

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Violeta MOTUZIENĖ

ĮSTIKLINIMO ĮTAKOS VIEŠŪJŲ PASTATŲ
ENERGIJOS POREIKIAMS
KOMPLEKSINĖ ANALIZĖ

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
ENERGETIKA IR TERMOINŽINERIJA (06T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNICA 2010

Disertacija rengta 2005–2010 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

prof. dr. Egidijus Saulius JUODIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas,
technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija – 06T).

<http://leidykla.vgtu.lt>

VG TU leidyklos TECHNIKA 1818-M mokslo literatūros knyga

ISBN 978-9955-28-704-9

© VG TU leidykla TECHNIKA, 2010

© Violeta, Motuzienė, 2010

violeta.svk@gmail.com

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Violeta MOTUZIENĖ

COMPLEX ANALYSIS OF THE INFLUENCE
OF GLAZING ON ENERGY DEMAND
OF PUBLIC BUILDINGS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
ENERGETICS AND POWER ENGINEERING (06T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2010

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2005–2010.

Scientific Supervisor

Prof Dr Egidijus Saulius JUODIS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Energetics and Power Engineering – 06T).

Reziumė

Disertacijoje, taikant dinaminį pastatų energijos poreikių modeliavimą, nagrinėjamos viešosios paskirties pastatų energinio efektyvumo problemos. Pagrindinis tyrimo objektas yra viešosios paskirties pastato fasado įstiklinimo įtaka energijos poreikiams. Greta savo pagrindinės funkcijos – pakankamo natūralaus apšvietimo užtikrinimo, fasado įstiklinimas privalo būti energiškai efektyvus. Tai prieštaringi reikalavimai.

Pagrindinis disertacijos tikslas – įvertinant natūralaus apšvietimo poreikį, kompleksiskai išanalizuoti viešosios paskirties pastato įstiklinimo charakteristikų įtaką pastato mikroklimato ir apšvietimo sistemų energijos poreikiams bei nustatyti, kokioms pastato įstiklinimo charakteristikoms esant, Lietuvoje bei panašaus klimato šalyse pastato energijos poreikius galima būtų sumažinti iki mažai energijos vartojančio pastato lygio. Darbe sprendžiami du pagrindiniai uždaviniai: pirmasis – atliekama įstiklinimo įtakos kondicionuojamo pastato energijos poreikiams analizė; antrasis – nustatomos efektyvios energiškai efektyvaus pastato įstiklinimo charakteristikos.

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, rezultatų apibendrinimas, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai.

Įvadiniamame skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai, pristatomos disertacijos tema paskelbtos autoriaus publikacijos ir pranešimai konferencijose bei disertacijos struktūra.

Pirmajame skyriuje apžvelgiama literatūra, susijusi su fasado įstiklinimu ir jo įtaka pastato energiniam naudingumui bei komfortui. Atlikta su nagrinėjama tema susijusių tyrimų apžvalga, kuri leidžia identifikuoti trūkstamų tyrimų sritį bei patikslinti darbo uždavinius.

Antrajame skyriuje pateikta pastatų energiniam modeliavimui naudojamų metodų bei kompiuterinių programų analizė, siekiant parinkti tinkamiausius. Pasirinkta modeliavimo programa patikrinta empiriniu būdu.

Trečiajame skyriuje aprašomas pastato modelio kūrimas, o ketvirtajame atliekama modeliavimo rezultatų analizė. Remiantis rezultatų analize, nustatomos efektyvios energiniu bei natūralaus apšvietimo požiūriais viešosios paskirties pastato įstiklinimo charakteristikos, sukuriamas mažai energijos vartojančio viešosios paskirties pastato įstiklinimo parinkimo algoritmas.

Disertacijos tema paskelbta 11 straipsnių: vienas – ISI Web of Science ir du – Inspec duomenų bazėse cituojamuose žurnaluose bei 8 straipsniai (vienas iš jų priimtas spaudai) tarptautinių ir respublikinių konferencijų medžiagoje.

Abstract

Applying building energy simulations, the dissertation investigates the issues of energy efficiency of public buildings. The main object of research – influence of the glazing of the public building on its energy demand. Next to its main function to ensure daylighting, glazing must to be energy efficient. So these requirements conflict.

The aim of this dissertation is to perform the complex analysis of the influence of glazing characteristics on the building's microclimate and lighting systems energy demand, taking into account DL demand. Also define, what glazing characteristics in Lithuanian and similar climate countries, are able to decrease buildings energy demand to the level of the low energy building. The paper approaches two major tasks. Task 1 is performance of the detailed analysis of influence of glazing on energy demand of the public building. Task 2 is determination of the efficient glazing characteristics of the energy efficient building.

The dissertation consists of Introduction, 4 chapters, Conclusions, References and list of published works of the author on the topic of dissertation.

The introduction reveals the investigated problem, importance of the thesis and the object of research and describes the purpose and tasks of the paper, research methodology, scientific novelty, the practical significance of results examined in the paper and defended statements. The introduction ends in presenting the author's publications on the subject of the defended dissertation, offering the material of made presentations in conferences and defining the structure of the dissertation.

Chapter 1 revises literature related to the glazing of the facade and its influence both on building's energy performance and comfort. Review of the researches, related to the topic of dissertation enables to identify the gap in the analysed field of research and reconsider the tasks of the work.

Chapter 2 analyses building energy simulation methods and programs, pursuing to choose the most relevant ones. Selected program is tested empirically.

Chapter 3 describes the creation of the building's model and chapter 4 analyses results of the simulations. These results enable to define efficient characteristics of the glazing of the public buildings in the point of view of energy and daylighting. Algorithm for the selection of glazing for the low energy public building is created.

11 articles focusing on the subject of the discussed dissertation are published: one – in the journal quoted by ISI Web of Science data base, two – in journals quoted by Inspec data base and eight (one of them accepted for publishing) – in proceedings of international and national conferences.

Žymėjimai

Santrumpos

ES – Europos Sąjunga;

GCA – gyvavimo ciklo analizė;

ASHRAE – Amerikos šildymo, šaldymo ir oro kondicionavimo inžinierių sąjunga (angl. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*);

IWEC – tarptautiniai klimatiniai duomenys energiniams skaičiavimams (angl. *International Weather for Energy Calculation*);

NAK (DF) – natūralios apšvietos koeficientas (angl. *daylight factor*);

NA (DL) – natūralus apšvietimas (angl. *daylighting*);

DAS – dirbtinio apšvietimo sistema;

PE – pirminė energija (angl. *primary energy*);

SFIP (WWR) – santykinis fasado įstiklinimo plotas (angl. *window-to-wall ratio*).

Simboliai

g – saulės energijos praleisties koeficientas;

τ_l – lango įstiklintos dalies šviesos pralaidumo koeficientas.

Indeksai

E – elektra;

T – šiluma;

PE – pirminė energija;

g – grindų;

L – lango.

Turinys

ĮVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	1
Tyrimų objektas.....	2
Darbo tikslas.....	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai	4
Darbo rezultatų aprobavimas.....	5
Disertacijos struktūra.....	5
1. ĮSTIKLINIMO REIKŠMĖ IR ATLIKTŲ TYRIMŲ APŽVALGA	7
1.1. Reikalavimai pastatų energiniam naudingumui.....	7
1.2. Mažai energijos vartojantis pastatas	9
1.3. Pastato fasado funkcijos ir įtaka energijos poreikiams.....	11
1.3.1. Fasado įstiklinimo įtaka energijos poreikiams.....	13
1.3.2. Įstiklinimo charakteristikų įtaka pastato šilumos balanso dedamosioms....	15
1.3.3. Įstiklinimo vieta pastato gyvavimo cikle	15

1.3.4. Įstiklinimo įtaka komfortui	17
1.3.5. Rekomendacijos fasado įstiklinimo plotui ir orientacijai	18
1.3.6. Natūralus apšvietimo išnaudojimas mažinant energijos poreikius	19
1.4. Administracinio pastato įstiklinimo charakteristikų įtakos energijos poreikiams atliktų tyrimų apžvalga	22
1.5. Pirmojo skyriaus išvados	26
2. PASTATO ENERGIJOS POREIKIŲ NUSTATYMO METODIKOS	29
2.1. Pastato kaip sistemos sprendimas	29
2.2. Pastate vykstantys šiluminiai reiškiniai	31
2.3. Dinaminiai pastatų energijos poreikių modeliavimo metodai	33
2.4. Analitiniai modeliavimo metodai	34
2.4.1. Laiko atsako funkcijos metodas	34
2.4.2. Dažnio atsako funkcijos metodas	35
2.5. Skaitiniai metodai	36
2.5.1. Baigtinių skirtumų metodas	36
2.5.2. Baigtinių tūrių metodas	37
2.5.3. Baigtinių elementų metodas	37
2.6. Metodų palyginimas	37
2.7. Kompiuterinio modeliavimo programos parinkimas	38
2.8. Šilumos balanso sprendimas EnergyPlus programoje	41
2.9. Empirinis programos EnergyPlus testavimas	44
2.9.1. Viešojo pastato parinkimas testavimui	44
2.9.2. Tyrinėto pastato aprašymas	45
2.9.3. Pastato modelio sukūrimas	48
2.9.4. Modeliavimo rezultatai	50
2.10. Antrojo skyriaus išvados	52
3. TEORINIO PASTATO MODELIO SUKŪRIMAS	53
3.1. Modelio įvesties duomenys	53
3.2. Modelio geometrija ir zonavimas	54
3.3. Vietovė ir klimatiniai duomenys	55
3.4. Konstrukcijos	59
3.5. Pastato naudojimo režimas	59
3.6. Reikalavimai apšvietimui darbo vietoje	60
3.7. Apšvietimo sistemos valdymo įtaka pastato energijos poreikiams	61
3.8. Šiluminio komforto palaikymas ir sistemų darbo režimai	63
3.8.1. Vėdinimo sistema	64
3.8.2. Šildymo sistema	64
3.8.3. Vėsinimo sistema	65
3.9. Langų parinkimas analizei	65
3.9.1. Reikalavimai langų plotui	65
3.9.2. Langų charakteristikos	67
3.9.3. Langų tipai	69
3.9.4. Stiklo paketų parinkimas	70

3.10. Analizuojamos įstiklinimo alternatyvos	72
3.11. Trečiojo skyriaus išvados	73
4. MODELIAVIMO REZULTATŲ ANALIZĖ	75
4.1. Šilumos pritekėjimai dėl saulės spinduliuotės	75
4.2. Pastato energijos poreikių analizė	77
4.2.1. Šildymo energijos poreikių ir galių šildymui analizė	79
4.2.2. Energijos poreikių vėsinimui ir vėsinimo galios analizė	82
4.2.3. Energijos poreikių apšvietimui analizė	87
4.2.4. Energijos poreikių siurbliams ir ventiliatoriams analizė	90
4.2.5. Pirminės energijos poreikių struktūros analizė	95
4.2.6. Suminių pirminės energijos poreikių analizė	100
4.3. Pastato energinio efektyvumo didinimas panaudojant papildomas langų apsaugos nuo saulės priemones	103
4.3.1. Apsaugos nuo saulės priemonių charakteristikos	104
4.3.2. Apsaugos nuo saulės priemonių įtakos energijos poreikiams įvertinimas.	105
4.3.3. Apsaugos nuo saulės priemonių efektyvumo priklausomybė nuo lango charakteristikų	110
4.4. Rezultatų jautrumo analizė	111
4.4.1. Atitvarų varža	112
4.4.2. Elektros pirminės energijos rodiklis	113
4.4.3. Šaldymo mašinos naudingumo koeficientas	114
4.5. Mažai energijos vartojančių viešosios paskirties pastatų įstiklinimo charakteristikų parinkimo algoritmas	115
4.6. Gautų rezultatų palyginimas su kitų tyrėjų	118
4.7. Ketvirtojo skyriaus išvados	123
BENDROSIOS IŠVADOS	127
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI	129
AUTORIAUS PUBLIKACIJOS DISERTACIJOS TEMA	139

Contents

INTRODUCTION	1
Formulation of the problem.....	1
Importance of the thesis	1
The object of research	2
The goal of the thesis.....	3
The tasks of the thesis	3
Research methodology	3
Importance of scientific novelty.....	4
Practical significance of achieved results.....	4
The defended statements	4
Approval of the results	5
Dissertation structure.....	5
1. IMPORTANCE OF THE GLAZING AND SURVEY OF RESEARCH WORKS.....	7
1.1. Buildings energy efficiency requirements	7
1.2. Low energy building	9
1.3. Functions of the building’s facade and its influence on energy demand	11
1.3.1. Influence of the fenestration on energy demand.....	13
1.3.2. Influence of glazing characteristics on components of the heat balance	15
1.3.3. Role of the glazing in building’s life cycle.....	15
1.3.4. Influence of the glazing on comfort.....	17
1.3.5. Recommendations for building’s fenestration and orientation	18

1.3.6. Reduction of the energy demand with the use of daylight	19
1.4. Review of surveys in the field of influence of glazing characteristics on office building's energy demand.....	22
1.5. Conclusions of the first chapter.....	26
2. METHODS FOR ASSESSMENT OF BUILDING'S ENERGY DEMAND.....	29
2.1. Solution of the building as a system.....	29
2.2. Heat flows inside the building.....	31
2.3. Dynamic building energy demand simulation methods	33
2.4. Analytical simulation methods	34
2.4.1. Time response function method	34
2.4.2. Frequency response function method	35
2.5. Numerical methods.....	36
2.5.1. Finite difference method.....	36
2.5.2. Finite volume method.....	37
2.5.3. Finite element method	37
2.6. Comparison of methods.....	37
2.7. Selection of the computer simulation program.....	38
2.8. Solution of the heat balance in EnergyPlus program.....	41
2.9. Empirical testing of the EnergyPlus program.....	44
2.9.1. Selection of the tested public building.....	44
2.9.2. Description of the analyzed building	45
2.9.3. Building's model creation	48
2.9.4. Results of the simulation	50
2.10. Conclusions of the second chapter	52
3. CREATION OF THE THEORETICAL MODEL OF THE BUILDING	53
3.1. Model input data.....	53
3.2. Model geometry and zoning.....	54
3.3. Location and weather data.....	55
3.4. Constructions.....	59
3.5. Building's occupancy schedule	59
3.6. Requirements for the lighting level in work station	60
3.7. Influence of the lighting control on the building's energy demand.....	61
3.8. Maintenance of the thermal comfort and systems' operation schedules	63
3.8.1. Ventilation system.....	64
3.8.2. Heating system	64
3.8.3. Cooling system.....	65
3.9. Selection of windows for analysis	65
3.9.1. Fenestration requirements	65
3.9.2. Characteristics of windows.....	67
3.9.3. Types of windows.....	69
3.9.4. Selection of the glazing	70
3.10. Analyzed alternatives of the glazing	72
3.11. Conclusions of the third chapter.....	73

- 4. ANALYSIS OF THE SIMULATION RESULTS 75
 - 4.1. Solar heat gains through windows..... 75
 - 4.2. Analysis of the building’s energy demand 77
 - 4.2.1. Analysis of the heating energy demand and heating loads 79
 - 4.2.2. Analysis of the cooling energy demand and cooling loads..... 82
 - 4.2.3. Analysis of the lighting energy demand 87
 - 4.2.4. Analysis of the energy demand for fans and pumps 90
 - 4.2.5. Analysis of the structure of primary energy demand..... 95
 - 4.2.6. Analysis of the overall primary energy demand 100
 - 4.3. Increase of the energy efficiency of the building after application of the solar shading..... 103
 - 4.3.1. Characteristics of solar shading 104
 - 4.3.2. Evaluation of the influence of solar shading on energy demand 105
 - 4.3.3. Dependency of efficiency of solar shading on glazing characteristics 110
 - 4.4. Sensitivity analysis of the results 111
 - 4.4.1. Heat transmittance of elements..... 112
 - 4.4.2. Electricity primary energy factor..... 113
 - 4.4.3. Coefficient of performance of the cooling machine 114
 - 4.5. Algorithm for selection of the glazing for low energy office building 115
 - 4.6. Comparison of the results with results of other researchers 118
 - 4.7. Conclusions of the fourth chapter..... 123

- GENERAL CONCLUSIONS 127

- REFERENCES 129

- LIST OF PUBLISHED WORKS ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION..... 139

Ivadas

Problemos formulavimas

Vienas iš reikšmingiausių viešosios paskirties pastato architektūrinių ir konstrukcinių elementų, kuris daro įtaką energijos vartojimui bei natūraliam apšvietimui, yra fasado įstiklinimas. Iki šiol pasaulyje atlikta nemažai tyrimų stengiantis optimizuoti šį pastato elementą, tačiau trūksta darbų, kai analizuojant įstiklinimą jo įtaka pastato mikroklimato ir apšvietimo sistemų energijos poreikiams vertinama kompleksiškai ir nėra darbų, kai į tokį kompleksinį vertinimą integruojamas ir natūralaus apšvietimo poreikio vertinimas.

Darbo aktualumas

Nors ir siekiama mažinti energijos vartojimą tiek visoje Europos Sąjungoje (toliau – ES), tiek Lietuvoje jis ir toliau auga (Bertoldi ir Atanuosiu 2007), o vienas iš didžiausių energijos vartotojų išlieka pastatai, kurie suvartoja apie 40 % visos galutinės energijos.

Pastato energinis naudingumas didele dalimi nulemiamas jau ankstyvojoje architektūrinės-konstrukcinės dalies projektavimo stadijoje, ir šie sprendimai iš esmės sąlygoja pastato aplinkosauginį efektyvumą per visą jo gyvavimo (būvio)

ciklą. Vienas iš pagrindinių pastato elementų, kuris daro įtaką energijos vartojimui, šiluminiam, regimajam, akustiniam bei psichologiniam komfortui, yra langas.

Tyrimus langų charakteristikų efektyvumo srityje yra atlikę Franzetti *et al.* (2004), Gratia ir De Herde (2003), Ghisi ir Tinker (2005), Perednis *et al.* (2007), Poirazis (2005), Bülow-Hübe (2001) bei kiti mokslininkai, tačiau šių tyrimų rezultatai ir rekomendacijos ne visada sutampa, todėl kad nagrinėjama vienas ar keli pastatai konkrečioms klimatinėms sąlygoms. Be to, tik nedaugelis atliktų įstiklinimo efektyvumo tyrimų įvertina, kad pastatas yra ne tik konstrukciniai elementai, bet ir inžinerinės sistemos, tarp kurių yra abipusis ryšys. Pastato elementų ir energijos poreikių nagrinėjimas atskirai yra reikalingas tyrimų etapas, tačiau šiuolaikinės pastato energijos poreikių analizės priemonės leidžia pereiti prie kokybiškai naujo etapo – pastato ir jo sistemų sąveikos kompleksinės analizės, kai įvertinami visi energijos poreikiai, kuriems nagrinėjamas sprendimas daro įtaką.

Tuo tarpu konstruktoriams ir architektams reikalingos konkrečios energiška efektyvaus pastato atitvarų elementų proporcijų rekomendacijos, kurios priklausytų nuo klimatinėms sąlygoms, o Lietuvoje ir gretimose šalyse nėra viešosios paskirties pastatų įstiklinimo ploto normų ar rekomendacijų, kad būtų atsižvelgta į kompleksinį poveikį energijos poreikiams bei natūralaus apšvietimo (NA) poreikiui.

Pastato įstiklinimo charakteristikų tyrimai taip pat labai svarbūs įgyvendinant Pastatų energinio naudingumo direktyvos (2010/31/EB) nuostatas. Atnaujinta direktyva reikalauja, kad valstybės narės pastatams nustatytų minimalius energijos suvartojimo reikalavimus ir parengtų nacionalinius planus, kuriais būtų siekiama didinti beveik nulinės energijos pastatų skaičių. Tuo tarpu Lietuva, kaip ir jos kaimyninės šalys, iki šiol neturi net mažai energijos vartojančio pastato apibrėžimo. Siekiant įgyvendinti direktyvos nuostatas, reikalinga aiški strategija ir nuosekli teisės aktų sistema, o tam reikalingi pastatų energinio efektyvumo tyrimai atitinkamoms klimatinėms sąlygoms.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – viešosios paskirties pastato fasado įstiklinimo įtaka energijos poreikiams.

Darbo tikslas

Šio darbo tikslas, įvertinant natūralaus apšvietimo poreikį, kompleksiškai išanalizuoti viešosios paskirties pastato įstiklinimo charakteristikų įtaką mikroklimato ir apšvietimo sistemų energijos poreikiams. Nustatyti, kokioms pastato įstiklinimo charakteristikoms esant, Lietuvoje bei panašaus klimato šalyse pastato energijos poreikius galima būtų sumažinti iki mažai energijos vartojančio pastato lygio.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Apžvelgti atliktus tyrimus, esamas rekomendacijas ir teisės aktus, susijusius su viešosios paskirties pastato įstiklinimo charakteristikomis ir įvertinti jų pritaikymą Lietuvos ir panašaus klimato sąlygomis.
2. Palyginti kompleksiniam pastato energijos poreikių modeliavimui naudojamus metodus ir parinkti tinkamiausią darbo tikslui pasiekti. Atlikti pastatų energinio modeliavimo programų pritaikymo šiame darbe galimybių analizę bei empiriniu metodu įvertinti pasirinktos programos rezultatų tikslumą.
3. Sukurti viešosios paskirties pastato būdingos patalpos modelį ir atlikti modeliavimą esant skirtingoms fasado įstiklinimo alternatyvoms. Apdoroti modeliavimo rezultatus ir atlikti išsamią įstiklinimo charakteristikų įtakos atskiriems bei suminiams viešosios paskirties pastato energijos poreikiams analizę.
4. Pateikti rekomendacijas dėl energiniu ir natūralaus apšvietimo požiūriu efektyvių viešosios paskirties pastato įstiklinimo charakteristikų ir jų svarbos didinant mažai energijos vartojančių pastatų skaičių. Sukurti supaprastintą mažai energijos vartojančio viešosios paskirties pastato įstiklinimo charakteristikų parinkimo algoritmą.

Tyrimų metodika

Darbe pastato įstiklinimo charakteristikų įtaka mikroklimato ir apšvietimo sistemų energijos poreikiams vertinama kompleksiai, atliekant metinių pastato energijos poreikių modeliavimą pusvalandžio žingsniu. Modeliavimas atliekamas naudojant programą EnergyPlus, kuri pagrįsta atsako funkcijos metodu.

Įvesties duomenų įtakai galutiniams rezultatams įvertinti naudojama jautrumo analizė.

Pastato energijos poreikių modeliavimui taip pat naudojama pagalbinė kompiuterinė programa DesignBuilder, kurios išvesties duomenų apdorojimui ir analizei naudojama MS Excel programa.

Darbo mokslinis naujumas

Šiame darbe pirmą kartą Lietuvai ir panašaus klimato šalims per metus pusvalandžio žingsniu atliekant dinaminį viešosios paskirties pastato modeliavimą, kompleksiškai išanalizuota įstiklinimo charakteristikų įtaka jo metiniams mikroklimato ir apšvietimo sistemų pirminės energijos (PE) poreikiams. Taip pat pirmą kartą šiam klimatui pateiktos rekomendacijos dėl energiniu ir natūralaus apšvietimo požiūriu efektyvaus įstiklinimo ploto bei orientacijos pasaulio šalių atžvilgiu.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Atlikta viešosios paskirties pastato įstiklinimo charakteristikų įtakos pastato energijos poreikiams analizė leidžia jau ankstyvojoje pastato architektūrinės-konstruktinės dalies projektavimo stadijoje priimti energiniu ir natūralaus apšvietimo požiūriu efektyvius ir nieko nekainuojančius arba mažai investicijų reikalaujančius sprendimus.

Ginamieji teiginiai

1. Vertinant pagal metinį suminį pirminės energijos poreikį, efektyviausias kondicionuojamo viešosios paskirties pastato santykinis fasado įstiklinimo plotas yra mažesnis, nei reikalingas užtikrinti natūralaus apšvietimo higienos normų reikalavimus. Dėl šios priežasties efektyviausias energiniu ir natūralaus apšvietimo požiūriu yra plotas, kuris užtikrina minimalius natūralaus apšvietimo higienos normų reikalavimus.
2. Lietuvoje ir panašaus klimato šalyse, jei kondicionuojamame viešosios paskirties pastate nenaudojamos langų apsaugos nuo saulės priemonės, energiniu požiūriu efektyviausia įstiklinto fasado orientacija yra šiaurė, o naudojant išorinės apsaugos nuo saulės priemones su automatiniu valdymu – pietūs.

3. Lietuvoje mažai energijos vartojančiam administraciniam pastatui maksimalus metinis pirminės energijos suvartojimas jo mikroklimato ir apšvietimo sistemose neturėtų viršyti $160 \text{ kWh}_{\text{PE}}/\text{m}^2_{\text{g}}$.
4. Sukurtas mažai energijos vartojančio viešosios paskirties pastato įstiklinimo parinkimo algoritmas leidžia dar ankstyvojoje pastato projektavimo stadijoje be didelių laiko sąnaudų parinkti energiniu ir natūralaus apšvietimo požiūriu efektyvias įstiklinimo charakteristikas.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema yra išspausdinta 11 mokslinių straipsnių: vienas – mokslo žurnale, cituojamame ISI Web of Science duomenų bazėje, du – žurnaluose, cituojamuose Inspec duomenų bazėje, trys – recenzuojamoje tarptautinės konferencijos medžiagoje (du iš jų referuotose Thomson ISI duomenų bazėje), penki – respublikinių konferencijų medžiagose (vienas iš jų priimtas spaudai).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti septyniose mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai ir rezultatų apibendrinimas. Darbo apimtis – 140 puslapių, tekste panaudotos 27 numeruotos formulės, 72 paveikslai ir 12 lentelių. Rašant disertaciją, buvo panaudota 133 literatūros šaltiniai.

1

Įstiklinimo reikšmė ir atliktų tyrimų apžvalga

Pirmajame skyriuje pateikus atliktų tyrimų viešosios paskirties pastatų įstiklinimo efektyvumo srityje apžvalgą ir išanalizavus ES direktyvų bei nacionalinių teisės aktų reikalavimus pastatų energijos poreikiams, nustatoma pasirinktų tyrimų vieta atliktų tyrimų erdvėje. Skyriuje parodoma įstiklinimo charakteristikų daroma įtaka pastato energijos poreikiams bei komfortui. Apsibrėžiamas tyrimų objektas – viešosios paskirties (administracinio) pastato fasado įstiklinimo įtaka pastato mikroklimato ir apšvietimo sistemų energijos poreikiams.

Skyriaus tematika paskelbtos dvi autorės publikacijos (Sasnauskaitė *et al.* 2007; Juodis ir Sasnauskaitė 2008).

1.1. Reikalavimai pastatų energiniam naudingumui

Europoje pirminės energijos (toliau – PE) suvartojimas paskutiniaisiais metais didėja 1–2 % kasmet (Europos Bendrijų Komisija 2006), o vienas iš pagrindinių energijos vartotojų yra pastatai, kuriems tenka apie 40 % visos suvartojamos galutinės energijos (Europos Parlamentas ir Taryba 2010). Dėl šios priežasties

tiek ES, tiek kitose pirmaujančiose pasaulio šalyse energijos taupymas išlieka vienu iš pagrindinių politikos ir darnaus vystymosi tikslų.

Pastatų sektoriuje, o ypač viešosios paskirties pastatuose, yra vis dar neišnaudotas didelis energijos taupymo potencialas – ES jis siekia 30 % (Europos Bendrijų Komisija 2006). Europos Bendrijos teisėje yra sukurta išsami direktyvų ir reglamentų, skirtų didinti energijos vartojimo efektyvumą, sistema. Su energijos vartojimo efektyvumo didinimu pastatuose sietinos trys pagrindinės direktyvos: 2010 m. gegužės 19 d. Europos Parlamento ir Tarybos direktyva 2010/31/EB dėl pastatų energinio naudingumo (nauja 2002/91/EB direktyvos redakcija), 2009 m. spalio 21 d. Europos Parlamento ir Tarybos direktyva 2006/32/EB dėl energijos galutinio vartojimo efektyvumo ir energetinių paslaugų bei Europos Parlamento ir Tarybos direktyva 2009/125/EB, nustatanti ekologinio projektavimo reikalavimų energiją vartojantiems gaminiams nustatymo sistemą. Pagrindinė visgi laikytina pastatų energinio naudingumo direktyva 2010/31/EB, nes jos tiesioginis tikslas mažinti energijos suvartojimą pastatuose. 2002/91/EB direktyvos į nacionalinę teisę perkeltos reglamentu STR 2.01.09:2005 „Pastatų energinis naudingumas. Energinio naudingumo sertifikavimas“. Šis reglamentas reikalauja, kad nustatytais atvejais, pastatas privalo turėti sertifikatą, nurodantį jo energinio naudingumo klasę.

Lietuvoje atliekant pastatų energinio naudingumo sertifikavimą iš esmės pastato energinis naudingumas nustatomas tik pagal energijos poreikius šildymui (kartu su vėdinimo sistemos tiekiamo oro pašildymui suvartojama šiluma) bei sustambintai pagal pastato paskirtį įvertinant elektros suvartojimą. Akivaizdu, kad toks vertinimas gyvenamiesiems ir kitos paskirties pastatams, kur nėra oro kondicionavimo, iš esmės yra tinkamas, tačiau administraciniams ir komercinės paskirties pastatams, kur dažnai pagrindinis energijos vartotojas yra vėdinimo ir vėsinimo sistemos, sertifikavimas pagal STR 2.01.09:2005 neatspindi tikrojo energinio naudingumo.

Tuo tarpu STR 2.01.01(6):2008 „Esminis statinio reikalavimas „Energijos taupymas ir šilumos išsaugojimas“ reikalauja, kad statinys, jo šildymo, kondicionavimo, vėdinimo ir kiti įrenginiai turi būti suprojektuoti bei pastatyti taip, kad juos naudojant būtų kuo mažesnės energijos sąnaudos, atsižvelgiant į vietovės klimatinės sąlygas ir pastato naudotojų reikmes. Taigi šis reglamentas reikalauja, kad pastato energijos sąnaudos būtų vertinamos kompleksiskai, tačiau tuo pačiu metu nėra sukurta bendros metodikos pastato energinio naudingumo kompleksiniam vertinimui.

Viena iš pagrindinių priemonių, darančių didelę įtaką pastato energijos poreikiams, ypač šildymui, yra nuolatos griežtinami reikalavimai pastatų atitvarų šilumos perdavimo koeficientams, kurie nuo 1994 m. iki dabar, visoms atitvaroms, išskyrus langus, padidėjo apie penkis kartus (RSN 143-92 „Pastatų atitvarų šiluminė technika“; STR 2.05.01:1999 „Pastatų atitvarų šiluminė technika“;

STR 2.05.01:2005 „Pastatų atitvarų šiluminė technika“). Tuo tarpu reikalavimai langų šilumos perdavimo koeficientui išaugo palyginti nežymiai (žr. 1.1 lentelė).

1.1 lentelė. Reikalavimai viešosios paskirties pastatų langų šilumos perdavimo koeficientui

Table 1.1. Requirements for the heat transfer coefficient in public buildings

Šilumos perdavimo koeficientas U , $W/(m^2K)$	Reglamentavimas
1,90	RSN 143-92
$1,90 \times k^*$	STR 2.05.01:1999
$1,60 \times k^*$	STR 2.05.01:2005

* $k=20/(\theta_i-\theta_e)$ – temperatūros pataisa, θ_i – patalpų vidaus oro temperatūra, °C; θ_e – šildymo sezono vidutinė išorės oro temperatūra arba gretimos patalpos projektinė vidaus oro temperatūra, °C. Kai patalpos vidaus oro projektinė temperatūra $\theta_i=20$ °C, o išorės – $\theta_e=0$ °C, tada $k=1$.

Nors vienas iš STR 2.01.01(6):2008 reglamente nurodomų veiksmų, lemiančių pastato energijos poreikius šildymui, vėsinimui ir vėdinimui yra pastato įstiklinimo plotas, jo išdėstymas ir numatytų apsaugos nuo saulės priemonių efektyvumas, skaidriųjų atitvarų maksimalus plotas neribojamas ir nėra teikiama rekomendacijų dėl energiniu požiūriu efektyviausio įstiklinimo ploto. Pagal STR 2.05.20:2006 „Langai ir išorinės įėjimo durys“ yra ribojamas tik visuminis saulės energijos praleisties koeficientas g .

Siekiant įgyvendinti atnaujintos pastatų energinio naudingumo direktyvos reikalavimus didinti pastatų energinį naudingumą bei sukurti nacionalinius veiksmų planus, kuriuose būtų numatytos priemonės, padėsiančios didinti mažai energijos vartojančių (nulinės energijos pastatų) skaičių, būtina peržiūrėti ir atnaujinti su skaidriomis pastato atitvaromis susijusius reglamentus bei nacionaliniu lygmeniu nustatyti, kokio energijos suvartojimo pastatai yra laikomi mažai energijos vartojančiais.

1.2. Mažai energijos vartojantis pastatas

Nors mažai energijos vartojančio pastato sąvoka egzistuoja jau ne vieneri metai, tačiau vis dar nėra vieningo apibrėžimo tokiam pastatui nusakyti. Iš principo mažai energijos vartojantis pastatas yra tas, kuris suvartoja mažiau energijos nei reikalauja galiojantys nacionaliniai energinio naudingumo standartai (Europos Komisija 2009), o beveik nulinės energijos pastatas yra tas, kurio energinis naudingumas labai aukštas ir, kuris pagrinde vartoja atsinaujinančią energiją.

Šiuo metu Europos valstybės turi susikūrusios savus mažai energiją vartojančio pastato apibrėžimus. Iš viso ES buvo identifikuota (Engelund Thomsen *et al.* 2008) 17 skirtingų apibrėžimų, skirtų nusakyti mažai energijos vartojantiems pastatams. Skirtumai yra ne tik apibrėžimuose, bet ir energijos poreikiuose, kurie yra įtraukti į apibrėžimą. Idealiu atveju turėtų būti įvertinti visi pastato energijos poreikiai: šildymui, vėdinimui, vėsinimui, karšto vandens ruošimui ir visi elektros energijos poreikiai (Europos Komisija 2009). Deja, praktikoje dažniausiai taip nėra.

Pavyzdžiui, Danijoje skaičiuojant gyvenamojo pastato energinį efektyvumą vertinama PE poreikiai šildymui, vėdinimui, vėsinimui ir karštam vandeniui, o negyvenamos paskirties pastatams papildomai vertinama energija apšvietimui. Danijoje nustatytos dvi klasės mažai energijos vartojantiems pastatams: 1 klasė – energijos suvartojimas 50 % mažesnis nei galiojantys minimalūs reikalavimai, 2 klasė atitinkamai 25 %.

Prancūzijoje apskaičiuojant energinį efektyvumą skaičiuojami metiniai PE poreikiai šildymui, vėsinimui ir karštam vandeniui. Mažai energijos vartojantis gyvenamasis pastatas per metus suvartoja 40–60 kWh_T/m², o kitos paskirties mažai energijos vartojantys pastatai suvartoja 50 % mažiau energijos nei reikalauja galiojantys nacionaliniai standartai.

Tuo tarpu Austrijoje mažai energijos vartojančiam pastatui nustatyta reikšmė įvertina tik energijos suvartojimą šildymui, ir reikalavimai nustatyti tik gyvenamiems pastatams.

Belgijoje mažai energijos vartojantis gyvenamasis pastatas turi suvartoti 60 %, o administracinis – 70 % mažiau energijos nei reikalauja nacionaliniai standartai.

Čekijoje mažai energijos vartojantis gyvenamas namas yra mažai energijos vartojantis, jei jis atitinka B energinio naudingumo klasę.

Vokietijoje mažai energijos vartojančiu laikomas gyvenamasis namas, kuris šildymui suvartoja 40–60 kWh_T/m². Mažai energijos vartojantis administracinis pastatas neapibrėžiamas, tačiau Vokietijos Parlamento (*Reichstag*) pastatas, kuris šildymui, karštam vandeniui, vėdinimui, vėsinimui ir apšvietimui suvartoja 271 kWh_{PE}/m², t. y. 39 % mažiau energijos nei reikalaujama naujiems pastatams, yra laikomas geros praktikos pavyzdžiu (Staudt *et al.* 2009).

Jensen *et al.* (2009), remdamiesi turimais duomenimis suskaičiavo, kad Jungtinėje Karalystėje užsibrėžtas mažai energijos vartojančio administracinio pastato metinis energijos suvartojimas visoms reikmėms turėtų būti 95–151 kWh_{PE}/m², o Olandijoje atitinkamai 60–158 kWh_{PE}/m².

Taigi dauguma šalių mažai energijos vartojantiems pastatams apibrėžime nepateikia suvartojimo kWh/m², o apibrėžimų skirtumas ir didelis skirtumas tarp metodikų kelia sunkumų lyginant skirtingų šalių mažai energijos vartojančius

pastatus (Engelund Thomsen *et al.* 2008; Jensen *et al.* 2009; Europos Komisija 2009).

Lietuvoje, kaip ir Estijoje, Latvijoje, Lenkijoje ir dar keliose kitose šalyse, iki šiol nėra mažai energijos vartojančio pastato apibrėžimo. Lietuvai, kaip ir kaimyninėms šalims, reikalinga aiški strategija siekiant didinti energijos vartojimo efektyvumą pastatuose, o tuo pačiu, įgyvendinant pastatų energinio naudingumo direktyvos reikalavimus. Tokios strategijos sukūrimui, reikalingi pastatų energinio efektyvumo tyrimai atitinkamoms klimatinėms sąlygoms.

Lietuvoje nėra statistikos ar atliktų studijų, kur būtų nustatytas administracinių pastatų esamas energijos suvartojimas įvertinant ne tik šilumos, bet ir elektros energijos suvartojimą, todėl būtų sudėtinga nustatyti, kiek procentų mažiau energijos turėtų suvartoti pastatas, kad galėtų būti laikomas mažai energijos vartojančiu. Remiantis aukščiau atlikta kitų šalių patirties apžvalga, galima daryti prielaidą, kad Lietuvoje mažai energijos vartojančiu administraciniu pastatu galėtų būti laikomas tas, kuris suvartoja ne daugiau nei $160 \text{ kWh}_{PE}/\text{m}^2_{g}$ visoms pastato reikmėms. Darbe atliekamas alternatyvų modeliavimas bei kompleksinė energijos poreikių analizė parodys, kiek ši prielaida yra reali ir kokios įstiklinimo charakteristikos gali padėti priartėti prie tokios energijos poreikių vertės.

1.3. Pastato fasado funkcijos ir įtaka energijos poreikiams

Energijos sąnaudų optimizavimas tradiciškai dalinamas į atskiras stadijas: pastato architektūrinės dalies optimizavimas ir pastato inžinerinių sistemų optimizavimas. Pirmoje stadijoje svarbu suprojektuoti pastatą, kuris atitiktų norminius reikalavimus ir poreikius priklausomai nuo pastato paskirties. To siekiama mažinant šildymo ir vėsinimo galias per įvairių šilumos pritekėjimų ir nuostolių optimizavimą. Kitoje stadijoje optimizuojamos pastato energijos sąnaudos per inžinerines sistemas ir jų veikimą. Taigi apibendrinant pastato architektūrinę dalis atsako už galią, o inžinerinės sistemos už sąnaudas.

Esminis komponentas, užtikrinantis pastato šiluminį, higieninį ir vizualinį komfortą, yra pastato fasadas. Fasadas turi būti sukurtas taip, kad tenkintų vartotojų poreikius ir tuo pačiu užtikrintų racionalų gamtos išteklių panaudojimą. Fasadas yra daugiau nei paprastas fizinis barjeras tarp vidaus ir išorės, jis taip pat turi atlikti daugybę funkcijų, pagrindinės iš jų (Daniels 2003):

- ◆ vizualinis kontaktas tarp lauko ir patalpos;
- ◆ natūralus patalpos apšvietimas;
- ◆ natūralus vėdinimas;
- ◆ šiluminė ir akustinė izoliacija;

- ◆ apsauga nuo saulės;
- ◆ komfortinės patalpos temperatūros;
- ◆ atitinkama apsauga nuo akinamos šviesos.

Plačiai paplitusi nuomonė, kad kuo geresnė pastato šiluminė izoliacija, tuo pastatas energiškaai efektyvesnis. Ši nuostata iš esmės yra teisinga, nes pastato atitvarų izoliavimas mažina energijos poreikius šildymui. Tačiau vasarą, kai dėl šilumos pritekėjimų patalpos temperatūra yra aukštesnė nei lauko oro, labai mažas pastato šilumos perdavimo koeficientas gali sukelti pastato perkaitinimą ir tuo pačiu padidinti jo vėsinimo energijos poreikį. Masoso (2008) atlikęs įvairių straipsnių analizę padarė išvadą, kad neigiamas izoliacijos poveikis atsispindėjo ir ankstesniuose mokslininkų darbuose, tačiau jis paprasčiausiai buvo ignoruojamas, ypač tada kai tyrimai buvo atliekami kraštuose, kur dominuoja energijos poreikis šildymui. Gratia ir De Herde (2003), kaip galimą išeitį siekiant išvengti patalpų oro perkaitinimo, siūlo projektuoti pastatus su mažiau izoliacijos ir su mažesne inercija.

Pastato sukūrimas reikalauja aukšto kūrybingumo lygio, tačiau retai architektas vienas sugeba sukurti ekologiškai ir ekonomiškai efektyvų pastatą. Nors architektai kuria ir originalių, energiją taupančių pastatų, pavyzdžiui, su fasadu, kuris pats dėl savo konstrukcijų sudaro šešėlius ir nereikalauja jokių langų apsaugos nuo saulės priemonių (Capeluto 2003) arba su sodu ant stogo (Wong *et al.* 2003), jie nepaplinta. Pastatai su labai įmantriais fasadais retai būna ekonomiški, ir jų vieno kvadratinio grindų ploto kaina viršija standartinę daugiau nei dvigubai, todėl dažnai užsakovai atsisako įgyvendinti tokius projektus (Daniels 2003).

Siekiant sukurti mažai energijos vartojantį pastatą ir tuo pačiu išvengti komforto užtikrinimo problemų, dar projektavimo stadijoje būtinas nuolatinis architektūrinės dalies projektuotojų bendradarbiavimas su mikroklimato sistemų projektuotojais bei priėmimas racionalių sprendimų dėl (LST EN 13779:2007):

1. Pastato formos ir orientacijos.
2. Langų dydžio optimizavimo.
3. NA panaudojimo galimybių.
4. Apšvietimo koncepcijos.
5. Efektyvios apsaugos nuo saulės spinduliuotės.
6. Optimalios šiluminės izoliacijos tiek vasaros, tiek žiemos sezonui.
7. Pastato sandarumo suderinimo su vėdinimo sistemos rūšimi.
8. Konstrukcijų šilumos akumuliacijos galimybių.
9. Skirtingos paskirties zonų atskyrimo.

Tai reiškia, kad iš esmės pirminis pastato energijos poreikių optimizavimas turi būti atliekamas dar architektūrinės dalies projektavimo stadijoje ir jau tada yra būtinas integruotas aukščiau išvardytų sprendimų priėmimas.

Pastato šilumos nuostoliai ir pritekėjimai yra tiesiogiai priklausomi nuo jo orientacijos, formos ir ploto santykio su tūriu, kitaip dar vadinamo kompaktiškumo. Kuo pastato forma sudėtingesnė, tuo daugiau nuostolių, kurie atsiranda dėl šiluminių tiltelių. Kad pastato formą turi įtakos jo energijos poreikiams, yra plačiai žinoma ne tik iš atliktų tyrimų gausybės (Gratia ir De Herde 2003; Aksoy ir Inalli 2006; Ourghi *et al.* 2007; AlAnzi *et al.* 2008; Catalina *et al.* 2008 ir kt.), bet ir iš vadovėlių (Daniels 2003; Mumovic and Santamouris 2009 ir kt.). Taip pat yra nustatyta (Selkowitz 2003), kad pastatai su prailgintais perimetrais dažnai kainuoja daugiau nei kompaktiško dizaino pastatai.

Yra šalių, pavyzdžiui, Kinija, kur yra nustatyti privalomi reikalavimai viešosios paskirties pastato formos reikalavimai: pastato išorinių atitvarų ploto ir tūrio santykis neturi viršyti 0,4 (Hong 2009).

Lietuvoje pastato formos įtaką energijos poreikiams vertino Perednis *et al.* (2007) ir Savickas (2009). Perednis *et al.* atliko pastato formos įtakos vėsinimo energijos poreikiams vertinimą teoriniam pastatui Lietuvos klimatinėmis sąlygomis. Išanalizavęs tris pastato variantus, jis nustatė, kad efektyviausias yra kvadratinės formos pastatas. Tuo tarpu Savickas, atlikęs 123 pastatų, esančių Lietuvoje, realių energijos poreikių šildymui priklausomybės nuo formos analizę, nustatė, kad priklausomybė realybėje yra labai silpna, nes be formos įtaką energijos poreikiams daro dar daug kitų veiksnių.

Kadangi pastato formos įtaka energijos poreikiams yra pakankamai ištirta, o pastato forma ir orientacija dažnai apsprendžiama statybos vietovės, sklypo formos, reikalavimų ir pan., kas apriboja architektų sprendimus, todėl darbe šie veiksniai nebus nagrinėjami.

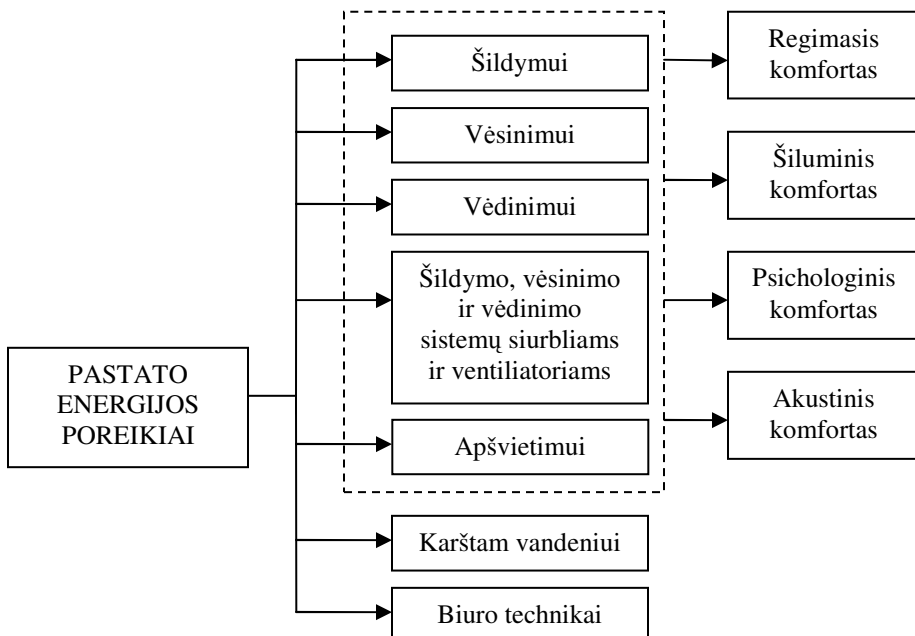
Disertacijoje apsiribojama 2–5 aukščiau minėtųjų veiksnių poveikio energijos poreikiams analize. Visi šie veiksniai yra tiesiogiai priklausomi nuo pastato fasado įstiklinimo pobūdžio, todėl toliau 1.3.1.–1.3.6. skyreliuose pristatoma, kokią įtaką daro pastato įstiklinimo charakteristikos pastato energijos poreikiams, komfortui ir natūraliam apšvietimui bei, kokia jų vieta pastato šilumos balanse ir pastato gyvavimo cikle.

1.3.1. Fasado įstiklinimo įtaka energijos poreikiams

Projektuojant fasadus, vienas iš svarbiausių architektūrinių sprendimų yra įstiklinimo charakteristikos: plotas, stiklo rūšis, šilumos perdavimo koeficientas ir langų orientacija.

Skaidriosios fasado dalys yra labai svarbūs pastato konstrukciniai elementai, nes šiluminiu atžvilgiu yra silpnoji pastato dalis ir jo šilumos laidumas visada bus didesnis nei gerai izoliuotos sienos. Yra paskaičiuota, kad JAV apie 3 %, o Švedijoje 7 % visos šalyje suvartojamos energijos yra prarandama dėl langų (Collins *et al.* 1995).

Teisingai orientuoti, didelio efektyvumo langai yra vienas iš svarbiausių energiškai efektyvaus pastato elementų. Dideli fasado įstiklinimo plotai didina šilumos nuostolius ir atitinkamai energijos poreikį šildymui žiemą, o vasarą – didesni šilumos pritekėjimai didina energijos poreikius vėsinimui. Langai daro įtaką šildymo, vėsinimo, vėdinimo, apšvietimo bei mikroklimato sistemų siurblių ir ventiliatorių suvartojamai energijai regimajam, šiluminiam ir psichologiniam komfortui užtikrinti (žr. 1.1 pav.). Plačiau langų įtaka komfortui aprašyta 1.3.4. skyrelyje.



1.1 pav. Pastato įstiklinimo daroma įtaka energijos poreikiams ir komfortui
Fig. 1.1. Influence of the building's glazing on the energy demand and comfort

Mikroklimato sistemų energijos poreikiai suprantami kaip šildymo sistemos energijos poreikiai, vėdinimo sistemos energijos poreikiai bei vėsinimo sistemos energijos poreikiai, tarp jų ir energija, reikalinga šilumnešiu/saltnešiu ir oru transportuoti. Vėdinimo sistemos orui paruošti, priklausomai nuo lauko oro temperatūros, taip pat reikalinga orą šildyti arba vėsinti. Todėl energijos kiekis, reikalingas vėdinimo sistemos orui pašildyti, toliau šiame darbe bus priskiriamas prie energijos poreikių šildymui, vėsos kiekis – prie energijos poreikių vėsinimui, o mikroklimato sistemų siurbliai ir ventiliatoriai nebus skirstomi pagal tai, kokiai jie sistemai priklauso.

1.3.2. Įstiklinimo charakteristikų įtaka pastato šilumos balanso dedamosioms

Pastato šilumos balanso lygtis gali būti užrašoma įvairiai, priklausomai nuo skaičiavimo tikslo, detalumo ir kitų veiksnių. Bendru atveju, patalpai reikalingas pateikti ar pašalinti šilumos kiekis gali būti užrašytas:

$$Q = \underbrace{(Q_{el} + Q_{\psi} + Q_{\chi}) + (Q_{ev} + Q_{in} + Q_{nv}) + (Q_{ig} + Q_{sg})}_{Q_{en} + Q_v + Q_{hg}}, \quad (1.1)$$

čia Q_{en} – šilumos nuostoliai/pritėkiai per atitvaras. Juos sudaro nuostoliai/pritėkiai per patalpos atitvaras Q_{el} , ilginius šilumos tiltelius Q_{ψ} ir nuostoliai per taškinius šilumos tiltelius Q_{χ} (karkasiniams pastatams); Q_v – šilumos/vėsos kiekis, patenkantis į patalpas dėl vėdinimo. Jam priskiriamas įnešamas/išnešamas šilumos kiekis dėl natūralaus vėdinimo – Q_{nv} , infiltracijos – Q_{in} ir mechaninės vėdinimo sistemos – Q_{ev} ; Q_{hg} – šilumos pritėkiai į patalpą. Juos sudaro šilumos pritėkiai per atitvaras dėl saulės spinduliuotės – Q_{sg} ir šilumos pritėkiai dėl vidinių šilumos šaltinių – Q_{ig} .

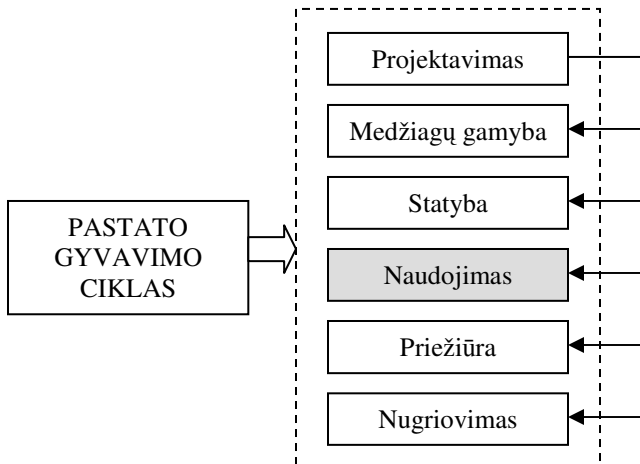
Kai lauko temperatūra didesnė nei patalpos, kai kurios šilumos balanso dedamosios gali įgyti neigiamą reikšmę. Jei laikoma, kad šilumos pritėkiai turi neigiamą ženklą, o nuostoliai – teigiamą, tokiu atveju gauta neigiama dedamųjų suma rodo vėsinimo poreikį, o teigiama – šildymo.

