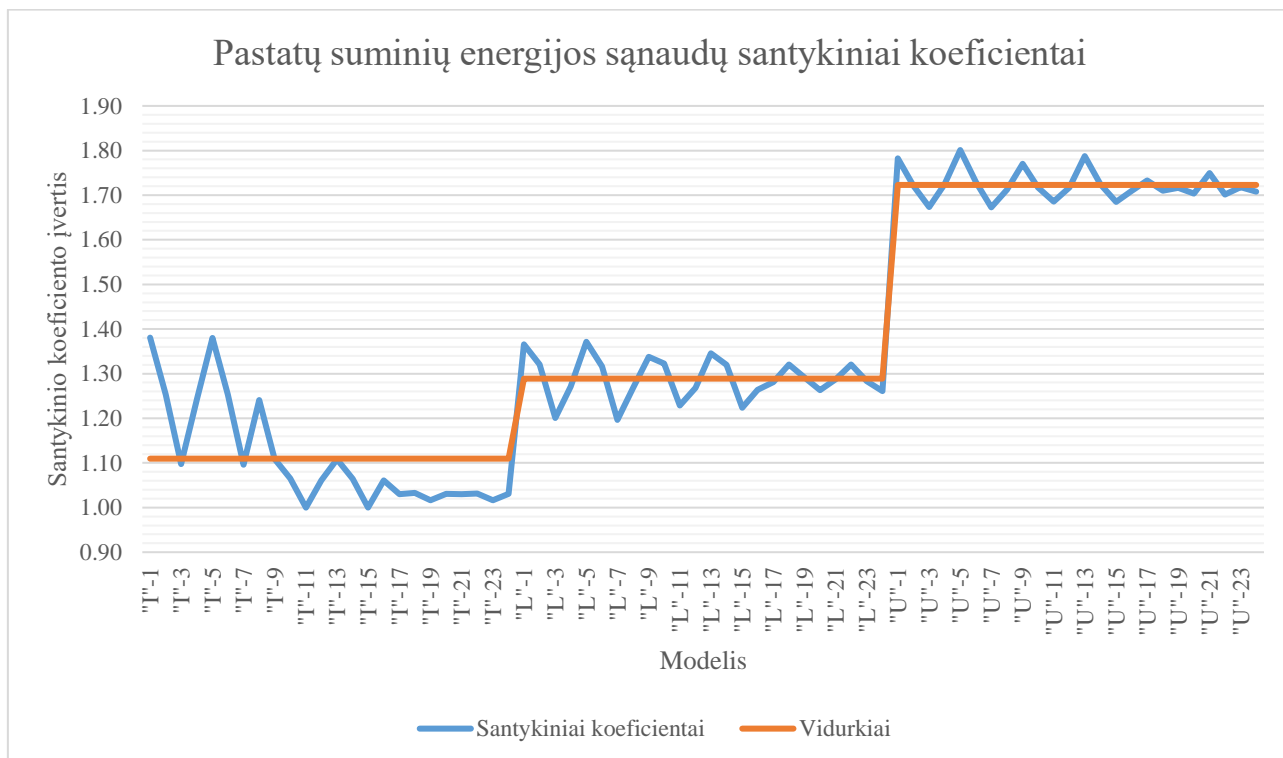
Pradinio tyrimo rezultatai parodė, jog šešėliuojančio ir šešėliuojamo fasadų ilgių santykis modelių energijos poreikių absoliutinėms vertėms įtakos neturėjo. Vertinant minimalias ir maksimalias sumines pastatų modelių energijos sąnaudas pagal a/b rodiklį nustatyta, jog šio santykio skaitinei vertei artėjant į 1,000, skirtumas tarp maksimalių ir minimalių energijos sąnaudų mažėjo. Tai leidžia manyti, kad a/b rodiklis gali įvertinti „L“ ir „U“ formos pastatų atsparumą jų orientavimui pasaulio šalių atžvilgiu, t.y. kuo pastato a/b rodiklis bus artimesnis vienetui, tuo jo energijos sąnaudos artės prie visų orientacijų analogiškų pastatų energijos sąnaudų vidurkio.

Tyrime nustatyta, jog pastato orientacija gali turėti gana ženklią įtaką pastatų energijos sąnaudoms. Mažiausiu pločio ir ilgio santykiu pasižymintio „I“ formos modelio maksimalus energijos sąnaudų skirtumas keičiant jo orientaciją pasaulio šalių atžvilgiu buvo 27,6 tūkst. kWh per metus, o tai sudarė beveik 23 % „I“ formos modelių energijos sąnaudų vidurkio. „L“ ir „U“ formų tyrimo modelių energijos sąnaudos taip pat kito priklausomai nuo jų orientacijos, maksimalūs skirtumai atitinkamai sudarė apie 13,5 % ir 7,5 %

Tyrimo rezultatai parodė pastatų energijos sąnaudų yra tiesinę priklausomybę nuo išorinių atitvaro ploto ir vidinio tūrio santykio. Tyrimo modelių vidutinių metinių energijos sąnaudų priklausomybės nuo S/V rodiklio tiesinės funkcijos koreliacijos koeficiento kvadrato vertė buvo beveik lygi 1,00, t.y. rezultatai buvo tiesiogiai priklausomi nuo šio rodiklio. Tai leidžia teigti, jog pastato energijos

sąnaudos, nepriklausomai nuo jo orientacijos, bus tiesiogine priklausomybe susietos su S/V rodikliu. Visgi S/V rodiklis neatsižvelgia į orientacijos įtaką pastato energijos sąnaudoms, o, remiantis šio tyrimo rezultatais, įmanoma beveik 28 tūkst. kWh suminių energijos sąnaudų paklaida.

Atsižvelgiant į tai, jog „I“ bei „L“ ir „U“ formos pastatų matmenų apibrėžimui buvo naudojami skirtingi rodikliai, siekiant sudaryti bendrą perspektyvą energijos sąnaudų įvertinimui, buvo išvestas lyginamasis koeficientas f , leidžiantis pastato formoms priskirti tam tikrą skaitinę išraišką. Koeficientas yra išreiškiamas kiekvieno modelio varianto bei modelio, kurio energijos suvartojimas buvo mažiausias, suminių energijos sąnaudų santykiu. Pradinio tyrimo modelių variantų santykinių koeficientų įverčiai pateikiami 4 paveiksle.



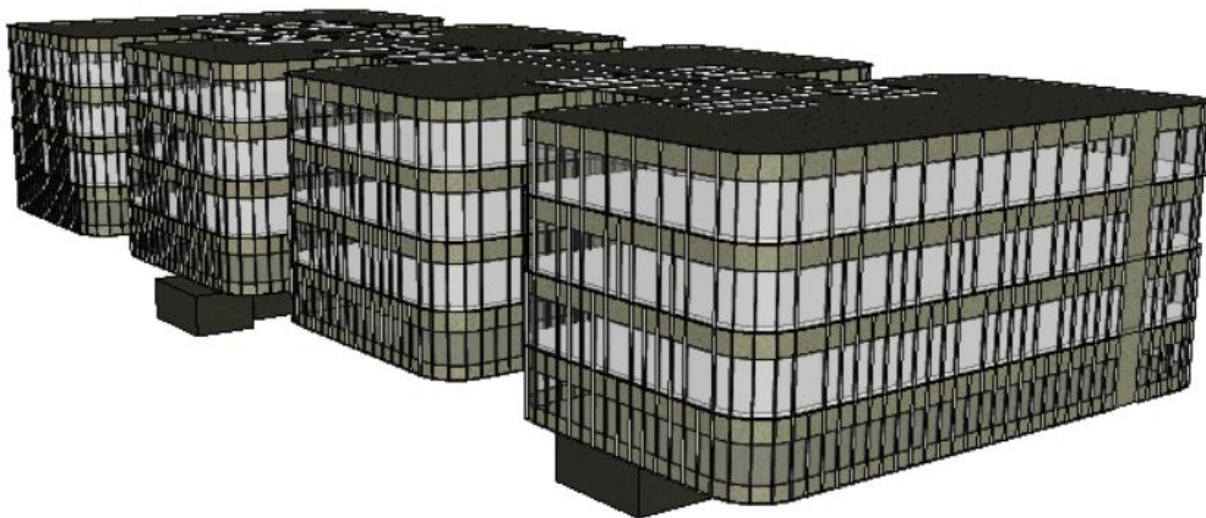
4 pav. Pastatų modelių suminių energijos sąnaudų santykinų koeficientų grafikas

Lyginamųjų koeficientų vidurkiai „I“, „L“ ir „U“ formos modeliams buvo atitinkamai 1,11, 1,29 ir 1,72, o standartiniai nuokrypiai – 0,116, 0,047 ir 0,034. Tai parodo, kad šis koeficientas gali pakankamai gerai sugrupuoti savišėliavimo efektą sukurančius pastatus. Visgi „I“ formos pastatų modelių atveju toks grupavimas nėra visai tikslus, tai parodo ir didesnis standartinis nuokrypis.

2.2. Tyrimas realaus pastato atveju

Siekiant patikrinti pirminiame tyrime keliamų hipotezių pagrįstumą bei dinaminių energinių skaičiavimų menamų pastatų modeliams rezultatų patvirtinimą, šiame magistro baigiamajame projekte yra atliekamas energijos sąnaudų modeliavimas realiam pastatui. Pirminiame tyrime nagrinėtos formos yra supaprastintos, todėl nebūtinai atspindi realybėje architektų formuojamų pastatų pavidalus. Tyrime nagrinėjamo administracinio pastato Kauno mieste konfigūracija, vertinant savišėliavimo aspektą, yra kur kas sudėtingesnė, nei nagrinėtos supaprastintos „I“, „L“ ar „U“ formos.

Magistro baigiamojo projekte pasirinktas nagrinėti Kauno mieste esantis administracinės paskirties A energinio efektyvumo klasės pastatas, jo energinio modelio vizualizacija pateikiama 5 paveiksle. Šis pastatas buvo pasirinktas atsižvelgus į paskirtį bei išskirtinę formą, kuri įgalina fasadų savišėliavimo efektą. Detalesnė informacija apie tyrimo metodiką, tyrimo objekto architektūrinius, konstrukcinius bei inžinerinius sprendimus ir tyrimo objektų alternatyvas pateikiama 2.2.1., 2.2.2., 2.2.3., 2.2.4. ir 2.2.5. skyreliuose.



5 pav. Administracinio pastato energinis modelis *IDA-ICE* aplinkoje

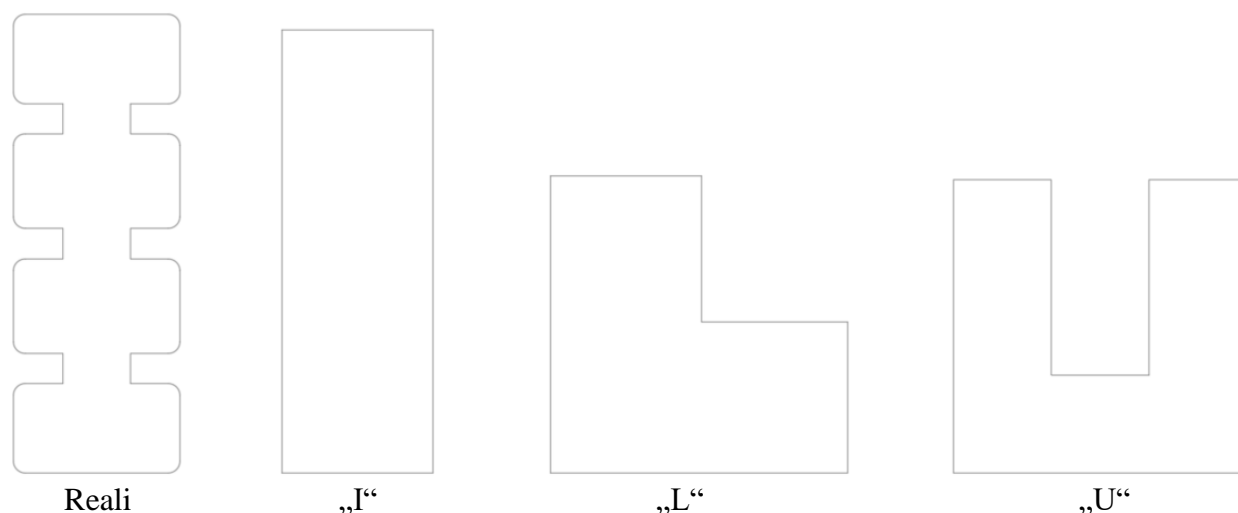
2.2.1. Tyrimo metodologija

Magistro baigiamojo projekto metu atliekamo tyrimo esminis tikslas yra patikrinti pradinio tyrimo metu gautų rezultatų atitikimą realioms sąlygoms bei nustatyti išsikeltų hipotezių dėl pastato energijos sąnaudų sąryšio su jo kompaktiškumo rodikliais pagrįstumą. Dėl šių priežasčių realaus atvejo tyrimo eiga yra paremta pradinio tyrimo koncepcija.

Siekiant kiek galima tiksliau įvertinti realaus pastato energijos sąnaudų priklausomybes nuo šešėliuojančio ir šešėliuojamo fasadų ilgių santykio, orientacijos bei išorinių atitvarų ir tūrio santykio, yra sukuriamas pastato energinis modelis (žr. pav. 5). Modelio energinių skaičiavimų rezultatai yra patikrinami ir patvirtinami pagal turimas realias energijos sąnaudas. Realaus pastato energijos vartojimo ypatumus atitinkančio modelio architektūra yra modifikuojama į tris menamas formas: „I“, „L“ ir „U“, taip sukuriamos virtualios realaus pastato alternatyvos šios variacijos pateikiamos 6 paveiksle. Sukurti papildomi menamų pastatų modeliai leidžia atkartoti pradinio tyrimo metodologiją su realaus pastato analogu *IDA-ICE* programinės įrangos aplinkoje.

Pradiniame tyrime dinaminiai energiniai skaičiavimai buvo atlikti supaprastintiems administracinių pastatų modeliams, sudarytiems iš penkių zonų, atitinkančių pastato aukštus. M. M. Singh'as ir kt. [29] tyrimas nustatė, jog toks supaprastintas pastato zonavimas gali lemti didelius metinius energijos sąnaudų skirtumus nuo detalesnio zonavimo pagal *ASHRAE 90.1 Appendix G* [30] metodologiją, padalinančią pastatą į perimetro ir centrinę zonas. Savo ruožtu T. Dogan'o ir kt. atliktame tyrime [31] buvo nustatyta, jog pastato zonavimas pagal šią metodologiją energijos sąnaudų vertinimui tinka tik

tam tikrų formų pastatams ir tik pirminėje stadijoje, ši metodologija negali įvertinti pačio pastato patalpų išsidėstymo poveikio energijos sąnaudoms. Todėl šiame tyrime kuriant pastato energinį modelį vadovaujamosi būtent architektūriniais aukštų planais.



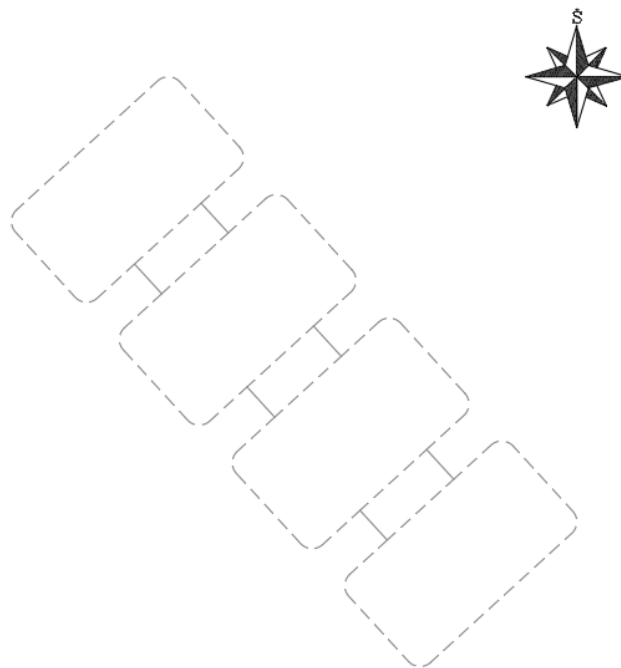
6 pav. Tyrime nagrinėjamos menamų pastatų formos

Visoms 6 paveiksle (įskaitant ir originalią) vaizduojamoms alternatyvoms atliekami energiniai skaičiavimai orientuojant jas skirtingomis kryptimis. Originalios bei „I“ formos pastato modeliams energiniai skaičiavimai atliekami dvejose orientacijose (posūkio kampai: 0° ir 90°), kadangi šios formos simetriškos, savo ruožtu, „L“ ir „U“ formos pastatų modeliams atliekami keturi skaičiavimai (posūkio kampai: 0° , 90° , 180° ir 270°). Nagrinėjamų orientacijų kiekis magistro baigiamojo projekto tyrime sumažinamas dėl didelės energinio modelio apimties ir ženklaus dinaminių energinių skaičiavimų trukmės pailgėjimo.

