



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Šiltnamių Lietuvoje energinio naudingumo vertinimas taikant statinio informacinį modeliavimą

Magistro baigiamasis projektas

Andžela Pudževelytė

Projekto autorė

Lekt. Dr. Juozas Vaičiūnas

Vadovas

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Šiltnamių Lietuvoje energinio naudingumo vertinimas taikant statinio informacinį modeliavimą

Magistro baigiamasis projektas

Darnūs ir energetiškai efektyvūs pastatai (6211EX006)

Andžela Pudževelytė

Projekto autorė

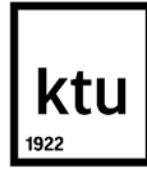
Dr. Juozas Vaičiūnas

Vadovas

Dr. Lina Šeduikytė

Recenzentė

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Andžela Pudževelytė

Šiltnamių Lietuvoje energinio naudingumo vertinimas taikant statinio informacinį modeliavimą

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Andžela Pudževelytė

Patvirtinta elektroniniu būdu



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

Magistro baigiamojo projekto užduotis

Studijų programa: Darnūs ir energetiškai efektyvūs pastatai

Baigiamojo projekto tema (lietuvių k.):
Šiltnamių Lietuvoje energinio naudingumo vertinimas taikant BIM modeliavimą

Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanų potvarkiu Nr.: A-549

Šiltnamių Lietuvoje energinio naudingumo vertinimas taikant statinio informacinį modeliavimą

(anglų k):
Implementation of BIM Modeling for the Assessment of Energy Performance of Greenhouses in Lithuania

Pradiniai duomenys darbui (pagal poreikį):

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

Kita informacija (pagal poreikį), susitikimų su vadovu savaitės diena (-os) bei laikas:

Vadovas: Juozas Vaičiūnas
(indėlis 90 %) pareigos, vardas, pavardė parašas

Konsultantas: Jurgita Černeckienė
(indėlis 10 %) pareigos, vardas, pavardė parašas

Studentas: Andžela Pudževelytė
vardas, pavardė parašas

Andžela Pudževelytė. Šiltnamių Lietuvoje energinio naudingumo vertinimas taikant statinio informacinį modeliavimą. Magistro studijų baigiamasis projektas vadovas dr. Juozas Vaičiūnas; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų krypčių grupė: inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: energetinis efektyvumas, šiltnamiai, CO₂ pėdsakas.

Kaunas, 2022. 44 p.

Santrauka

Baigiamajame magistro projekte „Šiltnamių Lietuvoje energinio naudingumo vertinimas taikant statinio informacinį modeliavimą“ modeliuojami įvairūs šiltnamio variantai ir stebima, kokią įtaką besikeičiančios kraštinės modeliavimo sąlygos turi šildymo ir vėsinimo sistemų energijos suvartojimams.

Tiriant šiltnamių energetinį efektyvumą, naudoti skaitiniai ir analitiniai tyrimai. Skaitiniai – modeliavimai, atliekami naudojant IDA ICE programinę įrangą, kurioje sumodeliuotas šiltnamio virtualusis dvynys.

Modeliavimai atliekami vietovėms, kurių urbanizacinis lygis kinta nuo žemo irki aukšto. Atlikus skaičiavimus stebima, kaip kinta energijos kiekiai reikalingi, užtikrinti šildymo ir vėsinimo poreikius, skaičiuojamas CO₂ pėdsakas, rezultatai palyginami.

Tyrimo aktualumas apžvelgiamas literatūros apžvalgos skyriuje. Remiantis literatūros apžvalga atliekami modeliavimai, aprašomi gauti rezultatai bei galimos jų priežastys, pateikiamos išvados.

Iš viso baigiamajame projekte yra 33 lentelės, 19 paveikslėlių, 40 literatūros šaltinių, kuriais remtasi tiriant ir analizuojant pasirinktos temos parametrus.

Andžela Pudževelytė. Implementation of BIM Modeling for the Assessment of Energy Performance of Greenhouses in Lithuania. Master's Final Degree supervisor Dr. Juozas Vaičiūnas; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Study field group: Engineering Sciences.

Keywords: energy efficiency, greenhouse, CO₂ footprint.

Kaunas, 2022. 44

Summary

The final master's project "Implementation of BIM Modeling for the Assessment of Energy Performance of Greenhouses in Lithuania" models greenhouse variants and monitors which may change the modeling conditions for the energy consumption of heating and cooling systems.

Use numerical and analytical studies to study the energy efficiency of greenhouses. Numerical - simulations performed using IDA ICE software, in which the virtual twin of the greenhouse is modeled.

Simulations are performed for areas where the level of urbanization varies from low to high. The calculations monitor changes in the amount of energy required, ensure heating and cooling needs, calculate the CO₂ footprint, and compare results.

The relevance of the study is reviewed in the literature review section. Based on the literature review, simulations are performed, the results and their possible causes are described, and conclusions are presented.

In total, the final project contains 33 tables, 19 figures, 40 references, and much of the research and analysis of the parameters of the chosen topic.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Įvadas.....	10
1. Literatūros apžvalga	11
1.1. Šiltnamių aktualumas	11
1.2. Mikroklimato parametrų analizė šiltnamyje.....	12
1.3. Šiltnamio dangos	13
1.4. Šiltnamio geometrija	14
1.5. Šiltnamio šildymo ir vėsinimo sistemos.....	15
1.6. Saulės energijos šaltinių integracija	15
1.7. Pastatų informacinio modeliavimo taikymas	18
2. Tiriamoji dalis.....	20
2.1. Kraštinės projektuojamo šiltnamio modelio sąlygos.....	20
2.2. Norminės oro apykaitos koeficiento įtaka energijos sąnaudoms	20
2.3. Šiltnamio dangos šilumos perdavimo koeficiento įtaka energijos sąnaudoms	22
2.4. Artumo idealiam taškui metodas	23
2.4.1. Kriterinių lygčių sudarymas, taikant artumo idealiam taškui metodą. Žemo lygio urbanizuota vietovė.....	24
2.4.2. Kriterinių lygčių sudarymas, taikant artumo idealiam taškui metodą. Vidutinio lygio urbanizuota vietovė.....	27
2.4.3. Kriterinių lygčių sudarymas, taikant artumo idealiam taškui metodą. Aukšto lygio urbanizuota vietovė.....	31
2.5. CO ₂ pėdsakas.....	35
2.6. Šiltnamio vėsinimas naudojant lauko orą.....	38
Išvados	41
Literatūros sąrašas	42

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Daugiametė vidutinė pilnutinė saulės ekspozicija Kauno mieste.....	16
2 lentelė. Energijos poreikis šildymui bei vėdinimui, keičiant norminės oro apykaitos koeficientą	21
3 lentelėje. Šildymo ir vėdinimo rezultatų palyginimas, keičiant norminės oro apykaitos koeficientą	21
4 lentelė. Stiklo gamintojo „Pilkington“ stiklo techniniai parametrai	22
5 lentelė. Žemas urbanizacijos lygis	22
6 lentelė. Vidutinis urbanizacijos lygis	22
7 lentelė. Aukštas urbanizacijos lygis	23
8 lentelė. Kriterinės lygtys. Žemo urbanizacijos lygio vietovė.....	24
9 lentelė. Normalizuota matrica. Žemo urbanizacijos lygio vietovė	25
10 lentelė. Svertinė normalizuota matrica. Žemo urbanizacijos lygio vietovė	25
11 lentelėje. Idealiai geriausios ir idealiai blogiausios alternatyvos. Žemo urbanizacijos lygio vietovė	25
12 lentelė. Nutolimas alternatyvų nuo idealiai geriausios ir idealiai blogiausios alternatyvos	26
13 lentelė. Sąlyginis artumas lyginamųjų alternatyvų idealiai alternatyvai. Žemo urbanizacijos lygio vietovė	26
14 lentelė. Lyginamų variantų naudingumo laipsnis N. Žemo urbanizacijos lygio vietovė.....	27
15 lentelė. Kriterinės lygtys. Vidutinio urbanizacijos lygio vietovė.....	28
16 lentelė. Normalizuota matrica. Vidutinio urbanizacijos lygio vietovė	28
17 lentelė. Svertinė normalizuota matrica. Vidutinio urbanizacijos lygio vietovė	29
18 lentelė. Idealiai geriausios ir idealiai blogiausios alternatyvos. Vidutinio urbanizacijos lygio vietovė	29
19 lentelė. Nutolimas alternatyvų nuo idealiai geriausios ir idealiai blogiausios alternatyvos	30
20 lentelė. Sąlyginis artumas lyginamųjų alternatyvų idealiai alternatyvai. Vidutinio urbanizacijos lygio vietovė	30
21 lentelė. Lyginamų variantų naudingumo laipsnis N. Vidutinio urbanizacijos lygio vietovė.....	30
22 lentelė. Kriterinės lygtys. Aukšto urbanizacijos lygio vietovė	31
23 lentelė. Normalizuota matrica. Aukšto urbanizacijos lygio vietovė	32
24 lentelė. Svertinė normalizuota matrica. Aukšto urbanizacijos lygio vietovė.....	32
25 lentelė. Idealiai geriausios ir idealiai blogiausios alternatyvos. Vidutinio urbanizacijos lygio vietovė	33
26 lentelė. Nutolimas alternatyvų nuo idealiai geriausios ir idealiai blogiausios alternatyvos	33
27 lentelė. Sąlyginis artumas lyginamųjų alternatyvų idealiai alternatyvai. Vidutinio urbanizacijos lygio vietovė	34
28 lentelė. Lyginamų variantų naudingumo laipsnis N. Aukšto urbanizacijos lygio vietovė.....	34
29 lentelė. Energijos kiekiai šildymui bei vėsinimui, kWh	35
30 lentelė. CO ₂ pėdsakas energijos gamybai naudojamų energijos šaltinių. Šildymas.....	35
31 lentelė. CO ₂ pėdsakas energijos gamybai naudojamų energijos šaltinių. Vėsinimas.....	37
32 lentelė. Ventilatoriaus sunaudojamas energijos kiekis vėsinimui, kWh.....	39
33 lentelė. CO ₂ pėdsakas energijos gamybai naudojamų energijos šaltinių. Vėsinimas.....	40

Paveikslų sąrašas

1 pav. Daržovių kiekis, tenkantis vienam gyventojui, kg [2].....	11
2 pav. Šiltnamiuose išauginamų daržovių kiekis per 2018 – 2020 metų laikotarpį (tonomis iš 1 ha) [2].	12
3 pav. Fotosintezės intensyvumo priklausomybė nuo CO ₂ koncentracijos, temperatūros ir šviesos stiprumo [5].	12
4 pav. Vidutinis saulės švietimo laikas Lietuvoje, val/metus.	16
5 pav. Saulės elementų sandara ir veikimo principas [19]......	17
6 pav. Abipusis šešėliavimas žiemos ir vasaros sezonu [21]......	18
7 pav. Simuliacijos rezultatai [14].	18
8 pav. Saulės švietimo azimutas.	19
9 pav. Modeliuojamas šiltnamis.....	20
10 pav. Šiltnamio 3D vizualizacija IDA ICE programoje.	21
11 pav. Lyginamųjų alternatyvų naudingumo laipsnio grafikas.	27
10 pav. Lyginamųjų alternatyvų naudingumo laipsnio grafikas.	31
13 pav. Lyginamųjų alternatyvų naudingumo laipsnio grafikas.....	34
14 pav. Energijos gamybai naudojamų energijos šaltinių paliekamas CO ₂ pėdsakas. Žemas urbanizacijos lygis.	36
15 pav. Energijos gamybai naudojamų energijos šaltinių paliekamas CO ₂ pėdsakas. Vidutinis urbanizacijos lygis.	36
16 pav. Energijos gamybai naudojamų energijos šaltinių paliekamas CO ₂ pėdsakas. Aukštas urbanizacijos lygis.	37
17 pav. Energijos gamybai naudojamų energijos šaltinių paliekamas CO ₂ pėdsakas. Vėdinimas ...	38
18 pav. Temperatūros priklausomybės nuo laiko grafikas.....	39
19 pav. Ventilatoriaus sunaudojamas energijos kiekis vėsinimui, kWh.....	39