Pastato įstiklinimas daro įtaka kelioms šilumos balanso dedamosioms: Q_{el} , Q_{sg} , Q_{ψ} , Q_{ev} , Q_{in} , Q_{nv} . Šiuo atveju įstiklinimo charakteristikos daugiausiai lemia Q_{el} , Q_{sg} balanso dedamąsias, kurios be šiluminių ir spektrinių langų charakteristikų taip pat priklauso ir nuo įstiklinimo ploto, orientacijos pasaulio šalių atžvilgiu, langų užtemdymo dėl šalia esančių pastatų ir medžių bei naudojamų apsaugos nuo saulės priemonių.

1.3.3. Įstiklinimo vieta pastato gyvavimo cikle

Vis labiau suvokiant aplinkos apsaugos svarbą ir galimus pagamintų bei suvartotų produktų poveikius aplinkai, didėja susidomėjimas kuriamais poveikių geresnio supratimo ir jų mažinimo metodais. Vienas iš šiam tikslui sukurtų metodų yra gyvavimo ciklo įvertinimas (GCA) (EN ISO 14044:2007). GCA padeda pagerinti produktų aplinkosauginį veiksmingumą įvairiais jų gyvavimo ciklo momentais. Pastato gyvavimo cikle galima išskirti šiuos etapus: projektavimas, medžiagų gamyba, statyba, naudojimas, priežiūra ir nugriovimas. Nors pastato projektavimo metu sunaudojamas energijos kiekis, lyginant su kitais pastato bū-

vio etapais, yra mažas ir dažnai net nevertinamas, jo metu priimti sprendimai veikia visus kitus gyvavimo ciklo etapus (1.2 pav.).



1.2 pav. Pastato projektinių sprendimų įtaka pastato gyvavimo cikle
Fig. 1.2. Influence of the building's design solutions throughout its life cycle

Sartori ir Hestnes (2007) palyginę 60 pastatų būvio ciklo analizių (tarp jų apie 30 atlikta šalyse, kur dominuoja šildymo poreikis) rezultatus, nustatė, kad visgi didžiausias energijos suvartojimas ir poveikis aplinkai yra pastato naudojimo etape. Pavyzdžiui, Scheuer *et al.* (2003) skaičiavimais šiam etapui universiteto pastatui tenka daugiau nei 83 % energijos, Kofoworola ir Gheewala (2009) administraciniams pastatui Tailande energijos suvartojimą naudojimo fazėje gavo 81 %. Su ir Zheng (2010) nustatė, kad pastato atitvarų ir statybos aplinkosaukinis poveikis per visą jo gyvavimo laiką yra vos 3 %, o likusi poveikio dalis tenka naudojimo stadijai. Gyvenamųjų daugiabučių namų gyvavimo ciklo analizę atlikęs Martinaitis (2001), taip pat nustatė, kad didžiausias PE suvartojimas yra pastatų naudojimo stadijoje.

Pastato mikroklimato sistemose per jų būvio ciklą taip pat beveik visa energija suvartojama naudojimo metu. Biekša (2008) nustatė, kad administracinio pastato vėdinimo sistemos būvio ciklo naudojimo fazei tenka 88 %, tiek pat tenka ir šildymo sistemos būvio ciklo naudojimo fazei. Sasnauskaitė *et al.* (2007) įvertino gyvenamojo pastato skirtingų šildymo sistemų būvio ciklą ir nustatė, kad naudojimo fazei visais nagrinėtais atvejais tenka 99 % PE.

Taigi pastato naudojimo etapo energijos poreikių optimizavimui turėtų būti skiriamas didžiausias dėmesys (Scheuer *et al.* 2003). Todėl ir šiame darbe toliau apsiribojama tik įstiklinimo charakteristikų poveikio energijos poreikiams naudojimo stadijoje vertinimu.

1.3.4. Įstiklinimo įtaka komfortui

Langas, kaip jau minėta, yra svarbus pastato komfortą lemiantis konstrukcinis elementas. Nepaisant to, jog žmogui langas yra būtinas, kad jis jaustų ryšį su aplinka ir psichologinį komfortą, jis taip pat gali sukelti ir nemalonių pojūčių, tokių kaip akustinis diskomfortas, akinimas, perkaitinimas, šaltos srovės ir pan.

Vietovėse, kur yra didelis šildymo poreikis, pageidautinas įstiklintos dalies šilumos perdavimo koeficientas 0,6–1,0 W/m²K. Tokios reikšmės reikalingos ne tik dėl energijos poreikių mažinimo, bet ir siekiant išvengti diskomforto ir kondensacijos patalpose (Selkowitz 2005).

LST EN ISO 7730 standarte yra pateikiama šiluminio komforto kriterijų nustatymo metodika, pagal kurią paprastai ir greitai galima paskaičiuoti, koks sienos/lango šilumos perdavimo koeficientas nesukeltų diskomforto patalpoje. Standartas rekomenduoja vadovautis trim vertinimo kriterijais:

1. Oro temperatūrų skirtumas patalpoje neturi viršyti 4 K. Tokiu atveju turi būti tenkinama nelygybė:

$$U_w < \frac{128}{\theta_{d,i} - \theta_{d,e}}. \quad (1.2)$$

2. Spinduliavimo temperatūros asimetrija nuo šaltų paviršių neturi viršyti 10 K. Tokiu atveju turi būti tenkinama nelygybė:

$$U_w < \frac{80}{\theta_{d,i} - \theta_{d,e}}. \quad (1.3)$$

3. Šaltų srovių atsiradimu nuo šaltų paviršių. Jei patalpoje išlaikoma standarte rekomenduojama sąlyga, kad vidutinis oro greitis patalpoje turi neviršyti 0,18 m/s, o patalpose oro projekcinė temperatūra yra 20 °C, tai siekiant išvengti šaltų srovių atsiradimo, turi būti tenkinama nelygybė:

$$U_w < \frac{150}{h \cdot (\theta_{d,i} - \theta_{d,e})}, \quad (1.4)$$

čia U_w – išorinės sienos/lango šilumos perdavimo koeficientas; $\theta_{d,i}$ – patalpos projekcinė oro temperatūra, °C; $\theta_{d,e}$ – projekcinė lauko oro temperatūra, °C; h – lango aukštis, m.

Kriterijams 1 ir 2 turi būti naudojamas vidutinis išorinės sienos ir lango šilumos perdavimo koeficientas, o kriterijui 3 – tik lango šilumos perdavimo koeficientas.

Atlikti komforto tyrimai administraciniuose pastatuose rodo, kad dažnai juose nėra užtikrinamos komfortinės sąlygos. Šeduikytė ir Paukštys (2008), tir-

dami du naujai pastatytus administracinius pastatus su dideliais įstiklinimo plotais nustatė, kad šildymo sezono metu žmonės skundėsi dėl per aukštos temperatūros, kuri kartais pasiekdavo 28,7–29,5 °C ir per sauso oro – santykinis oro drėgnumas buvo žemesnis nei 30 %. Menzies ir Wherrett (2005) atliko apklausą 4 administraciniuose pastatuose Edinburge, kuriuose bendras santykinis fasado įstiklinimas buvo 26–54 %, ir tik viename pastate bendras komfortas (šiluminis, vizualinis ir kt.) buvo įvertintas labai gerai. Vokietijoje buvo atlikta dvylikos mažai energijos vartojančių administracinių pastatų (su viengubu fasadu santykinis įstiklinimo plotas sudarė 23–55 %, o su dvigubu fasadu atitinkamai 60–90 %) komforto analizė. Nustatyta, kad vasaros metu net esant ekstremalioms sąlygoms šiuose pastatuose užtikrinamos komfortinės sąlygos (Pfafferott *et al.* 2007; Wagner *et al.* 2007). Bülow-Hübe (2001) atliko išsamią žmonėms priimtino fasado įstiklinimo ploto tyrimų apžvalgą, kurią apibendrinant galima teigti, kad administraciniuose pastatuose dirbantiems žmonėms priimtinausias įstiklinimo plotas būtų nuo 18 iki 49 %.

Atlikti tyrimai parodo, koks įstiklinimo plotas yra priimtinas žmonėms, tačiau taip pat rodo, kad vien įstiklinimo plotas nėra vienintelis veiksnys, lemiantis komfortą. Siekiant darnaus komforto reikia vertinti pastatą kaip visumą ir jame vykstančią įvairiapusę sąveiką su supančia aplinka, o taip pat reikia siekti kuo daugiau išnaudoti pasyvias priemones (pvz.: pastato architektūrą, klimatinės sąlygas ir atsinaujinančius energijos šaltinius). Tai prieštarauja labiausiai paplitusiam projektavimo būdai, kur architektai linkę perduoti arba yra priversti perduoti komfortinių sąlygų užtikrinimo sprendimą mikroklimato sistemų inžinieriams, kurie savo ruožtu jau nebegali kištis į pastato konstrukcinius-architektūrinius, apšvietimo sistemų ir netgi pastato patalpų išdėstymo sprendimus. Taip pat dažnai šildymo, vėdinimo ir oro kondicionavimo įrangos išdėstymas jau yra nulemtas architektūrinių sprendimų ir nėra galimybių jo keisti. Dėl esamos padėties mikroklimato sistemų inžinieriams lieka užtikrinti komfortines sąlygas tik naudojant aktyvias (reikalaujančias energijos) komforto užtikrinimo priemones. Integracijos trūkumas padaro daugelį pastatų mažiau komfortiškus, brangesnius ir komforto palaikymas, ypač vasarą, tampa kelis kartus brangesnis.

1.3.5. Rekomendacijos fasado įstiklinimo plotui ir orientacijai

Bendru atveju, žinoma, kad įstiklinimas šiaurės, rytų ar vakarų pusėje padidina šilumos nuostolius, todėl juos galima kompensuoti didesniu įstiklinimo plotu Pietų pusėje. Tačiau ne visada šis bendras principas yra tinkamas ir kiekvienu atveju reiktų atsižvelgti į pastato specifiką. Kiekvienu atveju reiktų žiūrėti, kokia įtaka daroma ne tik šilumos poreikiui, bet ir vėsinimo energijos poreikiui ir ieškoti geriausio – mažiausiai energijos reikalaujančio varianto.

Kai kuriose šalyse yra:

- oficialios rekomendacijos dėl administracinių pastatų įstiklinimo charakteristikų;
- įteisinti griežti reikalavimai.

ASHRAE (2004) šaltame klimate rekomenduoja didinti administracinio pastato pietinių langų plotą, ilginti pastatą vakarų – rytų kryptimis ir mažinti įstiklinimą į rytus ir vakarus orientuotose fasaduose. Kanados rekomendacijos tokios pačios kaip ir JAV (PWC 2002). Belgijos sąlygoms, jei nenaudojamos papildomos apsaugos nuo saulės priemonės, Gratia ir De Herde (2003) rekomenduoja daugiau įstiklinti šiaurinį fasadą. Taigi rekomendacijos yra prieštaringos.

Rekomendacijos dėl santykinio fasado įstiklinto ploto (SFĮP) ir jo apskaičiavimo taip pat skiriasi. ASHRAE rekomenduoja SFĮP 20–40 %, tuo tarpu Norvegijoje pastatų energinio naudingumo standarte NS 3031:2007 (2007) nurodoma, kad pastato fasado langų ir durų plotas neturėtų viršyti 20 % pastato šildomo grindų ploto. Estijos standartas EVS 894-2008 remdamasis NA poreikiu darbo vietoje, priklausomai nuo patalpos gylio rekomenduoja SFĮP 20–35 %. Šiame standarte yra pateikiama ir metodika, kaip tiksliau konkrečiai patalpai nustatyti SFĮP tenkinantį NA poreikį. Kanadoje įstiklintą plotą rekomenduojama apskaičiuoti pagal patalpos geometrinius rodiklius. Apskaičiavus dažniausiai gaunamas SFĮP artimas 30 % (PWC 2002). Kinijos standartai reikalauja, kad SFĮP visoms orientacijoms neturi viršyti 70 %, o jei jis mažesnis už 40 %, lango šviesos praleisties koeficientas turi būti ne mažesnis nei 0,4. Kinijoje taip pat priklausomai nuo SFĮP yra nustatyti minimalūs lango šilumos perdavimo koeficientai (Hong 2009).

Keep Cool projekto metu atlikta ES valstybių narių reikalavimų pastatų įstiklinimo charakteristikoms analizė (Goncalves ir Camelo 2009) parodė, kad tik Slovėnijoje, Portugalijoje, nors ir netiesiogiai, ribojamas fasado įstiklinimo plotas. Kitose valstybėse įstiklinimo ploto mažinimas yra tik rekomenduojama kaip viena iš saulės šilumos pritekėjimus mažinančių priemonių arba nėra visai jokių rekomendacijų.

Lietuvoje ir kaimyninėse šalyse nėra oficialių rekomendacijų dėl energiniu požiūriu efektyvaus įstiklinimo ploto ar įstiklinimo orientacijos. Skirtingų šalių rekomendacijų skirtumas parodo, kad jos negali būti taikomos universaliai, todėl Lietuvai negalima taikyti kitoje klimatinėje ir laiko juostoje galiojančių rekomendacijų.

1.3.6. Natūralus apšvietimo išnaudojimas mažinant energijos poreikius

Administracinio pastato energijos suvartojime energijos poreikiams apšvietimui tenka apie 30 % (Franzetti *et al.* 2004). Europoje apšvietimui suvartojama vidu-

tiniškai $45 \text{ kWh}_E/\text{m}^2$ per metus, o prastuose pastatuose gali siekti ir $65 \text{ kWh}_E/\text{m}^2$ per metus (Perednis 2006). Geriausios praktikos administraciniuose pastatuose energijos suvartojimas apšvietimui sudaro $5\text{--}11 \text{ kWh}_E/\text{m}^2$. Šiuo atveju tarp Europos šalių egzistuoja dideli skirtumai, pavyzdžiui, Švedijoje vidutinės energijos sąnaudos administracinių pastatų apšvietimui yra $23 \text{ kWh}_E/\text{m}^2$ per metus (Borg 2009).

Nors energijos vartojimo efektyvumo dirbtiniam apšvietimui didinimo priemonės yra žinomos ir nėra techninių kliūčių joms naudoti, visgi problemos kyla iš esmės dėl:

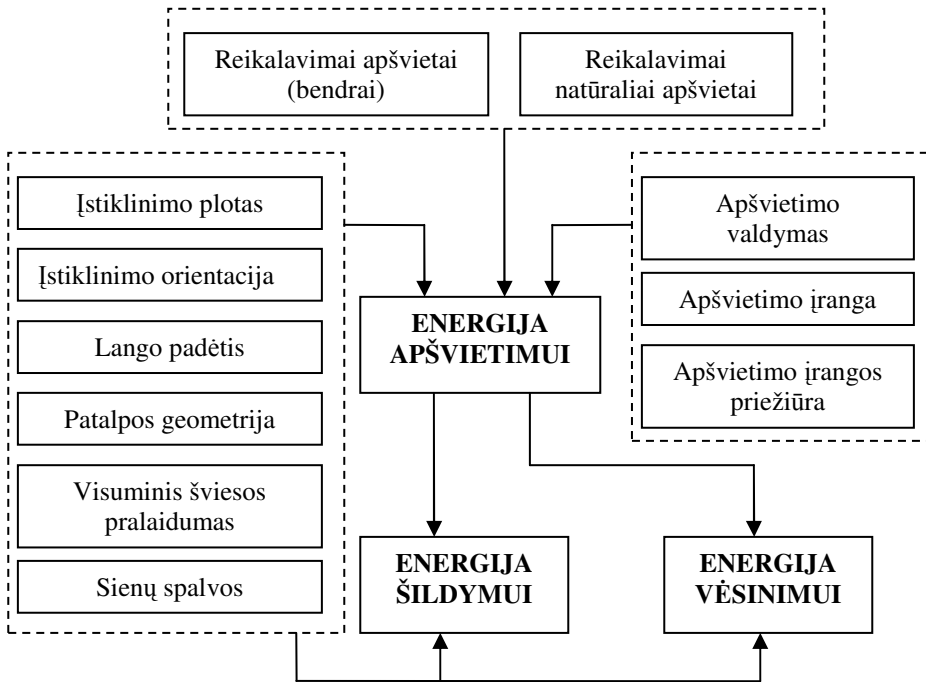
- informacijos trūkumo;
- sąmoningumo trūkumo;
- lėšų trūkumo;
- nėra į gyvavimo ciklą nukreipto mąstymo;
- trūksta bendradarbiavimo tarp skirtingų pastato dalių projektuotojų;
- ilgalaikių sutarčių su tiekėjais;
- įpročių („mes visada taip darome“).

Energijos poreikius apšvietimui galima mažinti maksimaliai išnaudojant NA, kuris turi didelę įtaką ne tik energijos taupymui, bet ir patalpų išvaizdai bei yra labiau priimtinas žmonėms nei dirbtinis apšvietimas. Sprendimai dėl NA maksimalaus išnaudojimo, kaip jau buvo minėta aukščiau, turi būti priimami, dar projektavimo stadijoje. NA atveju svarbūs rodikliai yra įstiklinimo plotas, lango aukštis, stiklo šviesos pralaidumas, patalpos sienų savybės, lango ir patalpos plotų santykis ir kt. (Gratia ir De Herde 2003), o NA kokybė apibūdinama išraiška: $\tau_0(A_{lango}/A_{grindų})$ (τ_0 – visuminis lango šviesos praleisties koeficientas).

Jei gauta vertė nuo 0,15 iki 0,30, tai NA laikomas efektyvus, tačiau šis rodiklis negali būti vertinamas vienareikšmiškai – turi būti rastas balansas tarp vizualinio komforto ir šiluminio komforto (Franzetti *et al.* 2004; ASHRAE 2004).

Neišnaudojus NA galimybių, padidėja ne tik energijos poreikis apšvietimui, bet ir šilumos pritekėjimai į patalpą, kurie gali sudaryti $10\text{--}25 \text{ W}/\text{m}^2$ (pagal LST EN 13779:2007 projektinė vertė $12 \text{ W}/\text{m}^2$). Šie pritekėjimai žiemą mažina energijos poreikį šildymui, tačiau vasarą didina energijos poreikį vėsinimui. Kita vertus, pakeitus įstiklinimo charakteristikas, kaip lango plotas ar šviesos pralaidumo koeficientas, galima sumažinti energijos sąnaudas apšvietimui bei šilumos pritekėjimus nuo apšvietimo įrangos, bet tokiu atveju padidėja šilumos pritekėjimai nuo saulės. Taigi, mažinant vidinius šilumos pritekėjimus ir energijos poreikius apšvietimui, didėja pritekėjimai nuo saulės ir atvirkščiai, todėl labai svarbu atitinkamai fasado orientacijai rasti tokias įstiklinimo charakteristikas, kad suminiai metiniai energijos poreikiai būtų minimalūs, bet tuo pačiu būtų užtikrintas pakankamas natūralus atitinkamos paskirties patalpos apšvietimas.

1.3 paveiksle pavaizduota energijos poreikius apšvietimui lemiantys veiksniai ir apšvietimo energijos ryšis su energijos poreikiais šildymui ir vėsinimui (energijos poreikiai vėdinimui bei mikroklimato sistemų siurbliams ir ventiliatoriams šiuo atveju atskirai nevaizduojami).



1.3 pav. Ryšis tarp apšvietimo energijos poreikių ir mikroklimato sistemų energijos poreikių

Fig. 1.3. Link between lighting and microclimate systems' energy demand

Glaudus ryšys tarp pastato apšvietimo ir mikroklimato užtikrinimo sistemų parodo poreikį jas vertinti kompleksškai, o ne kiekvieną atskirai.

Pastatų energijos poreikiai apšvietimui, taip pat gali būti mažinami panaudojant apšvietimo sistemos valdymą pagal apšvietos lygį, taip maksimaliai išnaudojant natūralų apšvietimą. Franzetti *et al.* (2004) nustatė, kad tokio valdymo įdiegimas leidžia sumažinti energijos poreikius apšvietimui iki 65 %. Kiti tyrėjai taip pat tyrė apšvietimo sistemos valdymo įtaką energijos poreikiams. Jų tyrimų rezultatai pateikti žemiau.

1.4. Administracinio pastato įstiklinimo charakteristikų įtakos energijos poreikiams atliktų tyrimų apžvalga

Vėsaus klimato šalyse, kurioms priklauso Lietuva, administraciniai pastatai savo šiluminiu režimu labai skiriasi nuo gyvenamųjų pastatų. Skirtingai nei gyvenamieji pastatai, kur energijos kiekis komfortui užtikrinti suvartojamas daugiausia šildymo sistemose, administraciniai pastatai turi būti dar papildomai vėdinami ir vėsinami. Todėl architektūriniai ir konstrukciniai sprendimai, kurie tinka gyvenamiems pastatams yra dažnai netinkami administraciniams.

Administracinių pastatų energijos poreikių mažinimo srityje yra atlikta nemažai tyrimų. Skirtingi mokslininkai analizavo skirtingų veiksnių įtaką pastato energijos poreikiams.

Kaip jau minėta, apšvietimas administraciniame pastate yra svarbus energijos vartotojas. Dėl šios priežasties, yra atliekama daug tyrimų siekiant sumažinti šiuos energijos poreikius. Bourgeois *et al.* (2006) nagrinėjo apšvietimo sistemos kontrolės įtaką administracinio pastato energijos sąnaudoms šildymui, vėsinimui bei apšvietimui. Jis nustatė, kad naudojant automatizuotą kontrolės sistemą, kuri reaguoja į žmonių buvimą ir reguliuojama pagal apšvietos lygį, galima sutaupyti daugiau nei 40 % PE. Roisin *et al.* (2008) nagrinėjo skirtingas apšvietimo kontrolės pagal apšvietos lygį sistemas ir nustatė, kad judesio davikliai duoda efektą tik tada, kai darbuotojai darbo vietose nebūna nuolat. Nagrinėdamas energijos poreikius trims miestams, – Stokholmui, Atėnams ir Briuseliui – Roisin nustatė, kad dėl apšvietimo kontrolės energijos sutaupymas apšvietimui administraciniame pastate siekia 45–61 %. Ihm *et al.* (2009) pasiūlė supaprastintą metodą apšvietimo energijos sąnaudoms įvertinti ir juo naudodamasis vertino skirtingas pastato formas, langų dydžio ir įstiklinimo charakteristikų kombinacijas JAV ir kitose vietovėse. Jis nustatė, kad energijos sąnaudas apšvietimui naudojant apšvietimo kontrolę pagal apšvietos lygį galima sumažinti iki 60 %. Lam *et al.* (2006) tyrė apšvietimo sistemos galios įtaką pastato energijos poreikiams šildymui, vėsinimui ir apšvietimui. Franzetti *et al.* (2004), paskaičiavęs kelis skirtingus apšvietimo sistemos sprendimus administraciniame pastate, iliustravo, kaip svarbu vertinti sąveiką tarp apšvietimo ir šiluminių procesų, t. y. kad būtina vertinant apšvietimo sistemos sprendimus ir energijos poreikius, įvertinti ir jų įtaką energijos poreikiams šildymui ir vėsinimui.

Ghisi ir Tinker (2005) ieškojo idealaus administracinio pastato SFIP. Jie nustatė, koks apšvietimo energijos požiūriu idealus SFIP atskiroms orientacijoms ir patalpos indeksui K:

$$K = \frac{WD}{(W + D)h'}, \quad (1.5)$$

čia W – patalpos plotis (m); D – patalpos gylis (m); h' – montažinis aukštis tarp darbo paviršiaus ir lubų.

Florianapoliui ir Leeds miestams Ghishi ir Tinker gautas idealus SFĮP yra nuo 10 iki 37 %.

Dalis atliekamų tyrimų nukreipti į naujai kuriamų langų įtakos pastato energijos sąnaudoms nagrinėjimą. Li *et al.* (2008) vertino įvairių stiklo plėvelių panaudojimo įtaką administracinio pastato energijos poreikiams apšvietimui ir vėsinimui. Tuo tarpu Baetens *et al.* (2010) tyrė elektrochrominių langų įtaką pastato energijos poreikiams apšvietimui ir vėsinimui. Elektrochrominio lango įtaką energijos poreikiams apšvietimui taip pat tyrė Gugliermetti ir Bisegna (2003). Miyazaki *et al.* (2005) tyrė lango su integruotu fotoelementu įtaką energijos poreikiams šildymui, vėsinimui ir apšvietimui.

Perednis *et al.* (2007) nagrinėjo teorinio pastato formos, orientacijos, įstiklinimo ploto ir šilumos perdavimo koeficiento įtaką pastato energijos poreikiams vėsinimui. Jis nustatė, kad vėsinimo energijos poreikių atžvilgiu, kai įstiklinimo plotas visose fasado pusėse vienodas, efektyviausias yra kvadratinės formos pastatas ir jam orientacija įtakos praktiškai nedaro. Taip pat nustatė, kad SFĮP sumažėjus nuo 90 iki 30 % (kai lango šilumos perdavimo koeficientas lygus $1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$, o įstiklinimo $g=0,55$), energijos poreikiai vėsinimui sumažėja apie 85 %. Optimalus paskaičiuotas įstiklinimo šilumos perdavimo koeficientas yra $1\text{--}1,3 \text{ W/m}^2$ (kai suminis saulės energijos praleisties koeficientas $g=0,53$).

Administracinio pastato įstiklinimo ploto bei parametru, tokių kaip pastato apšiltinimas, masyvumas, stiklo paketas, SFĮP, apsaugos nuo saulės priemonių bei oro kaitos įtaką energijos poreikiams šildymui bei vėsinimui Turkijos klimatinėmis sąlygomis nagrinėjo Eskin ir Turkmen (2008). Jie nustatė, kad Turkijos klimatinėmis sąlygomis administracinio pastato energijos poreikiai šildymui ir vėsinimui labai priklauso nuo SFĮP, šiluminės izoliacijos ir vėdinimo sistemos oro apykaitos, o vietoj skaidraus stiklo paketo naudojant mažos emisijos paketą, galima sutaupyti apie 14–15 % energijos. Taip pat nustatė, kad sienas dažant šviesiomis spalvomis galima sutaupyti 3–10 % energijos.

Assem ir Al-Mumin (2010) klimatui, būdingam Arabų šalims, analizavo visiškai įstiklinto fasado pikines vėsinimo galias ir pateikė rekomendacijas, kaip jas mažinti. Pagrindinės rekomendacijos yra naudoti įstiklinimą, kurio šviesos praleisties koeficientas ne mažesnis nei 40 %, o saulės energijos praleisties koeficientas turi būti mažesnis nei 40 %.

Su ir Zhang (2010) atliko administracinio pastato, esančio Šanchajuje, SFĮP ploto bei stiklo paketo įtakos per pastato gyvavimo ciklą vertinimą ir nustatė, kad fasado įstiklinimo plotas per visą jo gyvavimo ciklą daro reikšmingą įtaką

pastato energijos poreikiams tik esant viengubam skaidriam stiklo paketui, o dvigubam skaidriam ir dvigubam su mažos emisijos dangą – įtakos praktiškai nedaro. Autoriai, įvertinę energijos poreikius šildymui ir vėsinimui (apšvietimas nevertinamas), viengubo skaidraus stiklo paketo SFIP rekomenduoja 40–50 %.

Hyde ir Pedrini (2002), modeliuodami energijos poreikius vėsinimui ir apšvietimui, ieškojo šiltame klimate efektyviausio fasado įstiklinimo ploto, kuriam priklauso jų nagrinėtas Brisbane (Australija) esantis pastatas. Jie nustatė, kad į Šiaurę orientuotam administracinio pastato fasadui, kai nenaudojamos apsaugos nuo saulės priemonės, optimalus SFIP priklausomai nuo patalpos gylio yra 10–30 %.

Bodart ir De Herde (2002) tyrė, kokią įtaką energijos sutaupymas apšvietimui daro suminiams administracinio pastato pirminės energijos poreikiams. Jie tyrė vieną administracinio pastato vidinę patalpą, keisdami jos plotį, langų plotus, jų išdėstymą, šviesos praleisties koeficientus bei orientaciją. Tyrimas buvo atliekamas apšvietimo sistemos energijos poreikius modeliuojant programa Simulink, o mikroklimato sistemų energijos poreikius (išskyrus sistemų siurblių energijos poreikius) programa TRNSYS. Nustatyta, kad Belgijos klimato, patalpai, kurios plotis 2,7 m, įdiegus apšvietimo sistemos valdymą pagal apšvietimą, galima sutaupyti 50–80 % energijos apšvietimui, lyginant su tuo atveju, kai apšvietimas įjungtas visą darbo dieną. Taip pat jie nustatė, kad tada, kai nėra apšvietimo sistemos valdymo, energijos poreikiams apšvietimui gali tekti iki 50 % pastate suvartojamos PE (nevertinami poreikiai mikroklimato sistemų siurbliuose ir biuro įrangos poreikiai). Įdiegus apšvietimo valdymą, PE poreikių balanse apšvietimui priklausomai nuo orientacijos bei SFIP tenka nuo 7 iki 40 %, o bendrai suminiai pirminės energijos sutaupymai sudaro 36–43 %.

Gratia ir De Herde (2003) taip pat Belgijos klimato sąlygomis tyrinėjo administracinio pastato kompaktiškumo, orientacijos, apsaugos nuo saulės priemonių, apšiltinimo lygio, vidinių šilumos šaltinių, pastato inertiškumo, vėdinimo būdo įtaką energijos poreikiams šildymui ir vėsinimui, siekdami pateikti architektams rekomendacijas dėl mažai energijos vartojančių pastatų charakteristikų. Įtakos energijos poreikiams vertinimą Gratia ir De Herde atliko naudodami Belgijos sąlygoms sukurtą programą OPTI ir programą TAS. Jie nagrinėjo du konkrečius administracinius pastatus. Jų pateiktos rekomendacijos jau buvo minėtos 1.3.1 ir 1.3.6 skyreliuose.

Karlsson *et al.* (2001) pasiūlė metodą, kaip nesudėtingai paskaičiuoti per langus patekusį šilumos kiekį, naudojant tik lauko temperatūras, spinduliuotę ir lango šiluminę bei spektrinę charakteristiką. Jų metodas leidžia atlikti lango efektyvumo įvertinimą skirtingoms orientacijoms ir vietovėms, tačiau jis netinkamas pastatams su dideliais įstiklinimo plotais.

Hestnes ir Kofoed (2002) atliko energijos efektyvumo didinimo esamuose administraciniuose pastatuose priemonių analizę ir nustatė, kad daugeliu atveju

juose taip pat galima pasiekti, kad galutinės energijos suvartojimas būtų mažesnis nei 100 kWh/m^2 , t. y. toks pats kaip naujų mažai energijos vartojančių pastatų.

Mast ir Stec (2006) Olandijos klimatinėse sąlygose vertino dvigubo fasado, natūralaus vėdinimo ir naktinio vėdinimo efektyvumą. Vertindami kompleksiskai energijos poreikius šildymui, vėsinimui ir vėdinimui (taip pat ir elektros poreikius transportavimui), nustatė, kad naktinis mechaninis vėdinimas gali sumažinti vėsinimo įrangos galingumus iki 40 % be jokių papildomų investicijų, o natūralus vėdinimas kartu su naktiniu vėsinimu gali labai drastiškai sumažinti vėsinimo galingumus ir sąnaudas, net iki 60–70 %. Derinant dvigubą fasadą (arba atitinkamas išorines žaliuzes) kartu su natūraliu vėdinimu ir naktiniu vėsinimu su išankstine kontrole gali sumažinti vėsinimo įrangos galingumus iki 78 %, o energijos sąnaudas vėsinimui iki 90 %.

Tzempelikos ir Athienitis (2007) Monrealio (Kanada) mieste esančiam administraciniam pastatui pavalandžiui modeliuodami energijos poreikius apšvietimui, šildymui ir vėsinimui nustatė SFĖP įtaką energijos poreikiams bei darbo vietos NA. Jie nustatė, kad į pietus orientuotam fasadui pakankamas SFĖP yra 30 %, nes jis per metus 76 % darbo laiko užtikrina 500 lx natūralią darbo vietos apšvietą. Tzempelikos ir Athienitis skaičiavimais, įdiegus pastatui apšvietimo sistemos valdymą, kai apšvietimas įjungiamas/išjungiamas pagal nustatytą apšvietą, energijos poreikiai apšvietimui sumažinami 77 %, o vėsinimui – 16 %.

Švedijos klimato administracinio pastato energijos poreikius priklausomai nuo įstiklinimo charakteristikų tyrė Bülow-Hübe (1998) ir Poirazis (2005). Bülow-Hübe, naudodama administracinio pastato šilumos ir vėsos poreikiams modeliuoti programą DEROB-LTH, nustatė, kad Lundo mieste (Švedija) efektyviausias galutinės energijos poreikių požiūriu pietinei orientacijai yra 10 % SFĖP, kai lango šilumos perdavimo koeficientas $U=0,97 \text{ W/m}^2\text{K}$, saulės energijos praleisties koeficientas $g=0,5$, o šviesos praleisties koeficientas $\tau=0,66$. Sumodeliavusi energijos poreikius apšvietimui (su apšvietimo sistemos valdymu pagal apšvietą) naudodama programą ADELIN 2.0 ji gavo, kad galutinės energijos poreikiai šildymui geriausiu nagrinėtu atveju yra $58 \text{ kWh}_T/\text{m}^2$, vėsinimui – $8 \text{ kWh}_T/\text{m}^2$, o apšvietimui – $27 \text{ kWh}_E/\text{m}^2$.

Tuo tarpu Poirazis (2005), vienintelis iš minėtų tyrėjų, nagrinėjo pastato energijos poreikius kompleksiskai, t. y. įvertino visus energijos poreikius, kurie yra priklausomi nuo pastato įstiklinimo charakteristikų (žr. 1.2.2. sk.). Jis modeliuodamas programa IDA ICE 3.0 Švedijos klimato konkrečių administracinių pastatų, išnagrinėjo 7 skirtingas pastato įstiklinimo alternatyvas keisdamas SFĖP, stiklo paketus, langų apsaugos nuo saulės priemones ir pastato orientaciją. Jis nustatė, kad pastato galutinės energijos poreikių priklausomybė nuo pastato orientacijos didėja kartu su įstiklinimo plotu, o pastatui su vienodai įstiklintais fasadais energijos poreikiai yra nežymiai mažesni, kai jo ilgoji ašis eina šiaurės–

pietų kryptimis. Poirazis teigimu, nors didelis SFĖP yra energiškai neefektyvus, tačiau teisingai parinkus įstiklinimo parametrus, energijos poreikių skirtumą tarp nedidelio (30 %) ir didelio (100 %) SFĖP galima sumažinti iki 15 %.

Nemaža dalis mokslininkų, tarp jų ir jau minėtų aukščiau, nagrinėjo langų apsaugos nuo saulės priemonių įtaką administracinių pastatų energijos poreikiams. Apsaugos nuo saulės priemonės yra naudingos energijai taupyti tiek vasarą, tiek žiemą. Žiemą šios priemonės labiau naudingos kontroliuojant šviesą. Dubois atlikta studija (1998) nurodo, kad gerai parinktos apsaugos nuo saulės priemonės gali sumažinti energijos poreikius vėsinimui net iki 80 %. Tuo tarpu Eicker (2009) nurodo, kad naudojant išorines langų apsaugos nuo saulės priemones galima sumažinti saulės šilumos pritekėjimus 80–90 %, o vidinės – iki 55 %. Minėti Gratia ir De Herde (2003) nurodo, kad atspindinčios dangos naudojimas yra mažiau naudingas, nei išorinės užlaidos, kurias naudojant, Belgijos klimato orientuotam į pietus pastate galima sutaupyti iki 45 % energijos vėsinimui, o pastate, orientuotam į šiaurę, – iki 33 %. Tuo tarpu Olandijos sąlygomis, naudojant išorinės žaliuzes arba žaliuzes tarp dvigubo fasado stiklų, energijos poreikių vėsinimui sumažėjimą Mast ir Stec (2006) nurodo iki 50 %. Tzempelikos ir Athienitis (2007) aukščiau aprašytam pastatui papildomai pritaikius išorinius roletus gavo energijos poreikių vėsinimui sumažėjimą lygų 50 %. Palmero-Marrero ir Oliveira (2010), naudodami TRNSYS ir EES modeliavimo programas analizavo išorinių vertikalių ir horizontalių žaliuzių įtaką skirtingos orientacijos fasadams penkiuose skirtinguose miestuose (Meksike, Kaire, Lisabonoje, Madride ir Londone) ir nustatė, kad Londono klimato naudojant išorines žaliuzes be automatinio valdymo, energijos poreikiai (vertinant šildymą ir vėsinimą) kai kuriais atvejais gali būti netgi didesni, nei tada, kai nenaudojamos jokios žaliuzės.

Minėtiems atliktiems tyrimams pastatų energijos suvartojimo optimizavimo srityje trūksta universalumo, nes daugeliu atveju yra nagrinėjamas vienas ar keli pastatai, su konkrečiai vietai būdingais klimatiniais duomenimis. Be to, išvardyti tyrėjai savo darbuose vertina nagrinėjamų sprendimų įtaką skirtingiems energijos poreikiams ir trūksta tyrimų, kai pastato energijos poreikiai būtų nagrinėjami kompleksiskai.

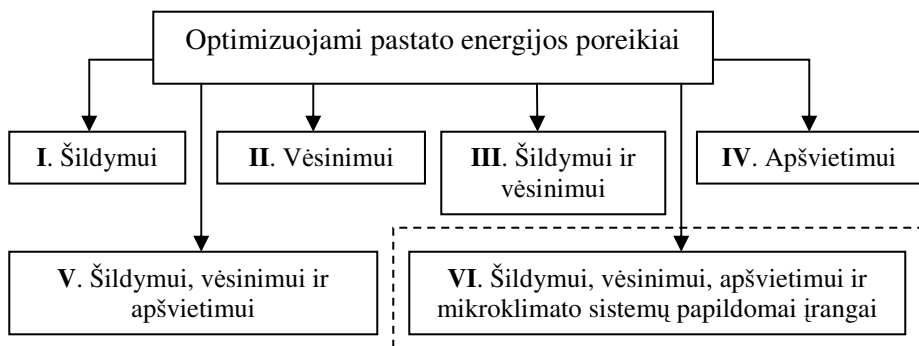
1.5. Pirmojo skyriaus išvados

Pastato energinis naudingumas didele dalimi apsprendžiamas ankstyvojoje jo architektūrinės-konstruktinės dalies projektavimo stadijoje, todėl šiame etape priimti sprendimai daro įtaką energijos suvartojimui visose pastato gyvavimo ciklo etapuose, o ypač didelė įtaka daroma pastato naudojimo stadijoje. Dėl šios priežasties jai turi būti skiriamas didžiausias dėmesys.

Vienas iš svarbiausių pastato komponentų energijos suvartojimo, šiluminio, regimojo, psichologinio ir akustinio komforto atžvilgiais yra langai. Administraciniuose pastatuose, skirtingai nei gyvenamuose, reikalingas oro kondicionavimas, o jis didžiąja dalimi nulemiamas fasado įstiklinimo charakteristikų. Dėl šios priežasties teisingos orientacijos, efektyvaus ploto ir charakteristikų langai yra labai svarbūs norint suprojektuoti energetiškai efektyvų pastatą.

Administracinių pastatų energinio efektyvumo srityje yra atlikta nemažai darbų, tarp jų ir ieškant efektyviausio įstiklinimo ploto, orientacijos ir kitų charakteristikų. Visgi, kaip parodė literatūros apžvalga, didžiąjai daliai darbų trūksta universalumo, nes nagrinėjamas vienas ar keli atvejai konkrečioms klimatinėms sąlygoms, šie darbai parodo tam tikrų sprendimų poveikio reikšmę pastato energijos poreikiams.

Pagal tai, kokie administracinio pastato energijos poreikiai vertinami, tyrimus galima suskirstyti į šešias grupes (1.4 pav.).



1.4 pav. Atlikti tyrimai sugrupuoti pagal įvertintus energijos poreikius
Fig. 1.4. Research works grouped according to estimated energy demand

Daugiausiai architektūrinių-konstrucinių sprendimų įtakos optimizuojant pastato energijos poreikius tyrimų gali būti priskirta II–IV grupėms. I grupės tyrimų šioje srityje mažiau dėl to, kad administraciniuose pastatuose energijos poreikiai šildymui yra sąlyginai maži ir pagrindiniai jiems įtaką darantys veiksniai, tokie kaip optimali atitvarų šiluminė izoliacija, yra pakankamai išnagrinėti. Tuo tarpu tyrimų, kai administracinio pastato architektūrinių-konstrucinių sprendimų (elementų) įtaka energijos poreikiams vertinama kompleksiskai (VI grupė) yra vienetai.

Apibendrinant atliktus tyrimus galima daryti išvadą, kad Lietuvoje ar kaimyninėse šalyse, esančiose toje pačioje klimatinėje zonoje, nėra atlikta tyrimų, kur būtų kompleksiskai analizuojamas pastatas kartu su mikroklimato ir apšvietimo sistemomis.

Kita įstiklinimo charakteristikų tyrimų poreikio priežastis yra atnaujintos pastatų energinio naudingumo direktyvos nuostatos, kurios reikalauja griežtinti reikalavimus pastatų energiniam naudingumui. Lietuva, kaip ir jos kaimyninės šalys, iki šiol net neturi oficialios mažai energijos vartojančio pastato sąvokos, todėl tokių reikalavimų įgyvendinimai yra tikras iššūkis. Siekiant didinti mažai energijos vartojančių ir beveik nulinės energijos pastatų skaičių, turi būti sukurta aiški strategija ir sukurta nuosekli teisės aktų sistema, o tam reikalingi pastatų energinio efektyvumo tyrimai atitinkamomis klimatinėmis sąlygomis.

2

Pastato energijos poreikių nustatymo metodikos

Antrajame skyriuje yra pateikiama pastato naudojimo etapo energijos poreikių modeliavimui taikomų integruoto modeliavimo metodų apžvalga bei palyginimas. Taip pat atliekamas pagrindinių esamų pastatų energinio modeliavimo programų galimybių ir naudojamų modeliavimo metodų palyginimas. Pasirinkus tinkamą tolimesniam modeliavimui atlikti programą, atliekamas jos testavimas empiriniu metodu.

Skyriaus tematika paskelbtas vienas autoriaus straipsnis (Sosnovskaja ir Juodis 2006).

2.1. Pastato kaip sistemos sprendimas

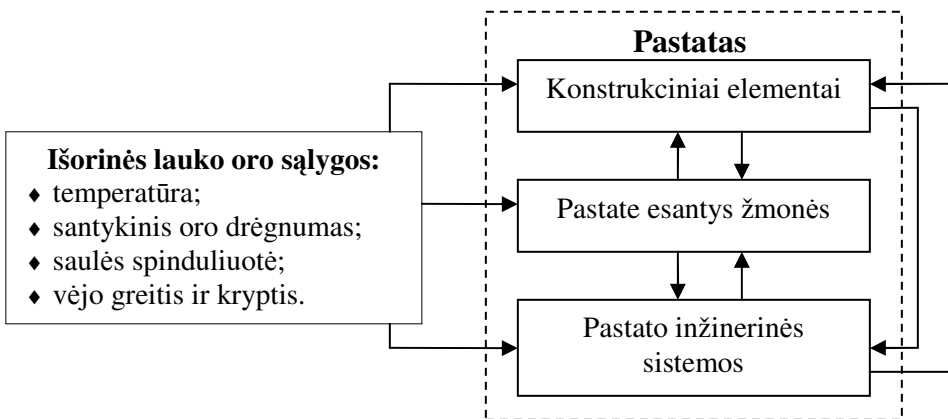
Inžinerinėje praktikoje paplitę supaprastinti metodai, kai atitvaros vertinamos atskirai nuo inžinerinių sistemų, o žmogaus elgesys įvertinamas tik minimaliai, neleidžia teisingai prognozuoti pastato kaip energetinės sistemos elgesio.

Lietuvoje, projektuojant pastato šildymo sistemą, šildymo sistemos galia ir energijos poreikiai šildymui nustatomi pagal STR 2.09.04:2008 „Pastato šildymo sistemos galia. Šilumos poreikis šildymui“. Pagal šiame reglamente patei-

kiamą metodiką metiniai energijos poreikiai šildymui yra skaičiuojami pamėnesiui, t. y. naudojant vidutines mėnesines reikšmes (temperatūras, saulės spinduliuotės ir kt.). Energijos poreikių skaičiavimas taip pat gali būti atliekamas remiantis LST EN ISO 13790, kuriame yra pateikiamos kelios alternatyvios skaičiavimo metodikos:

- ◆ Pusiau stacionarus skaičiavimo metodas, kai energijos poreikiai skaičiuojami pamėnesiui arba šildymo/vėsinimo sezonui. Toks metodas tinkamas, kai vertinami metiniai energijos poreikiai, tačiau atskiriems mėnesiams, ypač pereinamiesiems tarp šildymo ir vėsinimo sezonų, gaunamos santykinai didelės paklaidos.
- ◆ Supaprastintas valandinis dinaminis skaičiavimo metodas, kuris paremtas valandiniais žmonių buvimo, įrangos veikimo, nustatytosios temperatūros ir kitais grafikais. Šis metodas duoda valandinius energijos poreikius, tačiau vertinant atskiras valandas metodas taip pat gali duoti santykinai dideles paklaidas.
- ◆ Detalus dinaminis modeliavimas (standartas šiam metodui pateikia tik bendrus principus).

Pastatas yra sudėtinga sistema su daugybe jame vykstančių fizikinių reiškinių (2.1 pav.). Pastato konstrukciniai elementai, inžinerinės sistemos ir pastate esantys žmonės yra veikiami lauko oro sąlygų. Savo ruožtu atitvarose akumuluojamas šilumos (šalčio) kiekis priklausomas ir nuo vidinių šilumos pritėkėjimų, kurie atsiranda nuo žmonių bei mikroklimato sistemų patiekiamos į pastatą energijos. Pastato konstrukcijos lemia pastato inžinerinių sistemų veikimą bei žmonių savijautą. Žmogus daugiau ar mažiau turi galimybę reguliuoti patalpos inžinerinių sistemų veikimą.



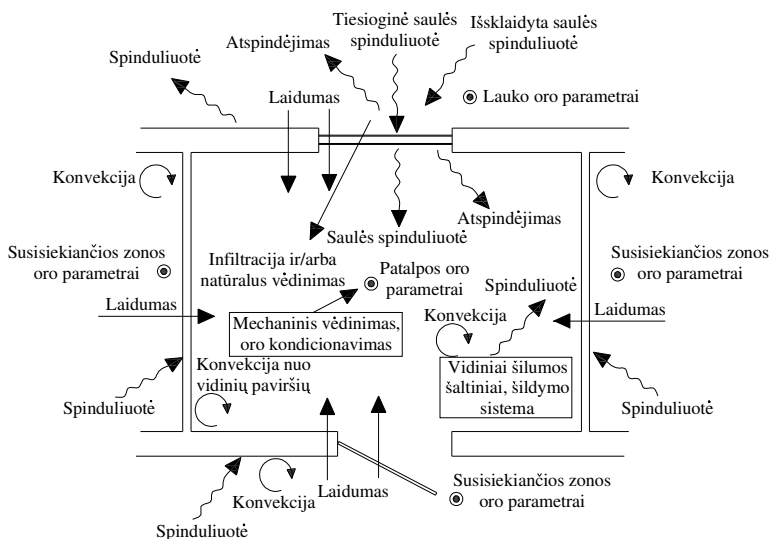
2.1. pav. Pastatas kaip sistema

Fig. 2.1. Building as system

Taigi, gaunama sudėtinga glaudžių ryšių tarp lauko oro sąlygų, pastato konstrukcinių elementų, inžinerinių sistemų bei žmonių sistema. Šiems sudėtingiems ryšiams įvertinti neužtenka supaprastintų inžinerinių metodų, todėl turi būti naudojami dinaminiai detalus modeliavimo metodai.

2.2. Pastate vykstantys šiluminiai reiškiniai

Remiantis Clarke (2001) 2.2 paveiksle supaprastintai pavaizduoti pagrindiniai patalpos oro parametrus veikiantys procesai. Pavaizduoti energijos srautai gali būti ir priešingų kryčių, o kiekvienai atitvarai turi būti dar skaičiuojamos kiekvieno jos sluoksnio paviršiaus temperatūros. Procesai kaip jau minėta sudėtingi, ypač spinduliavimo, nes vienos atitvaros spinduliai pasiekia kitą paviršių ar atitvarą, kur iš dalies absorbuojami ir iš dalies atspindimi, priklausomai nuo to paviršiaus fizikinių charakteristikų. Taip pat turi būti įvertinta kiekvienos atitvaros šiluminė inercija ir šilumos akumuliacija.



2.2 pav. Patalpos energijos srautai
Fig. 2.2. Energy flowpaths of the room

Sudėtingiems pastate vykstantiems procesams aprašyti pasitelkiami matematiniai modeliai bei šilumos ir masės mainų lygtys.

Nepaisant tikimybinės oro judėjimo patalpoje reiškinų prigimties, įmanoma sukonstruoti įvairaus sudėtingumo oro judėjimo patalpoje modelius, kurie gali būti pagrįsti tiek viso pastato parametrų regresija pagrįstais matavimo duomeni-

mis, tiek naudojant skaitinius lygčių sprendimo metodus, kai sprendžiamos tolydumo (nepertraukiamumo), judėjimo (momento tvermės), energijos tvermės ir difuzijos (koncentracijos tvermės) lygtys (Vaitiekūnas ir Špakauskas 2003; Clarke 2001).

Tolydumo lygtis sudaroma remiantis aplinkos masės tvėrmės dėsnium (masė=tankis×tūris):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0, \quad (2.1)$$

judėjimo lygtis:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \rho g \beta (\theta_\infty - \theta), \quad (2.2)$$

energijos lygtis:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i H) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{k}{C_p} \frac{\partial H}{\partial x_i} \right] + S_H, \quad (2.3)$$

difuzijos lygtis:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j C) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho D \frac{\partial C}{\partial x_j} \right] + S_C, \quad (2.4)$$

čia t yra laikas, x_i – koordinačių ašis (= x , y ir z), ρ – tankis (kg/m^3), u_i – greitis atitinkamos koordinačių ašies kryptimi (= u , v , w ; m/s), p – slėgis (N/m^2), g – gravitacijos konstanta (m/s^2); μ – klampis ($\text{kg}/\text{m s}$), H – savitoji entalpija (J/kg); C – medžiagos koncentracija (kg/kg), k – laidumas ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$); D – difuzijos koeficientas (m^2/s), C_p – specifinė slėginė šiluma ($\text{J}/(\text{kg K})$), β – oro šiluminis plėtimosi koeficientas ($1/\text{K}$); θ_∞ – projektinė temperatūra ($^\circ\text{C}$) ir S_H ir S_C – energijos ir koncentracijos (šaltinio) nariai (W/m^3 ir $\text{kg}/(\text{m}^3 \text{ s})$).

Tai yra pagrindinės lygtys, kuriomis galima aprašyti patalpoje vykstančius procesus. Išskleidus komponentus, kurie taip pat kinta laike, šios lygtys tampa sudėtingos ir reikalauja ne mažai žinių apie pačią energiją ir pagrindinius energijos mainų procesus – konvekciją, laidumą, spindulinius mainus bei masės mainus. Šios lygtys gali būti sprendžiamos skirtingais metodais.

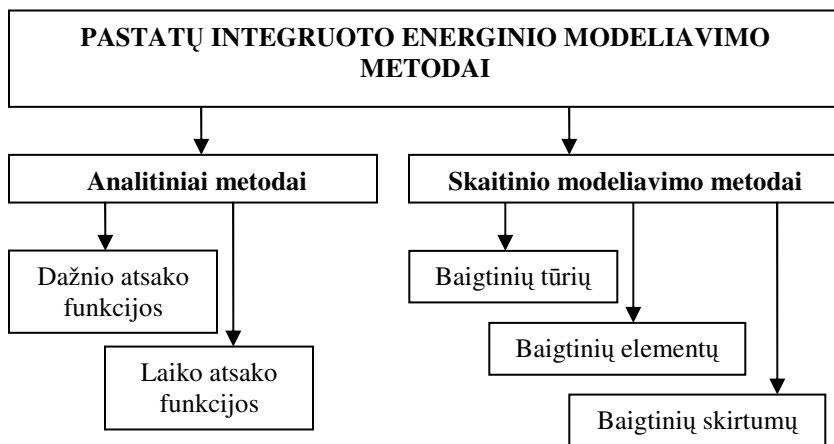
Vertinant grynai iš matematinės pusės, pastato energijos mainams ir įrangai aprašyti reikalingos trijų tipų diferencialinės lygtys: paprastos pirmos eilės diferencialinės lygtys, aprašančios bendras termofizikines savybes; antros eilės parabolines dalines diferencialines lygtys, naudojamos detalaus modeliavimo rei-

kalaujančių sričių izoliacijai/galiai aprašyti; elipsinės/hiperbolinės dalinės diferencialinės lygtys, naudojamos aprašyti fluidų srautams ir konvekcijai.