Šiame magistro baigiamojo projekto tyrime, kitaip nei pradiniam tyrime, į pastato energijos sąnaudas atsižvelgiama ne tik kaip į tam tikrą efektyvumo rodiklį, bet kaip ir į pastato draugiškumo aplinkai matą. Kaip teigiama Y. Schwartz'o ir kt. 251 pastato atvejų analizėje [32], vidutiniškai net 75 % pastato gyvenimo ciklo anglies pėdsako sudaro pastato eksploatacinės anglies dvideginio emisijos. Tai parodo pastatų energinio efektyvumo svarbą siekiant sumažinti globalinį atšilimą skatinančių šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas. Būtent anglies dvideginis yra vienas iš didžiausių dalį visų šiltnamio efektą sukeliančių dujų sudarančių cheminių junginių [33]. Siekiant įvertinti CO_2 emisijas, apskaičiuotos energijos sąnaudos pagal pirminės energijos rūšį yra dauginamos iš Lietuvoje reglamentuojamų CO_2 emisijų faktorių. Šiame tyrime naudojami šilumos iš AB „Kauno energija“ šilumos tinklų bei elektros įvairių gamybos būdų vidurkio CO_2 emisijų faktoriai, kurių vertės atitinkamai yra $0,08 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$ ir $0,42 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$ [26].

2.2.2. Architektūriniai sprendiniai

Pastatą sudaro keturi susisiekiantys stačiakampio gretasienio suapvalintais kampais formos tūriai. Pastato projekcija primena „I“ formos pastatą, tačiau keturis korpusus jungiančios mažesnių gabaritų cirkuliacinės erdvės suformuoja laužtus fasadus (žr. 7 paveikslą). Taip sujungti pastato tūriai suformuoja iš viso 6 nišas fasaduose, kurios, savo ruožtu, primena „U“ formos pastatą šešėliuojančių ir šešėliuojamų fasadų kiekiu.



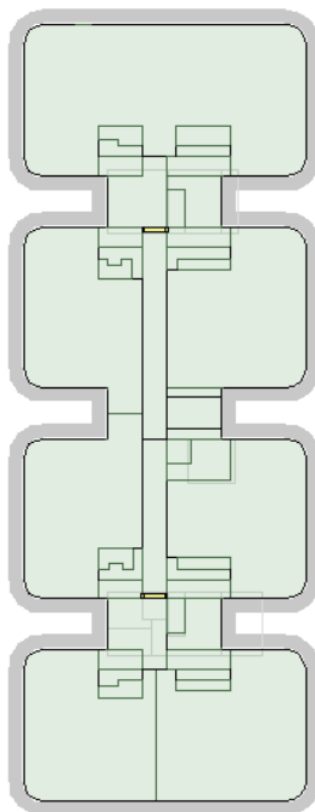
7 pav. Tiriamojo pastato tūrių išdėstymo planas

Pastato savišėšėliavimą apibūdinantis rodiklis – šešėliuojančio bei šešėliuojamo fasadų ilgių santykis – šio pastato atveju yra 3,235 ir 3,293. Du panašūs įverčiai susidaro dėl nežymiai besiskiriančių du centrinius bei kraštinius korpusus jungiančių dalių matmenų. Todėl dviejų pastato centre esančių nišų a/b rodiklio vertė yra 3,293, o likusių keturių – 3,235. Kito tyrime nagrinėjamo rodiklio – išorinių atitvarų ploto bei vidinio tūrio santykio – vertė yra 0,321. Pastato energinis modelis pasaulio šalių atžvilgiu orientuotas taip, jog su šiaurės poliumi sudarytų 42,5 laipsnių kampą (patiekiamoje projektinėje informacijoje šis kampas nenurodomas, todėl apytiksliai išmatuojamas naudojant viešai prieinamas palydovines nuotraukas).

Administracinės paskirties pastatas, sudarytas iš atviro plano (angl. *open plan office*) biuro erdvių, o fasadai pasižymi ne tik dideliu įstiklinimo plotu (skaidrios atitvaros sudaro didžiąją, t.y. 57,2 %, viso administracinių tūrių fasado ploto dalį), bet ir savybe mesti šešėlį vienas ant kito, atitinka bendrinę pirminiame tyrime formuotų menamų pastatų koncepciją. Kita vertus, šio pastato su išorės oru besiribojančių atitvarų plotas yra didesnis, kadangi didžioji šildomo pastato ploto dalis yra „pakelta“ nuo grunto, tai sudaro tam tikrą formos skirtumą nuo pirminiame tyrime nagrinėtų modelių. Antžeminės pastato dalies plotas yra 8362,94 m², o rūšiai sudaro – 103,28 m², SSVA [25] registre pateikiamame pastato energinės klasės sertifikato išrašė yra nurodomas 9013,02 m² šildomas pastato plotas. Pastatą sudaro vienas rūšio ir penki antžeminiai aukštai, iš kurių keturiuose yra numatytos biurų patalpos (pirmąjį aukštą sudaro dvi laiptinės su holais).

Tipinį pastato aukštą su administracinėmis erdvėmis sudaro 7 biuro erdvės, kurias išilgai pastato centrinės vertikaliuosios ašies jungia koridorius su laiptinėmis ir lifto šachtomis. Kiekviena iš biuro erdvių turi dedikuotas sanitarines, virtuvėlės bei technines patalpas. Kuriant pastato energinį modelį, atsižvelgus į sanitarinių mazgų bei virtuvėlės ir techninių patalpų išsidėstymą, nuspręsta kiekvienai iš administracinių patalpų suformuoti po tris mažesnes atskiras zonas: sanitarinę (ją sudaro tualetų bei virtuvėlės patalpos), techninę ir koridoriaus (esančio tarp sanitarinės ir techninės zonų), tipinio

administracinio aukšto planas pateikiamas 8 paveiksle. Šiaurinį pastato korpusą, kitaip nei kitus tris, sudaro viena biuro patalpa, kuri savo ruožtu turi po dvi mažesnes skirtingų paskirčių zonas.



8 pav. Tipinis realaus pastato energinio modelio administracinio aukšto planas

2.2.3. Konstrukciniai sprendiniai

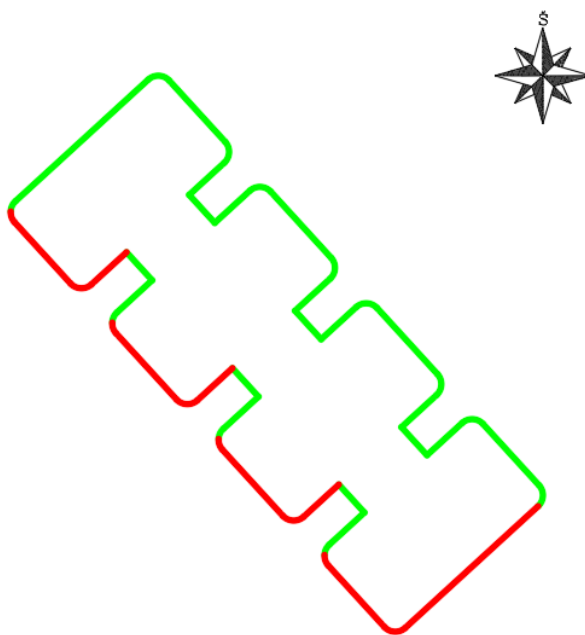
Remiantis projektine informacija, sumodeliuotų pastato atitvarų šiluminės savybės, t.y. šilumos perdavimo koeficientų reikšmės, pateikiamos 1 lentelėje. Išsamesnė informacija apie atitvaras sudarančių sluoksnių medžiagiškumą ir jų šilumos laidumo koeficientus nėra pateikiama. Dėl šios priežasties, kuriant pastato energinį modelį, atitvaras sudarančių sluoksnių medžiagos bei storiai parenkami taip, jog atitiktų architektūrinius brėžinius bei ŠVOK projekte pateikiamas šilumos perdavimo koeficientų vertes. Vidinės pertvaros kuriamos remiantis architektūriniais brėžiniais šiluminės masės įvertinimui.

1 lentelė. Pastato energinio modelio išorinių atitvarų šilumos perdavimo koeficientai

Nr.	Atitvara	U, W/(K·m ²)
1	Išorinės sienos	0,161
2	Grindys, kurios ribojasi su gruntu	0,163
3	Stogas	0,110
	Perdanga, besiribojanti su išore	0,111
4	Langai, durys	1,300
5	Vitrina – skaidrioji dalis	0,784
6	Vitrina – neskaidrioji dalis	0,261

Išorinės sienos (t.y. pirmojo ir rūšio aukštų) sudarytos iš 250 mm monolitinio gelžbetonio, apšiltintos 250 mm termoizoliacija su apdailos sluoksniu, rūšio sienų konstrukcija yra analogiškas, tačiau apšiltinamojo sluoksnio storis yra 150 mm. Atsižvelgiant, jog pastato sienos, besiribojančios su gruntu, yra šiltinamos, termoizoliacinė medžiaga yra priimamas ekstruzinis putų polistirenas (XPS). Grindys. Stogo konstrukcija yra 200 mm storio tuščiavidurės gelžbetoninės plokštės apšiltintos 500 mm storio termoizoliacija (storiausioje dalyje šiltinimo medžiagos storis siekia 550 mm, o siauriausioje – 450 mm, todėl išvedamas vidurkis), priimama, jog apšiltinama mineraline vata, padengta dvigubu sluoksniu bituminės hidroizoliacijos sluoksniu. Antrojo aukšto grindų, t.y. perdangos, besiribojančios su išore, konstrukcija sudaryta iš 250 mm monolitinio gelžbetonio, 500 mm termoizoliacinės medžiagos (priimama mineralinė vata) bei apdailinių sluoksnių.

Pagrindinio pastato tūris vertikaliai nuo išorės yra atskirtas vitrininių konstrukcijų sistema, kurią sudaro skaidriosios bei nepermatomosios detalės. Nepermatomoji dalis susideda iš viso 150 mm storio mineralinės vatos plokščių bei 5 mm vidinio bei išorinio apdailos sluoksnių (išorinis apdailos sluoksnis – stiklas). Skaidrioji dalis susideda iš dviejų kamerų stiklo paketų, kurių visuminės saulės energijos praleisties koeficientų vertės skiriasi priklausomai nuo fasadų orientacijos: į pietų ir pietvakarių pusę orientuotų stiklo paketų $g = 0,38$, visiems kitiems stiklo paketams ši vertė yra 0,50, pastato įstiklinimo schema pavaizduota 9 paveiksle. Visų stiklo paketų šilumos perdavimo koeficientai yra $0,5 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$, todėl rėmo šilumos perdavimo koeficientas nustatomas $3,34 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$. Šiuo atveju skaidri vitrinės dalis, kurios 10% sudaro rėmas, atitinka deklaruojamą reikšmę. Energiniame modelyje kiekvienai administracinės patalpos (netaikoma koridoriams, sanitariniams mazgams ir kitos paskirties zonoms) skaidriai vitrinės daliai yra pritaikomos vidinės žaliuzės, kurių visuminės saulės energijos praleisties koeficiento daugiklio reikšmė yra 0,65. Vidiniai šešėliavimo elementai yra numatomi remiantis vizualiniu pastato įvertinimu pagal viešai prieinamas nuotraukas bei konsultacijomis su pastatą prižiūrinčios įmonės atstovu. Vidinių žaliuzių naudojamas modelyje numatomas pagal saulės energijos srautą, kai jis pasiekia $100 \text{ W}/\text{m}^2$, žaliuzės yra užtraukiamos, tokia saulės energijos srauto vertė yra numatytais programos parametrais.



9 pav. Pastato įstiklinimo schema pagal stiklo paketų suminės saulės energijos praleisties koeficientų vertės:
raudona – $g = 0,38$, žalia – $g = 0,50$

Skirtingų konstrukcijų sandūrose susidarantys ilginiai šiluminiai tilteliai *IDA-ICE* programoje skaičiuojami pagal išorinius pastato matmenis kaip nustatyta reglamento [26] 7 priedo 21-27 punktuose. Ilginių šiluminių tiltelių vertės yra numatomos pagal programoje pateikiamas opcijas, jos parenkamos tipinės išskyrus šiluminiams tilteliams langų perimetru, kadangi *IDA-ICE* modelyje kiekviena vitrininės sistemos sekcija yra sumodeliuota kaip atskiras langas, o šiluminiai tilteliai yra įtraukti į vitrinės šilumos perdavimo koeficiento vertę. Visos šiluminių tiltelių šilumos perdavimo koeficientų vertės yra pateikiamos 2 lentelėje.

2 lentelė. Pastato ilginių šiluminių tiltelių šilumos perdavimo koeficientų vertės

Nr.	Šiluminio tiltelio apibūdinimas	$\Psi, W/(K \cdot m)$
1	Išorinės sienos ir vidinės perdangos sandūra	0,000
2	Išorinių sienų sandūra, išorinis kampas	-0,126
3	Išorinių langų perimetru	0,000
4	Stogo ir išorinių sienų sandūra	0,000
5	Išorinės perdangos sandūra su išorinėmis sienomis	0,500
6	Išorinių sienų sandūra, vidinis kampas	0,106

2.2.4. Pastato inžinerinės sistemos

Pagrindinis pastato šilumos šaltinis yra miesto šilumos tinklai, šiluminę energiją į pastato sistemas tiekiantys per nepriklausomą šilumos punktą. Remiantis statybos techninio reglamento [26] numatytais pastatų šilumos šaltinių energinio efektyvumo vertėmis, šilumos tinklų efektyvumas nustatomas – 1,00. Pastato šildymo sistema – radiatorinė, o tam tikras šilumos kiekis yra įnešamas per į patalpas tiekiamą orą, pašildomą per su šilumos punktu sujungtą šilumokaitį.

Pastato administracinių patalpų šiluminis režimas atitinka pradiniam tyrimo nagrinėtų pastatų parametrus, t.y. šaltuoju sezonu projektinė temperatūra yra 22 °C, o šiltuoju – 24 °C. Į patalpas tiekiamas oras pašildo patalpas, taip sumažindamas dedikuotos patalpų šildymo sistemos energijos poreikį, siekiant tiksliau įvertinti šildymo energijos sąnaudas zonose numatytas mechaninis vėdinimas. Siekiant supaprastinti energinį modelį, sanitarinių patalpų vėdinimas nėra numatomas, remiantis projektine informacija, vienam prietaisui turi būti numatyta 20 l/s šalinamo oro kiekis, o oro pritekėjimas – iš kitų patalpų, visgi šios patalpos yra sąlyginai nedidelės ir pritekėjęs oras neįneš žymaus šilumos kiekio. Pastato modelio zonų mikroklimato parametrai pagal projektinę pastato informaciją yra pateikiami 3 lentelėje

3 lentelė. Pastato energinio modelio zonų mikroklimato parametrai

Zona	Minimali temperatūra, °C	Maksimali temperatūra, °C	Tiekiamas oro kiekis, l/s	Šalinamas oro kiekis, l/s
Administracinės erdvės	22	24	2	2
Koridoriai, laiptinės, holai	18	Nekontroliuojama	0,5	0,5
Sanitariniai mazgai	22	Nekontroliuojama	-	-
Konferencijų salės	22	24	4	4
Techninės patalpos	16	Nekontroliuojama	0,5 (h ⁻¹)	0,5 (h ⁻¹)

Pastato vėsos šaltinis – oras-oras tipo šilumos siurblys, naudojamas vėsinimo energijos poreikio užtikrinimui. Didžioji dalis patalpų vėsinama aktyviosiomis šaltinio sijomis, mažesnėse patalpose

numatomi lubiniai konvektoriniai oro vėsintuvai. Projektinėje informacijoje pateikiamas sezoninis šalčio mašinos energinis efektyvumas ESEER (angl. *European Seasonal Energy Efficiency Rating*) yra 3,91.

Kuriant realaus pastato modelį šildymo ir vėsinimo poreikio nustatymui parenkami idealieji šildytuvai ir vėsintuvai, tiekiamojo oro temperatūra priimama pastovi – 20 °C. Tokios prielaidos atliekamos siekiant supaprastinti patį modelį, kadangi realaus pastato energinių skaičiavimų tikslas yra patikrinti, ar egzistuoja sąryšis su esamo pastato energijos sąnaudomis. Energinio modelio kalibravimas yra sudėtingas procesas, kuriam, remiantis *ASHRAE* gairėmis [34], taikoma leistina 10% paklaida nuo realaus pastato energijos suvartojimų vertinant valandinius bei 5% vertinant mėnesinius duomenis. Toks procesas reikalauja gilesnių programinės įrangos žinių, didesnių laiko resursų bei vietoje atliekamų pastato inžinerinių sistemų ir patalpų mikroklimato parametru matavimų.

Siekiant įvertinti pastato vėsinimo energijos sąnaudas, patalpose buvo numatyti skirtingi šilumos išsiskyrimų tipai: žmonės, įranga ir apšvietimas. Šilumos išsiskyrimai, susidarantys dėl žmonių metabolizmo bei jų naudojamos įrangos priimti pagal projektinius vėsinimo sistemos galingumo nustatymo duomenis: žmonių tankis biuro patalpose – 6 m²/ žm., įrangos skleidžiama šiluminė galia – 30 W/m². Remiantis šiluminio komforto darbo patalpose Lietuvos higienos norma [26], žmogaus medžiagų apykaitos lygis priimamas 1,2 met, t.y. fizinio aktyvumo lygis – sėdimas darbas. Žmogaus aprangos šiluminės varža yra priimam numatytoji programinės įrangos – 0,85 ± 0,25 clo. Aprangos šiluminė vertė kinta intervale nuo 0,6 clo iki 1,1 clo, šios vertės atspindi lengvą darbo bei būdingą žieminę aprangą [26], programa skaitinį įvertį keičia pagal žmonių šiluminį komfortą. Pagal numatomą žmonių tankį, šilumos išsiskyrimai nuo įrangos yra priimami 180 W vienam įrenginiui, daroma prielaida, jog vienas įrenginys yra skirtas vienam asmeniui. Tiek žmonių, tiek įrangos kiekis yra nustatomas kiekvienai tipinio aukšto biuro patalpai atskirai dalinant patalpos grindų plotą iš žmonių tankio ir suapvalinant iki sveikojo skaičiaus.