Įvadas

Lietuvoje šiltnamių plotai pastaraisiais metais vis didėja. Augant gyventojų skaičiui tiek Lietuvoje tiek ir pasaulyje išauga šiltnamiuose auginamų vaisių ir daržovių paklausa, todėl pasiūla taip pat turi didėti. Šiltnamis kaip statinys mūsų klimato sąlygomis negali visus metus užtikrinti vaisiams ir daržovėms augti tinkamų sąlygų, nes metų ciklas iššaukia didelius temperatūrų pokyčius, kuriuos reikia stabilizuoti, o tam naudojama papildoma energija. Norint palaikyti pastovias mikroklimato sąlygas šiltnamio aplinkoje, jame turėtų būti įrengtos šildymo, vėdinimo bei vėsinimo sistemos. Tačiau šiltnamio mikroklimato sąlygos priklauso ne tik nuo šildymo, vėdinimo bei vėsinimo sistemų, mikroklimato sąlygoms taip pat įtaką daro šiltnamio dangos bei jų šilumos izoliacinės savybės, kurios turi tiesioginės įtakos energijos suvartojimams.

Nustačius pagrindinius energijos vartojimo šaltinius šiltnamyje, reikia rasti būdus, kaip sumažinti energijos suvartojimus bei kaip reikalingą energijos kiekį šildymui, vėdinimui bei vėsinimui padengti, iš kuo draugiškesnių aplinkai šilumos bei šalčio šaltinių, tai užtikrinant mažesnę įtaką aplinkai, sumažinant CO₂ emisijos išsiskyrimus bei šiltnamio efektą.

Tikslas: sumodeliuoti šiltnamį modeliavimo programa, atlikti energetinius vertinimus, bei nustatyti, kokią įtaką klimatui turi suprojektuotas statinys.

Uždaviniai:

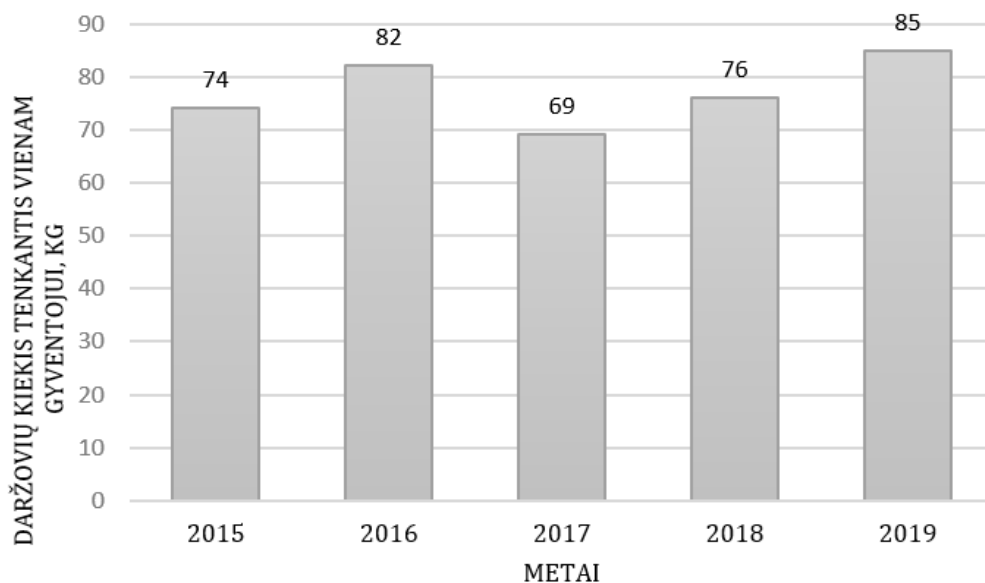
1. Remiantis atlikta mokslinių tyrimų analize, pateikti informaciją kaip mikroklimato parametrai, dangos, inžinerinės sistemos veikia augalų augimo sąlygas, derliaus kiekį bei energijos suvartojimą.
2. Sukurti šiltnamio modelį IDA ICE programine įranga, statiniui priskirti kraštines mikroklimato sąlygas.
3. Atlikti modeliavimus trims Lietuvos urbanizacijos lygiams ir palyginti energijos suvartojimus šildymui bei vėsinimui.
4. Nustatyti, kokį CO₂ pėdsaką palieka suprojektuotos sistemos šiltnamio mikroklimato sąlygoms palaikyti.

1. Literatūros apžvalga

Šiame skyriuje bus apžvelgiama literatūra, kurioje pateikiama bendra ir specifinė informacija apie reikalingas komfortines sąlygas šiltnamio aplinkoje bei priemones šioms komfortinėms sąlygoms pasiekti, užtikrinant kuo mažesnę energijos sunaudojimą. Apžvelgta informacija pateikta atskiruose poskyriuose: šiltnamių aktualumas, mikroklimato parametrų analizė šiltnamyje, šiltnamio dangos, šiltnamio geometrija, šiltnamio šildymo ir vėsinimo sistemos, saulės energijos šaltinių integracija, pastatų informacinio modeliavimo taikymas.

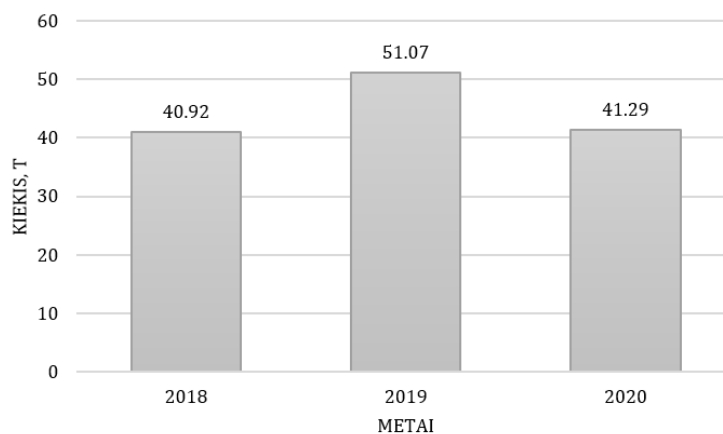
1.1. Šiltnamių aktualumas

Visame pasaulyje šiltnamių plotai sudaro apie 405 000 ha. Lietuvos stikliniai šiltnamiai užima apie 165 ha plotą, iš kurio 114 ha priklauso specializuotoms šiltnamių įmonėms ir žemės ūkio bendrovėms, 10 ha – pramonės įmonėms ir savivaldybėms, apie 40 ha – gyventojams, turintiems kolektyvinius sodus ar dirbamos žemės prie sodybų [1]. Lietuvoje šiltnamiuose auginamos įvairios daržovės, taip pat gėlės, tačiau visgi didžiąją dalį derliaus sudaro daržovės: pomidorai bei agurkai. Pagal statistikos departamento duomenis kasmet žmonės suvartoja vis daugiau daržovių, statistika pateikiama 1 paveikslėlyje „Daržovių kiekis, tenkantis vienam gyventojui, kg“ [2], todėl augant paklausai didėja ir poreikis išauginti kuo didesnę derlių. Kadangi Lietuvos klimatinės sąlygos neleidžia šių daržovių auginti lauko sąlygomis, išauga šiltnamių poreikis.



1 pav. Daržovių kiekis, tenkantis vienam gyventojui, kg [2].

Šiltnamiuose išauginamų daržovių statistika per pastaruosius trejus metus pateikiama 2 paveikslėlyje „Šiltnamiuose išauginamų daržovių kiekis per 2018 – 2020 metų laikotarpį (tonomis iš 1 ha)“.

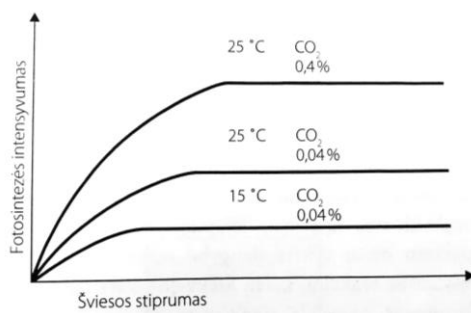


2 pav. Šiltnamiuose išauginamų daržovių kiekis per 2018 – 2020 metų laikotarpį (tonomis iš 1 ha) [2].

Tačiau šiltnamis kaip statinys negali užtikrinti reikalingų mikroklimatinių parametru augalams augti, jame turi būti įrengtos šildymo, vėdinimo bei vėsinimo sistemos, kurios užtikrintų reikalingus parametrus augalui augti bei derliui bręsti. Jei vidutinė aplinkos temperatūra yra žemesnė nei 10 °C, šiltnamį reikės šildyti, jei vidutinė aplinkos temperatūra yra apie 27 °C, reikės vėdinti, kad būtų išvengta per didelės vidinės temperatūros, jei vidutinė aplinkos temperatūra viršija 27 °C, reikia šiltnamį dirbtinai aušinti [3]. Įvairios modeliavimo priemonės, skirtos pastatytos aplinkos energiniam naudingumui vertinti, taip pat šilumos sąlygoms šiltnamyje imituoti, yra neatsiejama pastatytos aplinkos energinio vertinimo dalis.

1.2. Mikroklimato parametru analizė šiltnamyje

Šiltnamis pagal savo naudojimo paskirtį yra priskiriamas P.2.20 pastatu grupei – šiltnamiai, oranžerijos, žiemos sodai [4]. Šie statiniai skirti užtikrinti tokias klimatinės sąlygas vaisiams, gėlėms ar daržovėms, kurios yra nebūdingos tai klimato juostai. Tinkamos klimatinės sąlygos reikalingos tam, kad augalai galėtų vykdyti fotosintezės procesą. Fotosintezės proceso metu augalai pasisavina CO₂ ir kaip reakcijos šalutinį produktą išskiria deguonį, kuriuo kvėpuoja visi aerobai. Augalai, naudodami CO₂ fotosintezės procesui mažina šiltnamio efektą sukeliančių dujų koncentraciją. Fotosintezės intensyvumas priklauso nuo šviesos intensyvumo, temperatūros, CO₂ koncentracijos, augalų mineralinės mitybos, drėgmės ir šviesos spektro [5]. Fotosintezės intensyvumo priklausomybės nuo CO₂ koncentracijos, temperatūros ir šviesos stiprumo grafikas pateikiamas 3 paveikslėlyje.



3 pav. Fotosintezės intensyvumo priklausomybė nuo CO₂ koncentracijos, temperatūros ir šviesos stiprumo [5].

Iš grafiko galima matyti, kad optimaliausia temperatūra, kurioje augalai efektyviausiai vykdo fotosintezės procesą ir pasisavina daugiausiai anglies dioksido, yra 25 °C. Kuo šiltnamyje sudaromos palankesnės sąlygos augalui augti bei atlikti procesus, tuo galima tikėtis geresnio vaisių, daržovių ar augalų derliaus.