2.3. Dinaminiai pastatų energijos poreikių modeliavimo metodai

Pastatas ir jo inžinerinės sistemos yra glaudžiai susiję, todėl pastato inžinerinių sistemų charakteristikų įtraukimas į pastato energijos balanso sprendimą palaipsniui, kaip tai daroma praktikoje, yra ne visai teisingas. Tikslesnis sprendimo metodas – dinaminis inžinerinių sistemų ir pastato sprendimas vienu metu, kai visiškai atsižvelgiama į erdvinės ir laikinas sąveikas.

Detaliai pastatų energijos poreikių modeliavimo metodus aprašo Clarke (2001) bei Underwood ir Yik (2004). Remiantis jais pastatų energijos modeliavimo metodus galima suskirstyti į dvi pagrindines grupes: analitiniai modeliavimo metodai ir skaitiniai modeliavimo metodai, kurie taip pat skirstomi į atskirus metodus (2.3 pav.).



2.3 pav. Pagrindiniai pastatų energiniame modeliavime taikomi metodai

Fig. 2.3. General methods applied in building energy simulations

Analitinių integruoto modeliavimo metodų tikslas – numatyti viso pastato elementų (atitvarų ir inžinerinių sistemų) tarpusavio sąveiką. Sprendžiant uždavinių analitiniais metodais, įvertinant pradinių duomenų būdingus neapibrėžtumus, lygiagrečiai sprendžiamos visų energijos srautų lygtys. Populiariausias analitinio modeliavimo metodas yra atsako funkcijos. Abi šio metodo atšakos – laiko ir dažnio atsako funkcijos metodai yra taikomi nestacionariam laidumui ir tarpzoniniams energijos srautams spręsti (Clarke 2001).

2.4. Analitiniai modeliavimo metodai

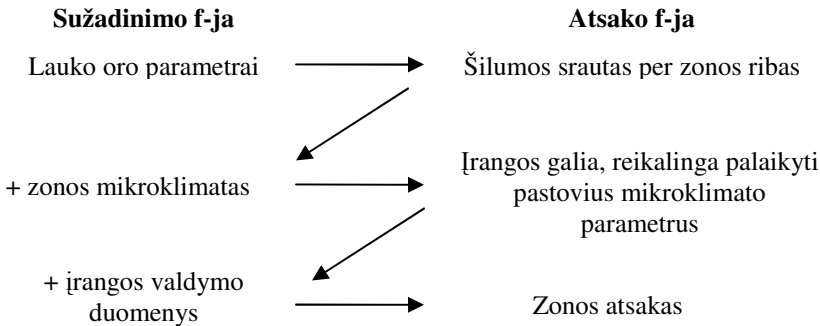
Tiek laiko, tiek dažnio atsako funkcijos metodai duoda sistemas diferencialinių lygčių, aprašančių šilumos laidumą kietuose kūnuose, šilumos perdavimą paviršiuose ir šilumos mainus tarp fluidų.

Šių metodų savybė yra ta, kad daugelyje atvejų diferencialinės lygtys yra transformuojamos į grynai algebrines, o dalinai diferencialinės lygtys – į paprastas diferencialines. Analitinis minėtų diferencialinių lygčių sprendimo būdas galimas panaudojant Laplaso transformacijas (Davies 2002).

2.4.1. Laiko atsako funkcijos metodas

Laiko atsako funkcijos sprendimo metodas susijęs su analitinių lygčių sprendimu laiko atžvilgiu. Pagrindinis laiko atsako metodo uždavinys – nustatyti sistemos atsaką į kažkokio vieneto, susijusio su realybėje tikėtinomis kraštinėmis sąlygomis, sužadinimą.

Šis metodas, kaip ir dažnio atsako funkcijos metodas, gali būti naudojamas nustatyti patalpos vyraujančią temperatūrą nekondicionuojamame pastate bei šildymo/vėsinimo energijos poreikius esant pastoviems arba kintamiems patalpos mikroklimato parametrams. 2.4 paveiksle pavaizduota bendro pastato zonos atsako į išorinių ir vidinių sąlygų pokyčius skaičiavimo žingsniai.



2.4 pav. Bendras zonos atsakas – žingsnių seka (Clarke 2001)

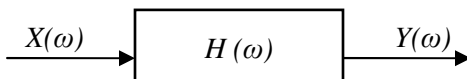
Fig. 2.4. Overall zone response – sequence of steps

Dėl skirtingų šilumos srautų sąveikos, norint šiai zonai nustatyti bendrą vieneto atsako funkciją esant bet kurio vieneto sužadinimui, būtina vertinti visus energijos srautus kaip vieną integruotą sistemą. Tai gali būti atliekama formuluojant energijos balanso lygtis kiekvienai didesnei sričiai, esančiai zonos viduje, taip susiejant jas tarpusavyje laiko ir erdvės atžvilgiu.

Detalesnės informacijos apie šio metodo taikymą pastato šiluminiams procesams skaičiuoti galima rasti Clarke (2001) knygoje.

2.4.2. Dažnio atsako funkcijos metodas

Dažnio atsako funkcija matematiškai aprašo ryšį tarp sistemos sužadinimo (poveikio) ir jos atsako (pokyčių). Remiantis Wren (2009) ir Irvine (2000) 2.5 paveiksle šis ryšys pavaizduotas schematiškai.



2.5 pav. Ryšis tarp sistemos poreikio ir atsako
Fig. 2.5. Relation between system's input and output

čia $X(\omega)$ – poveikio (sužadinimo) funkcija dažnio srityje, $Y(\omega)$ – sistemos atsako (pokyčių) funkcija dažnio srityje, $H(\omega)$ – sistemos dažnio atsako funkcija.

Sistemos dažnio atsako funkcija bendru atveju išreiškiama lygtimi (Underwood ir Yik 2004; Wren 2009; Irvine 2000):

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)}. \quad (2.5)$$

Jeigu sužadinimo funkcija $X(\omega)$ yra sinusoidinė fiksuotos amplitudės, tai ir sistemos dažnio atsako funkcija bus sinusoidinė, kurios dažnis tas pats, bet skirtinga fiksuota amplitudė ir fazė pasislinkusi (Underwood ir Yik 2004).

Taikant dažnio atsako funkcijos metodą pastatų energiniame modeliavime, pagrindinė daroma prielaida yra, kad lauko oro parametrų laiko eilutės vertinamos kaip eilė periodinių ciklų. Lauko oro parametrų įtaka yra vertinama kaip tolydi funkcija $f(t)$, kurioje vienas narys yra stacionarus, o kiti – harmoninės funkcijos (Clarke 2001). Kiekviena pasirinkta harmoninė funkcija tokiu atveju gali būti apdorojama atskirai ir modifikuojama atitinkamais atsako faktoriais atitinkamai jos dažniui. Sistemos atsakas gaunamas sumuojant atskirų harmoninių funkcijų individualius efektus.

Dėl prielaidų apie periodinį sužadinimą, šis metodas yra gerai pritaikytas nustatyti projektines vėsinimo galias pagal nustatytus lauko oro parametrus, tačiau jis tampa gremėzdiškas, kai reikia nustatyti vėsinimo galias pagal realius lauko oro parametrus.

Detalesnės informacijos apie šio metodo taikymą pastato šiluminiams procesams skaičiuoti galima rasti Clarke (2001) knygoje.

2.5. Skaitiniai metodai

Pastate vykstančius šiluminius procesus aprašančių diferencialinių lygčių sprendimui, kaip alternatyva analitiniams metodams, gali būti naudojami skaitiniai metodai, kurie atsirado kaip tobulėjančių kompiuterinių technologijų pasekmė. Skaitiniai sprendimo metodai remiasi kai kurių pagrindinių diferencialinių lygčių dalinių išvestinių aproksimacija (apytiksliai sprendimu), pavyzdžiui, – Furje lygtimi, kai vyrauja laidumas, Navje-Stokso judėjimo lygtimi fluideo srautui.

Uždavinio sprendimas skaitiniais metodais iš esmės susideda iš trijų žingsnių (Vaitiekūnas 2007):

1. Sistemos skaitinis diskretizavimas, kai kiekvienas diferencialinių lygčių dalinėmis išvestinėmis narys paverčiamas skaitiniu analogu. Šiai diskretizacijai atlikti gali būti taikomi įvairūs metodai.
2. Mazgo lygčių sistemos sudarymas.
3. Lygčių sistemos lygiagretus sprendimas gaunant būsenos kintamuosius.

Labiausiai paplitę skaitinės diskretizacijos metodai yra baigtinių elementų, baigtinių skirtumų ir baigtinių tūrių. Galima išskirti tokius bendrus šių metodų bruožus (Vaitiekūnas 2007):

- ♦ Sprendžiama lygtis naudojama kintamųjų reikšmėms baigtiniam nagrinėjamų srities taškų skaičiui gauti.
- ♦ Reikia žinoti pradinių sąlygų sistemą.
- ♦ Reikia žinoti uždavinio kraštines sąlygas.
- ♦ Diskretinė lygtis gali duoti išreikštines ir neišreikštines formas.

2.5.1. Baigtinių skirtumų metodas

Vienas iš populiariausių skaitinių metodų yra baigtinių skirtumų metodas. Underwood ir Yik (2004) teigimu, šis metodas yra naudojamas daugumoje pastatų energinio modeliavimo programų.

Taikant baigtinių skirtumų metodą, nagrinėjama sritis padengiama tiesių, bendruoju atveju – kreivių tinklu ir tinklo linijų susikirtimo taškuose diferencialinė lygtis keičiama skirtumine lygtimi. Kitaip tariant, kiekviena nežinoma reikšmė yra sekančiu laiko žingsniu žinomų reikšmių funkcija. Taikant šį metodą būtina, kad taškų tinklas būtų tipologiškai reguliarus (tinklo ląstelės turi atrodyti kaip kuboidai).

Baigtinių skirtumų metodas remiasi Teiloro eilučių naudojimu (Vaitiekūnas ir Špakauskas 2001; Clarke 2001; Heinzl 2007). Deja, ši metodika yra per gremėzdiška ir sudėtinga taikyti kai kuriems paprastiems uždaviniams spręsti, o jos taikymas modeliuojant pastatus yra komplikuoatas dėl pastate vykstančių skirtingų procesų vienalaikiškumo (Clarke 2001). Todėl alternatyvus metodas tokiu atveju yra tvermės dėsnų taikymas sistemos mažiems baigtiniams tūriams.

2.5.2. Baigtinių tūrių metodas

Baigtinių tūrių metodas buvo specialiai išstobulintas šilumos pernešimo ir fluidų tekėjimo lygtims spręsti (Vaitiekūnas ir Špakauskas 2001) ir, kaip jau minėta, jis labiau tinkamas naudoti pastatų energiniam modeliavimui, nei baigtinių skirtumų metodas.

Baigtinių tūrių metodas yra skirtas apie baigtinį tūrį esančioms kintamųjų reikšmėms skaičiuoti. Lyginant su baigtinių skirtumų metodu, jo privalumas yra tas, kad jis nereikalauja struktūrizuoto tinklo. Šis metodas yra geresnis už kitus ir tuo, kad saugomos kintamųjų reikšmės yra baigtinio tūrio viduje, o ne mazge ar paviršiuje, todėl užsiduodant ribines sąlygas negriaunama visa sistema.

Šis metodas užtikrina sprendimo rezultatus, kurie tenkina tvėrmės dėsnius net tada, kai kontrolinių tūrių skaičius yra nedidelis (Clarke 2001).

2.5.3. Baigtinių elementų metodas

Sprendžiant uždavinį šiuo metodu, sritis, kurioje ieškoma sprendinio, daloma į baigtinių skaičių dalių, vadinamų baigtiniais elementais. Tada kiekvieno elemento srityje diferencialinė lygtys yra dalinėmis išvestinėmis aproksimuojama, t. y. pakeičiama algebrinėmis lygtimis ir elementų algebrinės lygtys jungiamos į viena-reikšmiškai išsprendžiamą lygčių sistemą (Barauskas *et al.* 2004).

Baigtinių elementų metodui, skirtingai nei baigtinių skirtumų ir baigtinių tūrių, kuriems randamos lygtys konkrečiam taškui pagal greta esančių taškų reikšmes, gaunamos atskiros nepriklausomos lygtys kiekvienam atskiram elementui. Baigtinių elementų trūkumai tie, kad šiuo metodu sunku išvesti kraštines sąlygas, kai elemento lygtys yra suformuotos bei proceso diskretizavimas yra labiau komplikuoatas negu baigtinių skirtumų metodo (Vaitiekūnas ir Špakauskas 2001).

Šiam metodui nėra ribojimo dėl elementų briaunų taisyklingo išsidėstymo, tik briaunos tarp elementų privalo turėti bendrus mazgus kiekvienam besiribojančiam elementui. Šis elementų išdėstymo lankstumas leidžia modeliuoti labai sudėtingą elementų grupių geometriją (Vaitiekūnas 2007).

2.6. Metodų palyginimas

Atsako funkcijos metodas yra specifinis analitinis metodas, matematiškai elegantiškas ir yra daugelio tyrimų metų rezultatas, tačiau tai yra metodas, kuris iš esmės atsirado iš poreikio į rankinius sprendimo metodus įtraukus dinamines aplinkybes. Tuo tarpu skaitiniai metodai išsivystė kaip spartaus skaičiavimo technikos galios didėjimo rezultatas. Šių metodų bendrumas leidžia juos taikyti

tiesiogiai plačiam uždavinių spektrui – pastato šilumos mainams, patalpų mikroklimato procesams, kontrolei, patalpos oro kokybei, elektros srautams, atsinaujinančios energijos gamybai ir pan., o kas svarbiausia, šių procesų integracijai.

Analitiniai metodai duoda riboto pritaikymo lygtis, tačiau leidžia nustatyti temperatūras ir šilumos srautus bet kokiam modeliuojamos sistemos taške. Tuo tarpu skaitiniai metodai praktiškai gali būti taikomi bet kokio sudėtingumo laipsnio problemoms spręsti, tačiau jie yra tinkami tik tam tikriems nustatytiems taškams, o šie taškai apima savybes, kurios gali būti pritaikytos tik tam tikrai mažai sričiai (lango, sienos, mikroklimato sistemos elemento daliai).

Kompiuterinės programos, kurios pagrįstos atsako funkcijos metodais turi vieną didelį privalumą – jų rezultatus nesudėtinga patikrinti. Tuo tarpu skaitinių metodų skirtingos dalys yra priklausomos viena nuo kitos, sudėtinga pritaikyti apribojimus, keliamus vertinimo procedūrose. Nors lyginant realių bandymų rezultatus su skaitinių metodų rezultatais šiems metodams lygių nėra, numatyti pastato energiniam efektyvumui atsako funkcijos ir skaitiniai modeliavimo metodai yra vienodai tinkami. Darant tiesiškumo ir nekintamumo prielaidas, abu vienodai tinka įvertinti pastato dinaminės energijos srautų sąveikas (Clarke 2001).

2.7. Kompiuterinio modeliavimo programos parinkimas

Šiais laikais dauguma pastatų energinio efektyvumo problemų sprendžiama neapsieinant be vienokių ar kitokių modeliavimo programų (Hargaš *et al.* 2006; Kalz *et al.* 2006; Moosberger *et al.* 2006; Ichinose *et al.* 2006; Cremers *et al.* 2006; de Almeida Ferreira Tavares *et al.* 2007; Franzetti *et al.* 2004; Gratia ir De Herde 2003, Moeseke *et al.* 2007; Masoso ir Grobler 2008 ir kt.).

Kai kuriose ES šalyse dinaminio modeliavimo programos taikomos pastatų energiniam naudingumui sertifikuoti. Belgijos pastatų tyrimo instituto (Belgian Building Research Institute 2009) duomenimis dinaminis energinis modeliavimas yra taikomas Prancūzijoje ir Ispanijoje. Tuo tarpu Suomijoje, Norvegijoje, Airijoje, J. Karalystėje, Airijoje, Portugalijoje, Vengrijoje ir Graikijoje dinaminio modeliavimo metodai yra taikomi kartu su mėnesiniais energijos poreikių skaičiavimo metodais. Kai kurios šalys, kuriose naudojami abu metodai, leidžia pasirinkti sertifikavimo metodą, o kitose – dinaminis modeliavimas yra privalomas administraciniams pastatams.

Pirmieji pastatų dinaminio energinio modeliavimo metodai atsirado praeito amžiaus 60-ųjų viduryje. Iki tol pastatų energijos poreikiai buvo skaičiuojami

kaip stacionarus procesas, o populiariausias naudotas skaičiavimo metodas – dienolaipsnių.

Viena iš pirmųjų pastatų mikroklimato ir energijos poreikų šildymui bei vėsinimui kompiuterinio modeliavimo programų buvo išleista 1963 metais, ir ji vadinosi BRIS (Jokisalo 2008). Šiuo metu JAV Energetikos departamento duomenų bazėje (http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/) yra daugiau nei 300 įvairių pastato energetinio modeliavimo programų, sukurtų ir naudojamų įvairiose šalyse. Kiekviena iš esamų programų turi savo privalumų ir trūkumų. Nuo 1983 m. yra atlikta daugybė programų palyginimų. Jie yra išvardyti Crawley *et al.* (2008) ataskaitoje. Šioje ataskaitoje pateikiami naujausio visapusiško 20-ties pagrindinių programų: BLAST, BSim, DeST, DOE-2.1E, Ecotect, Ener-Win, Energy Express, Energy-10, EnergyPlus, eQuest, ESP-r, HAP, HEED, IDA ICE, IES<VE>, PowerDomus, SUNREL, Tas, TRACE, TRNSYS palyginimo rezultatai.

Remiantis Crawley (2005) ataskaita, yra pateikiamas trumpas penkių programų (Ecotect, EnergyPlus, ESP-r, IDA ICE, TRNSYS) pagrindinių bruožų palyginimas. Visos penkios programos modeliuoja mikroklimato sistemų galias, naudodamos šilumos balanso metodą. Šilumos balanso lygtys ESP-r ir IDA ICE sprendžiamos baigtinių skurtumų metodu, Ecotect – dažnio atsako funkcijos metodu, o EnergyPlus ir TRNSYS – laiko atsako funkcijos metodu. ESP-r, EnergyPlus, IDA ICE ir TRNSYS programose galima pasirinkti skaičiavimo laiko žingsnį, o Ecotect tokios galimybės neturi. Pastato geometrinio modelio sudarymas yra prakiškai neribojamas visose šiose programose, išskyrus TRNSYS, tačiau visose programose galimas brėžinių įkėlimas iš CAD programų. Visos šios programos atlieka analizuojamos zonos paviršių temperatūrų skaičiavimus. Saulės energijos pritekėjimai ir jų kontrolės galimybės geriausiai yra išplėstos programoje EnergyPlus. Ecotect, ESP-r, IDA ICE ir TRNSYS programos leidžia pasirinkti skaičiavimuose naudojamą dangaus modelį, kai tuo tarpu EnergyPlus programoje galimas tik anizotropinis dangaus modelis. Visos programos skaičiuoja vienmatį laidumą ir tik EnergyPlus turi galimybę skaičiuoti dvimatį ir trimatį laidumą. Ecotect modeliuoja tik idealizuotas mikroklimato sistemas, kai kitos programos turi galimybę išsamiai aprašyti atskiras sistemas. Savybę automatiškai parinkti mikroklimato sistemų komponentų galias turi tik EnergyPlus ir IDA ICE programos.

Ecotect programa yra labiau tinkama tik architektūrinės dalies optimizavimui, kai tuo tarpu TRNSYS labai gerai tinka, kai analizuojamos mikroklimato sistemų įrangos alternatyvos. Daugiausiai galimybių turi programa EnergyPlus. Tai parodė ir Vernon ir Smith (2003) atliktas EnergyPlus, TRNSYS, Energy-10 ir DOE-2 programų palyginimas pagal konkrečius kriterijus.

Renkantis programą, svarbu ne tik jos savybės, bet ir jos rezultatų patikimumas. Programos gali būti testuojamos trimis būdais: empiriniu, analitiniu ir lygi-

nimo (Neymark *et al.* 2002). Empirinio testavimo esmė, kad modeliavimo rezultatai yra lyginami su realaus pastato arba laboratoriniais eksperimentiniais duomenimis. Analitinio testavimo metu modeliavimo rezultatai lyginami su gautais sprendžiant analitiniu būdu, kai užsiduotos labai paprastos ir griežtos ribinės sąlygos. Testavimas lyginimo metodu – tai programos rezultatų lyginimas su jos pačios ar kitų, geriau vertinamų, išsamesnių ar fiziniu požiūriu tikslesnių programų rezultatais. Šių metodų privalumai ir trūkumai yra išvardyti Neymark *et al.* (2005).

Yra sukurtos ir standartizuotos pastatų energinio modeliavimo programų vertinimo procedūros, tokios kaip EN ISO 13791 (2004), EN 15265 (2007), ANSI/ASHRAE standartas 140 (2001). Standartas EN ISO 13791 nustato šilumos laidumo per sienas, spinduliuotės ilgosiomis bangomis patalpoje, išorinių langų apsaugos nuo saulės priemonių ir bendrai skaičiavimo metodo testavimą. Standartas EN 15265 nustato eilę prielaidų, reikalavimų ir testavimo procedūrų naudojamų metinių energijos poreikių šildymui ir vėsinimui skaičiavimuose. Šis standartas nenurodo jokios konkrečios metodikos, pagal kurią būtų apskaičiuojami energijos poreikiai, tik nurodoma atvejai, kokie turi būti išspręsti ir kokie turi būti atsakymai ir galimos paklaidos. ANSI/ASHRAE 2001 standarto nustatytas lyginamasis testavimas, kuris yra paremtas Tarptautinės energetikos agentūros (IEA) BESTEST procedūra. IEA taip pat yra sukūrusi ir testavimo procedūrų, tokių kaip, pavyzdžiui, ETNA ar GENECE, kurios skirtos empiriniam testavimui, taip pat egzistuoja ir kitos testavimo procedūros (Jokisalo, 2008).

Daugiausiai testuota tiek analitiniais, tiek empiriniais metodais ir daugeliu atveju geresnius rezultatus nei kitos parodė ESP-r programa (Crawley *et al.* 2005). Tačiau šio darbo tikslas – įvertinti įstiklinimo charakteristikų įtaką pastato energijos poreikiams, todėl dėl geriau išvystyto saulės energijos pritekėjimų ir jų kontrolės skaičiavimų modulio labiau tinkama programa EnergyPlus.

Loutzenhiser *et al.* (2009) atliko EnergyPlus, DOE-2,1E ir IDA-ICE programų empirinį testavimą laboratorijoje. Vidutinės absoliutinės paklaidos vėsinimo galiai atitinkamai gautos: EnergyPlus – 5,8 %, DOE-2,1E – 9,9 % ir IDA-ICE – 6 %. Kuriant EnergyPlus buvo atliekamas lyginamasis analitinis testavimas. Testuojant buvo vadovaujama ANSI/ASHRAE standartu 140 (2001), t. y. jame nurodytais įvairiais testavimo būdais, skirtais stiklo lengvųjų konstrukcijų ir mūro konstrukcijų pastatų analizei. EnergyPlus programos testavimas taip pat buvo atliekamas pagal HVAC BESTEST testavimo procedūrą (Henninger *et al.* 2004). EnergyPlus gebėjimas apskaičiuoti reikalingas zonų galias, vėsinimo įrangos galias, vėsinimo įrangos energijos poreikius ir atitinkamai zonų aplinkos parametrus buvo testuojamas 14 atvejų, kurių rezultatai buvo lyginami su kitų 7 programų rezultatais. Palyginimas taip pat buvo atliekamas su trijų analitinių sprendimų rezultatais. EnergyPlus rezultatai iš esmės skyrėsi ne daugiau nei 1 % nuo analitiniu būdu gautų rezultatų, išimtis – zonos santykinis oro drėgnumas,

kuris skyrėsi 0,2–3 %. Tronchin ir Fabbri (2008), atlikę gyvenamojo individualaus namo energijos poreikių modeliavimą su EnergyPlus programa, gavo, kad realus pastato metinis energijos suvartojimas nuo sumodeliuoto skiriasi 8,9 %, o žiemos sezonui šis skirtumas sudaro tik 0,7 %. Chantrasrisalai *et al.* (2003) atliko spindulinės sistemos modulio matavimų duomenų ir modeliavimo su EnergyPlus rezultatų palyginimą. Gautas geras (skaičiais nenurodomas) šildymo ir vėsinimo energijos sąnaudų ir vidaus temperatūrų atitikimas. Fisher *et al.* (2006), integruodami į EnergyPlus programą šilumos siurblio skaičiavimo modelį, modeliavimo rezultatus lygino su eksperimentiniais duomenimis ir nustatė, kad modeliavimo rezultatų paklaidos ribos yra $\pm 10\%$. Hamdin ir Turkmen (2008), palyginę faktinius ir sumodeliuotus su EnergyPlus energijos poreikius, gavo, kad valandinių energijos poreikių šildymui paklaida svyruoja $\pm 6,6\%$, o vėsinimui $\pm 3,8\%$. Atlikti programos vertinimai patvirtina, kad programa EnergyPlus iš esamų pastato energinio modeliavimo programų yra tinkamiausia disertacijos užsibrėžtų uždavinių sprendimui.

2.8. Šilumos balanso sprendimas EnergyPlus programoje

EnergyPlus programa atlieka integruotą modeliavimą. Tai reiškia, kad pastato elementai, pastatas ir jo sistemos yra sprendžiami vienu metu. Tokiu būdu kiekviename laiko žingsnyje kondicionuojamoje erdvėje įvertinama, kaip vieno parametro pasikeitimas daro įtaką kitam. Nortint gauti fiziškai realų modeliavimą, elementai turi būti tarpusavyje susieti. EnergyPlus programa iš esmės yra eilė funkcinių elementų, kurie tarpusavyje yra sujungti fluidų kontūrais (2.6 pav.).



2.6 pav. Vienalaikio sprendimo schema (EnergyPlus Engineering Referece 2009)

Fig. 2.6. Simultaneous solution scheme (EnergyPlus Engineering Referece 2009)

Kontūrai yra dalijami į vartojimo ir tiekimo puses, o sprendimo schema iš esmės priklauso nuo sėkmingo tiekimo ir vartojimo pusių susiejimo atliekant iteracijas naudojant Gauso-Zeidelio metodu. EnergyPlus programai atliekant sprendimą persidengimo su zonos šilumine talpa metodu, informacija iš ankstes-

nių laiko žingsnių naudojama numatyti sistemos atsaką ir atnaujinti zonos temperatūrą esamu laiko žingsniu.

Modeliavimas yra pradedamas nuo zonos šilumos balanso, kuris šiuo atveju užrašomas (EnergyPlus Engineering Referece 2009):

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{st}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty i} - T_z) + \dot{Q}_{sys}, \quad (2.6)$$

čia $C_z \frac{dT_z}{dt}$ – energija, kurią sukaupė zonos oras; $\sum_{i=1}^{N_{st}} \dot{Q}_i$ – konvekcinių vidinių

šilumos pritekėjimų suma; $\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$ – konvekcinis šilumos atidavimas

nuo zonos paviršių (h – konvekcijos koeficientas); $\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z)$ – šilumos

perdavimas dėl oro maišymosi tarp zonų; $\dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty i} - T_z)$ – šilumos perdavimas dėl lauko oro infiltracijos; \dot{Q}_{sys} – sistemos atiduodamas šilumos (vėsos) kiekis.

Sistemos zonai suteikta energija \dot{Q}_{sys} gali būti išreiškiama kaip tiekiamo ir ištraukiamo zonos oro entalpijų skirtumas:

$$\dot{Q}_{sys} = \dot{m}_{sys} C_p (T_{sup} - T_z). \quad (2.7)$$

Šioje lygtyje priimama, kad zonos tiekiamo oro srautas yra lygus iš patalpos išėinančių oro srautų sumai. Iš patalpos šalinamo oro temperatūra yra lygi patalpos vidutinei temperatūrai.

Siekiant rasti nežinomąjį tam tikru laiko žingsniu, galima pasinaudoti baigtinių skirtumų aproksimacija:

$$\frac{dT}{\delta t} = \frac{(T_z^t + T_z^{t-\delta t})}{\delta t} + O(\delta t). \quad (2.8)$$

Skaitinio integravimo panaudojimas ilgam periodui, tokiu atveju kaip šis, kai panaudojama pirmos eilės Eulerio lygtis (2.8), dėl didelio žingsnių skaičiaus

galėtų būti paklaidų akumuliuojasi priežastimi. Tačiau pastate vykstantiems procesams būdingas cikliškumas nesudaro sąlygų paklaidoms akumuliuotis. Siekiant gauti nežinomą laiko momentu t zonos temperatūrą, šilumos balanso lygčiai (2.6) pritaikoma Eulerio formulė (2.8), dydžiai su žinoma vidutine zonos temperatūra laiko momentu $t - \delta t$ perkeliama į kairiąją lygties pusę, o nežinomi – į dešiniąją ir gaunama lygtis:

$$C_z \frac{T_z^t - T_z^{t-\delta t}}{dt} + T_z^t \left(\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p + \dot{m}_{inf} C_p + \dot{m}_{sys} C_p \right) = \sum_{i=1}^{N_{st}} \dot{Q}_i + \dot{m}_{sys} C_p T_{sup\ ply}^t + \left(\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i T_{si} + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p T_{zi} + \dot{m}_{inf} C_p T_{\infty} \right). \quad (2.9)$$

Pirmos eilės Eulerio lygties taikymas riboja skaičiavimo laiko žingsnį. Yra nustatyta, kad siekiant naudoti didesnius laiko žingsnius, efektyviausia yra naudoti trečios eilės išvestinę:

$$\frac{dT_z}{dt} \Big|_t \approx (\delta t)^{-1} \left(\frac{11}{6} T_z^t - 3 T_z^{t-\delta t} + \frac{3}{2} T_z^{t-2\delta t} - \frac{1}{3} T_z^{t-3\delta t} \right) + O(\delta t^3). \quad (2.10)$$

Panaudojus trečios eilės išvestinę lygčiai (2.10), gaunama, kad nežinoma zonos vidutinė temperatūra laiko momentu t lygi:

$$T_z^t = \frac{\sum_{i=1}^{N_{st}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i T_{si} + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p T_{zi} + \dot{m}_{inf} C_p T_{\infty}}{\frac{11}{6} \frac{C_z}{\delta t} + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i C_p + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p + \dot{m}_{inf} C_p + \dot{m}_{sys} C} + \frac{\dot{m}_{sys} C_p T_{sup\ ply} - \left(\frac{C_z}{\delta t} \right) \left(-3 T_z^{t-\delta t} + \frac{3}{2} T_z^{t-2\delta t} - \frac{1}{3} T_z^{t-3\delta t} \right)}{\frac{11}{6} \frac{C_z}{\delta t} + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i C_p + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p + \dot{m}_{inf} C_p + \dot{m}_{sys} C}. \quad (2.11)$$

EnergyPlus zonos vidutinei temperatūrai nustatyti naudoja lygtį (2.11). Kadangi zonos galios (šilumos ar šalčio) poreikiai lemia visus procesus, galia yra naudojama kaip pradinis taškas nustatyti sistemų poreikius. Tokiu būdu sistemos modeliavimas duoda esamus tiekimo pajėgumus ir, esant poreikiui, reguliuojama zonos temperatūra. Toks EnergyPlus sprendimas vadinamas nuspėjimo/koregavimo procesu.

Nors aukščiau minėtoje Crawley *et al.* (2005) ataskaitoje teigiama, kad EnergyPlus naudoja laiko atsako funkcijos metodą, visgi matome, kad neapsieita ir be skaitinių metodų, šiuo atveju baigtinių skirtumų metodo, panaudojimo.

Detalus EnergyPlus sprendžiamų lygčių aprašymas yra pateikiamas programos dokumentacijoje – EnergyPlus Engineering Referece (2009).

2.9. Empirinis programos EnergyPlus testavimas

Atliekant pastato energinį modeliavimą, būtina turėti šios srities specifinių žinių. Kaip Banks ir Gibon (1997) pasakė: „*Modeliavimas yra disciplina, o ne programinės įrangos paketas; jis reikalauja detalaus problemos apibūdinimo, atsargaus sistemos logikos vertimo ar kodavimo į modeliavimui reikalingą kalbą (priklausomai nuo sąsajos tipo) ir visapusiško modelio ir rezultatų patikrinimo. Yra mažiausiai du dalykai, kurie reikalingi sėkmingam modeliavimui. Pirmas yra kompleksinis sistemos ir jos vidinių ryšių supratimas. Antras – gebėjimas savo supratimą paversti į loginę kalbą, suprantamą modeliavimo programinei įrangai*“.

Programos naudotojo įtaką modeliavimo rezultatams įrodė Roulet *et al.* (1999), kuris palygino devynių skirtingų modeliavimo programos naudotojų gautus rezultatus sprendžiant tuos pačius modelius. Rezultatai skyrėsi nuo –31 % iki +13 %, lyginant su vidutiniais rezultatais, o skirtumų vidurkis sudarė 8 %. Šios paklaidos iš esmės gautos dėl klaidų įvedant modelio duomenis. Roulet *et al.* (1999) priėjo prie išvados, kad tokių klaidų tikimybę gali sumažinti vartotojui draugiškas programos apipavidalinimas. Tačiau skaičiavimo netikslumai yra būdingi ne tik naudojant modeliavimo programas. Netikslumai neišvengiami taip pat naudojant supaprastintus skaičiavimo metodus. Buvo nustatyta, kad skaičiuojant pamėnesiui energijos poreikius pagal EN ISO 13790:2004 standartą, tam pačiam pastatui, tomis pačiomis klimatinėmis sąlygomis gauti rezultatų skirtumai $\pm 20\%$. Tai tik įrodo, kad skaičiuojant supaprastintais metodais vartotojo įtaka ne visada mažesnė nei skaičiuojant dinaminiais modeliavimo metodais.

2.9.1. Viešojo pastato parinkimas testavimui

Pasirinkta programa EnergyPlus yra įvertinta ekspertų ir palyginta su kitomis programomis bei pripažinta viena iš geriausių pastatų energinio modeliavimo programų. Visgi tokių programų naudojimas reikalauja aukšto modeliautojo žinių lygio. Tam, kad galima būtų teigti, jog programa yra naudojama teisingai ir gauti skaičiavimo rezultatai yra patikimi, sukuriamas realaus pastato modelis ir

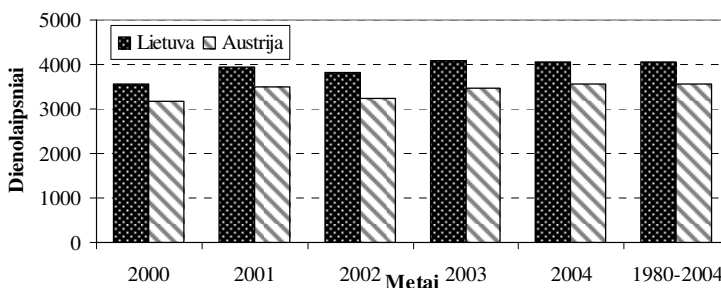
atliekamas modeliavimas. Gauti modeliavimo rezultatai lyginami su realiomis energijos sąnaudomis šildymui ir vėsinimui.

Šio darbo autoriaus, kaip modeliavimo programos naudotojo, kvalifikacijos patikrinimas buvo atliktas modeliuojant pastatą Vienoje – Viena International Center (VIC), kuris yra tarptautinis verslo centras. VIC pastato modeliavimas buvo atliekamas 2006–2007 m. stažuotės Austrijoje, Vienos technikos universitete (vok. *Technische Universität Wien*) metu.

Lietuvos ir Austrijos klimato skirtumas nėra didelis, abiejose šalyse dominuoja šildymo poreikis. 2.6 paveiksle pateikiamas Austrijos ir Lietuvos šildymo dienolaipsnių šalies mastu palyginimas (Eurostat 2007). Eurostat dienolaipsnius apskaičiuoja pagal pateiktą metodiką:

$$HDD = d \cdot (18 - T_m), \quad (2.12)$$

čia HDD – šildymo dienolaipsniai; d – šildymo sezono trukmė; T_m – vidutinė lauko oro temperatūra laikotarpiu d . Ji apskaičiuojama kaip minimalios ir maksimalios laikotarpio d temperatūros vidurkis: $(T_{min} - T_{max})/2$.



2.7 pav. Lietuvos ir Austrijos faktinių šildymo dienolaipsnių palyginimas
Fig. 2.7. Comparison of actual heating degree days in Lithuania and Austria

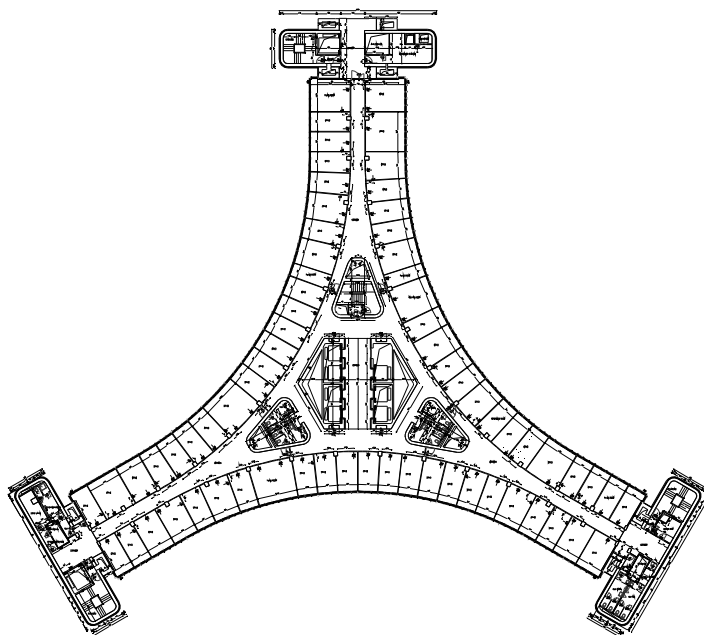
Lietuvoje 1980–2004 m. šildymo dienolaipsnių vidurkis buvo 4071 (2.7 pav.), o Austrijoje – 3569, taigi skirtumas palyginus nedidelis – apie 500 dienolaipsnių, t. y. Lietuvoje šildymo dienolaipsnių skaičius yra 14 % didesnis, todėl nėra principinio skirtumo ar modeliavimo ir faktinių rezultatų patikrinimas atliekamas Lietuvoje, ar Austrijoje esančiam pastatui.

2.9.2. Tyrinėto pastato aprašymas

Nagrinėjamas pastatas yra sudėtingos formos ir yra dalis pastatų grupės, kuri sudaryta iš 6 pastatų (2.8–2.9 pav.).



2.8 pav. VIC pastatų kompleksas
Fig. 2.8. Complex of the VIC buildings



2.9 pav. VIC pastato tipinio aukšto planas
Fig. 2.9. Typical floor plan of the VIC building

Pastatas statytas beveik prieš 40 metų (1970 m.) pagal tuo metu galiojusius standartus, todėl daugumos atitvarų šilumos perdavimo koeficientai (2.1 lentelė) neatitinka esamų reikalavimų.

2.1 lentelė. VIC pastato konstrukcijos

Table 2.1. Constructions of the VIC building

Kabinetų išorinės sienos	0,18 W/m ² K
Laiptinių išorinės sienos	2,79 W/m ² K (betonės neizoliuotos sienos)
Vidinės pertvaros	0,64 W/m ² K
Langai	2,93 W/m ² K; nenaudojamos jokios užtemdymo priemonės
Grindys ir lubos	Grindys ir lubos laikomos adiabatinėmis.

Pastato aukšto aukštis 3,25 m. Pastato fasado įstiklinimas 54 %. Kiekviename aukšte yra nuo 55 iki 70 kabinetų. Kabinetuose yra po vieną darbo vietą. 12 aukšte kabinetai yra po 15 m².

Pastato langai neatsidaro, todėl darbo valandomis reikalingas nuolatinis švares oro tiekimas į patalpas. Šildymo, vėdinimo ir vėsinimo sistemos veikia darbo valandomis, 252 dienas per metus. Sistemų darbo laikas yra nuo 7:00 iki 18:30 val., išskyrus birželį, liepą ir rugpjūtį, kai sistemos veikia nuo 7:00 iki 18:00 val. Pirmadienį ryte sistemos pradeda darbą 6:00 val., o penktadienį nustoja veikti pusvalandžiu anksčiau nei kitomis dienomis (žr. 2.2 lentelę).

Vėsinimas galimas gegužės–rugsėjo mėn., o šildymas rugsėjo–gegužės mėn. Gegužės ir rugsėjo mėnesiais galimas tiek šildymas, tiek vėsinimas.

Kabinetuose temperatūros reguliavimui yra numatyti termostatai.

Apšvietos lygis kabinetuose žinomas iš atliktų matavimų, kurie parodė, kad vidutinis apšvietos lygis patalpoje palaikomas 500 lx. Apšvietimui naudojamos T8 fluorescencinės lempos.

2.2 lentelė. VIC pastato mikroklimato sistemų veikimo grafikas

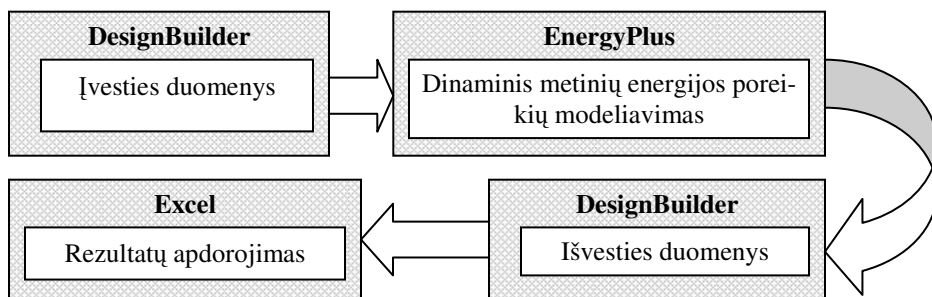
Table 2.2. Schedules of the VIC building microclimate systems

Zona	Darbo dienomis, val.	Savaitgaliais, val.	Temperatūra, °C
Kabinetai			
Dieną	7:00 (6:00)–18:30 (18:00)	0:00–0:00	20–24
Naktį	18:30 (18:00)–7:00 (6:00)	0:00–24:00	12–15
Koridoriai			
Dieną	7:00 (6:00)–18:30(18:00)	0:00–0:00	20–24
Naktį	18:30 (18:00)–7:00 (6:00)	0:00–24:00	12–15
Laiptinės			
Dieną	-	-	12–15
Naktį	-	-	12–15
WC			
Dieną	7:00 (6:00)–18:30 (18:00)	0:00–0:00	15–20
Naktį	18:30 (18:00)–7:00 (6:00)	0:00–24:00	12–15

Analizuojamo pastato korpuso D energijos suvartojimų apskaita vykdoma kartu su korpusu E, nes jie yra tarpusavyje sujungti. Korpusas D yra 22 aukštų, jo plotas 38 754 m². Abiejų korpusų bendras šildomas plotas yra 53 371 m². Vidutinis energijos šildymui suvartojimas 1993–2001 metais šildomo ploto vienetui sudarė 111 kWh/m². Faktinis energijos suvartojimas vėsinimui atitinkamai sudarė 54 kWh/m² (vėsinamo ploto vienetui).

VIC pastatas taip pat buvo modeliuotas su Ecotect modeliavimo programa, tačiau dėl šios programos ribotų galimybių gauti sumodeliuoti energijos poreikiai kelis kartus skyrėsi nuo faktinių sąnaudų. Todėl modeliavimas atliekamas su EnergyPlus, naudojant pagalbines programas.

Skaičiavimo eiga bei naudojamos programos pavaizduotos 2.10 paveiksle.

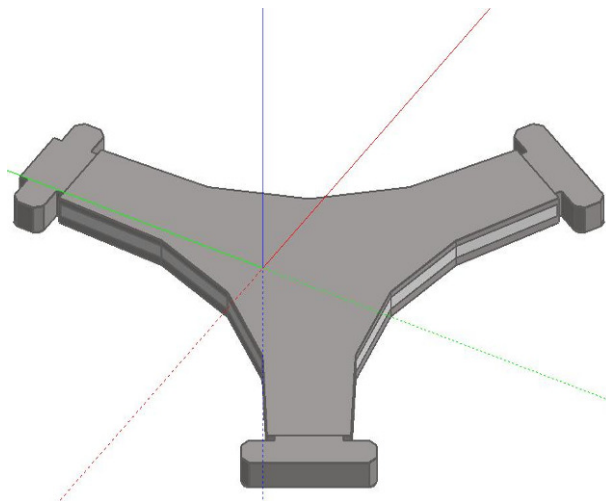


2.10 pav. Skaičiavimų ir analizės eigos schema
Fig. 2.10. Scheme of the calculations and analysis

Modeliavimui naudojama pagalbinė EnergyPlus programa DesignBuilder, jos pagalba sukuriama patalpos modelis (sukuriama modelio geometrija bei įvedami kiti duomenys). Pastato energinį modeliavimą pasirinktu laiko žingsniu metų laikotarpiui atlieka programa EnergyPlus, o išvesties duomenys (rezultatai) išvedami vėlgi DesignBuilder programoje, iš ten jie importuojami į programą Excel. Tada atliekamas duomenų apdorojimas ir analizė.

2.9.3. Pastato modelio sukūrimas

Pastato modelio sukūrimas prasideda nuo jo geometrijos, o nagrinėjamo pastato geometrija yra sudėtinga. Remiantis turimais pastato aukštų planais, programoje DesignBuilder buvo sukurta pastato 12 aukšto (tipinio) modelio geometrija (2.11 pav.).



2.11 pav. VIC pastato tipinio aukšto modelis sukurtas su DesignBuilder
Fig. 2.11. Typical floor plan of the VIC building created with DesignBuilder

Siekiant supaprastinti modelį, vienodos paskirties patalpos sujungiamos į zonas (2.3 lentelė).

Kitas žingsnis kuriant modelį – pastato konstrukcijų šiluminių charakteristikų aprašymas, todėl pagal turimus duomenis apie pastato konstrukcijas ir jų šilumos perdavimo koeficientus buvo sukurtos konstrukcijos su atitinkamais šilumos perdavimo koeficientais (2.1 lentelė).

Oro infiltracija buvo nežinoma. Atsižvelgiant į tai, kad pastato langai nuo pastatymo nekeisti, priimta, kad infiltracija lygi 0,5. Kabinetų temperatūros buvo imtos pagal vyraujančias, kurios buvo žinomos iš atliktų matavimų, t. y. 23 °C.

Oro apykaita patalpose dėl mechaninės sistemos veikimo taip pat buvo nežinoma, todėl kabinetams ji atskiroms zonoms buvo priimta.

2.3 lentelė. VIC pastato zonų aprašymas

Table 2.3. VIC building's zones description

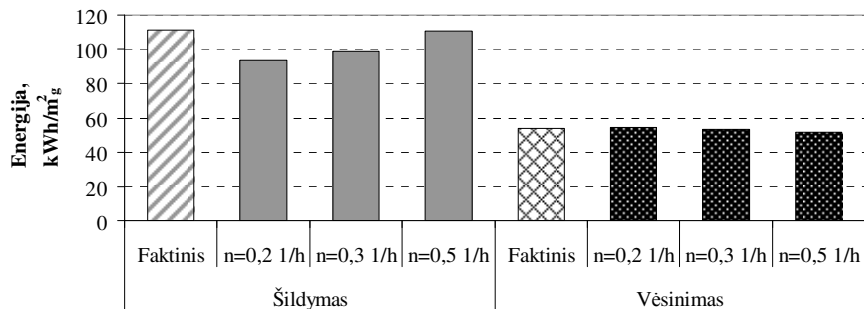
Zonos pavadinimas	Zonos aprašymas
<i>Laiptinė 1 – be tualetu</i>	Atliekamas darbas – vaikščiojimas. Žmonių tankis, žm./m ² – 0,03. Patalpų temperatūros: dieną – 15 °C, naktį – 12 °C. Apšvietos lygis: 300 lx.
<i>Laiptinė 2 – su tualetu</i>	Atliekamas darbas – stovėjimas/vaikščiojimas. Žmonių tankis, žm./m ² – 0,11. Patalpų temperatūros: dieną – 17,5 °C, naktį – 13,5 °C. Apšvietos lygis: 300 lx. Oro apykaita – 4 h ⁻¹ .

2.3 lentelė. VIC pastato zonų aprašymas**Table 2.3.** VIC building's zones description

Zonos pavadinimas	Zonos aprašymas
<i>Kabinetai</i>	Atliekamas darbas – spausdinimas. Žmonių tankis, žm./m ² – 0,07. Patalpų temperatūros: šildymo sezonas: dieną – 23 °C, naktį – 19 °C; vėsinimo sezonas: dieną – 24° C, naktį – 25 °C. Apšvietos lygis – 500 lx. Šilumos pritekėjimai nuo biuro technikos – 10 W/m ² . Oro apykaita – 3 h ⁻¹ .
<i>Laiptinė 1, Laiptinė 2, Laiptinė 3, Zona 18 (koridorius)</i>	Atliekamas darbas – stovėjimas/vaikščiojimas. Žmonių tankis, žm./m ² – 0,11. Patalpų temperatūros: šildymo sezonas: dieną – 23 °C, naktį – 19 °C; vėsinimo sezonas: dieną – 24 °C, naktį – 25 °C. Apšvietos lygis – 300 lx. Pritekėjimai nuo įrangos – 2 W/m ² . Oro apykaita koridoriuje – 3 h ⁻¹ , oro apykaita laiptinėse – 1,3 h ⁻¹ .
<i>Tualetas 1, tualetas 2</i>	Atliekamas darbas – stovėjimas/vaikščiojimas. Žmonių tankis, žm./m ² – 0,03. Patalpų temperatūros: šildymo sezonas: dieną – 20 °C, naktį – 19 °C; Apšvietos lygis – 300 lx. Oro apykaita – 10 h ⁻¹ .

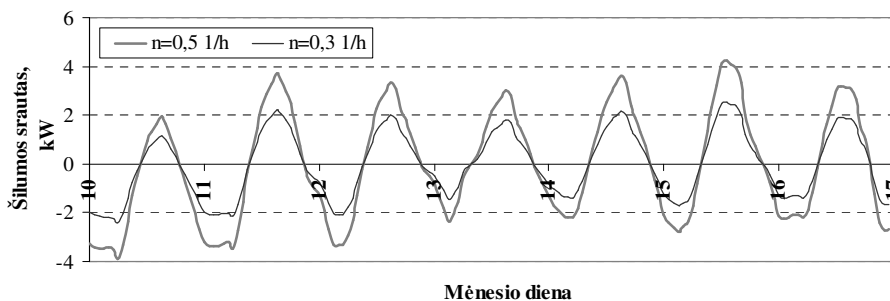
2.9.4. Modeliavimo rezultatai

Kadangi buvo nežinoma oro apykaita dėl infiltracijos, o jos įtaka energijos poreikiams šildymui yra žymi, buvo sumodeliuoti keli variantai su skirtinga oro apykaita dėl infiltracijos (2.12 pav.). Atlikus modeliavimą, gautas energijos suvartojimas šildymui priklausomai nuo infiltracijos yra 94–110 kWh/m². Tai reiškia, kad skirtumas tarp realaus (žr. 2.9.2. sk.) ir sumodeliuoto energijos šildymui suvartojimo sudaro 1–15 %. Sumodeliuoti energijos poreikiai vėsinimui sudaro 51–55 kWh/m² ir skiriasi nuo faktinių suvartojimų (–2)–5 %. Kai infiltracija primama 0,5 h⁻¹, gaunamos paklaidos pagal LST EN 15265:2007 yra A lygio, t. y. neviršija 5 %, o mažėjant infiltracijai atitinkamai mažėja ir rezultatų tikslumo lygiai. Didžiausios leistinos paklaidos pagal LST EN 15265:2007 yra 15 % tiek šildymo, tiek vėsinimo energijos poreikiams.