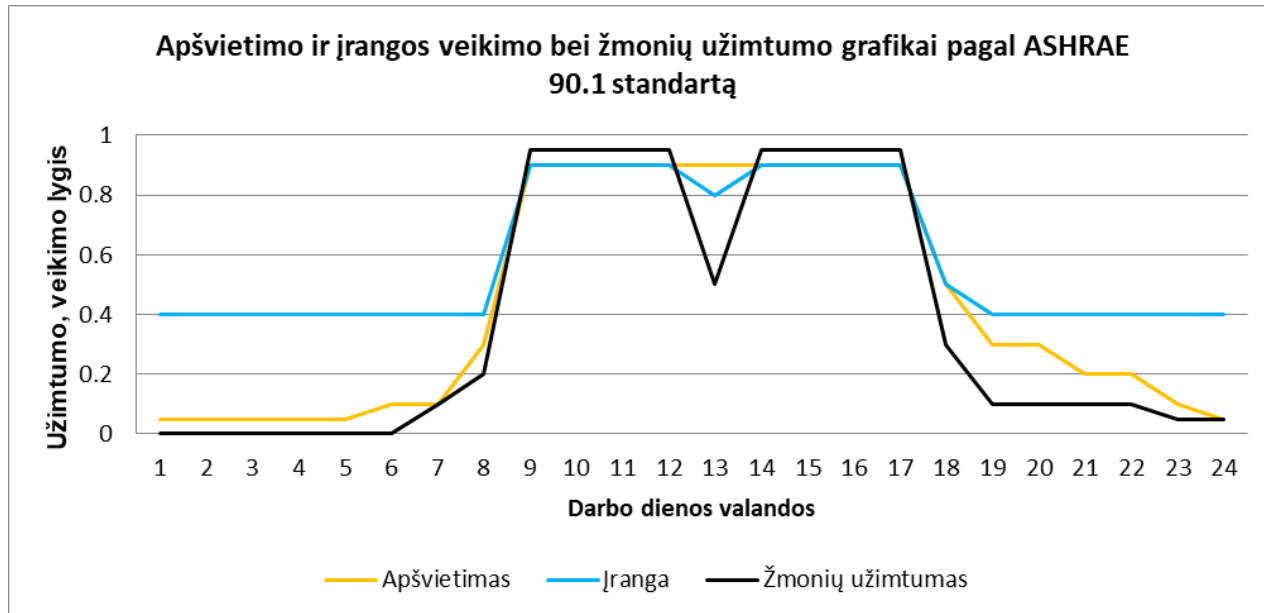
Šilumos kiekis sklindantis nuo šviestuvų, pagal projektinius duomenis, buvo priimtas 12 W/m², visgi energiniame modelyje šviestuvai buvo sumodeliuoti pagal turimą šviestuvų sąrašą. Patalpų apšvietimui buvo naudojami *Kalis* gamintojo šviestuvai, pagal gamintojo svetainėje pateikiamas technines specifikacijas, panašaus galingumo šviestuvų energinis efektyvumas yra 104 lm/W. Šis efektyvumas priskiriamas visiems modelio šviestuvams, kadangi pastate sumontuotų šviestuvų gamintojo kataloge nebuvo rasta. Neturint pakankamai duomenų, šviestuvų galios dalies, išspinduliuojamos kaip šiluminė energija, dydis priimamas 30% įvadinės galios, tai yra numatytasis programos parametras. Remiantis pastato šviestuvų išdėstymo planais bei jų sąrašu į patalpose buvo sumodeliuoti skirtingų parametru šviestuvai, jų duomenys pateikiami 4 lentelėje.

4 lentelė. Tipinio aukšto modeliuojamų šviestuvų parametrai

Zona	Vieno šviestuvo galia, W	Šviestuvo efektyvumas, lm/W	Šviestuvų kiekis, vnt.
Administracinės erdvės	50,4	104	203
Koridoriai	263	104	4
	94	104	6
	33	104	8
Sanitariniai mazgai (didesni)	24	104	2

Zona	Vieno šviestuvo galia, W	Šviestuvo efektyvumas, lm/W	Šviestuvų kiekis, vnt.
	33	104	1
Sanitariniai mazgai (mažesni)	24	104	2
Administracinių erdvių techninės patalpos (didesnės)	33	104	1
	12,6	76	1
Administracinių erdvių techninės patalpos (mažesnės)	33	104	1
Konferencijų salės	94	104	4
Laiptinės (1 ir 3)	21	104	2
Laiptinė (centrinė)	21	104	1
Pirmo aukšto holai	94	104	4

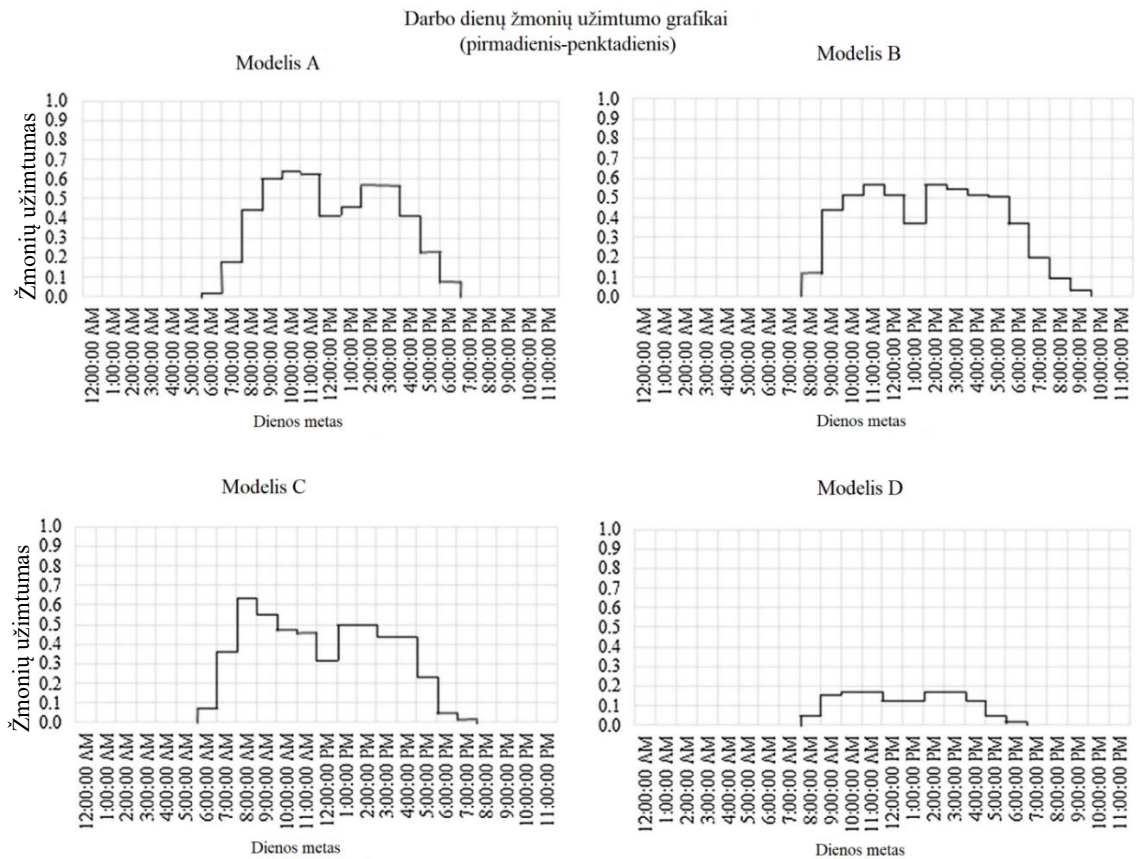
Žmonių, naudojamos įrangos bei apšvietimo kiekis yra kintantis laike parametras, susietas su patalpose vykdoma veikla. Šis kitimas dinamiinių skaičiavimų metu yra aprašomas grafikais, leidžiančiais įvertinti šilumos išsiskyrimų dydį laike. JAV energetikos departamento energinio efektyvumo ir atsinaujinančios energetikos biuro pateikiamų prototipinių energinių modelių pagal pastatų paskirtis duombazėje [35] šie grafikai yra priimami pagal ASHRAE 90.1 standartą [30]. Savo ruožtu, S. D’Oca ir T. Hong’o atliktame tyrime [36] nustatytas įvairių administracinių pastatų Vokietijoje žmonių užimtumas darbo dienomis gerokai skiriasi nuo ASHRAE 90.1 standarto. 10 ir 11 paveiksluose atitinkamai pateikiami ASHRAE 90.1 standarto numatytasis didelio biuro bei Vokietijos biuruose atlikto tyrimo metu nustatyti skirtingi užimtumo grafiko modeliai.



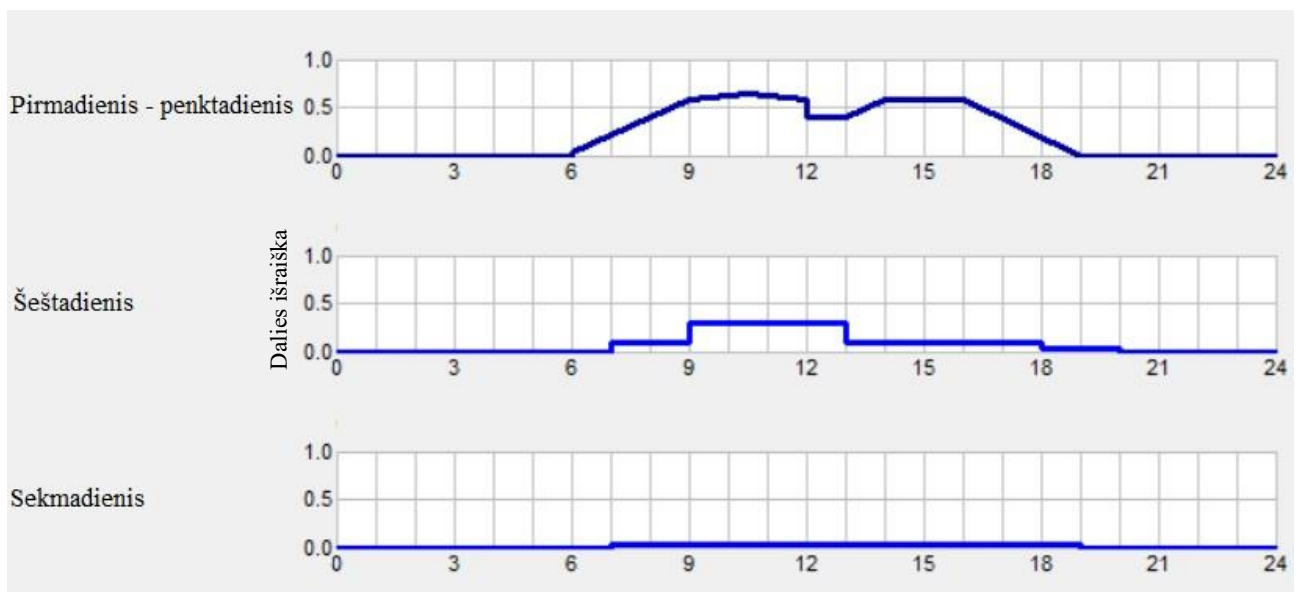
10 pav. Apšvietimo ir įrangos veikimo bei žmonių užimtumo grafikai pagal ASHRAE 90.1 standartą [35]

Atsižvelgiant į tai, jog S. D’Oca ir T. Hong’o tyrime buvo nagrinėjami Europos Sąjungoje esantys biurų pastatai, o ASHRAE 90.1 standartas paremtas JAV pastatų duombaze, žmonių užimtumo grafikas priimamas analogiškas į Modelį A (žr. pav. 11). Darbuotojo profilis A Modelyje tyrime apibūdinamas taip: „atvyksta į darbą apie 6–9 val., dirba stabiliai iš biuro ryte nuo 9 iki 12 val. po pietų nuo 13:30 iki 16 val., pietauti eina apie 12–13:30, išeina iš darbo apie 16–19 val.“ [36]. Priimama, jog šis apibūdinimas geriausiai atitinka įprastinio biuro darbuotojo, dirbančio nuo 8 val.

ryto iki 17 val. vakaro rutina, atsižvelgus į galimą darbo valandų lankstumą (t.y. fiksuoto darbo pradžios ir pabaigos laiko nebuvimą). Tačiau pasirinktas grafikas apibūdina tik tipines darbo dienas bei neįtraukia savaitgalių, todėl apibūdinti šias dienas pasirenkami *ASHRAE 90.1* standarte pateikiami duomenys. Energiniame modelyje naudojamas žmonių užimtumo grafikas pateikiamas 12 paveiksle.



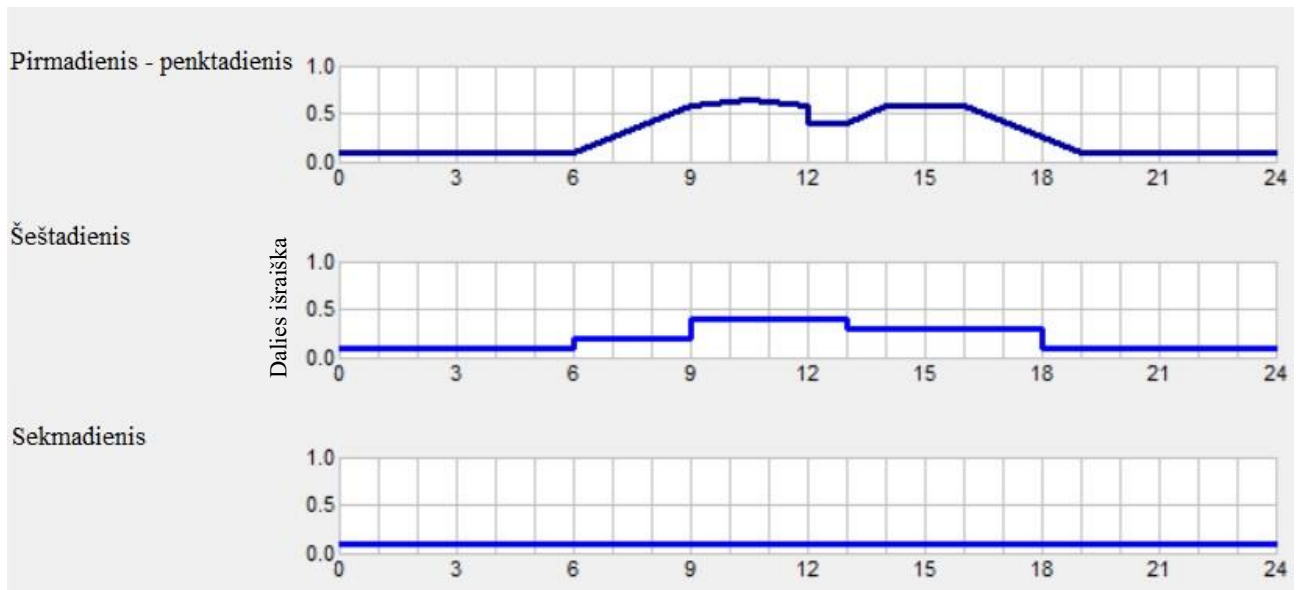
11 pav. Žmonių užimtumo grafikai pagal tyrimą Vokietijos biuruose [36]



12 pav. Modelyje taikomi žmonių užimtumo grafikai

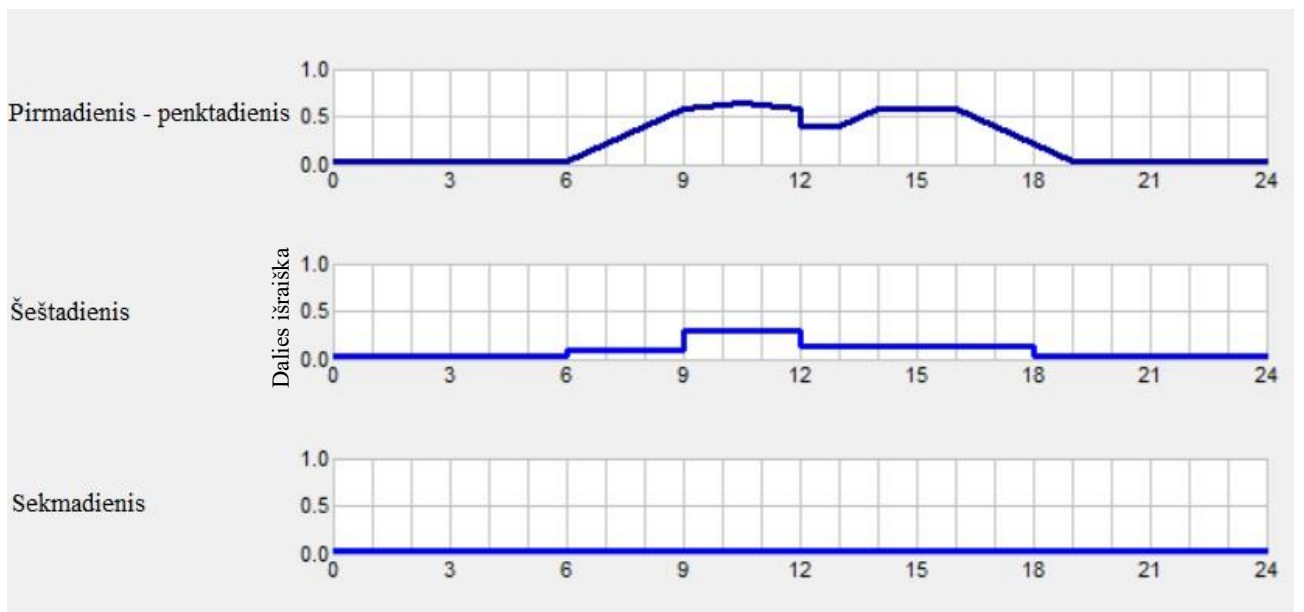
Įrangos veikimo grafikas darbo dienomis sudaromas taip, jog atspindėtų žmonių biuro patalpose darbą, nedarbo valandomis priimama fiksuota 0,1 vertė, įvertinanti neišjungiamos įrangos veikimą.