1.3. Šiltnamio dangos

Šiltnamio dangos medžiaga yra viena pagrindinių šio statinio konstrukcinių elementų, kuri daro didelę įtaką vidaus mikroklimato sąlygoms. Auginti augalus šiltnamyje yra geriau nei lauke, nes augalai gali augti labiau kontroliuojamoje aplinkoje, todėl labai svarbu išsirinkti tinkamą šiltnamio dangą, kuri padėtų sukurti kuo geresnes sąlygas augalams augti.

Tinkamai parinkta šiltnamio dangos medžiaga, gali reguliuoti šilumos įsiskverbimo į šiltnamį intensyvumą, taip pat sumažinti energijos poreikį šildymui bei vėdinimui. Dažniausiai naudojamos dangos - stiklas, standus plastikas, įskaitant polikarbonatą, stiklo pluoštu sustiprintas plastikas, akrilas ir polivinilchloridas, taip pat ploni plastikai, įskaitant mažo tankio polietilena, PVC ir etileno tetrafluoretilena kopolimerą (fluoro plastikas pasižymintis gera šilumine varža, cheminiu atsparumu bei stiprumu) [6]. Pasakyti, kuri danga yra geriausia – sudėtinga, nes renkantis dangą svarbu ne tik pačios dangos savybės, tačiau ir kokioms klimato sąlygoms esant danga bus naudojama. Šiaurinėse šalyse dažniausiai naudojamos dangos, kurios labiau praleidžia ir izoluoja saulės spinduliuotę, taip sutaupoma šiluminės energijos, pietinėse šalyse, dėl aukštos aplinkos temperatūros aktualus tampa šiltnamių vėsinimas, todėl danga parenkama iš dalies atspindinti saulės šviesą ar mažiau pralaidi. Viena iš naujų dangų, kuri kuriama šiltnamiams, esantiems saulės regionuose, tai mikro-nanofotoninė danga. Šios dangos šviesos pralaidumas yra didesnis nei 95 % ir infraraudonųjų spindulių atspindys viršija 90 % [7]. Kita medžiaga, pagrįsta formule, kai titano dioksidas sumaišomas su mažo tankio polietilenu ir gaunamos nevienalytės formos granulės, gaunama danga, kurio pagrindinis tikslas yra šildymo ir vėsinimo energijos poreikių mažinimas. Atlikus tyrimą, kuriame buvo naudojama ši danga, gauti rezultatai: pagerinus polietileno struktūrą titano dioksidu pagerėjo šilumos izoliacinės savybės, padidėjo atsparumas temperatūrai, ypač esant subtropinėms Viduržemio jūros sąlygoms [8]. Baltijos šalyse dažniausiai naudojamos dangos šiltnamiams - plėvelė, stiklas bei polikarbonatinė danga.

Viena populiariausių dangų, ypač tarp nedidelių šiltnamių savininkų – plėvelė. Ši danga yra pigiausia, prieinamausia ir pati primityviausia, tačiau neilgaamžiška. Paprasta plėvelė negali užtikrinti itin gerų mikroklimato sąlygų. Ant plėvelės karštomis dienomis susirado kondensatas, tai padidina drėgmės kiekį šiltnamyje, taip pat plėvele dengtuose šiltnamiuose sunku išlaikyti šilumą nakties metu, nes plėvelė gerai praleidžia infraraudonuosius spindulius, todėl šiltnamį gali reikėti šildyti net ir vasaros metu, norint palaikyti tinkamas sąlygas augalams augti. Standartinės plėvelės kokybei pagerinti į plėvelę yra dedami tokie priedai kaip vinilacenas, įvairūs stabilizatoriai, taip pat plėvelė gali būti sutvirtinama polipropileno armavimo tinkleliu, kas šiek tiek prailgina jos naudojimo laiką bei šiluminį pralaidumą [9].

Kita gana plačiai naudojama šiltnamių danga – stiklas. Lyginant su plėvele, stiklas – ilgaamžiškesnis, skaidresnis bei pasižymi gera šilumos izoliacija. Karštomis dienomis stiklas puikiai sulaiko šilumą šiltnamio viduje, todėl šiltnamį nakties metu taip greitai neatvėsta [10]. Tačiau stiklas yra trapi ir sunki danga, kurios įrengimas – sudėtingas. Šiltnamio konstrukcija turi būti parinkta taip, kad atlaikytų susidarančias apkrovas nuo stiklinės dangos svorio. Dabar vis dažniau šiltnamių dangai

vietoje paprasto stiklo naudojamas grūdintas stiklas. Jo terminės savybės išlieka tokios pačios, tačiau jis yra saugesnis ir patvaresnis dužimo metu.

Polikarbonatinė danga viena iš naujausių šiltnamio dangų medžiagų. Ši danga pasižymi gera šilumos izoliacija, todėl išvengiama didelių temperatūrinių svyravimų. Turbūt vienas iš svarbiausių aspektų, kodėl ši danga yra gan populiari tarp šiltnamių ūkių, kad ji yra ilgaamžiška. Kai kurie gamintojai deklaruoja, kad šią dangą galima naudoti net dešimt metų, tačiau visgi kokybėje atsispindi ir kaina. Danga yra brangi, todėl dažnai reikalingi ekonominiai vertinimai, kuriuose atsispindi energijos sąnaudos vėdinimui bei šildymui, dangos kaina, taip palyginamos visos galimos dangos, skaičiuojamas atsipirkimas ir parenkamas geriausias variantas. Polikarbonatine danga dengti šiltnamiai pasižymi gera statinio konstrukcija, ant kurios galima montuoti saulės modulių ar saulės kolektorius, taip pat mažas vėjo jėgaines, kurios suteikia dalinį nepriklausomumą nuo elektros energijos tiekėjų [11, 28].

Atlikta nemažai tyrimų, kuriuose atliekamos analizės lyginant polikarbonatinę, stiklo bei plėvelės dangas. Lyginant polikarbonatinę ir stiklo dangą atlikta spektrinė analizė, kurios rezultatai parodė, kad polikarbonatinė danga daug efektyviau blokuoja UV-A ir UV-B nei stiklas. Dubajuje atliktų tyrimų duomenys parodė, kad polikarbonatas galėtų sumažinti bendrą šilumos energijos suvartojimą 27, 89%, palyginti su polietilenu, taip sumažinant eksploataavimo sąnaudas net iki 30% [12].

1.4. Šiltnamio geometrija

Be šiltnamio dangos, kuri yra vienas iš pagrindinių šiltnamio konstrukcinių elementų, labai svarbi yra ir šiltnamio geometrinė forma. Šiltnamio geometrija turi didelę reikšmę šiltnamio mikroklimatui, augalų augimo sąlygoms ir energijos suvartojimui.

Tinkamai parinkta šiltnamio geometrija labai prisideda prie lengvesnio statinio eksploataavimo bei gyvavimo ciklo trukmės. Nuo geografinės vietovės, kurioje planuojami šie statiniai, dažnai priklauso ir statinio forma. Vietovėse, kuriose iškrenta sniego, aktualus šiltnamio stogo posvyrio kampas. Tinkamai parinktas posvyrio kampas užtikrina, kad žiemos metu iškritus sniegui jis bus numestas ir kritulių sudaromas svoris nesudarys papildomų apkrovų šiltnamio konstrukcijoms. Dėl netinkamai parinkto posvyrio kampo užsilaikę krituliai spaudžia šiltnamio konstrukcijas, papildomos apkrovos ilgalaikis veikimas silpnina konstrukcijos atsparumą, todėl konstrukcija, neatlaikiusi apkrovų, gali sugriūti. Optimalus kampas, rekomenduojamas statinių stogams yra 30 – 45 laipsnių. [13].

Žemės ūkis yra viena iš daugiausiai energijos vartojančių ir daugiausiai šiltnamio dujų išskiriančių sričių. Pagal Europos statistikos departamento (Eurostat) duomenis nuo 2007 iki 2018 metų šiltnamio dujų išsiskyrimai padidėjo net 23 %, todėl norint šiltnamių ūkius padaryti kuo draugiškesnius aplinkai, bent dalį reikalingos energijos šildymui, vėdinimui, šiltnamio aušinimui bei apšvietimui galima išgauti iš atsinaujinančių energijos šaltinių. Tam puikiai gali būti panaudojami saulės moduliai, kurių integracijai į šiltnamio konstrukcijas labai aktualus stogo nuolydžio kampas.

Nustatant tinkamiausią posvyrio stogo posvyrio kampą yra atlikta nemažai tyrimų ir eksperimentų. Vienas jų atliktas Švedijoje. Saulės spinduliai skirtingu kampu į paviršius krenta vasaros ir žiemos periodais, todėl prieš įrengiant saulės modulių būtina atsižvelgti į stogo nuolydį ir modulių įrengimą, kad moduliai vienas kitam nesudarytų šešėlio ir taip nesumažintų išgaunamos energijos kiekio. Tyrimo metu atliekamas modeliavimas ir analizuojama, kiek energijos bus sugeneruojama stogą orientuojant visomis pasaulio kryptimis. Iš rezultatų galima padaryti išvadą, kad iš saulės modulių

galima išgauti daugiausiai energijos kai jie sumontuoti pietų kryptimi 30° laipsnių kampu. Į pietų kryptį orientuoti saulės moduliai yra didžiausio naudingo ploto, nes ant jų nekrenta šešėlis, todėl ir išgaunami energijos kiekiai yra didesni nei kitomis kryptimis [14]. Stogo nuolydis ir forma yra vieni iš pagrindinių dydžių, lemiantys šiltnamio energetinį efektyvumą bei naudingumą.

1.5. Šiltnamio šildymo ir vėsinimo sistemos

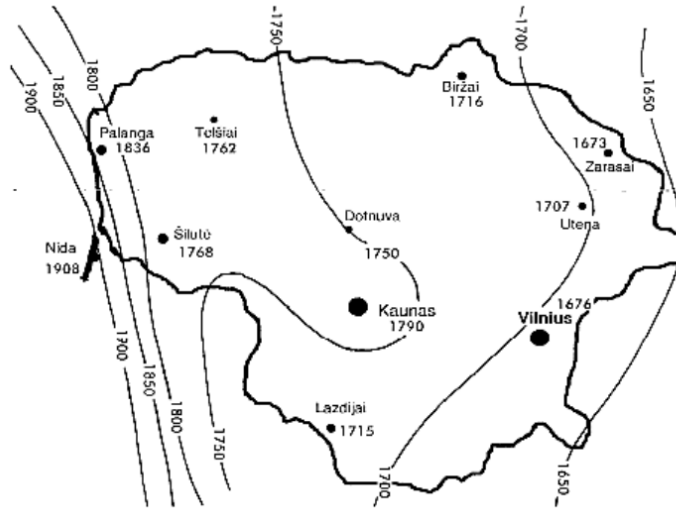
Gyvenamuosiuose pastatuose įrengtos šildymo ir vėsinimo sistemos yra pažangios. Jos gali būti automatizuotos taip, kad veiktų visiškai savarankiškai ir palaikytų reikiamas mikroklimato sąlygas pastatuose. Šiltnamiuose šildymo ir vėsinimo sistemos projektuojamos primityvesnės, tačiau jų paskirtis išlieka tokia pati, užtikrinti tinkamas sąlygas augalams augti. Šalyse esančiose vidutinių platumų klimato juostoje, vasarą reikalingas šiltnamio vėsinimas, o žiemą – šildymas.