2.12 pav. Faktinis ir sumodeliuotas VIC pastato energijos suvartojimas
Fig. 2.12. Actual and modelled energy consumption of the VIC building

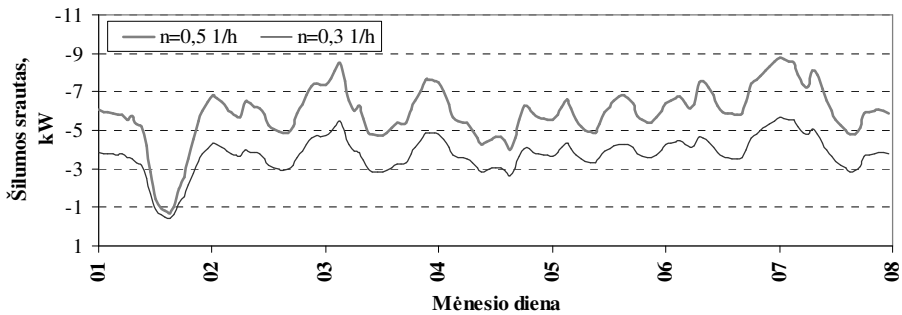
Šildymo sezono metu lauko oro temperatūra yra visada žemesnė nei patalpos, todėl infiltracijos būdu patekęs oras didina pastato energijos poreikius šildymui. Vėsinimo sezono metu administraciniame pastate vidaus temperatūra gali būti tiek aukštesnė nei lauko, tiek žemesnė, todėl su infiltracija gali būti įnešama tiek šiluma, tiek vėsa. Jei pažiūrėsime į infiltracijos įnešamą šilumos/vėsos srautą per rugpjūčio mėnesio savaitę (2.13 pav.) (nagrinėtam 12-am aukštui), matome, kad dienos metu infiltracijos įtaka yra neigiama, o naktį infiltracija prisideda prie pastato natūralaus vėsinimo.



2.13 pav. Infiltracijos įnešamas šilumos (vėsos) srautas per vasaros savaitę
Fig. 2.13. Heat (cool) infiltrated with outside air during the summer week

Jei pažiūrėsime į infiltracijos įnešamą energijos srautą pereinamuoju laikotarpiu – gegužės 1–7 d. (2.14 pav.), matome, kad dėl žemesnių nei patalpos lauko oro temperatūrų infiltracija prisideda prie pastato natūralaus vėsinimo visą parą.

Taiigi vertinant visą vėsinimo sezoną, o ne atskirus jo periodus, bendra didesnė infiltracija, nors ir nežymiai, visgi sumažina energijos poreikius vėsinimui.



2.14 pav. Infiltracijos įnešamas šilumos (vėsos) srautas per pavasario savaitę
Fig. 2.14. Heat (cool) infiltrated with outside air during the spring week

Kaip matyti, modeliuojant veikiančią pastatą priėmus pradines prielaidas pagal bendrus dėsningumus ir normų rekomendacijas, modeliavimo rezultatų ir faktinių duomenų sutapimas yra leistinose ribose, nepaisant, kad modeliuojant buvo naudojami ne faktiniai, o standartiniai lauko oro parametrų duomenys, nebuvo žinoma infiltracija bei oro apykaita dėl mechaninės vėdinimo sistemos.

Naujai statomam pastatui dažniausiai yra žinomi tikslesni duomenis, todėl pastato energijos poreikius galima modeliuojant apskaičiuoti daug tiksliau.

2.10. Antrojo skyriaus išvados

Pastatas dėl jame vykstančių procesų ir jų sąveikos sudėtingumo, siekiant maksimalaus tikslumo, turėtų būti nagrinėjamas naudojant integruotus sprendimo metodus. Yra dvi pagrindinės pastato integruoto modeliavimo metodų grupės: analitiniai metodai ir skaitiniai modeliavimo metodai. Nors kiekvienas iš metodų turi savo privalumų ir trūkumų, jie yra vienodai tinkami pastato energijos poreikių modeliavimui.

Atlikus pastato energijos poreikių modeliavimui naudojamų 5 pagrindinių programų palyginimą, tolimesniems skaičiavimams pasirinkta laiko atsako funkcijos metodu pagrįsta programa EnergyPlus, kuri turi daugiausiai funkcijų, reikalingų kompleksiskai sprendžiant įstiklinimo charakteristikų įtaką pastato energijos poreikiams. Nors apžvelgti programos testavimo rezultatai neleidžia abejoti programos rezultatų patikimumu, siekiant išvengti skaičiavimų netikslumų, galinčių atsirasti dėl naudotojo įtakos, ji buvo papildomai testuojama empiriniu metodu, t. y. lyginant realaus pastato energijos šildymui ir vėsinimui suvartojimus su sumodeliuotais. Gautos paklaidos pagal LST EN 15265:2007 yra leistinose ribose – neviršija 15 %. Tai leidžia EnergyPlus naudoti tolimesniems skaičiavimams.

Teorinio pastato modelio sukūrimas

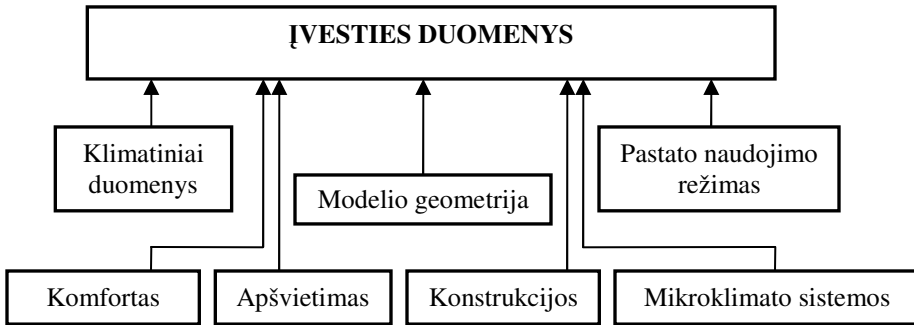
Trečiajame skyriuje yra pateikiamas administracinio pastato modelio kūrimo, įvesties duomenų ir prielaidų aprašymas. Parenkamos darbe naudojamos įstiklinimo alternatyvos. Nagrinėjamai patalpai, skirtingiems parinktiems stiklo pakečiams nustatomas NA higienos reikalavimus tenkinantis santykinis fasado įstiklinimo plotas (SFIP).

Skyriaus tematika paskelbti du autorės straipsniai (Valančius ir Sasnauskaitė 2008; Sasnauskaitė 2008).

3.1. Modelio įvesties duomenys

Pastato energiniam modeliavimui su EnergyPlus atlikti modelio kūrimui naudojama pagalbinė programa DesignBuilder. Modelio kūrimas pradedamas nuo vietovės, kurioje bus nagrinėjamas pastatas, pasirinkimo. Parenkant vietovę priskiriami ir tos vietovės klimatiniai duomenys. Kitas modelio kūrimo etapas yra pastato (patalpos) geometrijos sukūrimas. Toliau yra parenkamos iš duomenų bazės arba sukuriamos naujos konstrukcijos, aprašomas pastato naudojimo režimas: žmonių skaičius, jų buvimo patalpose režimas, biuro technikos veikimo režimas bei užsидуodami būdingi vidiniai šilumos pritekėjimai. Užsiduodamos norimos palaikyti komfortinės sąlygos bei jų palaikymo režimas (temperatūros

pažeminimas ir pan.). Parenkama apšvietimo sistema, mikroklimato sistemos ir jų parametrai. Modelio įvesties duomenų grupės pavaizduotos 3.1 paveiksle.



3.1 pav. Modelio įvesties duomenys

Fig. 3.1. Model input data

Modelio įvesties duomenys gali būti įvedami nebūtinai tokia tvarka, kokia tvarka jie išvardyti čia, ir jie gali būti keičiami bet kuriame modelio kūrimo etape.

3.2. Modelio geometrija ir zonavimas

Kadangi kiekvienas pastatas yra skirtingas, neįmanoma išnagrinėjus vieną konkretų pastatą jo skaičiavimo rezultatus universaliai taikyti kitiems pastatams. Norvegijoje pagal NS 3031:2007 standarto reikalavimus skaičiuojant energijos suvartojimą, jei skirtingoms pastato dalims tenkantis saulės spinduliuotės kiekis skiriasi, tada privaloma pastatą nagrinėti suskirsčius jį į atitinkamas zonas. O pastatams su nedideliu fasado įstiklinimu ir su apsaugos nuo saulės priemonėmis – rekomenduojama pastatą skaičiuoti kaip vieną zoną. Skirstant pastatą į zonas, turi būti ne mažiau nei trys zonos:

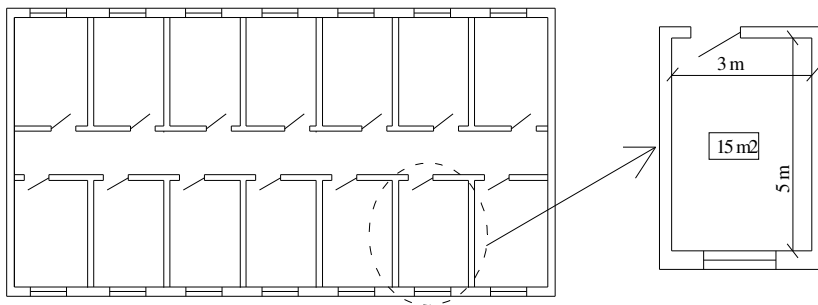
- Zona su fasadu, atsuktu į saulę (pietų, pietvakarių ir pietryčių orientacijos);
- Zona, kurios fasadui tenka mažai saulės (šiaurės, šiaurės–rytų ir šiaurės–vakarų orientacijos);
- Zona pastato viduje.

Galimas atvejis, kai pastatas yra labai mažo gylio (pagal NS 3031:2007 standartą mažo gylio yra pastatas, kurio gylis mažiau nei 10 m.). Tokiu atveju šis standartas leidžia analizuojant pastatą atskirai neišskirti vidurinės zonos.

Patalpų zonavimo principai atliekant energijos poreikių skaičiavimus taip pat yra pateikiami tarptautiniame standarte LST EN ISO 13790:2008.

Tolimesniems skaičiavimams buvo sukurtas stačiakampinio administracinio pastato modelis (3.2 pav.), kuris neatspindi kažkokio konkretaus atvejo, bet yra paprastos standartinės formos. Kabinetai pastate yra populiarus dydžio – 15 m^2 , skirti dviems dirbantiems su kompiuteriu žmonėms, tai atitinka HN 32:2004 „Darbas su videoterminalais. Saugos sveikatos reikalavimai“ reikalavimus.

Padarytos prielaidos, jog nagrinėjamam pastatui saulės spinduliavimo per stogą įneštas šilumos kiekis yra nežymus, lyginant su saulės radiacija per langus, o pastatas yra tiek platus, kad atskirų fasadų patalpų langai orientuoti tik į vieną pasaulio šalį. Šios prielaidos leidžia išskirti vieną kurią nors patalpą kaip būdingą šiluminio režimo atžvilgiu atitinkamame fasade bei atmesti skersinės oro cirkuliacijos pastate įtaką pasirinktos patalpos šiluminiam režimui.



3.2 pav. Analizuojamo pastato tipinio aukšto ir tipinio kabineto planas
Fig. 3.2. Plan of the typical floor and typical office of the analyzed building

Patalpos dydis ir proporcijos atitinka architektūrinius bei NA reikalavimus. Tai leidžia patalpos analizės rezultatus apibendrinti visam atitinkamos orientacijos fasadui.

Nagrinėjamos patalpos plotis yra 3 m, gylis – 5 m, aukštis šviesoje – 3 m, aukšto aukštis – 3,2 m. Pakabinamos lubos nuleistos 0,2 m.

3.3. Vietovė ir klimatiniai duomenys

Europos šalims klimatiniai duomenys, reikalingi energiniams skaičiavimams, buvo parengti ASHRAE vykdyto projekto metu (ASHRAE 2001). Klimatiniai duomenys už 1983–1993 m. buvo gauti iš nacionalinių meteorologinių tarnybų. Kadangi daugumai vietovių nebuvo duomenų apie saulės spinduliuotę, o šie duomenys būtini energiniams skaičiavimams, ji buvo nustatyta pagal saulės ir žemės tarpusavio padėtį ir debesuotumą.

Pastatų energiniam modeliavimui gali būti naudojami skirtingo formato klimatiniai duomenys, tačiau Gugliermetti *et al.* (2004) palyginęs skirtingus pastatų modeliavimui naudojamus klimatinį duomenų formatus priėjo prie išvados, kad pastatų kompleksiniam energiniam modeliavimui atlikti labiausiai tinka TMY (tipinių meteorologinių metų) klimatiniai duomenys. Šio tipo klimatiniai duomenys naudojami programoje EnergyPlus.

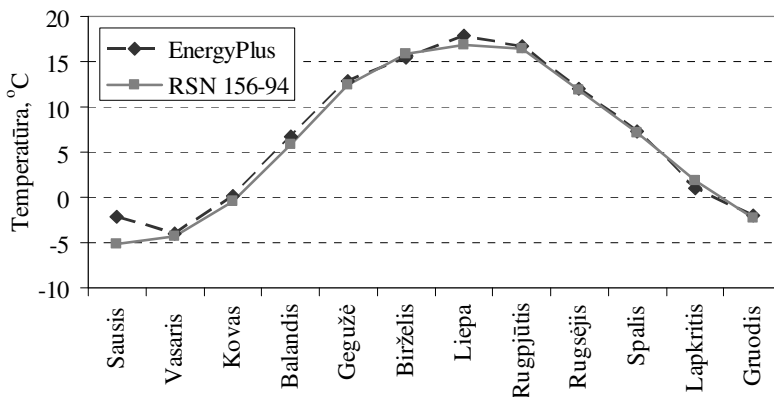
IWEC duomenų bazėje, iš kurios EnergyPlus užkraunami klimatiniai duomenys, Lietuvai yra pateikiami visi tik Kauno duomenys, todėl priimama, kad pastatas stovi Kaune. Kadangi Lietuvos teritorijoje didelių klimatinį svyravimų nėra, daroma prielaida, kad atlikus skaičiavimus su šiais klimatiniais duomenimis, gauti rezultatai bus vienodai tinkami ir kitiems Lietuvos miestams.

Šildymui projektuoti su 99,6 % patikimumu naudojama $-19,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ projektinė lauko oro temperatūra, o šildymo dienolaipsnių skaičius 4137 (kai bazinė temperatūra $18\text{ }^{\circ}\text{C}$). Vėsinimo sistemos projektavimui su tokiu pačiu patikimumu naudojama projektinė lauko oro sauso termometro temperatūra $27,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, vėsinimo dienolaipsnių skaičius 797 (kai bazinė temperatūra $10\text{ }^{\circ}\text{C}$). Šie duomenys skiriasi nuo Lietuvoje naudojamų mikroklimato sistemų projektavime klimatinį duomenų. Pagal RSN 156-94 „Statybinė klimatologija“, kuris sudarytas remiantis 1961–1993 metų temperatūromis, projektinė šildymo temperatūra Kauno miestui $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$, o vėsinimo – $24,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Šie skirtumai atsiranda dėl skirtingų projektinių temperatūrų nustatymo metodikų bei laikotarpių, kurių temperatūros imamos projektinėms reikšmėms nustatyti. Projektinių šildymo temperatūrų, nustatytų keturiomis skirtingomis metodikomis, analizę atliko Krivočiža (2008).

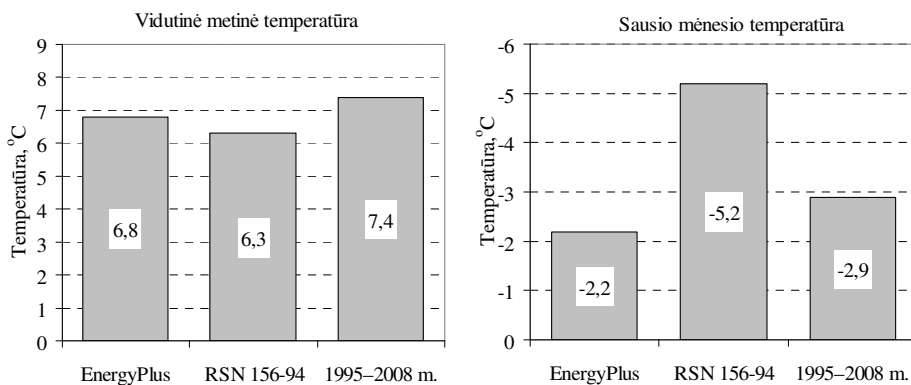
3.3 paveiksle pateikiamas mėnesinio lauko oro temperatūrų, naudojamų EnergyPlus skaičiavimams (pagal ASHRAE) palyginimas su pateikiamomis Lietuvos klimatinėse normose RSN 156-94. Visiems mėnesiams, išskyrus sausį, temperatūrų sutapimas yra geras. RSN 156-94 metų duomenys neatnaujinti jau beveik 20 metų, todėl tikėtina, kad juos atnaujinus būtų gautos šiek tiek kitokios reikšmės.

3.4 paveiksle yra pateikiama EnergyPlus, RSN 156-94 ir statistinių 1995–2008 m. (Statistikos departamentas 2009) metų ir sausio mėnesio temperatūrų palyginimas.

Tiek iš metinės temperatūros palyginimo, tiek iš sausio mėnesio temperatūrų matosi, kad RSN 156-94 nurodytos temperatūros yra žemesnės nei EnergyPlus naudojamos ar paskutinių 14 metų statistinės. EnergyPlus naudojama sausio mėnesio temperatūra yra artima paskutinių metų statistinei, tačiau abi jos ryškiai skiriasi nuo pateikiamos RSN 156-94.

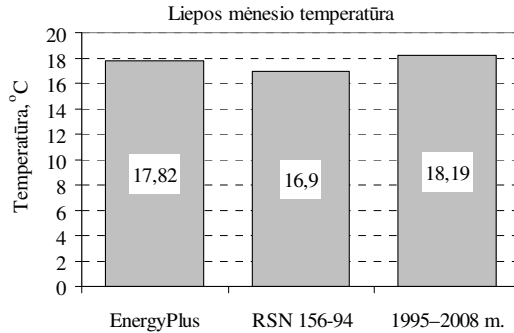


3.3 pav. Mėnesinių lauko oro temperatūrų palyginimas
Fig. 3.3. Comparison of the monthly outside temperatures



3.4 pav. Sausio mėnesio ir vidutinės metinės lauko oro temperatūrų palyginimas
Fig. 3.4. Comparison of outside temperatures of January and average annual temperatures

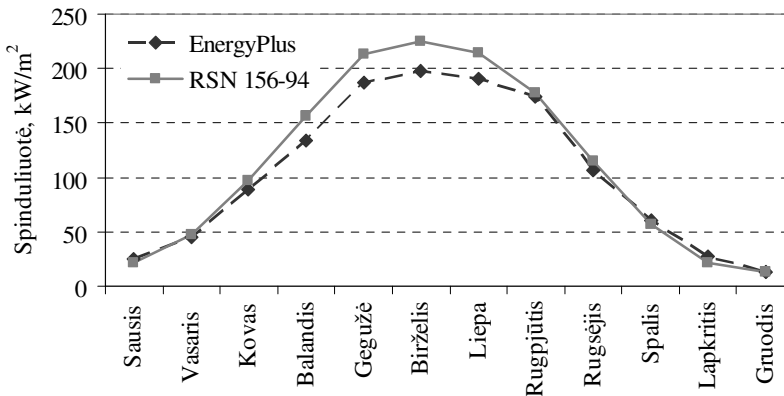
Jei palyginsime liepos mėnesio temperatūras, matyti (3.5 pav.), kad EnergyPlus skaičiavimuose naudojama temperatūra yra labai artima faktinei paskutinių 14 metų (jos skiriasi tik 0,4 °C), o faktinė temperatūra akivaizdžiai yra aukštesnė nei reglamentuojama RSN 156-94.



3.5 pav. Liepos mėnesio lauko oro temperatūrų palyginimas

Fig. 3.5. Comparison of outside temperatures of July

EnergyPlus saulės spinduliuotė bus modeliuojama kas pusvalandį. Kadangi Lietuvos normose nėra net valandinių projektinių spinduliuotės reikšmių, lyginamos mėnesinės saulės spinduliuotės (susumavus išsklaidytą ir tiesioginę spinduliuotę) į horizontalų paviršių reikšmės (3.5 pav.).



3.6 pav. Mėnesinė saulės spinduliuotė

Fig. 3.6. Monthly solar radiation

Sutapimas tarp saulės spinduliuotės nurodytos RSN 156-94 ir EnergyPlus yra pakankamai geras. Skirtumas balandžio–rugpjūčio mėnesiais gali būti paaiškinamas tuo, kad EnergyPlus naudoja Kauno miesto duomenis, o RSN 152-93 pateikia bendrus duomenis visai Lietuvai, nepaisant, kad saulės spindėjimo trukmė ir intensyvumas skirtinguose regionuose skiriasi: Kaune saulės spindėjimo trukmė 1790 val./metus, Nidoje ji siekia 1908 val./metus, o Vilniuje tik 1679 val./metus. Pavyzdžiui, Šilutėje saulės spinduliuotės valandų skaičius yra

1768 val./metus, t. y. nedaug skiriasi nuo Kauno, tačiau tai lemia apie 6 % metinės saulės spinduliuotės skirtumą (Šuksteris ir Kiveris 1996). Taip pat statistiniai duomenys rodo, kad atskirais mėnesiais, tiek Kaune, tiek Šilutėje didesnis nei 30 % saulės spinduliuotės nukrypimas nuo norminių parametų yra dažnas reiškinys (LR Aplinkos ministerija 2006; 2009).

3.4. Konstrukcijos

Lauko siena – lengvųjų konstrukcijų. Jos šilumos perdavimo koeficientas atitinka norminius (STR 2.05.01:2005) reikalavimus ir lygus $0,243 \text{ W/m}^2\text{K}$. Vidinės pertvaros – gipso kartonas, su 10 cm oro tarpu, šilumos perdavimo koeficientas $1,923 \text{ W/m}^2\text{K}$. Parenkant grindų konstrukcijas, grindų danga nerenkama. Laidoma, kad tarp aukštų yra tik 20 cm storio perdenginio plokštė. Pakabinamos lubos – mineralinės plokštės, kaip minėta, jos nuleistos 20 cm.

Kadangi nagrinėjama vidinė patalpa, priimama, kad aplinkinėse patalpose palaikomas toks pats šilumos režimas ir užsiduodama, kad visos vidinės atitvaros (pertvaros, grindys, lubos) yra adiabatinės. Priimama, kad pastatas stovi apsaugotoje nuo vėjo vietoje. Tokiu atveju oro apykaita dėl išorės oro infiltracijos yra $0,2 \text{ h}^{-1}$ (STR 2.09.04:2008).

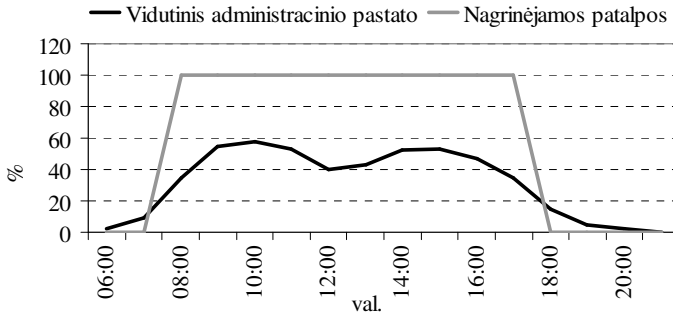
Nagrinėjami pastato įstiklinimo variantai yra aprašyti 3.9.4. ir 3.10. skyreliuose.

3.5. Pastato naudojimo režimas

Kadangi kabinetuose yra dvi darbo vietos, modelyje nustatomas žmonių tankis – $0,13 \text{ žm/m}^2$. Parenkama, kad dirbama sėdint, kas atitinka šilumos pritekėjimus lygius 120 W/m^2 žmogui (įvertinant šilumos kiekį, atiduodamą konvekcijos, spinduliuotės ir garinimo būdu).

Priimtas būdingas įstaigose darbo laikas – 8:00–17:00 val. Biuro technikos ir apšvietimo sistemos veikimo laikas priimamas toks pats, kaip ir žmonių darbo laikas. Šilumos pritekėjimai nuo biuro technikos – 4 W/m^2 (STR 2.01.09:2005).

Realiai žmonių tankis administraciniame pastate nėra pastovus dydis. Jis, kaip rodo tyrimai (Mohammadi 2007), darbo valandomis kinta kiekvienoje patalpoje individualiai. Bendras realus viso administracinio pastato vidutinis žmonių tankio kitimas yra pavaizduotas 3.7 paveiksle.



3.7 pav. Faktinis administracinio pastato ir priimtas nagrinėjamos patalpos žmonių skaičiaus kitimas darbo dienos bėgyje

Fig. 3.7. Actual and assumed daily occupancy schedule of the analyzed office room

Nagrinėjamoje patalpoje yra numatytos dvi darbo vietos, todėl žmonių patalpoje gali būti 0 %, 50 % arba 100 %. Siekiant supaprastinti uždavinį, daroma prielaida, kad patalpoje dirbančių žmonių darbo pobūdis yra toks, kad nuo darbo pradžios iki darbo pabaigos jie visą laiką būna darbo vietoje (3.6 pav.).

3.6. Reikalavimai apšvietimui darbo vietoje

Darbo patalpose, kuriose nuolat dirbama, turi būti užtikrinamas vizualinis komfortas, t. y. apšvietimas, atitinkantis darbuotojų saugos ir sveikatos reikalavimus. Natūrali šviesa taip pat labai svarbu žmogaus psichologiniam komfortui. Svarbu, kad patalpoje būtų langų, nes taip žmogus jaučia ryšį su išoriniu pasauliu.

Darbo patalpų NA vertinamas pagal natūralios apšvietos koeficiento (NAK) vertę (%). Apšvieta – tai kuriame nors paviršiaus taške į paviršiaus elementą krintantis šviesos srautas, padalytas iš to elemento ploto, liuksais (lx). Natūralios apšvietos koeficientas (NAK) – tai tam tikrame patalpos taške ir tuo pačiu metu lauke (esant visiškai atviram dangaus skliautui, ne šešėlyje) NA išmatuotų apšvietos verčių santykis, procentais.

NAK vertė nustatoma pagal HN 98:2000 “Natūralus ir dirbtinis darbo vietų apšvietimas. Apšvietos ribinės vertės ir bendrieji matavimo reikalavimai” pateiktą formulę:

$$N_n = N_v \times k, \quad (3.1)$$

čia N_v – NAK vertė, %; k – pataisos koeficientas, kuris šoniniam apšvietimui nurodytas 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Pataisos koeficiento (k) vertės langams (HN 98:2000)

Table 3.1. Correction coefficient (k) for windows (HN 98:2000)

Langų išdėstymas pagal pasaulio šalis	Pataisos koeficientas, k
Š, ŠR, ŠV, V, R,	1,1
PR, PV, P	1,0

Viešosios ir administracinės paskirties pastatams NAK ribinė vertė bei darbo vietos apšvieta nustatoma priklausomai nuo to, kokiai regos grupei priskiriamas atliekamas darbas, o taip pat nuo to, ar naudojamas bendras apšvietimas, ar kombinuotas (bendras su vietiniu). Darbas su kompiuteriu gali būti priskiriamas A arba B atliekamo darbo tikslumo grupei (ISO 8995).

3.2 lentelė. NAK reikšmės pagal regos darbų grupes

Table 3.2. Daylight factor according to the sight work group

Regos darbų grupė	Dirbtinio apšvietimo darbo paviršiaus bendro apšvietimo apšvieta, lx*	Natūralus apšvietimas, NAK, %
A	400–500	1,2–1,5
B	200–300	1,0–0,7

* Dirbtinio apšvietimo apšvietos mažiausios ribinės vertės liuksais, nustatytos darbo patalpos darbo paviršiaus apšvietos mažiausių verčių taškuose.

LST EN 13779:2007 tipinės vidutinės patalpos apšvietos reikšmės, naudojamą projektuojant sistemas, nurodomos 400–500 lx. Modelyje pasirenkamas aukščiausias reglamentuojamas apšvietos lygis dirbant su kompiuteriu – 500 lx.

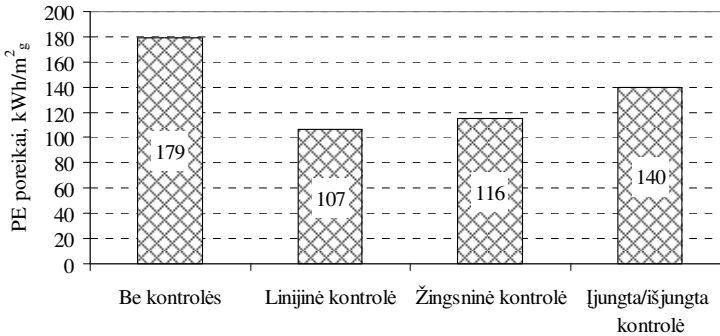
3.7. Apšvietimo sistemos valdymo įtaka pastato energijos poreikiams

Siekiant modelyje parinkti efektyvų apšvietimą, kuris sunaudotų mažiausiai energijos, buvo išnagrinėti (Sasnauskaitė ir Juodis 2008) skirtingi apšvietimo valdymo variantai: a) kai nėra jokio valdymo ir sistema veikia visą patalpų naudojimo laiką; b) kai yra rankinis apšvietimo valdymas įjungta/išjungta (angl. *on/off*); c) linijinis valdymas, kai apšvietimas reguliuojamas automatiškai palai-
kant nustatytą apšvietos lygį; d) žingsninis valdymas, kai dirbtinis apšvietimas intensyveja pasiekus tam tikrus natūralios apšvietos lygius. Taip pat, buvo išnagrinėti keli skirtingi fluorescencinių lempų tipai: a) T8 fluorescencinė trifosfato, b) T8 fluorescencinė halofosfato su aukšto dažnio kontrolės galimybe, c) T8 fluorescencinė halofosfato su žemo dažnio kontrolės galimybe bei šviestuvo tipai pagal montavimo būdą: a) pakabinamas; b) montuojamas prie lubų; c) įleidžiamas į lubas; d) įleidžiamas į lubas su aptekančiu ištraukiamu oru.

Siekiant įvertinti, kokį apšvietimo sistemos valdymo būdą, lempas bei šviestuvus pasirinkti, buvo įvertinti ne tik apšvietimo, bet ir šildymo bei vėsinimo sistemų pirminės energijos poreikiai.

Skaičiavimo rezultatai nagrinėtam atvejui (kai sienos šilumos perdavimo koeficientas $0,243 \text{ W/m}^2\text{K}$; įstiklinimo plotas 21 %, o lango šilumos perdavimo koeficientas – $1,359 \text{ W/m}^2\text{K}$) parodė, kad lyginant pastato bendrus metinius PE poreikius didžiausią įtaką daro pasirinktas apšvietimo sistemos valdymo būdas. Nagrinėtos lempos ir šviestuvo tipas pasirinkus linijinį sistemos valdymo būdą reikšmingos įtakos neturi.

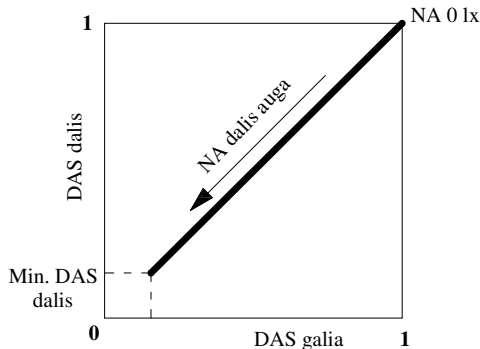
Linijinio apšvietimo sistemos valdymo pagalba galima sutaupyti iki 40 % PE lyginant su atveju, kai valdymo nėra ir 24 % lyginant su labiausiai paplitusiu atveju, kai naudojamas rankinis valdymas (3.8 pav.).



3.8 pav. Apšvietimo sistemos valdymo įtaka pastato PE poreikiams

Fig. 3.8. Influence of the control of lighting system on the PE consumption

Linijinio valdymo metu dirbtinio apšvietimo sistema (DAS) pagal NA reguliuoja galią taip, kad kompensuotų trūkstamą iki nustatytosios apšvietos dalį (3.9 pav.).



3.9 pav. Linijinis dirbtinio apšvietimo valdymas

Fig. 3.9. Linear control of the lighting system

Remiantis apšvietimo sistemos įtakos pastato energijos poreikiams skaičiavimais, parenkama apšvietimo sistema su linijiniu valdymu, pakabinamu šviestuvu. Apšvietimo lempų savitoji galia – $3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot 100 \text{ lx})$ (LST EN 13779:2007).

3.8. Šiluminio komforto palaikymas ir sistemų darbo režimai

Daugybė rodiklių turi įtakos šiluminiam komfortui, todėl labai sunku nustatyti nenuginčijamas komfortines sąlygas. Komforto pojūtis priklauso nuo: lyties, sveikatos, mitybos, amžiaus, metų laiko, dirbamo darbo pobūdžio.

Pagrindiniais šiluminio komforto rodikliais galima laikyti: oro temperatūrą, oro greitį ir drėgnumą. STR 2.09.02:2005 nustatyta, kad, kai dirbamas lengvas fizinis darbas, komfortinėmis laikomos šios sąlygos:

3.3 lentelė. Komfortinės sąlygos, kai dirbamas lengvas darbas

Table 3.3. Comfort conditions for light work

Metų periodas	Oro temperatūra, °C	Santykinė drėgmė, %
Šaltasis	22±2	40–60
Šiltasis	24,5±1,5	40–60

Dažnai vasarą $24 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūros palaikymas daug kainuoja, todėl dažnai patalpos temperatūra vasarą yra padidinama iki $27\text{--}28 \text{ }^\circ\text{C}$, kuriai esant komforto lygis sumažėja labai nežymiai. LST EN 13779:2007 šaltojo periodo komfortinės temperatūros nurodytos $19\text{--}24 \text{ }^\circ\text{C}$, o šiltojo $23\text{--}26 \text{ }^\circ\text{C}$. Patalpos oro greičiai dažniausiai neviršija $0,1 \text{ m/s}$, o esant tokiam greičiui žmogus nejaučia diskomforto (Daniels 2003). Leistini oro greičiai darbo zonoje priklauso nuo oro temperatūros (STR 2.09.02:2005; LST EN 13779:2007).

Kuriant modelį priimama, kad darbo valandomis mikroklimato sistemos palaikomos komfortinės sąlygos: šiltuoju metų laiku yra nustatyta palaikyti $24 \text{ }^\circ\text{C}$ patalpos oro temperatūra, o šaltuoju metu – $21 \text{ }^\circ\text{C}$. Ne darbo metu, šildymo sistema palaiko 3 K žemesnę ($18 \text{ }^\circ\text{C}$) nei nustatytoji temperatūra. Oro pašildymo iki nustatytosios trukmė – 1 val. Toks temperatūros pažeminimas ir oro pašildymo laikas parinktas remiantis normomis (LST EN 12831:2003) pagal pastato masyvumą.

Tiekiamo švaraus oro kiekis priklauso nuo pastato kategorijos. Aukštesnės kategorijos patalpose yra užtikrinama geresnė oro kokybė. Tyrimais (Wargocki 2006; Wargocki ir Seppanen 2006) taip pat nustatyta, kad žmogaus darbo efektyvumas yra tiesiogiai priklausomas nuo komfortinių sąlygų: kuo komfortiščiau žmogus jaučiasi, tuo jis našiau dirba ir investuoti į geresnę oro kokybę patalpose apsimoka.

Bet kuriuo atveju būtina laikytis minimalių normose nurodytų reikalavimų švaraus oro kiekiams. Modelyje minimalus tiekiamo švaraus oro kiekis parenkamas 10 l/s žmogui (STR 2.09.02:2005).

3.8.1. Vėdinimo sistema

Patalpos yra mechaniškai vėdinamos. Mechaninio vėdinimo tiekiamo švaraus oro kiekis yra 10 l/s žmogui (jis vėsinimo sezono metu gali būti ir didesnis, priklausomai nuo vėsos poreikių). Taip pat švarus oras priteka infiltracijos keliu. Vėdinimo sistema veikia tik darbo valandomis, kitu metu ji yra išjungta.

Siekiant taupyti energiją, yra numatyta patalpų oro recirkuliacija (lauko oras oro paruošimo įrenginyje dalinai maišomas su iš patalpų ištraukiamu oru). Taip pat nurodyta, kad į patalpas visada patektų minimalus švaraus oro kiekis.

Vėdinimo sistema numatoma su rekuperacija. Rekuperatoriaus temperatūrinis efektyvumas 70 %, lauko oras rekuperatoriuje sušildomas iki 15 °C.

Programoje reikia įvesti vėdinimo sistemos slėgio nuostolius bei ventiliatoriaus efektyvumą. Kadangi nagrinėjama tik viena pastato patalpa ir vėdinimo sistemos ortakių bei oro paskirstymo įrangos projektavimas neatliekamas, slėgio nuostoliai apskaičiuojami iš savitosios ventiliatoriaus galios (LST EN 13779:2007):

$$P_{SFP} = \frac{\Delta p}{\eta_{tot}}, \quad (3.2)$$

čia P_{SFP} – specifinė ventiliatoriaus galia, $W \cdot m^{-3} \cdot s$; Δp – sistemos slėgio nuostoliai prieš ir už ventiliatoriaus; η_{tot} – bendras ventiliatoriaus, variklio ir pavaros efektyvumas, kuris priimamas 70 %.

Priimama, kad ventiliatoriaus variklis yra kintamo greičio, o jo specifinė savitoji galia yra SFP 3 kategorijos (LST EN 13779:2007; STR 2.09.02:2005) ir lygi 1250 W/(m³/s). Iš formulės (3.2) gaunama, kad slėgio nuostoliai vėdinimo sistemoje yra 863 Pa. Slėgio nuostolius taip pat apytiksliai galima nustatyti pagal normose pateiktas vidutines nuostolių reikšmes vėdinimo sistemos elementuose (LST EN 13779:2007).

Kadangi patalpai yra numatytas oro kondicionavimas, vienu metu naudoti natūralų vėdinimą neefektyvu, todėl jis nenumatomas.

3.8.2. Šildymo sistema

Parenkama, kad šiluma yra gaminama dujiniame katile su automatiniu reguliavimu. Tokio šilumos šaltinio efektyvumas yra 0,94 (STR 2.09.04:2008). Priimami šilumos paskirstymo nuostoliai – 5 %. Šildymo sistema – radiatorinė.

Tiekiamo į patalpas oro pašildymui iki 18 °C numatytas vandeninis šildytuvai. Šildymo sistema palaiko darbo valandomis nustatytą 21 °C temperatūrą, o ne darbo valandomis – 18 °C.

3.8.3. Vėsinimo sistema

Vėsinimui naudojama oru vėsinama vandens šaldymo mašina. Priimamas vidutinio efektyvumo šaldymo mašinos naudingo veikimo koeficientas (angl. *COP*) 2,5; pagal Eurovent energinio naudingumo klasifikaciją toks naudingumas atitinka D klasę (Eurovent 2005). Tiekiamas į patalpas atvėsintas oras yra 18 °C temperatūros. Vėsinimo sistemos paskirstymo nuostoliai – 5 %. Vėsinimo sistema veikia tik darbo valandomis.

3.9. Langų parinkimas analizei

3.9.1. Reikalavimai langų plotui

Langų projektavimo, įvertinant natūralaus apšviestumo poreikį, reikalavimai yra nustatyti STR 2.05.20:2006. Esant šoniniam patalpų apšvietimui, langų įstiklinto paviršiaus plotas A_{sv} (m²) turi būti ne mažesnis už apskaičiuotą pagal formulę:

$$A_{sv} = 0,01 \cdot A_{gr} \cdot \frac{N_v \cdot k \cdot \eta_0}{\tau_0 \cdot r_1} K_t, \quad (3.3)$$

čia N_v – NAK norminė vertė (%), nustatoma pagal pastatų ir patalpų paskirtį pagal higienos normas (HN 98:2000). Ji nagrinėjama atvejui esant 500 lx apšvietimui yra lygi 1,5 %; k – pataisos koeficientas (STR 2.05.20:2006), kuris priklauso nuo lango orientacijos; A_{gr} – patalpos grindų plotas (m²), kuris nagrinėjama atvejui lygus 15 m²; τ_0 – bendrasis šviesos pralaidumo koeficientas; r_1 – koeficientas, įvertinantis NAK padidėjimą šoninio apšvietimo atveju dėl šviesos atspindėjimo nuo paviršių. Jis nustatomas pagal patalpos pločio ir atstumo m santykį z bei patalpos ilgio ir pločio santykį. Nagrinėjama atvejui r_1 gaunamas 1,47; K_t – koeficientas, įvertinantis langų užtemdymą dėl šalia esančių pastatų. Šis koeficientas, priimant, kad gretimi pastatai yra pakankamai toli, yra lygus 1 (STR 2.05.20:2006); η_0 – lango šviesos pralaidumo charakteristika.

τ_0 nustatomas pagal formulę (STR 2.05.20:2006):

$$\tau_0 = \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 \cdot \tau_4, \quad (3.4)$$

čia τ_1 – įstiklinimo šviesos pralaidumo koeficientas. Koeficiento vertė priklauso nuo stiklo storio ir atstumo tarp stiklų. Ji kiekvienam nagrinėjamam įstiklinimo variantui bus skirtinga. τ_2 – koeficientas, įvertinantis šviesos nuostolius dėl langų skersinių. Priimama, kad šis koeficientas lygus 1. τ_3 – koeficientas, įvertinantis šviesos nuostolius dėl lubų konstrukcijos. Esant šoniniam apšvietimui jis lygus 1; τ_4 – koeficientas, įvertinantis šviesos nuostolius dėl apsaugos nuo saulės priemonių. Kai saulės apsaugos priemonių nėra arba yra atitraukiamos žaliuzės, šis koeficientas lygus 1.

η_0 apskaičiavimo formulė parenkama pagal patalpos ilgio (atstumas nuo lango iki priešais esančios sienos) ir pločio santykį, kuris yra lygus 0,6. Tokiu atveju ši charakteristika turi būti skaičiuojama pagal formulę (STR 2.05.20:2006):

$$\eta_0 = 7,4 \cdot m + 13,8, \quad (3.5)$$

čia m – atstumas nuo sąlyginės apšviečiamos plokštumos iki lango įstiklinimo viršaus. Sąlyginė apšviečiama plokštuma nagrinėjamu atveju yra priimama 0,8 m nuo grindų. Remiantis ASHRAE (2001) rekomendacijomis, priimama, kad nepriklausomai nuo lango ploto, jis bus kiek įmanoma aukščiau. Tokiu atveju atstumas m yra priimamas 2,3 m.

Iš formulių (3.3) ir (3.5) gaunama, kad įstiklinimo plotas nagrinėjamam variantui galutinai priklauso nuo lango įstiklintos dalies šviesos pralaidumo ir orientacijos:

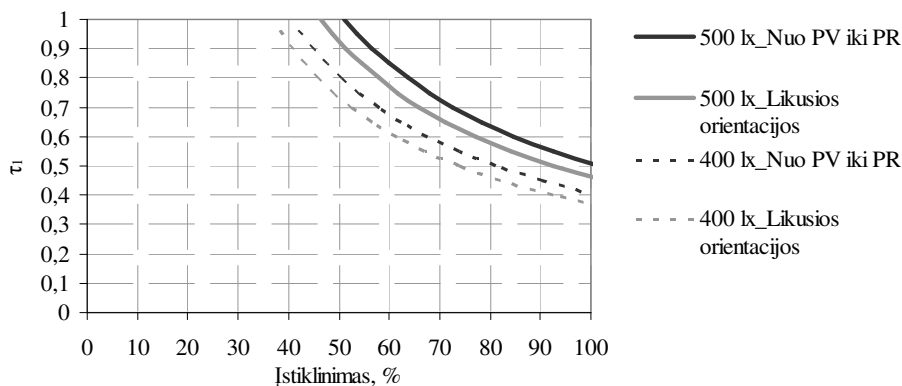
$$A_{sv} = 4,72 \cdot \frac{k}{\tau_1}. \quad (3.6)$$

Remiantis formulė (3.6) analizuojamai patalpai bus apskaičiuojamas minimalus NA higienos normų reikalavimus tenkinantis įstiklinimo plotas.

Dažnai darbo vietose nėra būtina 500 lx apšvieta ir išlaikant norminius parametrus ją galima sumažinti iki 400 lx. Tokia reikšmė imama kaip standartinė projektuojant oro kondicionavimo sistemas (LST EN 13779:2007). Norint palaikyti tokį apšvietos lygį, sumažėja reikalavimai ir NAK. Jis tokiu atveju lygus 1,2 %. O minimalus įstiklinimo plotas tokiu atveju turi būti apskaičiuojamas pagal formulę:

$$A_{sv} = 3,77 \cdot \frac{k}{\tau_1}. \quad (3.7)$$

Remiantis formulėmis (3.6) ir (3.7) nagrinėjai patalpai, esant skirtingoms orientacijoms, gaunama santykinio fasado įstiklinimo ploto priklausomybė nuo šviesos pralaidumo koeficiento (3.10 pav.).



3.10 pav. Minimalaus SFIP priklausomybė nuo įstiklinimo šviesos pralaidumo koeficiento

Fig. 3.10. Dependency of the minimal required fenestration on light transmittance of the glass

Sumažinus apšvietos lygį 100 lx (3.10 pav.), minimalus įstiklinimo plotas, priklausomai nuo įstiklinimo šviesos pralaidumo koeficiento, gali būti apie 10–20 % mažesnis. Žemesnį apšvietos lygį galima pasirinkti, jei žinoma, kad pastate bus atliekamas mažesnio tikslumo darbas, kuriam nebūtina 500 lx apšvieta.

3.9.2. Langų charakteristikos

Langų įstiklinta dalis ir stiklo charakteristikos yra energiniu požiūriu žymiai svarbesnės nei langų rėmai (Almeida Ferreira Tavares ir de Oliveira Gomes Martins 2007).

Pagrindinės energiniu požiūriu svarbios langų charakteristikos greta langų ploto yra: šilumos perdavimo koeficientas (U), visuminis saulės energijos praleisties koeficientas (g) ir bendrasis šviesos pralaidumo koeficientas (τ_0).

STR 2.05.20:2006 nustatytas langų plotas, kai būtina naudoti saulės pritekėjimus ribojantį stiklą (3.4 lentelė).

3.4 lentelė. Didžiausios leistinos langų plotų dalies patalpos atitvarose vertės

Table 3.4. Maximum allowed part of the windows area in external elements of the room

Langų orientacija	Langų ploto dalis patalpos atitvarose
ŠR – Š – ŠV	0,3
Visos kitos	0,2

Saulės veikiamo langų ploto dalis patalpos atitvarose apskaičiuojama pagal formulę:

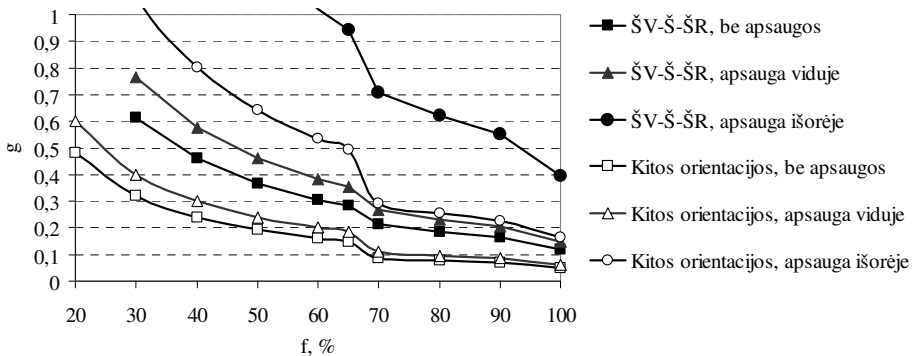
$$f = \frac{A_w}{A_f}, \quad (3.8)$$

čia A_w – veikiamas saulės patalpos langų plotas (m^2); A_f – patalpos pagrindinio fasado plotas (m^2).

Kai langų ploto dalis atitvarose didesnė už nurodytą 3.4 lentelėje, vidutinio langų įstiklinimo visuminės saulės energijos praleisties koeficiento g vertė turi būti ne didesnė už apskaičiuotą pagal formulę:

$$g = 0,7 \cdot \frac{S_0 + \sum \Delta S}{f \cdot F_C \cdot F_F}, \quad (3.9)$$

čia F_F – koeficientas, įvertinantis langų įstiklinimo dalį. Neturint duomenų, galima naudoti $F_F = 0,8$; F_C – koeficientas, įvertinantis apsaugos nuo saulės priemonių įtaką; S_0 – įstiklinimo bazinė saulės energijos pralaidumo vertė. $S_0 = 0,18$; ΔS – priedai prie įstiklinimo bazinės saulės energijos pralaidumo vertės.



3.11 pav. Reikalavimai minimaliam saulės energijos praleisties koeficientui g (nagrinėjamam atvejui)

Fig. 3.11. Requirements for the minimal solar heat gain coefficient g (for the analyzed case)

Kaip matyti iš 3.11 paveikslu, ties lango dalies plotu lygiu 65 %, kreivės lūžta. Tai nulemia didesniai nei 65 % lango plotui taikomas priedas (ΔS) prie įstiklinimo bazinės saulės energijos pralaidumo vertės.

Perednis *et al.* (2007) aukščiau minėtiems pastatams pateikė energijos sąnaudų vėsinimui priklausomybę nuo lango šilumos perdavimo koeficiento ir nustatė, kad šilumos perdavimo koeficientui mažėjant nuo 1,7 iki 0,7 W/m^2K (kai $g=0,53$), Lietuvos sąlygomis energijos sąnaudos vėsinimui padidėja apie 24 %.

Didesnės koeficiento g reikšmės yra naudingesnės šaltuose klimatuose. τ/g santykis nusako stiklo efektyvumą. Jei šis santykis mažiau nei 1, stiklas prastai užtikrina NA, o jei ši reikšmė yra daugiau nei 1,55, toks stiklas laikomas didelio efektyvumo. Lango ir sienos plotų santykį padauginus iš bendrojo šviesos pralaidumo koeficiento, gaunamas parametras, kuris nusako NA kokybę. Efektyvus laikomas koeficientas nuo 0,15 iki 0,30, tačiau šis rodiklis negali būti vertinamas vienareikšmiškai – turi būti rastas balansas tarp vizualinio ir šiluminio komforto (ASHRAE 2004).

3.9.3. Langų tipai

Standartiniai saulės pritekėjimus kontroliuojantys stiklo paketai yra: reflektiniai (atspindintys), absorbuojantys (spalvoti) ir selektyvūs. Reflektiniai ir absorbuojantys stiklai kontroliuoja saulės pritekėjimus, tačiau jie stabdo taip pat ir natūralią šviesą. Kai tuo tarpu selektyvūs stiklai tinka saulės pritekėjimų kontrolei, bet netrukdo patekti natūraliai šviesai.

Naudojant selektyvų stiklą dėl mažesnių saulės šilumos pritekėjimų, dėl mažesnio elektros energijos apšvietimui poreikio ir dėl mažesnių šilumos išsiskyrimų nuo apšvietimo, žymiai sumažėja vasaros pikiniai elektros energijos poreikiai vėsinimui ir apšvietimui. Kadangi vėsinimo įranga administraciniams pastatams parenkama pagal pikinį vėsos poreikį, tai selektyvios dangos naudojimas sumažina įrangos galingumus ir investicijas į įrangą. Paprastas skaidrus stiklas vidutiniškai sustabdo 25 % šiluminių saulės spindulių, o selektyvus gali sulaikyti iki 69 %. Selektivaus stiklo naudojimas yra labiausiai ekonomiškai klimatuose kur dominuoja vėsinimo poreikis ir kai apšvietimas yra kontroliuojamas pagal NA. Selektivaus stiklas netinkamas naudoti tada, kai pastate dominuoja šildymo poreikis, o vėsinimo poreikis yra labai mažas. Taip pat netinka selektivaus stiklas, kai yra naudojamos apsaugos nuo saulės priemonės arba kai ant langų pastoviai krenta šešėliai (pvz.: nuo medžių), nes tokiu atveju paprasčiausiai negaunamas pageidaujamas efektas.

Patobulintų langų naudojimas reikalauja sąlyginai mažų investicijų, kurios greitai atsiperka, o jų priežiūra nieko papildomai nekainuoja (de Almeida Ferreira Tavares ir de Oliveira Gomes Martins 2007).

Langai gali būti patobulinti naudojant selektyvines mažos emisijos dangas (low-e), kurios leidžia šviesai patekti į patalpas, bet neleidžia ten patekti šilumai. Pagerinti lango šilumos perdavimo koeficientą taip pat galima naudojant tarp stiklų dujas, kurių mažas laidumas (argonas, kriptonas), ir optimizuojant tarpą tarp stiklų dvigubo ar trigubo ištiklinimo languose (Menzies ir Wherret 2005).

Atspindinčios stiklo dangos naudojimas leidžia žymiai sumažinti energijos poreikį vėsinimui (į pietus orientuotam pastatui iki 34 %), tačiau dėl to padidėja energijos poreikis šildymui (iki 17 %) (Gratia ir De Herde 2003).

Be minėtų stiklo paketų rūšių, taip pat yra sukurti elektrochrominiai langai, kurie pritaikytos nuolatinės įtampos srovės elektrochrominėje dangoje pagalba leidžia keisti matomos šviesos ir saulės šilumos pritekėjimus. Elektrochrominių langų gamintojai deklaruoja, kad lango su dvigubu stiklu bendrasis šviesos pralaidumo koeficientas gali kisti nuo 0,70 iki 0,04. Atitinkamai visuminis saulės energijos praleisties koeficientas kinta 0,52 iki 0,10. Taigi elektrochrominiai langai leidžia patalpose darbuotojams arba pastatų priežiūros specialistams valdyti saulės pritekėjimus ir šviesos pritekėjimus (James ir Bahaj 2005).