Šeštadieniams šis grafikas sudaromas pagal *ASHRAE 90.1* standartą bei fiksuotą neišjungiamos įrangos veikimo vertę. Sekmadieniais priimama, jog šilumos išsiskyrimai susidaro tik nuo neišjungiamos įrangos veikimo. Darbo dienų bei savaitgalio įrangos veikimo grafikai pateikiami 13 paveiksle.



13 pav. Modelyje taikomi įrangos veikimo grafikai

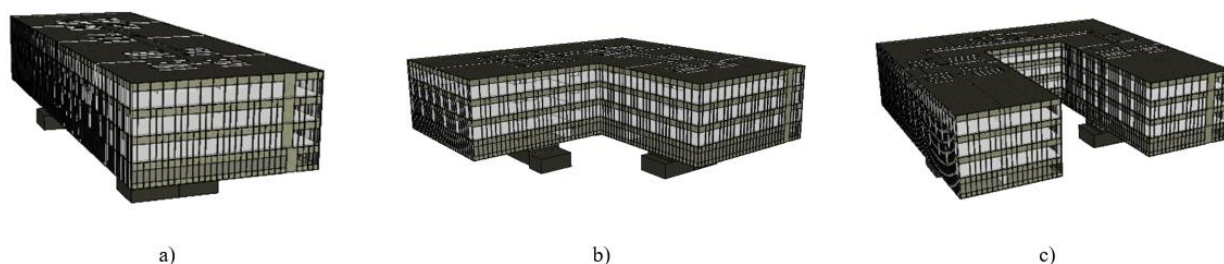
Patalpų apšvietimui numatoma dviejų faktorių kontrolė – pagal nustatytą grafiką ir patalpos natūralų apšvietimą. Minimalus apšvietimo lygis, pagal kurį yra įjungiami šviestuvai, priimtas 300 lux. Laiptinėse apšvietimas yra įjungtas visą laiką, taip priimta atsižvelgiant, jog tai yra žmonių evakuacijos keliai, savo ruožtu rūšio patalpose apšvietimas nmodeliuojamas dėl sąlyginai mažo naudojimosi pagalbinėmis patalpomis. Apšvietimo veikimo grafikas tiek darbo dienomis, tiek savaitgaliais yra susietas su žmonių užimtumo grafiku, nedarbo laiku priimamas minimalus apšvietimo poreikis – 0,05. Patalpų apšvietimo grafikai pateikiami 14 paveiksle.



14 pav. Modelyje taikomi apšvietimo veikimo grafikai

2.2.5. Menamos pastato alternatyvos

Menamos pastato alternatyvos yra formuojamos modifikuojant pirminio pastato modelio planą į skirtingas formas taip, jog bendras plotas (t.y. ir tūris) išliktų kuo panašesnis į originalų, menamų alternatyvų architektūrinės vizualizacijos pateikiamos 15 paveiksle. Biuro erdvės administraciniame pastate sudaro pagrindinę dedamąją, todėl atliekant menamų pastatų formavimą tiek pirmo aukšto, tiek ir rūšio patalpos yra išlaikomos tokios pačios kaip ir pirminio modelio tik pakoreguojama jų lokacija taip, jog atitiktų menamos formos pastato loginį išsidėstymą. Tokiu būdu performuojamas būtent biuro erdvių plotas kaip ir pradinio tyrimo atveju, kuomet visas pastato aukštas buvo numatytas kaip viena biuro erdvė. Kintant pastato formai, keičiasi ir formos rodikliai, realaus pastato ir jo menamų alternatyvų charakteristikos pateikiamos 5 lentelėje.



15 pav. Menamų alternatyvų modelių architektūrinės vizualizacijos: a) „I“, b) „L“, c) „U“

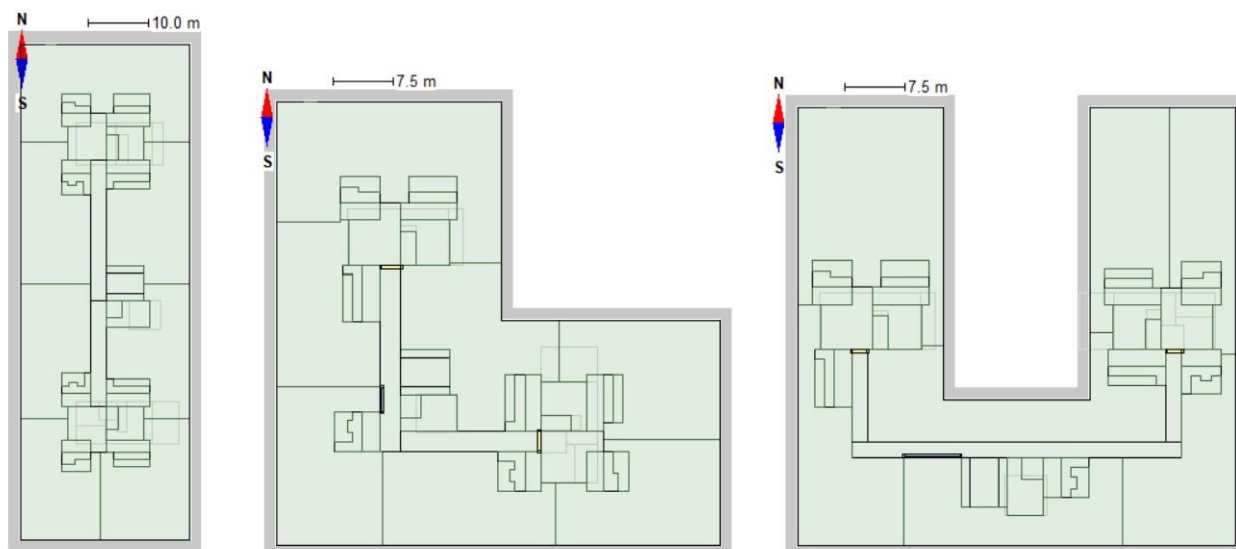
5 lentelė. Realaus pastato ir jo menamų alternatyvų charakteristikos

Modelis	Tipinio aukšto plotas, m ²	Administracinių aukštų tūris, m ³	Formos rodikliai		
			d/l	a/b	S/V
Realus pastatas	2318,0	32921,64	-	3,273	0,321
„I“ formos alternatyva	2318,0	32919,93	0,341	-	0,270
„L“ formos alternatyva	2318,0	32919,93	-	1,000	0,270
„U“ formos alternatyva	2319,0	32924,26	-	4,000	0,303

Formuojant kiekvieną iš trijų menamų alternatyvų, patalpų išsidėstymą aukšto plane buvo stengiamasi išlaikyti kuo panašesni į originalų. Patalpų, neskirtų administraciniam darbui, t.y. koridorių, laiptinių, sanitarinių mazgų ir kt., plotai buvo išlaikomi tokie patys, siekiant išlaikyti toki patį vėsinamą pastato plotą, kadangi šiose patalpose vėsinimas nėra numatomas. „I“, „L“ ir „U“ menamų pastato alternatyvų tipinio administracinio aukšto planai pateikiami 16 paveiksle.

Administracinio pastato vitrinų stiklo paketų visuminės saulės energijos praleisties koeficientų reikšmės yra skirtingos, priklausomai nuo fasado orientacijos. Dėl šios priežasties pastato energijos sąnaudų priklausomybė nuo jo orientacijos vertinimas nebūtų teisingas vertinant energijos suvartojimą skirtingai pasukant pastatą. Siekiant teisingai įvertinti energinius modelius, atliekant dinامينius energinius skaičiavimus (išskyrus pirminius energinius skaičiavimus rezultatų patvirtinimui realaus pastato atveju), visų administracinių aukštų stiklo paketai suvienodinami.

Priimamas tipinis stiklo paketas, kurio visuminės saulės energijos praleisties koeficiento vertė yra 0,38.



16 pav. „I“, „L“ ir „U“ formų menamų alternatyvų tipinio administracinio aukšto planai

3. Rezultatai

Šiame skyriuje yra pateikiami magistro baigiamojo projekto skaitinio tyrimo rezultatai. Pateikiamas administracinio pastato Kauno mieste energinio modelio rezultatų palyginimas su realiais energijos suvartojimais 2021 metais. Aprašomi dinaminių energinių skaičiavimų metu apskaičiuotos metinės energijos sąnaudos realaus pastato ir „I“ formų modeliams dviejose skirtingose orientacijose, o „L“ ir „U“ – keturiose.

3.1. Realus pastato energinio modelio patvirtinimas

Magistro baigiamojo projekto metu atliekamas tyrimas susidėjo iš dviejų dalių, pirmoji iš jų – realaus pastato energinio modelio patvirtinimas. Patvirtinimo procedūra nebuvo siekiama atkartoti realaus pastato energijos sąnaudas 2021 metų laikotarpiu, o sukurti energinį modelį, galintį imituoti realaus pastato eksploatacines savybes.

Dinaminių energinių skaičiavimų metu buvo vertinamos energijos sąnaudos pastato šildymui bei vėsinimui ir apšvietimui. Tiek energijos sąnaudos šildymui, tiek ir energijos sąnaudos vėsinimui aprėpė du aspektus – pačių patalpų ir į jas tiekiamo oro kondicionavimą (t.y. šildymą ir vėsinimą). Kitaip nei pradinio tyrimo metu, magistro baigiamojo tyrimo metu buvo vertinamas suvartotos energijos kiekis, o ne energijos poreikis. Tai reiškia, jog šiame tyrime vertinamas realus energijos suvartojimas, tuo tarpu pradiniam tyrime buvo nustatomas energijos poreikis, reikalingas pakelti arba sumažinti patalpų temperatūrą iki nustatytų temperatūrų bei sukurti tinkamą apšvietą. Realus pastato, aprašomo 2.2.2., 2.2.3. ir 2.2.4. skyreliuose, energinių skaičiavimų metu nustatytos energijos sąnaudos patiekiamos 6 lentelėje.

6 lentelė. Administracinio pastato energinio modelio metinės energijos sąnaudos 2021 metų laikotarpiu

Mėnuo	Energijos sąnaudos, tūkst. kWh per metus		
	Šildymas	Vėsinimas	Apšvietimas
Sausis	67,1	0,7	9,1
Vasaris	64,1	1,2	8,2
Kovas	30,8	4,0	8,6
Balandis	11,2	8,4	7,7
Gegužė	1,3	13,4	7,1
Birželis	0,1	16,1	7,2
Liepa	0,0	21,5	7,3
Rugpjūtis	0,0	19,4	7,6
Rugsėjis	0,7	9,2	8,1
Spalis	8,9	4,7	8,6
Lapkritis	30,4	1,5	9,2
Gruodis	67,4	0,7	9,6
Viso	282,1	100,5	98,3

Administracinio pastato energijos sąnaudos 2021 metais susidėjo iš keturių dedamųjų: šildymo sistemos energijos sąnaudos, energijos tiekiamo oro pašildymui sąnaudos, šalčio mašinos elektros sąnaudos bei elektros sąnaudos patalpų apšvietimui. Kadangi šildymo energija pateiktuose

duomenyse yra skirta tiek patalpų šildymui, tiek ir tiekiamo oro šildymui, priimama, kad tai yra bendras energijos kiekis šildymui. Realūs energijos suvartojimai pateikiami 7 lentelėje.

7 lentelė. Administracinio pastato realios metinės energijos sąnaudos 2021 metų laikotarpiu

Mėnuo	Energijos sąnaudos, tūkst. kWh per metus		
	Šildymas	Vėsinimas	Apšvietimas
Sausis	74,6	0,1	5,8
Vasaris	77,9	0,1	5,1
Kovas	52,5	0,1	6,3
Balandis	25,1	0,1	6,5
Gegužė	4,7	11,5	5,6
Birželis	0,2	20,2	6,0
Liepa	4,8	20,4	5,9
Rugpjūtis	7,90	16,7	8,1
Rugsėjis	11,3	20,9	9,9
Spalis	17,5	0,0	6,4
Lapkritis	39,5	0,1	9,6
Gruodis	53,9	0,1	9,6
Viso	369,8	90,3	84,8

6 ir 7 lentelėse pateikiamų duomenų palyginimas, apimantis realaus pastato ir jo energinio modelio sąnaudų skirtumus bei santykinę paklaidą pateikiamas 8 lentelėje. Pagal pateikiamus duomenis galima matyti, jog pastato energinio modelio šildymo energijos suvartojimas buvo apie 23,7 % mažesnis nei realaus pastato, o elektros energijos suvartojimas vėsinimui bei apšvietimui atitinkamai 11,3 % ir 15,9 % didesni. Suminių metinių energijos sąnaudų disbalansas tarp realaus pastato ir jo energinio modelio siekė apie 64 tūkst. kWh, realaus pastato suminis energijos suvartojimas buvo 11,76 % didesnis.

8 lentelė. Realaus pastato ir jo modelio metinių energijos sąnaudų palyginimas

Mėnuo	Šildymas		Vėsinimas		Apšvietimas	
	Skirtumas, kWh per metus	Santykinė paklaida, %	Skirtumas, kWh per metus	Santykinė paklaida, %	Skirtumas, kWh per metus	Santykinė paklaida, %
Sausis	-7556	-10,13	568	Nenustatoma	3291	56,59
Vasaris	-13782	-17,69	1055	Nenustatoma	3180	62,91
Kovas	-21712	-41,32	3911	Nenustatoma	2246	35,53
Balandis	-13863	-55,33	8258	Nenustatoma	1176	18,05
Gegužė	-3358	-72,11	1840	15,95	1465	26,00
Birželis	-50	-30,62	-4126	-20,43	1135	18,83
Liepa	-4794	Nenustatoma	1095	5,38	1433	24,49
Rugpjūtis	-7860	Nenustatoma	2646	15,80	-486	-6,00
Rugsėjis	-10654	Nenustatoma	-11683	-55,93	-1800	-18,12
Spalis	-8651	-49,38	4666	Nenustatoma	2131	33,05

Mėnuo	Šildymas		Vėsinimas		Apšvietimas	
	Skirtumas, kWh per metus	Santykinė paklaida, %	Skirtumas, kWh per metus	Santykinė paklaida, %	Skirtumas, kWh per metus	Santykinė paklaida, %
Lapkritis	-9014	-22,85	1403	Nenustatoma	-386	-4,03
Gruodis	13559	25,16	574	Nenustatoma	84	0,88
Viso	-87735	-23,73	10207	11,30	13469	15,88

8 lentelėje santykinės paklaidos tam tikriems mėnesiams nėra nustatomos. Pagal realaus pastato energijos suvartojimą galima pastebėti, jog energija šildymui ir vėsinimui nėra vartojama proporcingai lauko oro temperatūrai. Šis neproporcingumas susidaro dėl pastate suprojektuotos vėsinimo sistemos aktyviosiomis šalčio sijomis, šie prietaisai neturi kondensato surinkimo galimybės, todėl tiekiamas oras vasarą turi būti sausinamas iki projektinių parametų. Sausinimo metu oras turi būti pakankamai atvėsinamas drėgnumo sumažinimui bei pašildomas iki projektinės tiekiamo oro temperatūros, tai lemia šilumos energijos suvartojimą vasaros metu. Šalčio mašinos energijos sąnaudos metų laikotarpyje leidžia manyti, jog prietaisas realią vėsinimo funkciją atlieką tik nuo gegužės iki rugsėjo mėnesio, kitais mėnesiais energijos sąnaudos svyruoja apie 100 kWh. Šis energijos kiekis gali būti skirtas pačios šalčio mašinos eksploatavimui nedarbo režimu.

Vertinant apšvietimo energijos suvartojimo skirtumus, galima pastebėti, jog gruodžio ir lapkričio mėnesiai, santykinės paklaidos buvo ganėtinai mažos. Visgi realaus pastato energijos sąnaudos apšvietimui metų laikotarpyje nebuvo nuosekliai kintančios. Galima pastebėti, jog tų pačių metų lapkričio bei gruodžio mėnesių energijos sąnaudos buvo apie 1,5 karto didesnės nei sausio ir vasario, taip pat pastebimas ženklus skirtumas tarp liepos ir rugpjūčio mėnesių. Priežastys lėmusios tokius skirtumus nėra žinomos, tam įtakos galėjo turėti pastato patalpų nuomininkų įpročiai bei darbas patalpose, ypačingai įvertinant COVID-19 pandemijos įtaką darbui uždaroje erdvėje.