Kadangi šiltnamiai vasaros metu prikaista, jo vidaus temperatūra lyginant su išorės temperatūra gali skirtis iki 10-15 laipsnių, tad norint šiltnamio oro temperatūrą sumažinti, gali būti naudojamas vėsinimas lauko oru. Šio vėsinimo principas: ventiliatorius automatizuotas taip, kad lauko temperatūrai esant mažesnei už vidaus temperatūrą bent 3 – 4 laipsniais, įsijungia ir į šiltnamio vidų pradeda tiekti vėsesnį lauko orą. Nuo ventiliatoriaus įsijungimo automatiškai atsidaro langai, per kuriuos išstumiamas šiltesnis oras. Šiltnamio temperatūrai nukritus iki reikalingos ribos ventiliatorius išsijungia, langai užsidaro, o ciklas pakilus temperatūrai šiltnamyje kartojasi [15]. Toks šiltnamio vėsinimo būdas nereikalauja didelių investicijų, yra gana paprastas ir efektyvus, norint užtikrinti tinkamas mikroklimato sąlygas augalams augti.

Jei šiltuoju metų periodu augalams gyvybiškai svarbus šiltnamio vėsinimas, tai šaltuoju metų laiku, norint, kad augalai išaugintų derlių, reikalingas šildymas. Šiltnamiai – energetiškai labai neefektyvus. Jo atitvarų šilumos laidumo koeficientas yra labai prastas, todėl šilumos nuostoliai per atitvaras yra didžiuliai [16]. Pats efektyviausias šildymo tipas šiltnamiams – orinis šildymas. Orinio šildymo privalumas tas, kad per trumpą laiką pastate galima pakelti temperatūrą iki reikalingos ribos, augalo gyvybiškai svarbiems procesams atkilti. Orinio šildymo sistemą labai patogu kombinuoti su atsinaujinančiais energijos šaltiniais bei šilumos siurbliais. Šie sprendimai yra draugiški aplinkai, taip sumažinamas šiltnamio dujų išsiskyrimas ir šiltnamio efektas, paliekamas mažesnis CO₂ pėdsakas nei naudojant energijos šaltinius, kuriems reikalingas iškastinis kuras [17, 27]. Energijos gamybai naudojamų energijos šaltinių paliekamas CO₂ pėdsakas yra reglamentuojamas STR 2.01.02:2016 „Pastatų energinio naudingumo projektavimas ir sertifikavimas“. Dokumente apibrėžiamos reikšmės, paliekamo CO₂ pėdsako, kiekvienai suvartotai kilovatvalandei energijos, atsižvelgiant į tai, ar energija išgaunama iš atsinaujinančių, ar iš neatsinaujinančių energijos šaltinių.

1.6. Saulės energijos šaltinių integracija

Nors pagal klimato sąlygas Lietuva nėra šalis, kurioje yra didelis saulės švietimo laikas (7 pav.), tačiau pastaraisiais metais ypač populiarėjant atsinaujinančiai energetikai, Lietuvoje kasmet didėja saulės modulių elektrinių ne tik ant individualių namų stogų, bet ir žemės ūkio sektoriuje, kur pagaminama energija iš saulės modulių padengia žemės ūkio procesams sunaudojamą energijos kiekį.



4 pav. Vidutinis saulės švietimo laikas Lietuvoje, val/metus.

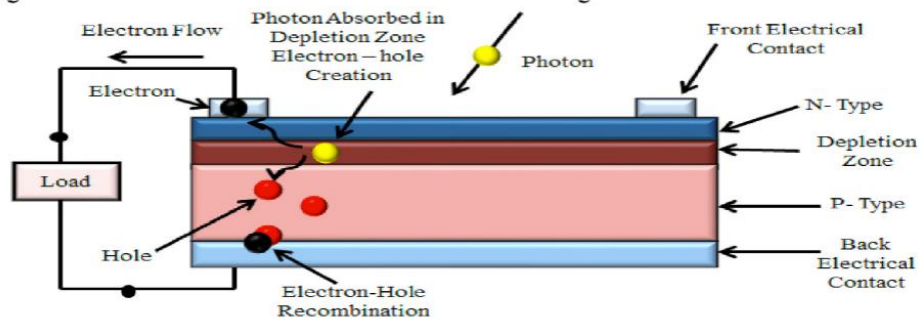
Kauno mieste pagal daugiametę vidutinę pilnutinę saulės ekspoziciją (1 lentelė), tenkančią horizontaliam paviršiui, daugiausia energijos galima išgauti balandžio – rugpjūčio mėnesiais, kai saulės ekspozicija yra didžiausia.

1 lentelė. Daugiametė vidutinė pilnutinė saulės ekspozicija Kauno mieste.

Mėnesiai												Viso per metus
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
16	33	70	99	146	155	150	138	90	52	19	16	984

Ne tik Europos šalyse, bet ir visame pasaulyje vis dažniau ant šilnamių stogų įrengiamos saulės modulių elektrinės, tačiau Lietuvoje šis sprendimas vis dar nėra itin populiarus.

Saulės elementų sistemos - saulės moduliai, kurie savo ruožtu gali būti sujungiami į fotovoltinę sistemą. Fotovoltinės sistemos arba saulės elementai yra sudaryti iš dviejų puslaidininkinių sluoksnių. Kai šviesa patenka ant saulės elementų elektronai yra išlaisvinami iš atomų, esančių puslaidininkiuose. Atsiradęs potencialų skirtumas lemia, kad vienoje baterijos pusėje susidaro neigiamas krūvis, o kitoje teigiamas. Kai grandinė susijungia yra išgaunama naudojamos įtampos elektros srovė [18,19].

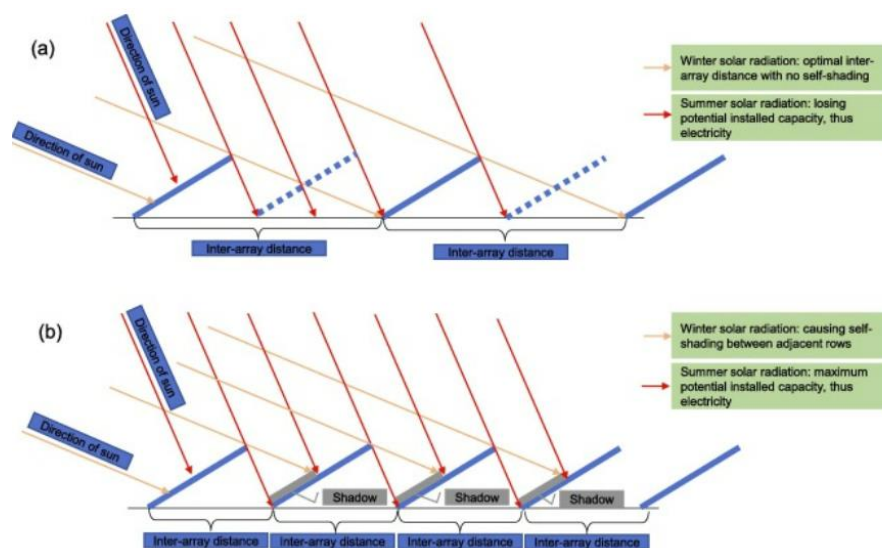


5 pav. Saulės elementų sandara ir veikimo principas [19].

Pagal gamybos technologiją skiriami du saulės modulių tipai: monokristaliniai ir polikristaliniai. Lyginant šiuos du saulės modulių tipus monokristaliniai saulės moduliai yra kur kas efektyvesni nei polikristaliniai saulės moduliai, tačiau polikristalinių saulės modulių kaina yra mažesnė nei polikristalinių, tad svarbiausiu aspektu renkantis saulės modulius tampa stogo paviršiaus plotas bei norimas išgauti energijos kiekis.

Ant šiltnamio stogo įrengtos saulės elektrinės sudaro šešėlių augalams ir jie negauna tiesioginių saulės spindulių, tad atliekama nemažai tyrimų, siekiant išsiaiškinti, kokią įtaką tai daro augalams bei jų augimo sąlygoms. Vienas iš tyrimų atliekamas su dviem identiškais šiltnamiais, ant vieno iš jų projektuojami PV moduliai. Eksperimento metu atliekami vidaus mikroklimato parametrų matavimai. Eksperimento rezultatai džiuginantys. Moduliai sumontuoti ant šiltnamio stogo sugeneravo 40.7 kWh elektros energijos. Taip pat daržovių kiekis tradiciniame šiltnamyje ir šiltnamyje, ant kurio buvo sumontuoti PV moduliai beveik nesiskyrė. Tačiau būtina atkreipti dėmesį, kad šis tyrimas buvo atliekamas Graikijoje, kuri priklauso subtropinei klimato juostai, todėl ten saulės spinduliavimo laikas yra ilgesnis nei Lietuvoje, kuri priklauso vidutinių platumų klimato juostai [20].

Mūsų klimato juostoje norint iš saulės energijos išgauti kuo daugiau energijos labai svarbus PV modulių įrengimas ant statinių stogų. Švedijoje atliktas tyrimas, kuriame analizuojamas PV modulių įrengimas ant pastato stogo. Kadangi Švedijos klimato sąlygos labai panašios kaip ir Lietuvos, gautus tyrimo rezultatus galima pritaikyti ir Lietuvoje įrengiamoms PV elektrinėms. Saulės spinduliai skirtingu kampu į paviršių krenta vasaros ir žiemos periodais, todėl prieš įrengiant saulės modulius būtina atsižvelgti į stogo nuolydį ir modulių įrengimą, kad moduliai vienas kitam nesudarytų šešėlio ir taip nesumažintų išgaunamos energijos kiekio. Saulės kritimo kampai vasaros ir žiemos sezonais ir šešėlio susidarymas pateikiami 6 paveikslėlyje [21].



6 pav. Abipusis šešėliavimas žiemos ir vasaros sezonų [21].

Tyrimo metu buvo atliekami modeliavimai ir analizuojama, kiek energijos bus sugeneruojama stogą orientuojant visomis pasaulio kryptimis. Simuliacijos rezultatai pateikiami 7 paveikslėlyje.

Roof type:	Usable area (km ²)	Tilt angle of PV modules (°)	Specific yield (kWh/kW _p)	Potential installed capacity (MW _p)	Potential yearly electricity generation (GWh)
East	1.06	30	820	191	149
South East	0.16	30	966	28	26
South	1.08	30	1023	195	190
South West	0.31	30	966	56	51
West	1.07	30	814	193	150
Total	3.68	N/A	N/A	664	565

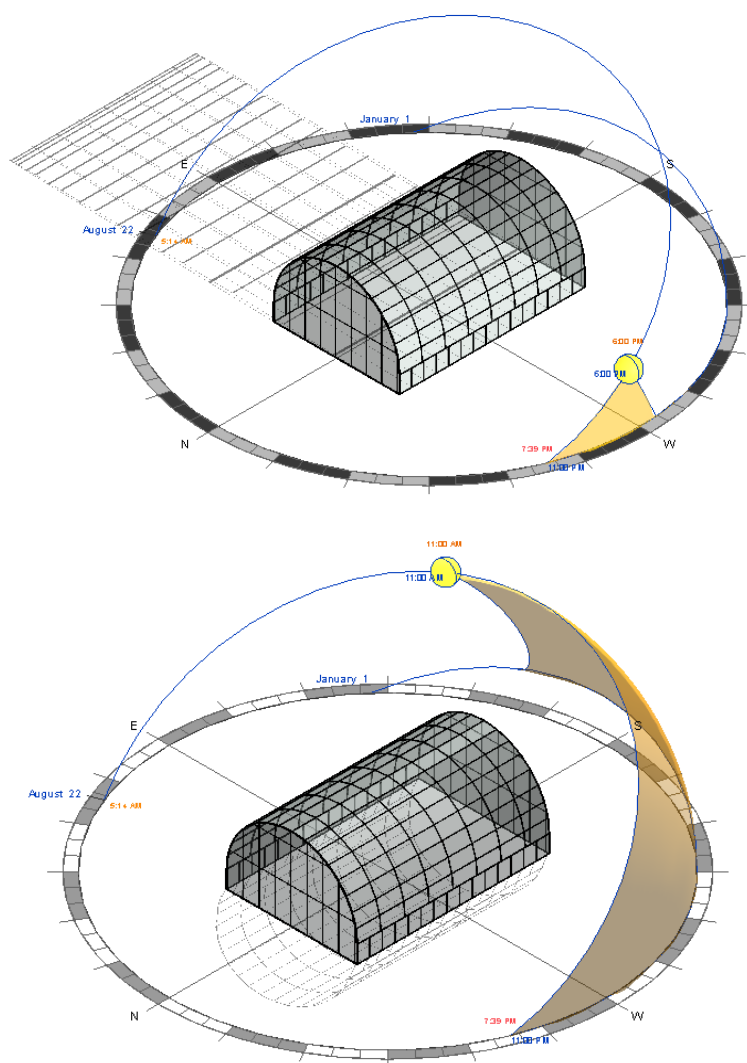
7 pav. Simuliacijos rezultatai [14].