Taip pat yra patvirtintas termotropinio (TT) (reaguojančio į šilumą) stiklo efektyvumas. Šie langai yra ne tik energetiškai efektyvūs, bet ir pagerina darbo sąlygas šalia langų sėdintiems žmonėms (Chikada 2001; Inoue 2003). TT stiklas – tai du stiklai, tarp kurių suspausta polimerinė želė. Želė turi savybę esant tam tikrai charakteringai temperatūrai leisti stiklui pačiam stabdyti saulės pritekėjimus, tačiau tuo pat metu praleisti natūralią šviesą (Watanabe 1998). Šis stiklas yra pripažintas tinkamas darbo kambariams, tačiau žiemos metu esant didelei saulės spinduliutei, dėl žemų lauko temperatūrų nepasiekiamo fazių kaita ir langų veiksmingumas dingsta. Todėl šie langai vis dar yra nepakankamai ištirti ir yra atliekami tyrimai, kaip pasiekti maksimalų efektą (Inoue *et al.* 2008).

3.9.4. Stiklo paketų parinkimas

Siekiant įvertinti įstiklinimo įtaką administracinio pastato energijos poreikiams, darbe parenkami skirtingi stiklo paketai. Nagrinėjama pastatui atlikus energijos poreikų analizę (Sasnauskaitė ir Juodis 2007), kai įstiklinimo variantai buvo parinkti pagal stiklo paketo rūšį (absorbuojantis, atspindintis ar selektyvus), nebuvo gauta vienareikšmiškų išvadų, kuris variantas energiškai efektyviausias. Taip atsitiko todėl, kad stiklo paketai buvo renkami pagal jų tipą, neatsižvelgiant į jų konkrečias charakteristikas.

To paties tipo lango charakteristikos gali labai skirtis ir būti artimos kitam, todėl renkantis langą, reikia žiūrėti ne į tipą, o į konkrečias charakteristikas.

Skaičiuotini stiklo paketų variantai parenkami tokie, kad pagrindinės charakteristikos – įstiklinimo šviesos pralaidumo koeficientas, saulės energijos praleisties koeficientas ir šilumos perdavimo koeficientas – būtų kiek įmanoma skirtingi. Renkantis stiklo paketą taip pat laikomasi dviejų apribojimų:

- Šilumos perdavimo koeficientas turi tenkinti norminius reikalavimus;
- Įstiklinimo šviesos pralaidumo koeficientas neturi būti mažesnis nei 50 % (žr. 3.9 pav.).

Tolimesniems skaičiavimams apsiribojama parenkant 5 skirtingus stiklo paketus (3.5 lentelė). Jeigu tenkinamos dvi aukščiau išvardytos sąlygos, tolimesnis paketo pasirinkimas daromas atsižvelgiant į τ_1/g santykį. Kuo didesnis paketo

τ_1/g santykis ir kuo mažesnis šilumos perdavimo koeficientas – tuo paketas efektyvesnis energiniu ir NA atžvilgiu.

Analogiškos Lietuvos įmonės siūlomų langų konstrukcijom buvo susikurtos DesignBuilder programoje.

3.5 lentelė. Analizuojamų stiklo paketų charakteristikos

Table 3.5. Characteristics of the analyzed glazing

Nr.	Stiklo paketo apibūdinimas	U, W/m ² K	τ_1	g	τ_1/g
1.	Trigubas skaidrus stiklas (4-16Ar-4-16Ar-4)	1,614	0,753	0,725	1,04
2.	Dvigubas, su vidiniu šilumą atspindinčiu stiklu (4-16Ar-4)	1,437	0,788	0,619	1,27
3.	Dvigubas skaidrus, turi ir šviesos ir saulės atspindėjimo dangas (6-16Ar-4)	1,436	0,593	0,464	1,28
4.	Dvigubas stiklas su multifunkcinėmis dangomis (6-16Ar-4)	1,384	0,598	0,343	1,74
5.	Dvigubas stiklas su mažos emisijos danga (6-16Ar-4)	1,383	0,739	0,428	1,73

Remiantis (3.6) formule, kai apšvieta palaikoma 500 lx, apskaičiuojamas minimalus išskirto pastato elemento įstiklinimo plotas esant skirtingiems stiklo paketams (3.6 lentelė).

3.6 lentelė. Minimalūs reikalaujami įstiklinimo plotai parinktiems stiklo paketams

Table 3.6. Minimal required fenestration for selected glazing

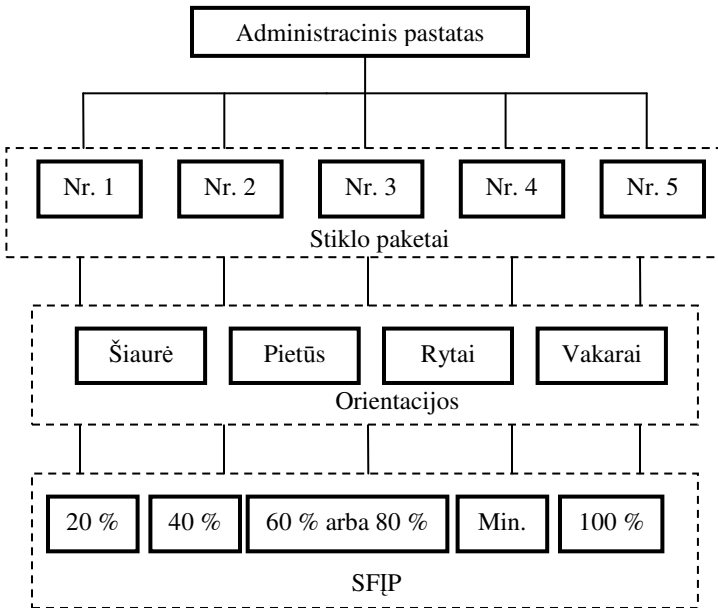
Stiklo paketo Nr.	Minimalus fasado įstiklinimo plotas			
	Orientacija nuo PV iki PR		Kitos orientacijos	
	m ²	%	m ²	%
1.	6,90	68	6,27	61
2.	6,59	65	5,99	59
3.	8,76	86	7,96	78
4.	8,68	85	7,89	77
5.	7,03	69	6,39	63

Šie apskaičiuoti minimalūs įstiklinimo plotai, tenkinantys NA higienos normų reikalavimus yra naudojami tolimesniuose skaičiavimuose.

Toliau stiklo paketams įvardinti bus naudojami 3.5 lentelėje priskirti numeriai.

3.10. Analizuojamos įstiklinimo alternatyvos

Programoje DesignBuilder skirtingiems stiklo paketams sukuriama baziniai modeliai. Kiekvienam iš stiklo paketų yra nagrinėjamos keturios pagrindinės orientacijos pasaulio šalių atžvilgiu. Kiekvienai stiklo paketo ir orientacijos kombinacijai keičiamas SFĖP nuo 20 % iki 100 %. Mažiau nei 20 % SFĖP nėra priimtinas psichologinio ir vizualinio komforto atžvilgiais bei nerekomenduojamas aukščiau aptartuose literatūros šaltiniuose. 3.12 paveiksle yra pavaizduota, kokios fasado įstiklinimo kombinacijos yra skaičiuojamos.



3.12 pav. Analizuojamos įstiklinimo alternatyvos
Fig. 3.12. Analyzed glazing alternatives

Kadangi minimalus reikalaujamas SFĖP skirtingiems stiklo paketams yra nevienodas, todėl nėra tikslo skaičiuoti 60 % įstiklinimą, jei gautas minimalus NA normas tenkinantis SFĖP yra 65 %. Dėl to schemoje prie fasado įstiklinimo ploto nenurodomas konkretus įstiklinimas, o „60 % arba 80 %“. Toks supaprastinimas leidžia sumažinti skaičiuotinių variantų skaičių. „Min.“ reiškia minimalų NA higienos normas tenkinantį SFĖP.

Iš viso modeliuojama 100 skirtingų administracinio pastato įstiklinimo alternatyvų.

3.11. Trečiojo skyriaus išvados

Kiekvienas administracinis pastatas yra skirtingas, todėl neįmanoma išnagrinėjus vieną konkretų pastatą jo skaičiavimo rezultatus taikyti universaliai. Dėl šios priežasties tolimesnei analizei atlikti tikslinga išskirti vieną patalpą, kaip būdingą šilumino režimo atžvilgiu atitinkamos orientacijos fasade.

EnergyPlus modeliavimui naudojami klimatiniai duomenys skiriasi nuo Lietuvoje reglamentuojamų dėl skirtingos jų nustatymo metodikos bei skaičiavimams naudojamų duomenų. Atlikta EnergyPlus, RSN 156-94 ir faktinių 14 pastarųjų metų lauko oro temperatūrų analizė leidžia daryti prielaidą, kad EnergyPlus klimatiniai duomenys yra tinkami analizei atlikti.

Analizuojamai patalpai yra parenkamos konstrukcijos, patalpų naudojimo režimas, palaikomi patalpų komfortiniai parametrai, apšvietimo bei mikroklimato sistemos. Taip pat parinktos penkios stiklo paketų alternatyvos ir jiems nustatyti minimalius natūralaus apšvietimo higienos normų reikalavimus atitinkantys SFĮP.

Pagal tą pačią schema (2.9 pav.), kaip ir VIC pastatui, yra modeliuojama 100 skirtingų įstiklinimo alternatyvų, siekiant nustatyti efektyviausias fasado įstiklinimo charakteristikas, kai vertinimo kriterijus yra metinis pirminės energijos poreikis mikroklimato ir apšvietimo sistemose.

Modeliavimo rezultatų analizė

Atlikus skirtingų pastato įstiklinimo plotų, orientacijų ir stiklo paketų kombinacijų (3.11 pav.) modeliavimą su EnergyPlus programa, rezultatai iš DesignBuilder programos importuojami į Microsoft Excel, kur ir atliekamas jų apdorojimas.

Vertinami tik tie energijos poreikiai, kurie priklauso nuo įstiklinimo charakteristikų (nuo jų nepriklauso tik energijos poreikiai biuro technikai bei karštam vandeniui ruošti). Įstiklinimo charakteristikų vertinimo kriterijus – suminiai metiniai mikroklimato ir apšvietimo sistemų pirminės energijos poreikiai.

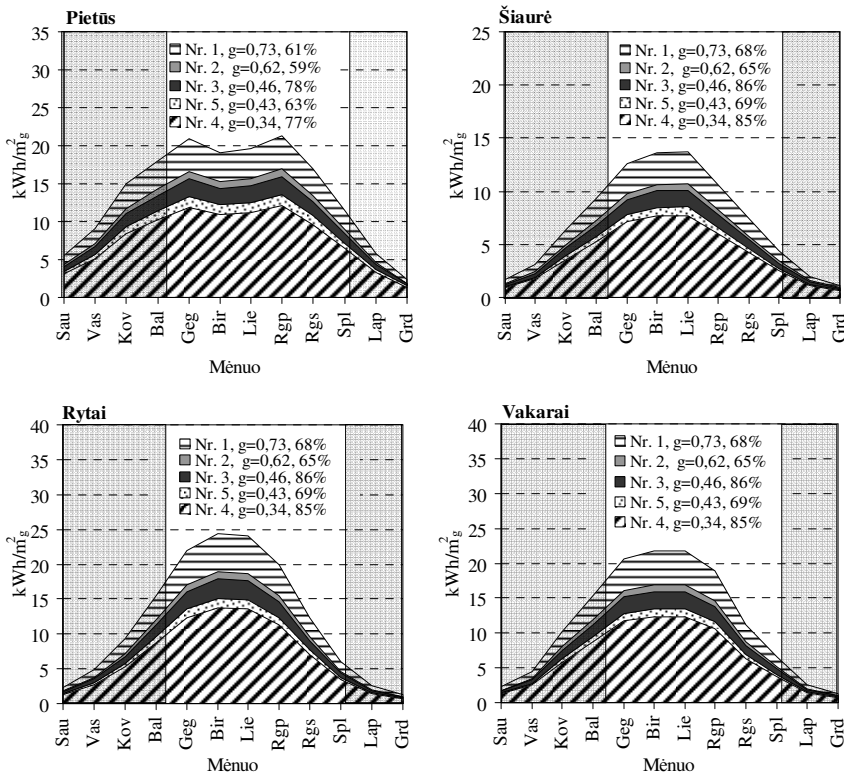
Skyriaus tematika paskelbti šeši autoriaus straipsniai (Sasnauskaitė ir Juodis 2007a; 2007b; Паулаускайте *et al.* 2009; Motuzienė *et al.* 2010; Motuzienė ir Juodis 2010a; 2010b).

4.1. Šilumos pritekėjimai dėl saulės spinduliuotės

Langai yra tiesioginės saulės spinduliuotės į patalpą šaltinis. Per langus patekusi spinduliuotė sudaro didžiąją dalį (Eicker 2009) visų patalpos šilumos pritekėjimų. Perednio (2007) skaičiavimais Lietuvos sąlygomis administraciniam pastatui šie pritekėjimai sudaro 90 %. Saulės šilumos pritekėjimai sumažina energijos poreikį šildymui žiemą, tačiau vasarą yra pagrindinė didelių energijos poreikių vėsinimui administraciniuose pastatuose priežastis. 4.1 paveiksle pavaizduota

minimalius NA reikalavimus tenkinančio SFIP atveju, kaip saulės šilumos pritekėjimai per langus pasiskirsto metų bėgyje ir jų priklausomybė nuo stiklo paketo charakteristikų. Kitiems įstiklinimo atvejams kitimo tendencijos yra tokios analogiškos.

4.1 paveiksle taip pat yra užštrichuotos šildymo sezono ribos tam, kad matytųsi, kuri saulės pritekėjimų dalis mažina energijos poreikius šildymui. Pagal RSN 156-94 Kauno miestui skaičiavimams naudojamo šildymo sezono pradžia yra rugsėjo 26 d., o pabaiga – gegužės 3 d., tačiau realiai jis pradedamas tada, kai tris paras vidutinė lauko oro temperatūra būna žemesnė nei 10 °C. Kadangi dažniausiai šildymo sezonas būna trumpesnis nei nurodytas normose, todėl pavažduotos apytikslės ribos, remiantis 1994–2007 metų šildymo sezonų duomenimis (Juodis ir Sasnauskaitė 2008b).

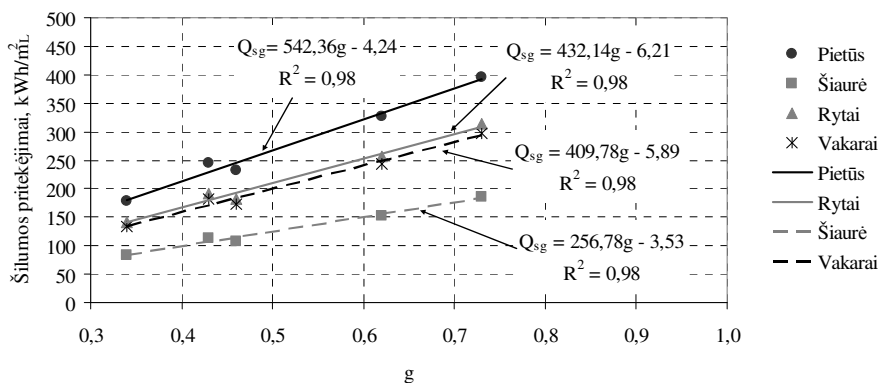


4.1 pav. Saulės šilumos pritekėjimai per skirtingos orientacijos langus, kai SFIP minimalus tenkinantis NA higienos normas

Fig. 4.1. Solar heat gains through the windows of different orientation, when WWR is equal to minimal required by hygiene norms of daylighting

Iš literatūros žinoma, kad koeficientas g yra pagrindinė stiklo charakteristika, lemianti saulės energijos pritekėjimus, tai matoma ir iš 4.1 paveikslo (jame procentais nurodomas SFIP). Žiemos mėnesiais pritekėjimai yra maži, todėl skirtumas tarp stiklo paketų yra nežymus: gruodžio–sausio mėnesiais skirtumas neviršija 2 kWh/m^2_g . Tuo tarpu vasaros mėnesiais koeficiento g įtaka pritekėjusios saulės spinduliuotės kiekiui yra žymi ir skirtumas tarp šilumos pritekėjimų gali siekti 11 kWh/m^2_g .

Norint gautus saulės energijos pritekėjimus taikyti universaliai, ne tik nagrinėjamai patalpai, reikalinga pritekėjimus perskaičiuoti į tenkančius lango ploto vienetui. 4.2 paveiksle vaizduojami saulės šilumos pritekėjimai į patalpą per lango ploto vienetą SFIP, kuris lygus minimaliam reikalaujamam pagal NA higienos normas.



4.2 pav. Metiniai saulės šilumos pritekėjimai per langus, kai SFIP minimalus tenkinantis NA higienos normas

Fig. 4.2. Annual solar heat gains through windows, when WWR is equals minimal required by hygiene norms of daylighting

Kaip matyti iš 4.2 paveikslo, gauta tiesinė priklausomybė tarp saulės energijos praleisties koeficiento g ir saulės šilumos pritekėjimų į patalpą (Q_{sg}) bei priklausomybę aprašančios tiesinės regresijos lygtys.

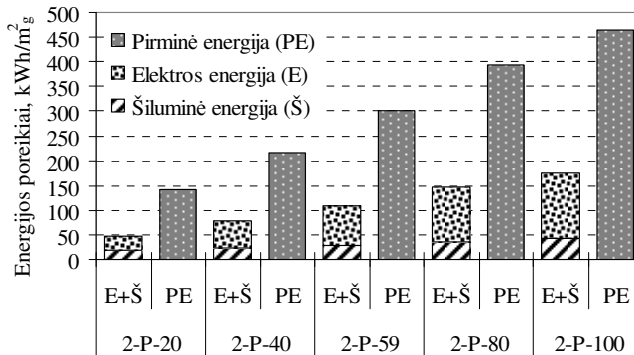
4.2. Pastato energijos poreikių analizė

Daugelis (Bülow-Hübe 2001; Poirazis *et al.* 2008 ir kt.) panašaus pobūdžio analizėse pastato energijos poreikius šilumos forma sumuoja su elektra neįvertindami to fakto, kad tai yra skirtingos kokybės energija. Toks sumavimas iš principo nėra teisingas, todėl lyginti įstiklinimo charakteristikų įtaką pastato energijos poreikiams teisinga tik perskaičiusus suvartojamą galutinę energiją į

pirminę energiją (PE). Pirminė energija suprantama, kaip energija, kurią savyje turi gamtinis energijos išteklius prieš transformuojant jį į galutinę energiją, o galutinė energija – tai energija, kurią vartotojas išsityja galutiniam vartojimui. Transformuojant pirminę energiją į galutinę, išgavimo, perdirbimo, saugojimo, transportavimo, gamybos, transformavimo, perdavimo ir paskirstymo procesuose atsiranda nuostoliai. Ši pirminės energijos transformavimo į galutinę efektyvumą apibūdina pirminės energijos transformacijos koeficientas, kuris dar kitaip vadinamas pirminės energijos (PE) rodikliu.

Nors PE rodikliai skiriasi priklausomai nuo šalies, tačiau dažnai priimamas elektros pirminės energijos rodiklis lygus 3 (Henze *et al.* 2008; Kalz *et al.* 2009). Įvertinus tai, kad šiluma nagrinėjamame pastate gaminama dujiniame katile (žr. 3.8.2 sk.), šilumai taikomas PE rodiklis gautas lygus 1,12.

Kaip pavyzdys, kaip perskaičiavimas gali pakeisti rezultatus, pateikiamas vieno skaičiuoto atvejo palyginimas (4.3 pav.).



4.3 pav. Pirminės ir galutinės energijos poreikiai

Fig. 4.3. Primary and final energy demand

Sumuojant elektrą ir šilumą (E+Š)(4.3 pav.), gauti galutinės energijos poreikiai didėjant įstiklinimo plotui auga nuo 60 iki 183 kWh/m²_g, tai sudaro 157 %, o vertinant PE atitinkamai 142–265 kWh_{PE}/m²_g – 177 %. Tai reiškia, kad vertinant pagal PE parodoma tikroji įstiklinimo įtaka energijos poreikiams. Dėl šios priežasties disertacijoje įstiklinimo charakteristikų energinio efektyvumo vertinimo kriterijus yra metiniai PE poreikiai.

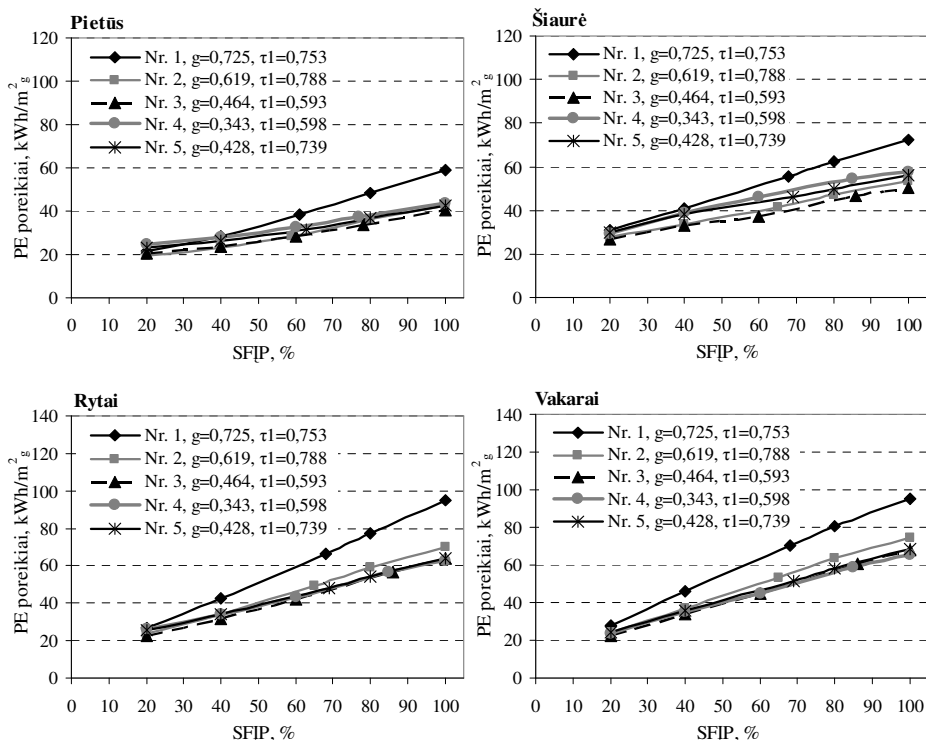
4.3 paveiksle 2-P-20 žymi stiklo paketą Nr. 2, orientacija – pietūs, SFIP – 20 %. Tokiu pačiu principu skirtingos įstiklinimo alternatyvos bus žymimos ir toliau.

4.2.1. Šildymo energijos poreikių ir galių šildymui analizė

Energijos poreikiai šildymui dėl saulės šilumos pritekėjimų ir nuostolių per langus tiesiogiai priklauso nuo įstiklinimo ploto, šilumos perdavimo koeficiento, saulės energijos praleisties koeficiento bei lango orientacijos. PE poreikių priklausomybė nuo įstiklinimo ploto, orientacijos ir stiklo paketo charakteristikų yra pavaizduota 4.4 paveiksle.

Kaip matome, energijos poreikių šildymui priklausomybė nuo įstiklinimo ploto yra žymi visoms orientacijoms. Įstiklinimo ploto padidinimas nuo 20 % iki 100 % energijos poreikius šildymui padidina 2–3 kartus.

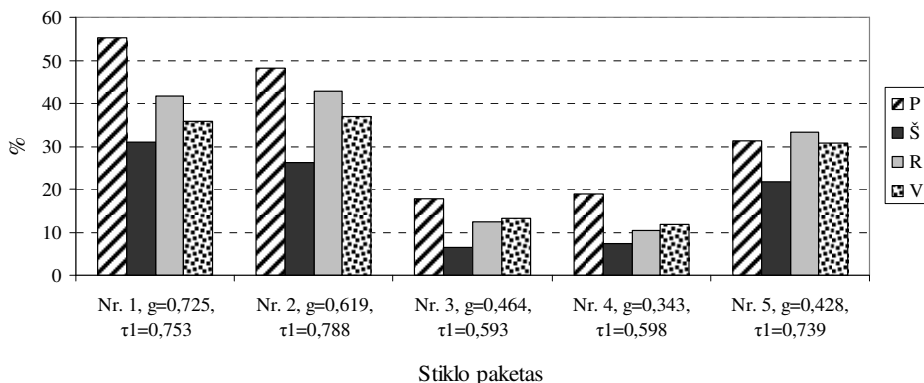
Didžiausi energijos poreikiai yra stiklo paketui, kurio šilumos perdavimo koeficientas yra didžiausias ($1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$). Šiam stiklo paketui PE poreikiai maksimaliam įstiklinimui priklausomai nuo orientacijos siekia $60\text{--}95 \text{ kWh}_{\text{PE}}/\text{m}^2_{\text{g}}$. Kai įstiklinimo plotas mažas, įstiklinimo charakteristikų įtaka sąlyginai maža ir visų stiklo paketų energijos poreikiai yra intervale $22\text{--}31 \text{ kWh}_{\text{PE}}/\text{m}^2_{\text{g}}$.



4.4 pav. Metiniai PE poreikiai šildymui skirtingų orientacijų fasadams
Fig. 4.4. Annual PE demand for facades with different orientations

Energijos poreikiai šildymui (4.4 pav.), padidinus SFIP nuo minimalaus reikalaujamo pagal NA higienos normas iki 100 %, žymiai padidina energijos poreikius šildymui. Šis padidėjimas pavaizduotas 4.5 paveiksle.

Didžiausią energijos poreikiams šildymui įtaką ploto padidinimas daro stiklo paketams su dideliais šviesos pralaidumo koeficientais. Taip yra todėl, kad minimalūs reikalaujami įstiklinimo plotai priklauso iš esmės nuo šviesos pralaidumo ir mažiems šviesos pralaidumo koeficientams gaunamas didelis minimalus reikalaujamas įstiklinimo plotas, taigi sumažinami galimi energijos sutaupymai dėl įstiklinimo ploto.



4.5 pav. PE poreikių šildymui padidėjimas, kai SFIP nuo minimalaus reikalaujamo padidinimas iki 100 %

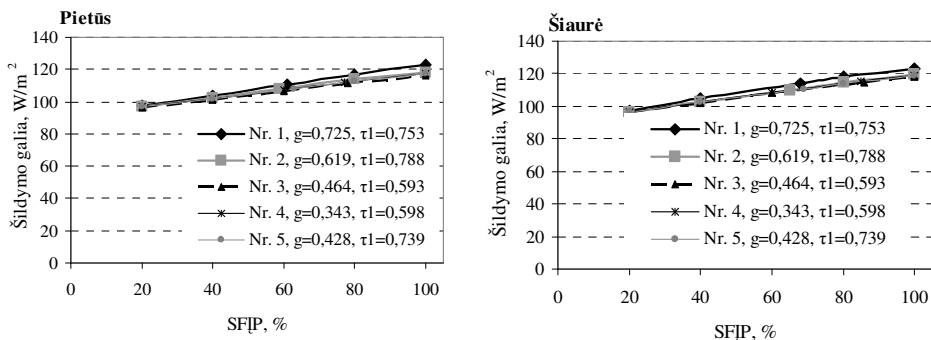
Fig. 4.5. Increase of the heating PE demand, when WWR from the minimal required is raised to 100 %

Padidinus įstiklinimo plotą nuo minimalaus reikalaujamo pagal NA higienos normas iki 100 % stiklo paketams su dideliu šviesos pralaidumo koeficientu, energijos poreikiai šildymui padidėja 21–55 %, o stiklo paketams su mažais šviesos pralaidumo koeficientais atitinkamai 6–19 %.

Šildymo galių analizė

Šildymo galią EnergyPlus programa skaičiuoja kaip stacionarų procesą, esant projektinėms lauko oro sąlygoms, neįvertinant jokių šilumos pritekėjimų. Kadangi modelyje numatomas temperatūros pažeminimas 3 K, programa įvertina ir papildomą galią, reikalingą ryte temperatūrai pakelti iki nustatytosios.

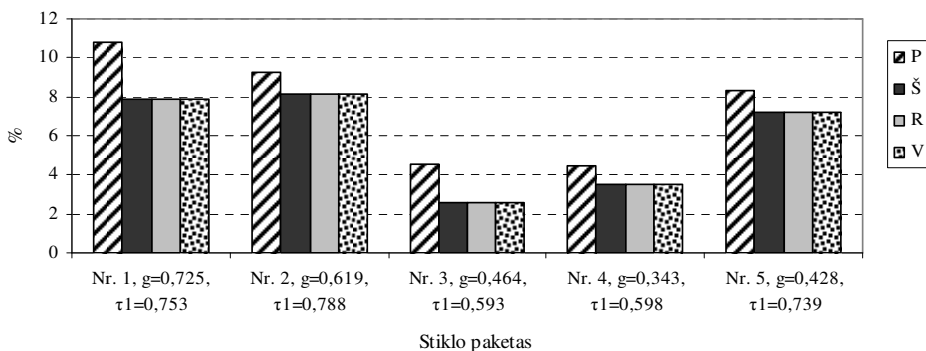
Visoms orientacijoms yra gaunami analogiški grafikai, todėl 4.6 paveiksle vaizduojamas šiluminės galios poreikis tik pietinės ir šiaurinės orientacijos patalpoms.



4.6 pav. Šildymo galios poreikio priklausomybė nuo įstiklinimo charakteristikų
Fig. 4.6. Dependency of the glazing characteristics on the heating load demand

Stiklo paketo charakteristikos reikšmingos įtakos šildymo sistemis galiai neturi – skirtumas tarp stiklo paketų maksimaliai siekia 7 %. Tuo tarpu SFIP padidėjimas nuo 20 % iki 100 % duoda šildymo galios poreikio padidėjimą 22–27 %.

Įstiklinimo ploto padidinimas nuo minimalaus reikalaujamo pagal NA higienos normas, padidina ne tik energijos poreikius šildymui, bet ir šildymo galios poreikius (4.7 pav.), o tuo pačiu ir investicijas į inžinerines sistemas.



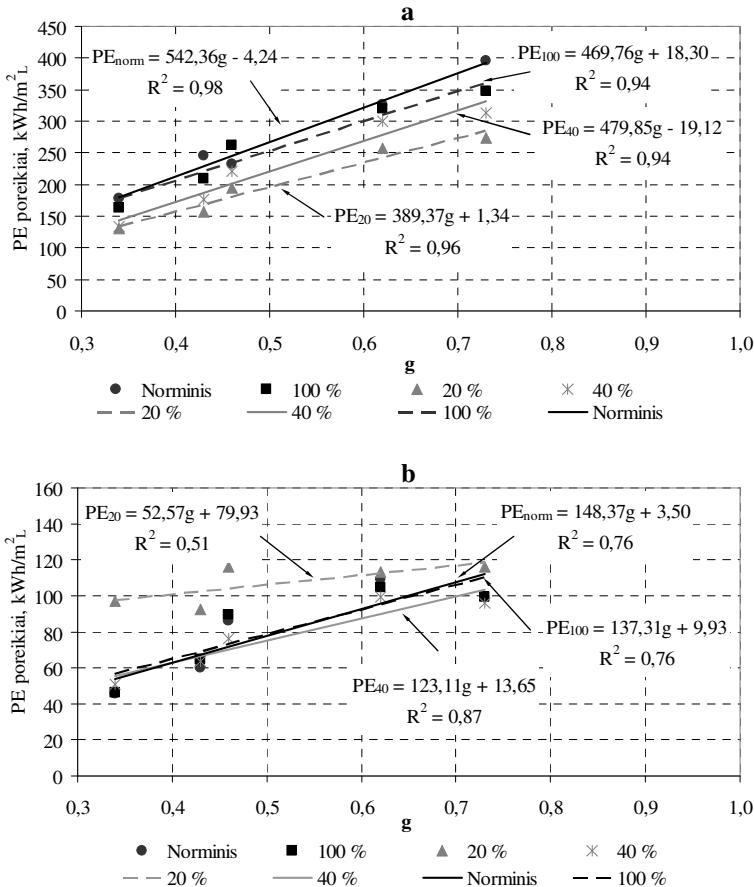
4.7 pav. Šildymo galios padidėjimas, kai SFIP nuo minimalaus reikalaujamo padidinimas iki 100 %

Fig. 4.7. Increase of the heating load, when WWR from the minimal required is raised to 100 %

Projektinis šildymo galios poreikis, dėl to, kad jį skaičiuojant nevertinami šilumos pritekėjimai per langus, yra pastebimai mažiau priklausomas nuo stiklo paketo šiluminių charakteristikų nei energijos poreikiai šildymui.

4.2.2. Energijos poreikių vėsinimui ir vėsinimo galios analizė

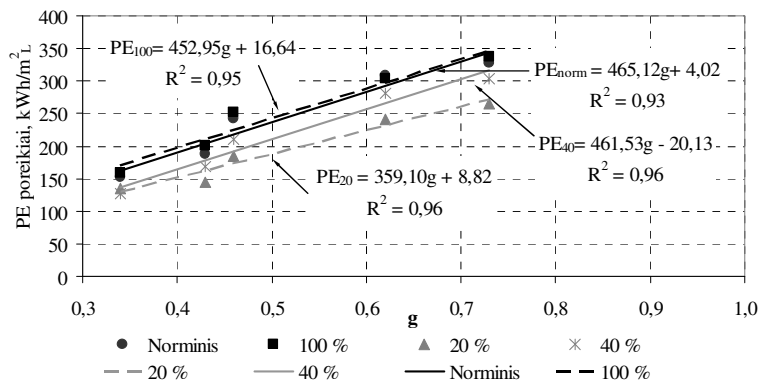
Energijos poreikiai vėsinimui, ypač esant didesniems įstiklinimo plotams, didžiausia dalimi priklausomi nuo saulės šilumos pritekėjimų, o šiuos pritekėjimus lemianti pagrindinė lango charakteristika, kaip jau minėta, yra koeficientas g . Kadangi patalpos gali būti skirtingos geometrijos, tikslingiau energijos poreikius vėsinimui, kaip ir saulės šilumos pritekėjimus, vaizduoti lango, o ne grindų ploto vienetui. Tokiu būdu gautos regresijos lygtys gali būti panaudotos universaliai bet kokiai atitinkamos orientacijos ir įstiklinimo ploto administracinei patalpai energijos poreikiams vėsinimui nustatyti.



4.8 pav. Metinių PE poreikių vėsinimui priklausomybė nuo koeficiento g pietinės (a) ir šiaurinės (b) orientacijos langams

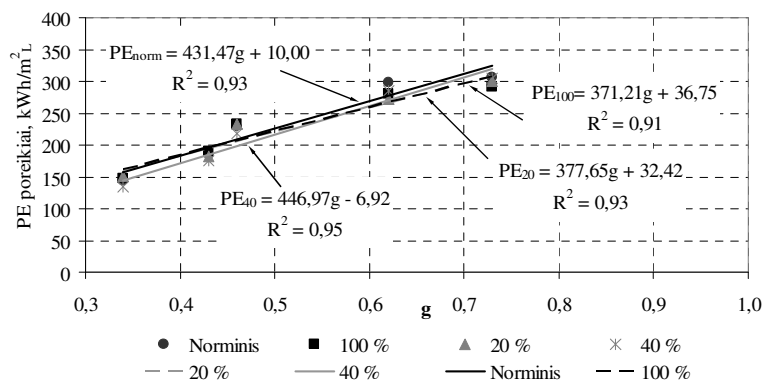
Fig. 4.8. Dependency of the annual cooling PE demand on the coefficient g for the south (a) and north (b) oriented windows

Visiems pietinės orientacijos ištiklinimo plotams koreliacijos koeficientas yra 0,94–0,98 (4.8a pav.), o tai reiškia, kad yra labai stipri tiesinė energijos poreikių vėsinimui priklausomybė nuo ištiklinimo koeficiento g . Tuo tarpu šiaurinei orientacijai (4.8b pav.) tiesinės koreliacijos koeficientas, kai SFIP 40–100 % yra intervale 0,76–0,87, o tai duoda stiprią tiesinę energijos poreikių vėsinimui priklausomybę nuo lango koeficiento g . Išimtis yra mažam SFIP (20 %), tokiu atveju minėta priklausomybė vos patenka į vidutinio stiprumo koreliacijos intervalą, o tai rodo, kad tokiam ištiklinimo plotui, koeficiento g įtaka energijos poreikiams vėsinimui yra nežymi.



4.9 pav. Metinių PE vėsinimui priklausomybė nuo koeficiento g rytinės orientacijos langams

Fig. 4.9. Dependency of the annual cooling PE demand on the coefficient g for the east oriented windows



4.10 pav. Metinių PE vėsinimui priklausomybė nuo koeficiento g vakarinės orientacijos langams

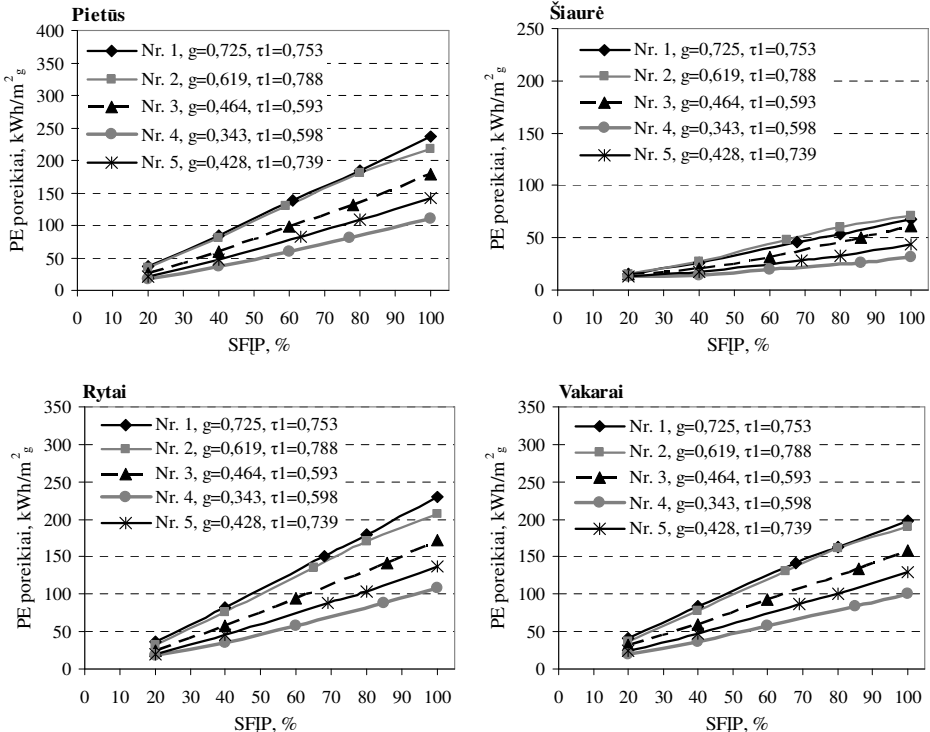
Fig. 4.10. Dependency of the annual cooling PE demand on the coefficient g for the west oriented windows

Rytinės ir vakarinės orientacijos fasadams (4.9–4.10 pav.) energijos poreikių vėsinimui priklausomybės nuo įstiklinimo koeficiento (g) koreliacijos koeficientai visiems įstiklinimo plotams yra 0,91–0,96, kas duoda stiprią tiesinę priklausomybę.

4.11 paveiksle yra pateikiamas metinių PE poreikių palyginimas skirtingoms fasado orientacijoms.

Stiklo paketai pagal energijos poreikius vėsinimui pasiskirsto praktiškai vienodai. Visoms orientacijoms daugiausiai energijos vėsinimui reikalauja stiklo paketas Nr. 1 ir Nr. 2, o labiausiai efektyvūs vėsinimo energijos poreikių atžvilgiu yra stiklo paketas Nr. 4.

Didžiausi energijos poreikiai vėsinimui yra į pietus orientuotam fasadui, o mažiausi – į šiaurę. Šiaurinės orientacijos energijos poreikiai vėsinimui esant visiškai įstiklintam fasadui gali būti 3,6 kartų mažesni nei pietinės orientacijos fasado.



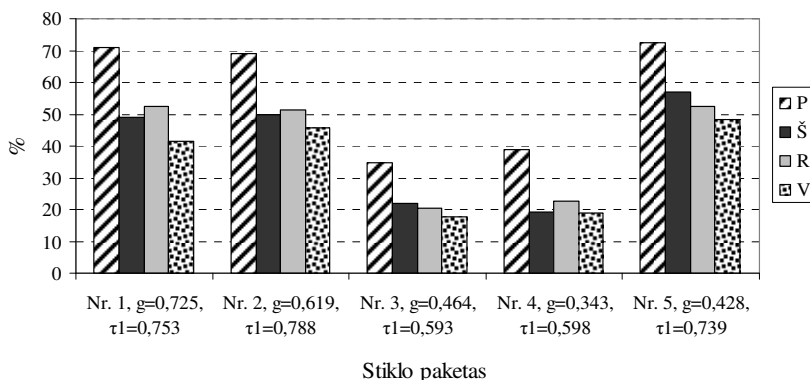
4.11 pav. Metiniai PE poreikiai vėsinimui skirtingų orientacijų fasadams

Fig. 4.11. Annual cooling PE demand for facades with different orientation

Nepriklausomai nuo orientacijos, energijos poreikiai vėsinimui didėjant įstiklinimo plotui didėja. Pietinei, rytinei ir vakarinei orientacijoms šis kitimas

yra analogiškas (4.11 pav.): didėjant įstiklinimo plotui, energijos poreikiai vėsinimui didėja labai sparčiai. Esant mažam (20 %) įstiklinimo plotui, visų stiklo paketų energijos poreikiai yra 20–41 kWh_{PE}/m²_g. Didėjant įstiklinimo plotui iki maksimumo, energijos poreikiai vėsinimui padidėja priklausomai nuo stiklo paketo ir orientacijos apytikriai 5–6,5 kartus. Šiaurinei orientacijai šie skirtumai yra mažesni.

PE poreikio vėsinimui padidėjimas SFIP padidinus nuo minimalaus, reikalaujamo pagal NA higienos normas, iki 100 % pavaizduotas 4.12 paveiksle.



4.12 pav. PE poreikių vėsinimui padidėjimas, kai SFIP nuo minimalaus reikalaujamo padidinamas iki 100 %

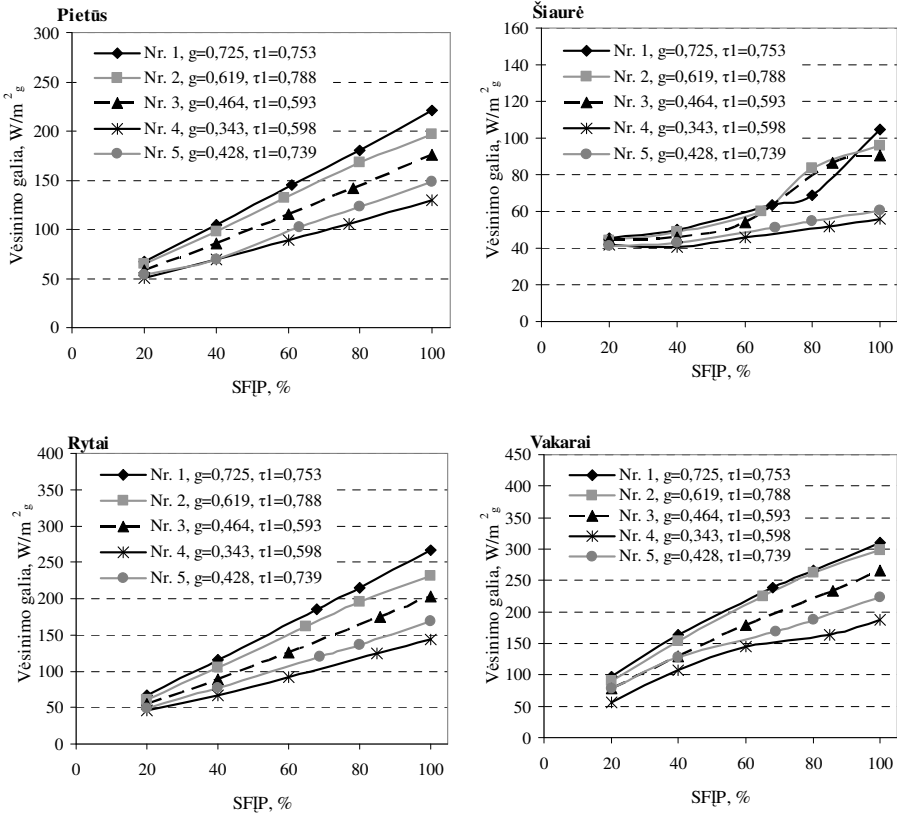
Fig. 4.12. Increase of the cooling PE demand, when WWR from the minimal required is raised to 100 %

Stiklinant fasadą maksimaliai, o ne tiek, kiek minimaliai reikalauja NA higienos normos, žymiai padidinami energijos poreikiai vėsinimui (4.12 pav.). Stiklo paketams, kurių šviesos pralaidumas yra didelis (Nr. 1, Nr. 2 ir Nr. 5), šis įstiklinimo ploto padidinimas priklausomai nuo orientacijos PE poreikius padidina 41–72 %, o stiklo paketams su mažais šviesos pralaidumo koeficientais (Nr. 3 ir Nr. 4) atitinkamai 18–39 %. Šis skirtumas tarp energijos poreikių padidėjimo skirtingiems stiklo paketams yra gaunamas todėl, kad skirtingų šviesos pralaidumo charakteristikų stiklo paketams skiriasi minimalūs reikalaujami įstiklinimo plotai.

Vėsinimo galių analizė

Vėsinimo galia yra svarbi ne tik tuo, kad ją sumažinus, mažėja investicijos į vėsinimo įrenginius, bet ir todėl, kad vėsinimo ir vėdinimo įrenginiai užima didelę pastato ploto dalį, kuri, sumažinus įrenginius ar jų skaičių, galėtų būti panaudota naudingai.

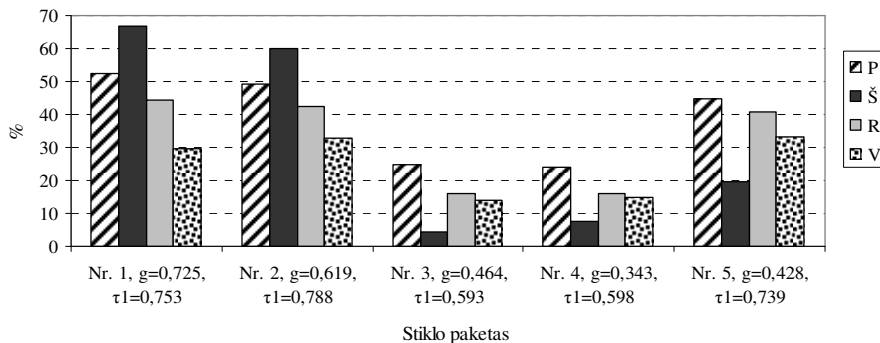
Vėsinimo galios poreikis (4.13 pav.) EnergyPlus nustatomas pagal projekti-
nės paros (liepos 15 d.) maksimalią galią, įvertinant visus pritekėjimus per parą.



4.13 pav. Vėsinimo galios poreikis

Fig. 4.13. Cooling load demand

Iš 4.13 pav. matyti, kad visoms fasado orientacijoms mažiausias vėsinimo galios poreikis yra stiklo paketui su mažiausiu saulės energijos praleisties koeficientu g (Nr. 4). Gauta, kad koeficientas g , priklausomai nuo orientacijos ir SFIP gali nulemti vėsinimo galios poreikio padidėjimą iki 228 %. Didžiausios vėsinimo galios yra vakarų ir rytų orientacijoms, o mažiausios – šiaurės. Nors energijos poreikiai vėsinimui buvo gauti didžiausi pietinei orientacijai, visgi rytinė ir vakarinė orientacijos per parą turi didesnius galios pikus.



4.14 pav. Vėsinimo galios poreikio padidėjimas, kai SFĮP nuo minimalaus reikalaujamo padidinimas iki 100 %

Fig. 4.14 Increase of the cooling load demand, when WWR from the minimal required is raised to 100 %

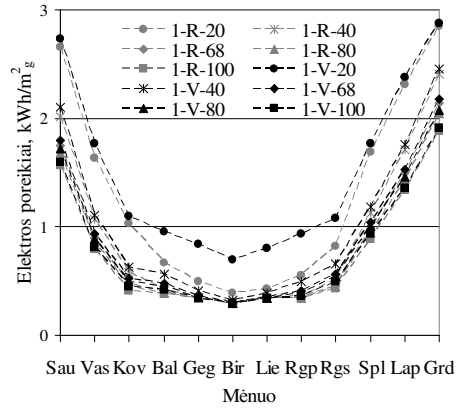
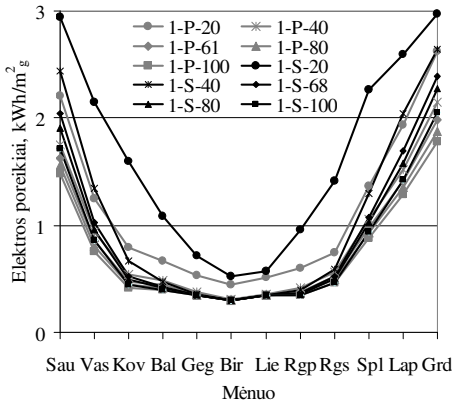
Padidinus SFĮP nuo minimalaus tenkinančio NA higienos normas iki 100 %, didžiausias papildomos vėsinimo galios poreikis yra gaunamas stiklo paketams su mažais šviesos pralaidumo koeficientais ir su dideliais saulės energijos praleisties koeficientais bei gali siekti 30–67 % (4.14 pav.). Tai paaiškina, kad stiklo paketams su dideliais šviesos pralaidumo koeficientais gautas minimalus NA normas tenkinantis SFĮP yra daug mažesnis, nei tų, kurių šviesos pralaidumas mažas. Tuo pačiu metu jų saulės energijos praleisties koeficientas yra didelis, dėl to jiems yra didesnis vėsinimo poreikis.

4.2.3. Energijos poreikių apšvietimui analizė

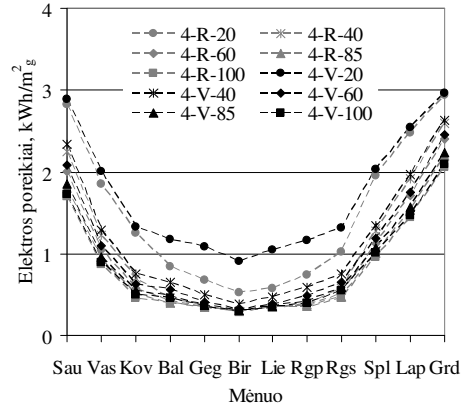
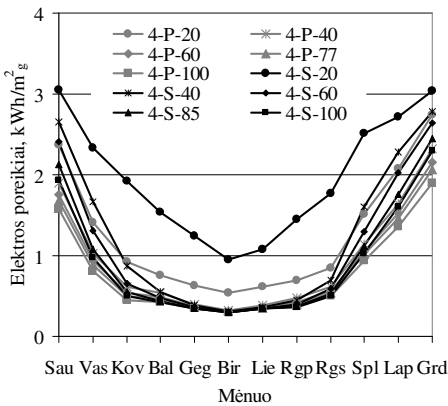
Energijos poreikius apšvietimui bendru atveju nulemia įstiklinimo plotas, lango orientacija bei įstiklinimo šviesos pralaidumo koeficientas τ . Nagrinėjamu atveju bendras šviesos pralaidumo koeficientas (τ_0) visoms nagrinėjamosioms alternatyvoms yra priklausomas tik nuo įstiklinimo šviesos pralaidumo koeficiento τ_1 .

Visiems stiklo paketams per metus gaunamas panašus energijos poreikių kitimas. Energijos poreikiai apšvietimui akivaizdžiai skiriasi, kai stiklo paketų šviesos pralaidumo koeficientas yra didelis (Nr. 1, Nr. 2 ir Nr. 5) ir, kai šis koeficientas mažas (Nr. 3 ir Nr. 4). 4.15 paveiksle pavaizduotas elektros energijos poreikių apšvietimui (grindų ploto vienetai) kitimas stiklo paketui su dideliu šviesos pralaidumu, o 4.16 paveiksle – su mažu šviesos pralaidumu.