Energinio modeliavimo rezultatams daug įtakos turi ir pastatų besinaudojančių žmonių įpročiai. Apžvelgdamas numatomų ir realių energijos sąnaudų skirtumus [37], P. de Wilde'as pastebi, jog kaip viena iš pagrindinių priežasčių energinių skaičiavimų neatitikimui realaus pastato eksploatacinėms energijos sąnaudoms yra įvardijamas žmonių elgesys. I. Gaetani ir kt. [38] atliktame tyrime nustatė, jog egzistuoja 90% koreliacija tarp šildymo ir vėsinimo energijos sąnaudų variacijų bei įrangos ir apšvietimo naudojimo bei pačių žmonių buvimo patalpose. Savo ruožtu, V. Motuzienė ir kt. [39] pastebi, jog žmonių buvimui patalpose ir jų skaičiaus kitimui pandemijos sąlygomis įtaką daro ir pačio administracinio darbo pobūdis. Energijos sąnaudų neatitikimui įtakos gali turėti ir klimatinio failo duomenys. E. Keyrouz'as [40] teigia, jog *IWEC* tipo failai (Kauno klimato *IWEC* tipo failas naudojamas ir šiame tyrime) yra sudaryti iš 12 tipinių mėnesių iš tam tikro laikotarpio, dėl to susidaro apie 7 °C skirtumas tarp 2005 metų Paryžiaus klimato faile bei 2022 metais nustatyto lauko oro temperatūros piko.

Energinio modelio supaprastinimas bei informacijos apie pastatą ribotumas turėjo įtakos rezultatams. Esamos pastato sistemos buvo supaprastintos siekiant sumažinti skaičiuojamųjų bei laiko resursų sąnaudas, kaip aprašoma 2.2.4. skyrelyje. Pastato konstrukcijos buvo priimtos pagal ŠVOK projekte numatytas šilumos perdavimo vertes, tai nebūtinai gali atitikti realių pastato atitvarų konstrukcinėse detalėse pateikiama informaciją. Dėl šių priežasčių atliekant energinio modelio rezultatų patvirtinimą nebuvo siekiama jo sukalibruoti pagal realias energijos sąnaudas. Kaip teigia E. Keyrouz'as [40], energinis modeliavimas projektinėje studijoje atlieka ne tikslaus energijos sąnaudų prognozavimo, o

energijos taupymo galimybių lyginamosios analizės funkciją. Atsižvelgiant į tai, jog tyrimas yra paremtas pastato formos keitimu, t.y. pastato architektūrinio išplanavimo perprojektavimu, gauti rezultatai yra patvirtinami.

3.2. Tyrimo rezultatai ir interpretacija

Remiantis 2 skyriuje aprašoma tyrimo metodologija, iš viso buvo atlikta 12 dinaminių energinių skaičiavimų į skirtingas formas performuoto realaus administracinio pastato. Tyrimo rezultatai pateikiami 9 lentelėje.

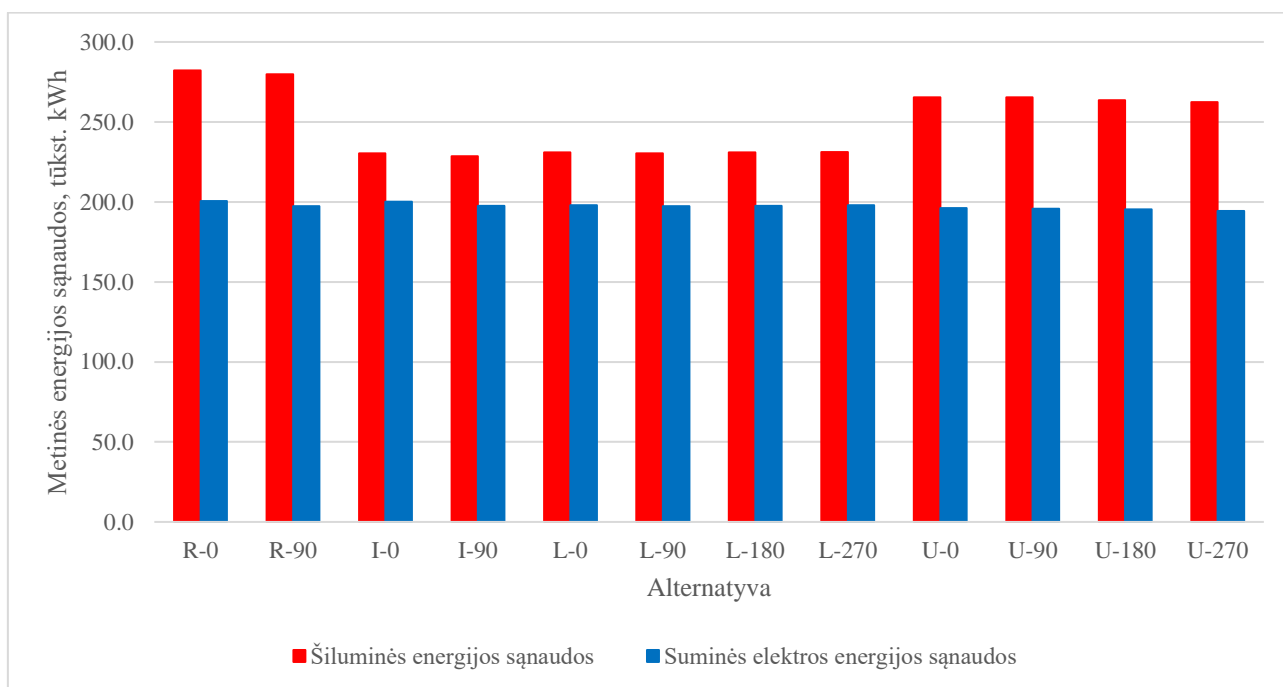
9 lentelė. Tyrimo objektų metinės energijos sąnaudos ir CO₂ emisijos

Pastato modelis (forma)	Orientacija	Energijos sąnaudos, tūkst. kWh per metus			CO ₂ emisijos, kgCO ₂
		Šildymas	Vėsinimas	Apšvietimas	
Realus	0°	282,2	102,4	98,2	115291
	90°	279,8	99,0	98,3	113667
„I“	0°	230,3	96,2	103,9	109359
	90°	228,5	93,5	104,1	108099
„L“	0°	231,0	94,0	103,9	108538
	90°	230,3	93,5	103,9	108241
	180°	230,9	93,5	104,1	108386
	270°	231,1	93,7	104,1	108529
„U“	0°	265,4	96,3	99,8	111576
	90°	265,3	96,2	99,6	111427
	180°	263,6	95,4	99,9	111012
	270°	262,4	94,5	99,9	110514

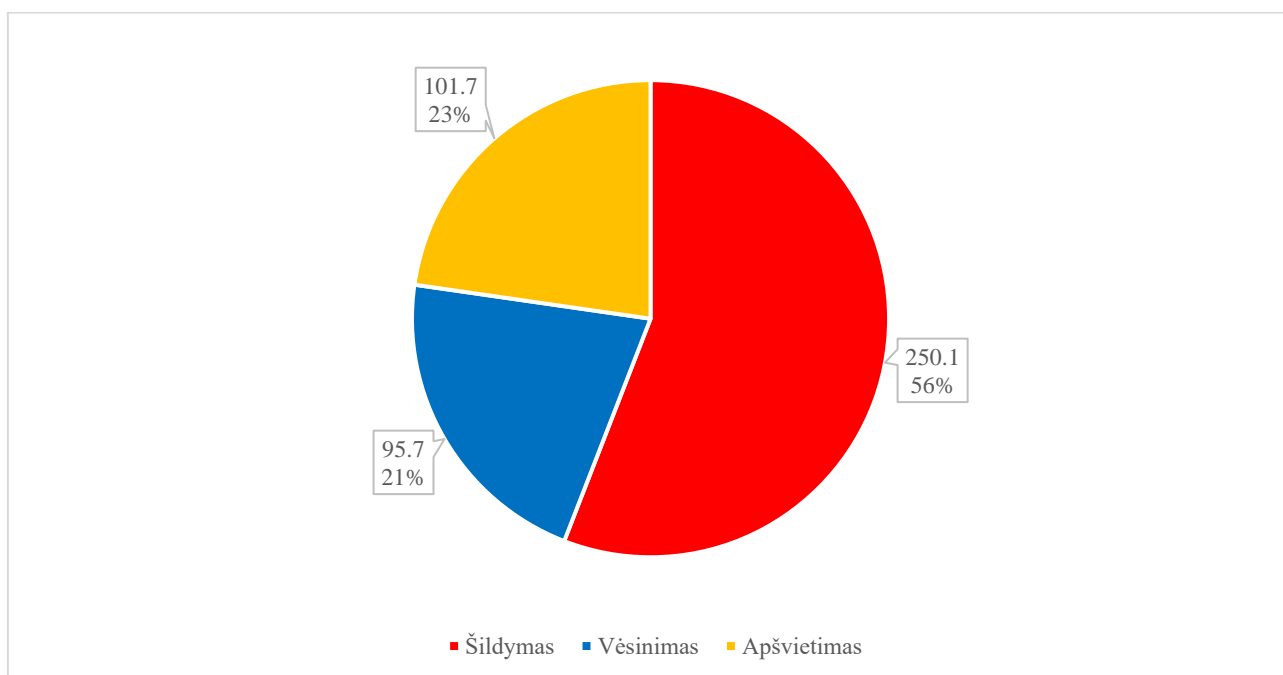
9 lentelėje patiekiami duomenys rodo, jog didžiausios energijos sąnaudos buvo pasiektos realaus pastato formos modelio, kurio trumpasis fasadas buvo atsuktas į pietus (t.y. aukšto planas buvo pasuktas į vertikalią poziciją). Šiuo atveju pastato šildymo reikmėm buvo suvartota 282,2 tūkst. kWh energijos per metus, o suminės elektros energijos sąnaudos sudarė 200,6 tūkst kWh per metus. Savo ruožtu mažiausią energijos suvartojimą pademonstravo „I“ formos pastato modelis, kurio ilgasis fasadas buvo atsuktas į pietus (t.y. aukšto planas buvo pasuktas į horizontalią poziciją). Šiuo atveju šiluminės bei suminės elektros energijos sąnaudos atitinkamai sudarė 228,5 bei 197,5 tūkst kWh per metus. Skirtumas tarp energiškai neefektyviausio bei optimaliausio modelio siekė 53,7 tūkst kWh šiluminės energijos per metus, tai sudaro 19,03 % energiškai neefektyviausio modelio šiluminės energijos sąnaudų. Kita vertus skirtumas tarp elektros energijos poreikio vėsinimui ir apšvietimui buvo sąlyginai nežymus – 3,1 tūkst. kWh per metus. Tai sudarė tik apie 1,54 % energijos vartojimo prasme prasčiausiai pasirodžiusio tyrimo objekto suminių elektros energijos sąnaudų.

Modelių energijos sąnaudų duomenys yra pateikiami 17 paveiksle. Iš metinių šiluminė ir elektros sąnaudų diagramos galima nesunkiai pastebėti visus tyrimo objektus siejančią tendenciją – elektros energijos suvartojimai buvo panašūs nepaisant pastato formos, o esminį skirtumą tarp modelių lėmė šiluminės energijos sąnaudos. 18 paveiksle pateikiama tyrimo modelių vidutinių energijos sąnaudų pasiskirstymo skritulinė diagrama patvirtina šią tendenciją. Didžiausią dalį (56%) visų vidutinių

energijos sąnaudų lėmė šildymo energija. Energijos poreikis pastato vėsinimui ir apšvietimui sudarė panašias dalis energijos sąnaudų, atitinkamai 21 % ir 23 %.



17 pav. Tiriamų alternatyvų metinės šiluminės ir elektros energijos sąnaudos



18 pav. Tyrimo modelių vidutinių energijos sąnaudų pasiskirstymas

Skirtumai tarp apskaičiuotų didžiausių ir mažiausių vėsinimo ir apšvietimo sistemų metinių energijos sąnaudų buvo kur kas mažesni negu šildymo sistemos, atitinkamai jie sudarė 8,9 ir 6,0 tūkst. kWh. Kadangi sumines elektros energijos sąnaudas sudarė dvi dedamosios, didžiausias skirtumas tarp skirtingų modelių elektros energijos sąnaudų buvo mažesnis – 6,2 tūkst. kWh per metus. Tai yra ženkliai mažesnis skirtumas nei šiluminės energijos sąnaudų (53,7 tūkst. kWh per metus). Todėl

galima teigti, jog šiluminė energija daro pagrindinę įtaką pastato energijos suvartojimui Lietuvos klimate.

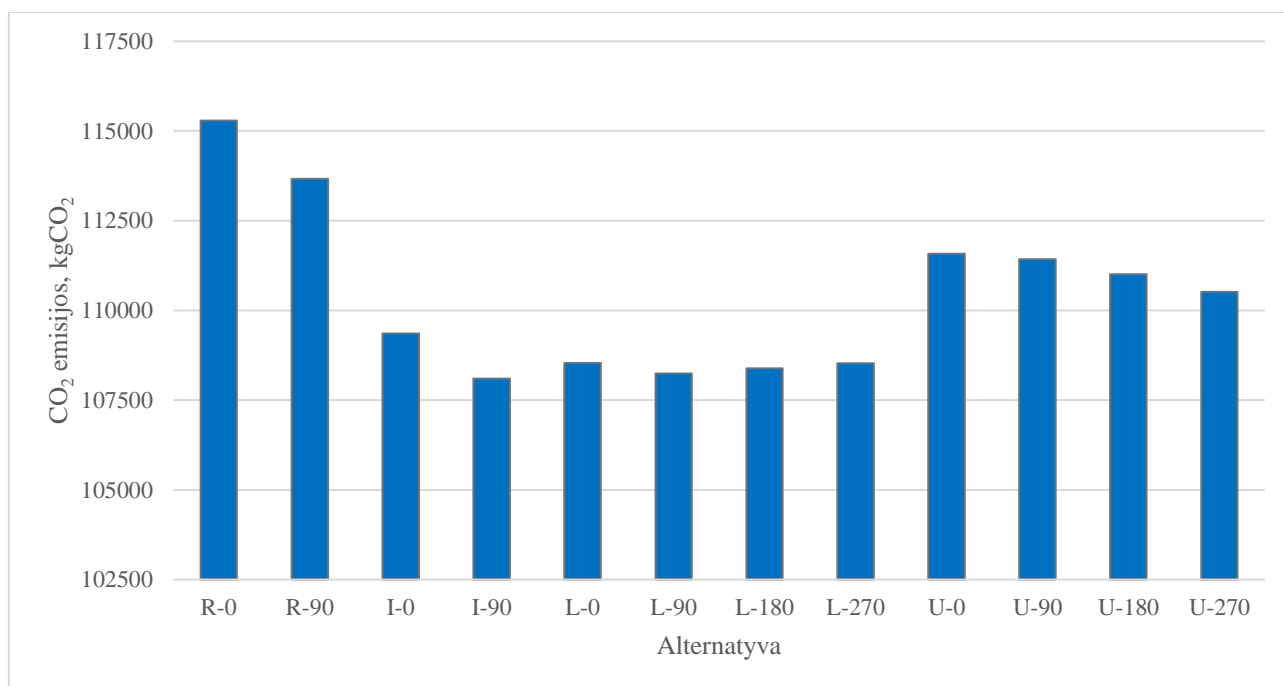
Susidarantis sąlyginai žymus energijos sąnaudų skirtumas pastebimas vertinant visą tyrimo objektų imtį. Visgi, energijos sąnaudų skirtumai tarp skirtingų pastato formų yra palyginus maži. Didžiausias suvartotos šiluminės energijos skirtumas nustatytas tarp realios formos pastatų modelių, jis siekė 3,2 tūkst. kWh per metus, tai sudaro tik apie 1,13 % 0° kampu orientuoto realaus pastato modelio metinių šiluminės energijos sąnaudų. Didžiausias suvartotos elektros energijos skirtumas nustatytas tarp „U“ formos pastatų modelių, jis siekė 3,0 tūkst. kWh per metus, tai sudaro tik apie 1,53 % 0° kampu orientuoto „U“ formos pastato modelio metinių elektros energijos sąnaudų. Tai rodo, jog šiame tyrime orientacija nebuvo reikšmingas įtakos veiksnys energijos sąnaudų dydžiui.