Iš rezultatų galima padaryti išvadą, kad pagaminti daugiausia energijos naudojant saulės modulių galima, kai jie sumontuoti pietų kryptimi 30° laipsnių kampu. Į pietų kryptį orientuoti saulės moduliai yra didžiausio naudingo ploto, nes ant jų nekrenta šešėlis, todėl ir išgaunami energijos kiekiai yra didesni nei kitomis kryptimis.

1.7. Pastatų informacinio modeliavimo taikymas

Statinio informacinis modeliavimas (angl. Building Information modeling) – tai skaitmeninis objektų ar pastatų atvaizdavimas. Statybos srityje informacinis modeliavimas jau nėra naujiena ir vis dažniau taikomas keičiantis projektine informacija projektavimo ar net pastato statybos stadijoje [25]. Vis labiau įsitvirtinat statyboje, pastato informacinio modeliavimo vizualinio atvaizdavimo lygmuo (LOD) didėja, pastatai bei juose projektuojamos sistemos tampa detalesnės, atvaizduojamas ne tik sistemų principas tačiau ir armatūra, įranga bei kitas medžiagiškumas. Be vizualinio atvaizdavimo lygmens statinio informacinis modelis dar gali turėti ir informacinį lygmenį LOI [26, 29].

Projektuojant statinį ne tik aukšto LOD, bet ir LOI lygmens, pastato konstrukcijoms, įrenginiams, medžiagoms priskiriama informacija apie reikiamus elektros poreikius, matmenis, ar kitus parametrus, kurie yra būdingi vienam ar kitam modelio komponentui, taip modelis tampa itin detalus, ir prisideda prie lengvesnio pastato eksplotavimo, nes visą informaciją galima rasti viename modelyje. Be statinio vizualinio ir informacinio lygmens, statinio modelis dar gali turėti ir energetinius duomenis. Pasinaudojus programinės įrangos įskiepiais galima analizuoti, energetinius pastato parametrus. Tokie įskiepiai kaip Insight leidžia pasirinkti būdingus regionus, pagal juos nustatyti saulės švietimo laiką. Tokie tyrimai ir modeliavimai padeda lengviau priimti sprendimus dėl saulės elektrinių modeliavimo, nes galima nustatyti kada saulė bus intensyviausia, kaip orientuoti statinį, kad jis gautų daugiau saulės šviesos [30, 31].



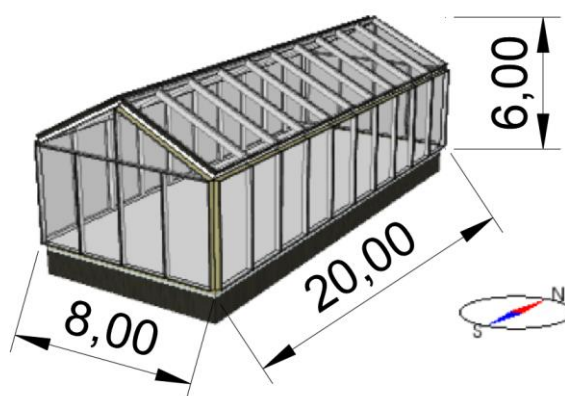
8 pav. Saulės švietimo azimutas.

2. Tiriemoji dalis

Šiame skyriuje aprašomi pasirinkti būdai ir metodai, kurie buvo naudojami, tikrinant hipotezę, kad šiltnamio konstrukcinių elementų savybės gali turėti įtakos energijos suvartojimams šiltnamio aplinkoje, bei būdai energijos sąnaudoms sumažinti taip mažinant CO₂ pėdsaką. Taip pat aprašomi tarpiniai tyrimai, kurie reikalingi skaičiavimo tikslumams nustatyti bei projektiniams galutinio modelio sprendiniams priimti.

2.1. Kraštinės projektuojamo šiltnamio modelio sąlygos

Urbanizacija – tai gyventojų susikaupimas miestuose arba miestuose gyvenančių žmonių lyginamosios dalies didėjimas. Urbanizacija suprantama ir kaip demografinis procesas, kurio metu didėja gyventojų skaičius dėl natūralaus gyventojų prieaugio arba migracijos, ir kaip infrastruktūros - miesto infrastruktūros ir žemės naudojimo plėtra bei ekonominis procesas, sukuriantis visuomenę, kurioje vertybės ir gyvenimo stilius yra miestietiški. [31] Kadangi urbanizacija įvairiose Lietuvos vietovėse skiriasi tyrimai atliekami visiems trims urbanizacijos lygiams: aukštas urbanizacijos lygis 70%, vidutinis 40 – 70%, žemas <40%. Modeliavimai atliekami šiltnamiui, kurio geometrija pateikiama 9 paveikslėlyje „Modeliuojamas šiltnamis“.



9 pav. Modeliuojamas šiltnamis

2.2. Norminės oro apykaitos koeficiento įtaka energijos sąnaudoms

Tiriant, analizuojant ir nustatant energijos suvartojimą pirmiausia reikia suprasti veiksnius, darančius įtaką galutiniam rezultatams. Dėl šios priežasties atliekami tarpiniai tyrimai kraštinėms modelio sąlygoms nustatyti. Projektuojami ir statomi A+ ir A++ energinio naudingumo klasei priskiriami pastatai yra itin sandarūs ir oro infiltracija iš lauko į pastatą per nesandarumus yra 0.6 norminės oro apykaitos esant 50 Pa slėgių skirtumui tarp pastato išorės ir vidaus. Tačiau šiltnamis tokiu sandarumu nepasižymi, o nustatyti, koks jo sandarumas yra sudėtinga. Pasinaudojant IDA ICE (Indor Climate and Energy) programine įranga modeliuojamas šiltnamio modelis, kuriam priskiriami norminės oro apykaitos koeficientai. Koeficientai parenkami C ir A+, A++ klasėms, atitinkamai 2.0 ir 1.0 norminės oro apykaitos esant 50 Pa slėgių skirtumui tarp pastato išorės ir vidaus. Modeliavimai atliekami numatant, kad šiltnamis pastatytas aukštą, vidutinį ir žemą urbanizacijos lygį turinčiose vietovėse. Modeliavimų rezultatai pateikiami 2 lentelėje „Energijos poreikis šildymui bei vėdinimui, keičiant norminės oro apykaitos koeficientą“.

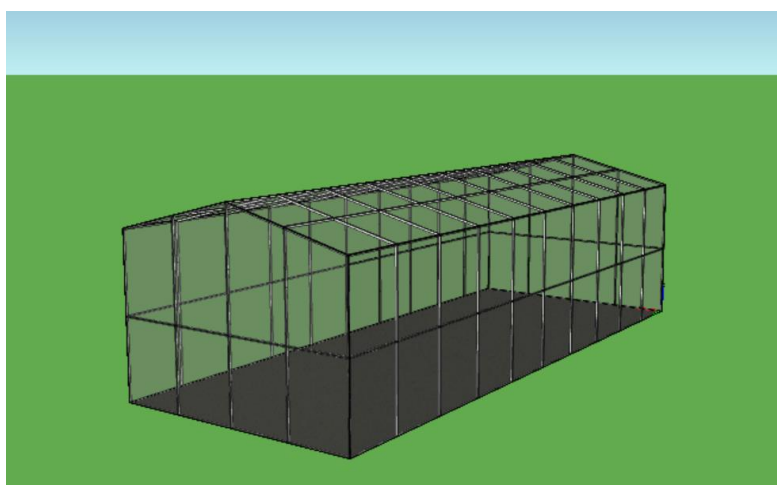
2 lentelė. Energijos poreikis šildymui bei vėdinimui, keičiant norminės oro apykaitos koeficientą.

	Norminės oro apykaitos $n_{50.N}$ (1/h) vertės esant 50 Pa slėgių skirtumui			
	C, B (2,0)		A+, A++ (1,0)	
	Šildymas	Vėsinimas	Šildymas	Vėsinimas
	kW	kW	kW	kW
Aukštas urbanizacijos lygis	142.00	44.73	142.00	44.74
Vidutinis urbanizacijos lygis	141.70	44.76	141.90	44.71
Žemas urbanizacijos lygis	141.60	44.73	141.70	44.70

Tyrimo tikslas: nustatyti, kokią įtaką rezultatams turi norminės oro apykaitos koeficientas, keičiant koeficiento vertę iš C į A+, A++ energinio efektyvumo klasės. Atlikus modeliavimus ir palyginus gautus rezultatus, nustatyta, kad keičiant norminės oro apykaitos koeficientą, energijos poreikis šiltnamio šildymui bei vėdinimui skiriasi iki 0.5%. Galime teigti, kad oro apykaitos koeficientas galutiniams rezultatams didelės įtakos neturi, tad atliekant tolimesnius skaičiavimus priimamas C, B klasėms priskiriamas oro apykaitos koeficientas. Rezultatų palyginimai pateikiami 3 lentelėje „Šildymo ir vėdinimo rezultatų palyginimas, keičiant norminės oro apykaitos koeficientą“.

3 lentelėje. Šildymo ir vėdinimo rezultatų palyginimas, keičiant norminės oro apykaitos koeficientą.

	Norminės oro apykaitos $n_{50.N}$ (1/h) vertės esant 50 Pa slėgių skirtumui					
	C, B (2,0)	A+, A++ (1,0)	Skirtumas	C, B (2,0)	A+, A++ (1,0)	Skirtumas
	Šildymas			Vėsinimas		
	kW	kW	%	kW	kW	%
Aukštas urbanizacijos lygis	142.00	142.00	0.00	44.73	44.74	0.02
Vidutinis urbanizacijos lygis	141.70	141.90	0.14	44.76	44.71	0.11
Žemas urbanizacijos lygis	141.60	141.70	0.07	44.73	44.70	0.07



10 pav. Šiltnamio 3D vizualizacija IDA ICE programoje.