Didžiausi energijos poreikiai apšvietimui visiems stiklo paketams yra sausio ir gruodžio mėnesiais į šiaurę orientuotam fasadui, kai SFĮP yra 20 %. Maksimalūs elektros energijos poreikiai apšvietimui šiais mėnesiais visiems stiklo paketams svyruoja nuo 1,5 iki 3 kWh_{PE}/m²_g, t. y. gali skirtis iki dviejų kartų.



4.15 pav. Mėnesiniai apšvietimo elektros energijos poreikiai (stiklo paketas Nr. 1)
Fig. 4.15. Monthly electricity demand for lighting (glazing No. 1)

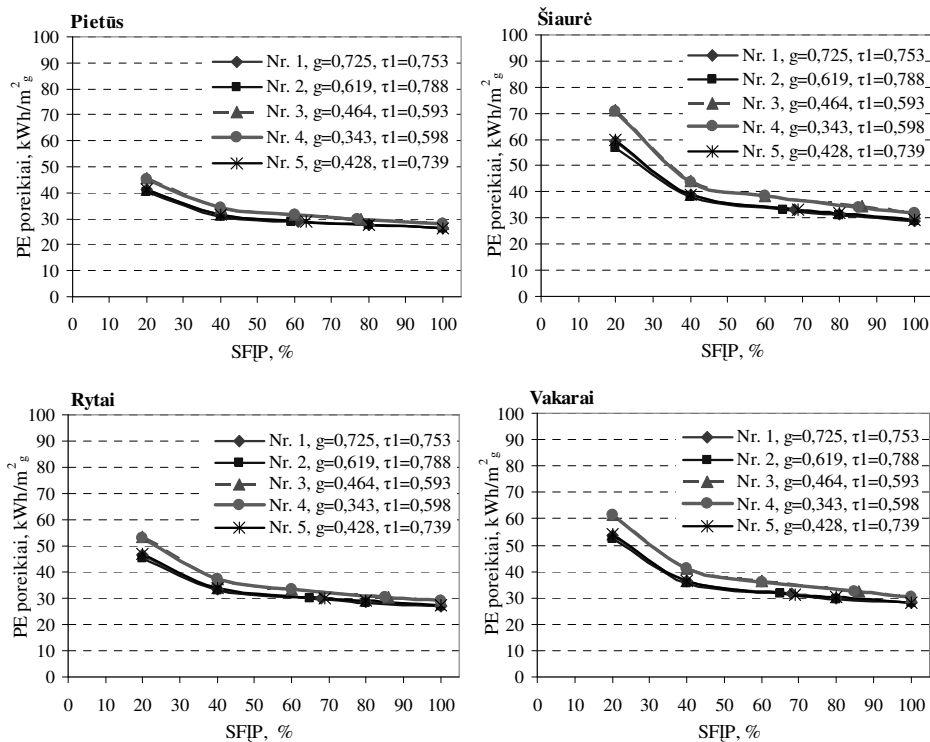


4.16 pav. Mėnesiniai apšvietimo elektros energijos poreikiai (stiklo paketas Nr. 4)
Fig. 4.16. Monthly electricity demand for lighting (glazing No. 4)

Didžiausi skirtumai tarp skaičiuotų alternatyvų yra rudens ir žiemos mėnesiai, kai energijos poreikis apšvietimui didžiausias. Nuo kovo iki rugsėjo dienos ilgos, be to įvedamas vasaros laikas, todėl energijos poreikiai šiais mėnesiais maždaug pastovūs ir tarpusavyje skiriasi nežymiai. Išimtis yra mėnesiniai elektros energijos poreikiai, kai fasado įstiklinimas mažas – 20 %.

Kai fasado įstiklinimas lygus 20 %, stiklo paketams su mažu šviesos pralaidumo koeficientu energijos poreikiai visus metus, išskyrus liepos mėnesį, šiaurės orientacijai yra didesni nei visų kitų alternatyvų. Stiklo paketams su dideliu šviesos pralaidumo koeficientu visais mėnesiais, išskyrus gegužės–liepos mėnesius, energijos poreikiai yra didžiausi į vakarus orientuotai patalpai.

Toliau yra atliekama metinių PE poreikių apšvietimui analizė. Įvairių skaičiuotų įstiklinimo alternatyvų modeliavimo rezultatai pateikiami 4.17 paveiksle.



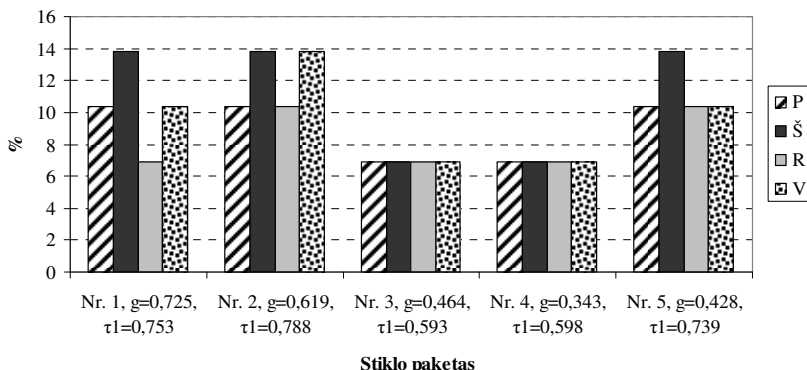
4.17 pav. Metiniai PE poreikiai apšvietimui skirtingų orientacijų fasadams
Fig. 4.17. Annual lighting PE demand for the facades with different orientation

Kaip matyti iš 4.17 paveikslo, visoms įstiklinimo alternatyvoms PE poreikiai didėjant įstiklinimo plotui mažėja. Didžiausias PE poreikių apšvietimui sumažėjimas pastebimas, kai santykinis įstiklinimo plotas padidėja nuo 20 iki 40 %. Toliau didėjant įstiklinimo plotui, energijos poreikių mažėjimas yra ne toks žymus.

Visais atvejais energijos poreikiai apšvietimui tarp stiklo paketų su dideliu šviesos pralaidumo koeficientu ir su mažu maksimaliai skiriasi 11–20 %. Didėjant įstiklinimo plotui, šis skirtumas sumažėja iki 7–9 %.

Didžiausi energijos poreikiai apšvietimui yra šiaurinei fasado orientacijai, o mažiausi – pietinei. Šis skirtumas dėl orientacijos, kai įstiklinimo plotas 20 %, siekia 35 kWh_{PE}/m²_g, o tai sudaro 37 %. Didėjant įstiklinimo plotui, orientacijos įtaka mažėja. Esant 100 % įstiklinimo plotui, orientacijos įtaka lieka nežymi ir visiems atvejams energijos poreikiai apšvietimui sudaro 27–31 kWh_{PE}/m²_g.

Akivaizdu, kad jei SFIP bus didesnis nei minimalus reikalaujamas pagal NA higienos normas, energijos poreikiai apšvietimui sumažės dėl didesnio natūralaus apšviestumo. Šis energijos poreikių sumažėjimas pavaizduotas 4.18 paveiksle.



4.18 pav. PE poreikių apšvietimui padidėjimas, kai įstiklinimas nuo minimalaus reikalaujamo padidinimas iki 100 %

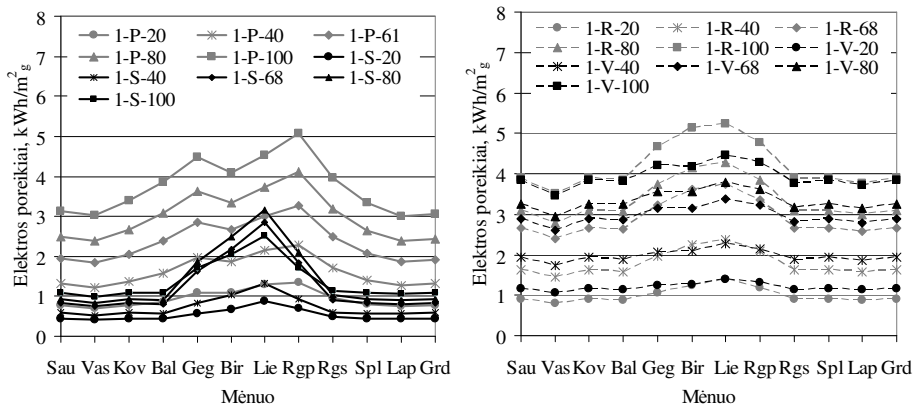
Fig. 4.18. Increase of the lighting PE demand, when fenestration from the minimal required is raised to 100 %

Daugiausia energijos poreikiai apšvietimui sumažėja stiklo paketams su dideliu šviesos pralaidumu 7–14 %, o mažiausiai atitinkamai su mažu šviesos pralaidumu – 7 %.

4.2.4. Energijos poreikių siurbliams ir ventiliatoriams analizė

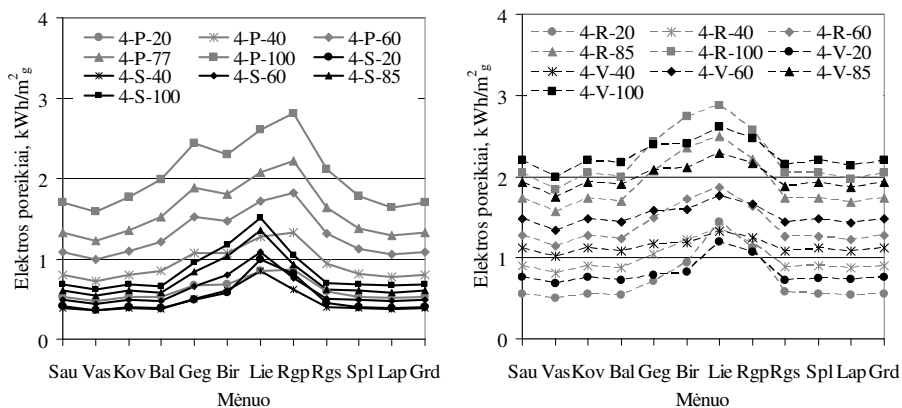
Energijos poreikiai siurbliams ir ventiliatoriams yra tiesiogiai priklausomi nuo energijos poreikio šildymui, vėdinimui ir vėsinimui. Tiek siurbliai, tiek ventiliatoriai yra naudojami ir žiemą, ir vasarą. Cirkuliacinis vandeninės šildymo sistemos siurblys užtikrina šilumnešio cirkuliaciją šildymo sistemoje, todėl didėjant ar mažėjant šilumos poreikiui, pakitę šilumnešio parametrai tiesiogiai daro įtaką siurblio darbui ir tuo pačiu jo energijos poreikiams. Tuo tarpu vėdinimo ir vėsinimo sistemoje, oro cirkuliaciją užtikrina oro tiekimo ir ištraukimo ventiliatoriai, kurių energijos poreikiai priklauso nuo vėsos poreikio. Vėdinimo ir vėsinimo sistemose taip pat naudojami siurbliai, tačiau jų galingumas yra žymiai mažesnis nei šildymo sistemos.

Visų stiklo paketų elektros energijos poreikių ventiliatoriams mėnesinis kitimas yra praktiškai analogiškas. 4.19 ir 4.20 paveiksluose pavaizduoti du stiklo paketai: skaidrus paketas Nr. 1 – reikalaujantis mažiausiai ir paketas su multifunkcinėmis dangomis Nr. 4 – reikalaujantis daugiausiai energijos ventiliatoriams.



4.19 pav. Mėnesiniai mikroklimato sistemų ventiliatorių elektros energijos poreikiai (stiklo paketas Nr. 1)

Fig. 4.19. Monthly electricity demand for the fans of microclimate systems (glazing No. 1)



4.20 pav. Mėnesiniai mikroklimato sistemų ventiliatorių elektros energijos poreikiai (stiklo paketas Nr. 4)

Fig. 4.20. Monthly electricity demand for the fans of microclimate systems (glazing No. 4)

100 % įstiklintam fasadui maksimalūs mėnesiniai energijos poreikiai priklausomai nuo stiklo paketo charakteristikų gauti nuo 2,9 iki 5,3 kWh_E/m²_g (4.19, 4.20 pav.).

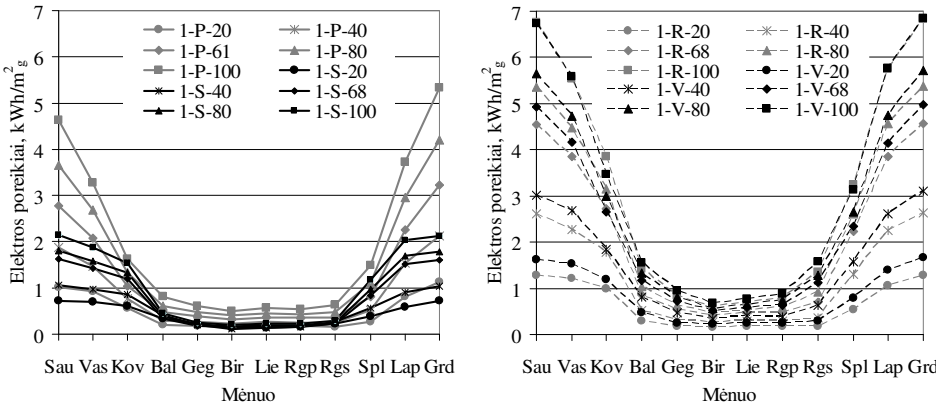
Visoms fasadų orientacijoms, elektros energijos poreikis ventiliatoriams didėja kartu su įstiklinimo plotu. Išimtis yra stiklo paketas Nr. 1 ir Nr. 2, šiaurės orientacijos, kur vasaros mėnesiais maksimalūs energijos poreikiai ventiliatoriams yra ne tada, kai įstiklinimo plotas maksimalus. Tai galima paaiškinti tuo,

kad šiaurės fasado orientacijai vėsinimo poreikis nėra didelis lyginant su kitomis orientacijomis ir iki 80 % SFIP, kai kuriomis dienomis šilumos pritekėjimai kompensuojami iki maksimumo suintensyvinus recirkuliaciją patalpoje, o 100 % SFIP recirkuliacijos nepakanka, todėl ventiliatorių galia sumažinama ir tiekiamas šaldymo mašinoje atvėsintas oras.

Orientacijos įtaka energijos poreikiams mažėja kartu su SFIP.

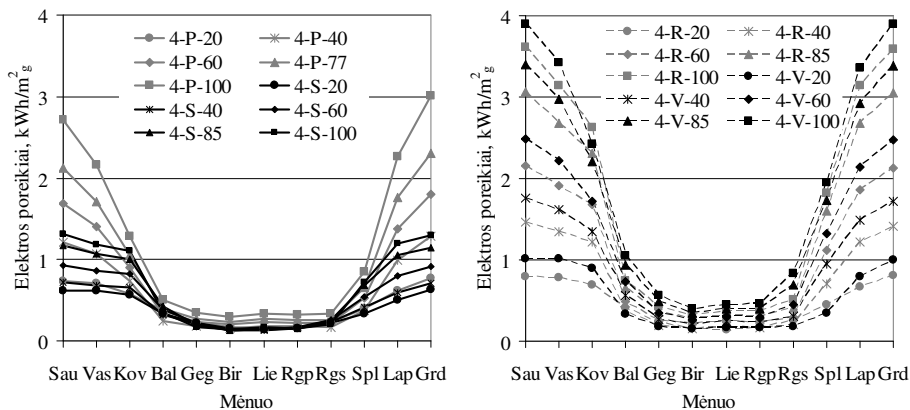
Kadangi ventiliatoriai turi tiekti didesnį oro kiekį tais mėnesiais, kai reikalingas vėsinimas, tai ir energijos poreikių ventiliatoriams pikai yra šiltuoju metų laiku. Šiaurinės, rytinės ir vakarinės orientacijos fasadui energijos poreikių ventiliatoriams pikas yra liepos mėnesį. Tuo tarpu pietinės orientacijos fasado du pikai – gegužės ir rugpjūčio mėnesį. Metiniai energijos poreikių vėsinimui pikai yra tie patys, kaip ir pritekėjimų nuo saulės spinduliuotės, kas parodo, kad ventiliatorių darbas yra labiausiai priklausomas nuo vėsinimo energijos poreikių.

Visų stiklo paketų elektros energijos poreikių siurbliams mėnesinis kitimas yra analogiškas (4.21–4.22 pav.). Kaip ir ventiliatoriams, energijos poreikiai siurbliams yra didžiausi skaidriam stiklo paketui (Nr. 1), o mažiausi stiklo paketui su multifunkcinėmis dangomis – Nr. 4. Energijos poreikiai siurbliams taip pat yra tiesiogiai priklausomi nuo įstiklinimo ploto ir didžiausi yra 100 % įstiklintam fasadui. Maksimalūs mėnesiniai elektros energijos poreikiai priklausamai nuo stiklo paketo charakteristikų yra nuo 4 iki 7 kWh_E/m²_g. Siurbliams žiemos mėnesiais energijos reikia daugiau nei ventiliatoriams vasarą, tačiau apskritai metiniai energijos poreikiai ventiliatoriams 1,2–2,2 karto didesni. Šis skirtumas tuo didesnis, kuo stiklo paketo efektyvumas mažesnis.



4.21 pav. Mėnesiniai mikroklimato sistemų siurblių elektros energijos poreikiai (stiklo paketas Nr. 1)

Fig. 4.21. Monthly electricity demand for the pumps of microclimate systems (glazing No. 1)



4.22 pav. Mėnesiniai mikroklimato sistemų siurblių elektros energijos poreikiai (stiklo paketas Nr. 4)

Fig. 4.22. Monthly electricity demand for the pumps of microclimate systems (glazing No. 4)

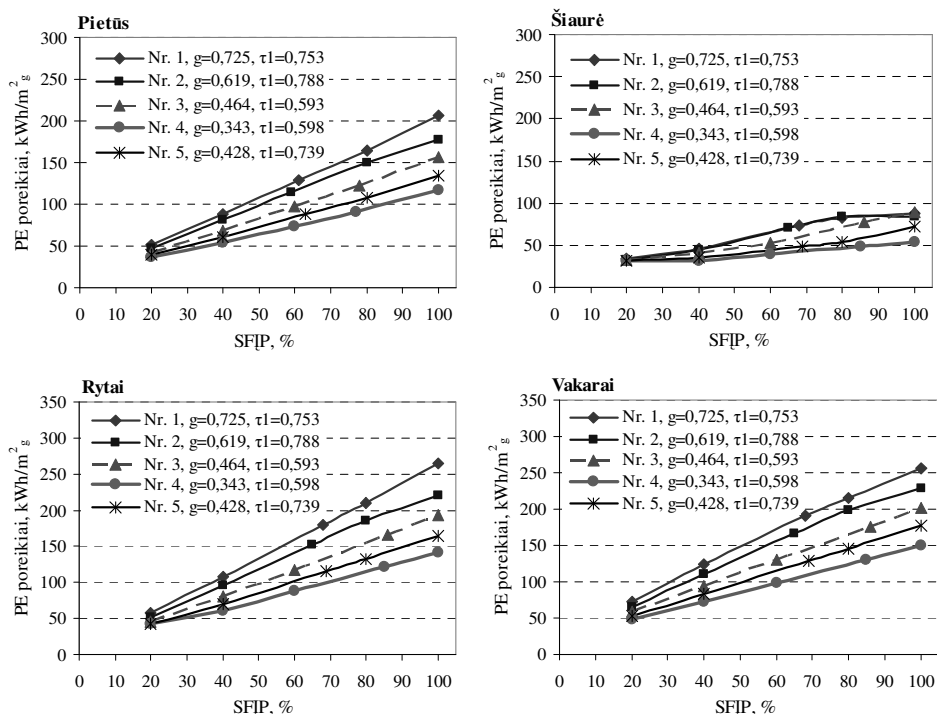
Kadangi pagrindinis energijos kiekis tenka šildymo sistemos siurbliams, todėl atitinkamai maksimalus energijos suvartojimas yra gruodžio ir sausio mėnesiais. Sistemų siurblių šilumnešio debitas yra kintamas ir priklausomas nuo šilumos poreikio, todėl ir energijos poreikiai siurbliams mažėja kartu su šildymo energijos poreikiais. Gegužės–rugpjūčio mėnesiais veikia tik kondicionavimo sistemos siurbliai, todėl energijos poreikis nedidelis ir maždaug pastovus, o stiklo paketo ar įstiklinimo ploto įtaka yra nežymi.

Fasado orientacijos įtaka tais mėnesiais, kai nereikia šildymo, tai pat yra santykinai maža.

Galima daryti išvadą, kad dėl žymiai didesnių energijos poreikių, šildymo sistemos siurblių optimizavimas yra svarbiau, nei kondicionavimo sistemos siurblių.

Didžiausi PE poreikiai siurbliams ir ventiliatoriams yra į rytus orientuotam visiškai įstiklintam fasadui ir blogiausiu atveju siekia net $264 \text{ kWh}_{PE}/\text{m}^2_{g}$, o mažiausi atitinkamai šiaurinei orientacijai siekia tik $89 \text{ kWh}_{PE}/\text{m}^2_{g}$, t. y. energijos poreikiai šiaurinės orientacijos fasadui yra apie 3 kartus mažesni (4.23 pav.).

Metiniai PE poreikiai siurbliams ir ventiliatoriams (4.23 pav.) visoms alternatyvoms didėja kartu su įstiklinimo plotu, tačiau ši priklausomybė yra nevienodai stipri: pietinei, rytinei ir vakarinei orientacijai įstiklinimo padidinimas nuo 20 % iki 100 % pakelia energijos poreikius 3–5 kartus priklausomai nuo stiklo paketo; o šiaurinei – tik 0,7–2 kartus. Energijos poreikių priklausomybė nuo įstiklinimo ploto tuo didesnė, kuomet didesnis saulės energijos praleisties koeficientas g .

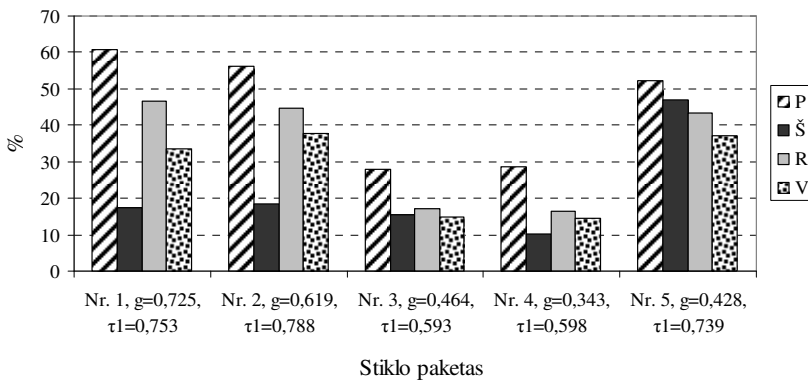


4.23 pav. Metiniai PE poreikiai siurbliams ir ventiliatoriams skirtingų orientacijų fasadams

Fig. 4.23. Annual PE demand for the pumps and fans for the facades with different orientation

Kadangi siurbliai ir ventiliatoriai yra mikroklimato sistemų elementai, ištikimumo charakteristikos šiems energijos poreikiams, kaip ir mikroklimato sistemų energijos poreikiams, daro reikšmingą įtaką.

SFIP padidinimas nuo minimalaus reikalaujamo iki 100 %, mažiausiai padidina energijos poreikius siurbliams ir ventiliatoriams (4.24 pav.) tada, kai lango šviesos pralaidumo koeficientais yra mažas (to priežastis jau buvo paašškinta analizuojant šildymo ir vėsinimo energijos poreikius).



4.24 pav. PE poreikių siurbliams ir ventiliatoriams padidėjimas, kai SFIP nuo minimalaus reikalaujamo padidinimas iki 100 %

Fig. 4.24. Increase of the PE demand for fans and pumps, when WWR from the minimal required is raised to 100 %

Taigi energijos poreikių siurbliams ir ventiliatoriams padidėjimas dėl padidinto SFIP svyruoja nuo 18 iki 61 %, kai stiklo paketo šviesos pralaidumas didelis ir nuo 16 iki 29 %, kai jis mažas. Mažiausiai padidėja energijos poreikiai šiaurinės orientacijos fasadui, o daugiausiai – pietinės.

4.2.5. Pirminės energijos poreikių struktūros analizė

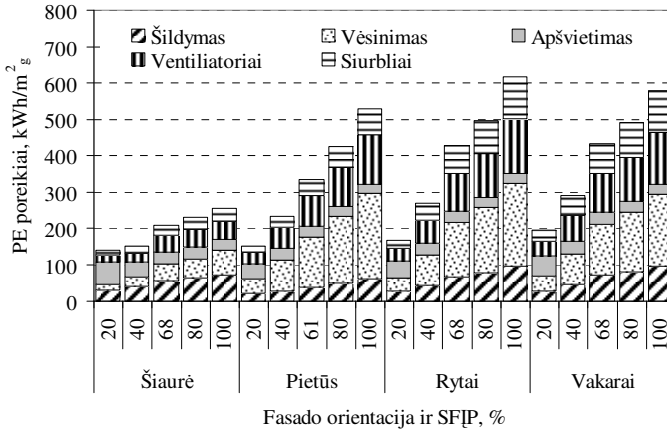
Siekiant parodyti, kokia suminių metinių PE poreikių energijos dalis tenka atskiriems energijos poreikiams, 4.25–4.29 paveiksluose yra pateikiama atskirtų stiklo paketų energijos poreikių struktūra. Iš jų matyti, kad orientacijos įtaka bendriems energijos poreikiams yra labai didelė. Visiems stiklo paketams energijos poreikiai yra didžiausi rytinei bei vakarinei orientacijoms ir žymiai mažesni – šiaurinės orientacijos fasadams.

Skaidriam stiklo paketui Nr. 1 ($g=0,725$, $\tau_l=0,753$) šildymui sunaudojama energijos dalis šiaurinei orientacijai yra žymiai didesnė nei kitoms ir priklausomai nuo SFIP sudaro 22–28 %. Kitoms orientacijoms energijai šildymui tenka 11–17 %.

Vėsinimui skaidriam stiklo paketui mažiausiai energijos tenka šiaurinės orientacijos fasadui ir, priklausomai nuo įstiklinimo ploto, ši dalis sudaro 11–26 %. Kitoms orientacijoms ši dalis yra 21–45 %.

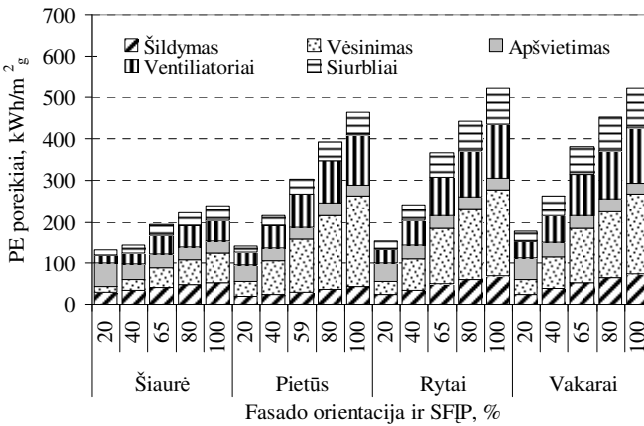
Apšvietimui tenkanti energijos dalis šiuo atveju šiauriniam fasadui yra didžiausia ir sudaro 11–42 %, kai tuo tarpu kitoms orientacijoms 5–28 %.

Siurbliams ir ventiliatoriams naudojamai energijai taip pat tenka reikšminga dalis bendro PE poreikio. Šiaurinei orientacijai tenka 24–34 %, o kitoms – 34–44 %.



4.25 pav. Stiklo paketo Nr. 1 PE energijos poreikių struktūra
Fig. 4.25. Structure of the PE demand of the glazing No. 1

Dvigubam stiklo paketui Nr. 2 ($g=0,619$, $\tau_f=0,788$) su vidiniu šilumą atspindinčiu stiklu šildymui sunaudojamos energijos dalis šiaurinei orientacijai yra didesnė nei kitoms ir priklausomai nuo SFIP sudaro 21–23 %. Kitoms orientacijoms energijai šildymui tenka 9–15 %.



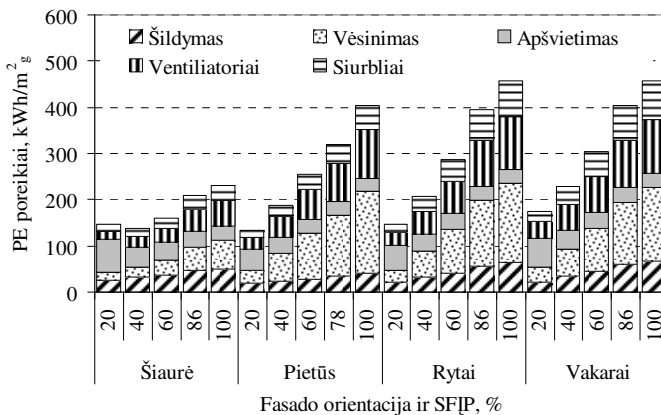
4.26 pav. Stiklo paketo Nr. 2 PE energijos poreikių struktūra
Fig. 4.26. Structure of the PE demand of the glazing No. 2

Vėsinimui dvigubam stiklo paketui su vidiniu šilumą atspindinčiu stiklu mažiausiai energijos tenka šiaurinės orientacijos fasadui ir, priklausomai nuo SFIP, ši dalis nuo bendro energijos poreikio sudaro 12–30 %. Kitoms orientacijoms ši dalis yra 21–47 %.

Energijos dalis, tenkanti apšvietimui šiauriniam fasadui šiam stiklo paketui, sudaro 12–43 %, kai tuo tarpu kitoms orientacijoms 5–29 %.

Siurbliams ir ventiliatoriams naudojamai energijai bendro PE poreikio tenka: šiaurinei orientacijai – 25–36 %, o kitoms atitinkamai – 33–44 %.

Dvigubam stiklo paketui Nr. 3 ($g=0,464$, $\tau_l=0,593$) su šviesos ir saulės atspindėjimo dangomis šildymui sunaudojamos energijos dalis šiaurinei orientacijai didesnė nei kitoms ir priklausomai nuo SFIP sudaro 18–22 %. Kitoms orientacijoms energijai šildymui tenka 10–15 %.



4.27 pav. Stiklo paketo Nr. 3 PE energijos poreikių struktūra

Fig. 4.27. Structure of the PE demand of the glazing No. 3

Vėsinimui šiam stiklo paketui mažiausiai energijos tenka šiaurinės orientacijos fasadui ir priklausomai nuo SFIP ši dalis nuo bendro energijos poreikio sudaro 11–26 %. Kitoms orientacijoms ši dalis yra 17–44 %.

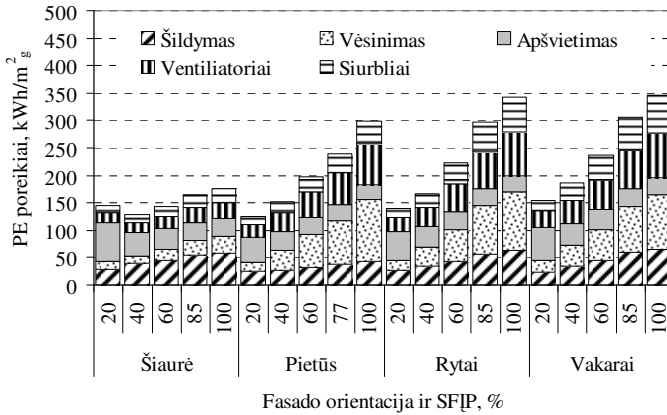
Energijos dalis tenkanti apšvietimui šiauriniam fasadui sudaro 14–49 %, kai tuo tarpu kitoms orientacijoms 6–37 %.

Siurbliams ir ventiliatoriams naudojamai energijai tenka: šiaurinei orientacijai – 22–38 %, o kitoms atitinkamai – 31–44 %.

Dvigubam stiklo paketui Nr.4 ($g=0,343$, $\tau_l=0,598$) su multifunkcinėmis dangomis šildymui sunaudojamos energijos dalis šiaurinei orientacijai priklausomai nuo SFIP sudaro 20–33 %. Kitoms orientacijoms šildymui tenka 15–19 %.

Vėsinimui šiam paketui mažiausiai energijos tenka šiaurinės orientacijos fasadui ir priklausomai nuo SFIP ploto ši dalis bendrame energijos poreikių balanse sudaro 9–18 %. Kitoms orientacijoms ši dalis yra 13–37 %.

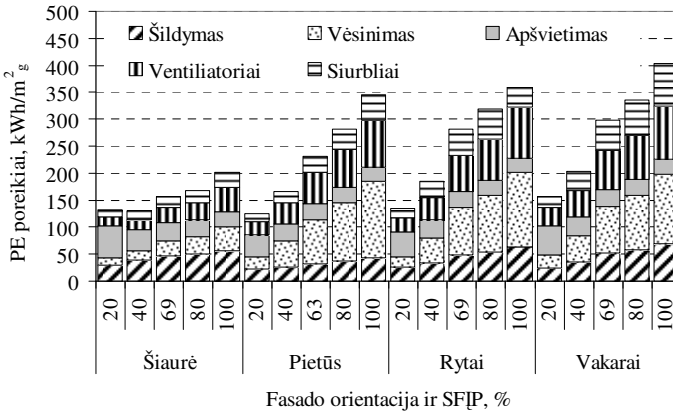
Energijos dalis, tenkanti apšvietimui šiauriniam fasadui šiam stiklo paketui, sudaro 18–49 %, kai tuo tarpu kitoms orientacijoms 8–40 %.



4.28 pav. Stiklo paketo Nr. 4 PE energijos poreikių struktūra
Fig. 4.28. Structure of the PE demand of the glazing No. 4

Siurbliams ir ventilatoriams naudojamai energijai bendro PE poreikio tenka: šiaurinei orientacijai – 31–22 %, o kitoms atitinkamai – 30–43 %.

Dvigubam stiklo paketui Nr. 5 su mažos emisijos dangai šildymui sunaudojamos energijos dalis šiaurinei orientacijai priklausomai nuo SFIP sudaro 22–28 %. Kitoms orientacijoms – 12–19 %.



4.29 pav. Stiklo paketo Nr. 5 PE energijos poreikių struktūra
Fig. 4.29. Structure of the PE demand of the glazing No. 5

Vėsinimui dvigubam stiklo paketui su mažos emisijos dangai mažiausiai energijos tenka šiaurinės orientacijos fasadui ir, priklausomai nuo SFIP ši dalis nuo bendro energijos poreikio sudaro 9–22 %. Kitoms orientacijoms ši dalis yra 15–41 %.

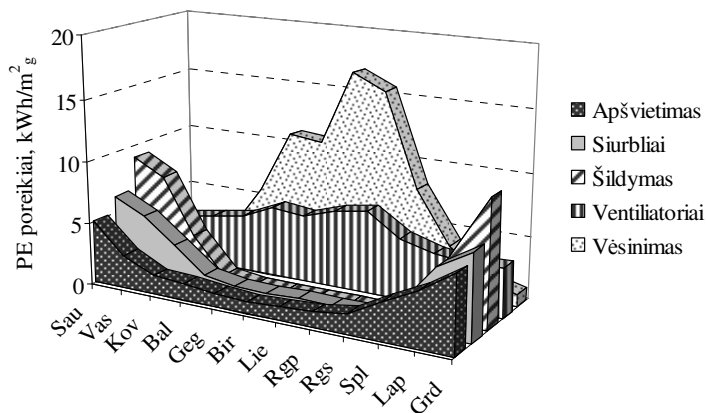
Energijos dalis, tenkanti apšvietimui šiauriniam fasadui šiam stiklo paketui, sudaro 14–45 %, kai tuo tarpu kitoms orientacijoms 7–35 %.

Siurbliams ir ventiliatoriams naudojami energijai bendrame PE balanse tenka: šiaurinei orientacijai – 23–36 %, o kitoms atitinkamai – 31–44 %.

Pačiam efektyviausiam stiklo paketui Nr. 4, kai SFIP lygus minimaliam reikalaujamam pagal NA higienos normas, 4.30 ir 4.31 paveiksluose pavaizduota mėnesinių energijos poreikių struktūros kitimas. Vaizduojama į pietus ir į šiaurę orientuoti fasadai, nes iš prieš tai aptartų rezultatų žinoma, kad šiaurės orientacija savo energijos poreikių struktūra bei dydžiu išsiskiria iš likusių orientacijų.

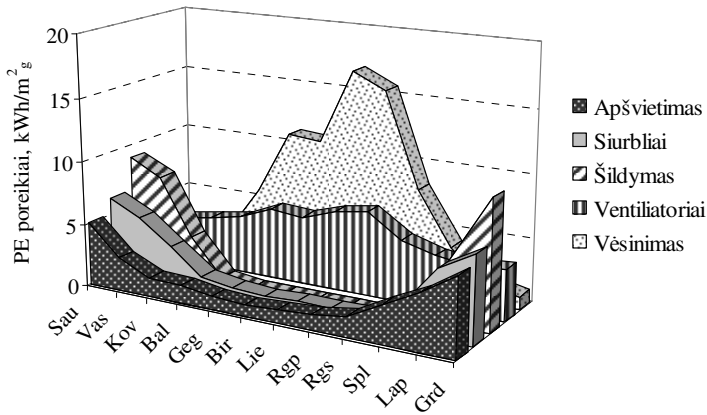
Mėnesinių energijos poreikių apšvietimui, siurbliams ir ventiliatoriams kitimas jau buvo aptartas aukščiau, nagrinėjant atskirus energijos poreikius. Tačiau 4.31–4.32 paveiksai leidžia sugretinti siurblių ir ventiliatorių energijos poreikius su energijos poreikiais šildymui ir vėsinimui.

Čia akivaizdžiai matyti, kad energijos poreikiai šildymui nulemia energijos poreikių siurbliuose kitimą, tačiau įdomu tai, kad nors pietinės orientacijos patalpą reikia mažiau šildyti, jos energijos poreikiai siurbliuose yra didesni nei šiaurinės patalpos. Tai galima paaiškinti tuo, kad pietinės orientacijos patalpai net ir žiemos mėnesiais dažnai prireikia vėsinimo, o tai reiškia, kad įsijungia ir vėsinimo sistemos siurbliai. Kita priežastis – šiaurinės orientacijos patalpai nemaža šilumos dalis yra paruošiama oro kondicionavimo įrenginio pašildymo sekcijoje ir patiekama į patalpą kartu su tiekiamu oro, o pietinės orientacijos patalpai praktiškai visą jai reikalingą šilumos kiekį patiekia šildymo sistema.



4.30 pav. Į pietus orientuoto stiklo paketo Nr. 4 mėnesinių energijos poreikių struktūra, kai SFIP minimalus reikalaujamas

Fig. 4.30. Monthly structure of the PE demand for South oriented glazing No. 4, when WWR is equal to minimal required



4.31 pav. Į šiaurę orientuoto stiklo paketo Nr. 4 mėnesinių energijos poreikių struktūra, kai SFĪP minimalus reikalaujamas
Fig. 4.31. Monthly structure of the PE demand for North oriented glazing No. 4, when WWR is equal to minimal required

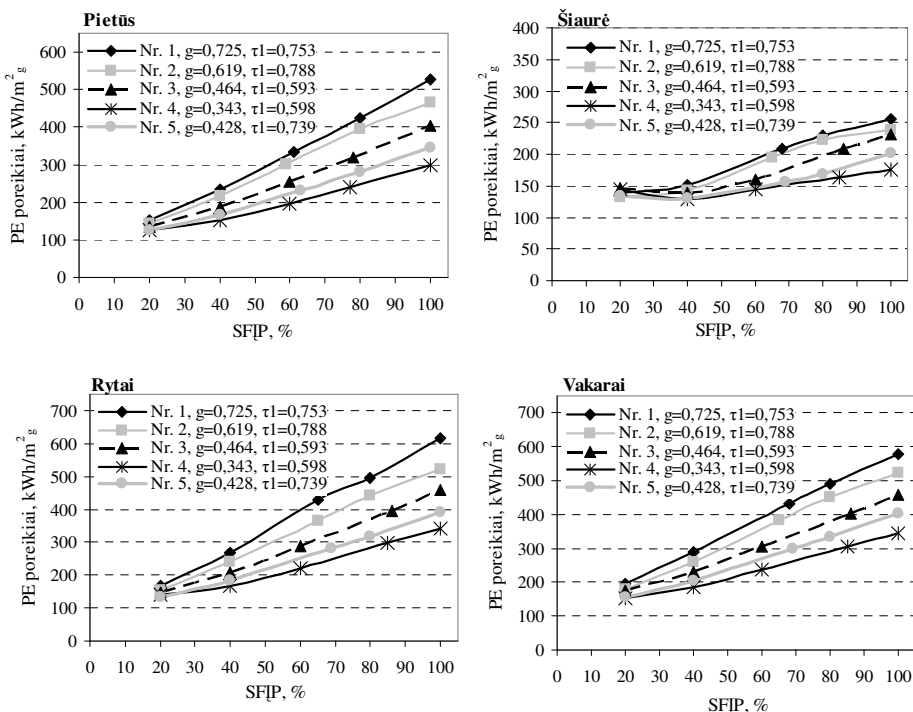
Kaip buvo minėta anksčiau, matyti (4.30–4.31 pav.), kad energijos poreikiai vėsinimui tiesiogiai daro įtaką ventilatorių energijos poreikiams. Žiemą, kai patalpų vėsinti nereikia, tiekiamas vienodas oro kiekis ir šie energijos poreikiai pastovūs. Atsiradus poreikiui vėsinti patalpą, energijos poreikiai ventilatoriuose padidėja ir kinta priklausomai nuo vėsos poreikio.

4.2.6. Suminių pirminės energijos poreikių analizė

Siekiant palyginti skirtingus stiklo paketus, reikalinga analizuoti jų suminius metinius PE poreikius (4.32 pav.).

Energijos poreikiai kiekvienai orientacijai bei stiklo paketui kinta analogiškai (4.32 pav.), jie yra tiesiogiai priklausomi nuo SFĪP, išskyrus šiaurinį fasadą. Šiaurinės orientacijos fasado, didėjant įstiklinimo plotui nuo 20 % iki 40 %, energijos poreikiai kai kuriems stiklo paketams netgi sumažėja, nes tame intervale šiai orientacijai žymiai sumažėja energijos poreikiai apšvietimui.

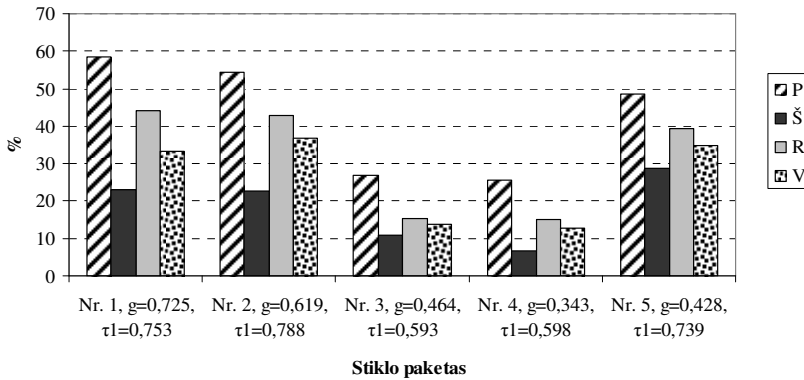
Visų orientacijų fasadams pastebima viena – kuo stiklo paketo šviesos pralaidumo ir visuminės saulės energijos praleisties koeficientų santykis τ/g didesnis, tuo energijos poreikiai mažesni. Šiuo atveju mažiausi energijos poreikiai stiklo paketo su multifunkcinėmis dangomis (Nr. 4).



4.32 pav. Suminiai metiniai PE poreikiai skirtingos orientacijos fasadams
Fig. 4.32. Total annual PE demand for the facades with different orientation

Mažiausi gauti suminiai PE poreikiai yra kai SFIP pietinei, rytinei ir vakarinei orientacijai – 20 %, o šiaurinei – 20–40 %, todėl jis yra energiniu požiūriu efektyviausias, tačiau toks plotas netenkina NA apšvietimo higienos normų reikalavimų. Tam, kad būtų tenkinami reikalavimai, tačiau tuo pačiu energijos poreikiai būtų minimalūs, SFIP turėtų būti ne didesnis nei minimalus reikalaujamas pagal NA higienos normas.

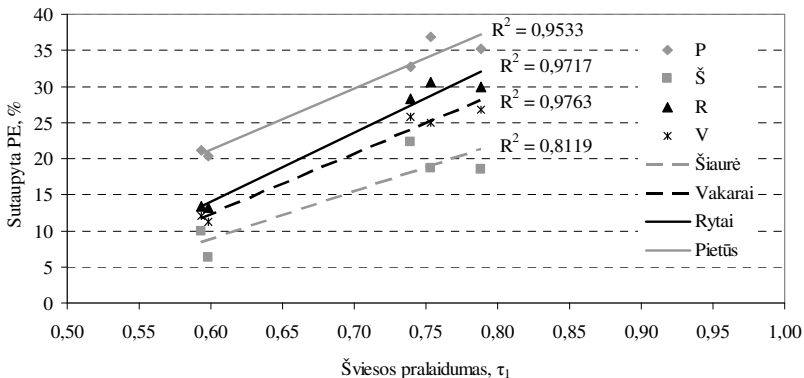
Lyginant kondicionuojamo administracinio pastato patalpą, kurios SFIP lygus minimaliam reikalaujamam, su visiškai ištiklintu fasadu, suminiai PE poreikiai stiklo paketams su mažais šviesos pralaidumo koeficientais yra 7–27 % didesni, o stiklo paketams su dideliais šviesos pralaidumo koeficientais – 23–59 % didesni (4.33 pav.).



4.33 pav. Suminių PE poreikių padidėjimas, kai SFIP nuo minimalaus reikalaujamo padidinimas iki 100 %

Fig. 4.33. Increase of the total PE demand, when WWR from the minimal required is raised to 100 %

Taigi akivaizdu, kad stiklinant fasadą daugiau nei reikalauja NA higienos normos, yra švaistoma energija. Iš aukščiau esančių rezultatų aišku, kad atsisiakius visiškai ištiklinto fasado ir sumažinus ištiklinimo plotą iki minimalaus reikalaujamo, PE sutaupymai priklausys nuo šviesos pralaidumo koeficiento. Ši priklausomybė yra pavaizduota 4.34 paveiksle.



4.32 pav. Suminiai PE sutaupymai, kai ištiklinimas nuo 100 % sumažinamas iki minimalaus reikalaujamo

Fig. 4.32. Total PE savings, when fenestration from 100 % is decreased to minimal required

Gauta, kad galimi energijos sutaupymai sumažinus ištiklinimo plotą tiesiogiai priklauso nuo šviesos pralaidumo koeficiento ir tarp jų gauta stipri arba la-

bai stipri tiesinė priklausomybė. Šie sutaupymai didžiausi pietinei fasado orientacijai 20–37 %, o mažiausi šiaurinei – 12–27 %.

Nors ši analizė ir parodė, kad vertinant pagal metinį pirminės energijos poreikį ir NA požiūriu efektyviausias fasado įstiklinimo plotas yra minimalus tenkinantis NA higienos normas, visgi net ir tokiu atveju gauti (4.32 pav.) kondicionuojamo administracinio pastato energijos poreikiai praktiškai visais atvejais yra daug didesni už nustatytus mažai energijos vartojantiems pastatams Olandijoje ir Jungtinėje Karalystėje (žr. 1.1 skyrių). Išimtis šiuo atveju yra į šiaurę orientuotas fasadas su efektyviu įstiklinimu (Nr. 4 ir Nr. 5), kai metinis suminis PE poreikis siekia 157–164 kWh_{PE}/m². Toks energijos poreikis yra artimas mažai energijos vartojančio pastato poreikiui. Visiems kitiems nagrinėtiems atvejams būtina taikyti papildomas energinio efektyvumo didinimo priemones, pavyzdžiui, langų apsaugos nuo saulės priemones.

4.3. Pastato energinio efektyvumo didinimas panaudojant papildomas langų apsaugos nuo saulės priemones

Kadangi rezultatai parodė, kad Lietuvos sąlygomis, kondicionuojamame administraciniame pastate reikšmingą PE poreikių dalį sudaro energijos poreikiai vėsinimui, vienas iš būdų mažinti pastato energijos suvartojimą – riboti saulės šilumos pritekėjimus.

Net ir tada, kai naudojamas saulės pritekėjimus ribojantis stiklas, daugeliu atveju reikalinga naudoti ir papildomas langų apsaugos nuo saulės priemones, kurių paskirtis yra:

- sumažinti saulės šilumos pritekėjimus ir sumažinti patalpos oro, vidutinę patalpos temperatūrą ir spindulinę temperatūrą;
- kontroliuoti natūralios šviesos patekimą į patalpą: blokuoti tiesioginę ir leisti patekti tik netiesioginei šviesai;
- reguliuoti akinimą.

Nors saulės šilumos pritekėjimams sumažinti naudojami įvairūs būdai – tinkama orientacija, langų dydis ir išdėstymas, kolonos, balkonai ir parapetai, – tačiau patogiausia yra naudoti apsaugos nuo saulės priemones.

Lietuvoje nėra oficialių rekomendacijų dėl apsaugos nuo saulės priemonių naudojimo. Netiesioginis įpareigojimas naudoti šias priemones gali būti išveltas tik reglamente STR 2.05.20:2006, nes jame reglamentuotas maksimalus vidutinis langų įstiklinimo visuminis saulės energijos praleisties koeficientas g . Jei stiklo paketo koeficientas g neatitinka reikalavimų, tada reikalavimus galima patenkinti panaudojus atitinkamas apsaugos nuo saulės priemones.

Tuo tarpu Norvegijoje pastatų energinio naudingumo standartas NS 3031:2007 (2007) reikalauja administraciniams pastatams naudoti apsaugos nuo saulės priemonės su automatiniu valdymu arba imtis kitų efektyvių priemonių, leidžiančių išvengti vietinių vėsinimo sistemų naudojimo.

4.3.1. Apsaugos nuo saulės priemonių charakteristikos

Apsaugos nuo saulės priemonės apibūdinamos daugeliu parametru, kurie lemia sąveiką su lango stiklu, todėl langas ir šios priemonės negali būti apibūdinami atskirai, o naudojamų apsaugos nuo saulės priemonių efektyvumas priklauso nuo jų:

- padėties lango ir lango komponentų atžvilgiu;
- geometrijos;
- paviršių optinių savybių;
- kontrolės galimybių (reguliuojamoms priemonėms).

Visos reguliuojamos apsaugos nuo saulės priemonės, tokios kaip žaliuzės, leidžia jas valdyti rankiniu arba automatiniu būdu, pritaikant jų padėtį priklausomai nuo paros ar metų laiko.

Žaliuzės gali būti montuojamos trim būdais: patalpos viduje, tarp stiklų ir išorėje.

Vidinės žaliuzės yra labai populiaros, nes jas labai paprasta pritaikyti, tačiau jos iš esmės apsaugo tik nuo šviesos. Jos yra neefektyvios sulaikant saulės šilumos pritekėjimus, nes stabdo juos tada, kai jie jau patekę į patalpą (ASHRAE 2004).

Lango konstrukcijoje montuojamos žaliuzės yra efektyvios tiek sulaikant saulės šilumos pritekėjimus, tiek šviesą. Šio tipo žaliuzių trūkumas tas, kad šiluma patenka tarp dviejų stiklų ir laidumo būdu dalis jos patenka į patalpą ir jei į tarpą per žaliuzių valdymo mechanizmą infiltruojasi oras, žiemą gali kondensuotis garai.

Išorinės žaliuzės sulaiko saulės spindulius prieš jiems patenkant į patalpą, todėl jos yra daug efektyvesnės apsaugai nuo šilumos pritekėjimų nuo saulės nei vidinės. Tačiau reikia pabrėžti, kad išorinės žaliuzės gali daryti ir neigiamą įtaką – sulaikyti šilumą tarp žaliuzių ir lango. Išorinės žaliuzės taip pat gali būti kliūtis natūraliam vėdinimui. Visgi būtent išorines apsaugos nuo saulės priemones rekomenduoja naudoti ASHRAE (2004).

Horizontalios žaliuzės sulaiko didžiąją dalį tiesioginės saulės spinduliuotės, tačiau leidžia patekti išsklaidytai šviesai. Horizontalios žaliuzės taip pat leidžia matyti vaizdą pro langą, kas labai svarbu darbinėje aplinkoje (James ir Bahaj 2005).

Ilgalaikės apsaugos nuo saulės priemonės yra sukurtos tam tikros paskirties pastatams ir yra mažiau lanksčios nei reguliuojamos. Joms priskiriamos langų

užlaidos (horizontalios plokštės, tvirtinamos išorėje virš langų), vertikalios plokštės, nereguliuojamos žaliuzės, šviesos lentynos.

Langų užlaidos yra populiarios karšto klimato kraštuose. Jei jos suprojektuotos teisingai, jų pagrindinis privalumas yra tas, kad vasarą jos sulaiko saulės spinduliuotę, o žiemą, kai saulė yra žemiau, leidžia jai patekti. Langų užlaidos yra efektyviausios pietiniams fasadams. Šaltame klimate, siekiant išvengti šviesos sulaikymo, rekomenduojama užlaidas daryti perforuotas arba iš plokštelių (ASHRAE 2004).