17 paveiksle pateikiama grafinė medžiaga neatskleidžia ir apčiuopiamos tiesioginės pastato formos įtakos eksploatacinėms energijos sąnaudoms. „I“ ir „L“ formų pastatų energiniai modeliai suvartojo labai panašų tiek šiluminės, tiek ir elektros energijos kiekį metų bėgyje. Tarpusavyje lyginant „I“ ir „L“ formos modelius, pastebima, jog vidutinių metinių šiluminės ir elektros energijos sąnaudų skirtumai buvo atitinkamai 1,4 ir 1,1 tūkst. kWh. Savo ruožtu, tarpusavyje lyginant realaus pastato, kuris savo konfiguracija iš dalies primena „I“ forma, bei „I“ formos pastato modelių vidutinės energijos sąnaudas, šie skirtumai atitinkamai buvo 50,2 ir 1,3 tūkst. kWh. Nors skirtumas tarp vidutinių elektros sąnaudų ir yra sąlyginai nežymus, tačiau skirtumas tarp panašios formos pastatų modelių šiluminės energijos vidutinio suvartojimo yra ženklus. Kita vertus, „U“ formos modelio, kuris savo forma skiriasi nuo kitų tyrimo objektų, metinės vidutinės šiluminės energijos sąnaudos buvo 16,8 tūkst. kWh mažesnės nei realaus pastato modelio ir 33,4 tūkst. kWh didesnės nei „I“ formos modelio. Tai parodo, jog panašių formų modelių šiluminės energijos sąnaudos skyrėsi tiek, kad į šį skirtumo intervalą pateko ir iš esmės skirtingos formos modelio energijos sąnaudų dydis. Lyginant energinių modelių vidutinį elektros energijos suvartojimą pagal pastatų formą, galima pastebėti, jog mažiausias vidutinės elektros sąnaudas pasiekia „U“ formos pastato modelis – 195,4 tūkst. kWh per metus, o didžiausias – realaus pastato formos modelis – 199,0 tūkst. kWh per metus. Šis skirtumas, lyginant su šiluminės energijos sąnaudų skirtumais yra nežymus. Todėl galima manyti, jog šiame tyrime nagrinėjamų pastatų modelių fundamentali forma neturi arba turi labai ribotą įtaką jų energijos sąnaudoms.

9 lentelėje pateikiami duomenys rodo, jog didžiausias ir mažiausias anglies dvideginio emisijas sugeneravo modeliai pasiekę atitinkamai didžiausias ir mažiausias šiluminės energijos sąnaudas (visų modelių elektros energijos sąnaudos buvo ganėtinai panašios). Maksimalios susidariusios CO₂ emisijos buvo 115,3 tonų, o minimalios – 108,1 tonų, visų modelių CO₂ emisijų vidurkis siekė 110,4 tonų. Skirtumas tarp taršiausio ir „švariausio“ modelio buvo 7,2 tonų per metus, tai sudaro 6,52 % visų modelių CO₂ emisijų vidurkio. Tyrimo modelių metinių anglies dvideginio emisijų diagrama pateikiama 19 paveiksle.

19 paveiksle pateikiama diagrama vizualiai primena 17 paveiksle pateikiamą metinių šiluminės energijos sąnaudų diagramą, tačiau pastebima, jog modelių CO₂ emisijų skirtumai buvo mažesni, nei šiluminės energijos sąnaudų. Tai galima paaiškinti skirtumu tarp šilumos tinklų bei elektros energijų CO₂ emisijų faktorių. Elektros energija, remiantis reglamente [26] nustatytu elektros įvairių gamybos būdų vidurkio CO₂ emisijų faktoriumi, yra daugiau nei 5 kartus taršesnis energijos šaltinis. Esminį skirtumą tarp modelių metinių energijos sąnaudų sudaro būtent šildymas, todėl tai vizualiai atsispindi ir 17 ir 19 paveiksluose vaizduojamose diagramose, visgi skirtumai tarp CO₂ emisijų yra mažesni nei

tarp šiluminės energijos sąnaudų dėl taršesnės elektros energijos dedamosios. Tai taip pat leidžia daryti išvadą, jog pastato fundamentali forma neturi reikšmingos įtakos pastatų eksploatacinėms CO₂ emisijoms kaip ir energijos suvartojimui.

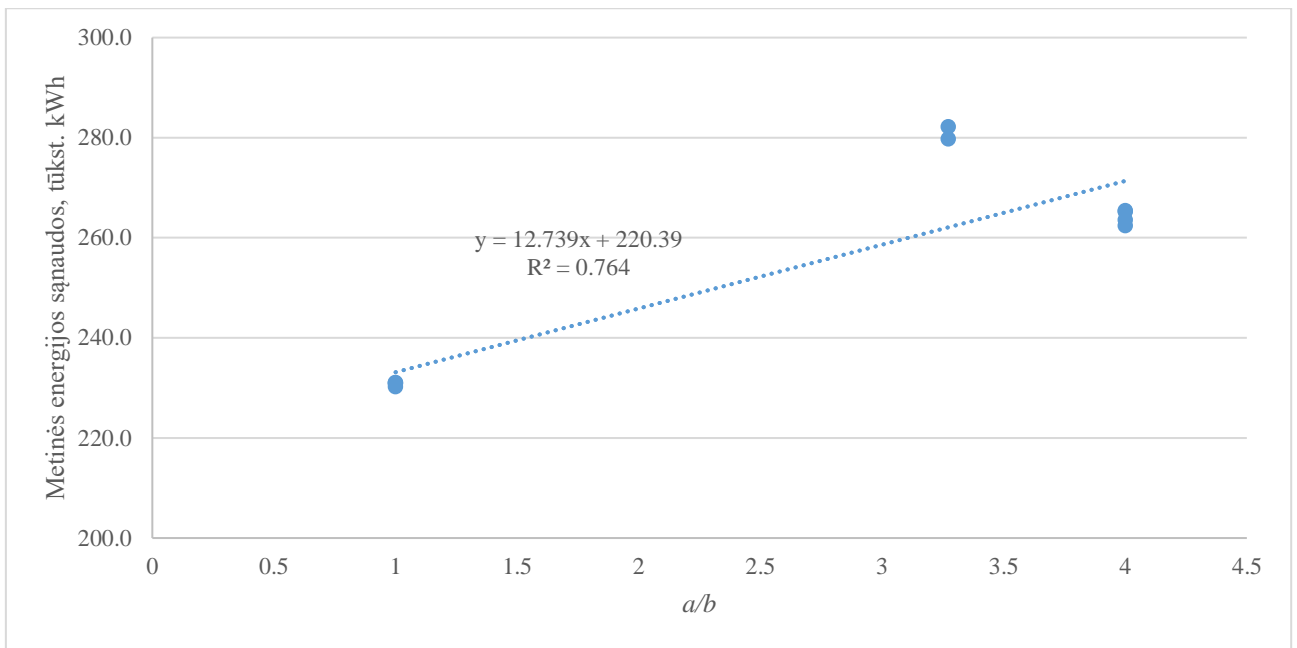


19 pav. Tyrimo modelių metinės CO₂ emisijos

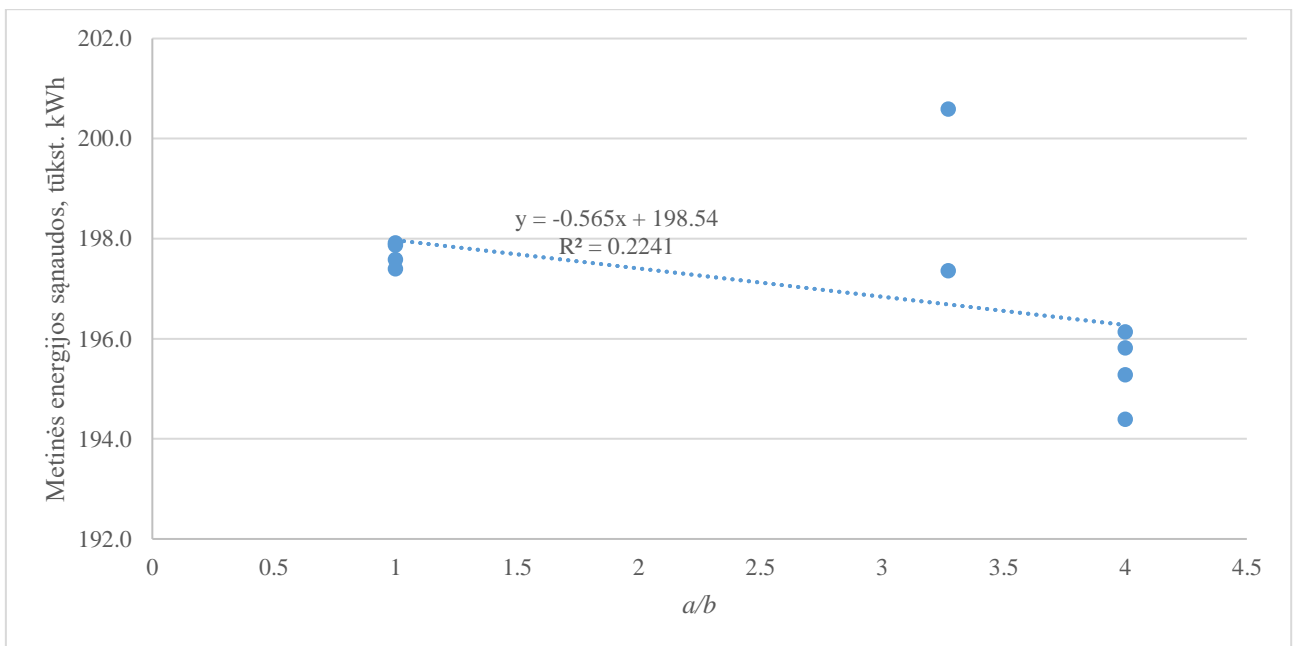
3.3. Tyrimo hipotezių vertinimas

Šešėliuojančio ir šešėliuojamo fasadų ilgių santykį a/b , kaip ir pradinio tyrimo metu, buvo įmanoma nustatyti „L“ ir „U“ formos pastatų modeliams bei realaus pastato formos modeliui. Tiek „L“, tiek ir „U“ formos pastatų modeliams savišėliavimo efektas susidarė dėl stačiais kampais susijungiančių pastato korpusų, o realaus pastato modeliu atveju – dėl besiskiriančio korpusus jungiančių cirkuliacinių erdvių pločio.

Tyrimo realaus pastato ir jo menamų alternatyvų atveju, rezultatai, lygiai taip pat kaip ir pradiniam tyrimo, rodo, jog šešėliuojančio ir šešėliuojamo fasadų ilgių santykio sąryšis su absoliutinėmis energijos sąnaudų vertėmis yra silpnas. 20 paveiksle vaizduojama tyrimo apskaičiuotas metinės šiluminės energijos sąnaudas ir a/b rodiklį siejančios tiesinės priklausomybės funkcija, kurios koreliacijos koeficiento kvadrato vertė yra 0,764. Toks įvertis iš sąlyginai yra neblogas, tačiau tyrimo objektų bei rezultatų imtis yra nedidelė. Dėl to yra tikėtina, jog šios tiesės funkcija gali kardinaliai pakisti, atlikus skaičiavimus platesniam spektrui tyrimo objektų. Tai atsispindi ir rezultatų išsidėstyme pagal a/b rodiklį, iš 20 paveikslo matoma, jog realios ($a/b = 3,273$) ir „U“ ($a/b = 4,000$) formų pastatų alternatyvų modelių šiluminės energijos sąnaudų rezultatai vizualiai nėra vienoje tiesėje. 21 paveiksle pateikiamas analogiškas grafikas, vaizduojantis elektros sąnaudų sąryšį su a/b rodikliu. Šiuo atveju tiesinės funkcijos pasitikėjimo koeficiento kvadrato vertė yra 0,224. Nedidelę koreliaciją tarp elektros energijos sąnaudų ir šešėliuojančio bei šešėliuojamo fasadų ilgių santykio lemia rezultatų sklaida, vizualiai panaši į nustatytąją šiluminės energijos įverčiams. Dėl to galima daryti išvadą, kad metinių energijos sąnaudų priklausomybė nuo a/b rodiklio yra maža, arba išvis neegzistuoja.



20 pav. Tyrimo modelių šiluminės energijos sąnaudų priklausomybės nuo a/b rodiklio grafikas

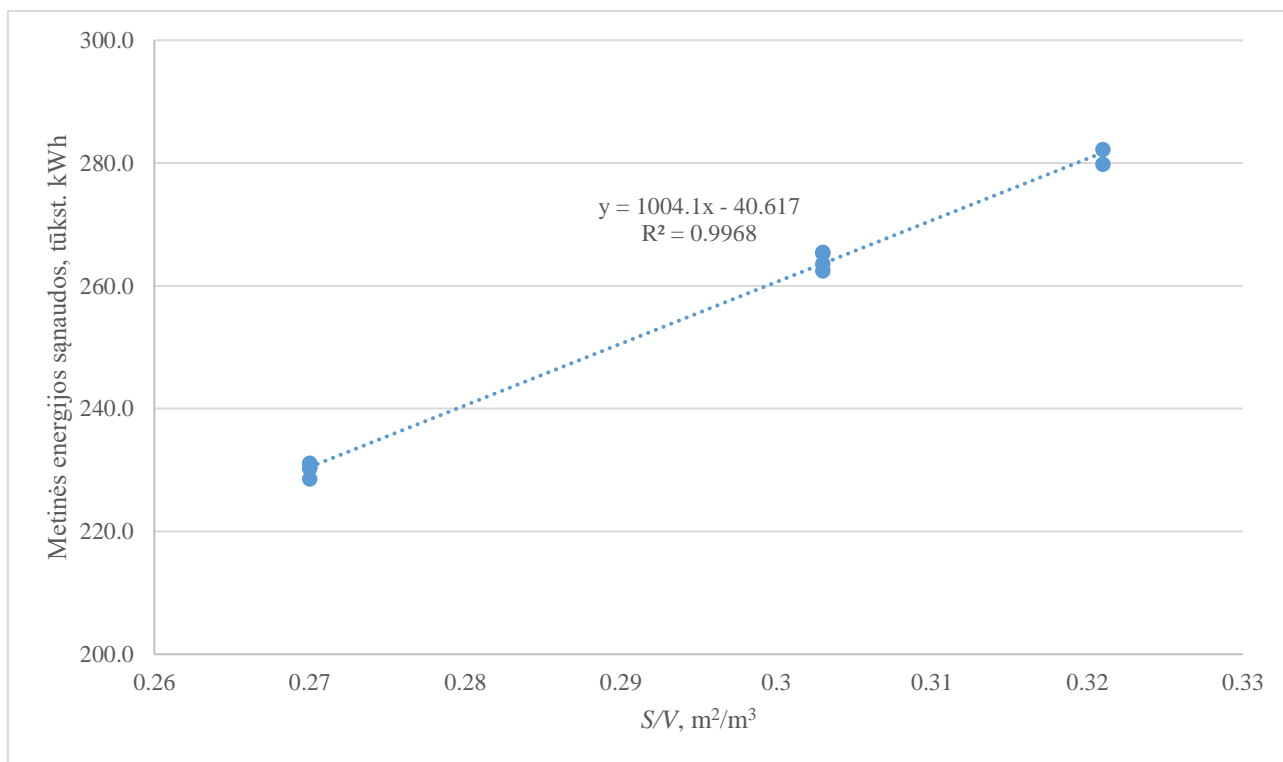


21 pav. Tyrimo modelių elektros energijos sąnaudų priklausomybės nuo a/b rodiklio grafikas

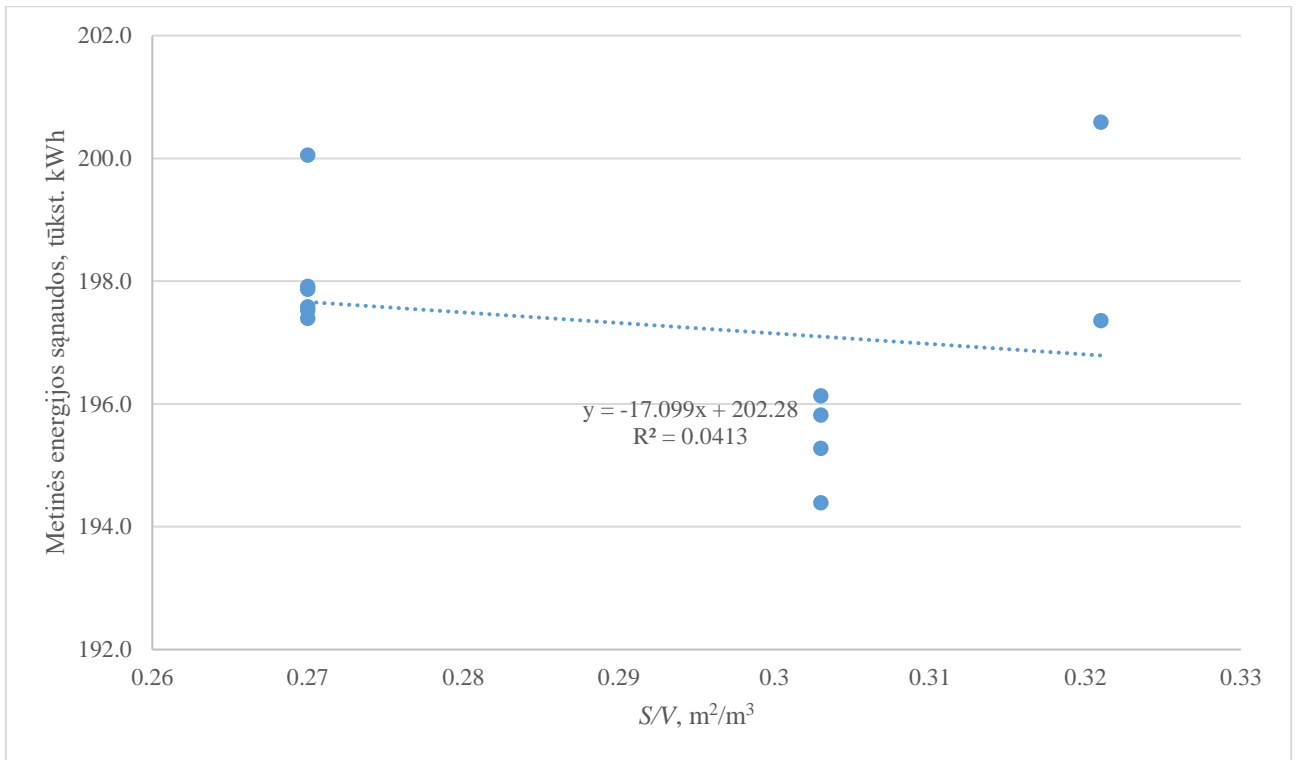
Pastebima orientacijos įtaka realaus pastato atveju tyrime yra sąlyginai nedidelė. Nustatyti skirtumai tarp metinių šiluminės energijos sąnaudų realaus pastato ir „I“, „L“ bei „U“ formos menamų alternatyvų modelių rezultatuose atitinkamai buvo 2,4, 1,8, 0,8 ir 3,0 tūkst. kWh per metus. Šie skirtumai visų pastatų modelių atveju, išskyrus „I“ formos alternatyvą, sudarė tarp 0,35 % ir 1,14 % vidutinių šiluminės energijos sąnaudų kiekvieno modelio atveju. Skirtumai tarp elektros energijos sąnaudų realaus pastato ir „I“, „L“ bei „U“ formos modeliams atitinkamai buvo 3,2, 2,5, 0,5 ir 1,7 tūkst. kWh per metus, šie skirtumai sudarė tarp 0,25 % ir 1,61 % vidutinių elektros energijos sąnaudų kiekvieno modelio atveju. Toks rezultatas stipriai skiriasi nuo pradinio tyrimo, kurio metu pastato orientacija lėmė daugiau nei 20 % energijos poreikio skirtumą tarp energiškai neefektyviausio ir optimaliausio modelio lyginant su to paties modelio vidutinėmis energijos sąnaudomis.