2.3. Šiltnamio dangos šilumos perdavimo koeficiento įtaka energijos sąnaudoms

Šiltnamio danga yra viena pagrindinių šiltnamio konstrukcinių elementų. Pramoniniuose šiltnamiuose Lietuvoje vis dar dažniau danga pasirenkamas stiklas nei polikarbonatas ar kitos medžiagos. Tam įtakos turi stiklo ilgaamžiškumo ir kainos faktorius bei energetinės savybės. Stiklą kaip medžiagą apibūdina ne tik šilumos perdavimo koeficientas. Saulės šviesos laidumo koeficientas, saulės šviesos atspindėjimo koeficientas, taip pat reikšmingi veiksniai lemiantys energijos suvartojimus. Modeliavimams pasirenkami „Pilkington“ gamintojo stiklo gaminiai. Šio gamintojo produktai sertifikuoti tarptautiniais standartais ir turi kokybės atitikties deklaracijas. Stiklo techniniai duomenys pateikiami 4 lentelėje „Stiklo gamintojo „Pilkington“ stiklo techniniai parametrai“.

4 lentelė. Stiklo gamintojo „Pilkington“ stiklo techniniai parametrai [31].

Stiklo storis, mm	Šilumos perdavimo koeficientas, W/m ² K	Saulės šviesos laidumo koeficientas T _{vis}	Saulės šviesos atspindėjimo koeficientas, T	G
2 mm	5.8	91	88	89
5 mm	5.7	89	81	84
8 mm	5.6	87	76	80
12 mm	5.5	85	68	74
15 mm	5.4	83	63	70
19 mm	5.3	81	57	66

Lietuvos urbanizacinis lygis yra labai skirtingas, miestuose ar miesteliuose dažnai jis vidutinio arba aukšto lygio, kaimuose žemas, todėl labai svarbu įvertinti kokią įtaką energijos suvartojimams turi ne tik šiltnamio danga, bet ir vietovės užstatymo lygis, kuriame bus pastatytas statinys. IDA ICE (IDA Indoor Climate and Energy) programinė įranga leidžia parinkti kraštines sąlygas ir šiltnamiui priskirti, ne tik dangos savybę, bet ir vietovės urbanizacijos lygį. Modeliavimų rezultatai pateikiami 5, 6, 7 lentelėse.

5 lentelė. Žemas urbanizacijos lygis

Sistema	Matavimo vnt.	Stiklo matmenys					
		2mm	5mm	8mm	12mm	15mm	19mm
Šildymas	kW	146.80	145.80	144.60	143.80	142.80	142.00
	kWh	693855	688529	687864	685396	685580	683105
Vėsinimas	kW	40.58	41.42	42.16	43.06	43.79	44.73
	kWh	286503	292686	299260	306398	313116	320123

6 lentelė. Vidutinis urbanizacijos lygis

Sistema	Matavimo vnt.	Stiklo matmenys					
		2mm	5mm	8mm	12mm	15mm	19mm
Šildymas	kW	146.50	145.40	144.40	143.70	142.70	141.70
	kWh	694338	689048	688547	686072	686260	683105
Vėsinimas	kW	40.73	41.53	42.26	43.15	43.87	44.76
	kWh	288516	294659	301342	308409	313582	322030

7 lentelė. Aukštas urbanizacijos lygis

Sistema	Matavimo vnt.	Stiklo matmenys					
		2mm	5mm	8mm	12mm	15mm	18mm
Šildymas	kW	146.40	145.30	144.30	143.60	142.50	141.60
	kWh	694149	688929	688571	686072	686336	683972
Vėsinimas	kW	40.78	41.55	42.29	43.16	43.86	44.73
	kWh	290004	296125	302861	308409	316511	323415

Iš gautų rezultatų atlikus modeliavimus galime padaryti išvadą, kad vietovėse, kur urbanizacijos lygis yra didesnis energijos sąnaudos šildymui mažesnės, o vėsinimo sąnaudos didesnės. Taip yra todėl, nes urbanizacija turi įtakos norminei oro apykaitai šiltnamyje, o tai turi įtakos reikalingos energijos kiekiams šildymui bei vėsinimui.

2.4. Artumo idealiam taškui metodas

Pasinaudojant artumo idealiam taškui metodu galima nustatyti, kuri šiltnamio dangos medžiaga yra optimaliausia kainos, kokybės ir energetiniu požiūriu. Nagrinėjamos šešios dangos trims urbanizacijos lygiams. Norima nustatyti, kuri iš dangų yra geriausia, vertinant dangos energijos poreikį šildymui, vėsinimui bei kainą.

Norint įvertinti šias šešias šiltnamio dangas, sprendžiamas kompleksiškas kriterijų vertinimas. Nustatoma, kuri sistema yra pigesnė, bet tuo pačiu vertinamos ir energijos sąnaudos.

Kadangi šiltnamio dangų palyginimui yra labai daug kriterijų ir jų reikšmės skiriasi, naudojami daugiakriterinis vertinimas, norint išsiaiškinti, kuri danga yra tinkamiausia projektuojamam šiltnamiui.

Naudojamas kriterinių lygčių metodas, kurio dėka sprendimas gali būti nustatytas šiais būdais:

1. Įvertinant teorinį kriterijų reikšmingumą;
2. Įvertinant subjektyvų kriterijų reikšmingumą;
3. Įvertinant kompleksinį kriterijų reikšmingumą;
4. Skaitant, kad visi kriterijų reikšmingumai yra svarbūs.

Lyginamos šešios šiltnamio dangos:

a_1 – stiklo danga 2 mm;

a_2 – stiklo danga 5 mm;

a_3 – stiklo danga 8 mm;

a_4 – stiklo danga 12 mm;

a_5 – stiklo danga 15 mm;

a_6 – stiklo danga 19 mm.

Kriterijai, pagal kuriuos bus lyginamos alternatyvos:

k_1 – stiklo dangos kaina €/m²;

k_2 – sunaudojamos energijos kiekis šildymui, kWh/metai;

k_3 – sunaudojamos energijos kiekis vėsinimui, kWh/metai.

2.4.1. Kriterinių lygčių sudarymas, taikant artumo idealiam taškui metodą. Žemo lygio urbanizuota vietovė

Pradinė matrica A , sudaryta žemo lygio urbanizuotos vietovės geriausiam dangos variantui parinkti, pateikiama 8 lentelėje „Kriterinės lygtys. Žemo urbanizacijos lygio vietovė“.

8 lentelė. Kriterinės lygtys. Žemo urbanizacijos lygio vietovė.

Kriterijai \ Alternatyvos	k1	k2	k3
a1	26	693855	286503
a2	36	688529	292686
a3	52	687864	299260
a4	94	685396	306398
a5	124	685580	313116
a6	194	683105	320123
Optimalumo rodiklis	min	min	min
Geriausia reikšmė	26	683105	286503

Norint optimaliai įvertinti pateiktus duomenis, reikia normalizuoti matricą A į matricą \bar{A} , taikant vektorių normalizavimo metodą. Skaičiavimai atliekamas pagal formulę:

$$\bar{A}_{ij} = \frac{A_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=A}^m A_{ij}^2}}; \quad (1)$$

čia:

\bar{A}_{ij} = i – osios alternatyvos, j – ojo efektyvumo rodiklio reikšmė.

Normalizuota matrica pateikiama 9 lentelėje „Normalizuota matrica. Žemo urbanizacijos lygio vietovė“.

9 lentelė. Normalizuota matrica. Žemo urbanizacijos lygio vietovė

Kriterijai \ Alternatyvos	k1	k2	k3
a1	0.101	0.412	0.386
a2	0.140	0.409	0.394
a3	0.202	0.409	0.403
a4	0.364	0.407	0.413
a5	0.481	0.407	0.422
a6	0.752	0.406	0.431

Kai žinomas kriterijų reikšmingumo vektorius galima suskaičiuoti svertinę normalizuotą matricą \bar{A}^* žemo lygio urbanizuotai vietovei. Skaičiavimai atliekami pagal formulę:

$$\bar{A}_{ij}^* = \bar{A}_{ij} * \bar{q}_i; \quad (2)$$

čia:

\bar{A}_{ij} – i – osios alternatyvos, j – ojo efektyvumo rodiklio reikšmė;

q_i – kriterijų reikšmingumo vektorius.

10 lentelė. Svertinė normalizuota matrica. Žemo urbanizacijos lygio vietovė.

Kriterijai \ Alternatyvos	k1	k2	k3
a1	0.034	0.168	0.158
a2	0.048	0.167	0.161
a3	0.069	0.167	0.164
a4	0.124	0.166	0.169
a5	0.164	0.166	0.172
a6	0.256	0.166	0.176

Pagal gautą svertinę normalizuotą matricą nustatomi du variantai: idealus teigiamas a^+ ir idealus neigiamas a^- . Rezultatai pateikiami 11 lentelėje „Idealieji variantai. Žemo urbanizacijos lygio vietovė“.

11 lentelėje. Idealiai geriausios ir idealiai blogiausios alternatyvos. Žemo urbanizacijos lygio vietovė.

	K ₁	k ₂	k ₃
Geriausia reikšmė	min	min	min
Idealus teigiamas a+	0.034	0.166	0.158
Idealus neigiamas a-	0.256	0.168	0.176

Atstumas tarp realaus a_i ir idealaus teigiamo a_i^+ (L_i^+), bei tarp realaus a_i ir idealaus neigiamo a_i^- (L_i^-) apskaičiuojamas pagal formulę:

$$L_i^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - A_j^+)^2}; \quad (3)$$

$$L_i^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - A_j^-)^2}; \quad (4)$$

čia:

L_i^+ - rodiklis, parodantis koks yra atstumas tarp alternatyvos ir idealiai geriausios alternatyvos;

L_i^- - rodiklis, parodantis koks yra atstumas tarp alternatyvos ir idealiai blogiausios alternatyvos;

12 lentelė. Nutolimas alternatyvų nuo idealiai geriausios ir idealiai blogiausios alternatyvos.

	Nutolimas nuo idealiai geriausios alternatyvos	Nutolimas nuo idealiai blogiausios alternatyvos
a1	0.002	0.223
a2	0.208	0.209
a3	0.069	0.187
a4	0.124	0.132
a5	0.164	0.092
a6	0.255	0.020

Nustatomas, sąlyginis artumas lyginamųjų alternatyvų idealiai alternatyvai. Sąlyginis artumas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\bar{K}_i = \frac{L_i^-}{L_i^- + L_i^+}; \quad (5)$$