Vertikalios plokštės iš esmės naudojamos tik rytiniams ir vakariniams langams apsaugoti. Jos gali būti taikomos vienos arba kartu su langų užlaidomis.

Šviesos lentyna – tai horizontalus atspindintis paviršius, kuris sumontuotas gana aukštai prie lango patalpos viduje arba išorėje. Kartu su langų užlaidomis, ji sudaro sąlygas patekti dienos šviesai, tačiau tuo pačiu metu mažina saulės šilumos pritekėjimus.

Naudojant bet kokias apsaugas nuo saulės priemones, kurias gali reguliuoti žmonės mechaniniu būdu, nepavyks optimizuoti pastato energijos sąnaudų. Vienintelis būdas optimaliai naudoti apsaugas nuo saulės priemones – naudoti automatinį valdymą (Selkowitz 2005), kuris veikia reaguodamas į įrengtus apšviestos, saulės spinduliuotės, patalpos temperatūros, lauko temperatūros ir kitokius jutiklius.

Žinoma, kad renkantis apsaugas nuo saulės priemones, turi būti įvertintas ir jų panaudojimo ekonominis tikslingumas. Palyginimui, apytikrės investicijos reikalingos skirtingai įstiklintiems fasadams (Streicher *et al.* 2007):

- ✓ viengubas fasadas be apsaugos nuo saulės priemonių – 370 eurų/m²;
- ✓ viengubas fasadas su išorinėmis žaliuzėmis ir paprasčiausiu valdymu – 580 eurų/m²;
- ✓ Dvigubas fasadas, priklausomai nuo tipo, su apsaugos nuo saulės priemonėmis 560–1000 eurų/m².

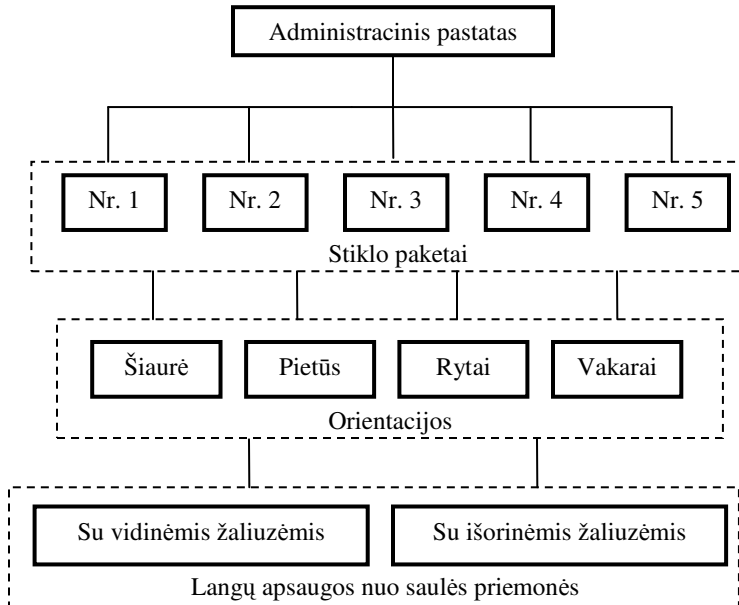
Taigi viengubo fasado, koks analizuojamas šiame darbe, kaina pritaikius žaliuzes su valdymu pagal vieną parametą, kaina padidėtų apytiksliai 210 eurų/m². Ar papildomos investicijos atsipirktų ir per kiek laiko atsipirktų, reikėtų skaičiuoti kiekvienam pastatui individualiai, bet tam visų pirma turi būti nustatyta, kiek energijos gali būti sutaupyta panaudojus apsaugas nuo saulės priemones.

4.3.2. Apsaugos nuo saulės priemonių įtakos energijos poreikiams įvertinimas

Energijos poreikiai tuo mažesni, kuo mažesnis įstiklinimo plotas, tačiau atlikta analizė parodė, kad toks plotas netenkina NA higienos reikalavimų, todėl siekiant išlaikyti regimąjį komfortą bei kiek įmanoma sumažinti energijos suvartojimą, tikslinga apsaugas nuo saulės priemonių efektyvumą analizuoti tik tuo at-

veju, kai įstiklinimo plotas lygus minimaliam reikalaujamam pagal NA higienos normas.

Siekiant padidinti analizuotų administracinio pastato variantų energinį efektyvumą, modeliuojamos dviejų tipų apsaugos nuo saulės priemonės: a) vidinės žaliuzės ir b) išorinės žaliuzės. Apsaugos nuo saulės priemonių įtaka vertinama skirtingiems stiklo paketams bei skirtingoms fasado orientacijoms (žr. 4.35 pav.), kai SFIP yra minimalus reikalaujamas.



4.35 pav. Modeliuojami patalpos variantai pritaikius apsaugos nuo saulės priemones

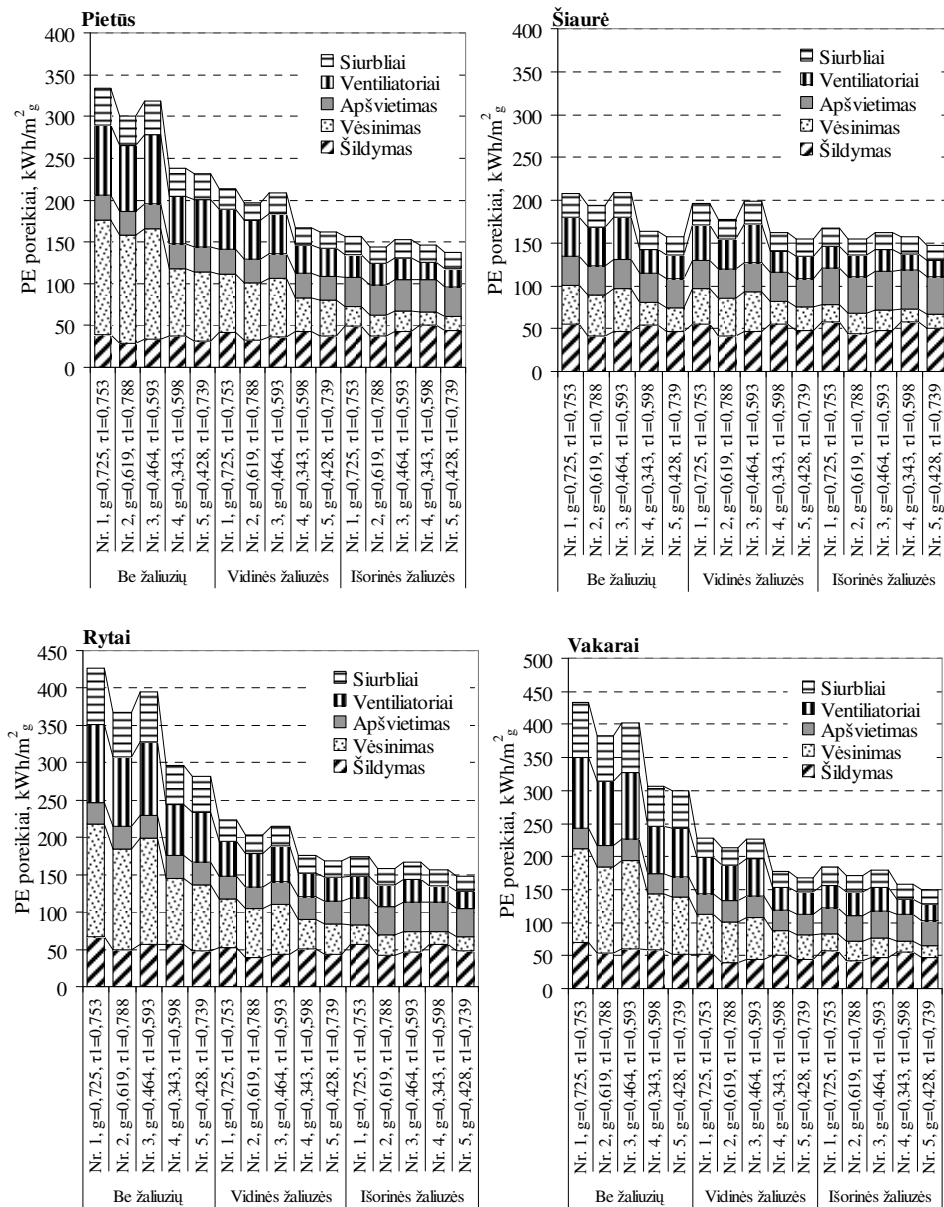
Fig. 4.35. Modelled alternatives of the room when solar shadings devices are applied

Išanalizavus literatūrą, Lietuvos ir panašaus klimato šalims nepavyko rasti konkrečių rekomendacijų dėl apsaugos nuo saulės priemonių ir jų valdymo parinkimo, todėl jos buvo parinktos atlikus jautrumo analizę kelioms skirtingoms apsaugos nuo saulės priemonės su keliais skirtingais valdymo būdais.

Parinktos vidinės horizontalios žaliuzės, kurių plokštelės yra 1 cm pločio, jų atspindėjimo koeficientas iš abiejų pusių lygus 0,8. Žaliuzių veikimas yra valdomas pagal nustatytą 500 lx apšvietą.

Išorinės žaliuzės taip pat parinktos horizontalios, jų plotis 10 cm, o atspindėjimo koeficientas taip pat yra parinktas didelis – 0,8. Žaliuzės valdomos pagal saulės spinduliuotę. Nustatytas saulės spinduliuotės intensyvumas – 120 W/m².

Atlikto modeliavimo rezultatai pavaizduoti 4.36 paveiksle.



4.36 pav. Apsaugos nuo saulės priemonių įtaka metiniams PE poreikiams
Fig. 4.36. Influence of the solar shading devices on annual PE demand

Vidinių žaliuzių įtaka

Panaudojus vidines žaliuzes, energijos poreikiai šildymui skirtingos orientacijos langams kinta nevienodai. Pietinei orientacijai energijos poreikiai šildymui padidėja vidutiniškai 11 %; o šiaurinei energijos poreikiai šildymui lieka praktiškai nepakitę. Tuo tarpu rytinei orientacijai šie poreikiai vidutiniškai sumažėja 17 %, o vakarinei – 22 %.

Energijos poreikiai vėsinimui pietinei orientacijai sumažėja vidutiniškai 48 %, šiaurinei orientacijai pokytis labai nevienodas – skaidriam stiklo paketui jis siekia 9 %, o stiklo paketams Nr. 4 ir Nr. 5 – 1 %. Rytinei ir vakarinei orientacijai energijos poreikiai vėsinimui sumažėja apie 54–55 %.

Energijos poreikiai apšvietimui pritaikius vidines žaliuzes nekinta, nes yra parinkta žaliuzių kontrolė pagal apšvietos lygį, t. y. žaliuzės niekada nesumažina NA mažiau nei iki 500 lx.

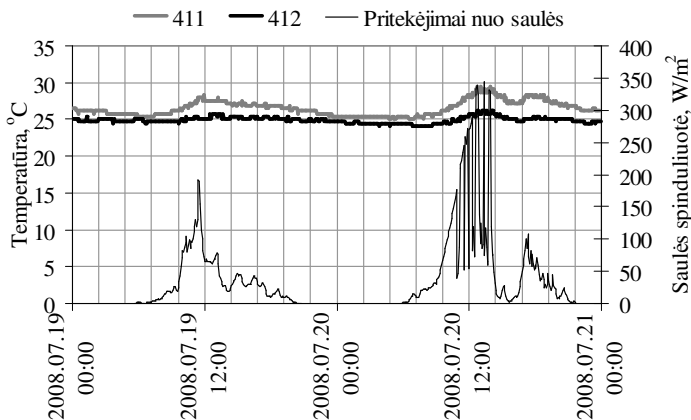
Energijos poreikiai ventiliatoriams vidutiniškai sumažėja: pietinei orientacijai – 42 %; šiaurinei – 10 %, rytinei – 53 %, o vakarinei – 49 %. Energijos poreikiai siurbliams atitinkamai vidutiniškai sumažėja: pietinei orientacijai – 40 %; šiaurinei – 10 %, rytinei 59 %, o vakarinei – 62 %.

Pritaikius vidines žaliuzes visi energijos poreikiai, išskyrus šildymo pietinei orientacijai, sumažėja. Tai lemia žymius suminių metinių PE poreikių sumažėjimus. Pietinės orientacijos fasadui stiklo paketams, Nr. 1, Nr. 2 ir Nr. 3 vidutinis PE poreikių sumažėjimas yra 35 %, o paketų Nr. 4 ir Nr. 5, kurių τ/g santykis žymiai didesnis, – 30 %. Atitinkamai šiaurinei orientacijai vidutinis energijos poreikių sumažėjimas yra 7 ir 1 %, rytinei – 46 ir 41 %, o vakarinei visiems stiklo paketams vidutiniškai 44 %.

Taigi visoms orientacijoms, išskyrus šiaurę, automatiškai valdomos vidinės žaliuzės daro reikšmingą teigiamą įtaką energijos poreikiams.

Išmatuota vidinių žaliuzių įtaka

2008 m. vasarą Vilniaus Gedimino technikos universitete buvo atlikti spinduliuotės, lauko temperatūros ir trijų į pietus orientuotų patalpų vidaus temperatūrų matavimai. Dvi iš matuotų patalpų (411 ir 412) yra visiškai vienodos (18 m²), todėl matavimų metų vienoje iš jų vidinės horizontalios žaliuzės buvo uždarytos, o kitoje visiškai pakeltos. Žaliuzės matavimo metu nebuvo reguliuojamos. Palyginimui buvo pasirinktas savaitgalis, kai nėra vidinių šilumos pritekėjimų ir kai yra išjungta vėdinimo sistema. Su Tinytag Ultra jutikliais matuoti kas 5 min. patalpų temperatūrų skirtumai 2008 m. liepos 19–21 d. kartu su į patalpą patekusia per vertikalius langus sumine saulės spinduliuote (matuota su ALMEMO 2890-9 ir FLA613GS prietaisais), kai žaliuzės yra pakeltos, pavaizduoti 4.37 paveiksle.



4.37 pav. Išmatuotas temperatūrų skirtumas patalpose su žaliuzėmis ir be žaliuzių
Fig. 4.37. Measured temperature difference in the room with and without internal blinds

Nors prieš tai minėti literatūros šaltiniai teigė, kad optimaliai naudoti apsaugos nuo saulės priemonės naudinga tik tada, kai jos yra valdomos automatiškai, eksperimentas rodo (4.37 pav.), kad ir tada, kai nėra jokio valdymo, panaudojus vidines žaliuzes į pietus orientuotam fasadui saulėtomis vasaros dienomis patalpos temperatūra gali būti sumažinta daugiau nei 3 °C.

Išorinių žaliuzių įtaka

Energijos poreikiai šildymui naudojant išorines žaliuzes skirtingos orientacijos langams, kaip ir naudojant vidines žaliuzes, kinta nevienodai. Pietinei orientacijai energijos poreikiai šildymui, lyginant su atveju, kai apsaugos nuo saulės priemonės nenaudojamos, padidėja vidutiniškai 32 %; šiaurinei orientacijai – 6 %. Tuo tarpu rytinei ir vakarinei orientacijai energijos poreikiai šildymui sumažėja, tačiau skirtingiems stiklo paketams skirtingai: rytinei orientacijai nedidelio efektyvumo stiklo paketams Nr. 1, Nr. 2 ir Nr. 3 – vidutiniškai 16 %, o didelio efektyvumo Nr. 4 ir Nr. 5 – tik 1 %; vakarinei orientacijai atitinkamai – 21 ir 8 %.

Energijos poreikiai vėsinimui pietinei orientacijai sumažėja vidutiniškai 81 %, šiaurinei orientacijai pokytis stiklo paketams Nr. 1, Nr. 2 ir Nr. 3 – vidutiniškai 53 %, o stiklo paketams Nr. 4 ir Nr. 5 – 41 %. Rytinei orientacijai energijos poreikiai vėsinimui sumažėja apie 80 %, o vakarinei atitinkamai – 79 %.

Energijos poreikiai apšvietimui pritaikius išorines žaliuzes su kontrole pagal saulės spinduliuotę padidėjo 21–28 % pietinei, rytinei ir vakarinei ir 29–32 % šiaurinei orientacijai. Daugiausiai energijos poreikiai apšvietimui padidėjo stiklo

paketams su mažais šviesos pralaidumo koeficientais (Nr. 3, Nr. 4), o mažiausiai – skaidriam stiklo paketui (Nr. 1).

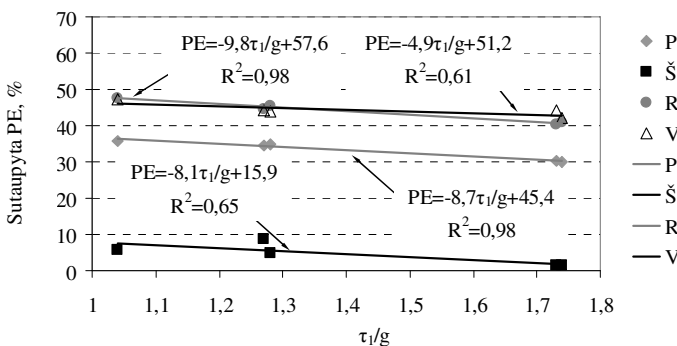
Energijos poreikiai ventiliatoriams vidutiniškai sumažėja: pietinei orientacijai – 43 %; šiaurinei – 40 %, rytinei – 68 %, o vakarinei – 66 %. Energijos poreikiai siurbliams atitinkamai vidutiniškai sumažėjo: pietinei orientacijai – 43 %; šiaurinei – 20 %, rytinei – 62 %, o vakarinei – 64 %

Nors taikant išorines žaliuzes žymiai padidėjo energijos poreikiai apšvietimui bei kai kurioms orientacijoms ir šildymui, suminiai PE poreikiai žymiai sumažėjo. Pietinės orientacijos fasadui stiklo paketams Nr. 1, Nr. 2 ir Nr. 3 vidutinis PE energijos poreikių sumažėjimas yra 52 %, o stiklo paketų Nr. 4 ir Nr. 5, kurių šviesos pralaidumo ir saulės praleisties koeficiento santykis žymiai didesnis, atitinkamai – 40 %. Tuo tarpu šiaurinei orientacijai šis energijos poreikių sumažėjimas yra vidutiniškai 20 ir 5 %, rytinei – 58 ir 47 %, o vakarinei 56 ir 49 %.

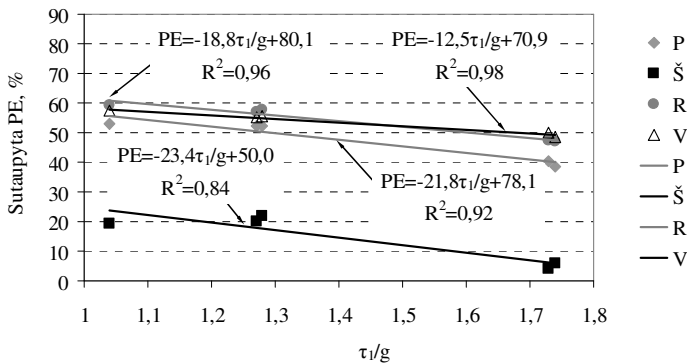
Taigi galima daryti išvadą, kad praktiškai visais atvejais, automatiškai valdomų išorinių žaliuzių naudojimas leidžia žymiai padidinti energinį efektyvumą. Išimtis – į šiaurę orientuotas fasadas su didelio efektyvumo stiklo paketais.

4.3.3. Apsaugos nuo saulės priemonių efektyvumo priklausomybė nuo lango charakteristikų

Išanalizavus, kokios iš darbe analizuotų lango charakteristikų (U , τ_l , g , τ_l/g) daro tiesioginę įtaką sutaupytam PE kiekiui, ir pritaikius apsaugos nuo saulės priemones, buvo nustatyta, kad apaugos nuo saulės priemonių (šiuo atveju vidinių ir išorinių žaliuzių) efektyvumas yra tiesiogiai priklausomas nuo stiklo šviesos pralaidumo koeficiento ir saulės energijos praleisties koeficiento santykio τ_l/g (nuo lango efektyvumo). Ši priklausomybė pavaizduota 4.37 ir 4.38 paveiksluose.



4.37 pav. PE sutaupymai pritaikius vidinės žaliuzes
Fig. 4.37 PE savings when internal blinds are applied



4.38 pav. PE sutaupymai pritaikius išorines žaliuzes
Fig. 4.38 PE savings when external blinds are applied

Iš 4.37 ir 4.38 pav. matyti, kad tarp stiklo paketo efektyvumo ir metinių PE sutaupymų, kai naudojamos apsaugos nuo saulės priemonės, yra tiesinė priklausomybė. Vidinėms žaliuzėms ši priklausomybė nėra didelė, priešingai nei išorinėms. Gautos priklausomybės gali būti panaudotos architektų, siekiant įvertinti, ar tikslinga taikyti vidines ar išorines žaliuzes ir, kokių PE energijos sutaupymų galima tikėtis.

4.4. Rezultatų jautrumo analizė

Jautrumo analize (jautrumo tikrinimu) nustatoma prielaidų, metodų ir duomenų kitimo įtaką rezultatams. Dažniausiai tikrinamas nustatytų reikšmingiausių parametru jautrumas. Jautrumo analizės procesą sudaro rezultatų, gautų taikant tam tikras prielaidas, metodus ar duomenis, lyginimas su rezultatais, gautais taikant pakeistas prielaidas, metodus ir duomenis (LST EN ISO 14044:2007).

Kuriant pastato modelį, buvo daromos prielaidos, apimančios pastato architektūrinę dalį, konstrukcijas, veikimo režimą, komfortą bei inžinerines sistemas. Siekiant nustatyti darbe gautų rezultatų patikimumą ir įvertinti galimus jų svyravimus, būtina atlikti svarbiausių parametru jautrumo analizę.

Tyrėjo nuožiūra yra identifikuojami trys įvesties duomenų parametrai, iš jų vienas apibūdinantis pastato konstrukcijas, o kiti du – inžinerines sistemas, kurie potencialiai gali turėti įtakos modeliavimo rezultatams:

- ♦ atitvarų šiluminė varža;
- ♦ elektros pirminės energijos (PE) rodiklis;
- ♦ šaldymo mašinos naudingumo koeficientas.

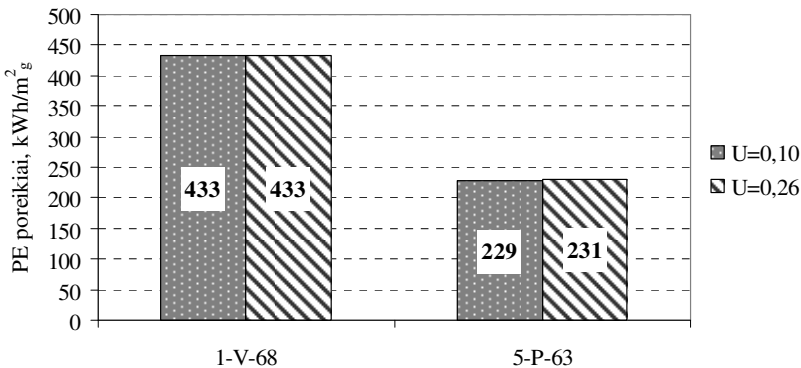
Siekiant nustatyti išvardintų rodiklių įtaką rezultatams ir tuo pačiu įtaką išvadoms, jautrumo analizė atliekama variantui su mažiausiu energijos (Pietų o-

rientacija, stiklo paketas Nr. 5, minimalus reikalaujamas SFIP, naudojamos išorinės žaluzės su valdymu pagal saulės spinduliuotę) suvartojimu ir su didžiausiu (Vakarų orientacija, stiklo paketas Nr. 1, minimalus reikalaujamas SFIP, be apsaugos nuo saulės priemonių) (žr. 4.34 pav.).

4.4.1. Atitvarų varža

Pastato atitvarų šilumos perdavimo koeficiento didinimas, kaip jau buvo rašyta 1.1. skyriuje, yra viena iš pagrindinių priemonių, kurios imasi valstybės (ypač tos, kuriose dominuoja šildymas), siekdamas sumažinti energijos vartojimą pastatuose.

Kuriant modelį, buvo padaryta prielaida, kad sienos šilumos perdavimo koeficientas yra lygus reikalaujamam pagal galiojančias normas, t. y. $0,243 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Kadangi reikalavimai pastatų šiluminėms charakteristikoms nuolatos griežtinami, tikslinga atlikti jautrumo analizę tam atvejui, jei lauko sienos šilumos perdavimo koeficientas būtų lygus $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.



4.36 pav. Sienos šilumos perdavimo koeficiento įtaka rezultatams

Fig. 4.36. Influence of the wall heat transfer coefficient on results

Akivaizdu (4.36 pav.), kad tiek efektyviausiam iš nagrinėtų fasado įstiklinimų, tiek mažiausiai efektyviam variantui, įtaka yra labai nereikšminga – pagerinus sienos šilumos perdavimo koeficientą 61,5 %, pokytis siekia vos 1 %. Tokio mažo skirtumo priežastis yra ta, kad labiau izoliuotą pastatą reikia mažiau šildyti, tačiau daugiau vėsinti. Taigi vėsinimui sunaudojamas papildomas energijos kiekis yra praktiškai lygus sutaupytos šildymui energijos kiekiui.

Todėl galima teigti, kad šios analizės rezultatai bus aktualūs ir tuo atveju, jei bus griežtinami reikalavimai sienos šilumos perdavimo koeficientui.

4.4.2. Elektros pirminės energijos rodiklis

Dėl skirtingų elektros energijos gamyboje naudojamų energijos išteklių bei gamybos efektyvumo elektros PE rodiklis kiekviename šalyje skiriasi. Skirtingose literatūros šaltiniuose pateikiami elektros PE rodikliai taip pat nėra vienodi. Pavyzdžiui prEN 15315:2005 pateikiamas vienas elektros PE rodiklis, kai elektra gaminama iš įvairių energijos šaltinių, kuris lygus 2,8. Nors, pavyzdžiui, Vokietijos standarte DIN V 18599 šis rodiklis lygus 2,7 (Reiser *et al.* 2008), o Šveicarijos mažai energijos vartojančių pastatų standarte MINERGIE – 2,0 (Mennel *et al.* 2007).

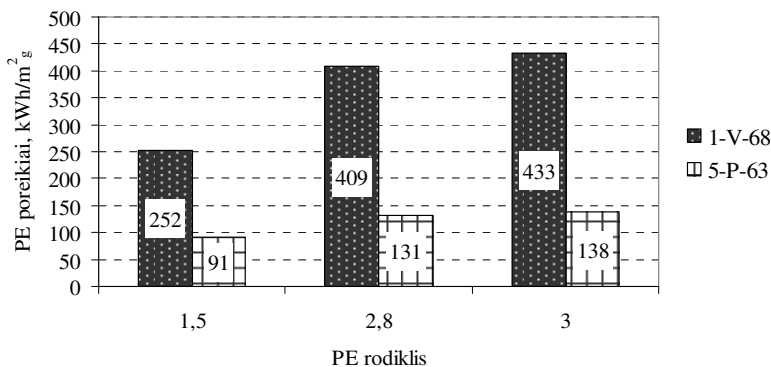
Lietuvoje nėra oficialiai nustatyto PE rodiklio, todėl darbe, kaip jau buvo minėta, priimamas elektros energijos perskaičiavimo į pirminę rodiklis lygus 3. Tokia reikšmė dažnai priimama kitų tyrėjų, todėl leidžia palyginti skirtingų tyrimų rezultatus.

Elektros PE rodiklio jautrumo analizė bus atliekama atveju, kai elektra gaminama hidroelektrinėje ir atominėje elektrinėje (4.1 lentelė).

4.1 lentelė. Elektros PE rodiklis (LST EN 15603:2008)

Table 4.1. Electricity PE factor (LST EN 15603:2008)

	Elektros PE rodiklis
Elektra gaminama hidroelektrinėse	1,50
Elektra gaminama atominėje	2,80



4.37 pav. Elektros PE rodiklio įtaka rezultatams

Fig. 4.37. Influence of the PE factor on results

Pagal 4.37 paveiksle pateiktus suminius pirminės energijos poreikius, rezultatų jautris PE koeficientui akivaizdžiai yra reikšmingas. Jautris tuo didesnis, kuo didesni energijos poreikiai. Mažiausiai energiška efektyviam stiklo paketui (1-V-68) jautris, kai elektra gaminama iš hidroenergijos, siekia 41,8 %, o efektyviausiam – 34 %. Lietuvoje labai nedidelė dalis elektros (2007 m. siekė 4,6 %)

pagaminama iš atsinaujinančių energijos šaltinių ir artimiausioje ateityje, kol nepastatyta nauja atominė elektrinė, labiausiai tikėtina, kad elektros PE rodiklis bus daugiau nei 2,8. Taigi, priimta PE rodiklio reikšmė vertinant rezultatus Lietuvos ribose, reikšmingos įtakos neturi. Norint pritaikyti analizės rezultatus kitoms kaimyninėms šalims, reikėtų atlikti PE poreikių perskaičiavimą atsižvelgiant į jų energetinius balansus. Pavyzdžiui, Latvijoje pastato PE suvartojimas bus akivaizdžiai mažesnis, nes joje daugiau nei trečdalis elektros pagaminama iš hidroenergijos.

4.4.3. Šaldymo mašinos naudingumo koeficientas

Modelyje padaryta nemažai prielaidų, susijusių su pastato mikroklimato sistemomis: jų rūšimi, efektyvumu, veikimo režimais. Šios prielaidos buvo daromos remiantis labiausiai šiuo metu paplitusiais sprendimais bei atsižvelgiant į galiojančius reikalavimus. Biekša (2008) nustatė, kad administracinio pastato energijos poreikiams reikšmingą įtaką daro naudojamų ventiliatorių savitoji galia, vėdinimo sistemos šilumokaitis bei tiekiamo švaraus oro kiekis. Jis taip pat nustatė, kad pastato inžinerinių sistemų šilumnešių temperatūrinių režimų įtaka pastato energijos poreikiams yra nežymi.

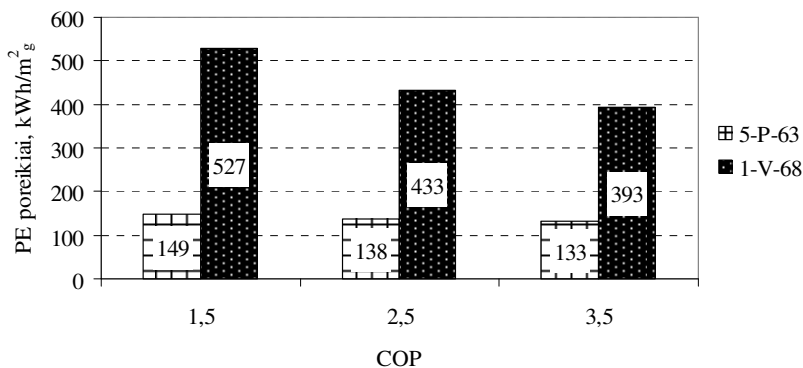
Be Biekšos (2008) nagrinėtų inžinerinių sistemų rodiklių, yra dar vienas rodiklis, kuris pastatams su dideliu vėsinimo poreikiu gali turėti reikšmingą įtaką bendriems energijos poreikiams – šaldymo mašinos naudingumo koeficientas (COP). Jis darbe, kaip jau minėta, priimtas lygus 2,5. Pagal Eurovent (2005) klasifikaciją, oru vėsinamai mašinai tai nėra labai efektyvus įrenginys (D klasė) (žr. 4.2 lentelę), tačiau Europoje vidutinis visų naudojamų vėsinimo įrenginių naudingumo koeficientas yra taip pat nedidelis – 2,7 (Eicker 2009).

4.2 lentelė. Vandens šaldymo mašinų energinio naudingumo klasifikavimas (Eurovent, 2005)

Table 4.2. Energy efficiency classification for chillers (Eurovent 2005)

Klasė	Oru vėsinamos	Vandeniū vėsinamos
A	$COP \geq 3,1$	$COP \geq 5,1$
B	$2,9 \leq COP < 3,1$	$4,65 \leq COP < 5,05$
C	$2,7 \leq COP < 2,9$	$4,25 \leq COP < 4,65$
D	$2,5 \leq COP < 2,7$	$3,85 \leq COP < 4,25$
E	$2,3 \leq COP < 2,5$	$3,45 \leq COP < 3,85$
F	$2,1 \leq COP < 2,3$	$3,05 \leq COP < 3,45$
G	$COP < 2,1$	$COP < 3,05$

Pagal 4.2 lentelę, jautrumo analizei atlikti parenkamas įrenginys prasčiausios G klasės (COP=1,5) ir geriausios – A klasės (COP=3,5).



4.38 pav. Šaldymo mašinos naudingumo koeficiento (COP) įtaka rezultatams
Fig.4.38. Influence of cooling mashine coefficient of performance on results

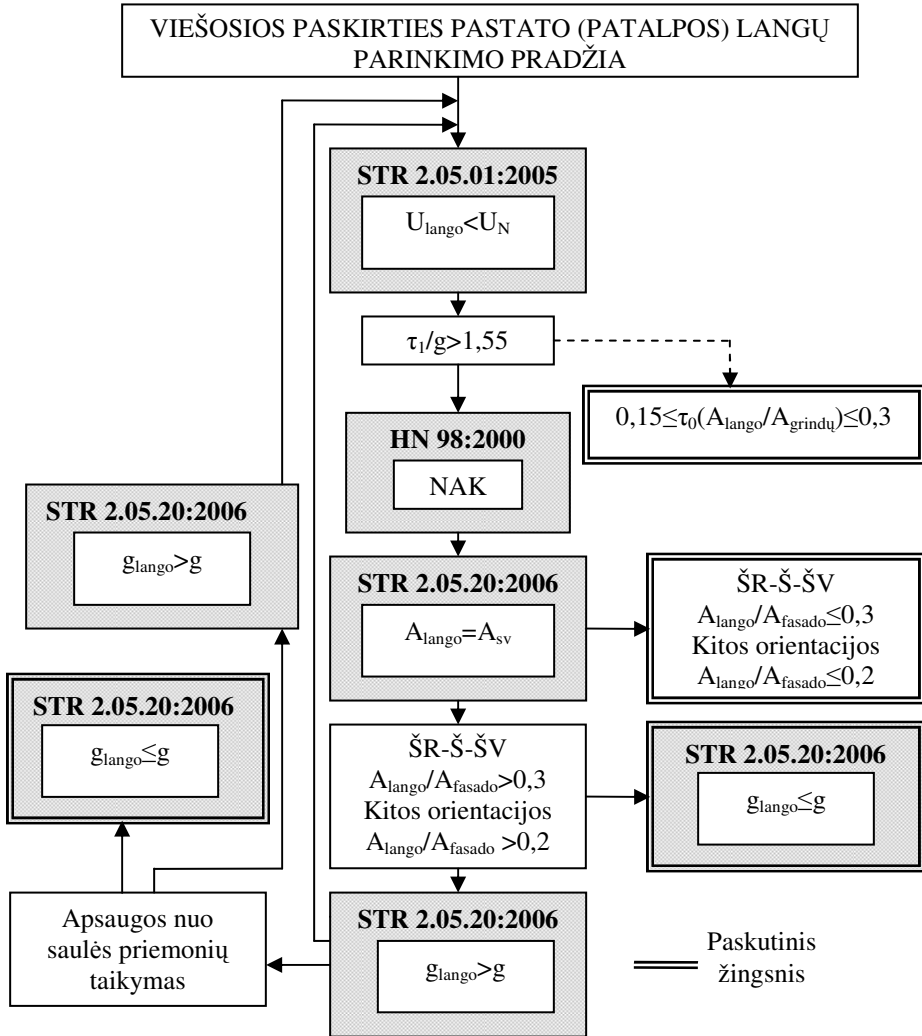
Šaldymo mašinos naudingumo koeficiento daromos įtakos dydis priklauso nuo įstiklinimo efektyvumo, t. y. nuo energijos poreikių dydžio (4.38 pav.). Sumažinus COP iki 1,5, energijos poreikiai padidėja 21,7 % mažo efektyvumo įstiklinimui (1-V-68) ir 8 % didelio efektyvumo įstiklinimui (5-P-63). Šį koeficientą padidinimus iki 3,5, energijos poreikiai atitinkamai sumažėja 9,2 % ir 3,6 %. Galima daryti išvadą, kad efektyviam įstiklinimui dėl vėsinimui tenkančios nedidelės energijos dalies PE balanse, COP įtaka rezultatams yra nereikšminga. Taigi mažinant administracinio pastato energijos poreikius, pirmenybė turi būti teikiama konstrukciniams sprendimams, o įrangos efektyvumo didinimas turėtų būti tik kitas energijos poreikių optimizavimo etapas.

4.5. Mažai energijos vartojančių viešosios paskirties pastatų įstiklinimo charakteristikų parinkimo algoritmas

Darbe atlikta analizė padėjo nustatyti, kokios viešosios paskirties pastato fasado įstiklinimo charakteristikos Lietuvos klimato sąlygomis yra efektyviausios vertinant pagal suminių metinių pirminės energijos poreikį ir NA poreikį. Taip pat skaičiavimais buvo pademonstruota, kaip parinkus efektyvias įstiklinimo charakteristikas galima pasiekti mažai energijos vartojančio pastato lygį.

Minėtiems rezultatams gauti reikia atlikti nemažai sudėtingų dinaminių skaičiavimų, kai vien detalus modelio sukūrimas reikalauja daug laiko ir žinių ne tik apie pastato konstrukcijas, bet ir apie mikroklimato sistemas. Tuo tarpu architektams ir inžinieriams konstruktoriams, priimantiems sprendimus dėl pastato įstiklinimo charakteristikų, reikalingas mažiau sudėtingas ir mažiau laiko atimantis būdas parinkti energiniu ir NA požiūriais efektyviausią fasado įstikli-

nimą. Remiantis darbe atlikta analize bei galiojančiais teisės aktais, reglamentuojančiais administracinių pastatų įstiklinimo charakteristikas, siūlomas supaprastintas mažai energijos vartojančio viešosios paskirties pastato įstiklinimo (langu) parinkimo algoritmas, kuris pavaizduotas 4.39 paveiksle.



4.39 pav. Mažai energijos vartojančio viešosios paskirties pastato įstiklinimo charakteristikų parinkimo algoritmas

Fig. 4.39. Algorithm for selection of the glazing for low energy public building

Parinkant langus gali būti išskirti šie žingsniai:

1. Parenkami tokie langai, kad jų šilumos perdavimo koeficientas atitiktų STR 2.05.01:2005 reikalavimus. Praktikoje langai dažniausiai parenkami vadovaujantis tik šiuo parametru. Tačiau, norint kad langas ne tik mažintų šilumos nuostolius, bet ir šilumos pritekėjimus bei tuo pačiu užtikrintų pakankamą regimąjį komfortą, reikia atsižvelgti ir į stiklo saulės energijos praleisties koeficientą ir šviesos pralaidumo koeficientą.
2. Antras siūlomas žingsnis, tai patikrinimas, ar įstiklinimas efektyvus energiniu ir NA atžvilgiais, t. y., ar santykis $\tau_l/g > 1,55$.
3. Nustatoma, koks turėtų būti langų plotas, kad būtų užtikrinamas pakankamas natūralus apšvietimas. Šalyse, kur nėra reikalavimų dėl minimalaus įstiklinimo ploto, tenkinančio NA reikalavimus, galima būtų vadovautis principu, kad natūralus apšvietimas yra pakankamas, kai patalpos lango ploto ir grindų ploto santykio sandauga su visuminiu šviesos pralaidumo koeficientu yra 0,15–0,3. Lietuvoje yra reglamentuojama, koks turi būti viešosios paskirties pastato langų plotas, kad darbo vietoje būtų tenkinami NA reikalavimai, todėl remiantis HN 98:2000 pagal pastato paskirtį ir atliekamo darbo tikslumą nustatoma, kokia turi NAK reikšmė darbo vietoje.
4. Pagal STR 2.05.20:2006 nustatoma, koks turi būti lango plotas, kad tenkintų NA poreikį darbo vietoje. Praktikoje projektuojant visuomeninius pastatus dažniausiai vadovujamasi principu, kad darbo patalpose langų ir grindų ploto santykis turi būti 1:4–1:6 (Statybos inžinieriaus žinynas 2004).
5. Priklausomai nuo to, kokią dalį pastato fasade užima langai, priklauso ir tolimesnė parinkimo eiga:
 - 5.1. jei langų plotas atitinkamai orientacijai neviršija nustatyto (žr. 4.39 pav.) (STR 2.05.20:2006), parinkimas baigiamas;
 - 5.2. jei langų plotas atitinkamai orientacijai viršija nustatytą (žr. 4.39 pav.) (STR 2.05.20:2006), turi būti tikrinama, ar saulės energijos praleisties koeficientas atitinka keliamus reikalavimus (pirminėje fazėje, kai nežinomas įstiklinimo plotas, toks patikrinimas negalimas). Tačiau būtina atsižvelgti į tai, kad STR 2.05.20:2006 pateikiami apsaugos nuo saulės priemonių įtaką įvertinantys koeficientai yra tik trijų tipų, kas lemia labai netikslų vertinimą. Realiai šie koeficientai kiekvienai individualiai apsaugos nuo saulės priemonei yra skirtingi, be to, būtina įvertinti, ar priemonės yra valdomos ir koku būdu. Todėl, turint konkrečių duomenų, rekomenduojama apsaugos nuo saulės priemonių įtaką įvertinti koeficientą vertinti tiksliau arba galima jį nustatyti remiantis LST EN ISO 13790:2008.
6. Pagal STR 2.05.20:2006 tikrinama, ar lango saulės energijos praleisties koeficientas tenkina nustatytus reikalavimus:
 - 6.1. jei lango saulės energijos praleisties koeficientas tenkina nustatytus reikalavimus, parinkimas baigiamas;

- 6.2. jei lango saulės energijos praleisties koeficientas netenkina nustatytų reikalavimų, galimi du sprendimo būdai:
- 6.2.1. grįžti į parinkimo pradžią (1 žingsnis) ir parinkti naują stiklo paketą ir pakartoti visą procedūrą;
- 6.2.2. pritaikyti apsaugos nuo saulės priemonės.
7. Tikrinama, ar saulės energijos praleisties koeficientas atitinka reikalavimus:
- 7.1. jei reikalavimai tenkinami, parinkimas baigiamas;
- 7.2. jei reikalavimai netenkinami, grįžtama į parinkimo pradžią (1 žingsnis) ir renkamas kitas stiklo paketas, o procedūra kartojama iš naujo.
- Šis algoritmas nurodo aiškią seką, kaip turi būti parenkami viešosios paskirties pastato langai, kai iki šiol normuose, reglamentuojančiuose pastatų įstiklinimo charakteristikas egzistavo tik atskiri reikalavimai, kurie tarpusavyje nebuvo niekaip susieti: nei nurodant aiškų algoritmą, nei pateikiant nuorodas į lygiagrečiai egzistuojančius kitų teisės aktų reikalavimus.

4.6. Gautų rezultatų palyginimas su kitų tyrėjų

Kaip jau buvo minėta literatūros apžvalgoje, iki disertacijos autoriaus ir kiti tyrėjai yra atlikę panašių darbų, t. y. nagrinėjo administracinio pastato įstiklinimo charakteristikų įtaką jo energijos poreikiams. Visgi kiekvieno darbo nagrinėtų veiksmų kombinacijos, įvesties duomenys, tarp kurių ypač svarbu klimato parametrai, bei naudoti metodai (ar programos) skiriasi. Dėl šių priežasčių skiriasi ir gauti rezultatai.

Rezultatų lyginimas su darbų, kuriuose buvo nagrinėjami pastatai, esantys klimato zonose, kur dominuoja vėsimo sezonas, neturi prasmės. Vėsus klimato šalyse atliktų panašaus pobūdžio, kaip šis darbas, tyrimų nėra daug. 50–60° Šiaurės platumoje esančius pastatus tyrė jau minėti Poirazis (2005, 2008), Bülow-Hübe (1998) ir Bodart ir De Herde (2002). 4.1. lentelėje pateikiamas šių darbų ir disertacijos esminių bruožų palyginimas.

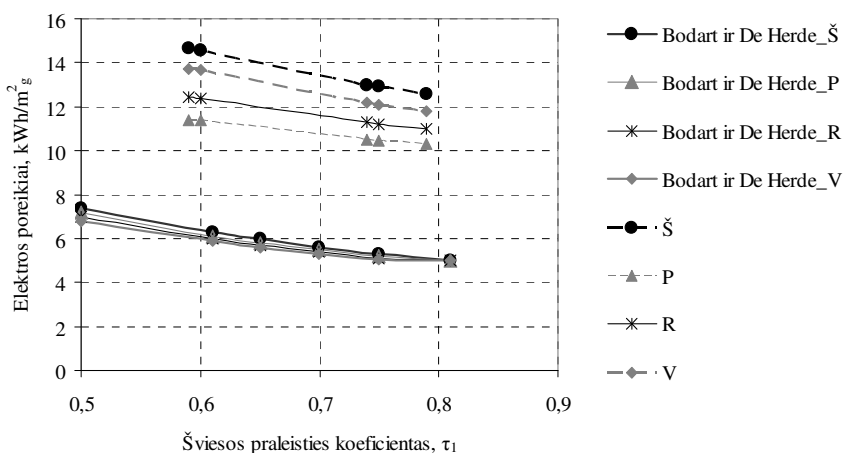
4.1. lentelė. Disertacijos ir kitų panašių atliktų tyrimų esminių bruožų palyginimas
Table 4.1. Comparison of dissertation and general other similar surveys

	Disertacija	Bülow-Hübe	Poirazis	Bodart ir De Herde
Miestas, platumas	Kaunas, 54°53′	Lundas, 55°72′	Goteburgas, 57°42′	Miestas nenurodytas, 50°47′
Objektas	Administracinio pastato kabinetas viduriniame aukšte su viena lauko siena	Administracinio pastato kabinetas viduriniame aukšte su viena lauko siena	Administracinis šešių aukštų pastatas	Administracinio pastato kabinetas viduriniame aukšte su viena lauko siena

4.1. lentelė. Disertacijos ir kitų panašių atliktų tyrimų esminių bruožų palyginimas
Table 4.1. Comparison of dissertation and general other similar surveys

	Disertacija	Bülow-Hübe	Poirazis	Bodart ir De Herde
Modeliavo programa	EnergyPlus	DEROB-LTH, ADELINÉ	IDA ICE 3.0	TRNSYS, ADELINÉ
Vertinti energijos poreikiai	Šildymo, vėsinimo, apšvietimo, siurblių ir ventiliatorių	Šildymo, vėsinimo, apšvietimo	Šildymo, vėsinimo, apšvietimo, siurblių ir ventiliatorių	Šildymo, vėsinimo, apšvietimo
Kriterijus	Pirminė energija	Patalpos galutinės energijos poreikiai	Galutinė energija, suvartota pastate	Pirminė energija

Bodart ir De Herde rezultatus sudėtinga lyginti su disertacijos rezultatais, nes jų darbo tikslas buvo įvertinti natūralaus apšvietimo įtaką suminiams (žr. 4.1. lentelę) energijos poreikiams ir jie nepateikia praktiškai jokios informacijos, kaip įvertino šildymo ir vėsinimo energijos poreikius. Kaip ir šiame darbe, autoriai vertino energijos poreikius apšvietimui, esant skirtingiems lango šviesos pralaidumo koeficientams ir nustatė priklausomybę skirtingos orientacijos langams. 4.40 paveiksle pateikiamas Bodart ir De Herde ir šio darbo gautų rezultatų palyginimas. Kadangi darbe nebuvo skaičiuotas SFIP, kuriam pateikia priklausomybę Bodart ir De Herde (57 %), lyginama su 40 % SFIP. Akivaizdu, kad esant mažesniai SFIP, turėtų būti didesnis energijos poreikis apšvietimui, kas ir matosi iš 4.40 pav.

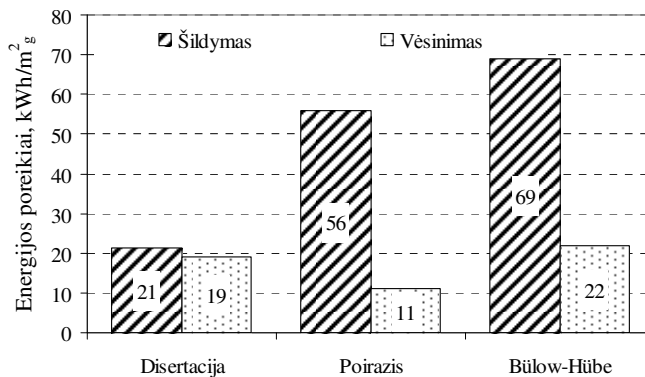


4.40 pav. Energijos poreikių apšvietimui priklausomybė nuo koeficiento τ_1
Fig. 4.40. Dependency of the lighting energy demand on coefficient τ_1

Gautos energijos poreikių apšvietimui priklausomybės nuo šviesos pralaidumo koeficiento turi tą pačią kitimo tendenciją kaip ir gautos Bodart ir De Herde, tačiau taip pat matomi ir skirtumai. Visų pirma, žymiai skiriasi skaitinė energijos suvartojimo reikšmė. Tai gali būti paaiškinama dviem veiksniais: 1. Pavaizduotas darbe gautas energijos suvartojimas, kai SFIP yra 40 %, o Bodart ir De Herde kreivės atitinka 57 % SFIP; 2. Darbe skaičiavimams naudota instaliuota apšvietimo galia 15 W/m^2 , o Bodart ir De Herde priėmė 8 W/m^2 . Abiem atvejais apšvietimas yra valdomas pagal nustatytą 500 lx apšvietos lygį. Taip pat galima pastebėti, kad Bodart ir De Herde pavaizduotam šviesos praleisties koeficiento intervalui gavo labai mažus energijos poreikių apšvietimui skirtumus tarp skirtingos orientacijos patalpų bei, įdomu tai, kad mažiausią energijos suvartojimą jie gavo į vakarus, o ne į pietus orientuotai patalpai, nes į pietus orientuota patalpa, esant toms pačioms sąlygoms, gauna daugiausiai natūralios šviesos. Tai rodo ne tik šio darbo rezultatai, bet ir Tzempelikos ir Athienitis (2007) tyrimo rezultatai (Monrealyje esančio pastato), Jenkins ir Newborough (2007) pateikiamos natūralaus apšvietimo skaičiavimo formulės bei kiti šaltiniai. Tzempelikos ir Athienitis gauti rezultatai, kaip ir šio darbo, taip pat rodo žymesnę orientacijos įtaką apšvietimo energijos poreikiams nei gavo Bodart ir De Herde.

Kaip matyti iš 4.1. lentelės, nors Bülow-Hübe taip pat vertino įstiklinimo charakteristikų įtaką pastato energijos poreikiams tipinei biuro patalpai, ji neįvertino energijos suvartojamos mikroklimato sistemų siurbliuose ir ventiliatoriuose. Bülow-Hübe vertino tik patalpos energijos poreikius, neįvertindama mikroklimato sistemų veikimo ypatumų, jų efektyvumo, taip pat ir išmetamo oro šilumos atgavimo. Šie skaičiavimo ypatumai ir išeities duomenų skirtumai apsunkina darbo rezultatų palyginimą su gautais Bülow-Hübe.

Tuo tarpu Poirazis vertino visus pastato galutinės energijos poreikius, įvertindamas ir sistemų efektyvumą (katilo, šaldymo mašinos, vėdinimo įrangos). Tik jo darbe nenurodoma, kaip buvo nustatyti energijos poreikiai siurbliams ir ventiliatoriams, todėl kelia abejonių visoms jo nagrinėtoms alternatyvoms gautas nekintantis siurblių ir ventiliatorių energijos suvartojimas ($8 \text{ kWh}_E/\text{m}^2_g$), nors energijos poreikiai šildymui ir vėsinimui kito, o šio darbo rezultatai rodo, kad tarp šių energijos poreikių yra tiesioginė priklausomybė. Poirazis visoms nagrinėtoms alternatyvoms pritaikė vienokias ar kitokias apsaugas nuo saulės priemonės, tačiau skirtingas nei taikomos šiame darbe, o tai vėlgi neleidžia tinkamai palyginti rezultatų tiek su darbo, tiek su Bülow-Hübe rezultatais. 4.41 paveiksle pavaizduota gautų rezultatų skirtumai, kai įstiklinimo plotas yra 30 % (šiuo paveiksle disertacijos rezultatai pateikiami kaip galutinė energija).