Magistro baigiamojo projekto tyrime, kitaip nei pradiname, kiekviena pastato forma turėjo tik vieną variaciją, o tai neleidžia įvertinti sąryšio tarp šešėliuojančio ir šešėliuojamo fasadų ilgių santykio bei pastato orientacijos atskiroms pastatų formoms. Kita vertus, galima pastebėti, jog „L“ formos pastato modelio, kurio a/b rodiklis buvo 1,00, energijos sunaudojimui orientacija turėjo mažiausiai įtakos. Didžiausias nustatytas skirtumas tarp skirtingai orientuotų „L“ formos modelių atitinkamai sudarė tik 0,35 % ir 0,25 % šių modelių šiluminės ir elektros energijos sąnaudų vidurkio.

Išorinių atitvarų ploto ir vidaus tūrio santykis yra laikomas sąlyginai patikimu rodikliu energijos sąnaudų palyginimui tarp skirtingų matmenų pastatų vėsiamame klimate [8, 17]. Šio tyrimo rezultatai rodo panašią tendenciją, 22 paveiksle pavaizduota metinių šiluminės energijos sąnaudų priklausomybės nuo S/V rodiklio tiesinė priklausomybė gali būti išreikiama funkcija, kurios koreliacijos koeficiento kvadrato vertė yra beveik 1,00. Tai tik parodo, jog išorinių atitvarų plotas ir šildomas tūris yra esminę įtaką pastato šildymo poreikiui turintys veiksniai. Kita vertus, iš 23 paveiksle pateikiamo metinių elektros energijos sąnaudų sąryšio su S/V rodikliu grafiko galima teigti, jog šis rodiklis itin silpnai koreliuoja su elektros energijos sąnaudomis. 23 paveiksle vaizduojamos priklausomybės tiesės funkcijos koreliacijos koeficiento kvadrato vertė yra tik 0,041. Tai rodo, jog šis rodiklis gali būti taikomas tik šiluminės energijos sąnaudų įvertinimui šio tyrimo rėmuose.



22 pav. Tyrimo modelių šiluminės energijos sąnaudų priklausomybė nuo S/V rodiklio



23 pav. Tyrimo modelių suminių energijos sąnaudų priklausomybės nuo S/V rodiklio grafikas

4. Diskusija

Šiame magistro baigiamajame projekte atliktas tyrimas nagrinėjo 4 skirtingų formų pastatų kompaktiškumo rodiklių sąryšį su eksploatacinėmis energijos sąnaudomis. Tyrimu buvo siekiama patikrinti pradiname tyrime išsikeltų hipotezių pagrįstumą realaus pastato atveju. Kaip prielaidos buvo vertinamos šešėliuojančio ir šešėliuojamo fasadų ilgių santykio, pastato orientavimo bei išorinių atitvarų ploto ir vidinio pastato tūrio santykio daromos įtakos pastato energijos sąnaudoms.

Dar vienas tikslas, kurio siekė šis tyrimas, buvo palyginti pradinio ir realaus pastato atveju atliktų tyrimų rezultatus. Šie du tyrimai skyrėsi objektų detalizavimo lygiu. Pradiname tyrime buvo nagrinėjami ankstyvoje projekto stadijoje suformuoti pastatai, kiekvienas aukštas sudarė atskirą zoną, skaidrios atitvaros kiekviename fasade sudarė fiksuotą dalį visos sienos bei neturėjo jokių priskirtų šešėliavimo objektų. Taip pat pradinio tyrimo modeliai neturėjo vidinių šilumos išsiskyrimų dėl žmonių metabolizmo, įrangos bei apšvietimo veikimo, reguliuojamo pagal žmonių darbo grafiką, be to, nebuvo numatyta vėdinimo sistema su tiekiamo oro temperatūrinio režimo nustatymu. Vertinama buvo ne realūs energijos suvartojimai (išskyrus apšvietimą), o energijos poreikiai padengti šilumos nuostolius arba atvėsinti patalpą iki reikiamos temperatūros. Savo ruožtu magistro baigiamojo projekto tyrimas nagrinėjo jau esamo pastato energijos suvartojimo ypatumus, o energiniuose modeliuose buvo suprojektuoti visi minėtieji realaus pastato eksploataciją atspindintys veiksniai bei elementai.

Skirtingus pastato gyvavimo ciklo etapus atitinkantys tyrimo objektai turėjo ir kitų esminių skirtumų. Vienas iš jų buvo įstiklintos atitvaros, pradiname tyrime pasirinktas 70 % skaidrių atitvarų ir fasado ploto santykis, nagrinėjamo pastato atveju buvo mažesnis – 57,2 %. Remiantis projektine informacija bei tyrimo metodologija, šiame tyrime visuminės saulės energijos praleisties koeficientas buvo pasirinktas 0,38, kai pradiname tyrime jis buvo 0,5, o papildomos pagal saulės energijos srautą valdomos vidinės žaliuzės šį koeficientą realaus pastato modelio langams dar sumažino. Toks neatitikimas neleidžia pakankamai patikimai nustatyti skirtumų, tarp skirtingo detalumo lygio energinių modelių skaičiavimų rezultatų. Taip pat, nagrinėjamo administracinio pastato (kaip ir jo menamų alternatyvų) išorinių atitvarų ribojamų grunto sluoksniu plotas skyrėsi nuo pradiname tyrime nagrinėjamų objektų. Šiame tyrime pastatų modelių pagrindinis administracinis tūris ribojosi su išorės oru, kai pradiname tyrime visas pirmo aukšto (t.y. pirmos administracinės zonos) plotas turėjo sąlytį su gruntu. Grunto bei išorės oro temperatūros metų laikotarpyje skiriasi, žemės sluoksnyje šios temperatūros yra aukštesnės nei išorės oro temperatūra šaltuoju metų laiku ir žemesnės nei šaltuoju. Todėl šio tyrimo energiniai modeliai turėjo didesnę atitvarų, besiribojančių su nepalankesne terpe plotą, o tai turėjo įtakos šildymo bei vėsinimo energijos sąnaudoms.

Tyrimo metu sukurtas realaus pastato energinis modelis, net ir įvertinantis prieš tai minėtus energijos sąnaudoms įtaką turinčius aspektus, nebuvo pilnavertis realaus pastato energijos vartojimo ypatumus imituojantis dvynys. Energinio modelio tipinių meteorologinių metų energijos sąnaudų neatitikimas realiosioms siekė beveik 12 %. Šiai paklaidai įtakos galėjo turėti pačio modelio ir jį sudarančių šildymo, vėdinimo ir vėsinimo sistemų supaprastinimas, tačiau, kaip pastebi mokslininkai [37, 38], tikėtina, jog esminė įtaką turėjo žmonių elgesys ir su juo susiję pastato eksploataavimo procesai. Kita vertus, šiame tyrime nebuvo siekiama sukalibruoti energinio modelio pagal paplitusius standartus [30, 34], tikslas buvo sukurti modelį, galinti atkartoti realaus pastato energijos vartojimo ypatumus, ir rezultatų neatitikimas šiuo atveju nėra esminis.

Ribotas menamų realaus pastato alternatyvų kiekis, kurių modelių sukūrimui didžiausią įtaką turėjo riboti laiko išteklių neleidė išnagrinėti tokio pat pločio tyrimo objektų spektro lyginant su pradiniu tyrimu. Šis apribojimas pats iš savęs patvirtina vieną iš pamatinių laiko poreikių pastato formos kompaktiškumo rodiklio identifikavimui. Imlus laikui modelio kūrimo procesas energinių modeliavimą paverčia sunkiai pritaikomu įrankiu pastato energijos suvartojimo charakteristikų nustatymui ankstyvosiose projektų stadijose.

Net ir disponuojant ribotu duomenų kiekiu, dinaminių energinių skaičiavimų rezultatai parodė, jog realaus pastato ir jo menamų alternatyvų atveju pastato fundamentali forma neturėjo aiškiai išreikštos įtakos modelių energijos sąnaudoms. Kitaip nei pradiniam tyrimo, magistro baigiamojo tyrimo metu nebuvo aptikta pastebimos šešėliuojančio ir šešėliuojamo fasadų ilgių santykio ir orientacijos įtakos pastato energijos sąnaudų bei jų dedamųjų dydžiams. Tačiau šių dviejų veiksnių įtakos sumažėjimas lyginant su pradiniu tyrimu gali būti paaiškinamas sumažėjusiu skaidrių atitvarų ir fasado plotų santykiu bei langų visuminės saulės energijos praleisties koeficientu, kuris taip pat buvo dar mažinamas sumodeliavus vidines žaliuzes. Kaip pastebi Caroline Hachem ir kt. [12], didinant a/b rodiklį galima pasiekti net iki 53 % fasadui tenkančios saulės spinduliuotės kiekio sumažėjimą. Visgi, juo mažiau saulės spinduliuotės praleidžia stiklo paketas, tuo mažesnę įtaką pastato energijos sąnaudoms turės ir fasadams tenkantis saulės spinduliuotės kiekis. Tai leidžia manyti, kad stiklo paketai su žemomis visuminės saulės energijos praleisties koeficiento vertėmis gali sumažinti saulės spinduliuotės įtaką pastato formos ar orientacijos pokyčiams.

Tiek pradinis, tiek ir magistro baigiamojo projekto tyrimas parodė tiesioginę išorinių atitvarų ploto santykio su vidiniu pastato tūriu įtaką energijos sąnaudoms. Šiluminės energijos sąnaudas ir S/V rodiklio sąryšį nusakančios tiesinės funkcijos koreliacijos koeficiento kvadrato vertė buvo apytiksiai 1,0. Visgi koreliacija tarp šio rodiklio ir tyrimo objektų elektros energijos sąnaudų buvo itin maža net ir esant ribotai rezultatų imčiai. Šiame tyrimo išorinių atitvarų ploto bei tūrio santykis nebuvo tinkamas rodiklis pastato vėsinimo ir apšvietimo energijos sąnaudų įvertinimui. Tokia tendencija pastebima ir P. Depecker'io ir kt. [17] bei M. Premrov'o ir kt. [8] tyrimuose, t.y. šiltesnio klimato vietovėse, kur vėsinimo poreikis yra didesnis, S/V rodiklio koreliacija su šildymo energijos sąnaudomis buvo pastebimai mažesnė nei vėsaus klimato vietovėse. Šio tyrimo metu orientacijos veiksnys neturėjo pastebimos įtakos energijos sąnaudoms dėl prieš tai paminėtų priežasčių. Tyrimas taip pat parodo ir šio rodiklio silpną vietą, tai pastato fundamentalios formos nustatymas. Sukurti „I“ ir „L“ formos modeliai turėjo praktiškai identišką S/V rodiklį, kuris buvo lygus 0,27, tačiau nors ir pastato formos vizualiai skyrėsi iš esmės, energijos sąnaudos buvo apylygės. Be to, vizualiai panašių formų realaus pastato ($S/V = 0,321$) ir „I“ formos modeliai, energinių skaičiavimų metu parodė pastebimai skirtingus šiluminės energijos sąnaudų rezultatus. Dėl to galima teigti, jog išorinių atitvarų ploto bei vidinio pastato tūrio santykis yra geras pastato kompaktiškumo rodiklis pastato šiluminės energijos sąnaudų palyginimui Lietuvos klimato, ypatingai kai skaidrių atitvarų atitvaros praleidžia nedidelę dalį saulės energijos.

Šiame tyrimo buvo atsižvelgiama ir į energijos sąnaudų įtaką aplinkai. Remiantis Lietuvoje reglamentuotais CO₂ emisijų faktoriais buvo įvertintas pastatų modelių eksploatacinis anglies pėdsakas. Atsižvelgiant į tai, jog CO₂ emisijų faktorius yra daugiklis, CO₂ emisijos koreliavo su energijos suvartojimais. Kita vertus skirtumai tarp modelių ir jų variacijų skyrėsi, kadangi šildymo energijos CO₂ faktorius buvo daugiau nei 5 kartus mažesnis nei elektros energijos, o šildymo energijos sąnaudos turėjo didžiausią įtaką suminių energijos sąnaudų skirtumams tarp modelių. Tai lemia, jog S/V rodiklis, šio tyrimo ribose, gali geriausiai nustatyti CO₂ emisijas. Visgi, kitokių šilumos

bei elektros energijos šaltinių pasirinkimas galėtų lemti kardinaliai kitokias pastatų CO₂ emisijas, tai yra nustatyta ir tyrimais [32]. Todėl CO₂ emisijų lyginimo pagal pastatų formas galimybes riboja jų energijos šaltinių tipai, tačiau tai gali būti įrankis konkretaus objekto atvejų CO₂ emisijų prognozavimui ir lyginimui.

Reikia pažymėti, jog visi tyrimo objektai pasižymėjo vienodomis skaidrių atitvarų ir fasadų ploto santykio bei visuminės saulės energijos praleisties koeficientų vertėmis, todėl tyrime nustatyti rezultatai yra aktualūs tik pastatams, pasižymintiems analogiškais skaidrių atitvarų savybėmis. Tai neleidžia plačiai įvertinti pastato formos kompaktiškumo sąryšio su energijos sąnaudomis, tačiau šis tyrimas gali būti pagrindu tolimesniems pastato formos kompaktiškumo tyrimams. Tyrimų objektų imties ribotumas, susidaręs dėl neautomatizuoto energinių modelių kūrimo, lėmė sąlyginai mažą rezultatų imtį, tai neleido visavertiškai įvertinti analizuojamų kompaktiškumo rodiklių sąsajų su energijos sąnaudomis. Todėl tolimesnių tyrimų metodologijos turėtų įtraukti automatizuotą energinių modelių sudarymo procesą. Tai leistų sukurti didesnę kiekį skirtingų matmenų pastato formų, taip pat tyrimuose būtų galima įvertinti platesnį spektrą pastato atitvarų požymių (pvz.: šilumos perdavimo koeficientas, visuminės saulės energijos praleisties koeficientas, šešėliavimo sprendimai, skaidrių atitvarų bei fasado plotų santykis ir kt.) ir išnagrinėti pastato formos kompaktiškumo rodiklių universalumą. Energinių modelio kūrimo proceso automatizavimas nėra nauja technologija, optimizavimo bei mašininio mokymosi algoritmai pritaikyti ir dalyje šiame darbe apžvelgtų tyrimų. Šios technologijos pritaikymas reikalauja gilaus energinio modeliavimo programinės įrangos supratimo bei atitinkamų programavimo žinių.

Išvados

1. Mokslinės literatūros analizė parodė, jog pastato formos kompaktiškumo tyrimai buvo atliekami jau prieš kelis dešimtmečius, tačiau jų apimtis skirtingoms klimato zonoms nėra pakankama. Literatūroje sutinkami pastato formos kompaktiškumui ir energijos sąnaudų sąryšiui pagrindinę įtaką darantys veiksniai – išorinių atitvarų bei įstiklinimo plotai, taip pat šešėliavimo sprendimai. Matematinų modelių vystymas, dinaminiai energiniai skaičiavimai bei optimizavimo algoritmų pritaikymas juose yra plačiausiai paplitusios pastato formos kompaktiškumo rodiklių tyrimų kryptys bei įrankiai.
2. Remiantis literatūros analize, nustatyti pastato kompaktiškumą apibūdinantys rodikliai: išorinių atitvarų ploto ir tūrio bei fasadų ilgio ir pločio santykis gretasienio formos pastatams bei šešėliuojančio ir šešėliuojamo fasado ilgių santykiai.
3. Pradiniam tyrimui nustatyta, jog šešėliuojančio ir šešėliuojamo fasadų ilgių santykis daro neženklų poveikį pastato energijos sąnaudoms, kita vertus šio santykio vertei artėjant į 1, energijos sąnaudų pokytis dėl orientacijos ženkliai sumažėjo. Pastato orientacija turėjo pastebimą įtaką pastatų modelių energijos sąnaudoms, didžiausias energijos poreikio skirtumas tos pačios formos modeliui buvo 27,6 tūkst. kWh per metus, tai sudarė beveik 23 % modelio vidutinio suminio metinio energijos poreikio.
4. Pradinis tyrimas parodė, jog „I“, „L“ ir „U“ formos pastatų energijos sąnaudos pastebimai skiriasi. Šis skirtumas įvertintas santykinu koeficientu, kurio vidurkiai ir standartiniai nuokrypiai kiekvienai iš pastato formų buvo: „I“ – $f_{vid} = 1,11$, $\sigma = 0,116$, „L“ – $f_{vid} = 1,29$, $\sigma = 0,047$ ir „U“ – $f_{vid} = 1,72$, $\sigma = 0,034$.
5. Sukurtas realaus administracinio pastato Kauno mieste energinis modelis, remiantis projektiniais sprendimais, supaprastintais dėl ribotų skaičiuojamųjų pajėgumų ir laiko resursų. Pastato energinio modelio visų energijos sąnaudų skaičiavimo rezultatai už realias energijos sąnaudas 2021 metų laikotarpiu buvo mažesni 11,76 %. Energinio modelio šildymo energijos sąnaudų skaičiavimo rezultatai buvo 23,7 % mažesni, o elektros energijos sąnaudų vėsinimui bei apšvietimui skaičiavimo rezultatai atitinkamai 11,3 % ir 15,9 % didesni nei realaus pastato.
6. Atliktas pastato formos kompaktiškumo sąryšio su energijos sąnaudomis tyrimas realaus pastato bei suformuotų jo „I“, „L“ ir „U“ formų menamų alternatyvų modeliams IDA-ICE energinių skaičiavimų programine įranga. Didžiausios metinės šiluminės bei elektros energijos sąnaudos nustatytos realaus pastato formos modeliui, kurio orientacija buvo 0°, energijos sąnaudos atitinkamai buvo 282,2 ir 200,6 tūkst. kWh. Mažiausios metinės šiluminės energijos sąnaudos buvo nustatytos „I“ formos menamos alternatyvos atveju, kai modelis buvo orientuotas 90°, šiluminės energijos sąnaudos buvo 228,5 tūkst. kWh. Mažiausios metinės elektros energijos sąnaudos nustatytos „U“ formos pastato modeliui, kurio orientacija buvo 270°, jos sudarė 194,4 tūkst. kWh.
7. Tyrimo rezultatai rodo, jog skirtumas tarp maksimalių ir minimalių šio tyrimo objektų metinių elektros energijos sąnaudų buvo 6,2 tūkst. kWh. Vertinant šiluminę energiją, šis skirtumas buvo 53,7 tūkst. kWh. Todėl galima teigti, jog pagrindinį skirtumą tarp alternatyvių formų pastatų modelių energijos vartojimo ypatumų sudarė pastato šildymo sistemos energijos sąnaudos.
8. Tyrimo metu apskaičiuotos kiekvienos modelio modeliuotos alternatyvos energijos sąnaudų CO₂ emisijos. Didžiausios CO₂ emisijos nustatytos realaus pastato formos modelio, kurio orientacija buvo 0°, atveju ir jos sudarė 115,3 tonų CO₂ per metus. Mažiausios CO₂ emisijos nustatytos „I“ formos menamos alternatyvos atveju, kai pastato modelis buvo orientuotas 90° ir jos sudarė 108,1 tonų CO₂ per metus. Nepaisant skirtingų šiluminės ir elektros energijų CO₂ emisijų faktorių

verčių, daugiausiai CO₂ emisijų sugeneravo pastato modelis, kurio šiluminės energijos suvartojimas buvo didžiausias. Savo ruožtu, modelis, kurio šiluminės energijos sąnaudos buvo mažiausios, buvo „švariausias“ – apskaičiuotos mažiausios CO₂ emisijos.

9. Tyrimas realaus pastato atveju parodė, jog energijos sąnaudų rezultatai buvo tiesiškai priklausomi nuo išorinių atitvarų ploto bei vidinio tūrio santykio. Kita vertus, nebuvo nustatyta reikšmingos šešėliuojančio ir šešėliuojamo fasadų ilgių santykio bei orientacijos įtakos alternatyvių pastatų modelių energijos sąnaudoms. Visi pastatų modeliai pasižymėjo identiškomis išorinių atitvarų šiluminėmis charakteristikomis, atitinkančiomis A energinio efektyvumo klasės reikalavimus, skaidrių atitvarų ir fasadų plotų santykis buvo 57,2 %, o stiklo paketo visuminės saulės energijos praleisties koeficiento vertė – 0,38.
10. Išsamesniam pastato formos kompaktiškumo rodiklių ir pastato energijos sąnaudų sąryšiui nustatyti reikėtų tęsti analogiškus tyrimus naudojant skirtingų konstrukcinių savybių bei skaidrių atitvarų ir fasadų plotų santykių pastatus.

Literatūros sąrašas

1. GRANADEIRO, Vasco, et al. Building envelope shape design in early stages of the design process: Integrating architectural design systems and energy simulation. *Automation in Construction* [interaktyvus]. 2013, **32**, 196-209 [žiūrėta 2022-06-13]. ISSN 0926-5805. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2012.12.003>
2. CIARDIELLO, Adriana, et al. Multi-objective approach to the optimization of shape and envelope in building energy design. *Applied Energy* [interaktyvus]. 2020, **280**, 115984 [žiūrėta 2022-06-13]. ISSN 0306-2619. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115984>
3. GONZALO, Roberto ir Karl J. Habermann. *Energy-Efficient Architecture: Basics for Planning and Construction* [interaktyvus]. Basel: Birkhäuser, 2006 [žiūrėta 2022-06-13]. ISBN: 9783764372538. Prieiga per: https://vb.ktu.edu/permalink/f/1746fh5/TN_cdi_askewsholts_vlebooks_9783034608626
4. FENG, Guohui, Shuai SHA and Xiaolong XU. Analysis of the building envelope influence to building energy consumption in the cold regions. *Procedia Engineering* [interaktyvus]. 2016, **146**, 244-250 [žiūrėta 2022-11-28]. ISSN 1877-7058. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.382>
5. D'AMICO, Bernardino and Francesco POMPONI. A compactness measure of sustainable building forms. *Royal Society open science* [interaktyvus]. 2019, **6**, 181265 [žiūrėta 2022-06-13]. ISSN 2054-5703. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1098/rsos.181265>
6. ECHENAGUCIA, Tomás Méndez et. al. The early design stage of a building envelope: Multi-objective search through heating, cooling and lighting energy performance analysis. *Applied Energy* [interaktyvus]. 2015, **154**, 577-591 [žiūrėta 2022-06-13]. ISSN 0306-2619. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.090>
7. GRANADEIRO, Vasco, et al. Envelope-related energy demand: A design indicator of energy performance for residential buildings in early design stages. *Energy and Buildings* [interaktyvus]. 2013, **61**, 215-223 [žiūrėta 2022-06-13]. ISSN 0378-7788. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.018>
8. PREMROV, Miroslav, Vesna Žegarac LESKOVAR and Klara MIHALIČ. Influence of the building shape on the energy performance of timberglass buildings in different climatic conditions. *Energy* [interaktyvus]. 2016, **108**, 201-211 [žiūrėta 2022-06-13]. ISSN 0360-5442. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.027>
9. WEI, Lai, et al. Effects of Building Form on Energy Use for Buildings in Cold Climate Regions. *Procedia Engineering* [interaktyvus]. 2016, **146**, 182-189 [žiūrėta 2022-06-13]. ISSN 1877-7058. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.370>
10. AKSOY, U. Teoman and Mustafa INALLI. Impacts of some building passive design parameters on heating demand for a cold region. *Building and Environment* [interaktyvus]. 2006, **41**, 1742-1754 [žiūrėta 2022-06-13]. ISSN 0360-1323. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.011>
11. CHEN, Kian Wee, Patrick JANSSEN and Arno SCHLUETER. Multi-objective optimisation of building form, envelope and cooling system for improved building energy performance. *Automation in Construction* [interaktyvus]. 2018, **94**, 449-457 [žiūrėta 2022-06-13]. ISSN 0926-5805. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.07.002>
12. ROSLAN, Nurul Hidayah and Mohd Rodzi ISMAIL. Influence of building shapes on thermal and energy performances in glass façade high-rise buildings: A review. *MATEC Web of*

- Conferences* [interaktyvus]. 2018, **250**, 6006 [žiūrėta 2022-06-13]. ISSN 2261-236X. Prieiga per: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201825006006>
13. HACHEM, Caroline, Andreas ATHIENITIS and Paul FAZIO. Parametric investigation of geometric form effects on solar potential of housing units. *Solar Energy* [interaktyvus]. 2011, **85**, 1864-1877 [žiūrėta 2022-06-13]. ISSN 0038-092X. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.04.027>
 14. NEGENDAHL, Kristoffer and Toke Rammer NIELSEN. Building energy optimization in the early design stages: A simplified method. *Energy and Buildings* [interaktyvus]. 2015, **105**, 88-99 [žiūrėta 2022-06-13]. ISSN 0378-7788. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.087>
 15. FANG, Yuan and Soolyeon CHO. Design optimization of building geometry and fenestration for daylighting and energy performance. *Solar Energy* [interaktyvus]. 2019, **191**, 7-18 [žiūrėta 2022-06-13]. ISSN 0038-092X. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.08.039>
 16. LIM, Hong Soo and Gon KIM. Analysis of Energy Performance on Envelope Ratio Exposed to the Outdoor. *Advances in civil engineering* [interaktyvus]. 2018, **2018**, 1-10 [žiūrėta 2022-06-13]. ISSN 1687-8086. Prieiga per: <https://doi.org/10.1155/2018/7483619>
 17. DEPECKER, P., et al. Design of buildings shape and energetic consumption. *Building and Environment* [interaktyvus]. 2001, **36**, 627-635 [žiūrėta 2022-06-13]. ISSN 0360-1323. Prieiga per: [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(00\)00044-5](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00044-5)
 18. BEKKOUCHE, S. M. A., et al. Influence of the compactness index to increase the internal temperature of a building in Saharan climate. *Energy and Buildings* [interaktyvus]. 2013, **66**, 678-687 [žiūrėta 2022-06-13]. ISSN 0378-7788. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.077>
 19. GERALDI, Matheus Soares, et al. Evaluating the impact of the shape of school reference buildings on bottom-up energy benchmarking. *Journal of Building Engineering* [interaktyvus]. 2021, **43**, 103142 [žiūrėta 2022-06-13]. ISSN 2352-7102. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103142>
 20. GOIA, Francesco. Search for the optimal window-to-wall ratio in office buildings in different European climates and the implications on total energy saving potential. *Solar Energy* [interaktyvus]. 2016, **132**, 467-492 [žiūrėta 2022-06-13]. ISSN 0038-092X. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.031>
 21. TROUP, Luke, et al. Effect of window-to-wall ratio on measured energy consumption in US office buildings. *Energy & Buildings* [interaktyvus]. 2019, **203**, 109434 [žiūrėta 2022-06-13]. ISSN 0378-7788. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109434>
 22. PEEL, M. C., B. L. FINLAYSON and T. A. MCMAHON. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and earth system sciences* [interaktyvus]. 2007, **11(5)**, 1633-1644 [žiūrėta 2022-06-13]. ISSN 1027-5606. Prieiga per: <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
 23. EQUA SIMULATION AB. *IDA Indoor Climate and Energy* [žiūrėta 2022-11-28]. Prieiga per: <https://www.equa.se/en/ida-ice>
 24. EQUA SIMULATION AB. *Validation of IDA Indoor Climate and Energy 4.0 Build 4 with Respect to ANSI/ASHRAE Standard 140-2004* [interaktyvus]. 2010 [žiūrėta 2022-11-28]. Prieiga per: <http://www.equaonline.com/iceuser/validation/ASHRAE140-2004.pdf>

25. *PEN sertifikatai*. SSVA [žiūrėta 2022-11-28]. Prieiga per:
[https://www.ssva.lt/registrai/pensreg/pensert_list.php?q=\(PEN~contains~A\)&orderby=dPEN](https://www.ssva.lt/registrai/pensreg/pensert_list.php?q=(PEN~contains~A)&orderby=dPEN)
26. LIETUVOS RESPUBLIKOS APLINKOS MINISTERIJA. STR 2.01.02:2016, *Pastatų energinio naudingumo projektavimas ir sertifikavimas* [interaktyvus]. TAR, 2016-12-01, Nr. 27896 [žiūrėta 2022-11-28]. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/15767120a80711e68987e8320e9a5185/pLxpBVUYOS>
27. LIETUVOS RESPUBLIKOS SVEIKATOS APSAUGOS MINISTERIJA. HN 69:2003, *Šiluminis komfortas ir pakankama šiluminė aplinka darbo patalpose. Parametrų norminės vertės ir matavimo reikalavimai*. Valstybės žinios, 2004-03-26, Nr. 45-1485.
28. LIETUVOS RESPUBLIKOS SVEIKATOS APSAUGOS MINISTERIJA. HN 98:2000, *Natūralus ir dirbtinis darbo vietų apšvietimas. Apšvietos ribinės vertės ir bendrieji matavimo reikalavimai*. Valstybės žinios, 2000-05-31, Nr. 44-1278.
29. SINGH, Manav Mahan, et al. Quick energy prediction and comparison of options at the early design stage. *Advanced Engineering Informatics* [interaktyvus]. 2020, **46**, 101185 [žiūrėta 2022-11-28]. ISSN: 1474-0346. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101185>
30. ASHRAE. ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2019, *Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings* [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2022-11-28]. Prieiga per: https://ashrae.iwrapper.com/ASHRAE_PREVIEW_ONLY_STANDARDS/STD_90.1_2019
31. DOGAN, Timur, Emmanouil SARATSI and Christoph REINHART. The optimization potential of floor-plan typologies in early design energy modeling. *Proceedings of BS2015: 14th Conference of International Building Performance Simulation Association* [interaktyvus]. 2015, 1126-1133 [žiūrėta 2022-11-28]. Prieiga per: <http://hdl.handle.net/1721.1/109221>
32. SCHWARTZ, Yair, Rokia RASLAN and Dejan MUMOVIC. The life cycle carbon footprint of refurbished and new buildings – A systematic review of case studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [interaktyvus]. 2018, **81**, 231-241 [žiūrėta 2022-12-06]. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.061>
33. LIU, Dunnan, Xiaodan GUO and Bowen XIAO. What causes growth of global greenhouse gas emissions? Evidence from 40 countries. *Science of the Total Environment* [interaktyvus]. 2019, **661**, 750-766 [žiūrėta 2022-12-06]. Prieiga per: <http://hdl.handle.net/1721.1/109221>
34. GUCYETER, Basak. Calibration of a Building Energy Performance Simulation Model via Monitoring Data. *2018 Building Performance Analysis Conference and SimBuild co-organized by ASHRAE and IBPSA-USA* [interaktyvus]. 2018, 542-549 [žiūrėta 2022-11-28]. Prieiga per: <https://www.semanticscholar.org/paper/CALIBRATION-OF-A-BUILDING-ENERGY-PERFORMANCE-MODEL-Gucyeter/796c0ce81c487568ab8a7d73032310f4150f82ee>
35. *Prototype Building Models / Building Energy Codes Program*. OFFICE of ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY [žiūrėta 2022-11-28]. Prieiga per: <https://www.energycodes.gov/prototype-building-models>
36. D'OCA, Simona and Tianzhen HONG. Occupancy schedules learning process through a data mining framework. *Energy and Buildings* [interaktyvus]. 2015, **88**, 395-408 [žiūrėta 2022-11-28]. ISSN 0378-7788. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.065>
37. DE WILDE, Pieter. The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation. *Automation in Construction* [interaktyvus]. 2014, **41**, 40-49 [žiūrėta 2022-12-3]. ISSN 0926-5805. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.02.009>

38. GAETANI, Isabella, Pieter-Jan HOES and Jan L. M. HENSEN. Estimating the influence of occupant behavior on building heating and cooling energy in one simulation run. *Applied Energy* [interaktyvus]. 2018, **223**, 159-171 [žiūrėta 2022-12-3]. ISSN 0306-2619. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.108>
39. MOTUZIENĖ, Violeta, et al. Office buildings occupancy analysis and prediction associated with the impact of the COVID-19 pandemic. *Sustainable Cities and Society* [interaktyvus]. 2022, **77**, 103557 [žiūrėta 2022-12-3]. ISSN 2210-6707. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103557>
40. KEYROUZ, Edward. The Impact of Weather File Selection. *Integrated Environmental Solutions* [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2022-12-3]. Prieiga per: <https://www.iesve.com/discoveries/view/29641/impact-of-weather-file-selection>