4.41 pav. Galutinės energijos poreikių palyginimas
Fig. 4.41. Comparison of the final energy demand

Iš 4.41 pav. matyti, kad disertacijoje gautas energijos poreikis šildymui yra žymiai mažesnis, nei gautas kitų dviejų autorių. Didelį Bülow-Hübe gautą energijos poreikį šildymui galima paaiškinti tuo, kad vėdinimo sistema yra be šilumos atgavimo ir kadangi nurodytas vėdinimo sistemos darbo laikas, tikėtina, kad vertintas vėdinimo sistemos veikimo laikas buvo 24 h per parą (žr. 4.2 lentelę). Poirazis gautas energijos poreikis šildymui taip pat yra žymiai didesnis nei gautas darbe, tačiau vėlgi jo modelyje šalinamo oro šilumos atgavimas yra 10 % mažesnis, o vėdinimo sistemos veikimo laikas per savaitę yra beveik dvigubai didesnis, be to – sienų šilumos perdavimo koeficientas taip pat yra šiek tiek didesnis, lyginant su priimtu šiame darbe (žr. 4.2. lentelę).

Lygindami energijos poreikius vėsinimui (4.41 pav.), matome, kad Poirazis gavo beveik dvigubai mažesnius galutinės energijos poreikius vėsinimui. Kaip buvo parodyta šioje disertacijoje, patalpos energijos poreikiai vėsinimui daugiausia yra nulemiami saulės šilumos pritekėjimų, o juos savo ruožtu nulemia saulės energijos praleisties koeficientas g . Taigi Poirazis ir disertacijos lyginamų skaičiuotų variantų saulės energijos praleisties koeficientų g skirtumas nulemia ir energijos poreikio vėsinimui skirtumą (žr. 4.2. lentelę). Taigi galima laikyti, kad gautų energijos poreikių vėsinimui sutapimas yra geras. Bülow-Hübe vėsinimo energijos poreikius tiesiogiai palyginti sudėtingiau, nes, kaip jau buvo minėta, ji vertino tik patalpos vėsos poreikį, nenumatydama, koku būdu ar kokia įranga šį poreikį patenkins.

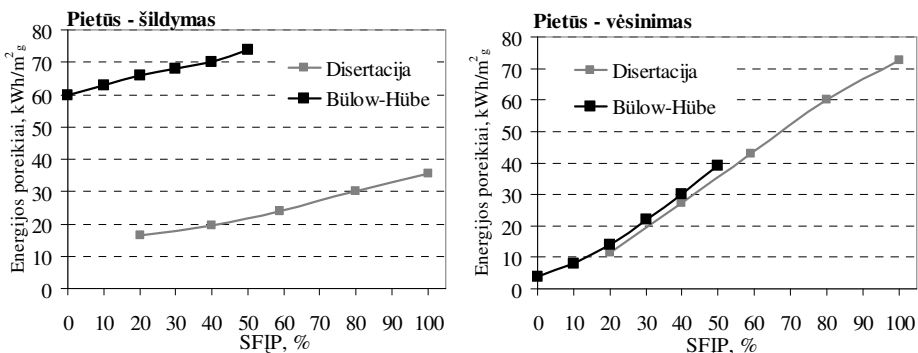
4.2. lentelė. Disertacijos ir kitų tyrimų pagrindiniai modelio įvesties duomenų skirtumai **Table 4.2.** General differences between the model input data of the dissertation and other research

	Disertacija	Poirazis	Bülow-Hübe
Lauko sienos U	0,243 W/m ² K	0,25–0,32 W/m ² K	0,18 W/m ² K
Stiklo U, g	1,44; 0,62	1,65; 0,3*	1,89; 0,66
Tiekiamo oro kiekis	10 l/s	10 l/s	10 l/s
Infiltracija	0,2 h ⁻¹	0,1 h ⁻¹	0,1 h ⁻¹
Šilumos atgavimas	Efektyvumas 70 %	Efektyvumas 60 %	Nėra
Vėdinimo sistemos veikimo laikas per savaitę	45 h	88 h	168 h**
Patalpų temperatūrinis režimas	Žiemą: darbo valandomis – 21 °C, nedarbo – 18 °C. Vasarą: darbo valandomis – 24 °C, nedarbo – sistemos išjungiamos.	22–24,5 °C (informacijos apie temperatūros pažeminimą nenurodo)	Žiemą: darbo valandomis – 20 °C, nedarbo – 18 °C. Vasarą: darbo valandomis – 24 °C, nedarbo 28 °C

* charakteristikos nurodytos įvertinus tarp stiklų įmontuotas žaliuzes;

**valandos literatūros šaltinyje nenurodomos, tačiau teigiama, kad vėdinimo sistemos tiekiamas oro kiekis yra pastovus.

Palyginti galima ir gautas energijos poreikių priklausomybes nuo įstiklinimo charakteristikų su kitų autorių gautomis priklausomybėmis (4.42 pav.). Šiuo atveju Bülow-Hübe pateikia energijos poreikių šildymui ir vėsinimui priklausomybės nuo SFIP intervale 0–50 %, kai disertacijoje skaičiuotas SFIP 20–80 %.



4.42 pav. Disertacijoje ir Bülow-Hübe gautų energijos poreikių šildymui ir vėsinimui priklausomybių nuo SFIP palyginimas

Fig. 4.42. Comparison of dependency of energy demand for heating and cooling on WWR defined in the dissertation and by Bülow-Hübe

Nors energijos poreikiai šildymui ir vėsinimui abiem lyginamais atvejais buvo skaičiuoti esant skirtingiems pradiniais duomenims, tačiau matome (4.42 pav.), kad esant labai panašiam saulės energijos praleisties koeficientui bei nesant dideliems skirtumams tarp atitvarų šilumos perdavimo koeficientų, visgi priklausomybės tiek Kauno miestui, tiek Lundo miestui yra analogiškos. Tai patvirtina prielaidą, kad disertacijoje gautos priklausomybės gali būti panaudotos tam tikros įstiklinimo charakteristikos įtakai energijos poreikiams įvertinti ne tik Lietuvoje, bet ir kitose panašaus klimato kaimyninėse šalyse.

Visgi Bülow-Hübe pateikia tik patalpos energijos poreikių šildymui ir vėsinimui priklausomybes nuo tam tikrų charakteristikų bei neįvertina mikroklimato sistemų efektyvumo bei sunaudotos pirminės energijos, o Poirazis nors ir įvertino konkretaus pastato visus galutinės energijos poreikius, nepateikė jokių apibendrintų energijos poreikių priklausomybių nuo įstiklinimo charakteristikų bei neįvertino pastate suvartotos energijos skirtingos kokybės.

Tuo tarpu šiame darbe administracinio pastato energijos poreikiai yra įvertinti kompleksiskai (visi energijos poreikiai, kuriems įtaką daro įstiklinimo charakteristikos), įvertinant natūralaus apšvietimo poreikį darbo vietoje bei pateikiamos energijos poreikių priklausomybės nuo nagrinėtų įstiklinimo charakteristikų skirtingos orientacijos fasadams.

4.7. Ketvirtojo skyriaus išvados

Ketvirtajame skyriuje pateikiama gautų metinių administracinio pastato energijos poreikių modeliavimo pusvalandžio žingsniu rezultatų analizė.

Rezultatai parodė, kad visos nagrinėtos pastato energijos poreikių dedamosios yra priklausomos nuo SFĮP, fasado įstiklinimo charakteristikų (šilumos perdavimo koeficiento, šviesos praaidumo koeficiento bei saulės energijos praleisties koeficiento) bei fasado orientacijos. Darbe panaudoti metodai leido identifikuoti šių įstiklinimo charakteristikų įtakos reikšmę skirtingoms fasado orientacijoms.

PE poreikiai šildymui yra labai priklausomi nuo įstiklinimo ploto. Esant mažiems SFĮP, skirtumas tarp skirtingų stiklo paketų yra labai nežymus, tačiau didėjant SFĮP, šie skirtumai ryškėja. Lygiai taip pat ir fasado orientacijos įtaka didėja kartu su įstiklinimo plotu. Pagrindinė įstiklinimo charakteristika (neskaitant įstiklinimo ploto bei orientacijos), lemianti pastato energijos poreikius yra įstiklinimo šilumos perdavimo koeficientas. Šildymo galios poreikis yra mažiau priklausomas nuo stiklo paketo šilumos perdavimo koeficiento nei šilumos kiekio poreikiai, tačiau įstiklinimo ploto padidėjimas gali nulemti galios poreikio padidėjimą iki 27 %.

PE poreikiai vėsinimui taip pat yra labai priklausomi nuo įstiklinimo ploto bei orientacijos. SFĖP padidėjimas nuo 20 % iki maksimumo energijos poreikius vėsinimui padidina apytikriai 5 kartus, o šiaurinės orientacijos energijos poreikiai vėsinimui esant visiškai įstiklintam fasadui gali būti iki 4 kartų didesni nei pietinės orientacijos. Nors įstiklintos fasado dalies plotas bei orientacija turi labai reikšmingą įtaką PE poreikiams vėsinimui, tačiau nemažesnę įtaką daro ir stiklo paketo koeficientas g . Tarp energijos poreikių vėsinimui ir koeficiento g yra nustatyta stipri tiesinė priklausomybė. Vėsinimo galios poreikis kaip ir metiniai vėsinimo energijos poreikiai, žymiai priklauso nuo įstiklinimo ploto, orientacijos bei saulės energijos praleisties koeficiento. Nors energijos poreikiai vėsinimui yra didžiausi į pietus orientuoti patalpai, tačiau į rytus ir vakarus orientuotos patalpos per parą turi didesnius vėsos poreikio pikus.

Akivaizdu, kad PE poreikiai dirbtiniam apšvietimui yra tiesiogiai priklausomi nuo fasado įstiklintos dalies ploto, tačiau rezultatai parodė, kad didžiausias energijos poreikių apšvietimui sumažėjimas pastebimas kai SFĖP padidėja nuo 20 iki 40 %, toliau didėjant įstiklinimo plotui, energijos poreikių mažėjimas nėra labai žymus. Taigi vertinant tik energiją apšvietimui, 40 % fasado įstiklinimą galima būtų laikyti efektyviausiu, toks įstiklinimas atitinka ir aukščiau minėtas ASHRAE rekomendacijas. Didėjant SFĖP, tai pat mažėja energijos poreikių apšvietimui skirtumas tarp stiklo paketų su skirtingais šviesos pralaidumo koeficientais. Esant visiškai įstiklintam fasadui, šis skirtumas sudaro vos 7–9 %. Didėjant SFĖP, mažėja orientacijos įtaka ir esant 100 % santykiniam fasado įstiklinimui, orientacija įtakos energijos poreikiams apšvietimui praktiškai neturi.

PE poreikiai siurbliams ir ventiliatoriams yra tiesiogiai priklausomi nuo SFĖP ir jie tuo didesni, kuo didesnis koeficientas g . Didžiausi PE poreikiai siurbliams ir ventiliatoriams yra į rytus orientuotam visiškai įstiklintam fasadui ir blogiausiu atveju siekia net 264 kWh/m^2 , o mažiausi atitinkamai šiaurinei orientacijai siekia tik 89 kWh/m^2 , t. y. energijos poreikiai šiaurinės orientacijos fasadui yra apie 3 kartus mažesni. Energijos poreikiai siurbliams ir ventiliatoriams yra tiesiogiai priklausomi nuo energijos poreikių šildymui ir vėsinimui.

Rezultatai parodė, kad nagrinėjamam administraciniam pastatui PE poreikių balanse šildymui priklausomai nuo stiklo paketo charakteristikų tenka: šiaurinei orientacijai – 18–28 %, kitoms – 9–19 %; vėsinimui šiaurinei orientacijai tenka 9–30 %, o kitoms – 13–47 %; apšvietimui šiaurinei orientacijai tenka 11–49 %, o kitoms – 5–40 %. Papildomai energijai siurbliams ir ventiliatoriams („parazitinei“ energijai), kuri yra dažnai neįvertinama, visais atvejais tenka ne-menka dalis: šiaurinei orientacijai 22–38 %, o kitoms 30–44 %. Tai atitinka Westphalen ir Koszalinski (1999) ataskaitą, kurioje nurodoma, kad „parazitinė“ energija gali sudaryti 20–60 % visos administraciniame pastate suvartojamos energijos.

Vertinant suminius PE poreikius, energiniu požiūriu efektyviausia gaunama šiaurinė įstiklinto fasado orientacija, o mažiausiai efektyvios – rytinė ir pietinė. Tai prieštarauja JAV (ASHRAE 2004) ir Kanados (PWC 2002) rekomendacijoms šaltuose klimatuose didinti pastato pietinių langų plotą, tačiau sutampa su Gratia ir De Herde (2003) rekomendacijomis Belgijos klimatui, kai nenaudojamos apsaugos nuo saulės priemonės, gausiau stiklinti šiaurinę fasadą.

Taigi, Lietuvos klimatinėmis sąlygomis energiniu požiūriu efektyviausias SFĖP pietinei, rytinei ir vakarinei orientacijoms 20 %, o šiaurinei 20–40 %, tačiau toks plotas netenkina NA higienos normų. Todėl racionaliausia būtų fasadą stiklinti tik tiek, kiek minimaliai reikalauja higienos normos. Taip pat nustatyta, kad sumažinus įstiklinimo plotą nuo 100 % iki minimalaus reikalaujamo pagal NA higienos normas, energijos poreikių sumažėjimas tiesiogiai priklauso nuo šviesos pralaidumo koeficiento. Šie sutaupymai didžiausi pietinei orientacijai ir siekia 20–37 %, o mažiausi šiaurinei – 12–27 %. Jeigu normos, reglamentuojančios minimalų viešųjų pastatų įstiklinimo plotą būtų peržiūrėtos ir reikalaujami įstiklinimo plotai sumažėtų, atitinkamai padidėtų ir energijos taupymo potencialas.

Nors analizė ir parodė, kad energiniu ir NA požiūriu efektyviausias kondicionuojamo administracinio pastato fasado įstiklinimo plotas yra lygus minimaliam reikalaujamam, visais atvejais išskyrus į šiaurę orientuotam fasadui stiklo paketams Nr. 4 ir Nr. 5, suminiai PE poreikiai, vertinant pagal Jungtinės karalystės ir Olandijos nustatytus suvartojimus, yra žymiai didesni, nei mažai energijos vartojančio pastato (žr. 1.1. skyrių). Dėl šios priežasties, siekiant sumažinti energijos poreikius iki mažai energijos vartojančio pastato lygmens, yra pritaikytos apsaugos nuo saulės priemonės. Skaičiavimai, kaip ir nurodė įvairūs apžvelgti šaltiniai, parodė, kad efektyviau naudoti išorines užtemdymo priemones, o ne vidines. Energijos sutaupymai naudojant tiek vidines, tiek išorines žaliuzes yra didžiausi į rytus orientuotai patalpai ir gali siekti atitinkamai 48 ir 59 %. Tuo tarpu mažiausi energijos sutaupymai yra šiaurinės orientacijos fasadui. Naudojant vidinės žaliuzes, šie sutaupymai siekia maksimaliai 9 %, o naudojant išorines žaliuzes – 22 %.

PE poreikių sumažėjimas taikant apsaugos nuo saulės priemones yra žymiai mažesnis didelio efektyvumo stiklo paketams. Ypač mažas efektyvumas yra šiaurinės orientacijos fasadui: jis naudojant vidines žaliuzes siekia tik 1 %, o išorines – 4–5 %. Galima teigti, kad didelio efektyvumo stiklo paketams orientuotiems į šiaurę, energijos taupymui netikslinga naudoti apsaugos nuo saulės priemones. Taikant išorines automatiškai valdomas žaliuzes, labai sumažėja skirtumas tarp efektyvių ir neefektyvių stiklo paketų PE poreikių. Dėl šios priežasties, kai planuojama taikyti efektyvias apsaugos nuo saulės priemones, gali būti ekonomiškai tikslingiau pasirinkti prastesnių charakteristikų (pigėsnį) stiklo paketą.

Rezultatų neapibrėžščiai įvertinti atlikta parinktų įvesties duomenų (sienų šiluminės varžos, elektros PE rodiklio, šaldymo mašinos naudingumo koeficiento) jautrumo analizė parodė, kad sienos šilumos varžos įtaka rezultatams yra nereikšminga, o šaldymo mašinos naudingumo koeficiento ir elektros PE rodiklio – reikšminga.

Remiantis atliktais skaičiavimais, literatūros apžvalga bei galiojančiais reglamentais, sukurtas algoritmas, kaip be didelių laiko sąnaudų nesudėtingai architektams ir konstruktoriams parinkti efektyvų administracinio pastato įstiklinimą.

Disertacijos rezultatų palyginimas su kitų panašių tyrimų rezultatais parodė, kad nors ir skiriasi skaitinės reikšmės, šie skirtumai atsiranda dėl pradinių duomenų skirtumų, o disertacijoje autorės pateiktų ir kitų autorių energijos poreikių priklausomybių nuo įstiklinimo charakteristikų pobūdis sutampa.

Bendrosios išvados

1. Disertacijos tema atlikta literatūros apžvalga parodė, kad Lietuvoje ir kaimyninėse šalyse, esančiose toje pačioje klimatinėje zonoje, trūksta tyrimų, kuriuose būtų kompleksiskai analizuojama įstiklinimo charakteristikų įtaka viešosios paskirties pastato mikroklimato ir apšvietimo sistemų energijos poreikiams.

2. Kompiuteriniam pastato modeliavimui naudojamų programų palyginimas parodė, kad analizei atlikti tinkamiausia yra analitiniais sprendimo metodais pagrįsta programa EnergyPlus. Nors skaičiavimams naudojami klimatiniai duomenys skiriasi nuo faktinių, patikrinus programą empiriniu būdu, gautos paklaidos neviršija LST EN 15265:2007 leistinų ribų – 15 %.

3. Nagrinėjame kondicionuojamame administraciniame pastate Lietuvos klimatinėmis sąlygomis, kai nenaudojamos apsaugos nuo saulės priemonės, priklausomai nuo santykinio fasado įstiklinimo ploto, orientacijos bei įstiklinimo charakteristikų, metinis pirminės energijos (PE) poreikis pasiskirsto taip: šildymui – 9–28 %, vėsinimui – 9–47 %, apšvietimui – 5–49 %, energija siurbliams ir ventiliatoriams – 22–44 %. Tai įrodo, kad visos nagrinėtos energijos poreikių dedamosios yra svarbios ir kad pastato energijos poreikius būtina vertinti kompleksiskai.

4. Kompleksinė energijos poreikių analizė parodė, kad energiškai efektyviausias kondicionuojamo administracinio pastato santykinis fasado įstiklinimo

plotas vėsaus klimato šalyse, kurioms priskiriama Lietuva, yra 20 % pietų, rytų bei vakarų fasadams ir 20–40 % šiaurės fasadui. Tuo pačiu metu energiška efektyviausias santykinis fasado įstiklinimo plotas netenkina natūralaus apšvietimo (NA) higienos normų reikalavimų. Dėl šios priežasties, efektyviausias energiniu bei NA požiūriu santykinis fasado įstiklinimo plotas yra lygus minimaliam, tenkinančiam NA higienos normas, plotui.

5. Lietuvos ir kaimyninių šalių klimatui energiška efektyviausia kondicionuojamo pastato fasado orientacija pasaulio šalių atžvilgiu, kai nenaudojamos apsaugos nuo saulės priemonės, yra šiaurė. Šiai orientacijai, esant efektyviausiam įstiklinimo plotui, mažiausi gauti PE poreikiai $157 \text{ kWh}_{\text{PE}}/\text{m}^2_{\text{g}}$. Esant didelio efektyvumo stiklo paketams, vidines apsaugos nuo saulės priemones šiaurės orientacijai Lietuvos sąlygomis taikyti netikslinga. Kitoms orientacijoms, vidinių ir išorinių žaliuzių naudojimas PE poreikius gali sumažinti atitinkamai iki 48 ir 59 %. Pritaikius išorinės žaliuzes, pietinės orientacijos fasadui energijos poreikius galima sumažinti iki $137 \text{ kWh}_{\text{PE}}/\text{m}^2_{\text{g}}$.

6. Remiantis disertacijos rezultatais siūloma nustatyti, kad mažai energijos vartojančiam administraciniam pastatui suminiai metiniai apšvietimo ir mikroklimato sistemų PE poreikiai Lietuvos sąlygomis neturėtų viršyti $160 \text{ kWh}_{\text{PE}}/\text{m}^2_{\text{g}}$ bei siūloma peržiūrėti nacionalinius teisės aktus, reglamentuojančius minimalų viešųjų pastatų fasadų įstiklinimo plotą.

7. Rezultatų neapibrėžčiai įvertinti atlikta parinktų įvesties duomenų jautrumo analizė. Ji parodė, kad sienos šilumos varžos didinimo nuo 4 iki $10 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ įtaka nereikšminga – vos 1 %. Šaldymo mašinos naudingumo koeficiento pokytis nuo 2,5 iki 1,5 ir 3,5 atitinkamai gali padidinti PE poreikius 22 % arba sumažinti 9 %. Šio koeficiento įtaka tuo mažesnė, kuo didesnis įstiklinimo efektyvumas. PE rodiklio įtaka rezultatams bendru atveju gali būti reikšminga, tačiau vertinant Lietuvos energetinę situaciją artimiausioje perspektyvoje šis rodiklis įtakos praktiškai neturi.

8. Sukurtas mažai energijos vartojančio viešosios paskirties pastato įstiklinimo charakteristikų parinkimo algoritmas leidžia ankstyvojoje projektavimo stadijoje, neatliekant daug laiko ir specifinių žinių apie pastato mikroklimato sistemas reikalaujančio modeliavimo, parinkti energiniu ir NA požiūriu efektyvias kondicionuojamo viešosios paskirties pastato įstiklinimo charakteristikas.

Literatūra ir šaltiniai

Aksoy, U. T.; Inalli, M. 2006. Impacts of some building passive design parameters on heating demand for a cold region, *Building and Environment* 41(12):1742–1754.

AlAnzi, A.; Seo, D.; Krarti, M. 2008. Impact of building shape on thermal performance of office buildings in Kuwait, *Energy Conversion and Management* 50(3): 822–828.

de Almeida Ferreira Tavares, P. F.; de Oliveira Gomes Martins, A. M. 2007. Energy efficient building design using sensitivity analysis – A case study, *Energy and Buildings* 39(1): 23–31.

ASHRAE 2001. *Research Project 1015-RP: Typical Weather Years for International Locations. Final Report* [interaktyvus]. 116 P. [žiūrėta 2010 m. sausio 10 d.] Prieiga per internetą: <http://rp.ashrae.biz/page/rp-1015.pdf>.

ASHRAE 2004. *Advanced Energy Design Guide for Small Office*. Atlanta: ASHRAE. 104 p. ISBN 1-931862-55-9.

Assem, E. O.; Al-Mumin, A. A. 2010. Code compliance of fully glazed tall office buildings in hot climate, *Energy and Buildings* 42(7): 1100–1105.

Baetens, R.; Jelle, B. J.; Gustavsen, A. 2010. Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: A state-of-the-art review, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 94(2): 87–105.

Banks, J.; Gibson, R. R. 1997. *Simulation Modelling – Some Programming Required*. IIE Solutions. Feb. 1997.

Bertoldi, P.; Atanuosiu B. 2007. *Electricity Consumption and Efficiency Trends in the Enlarged European Union*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. 62 p. ISBN 978-92-79-05558-4.

Belgian Research Institute 2009. *Overview of alternative assessment procedures across EU* [interaktyvus] [žiūrėta 2009 m. lapkričio 17 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.asiepi.eu/fileadmin/files/WebEvents/WebEvent_6.1/ASIEPI_WP6_WebEvent1_03_Overview.pdf>.

Biekša, D. 2008. *Pastato inžinerinių sistemų procesų integravimo vertinimas taikant eksergijos kriterijų*: daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius: Technika. 87 p.

Bodart, M.; De Herde, A. 2002. Global energy savings in offices buildings by the use of daylighting, *Energy and Buildings* 34(5): 421–429.

Borg, N. 2009. *Guidelines for integrating sustainable summer comfort into public procurement schemes for office equipment and lighting*. Swedish Energy Agency, 19 p.

Bourgeois, D.; Reinhart, C.; Macdonald, I. 2006. Adding advanced behavioural models in whole building energy simulation: A study on the total energy impact of manual and automated lighting control, *Energy and Buildings* 38(7): 814–823.

Bülöw-Hübe, H. 2001. *Energy-Efficient Window Systems. Effects on Energy Use and Daylight in Buildings*: Doctoral Dissertation. Lund Institute of Technology. Lund: KFS AB. 248 p.

Bülöw-Hübe, H. 1998. The effect of glazing type and size on annual heating and cooling demand for Swedish offices, in *Proceedings of Renewable Energy Technologies in Cold Climates '98, 4–6 May 1998, Montréal, CA*: 188–193.

Catalina, T.; Virgone, J.; Blanco, E. 2008. Development and validation of regression models to predict monthly heating demand for residential buildings, *Energy and Buildings* 40(10) 1825–1832.

Chantrasrisalai, C.; Ghatti, V.; Fisher, D. E.; Schaetzle, D. G. 2003. Experimental Validation of the EnergyPlus Low-Temperature Radiant Simulation, *ASHRAE Transactions* 109(2): 614–623.

Chikada, M., *et al.* 2001. Evaluation of energy saving methods in a research institute building, in *Proc. of the PLEA 2001 International Conference on Passive and Low Energy Architecture, Florianópolis, Brazil*: 883–888.

Collins, R. E.; *et al.* 1995. Vacuum glazing – A new component for insulating Windows, *Building and Environment* 30(4): 459–492.

Clarke, J. A. 2001. *Energy Simulation in Building Design. 2nd Edition*. Oxford: Butterworth-Heinemann. 384 p. ISBN 0 7506 5082 6.

Cremers, J.; Illinger C.; Lang W. 2006. Thermische Simulationen zur Bewertung des Potenzials eines neuartigen, hoch wärmegeprägten Fenstersystems, in *Proc. of Confe-*

rence “Energieeffizienz von Gebäuden und Behaglichkeit in Räumen“, München, October 9–11, 2006. Technische Universität München.

Crawley, D. B.; Hand, J. W.; Kummert, M.; Griffith, B. T. 2005. *Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs* [interaktyvus], US Department of Energy, Washington, DC. 55 p [žiūrėta 2009 m. gruodžio 5 d.]. Prieiga per internetą: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/pdfs/contrasting_the_capabilities_of_building_energy_performance_simulation_programs_v1.0.pdf>.

Crawley, D. B., *et al.* 2008. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs, *Building and Environment* 43(4): 661–673.

Daniels K. 2003. *Advanced building systems: a technical guide for architects and engineers*. Basel: Birkhauser. 512 p.

Davies B. 2002. *Integral Transforms and Their Applications. Third Edition*. New York: Springer-Verlag. 367 p. ISBN 0-387-95314-0.

Eicker, U. 2009. *Low Energy Cooling for Sustainable Buildings*. West Sussex: WILEY, 278 p. ISBN: 978-0-470-69744-3.

Engelund Thomsen, K.; Wittchen, K. B.; EuroACE 2008. *European national strategies to move towards very low energy buildings*. Aalborg: SBI, Statens Byggeforskningsinstitut. 33 p. ISBN 978-87-563-1329-2.

Eskin, N.; Turkmen, H. 2008. Analysis of annual heating and cooling energy requirements for office buildings in different climates in Turkey, *Energy and Buildings* 40(5): 763-773.

Estonian Center for Standardisation 2008. EVS 894:2008. *Loomulik valgustus elu- ja büroorumides* (Daylight in dwellings and offices). Estonian Center for Standardisation: 44 p.

EULEB 2007. *European High Quality Low Energy Buildings. Final Report* [interaktyvus]. 40 p. [žiūrėta 2009 m. gruodžio 1 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.euleb.info/download/eie-2003-172_euleb_fr_20070228.pdf>.

Europos Bendrijų komisija 2006. *Komisijos komunikatas: Efektyvaus energijos vartojimo veiksnių planas: išnaudoti potencialą* [interaktyvus]. KOM(2006)0545 galutinis [žiūrėta 2007 m. gegužės 20 d.]. Briuselis. 26 p. Prieiga per internetą: <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2006:0545:FIN:LT:PDF>>.

Europos Bendrijų komisija 2009. *Low energy buildings in Europe: Current state of play, definitions and best practice* [interaktyvus]. 18 p. [žiūrėta 2009 m. spalio 20 d.]. Prieiga per internetą: <http://ec.europa.eu/energy/efficiency/doc/buildings/info_note.pdf>.

Europos Parlamentas ir Taryba 2006. 2006 m. balandžio 5 d. Europos Parlamento ir Tarybos direktyva 2006/32/EB dėl energijos galutinio vartojimo efektyvumo ir energetinių paslaugų, panaikinanti Tarybos direktyvą 93/76/EEB. *Europos Sąjungos oficialusis leidinys* L114: 64–85.

Europos Parlamentas ir Taryba 2009. 2009 m. spalio 21 d. Europos Parlamento ir Tarybos direktyva 2009/125/EB nustatanti ekologinio projektavimo reikalavimų su energija susijusiems gaminiams nustatymo sistemą (nauja redakcija). *Europos Sąjungos oficialusis leidinys* L285: 10–35.

Europos Parlamentas ir Taryba 2010. 2010 m. gegužės 19 d. Europos Parlamento ir Tarybos direktyva 2010/31/EB dėl pastatų energinio naudingumo. *Europos Sąjungos oficialusis leidinys* L153: 13–35.

Eurostat 2007. *Panorama on Energy*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 178 p. ISBN 92-79-03894-X.

Fisher, D. E., *et al.* 2006. Implementation and Validation of Ground-Source Heat Pump System Models in an Integrated Building and System Simulation Environment, *HVAC&R Research* 12(3a): 693–710.

Franzetti, C.; Fraisse, G.; Achard, G. 2004. Influence of the coupling between daylight and artificial lighting on thermal loads in office buildings, *Energy and Buildings* 36(2): 117–126.

Ghisi E.; Tinker J. A. 2005. An Ideal Windows Area concept for energy efficient integration of daylight and artificial light in buildings, *Building and Environment* 40(1): 51–61.

Goncalves, H.; Camelo, S. 2009. *Recommendations on summer energy efficiency on national building codes*. Lisbon: LNEG. 53 p.

Gratia, E.; De Herde, A. 2003. Design of low energy office buildings, *Energy and Buildings* 35(5): 473–491.

Gugliermetti, F.; Bisegna, F. 2003. Visual and energy management of electrochromic windows in Mediterranean climate, *Building and Environment* 38(3): 479–492.

Gugliermetti, F.; Passerini, G.; Bisegna, F. 2004. Climate models for the assessment of office buildings energy performance, *Building and Environment* 39(1): 39–50.

Hargaš L.; Drkal F.; Zmrhal V. 2006. Experimental and simulation temperature evaluation which determine thermal comfort, *in. Proceedings of 17th Air conditioning and ventilation conference 2006, May 17–19, 2006, Prague*. p. 65–68.

Heinzl, R. 2007. *Concepts for Scientific Computing*. Dissertation, Technische Universität Wien, Austria [interaktyvus] [žiūrėta 2010 m. vasario 30 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/heinzl/>>.

Henninger, R. H.; Witte, M. J.; Crawley, D. B. 2004. Analytical and comparative testing of EnergyPlus using IEA HVAC BESTEST E100–E200 test suite, *Energy and Buildings*, 36(8): 855–863.

Henze, G. P.; Felsmann, C.; Kalz, D. E.; Herkel, S. 2008. Primary energy and comfort performance of ventilation assisted thermo-active building systems in continental climates, *Energy and Buildings* 40(2): 99–111.

Hestnes, A. G.; Kofoed, N. U. 2002. Effective retrofitting scenarios for energy efficiency and comfort: results of the design and evaluation activities within the OFFICE project, *Building and Environment* 37(6): 569–574.

Hyde, R. A.; Pedrini, A. 2002. An energy conservation architectural design tool for warm climate (LTV): The tool development and testing. *In Proc. of Conference Tropical Daylight and Buildings 2002, Singapore, 29 January, 2002*. National University of Singapore: 150–159.

HN 98:2000 Natūralus ir dirbtinis darbo vietų apšvietimas. Apšvietos ribinės vertės ir bendrieji matavimo reikalavimai. Vilnius, 2000. 17 p.

HN 32:2004 Darbas su videoterminalais. Saugos sveikatos reikalavimai. Vilnius, 2004. 5 p.

Hong, T. 2009. A close look at the China Design Standard for Energy Efficiency of Public Buildings, *Energy and Buildings* 41(4): 426–435.

Ichinose M., *et al.* 2006. Computing method of thermal and lightning environment considering solar spectral characteristics, *in Proc. of Conference "Energieeffizienz von Gebäuden und Behaglichkeit in Räumen"*, München, October 9–11, 2006. Technische Universität München: 74–76.

Ihm, P.; Nemri, A.; Krarti, M. 2009. Estimation of lighting energy savings from daylighting, *Building and Environment* 44(2): 509–514.

Inoue, T.; Ichinose, M.; Ichikawa, N. 2008. Thermotropic glass with active dimming control for solar shading and daylighting, *Energy and Buildings* 40(3): 385–393.

Inoue, T. 2003. Solar shading and daylighting by means of autonomous responsive dimming glass: practical application, *Energy and Buildings* 35(5): 463–471.

Irvine, T. 2000. *An introduction to frequency response functions* [interaktyvus]. 14 p. [žiūrėta 2010 gegužės 10 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.cs.wright.edu/~jslater/SDTCOutreachWebsite/intro_freq_resp_functions.pdf>.

ISO 8995:1989 (E). Principles of visual ergonomics - The lighting of indoor work systems.

James P. A. B.; Bahaj A.S. 2005. Smart glazing solutions to glare and solar gain: a 'sick building' case study, *Energy and Buildings* 37(10): 1058–1067.

Jenkins, D.; Newborough, M. 2007. An approach for estimating the carbon emissions associated with office lighting with a daylight contribution, *Applied Energy* 84(6): 608–622.

Jensen, O. M.; Wittchen, K. B.; Engelund Thomsen, K.; EuroACE 2009. *Towards very low energy buildings. Energy saving and CO₂ emission reduction by changing European building regulations to very low energy standards* [interaktyvus]. 40 p. [žiūrėta 2009 m. spalio 10 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.euroace.org/EuroACE%20documents/EuroACE%20-%20Sbi_2009-03%20Towards%20very%20low%20energy%20building%20-%20February%202009.pdf>.

Jokisalo, J. 2008. *On design principles and calculation methods related to energy performance of building in Finland*: Doctoral dissertation. Helsinki: Helsinki University of Technology. 68 p. ISBN 978-951-22-9635-7.

Kalz D.; Pfafferoth J.; Cshossig P.; Herkel S. 2006. Flächenkuelsystemen mit integrierten Phasenwechselmaterialen – eine Simulationsstudie, in *Proc. of Conference "Energieeffizienz von Gebäuden und Behaglichkeit in Räumen"*, München, October 9–11, 2006. Technische Universität München: 81–83.

Kalz, D. E.; Herkel, S.; Wagner, A. 2009. The impact of auxiliary energy on the efficiency of the heating and cooling system: Monitoring of low-energy buildings, *Energy and Buildings* 41(10): 1019–1030.

Karlsson J., Karlsson B., Roos A., 2001. A Simple Model for Assessing the Energy Performance of Windows. *Energy and Buildings* 33(7): 641–651.

Kofoworola, O.F.; Gheewala, S.H. 2009. Life cycle energy assessment of a typical Office building in Thailand, *Energy and Buildings* 41(10): 1076–1083.

Krivochiža, D.; Čiuprinskas, K. 2008. Lauko oro projektinės temperatūros skaičiavimas ir parinkimas, *respublikinės mokslinės konferencijos „Pastatų inžinerinės sistemos“, įvykusios Vilniuje 2008 m. balandžio 24–25 d. medžiaga*. Vilnius: Technika. 47–53 p.

Lam, J. C.; Tsanga, C.L.; Yang, L. 2006. Impacts of lighting density on heating and cooling loads in different climates in China, *Energy Conversion and Management* 47(13–14): 1942–1953.

Li, D. H. W., *et al.* 2008. Lighting and cooling energy consumption in an open-plan office using solar film coating, *Energy* 33(8): 1288–1297.

Loutzenhiser, P. G.; Manz, H.; Moosberger, S.; Maxwell, G. M. 2009. An empirical validation of window solar gain models and the associated interactions, *International Journal of Thermal Sciences* 48(1): 85–95.

LR Aplinkos ministerija 2009. *Aplinkos būklė 2008. Tik faktai*. Vilnius: UAB „Sapnų sala“. 128 p. ISSN 1882-0193.

LR Aplinkos ministerija 2006. *Aplinkos būklė 2005. Tik faktai*. Vilnius: UAB „Petro ofsetas“, 84 p. ISSN 1882-0193.

LST EN 13779:2007 Negyvenamųjų pastatų ventiliacija. Ventiliacijos ir patalpų oro kondicionavimo sistemų eksploatacinių charakteristikų reikalavimai (tapatus EN 13779:2007). Vilnius, 2007. 72 p.

LST EN ISO 7730:2006 Šiluminės aplinkos ergonomika. Šiluminio komforto analitinis nustatymas ir aiškinimas, naudojant numatomojo vidutinio vertinimo ir numatomojo nepatenkintųjų procento rodiklių bei vietinio šiluminio komforto kriterijų skaičiavimą (tapatus ISO 7730:2005). Vilnius, 2006. 54 p.

LST EN 12831:2003 Pastatų šildymo sistemos. Projektinės šilumos apkrovos apskaičiavimo metodas (tapatus EN 12831:2003). Vilnius, 2003. 76 p.

LST EN ISO 14044:2007. *Aplinkos vadyba. Būvio ciklo įvertinimas. Reikalavimai ir nurodymai (ISO 14044:2006)*. Vilnius, 2007. 48 p.

Martinaitis, V. 2001. *Pastato gyvavimo ciklo termodinaminės analizės modelis*. Vilnius: Technika. 171 p. ISBN 9986054354.

Masoso, O. T.; Grobler, L. J. 2008. A new and innovative look at anti insulation behaviour in building energy consumption, *Energy and Buildings* 40(10): 1889–1894.

Mast, J. G.; Stec, W. J. 2006. Optimization of the buildings performance with the use of simulations, *Rehva journal* 3/2006, p. 12–15.

Mennel, S.; Menti, U-P.; Notter, G. 2007. *MINERGIE-P® – A Building Standard of the Future* [interaktyvus] [žiūrėta 2008 m. liepos 21 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.inive.org/members_area/medias/pdf/Inive/clima2007/B01/B01D1349.pdf>.

Menzies, G. F.; Wherrett, J. R. 2005. Windows in the workplace: examining issues of the environmental sustainability and occupant comfort in the selection of multi-glazed windows, *Energy and Buildings* 37(6): 623–630.

Miyazaki, T.; Akisawa, A.; Kashiwagi, T. 2005. Energy savings of the office buildings by the use of semi-transparent solar cells for windows, *Renewable Energy* 30(3): 281–304.

van Moeseke, G.; Bruyere, I.; De Herde, A. 2007. Impact of control rules on the efficiency of shading devices and free cooling for office buildings, *Building and Environment* 42(2): 784–793.

Mohammadi, A. 2007. *Modeling occupants' control actions and their energy implications in an office building*. Dissertation. Vienna University of Technology. 118 p.

Moosberger, S., et al. 2006. Einsatz von Gebaeude – Simulations – Programmen zur Optimierung von Verglasung und Beschattung, in *Proc. of Conference "Energieeffizienz von Gebäuden und Behaglichkeit in Räumen"*, München, October 9–11, 2006. Technische Universität München: 177–179.

Mumovic, D.; Santamouris, M. *A handbook of sustainable building design and engineering: an integarted approach to energy, health and operational performance*. London: Earthscan. ISBN 978-1-84407-596-6.

Neymark, J., et al. 2002. Applying the building energy simulation test (BESTEST) diagnostic method to verification of space conditioning equipment models used in whole-building energy simulation programs, *Energy and Buildings* 34(9): 917–931.

NS 3031:2007 Beregning av bygningers energiytelse - Metode og data (Calculation of energy performance of buildings Method and data). Lysaker, 2007. 72 p.

Ourgbi, R.; Al-Anzi, A.; Krarti, M. 2007. A simplified analysis method to predict the impact of shape on annual energy use for office buildings, *Energy Conversion and Management* 48(1): 300–305.

- Palmero, A. I.; Oliveira, A. C. 2010. Effect of louver shading devices on building energy requirements, *Applied Energy* 87(6): 2040–2049.
- Perednis, E.; Katinas, V.; Tumosa, A. 2007. Pastatų vėsinimo tyrimai, *Energetika* 53(2): 57–60.
- Perednis, E. 2006. Pastatų subalansuotas vėsinimas. *Šiluminė technika* 28(3): 18–19.
- Pfafferott, J. U.; Herkel, S.; Kalz, D. E.; Zeuschner A. 2007. Comparison of low-energy Office buildings in summer using different thermal comfort criteria, *Energy and Buildings* 39(7): 750–757.
- Poirazis, H. 2005. *Single skin glazed office buildings. Energy use and Indoor climate simulations*. Report EBD-T-05/4. Lund University. 248 p.
- Poirazis, H.; Blomsterberg, A.; Wall, M. 2008. Energy simulations for glazed office buildings in Sweden, *Energy and Buildings* 40(7): 1161–1170.
- Reiser, C.; David, R.; Faigl, M.; Baumann, O. 2008. *DIN 18599 – Accounting for primary energy new code requirements dynamic simulation* [interaktyvus] [žiūrėta 2009 m. spalio 15 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.ibpsa.us/simbuild2008/technical_sessions/SB08-DOC-TS09-1-Reiser.pdf>.
- Roisin, B.; Bodart, M.; Denyer, A.; D'Herdt, P. 2008. Lighting energy savings in offices using different control systems and their real consumption, *Energy and Buildings* 40(4): 514–523.
- Roulet, C.-A.; Fürbringer, J.-M.; Cretton, P. 1999. The influence of the user on the results of multizone air flow simulations with COMIS, *Energy and Buildings* 30(1): 73–86.
- RSN 143-92 Pastatų atitvarų šiluminė technika. Vilnius, 1992.
- RSN 156-94 Statybinė klimatologija. Vilnius, 1994.
- Sartori, I.; Hestnes, A. G. 2007. Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article, *Energy and Buildings* 39(3): 249–257.
- Savickas, R. 2009. Influence of building shape indicator on building energy consumption efficiency, in *Proceedings of the 6th Conference of young scientists on energy issues (CYSENI 2009)*. 28–29 May, 2009, Kaunas, Lithuania. Kaunas, [CD-ROM]: ISSN 1822–7554.
- Scheuer, C.; Keoleian, G. A.; Reppe, P. 2003. Life cycle energy and environmental performance of a new university building: modeling challenges and design implications, *Energy and Buildings* 35(10): 1049–1064.
- Selkowitz, S.; Aschehoug, O.; Lee E. S. 2003. *Advanced Interactive Facades Critical Elements for Future Green Buildings?* [interaktyvus] [žiūrėta 2009 m. rugsėjo 5 d.]. Prieiga per internetą: <http://windows.lbl.gov/comm_perf/Electrochromic/refs/attachmt17.2_usgbc.pdf>.

Selkowitz, S. 2005. Field Testing of Dynamic Façade Controls in Highly Glazed Buildings for Energy Efficiency and Comfort, in *Proc. of the 9th International Conference Glass Processing Days 2005*. 17–20 June, 2005, Tampere, Finland. Tampere: Glass Performance Days, 557–561.

Statistikos departamentas prie Lietuvos Respublikos Vyriausybės, 2009. *Gamtos išteklių ir aplinkos apsauga: 2008*. Vilnius: Statistikos departamentas prie Lietuvos Respublikos Vyriausybės, 95 p. ISSN 1648-083X.

Statybos inžinieriaus žinynas (sudarytojas Julius Gajauskas) 2004. Vilnius: Technika. 1096 p. ISBN 9986-05-682-9.

STR 2.05.20:2006 Langai ir išorinės įėjimo durys. Vilnius, 2006. 15 p.

STR 2.05.01:2005 Pastatų atitvarų šiluminė technika. Vilnius, 2005. 54 p.

STR 2.09.02:2005 Šildymas, vėdinimas ir oro kondicionavimas. Vilnius, 2005. 51 p.

STR 2.01.01(6):2008 Esminis statinio reikalavimas. Energijos taupymas ir šilumos išsaugojimas. Vilnius, 2008. 7 p.

STR 2.09.04:2008 Pastato šildymo sistemos galia. Šilumos poreikis šildymui. Vilnius, 2008. 38 p.

STR 2.05.01:1999 Pastatų atitvarų šiluminė technika. Vilnius, 1999. 18 p.

Staudt, A.; Erhorn-Kluttig, H.; Erhorn H. 2009. *Leading examples of public buildings: German Reichstag receives certificate with excellent energy performance* [interaktyvus] [žiūrėta 2010 m. sausio 7 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.buildup.eu/cases/6819>>.

Streicher, W., *et al.* 2007. On the Typology, Costs, Energy Performance, Environmental Quality and Operational Characteristics of Double Skin Façades in European Buildings, *Advances in Building Energy Research*, Volume 1(1): 1–28.

Su, X.; Zhang, X. 2010. Environmental performance optimization of window–wall ratio for different window type in hot summer and cold winter zone in China based on life cycle assessment, *Energy and Buildings* 42(2): 198–202.

Šeduikytė, L.; Paukštys, V. 2008. Evaluation of indoor environment conditions in offices located in buildings with large glazed areas, *Journal of Civil Engineering and Management* 14(1): 39–44.

Šuksteris, V.; Kiveris, R. 1996. *Saulės energijos panaudojimo galimybės Lietuvoje*. Vilnius: Voruta, 33 p. ISBN 9986-510-21-X.

Tronchin, L.; Fabbri, K. 2008. Energy performance building evaluation in Mediterranean countries: Comparison between software simulations and operating rating simulation, *Energy and Buildings* 40(7): 1176–1187.

Tzempelikos, A.; Athienitis, A. K. 2007. The impact of shading design and control on building cooling and lighting demand, *Solar Energy* 81(3): 369–382.

Underwood, C. P.; Yik F. W. H. 2004. *Modelling Methods for Energy in Buildings*. Oxford: Blackwell Publishing. 295 p. ISBN 0-632-05936-2.

U.S. Department of Energy 2010. *EnergyPlus documentation. Engineering Reference* [interaktyvus] [žiūrėta 2010 m. kovo 10 d.]. Prieiga per internetą: <<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/engineeringreference.pdf>>.

Vaitiekūnas, P. 2007. *Šilumos mainų matematinis modeliavimas*. Vilnius: Technika. 290 p. ISBN 978-9955-28-077-4.

Vaitiekūnas, P.; Špakauskas, V. 2003. *Šilumos ir masės pernašos procesų aplinkoje modeliavimo principai*. Vilnius: Technika. 194 p. ISBN 9986-05-663-2.

Vernon, A.; Smith, P. E. 2003 [žiūrėta 2010 05 07]. Survey of Available Simulation Tools [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <http://www.hvac.okstate.edu/tc47/Presentations/Smith_Chicago.pdf>.

Wagner, A., *et al.* 2007. Thermal comfort and workplace occupant satisfaction - Results of field studies in German low energy office buildings, *Energy and Buildings* 39(7): 758–769.

Wargocki, P. 2006. Is it economically justified to invest in high indoor air quality? P. 355-360. *Proceedings of 17th Air conditioning and ventilation conference 2006*, May 17–19, 2006, Prague.

Wargocki, P.; Seppanen, O. 2006. Indoor Climate and Productivity, *REHVA Journal* 2006 (4): 11–12.

Watanabe, H. 1998. Intelligent window using a hydrogel layer for energy efficiency, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 54(1): 203–211.

Westphalen, D.; Koszalinski, S. 1999. *Energy Consumption Characteristics of Commercial Building HVAC Systems*. Volume II: Thermal Distribution, Auxiliary Equipment, and Ventilation. Cambridge: Arthur D. Little, Inc.. 128 p.

Wong, N. H., *et al.* 2003. The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore, *Energy and Buildings* 35(4): 353–364.

Wren, J. 2009. *A Simple Frequency Response Function* [interaktyvus] [žiūrėta 2010 m. kovo 25 d.]. Prieiga per internetą: <<http://blog.prosig.com/2009/10/19/a-simple-frequency-response-function/>>.

Autoriaus publikacijos disertacijos tema

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Sasnauskaitė (Motuzienė), V.; Užšilaitytė, L.; Rogoža, A. 2007. A sustainable analysis of a detached house heating system throughout its life cycle. A case study, *International Journal of Strategic Property Management* 11(3): 143–155. ISSN 1648-715X. (INSPEC).

Motuzienė, V.; Paulauskaitė, S.; Valančius, K. 2010. Pastato fasado įstiklinimo charakteristikų įtaka šildymo, vėsinimo bei apšvietimo sistemų energijos sąnaudoms, *Energetika* 56(1): 48–53. ISSN 0235-7208. (INSPEC).

Motuzienė, V.; Juodis, E. S. 2010a. Complex simulation based energy assessment of office building fenestration, *Journal of Civil Engineering and Management* 16(3): 345–351. ISSN 1392-3730. (ISI Web of Science).

Straipsniai kituose leidiniuose

Sosnovskaja (Motuzienė), V.; Juodis, E. 2006. Analysis of building simulation tools, *respublikinės mokslinės konferencijos „Šilumos energetika ir technologijos“, įvykusios Kaune 2006 m. vasario 2–3 d., mokslinių pranešimų rinkinyje*. Kaunas: LEI, 245–248. ISBN 9986-492-92-0.

Sasnauskaitė (Motuzienė), V.; Juodis, E. 2007a. Energijos sąnaudų apšvietimui ir aušinimui priklausomybė nuo patalpos įstiklinimo ploto, *respublikinės mokslinės konferencijos „Šilumos energetika ir technologijos“, įvykusios Kaune 2007 m. vasario 1–2 d., mokslinių pranešimų rinkinyje*. Kaunas: Technologija, 247–250. ISBN 978-9955-25-338-9.

Sasnauskaitė (Motuzienė), V.; Juodis, E. 2007b. Administracinio pastato įstiklinimo ploto optimizavimas atsižvelgiant į energijos sąnaudas apšvietimui ir aušinimui, *doktorantų ir jaunųjų mokslininkų kasmetinės konferencijos „Jaunoji energetika 2007“, įvykusios Kaune 2007 m. birželio 7 d., pranešimų medžiagoje*. Kaunas: Lietuvos energetikos institutas, 2007. ISSN 1822-7554 (CD).

Sasnauskaitė (Motuzienė), V. 2008. Apšvietimo sistemos įtaka administracinio pastato šildymo ir vėsinimo energijos poreikiams *respublikinės mokslinės konferencijos „Šilumos energetika ir technologijos“, įvykusios Kaune 2008 m. sausio 31–vasario 1 d., mokslinių pranešimų rinkinyje*. Kaunas: LEI, 273–276. ISBN 978-9986-492-99-3.

Juodis, E.; Sasnauskaitė (Motuzienė), V. 2008. The analysis of balance temperatures in residential buildings, *in proceedings of the 7th International Conference “Environmental Engineering”, held in Vilnius on May 22–23, 2008*. Vilnius: Technika, 827–832. ISBN 978-9955-28-264-8 (Thomson ISI Proceedings).

Valančius, K.; Sasnauskaitė (Motuzienė), V. 2008. An influence of the control of heating system to the design heat load and demand of the building, *in proceedings of the 7th International Conference “Environmental Engineering”, held in Vilnius on May 22–23, 2008*. Vilnius: Technika, 882–885. ISBN 978-9955-28-264-8 (Thomson ISI Proceedings).

Паулаускайте, С.; Саснаускайте (Мотузене), В.; Валанчюс К. 2009. Затраты энергии систем отопления и охлаждения в зависимости от характеристик остекления здания, *Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции, Третья Международная научно-техническая конференция, Сборник докладов: 11–13 ноября 2009*. Москва, с. 58–62. ISBN 5-7264-0486-6.

Motuzienė, V.; Juodis, E. S. 2010b. Administracinio pastato įstiklinimo charakteristikų optimizavimas siekiant sukurti mažai energijos vartojantį pastatą, *respublikinės mokslinės konferencijos „Šilumos energetika ir technologijos“, įvykusios Kaune 2010 m. vasario 4–5 d., mokslinių pranešimų rinkinyje*. (priimtas spaudai).

Violeta MOTUZIENĖ

ĮSTIKLINIMO ĮTAKOS VIEŠŪJŲ PASTATŲ ENERGIJOS
POREIKIAMS KOMPLEKSINĖ ANALIZĖ

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
Energetika ir termoinžinerija (06T)

Violeta MOTUZIENĖ

COMPLEX ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF GLAZING ON ENERGY DEMAND
OF PUBLIC BUILDINGS

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Energetics and power engineering (06T)

2010 10 26. 13,25 sp. I. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Ciklonas“,
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius