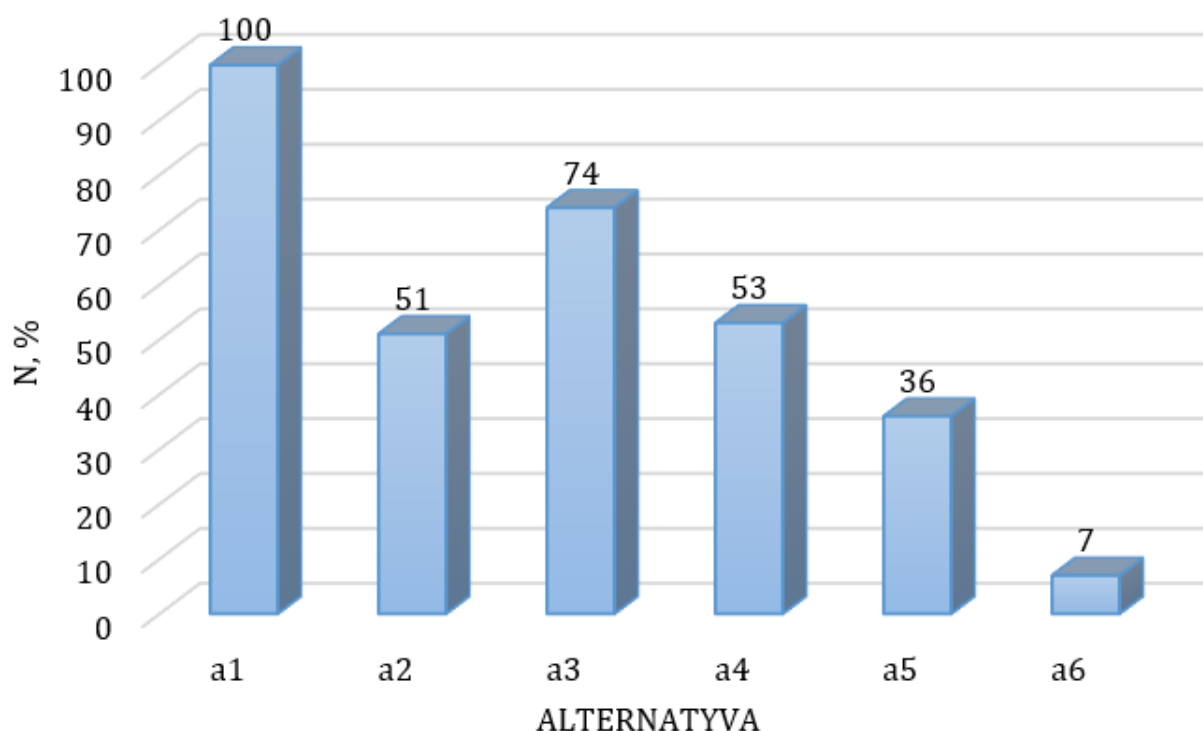
13 lentelė. Sąlyginis artumas lyginamųjų alternatyvų idealiai alternatyvai. Žemo urbanizacijos lygio vietovė.

Alternatyva	Sąlyginis artumas lyginamųjų alternatyvų idealiai alternatyvai
a1	0.99
a2	0.50
a3	0.73
a4	0.52
a5	0.36
a6	0.07

Nustatomas lyginamų 27ariant naudingumo laipsnis N, %.

14 lentelė. Lyginamų 27ariant naudingumo laipsnis N. Žemo urbanizacijos lygio vietovė.

Alternatyva	Lyginamų 27ariant naudingumo laipsnis N, %
a1	100
a2	51
a3	74
a4	53
a5	36
a6	7



11 pav. Lyginamųjų alternatyvų naudingumo laipsnio grafikas.

Išvada: pritaikius artumo idealiam taškui metodą, nustatyta, kad žemo lygio urbanizuotoje vietovėje pagal kainos, energijos suvartojimo šildymui ir vėsinimui kriterijus, geriausia rinktisi 2mm storio stiklo dangą.

2.4.2. Kriterinių lygčių sudarymas, taikant artumo idealiam taškui metodą. Vidutinio lygio urbanizuota vietovė.

Pradinė matrica A, sudaryta vidutinio lygio urbanizuotos vietovės geriausiam dangos variantui parinkti, pateikiama 15 lentelėje „Kriterinės lygtys. Vidutinio urbanizacijos lygio vietovė“.

15 lentelė. Kriterinės lygtys. Vidutinio urbanizacijos lygio vietovė.

Kriterijai \ Alternatyvos	k1	k2	k3
a1	26	694338	288516
a2	36	689048	294659
a3	52	688547	301342
a4	94	686072	308409
a5	124	686260	313582
a6	194	683105	322030
Optimalumo rodiklis	min	min	min
Geriausia reikšmė	26	683105	288516

Norint optimaliai įvertinti pateiktus duomenis, reikia normalizuoti matricą A į matricą \bar{A} , taikant vektorių normalizavimo metodą. Skaičiavimai atliekamas pagal formulę:

$$\bar{A}_{ij} = \frac{A_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=A}^m A_{ij}^2}}; \quad (6)$$

čia:

\bar{A}_{ij} = i – osios alternatyvos, j – ojo efektyvumo rodiklio reikšmė.

Normalizuota matrica pateikiama 16 lentelėje „Normalizuota matrica. Vidutinio urbanizacijos lygio vietovė“.

16 lentelė. Normalizuota matrica. Vidutinio urbanizacijos lygio vietovė.

Kriterijai \ Alternatyvos	k1	k2	k3
a1	0.101	0.412	0.386
a2	0.140	0.409	0.394
a3	0.202	0.409	0.403
a4	0.364	0.407	0.413
a5	0.481	0.407	0.420
a6	0.752	0.405	0.431

Kai žinomas kriterijų reikšmingumo vektorius galima suskaičiuoti svertinę normalizuotą matricą \bar{A}^* žemo lygio urbanizuotai vietovei. Skaičiavimai atliekami pagal formulę:

$$\bar{A}_{ij}^* = \bar{A}_{ij} * \bar{q}_i; \quad (7)$$

čia:

\bar{A}_{ij} = i – osios alternatyvos, j – ojo efektyvumo rodiklio reikšmė;

\bar{q}_i – kriterijų reikšmingumo vektorius.

17 lentelė. Svertinė normalizuota matrica. Vidutinio urbanizacijos lygio vietovė.

Kriterijai \ Alternatyvos	k1	k2	k3
a1	0.034	0.168	0.157
a2	0.048	0.167	0.161
a3	0.069	0.167	0.164
a4	0.124	0.166	0.168
a5	0.163	0.166	0.171
a6	0.256	0.165	0.176

Pagal gautą svertinę normalizuotą matricą nustatomi du variantai: idealus teigiamas a^+ ir idealus neigiamas a^- . Rezultatai pateikiami 18 lentelėje „Idealieji variantai. Vidutinio urbanizacijos lygio vietovė“.

18 lentelė. Idealiai geriausios ir idealiai blogiausios alternatyvos. Vidutinio urbanizacijos lygio vietovė.

	K ₁	k ₂	k ₃
Geriausia reikšmė	min	min	min
Idealus teigiamas a+	0.034	0.165	0.157
Idealus neigiamas a-	0.256	0.168	0.176

Atstumas tarp realaus a_i ir idealaus teigiamo a_i^+ (L_i^+), bei tarp realaus a_i ir idealaus neigiamo a_i^- (L_i^-) apskaičiuojamas pagal formulę:

$$L_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - A_j^+)^2}; \quad (8)$$

$$L_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - A_j^-)^2}; \quad (9)$$

čia:

L_i^+ - rodiklis, parodantis koks yra atstumas tarp alternatyvos ir idealiai geriausios alternatyvos;

L_i^- - rodiklis, parodantis koks yra atstumas tarp alternatyvos ir idealiai blogiausios alternatyvos.

19 lentelė. Nutolimas alternatyvų nuo idealiai geriausios ir idealiai blogiausios alternatyvos.

	Nutolimas nuo idealiai geriausios alternatyvos	Nutolimas nuo idealiai blogiausios alternatyvos
a1	0.003	0.222
a2	0.014	0.209
a3	0.035	0.187
a4	0.090	0.132
a5	0.130	0.092
a6	0.222	0.003

Nustatomas, sąlyginis artumas lyginamųjų alternatyvų idealiai alternatyvai. Sąlyginis artumas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\overline{K}_i = \frac{L_i^-}{L_i^- + L_i^+}; \quad (10)$$

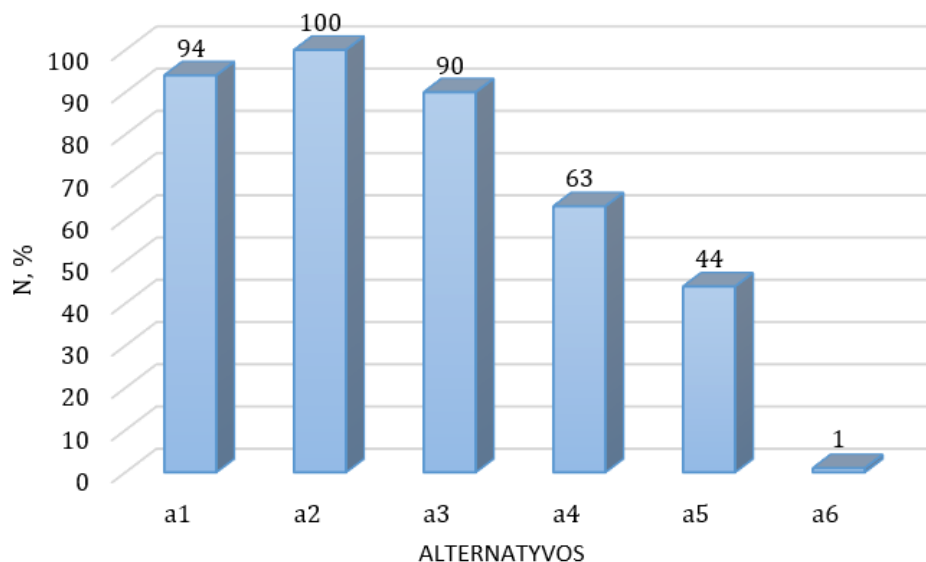
20 lentelė. Sąlyginis artumas lyginamųjų alternatyvų idealiai alternatyvai. Vidutinio urbanizacijos lygio vietovė.

Alternatyva	Sąlyginis artumas lyginamųjų alternatyvų idealiai alternatyvai
a1	0.88
a2	0.94
a3	0.84
a4	0.59
a5	0.41
a6	0.01

Nustatomas lyginamų 30ariant naudingumo laipsnis N, %.

21 lentelė. Lyginamų 30ariant naudingumo laipsnis N. Vidutinio urbanizacijos lygio vietovė.

Alternatyva	Lyginamų 30ariant naudingumo laipsnis N, %
a1	94
a2	100
a3	90
a4	63
a5	44
a6	1



10 pav. Lyginamųjų alternatyvų naudingumo laipsnio grafikas.

Lyginamųjų variantų naudingumo laipsnis pateikiamas 10 paveikslėlyje „Lyginamųjų alternatyvų naudingumo laipsnio grafikas“.

Išvada: pritaikius artumo idealiam taškui metodą, nustatyta, kad vidutinio lygio urbanizuotoje vietovėje pagal kainos, energijos suvartojimo šildymui ir vėsinimui kriterijus, geriausia rinktis 5 mm storio stiklo dangą.

2.4.3. Kriterinių lygčių sudarymas, taikant artumo idealiam taškui metodą. Aukšto lygio urbanizuota vietovė.

Pradinė matrica A, sudaryta vidutinio lygio urbanizuotos vietovės geriausiam dangos variantui parinkti, pateikiama 22 lentelėje „Kriterinės lygtys. Aukšto urbanizacijos lygio vietovė“.

22 lentelė. Kriterinės lygtys. Aukšto urbanizacijos lygio vietovė.

Kriterijai \ Alternatyvos	k1	k2	k3
a1	26	669224	269415
a2	36	664439	276235
a3	52	665000	283722
a4	94	663407	291414
a5	124	664022	298264
a6	194	661181	304756
Optimalumo rodiklis	min	min	min
Geriausia reikšmė	26	661181	269415

Norint optimaliai įvertinti pateiktus duomenis, reikia normalizuoti matricą A į matricą \bar{A} , taikant vektorių normalizavimo metodą. Skaičiavimai atliekamas pagal formulę:

$$\bar{A}_{ij} = \frac{A_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=A}^m A_{ij}^2}}; \quad (11)$$

čia:

\bar{A}_{ij} = i – osios alternatyvos, j – ojo efektyvumo rodiklio reikšmė.

Normalizuota matrica pateikiama 23 lentelėje „Normalizuota matrica. Aukšto urbanizacijos lygio vietovė“.

23 lentelė. Normalizuota matrica. Aukšto urbanizacijos lygio vietovė.

Kriterijai \ Alternatyvos	k1	k2	k3
a1	0.101	0.411	0.382
a2	0.140	0.408	0.392
a3	0.202	0.409	0.403
a4	0.364	0.408	0.414
a5	0.481	0.408	0.423
a6	0.752	0.406	0.433

Kai žinomas kriterijų reikšmingumo vektorius galima suskaičiuoti svertinę normalizuotą matricą \bar{A}^* žemo lygio urbanizuotai vietovei. Skaičiavimai atliekami pagal formulę:

$$\bar{A}_{ij}^* = \bar{A}_{ij} * \bar{q}_i; \quad (12)$$

čia:

\bar{A}_{ij} = i – osios alternatyvos, j – ojo efektyvumo rodiklio reikšmė;

\bar{q}_i – kriterijų reikšmingumo vektorius.

24 lentelė. Svertinė normalizuota matrica. Aukšto urbanizacijos lygio vietovė.

Kriterijai \ Alternatyvos	k1	k2	k3
a1	0.034	0.168	0.156
a2	0.048	0.167	0.160
a3	0.069	0.167	0.164
a4	0.124	0.167	0.169
a5	0.164	0.167	0.173
a6	0.256	0.166	0.177

Pagal gautą svertinę normalizuotą matricą nustatomi du variantai: idealus teigiamas a^+ ir idealus neigiamas a^- . Rezultatai pateikiami 25 lentelėje „Idealieji variantai. Vidutinio urbanizacijos lygio vietovė“

25 lentelė. Idealiai geriausios ir idealiai blogiausios alternatyvos. Vidutinio urbanizacijos lygio vietovė.

	k_1	k_2	k_3
Geriausia reikšmė	min	min	min
Idealus teigiamas a^+	0.034	0.166	0.156
Idealus neigiamas a^-	0.256	0.168	0.177

Atstumas tarp realaus a_i ir idealaus teigiamo a_i^+ (L_i^+), bei tarp realaus a_i ir idealaus neigiamo a_i^- (L_i^-) apskaičiuojamas pagal formulę:

$$L_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - A_j^+)^2}; \quad (13)$$

$$L_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - A_j^-)^2}; \quad (14)$$

čia:

L_i^+ - rodiklis, parodantis koks yra atstumas tarp alternatyvos ir idealiai geriausios alternatyvos;

L_i^- - rodiklis, parodantis koks yra atstumas tarp alternatyvos ir idealiai blogiausios alternatyvos.

26 lentelė. Nutolimas alternatyvų nuo idealiai geriausios ir idealiai blogiausios alternatyvos.

	Nutolimas nuo idealiai geriausios alternatyvos	Nutolimas nuo idealiai blogiausios alternatyvos
a1	0.002	0.222
a2	0.014	0.209
a3	0.035	0.187
a4	0.090	0.132
a5	0.130	0.092
a6	0.222	0.002

Nustatomas, sąlyginis artumas lyginamųjų alternatyvų idealiai alternatyvai. Sąlyginis artumas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\bar{K}_i = \frac{L_i^-}{L_i^- + L_i^+}; \quad (15)$$

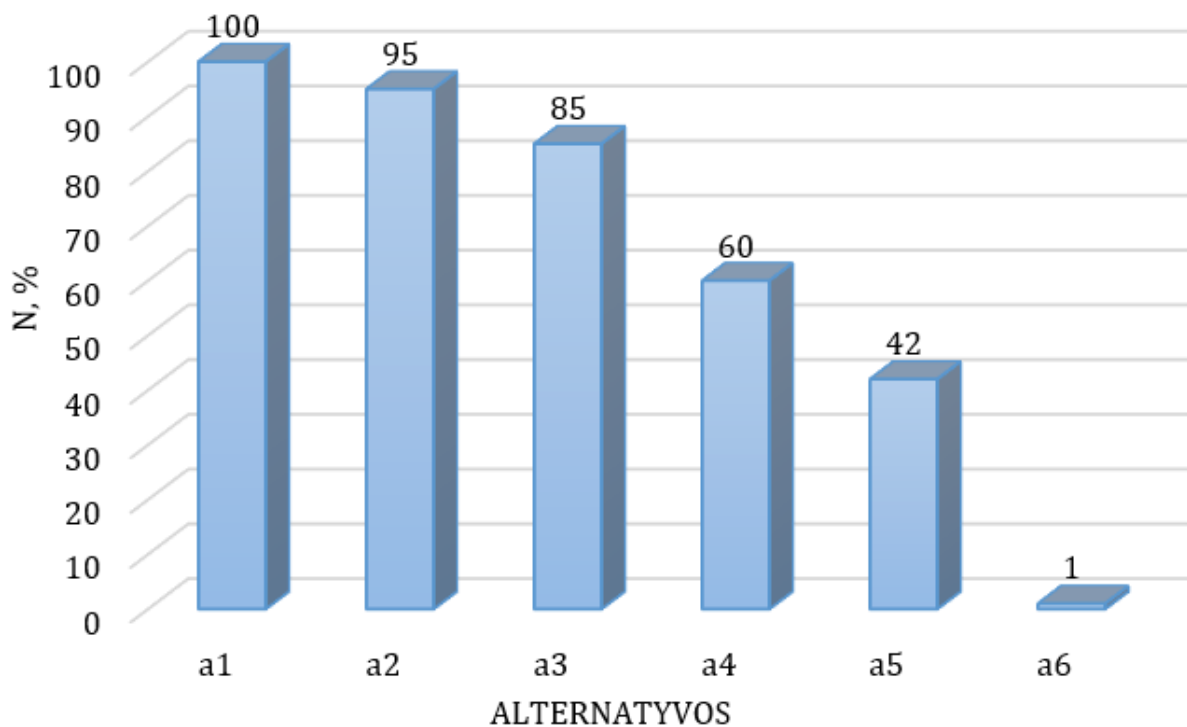
27 lentelė. Sąlyginis artumas lyginamųjų alternatyvų idealiai alternatyvai. Vidutinio urbanizacijos lygio vietovė.

Alternatyva	Sąlyginis artumas lyginamųjų alternatyvų idealiai alternatyvai
a1	0.99
a2	0.94
a3	0.84
a4	0.59
a5	0.41
a6	0.01

Nustatomas lyginamųjų variantų naudingumo laipsnis N, %.

28 lentelė. Lyginamųjų variantų naudingumo laipsnis N. Aukšto urbanizacijos lygio vietovė.

Alternatyva	Lyginamųjų variantų naudingumo laipsnis N, %
a1	100
a2	95
a3	85
a4	60
a5	42
a6	1



13 pav. Lyginamųjų alternatyvų naudingumo laipsnio grafikas

Lyginamųjų variantų naudingumo laipsnis pateikiamas 13 paveikslėlyje „Lyginamųjų alternatyvų naudingumo laipsnio grafikas“.

Išvada: pritaikius artumo idealiam taškui metodą, nustatyta, kad vidutinio lygio urbanizuotoje vietovėje pagal kainos, energijos suvartojimo šildymui ir vėsinimui kriterijus, geriausia rinktis 2 mm storio stiklo dangą.

2.5. CO₂ pėdsakas

Pagrindinis šio darbo tikslas, nustatyti energetinį šiltnamio naudingumą. Pritaikius artumo idealiajam taškui metodą nustatytos dangos trims Lietuvos užstatymo lygiams, įvertinus optimaliausią variantą kainos ir energetiniu požiūriu. Atlikus šią analizę, galima nustatyti, kokį CO₂ pėdsaką palieka sumodeliuoti šiltnamių variantai, energijos gamybai šildymui ir vėsinimui renkantis iš įvairių energijos šaltinių. STR 2.01.02:2016 „Pastatų energinio naudingumo projektavimas ir sertifikavimas“ 2.8 lentelėje pateikiamos reikšmės, energijos gamybai naudojamų energijos šaltinių CO₂ emisijų faktoriaus MCO₂ (kgCO₂/kWh) vertės. Pagal šias vertes paskaičiuojamas metinis CO₂ kiekis šildymui bei vėsinimui, kuris pateikiamas 29 lentelėje. CO₂ pėdsakas energijos gamybai naudojamų energijos šaltinių.

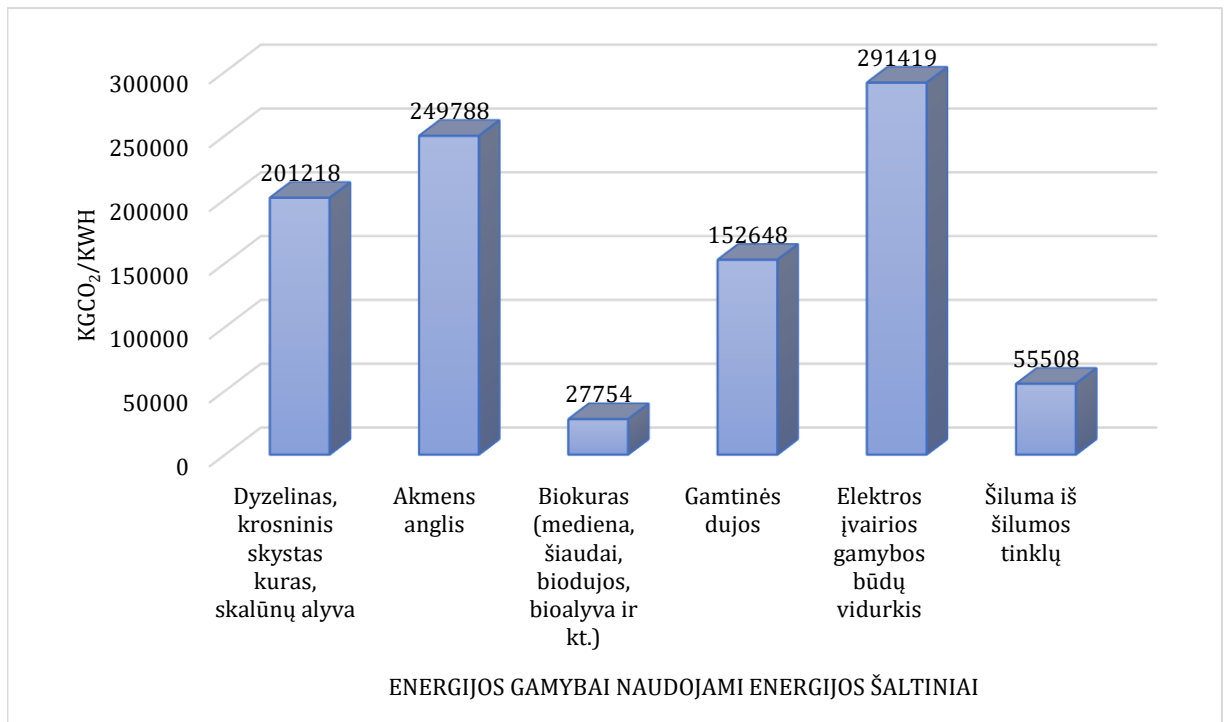
29 lentelė. Energijos kiekiai šildymui bei vėsinimui, kWh.

	Žemas urbanizacijos lygis	Vidutinis urbanizacijos lygis	Aukštas urbanizacijos lygis
Energijos kiekis šildymui, kWh	693855	689048	694149
Energijos kiekis vėsinimui, kWh	286503	294659	290004

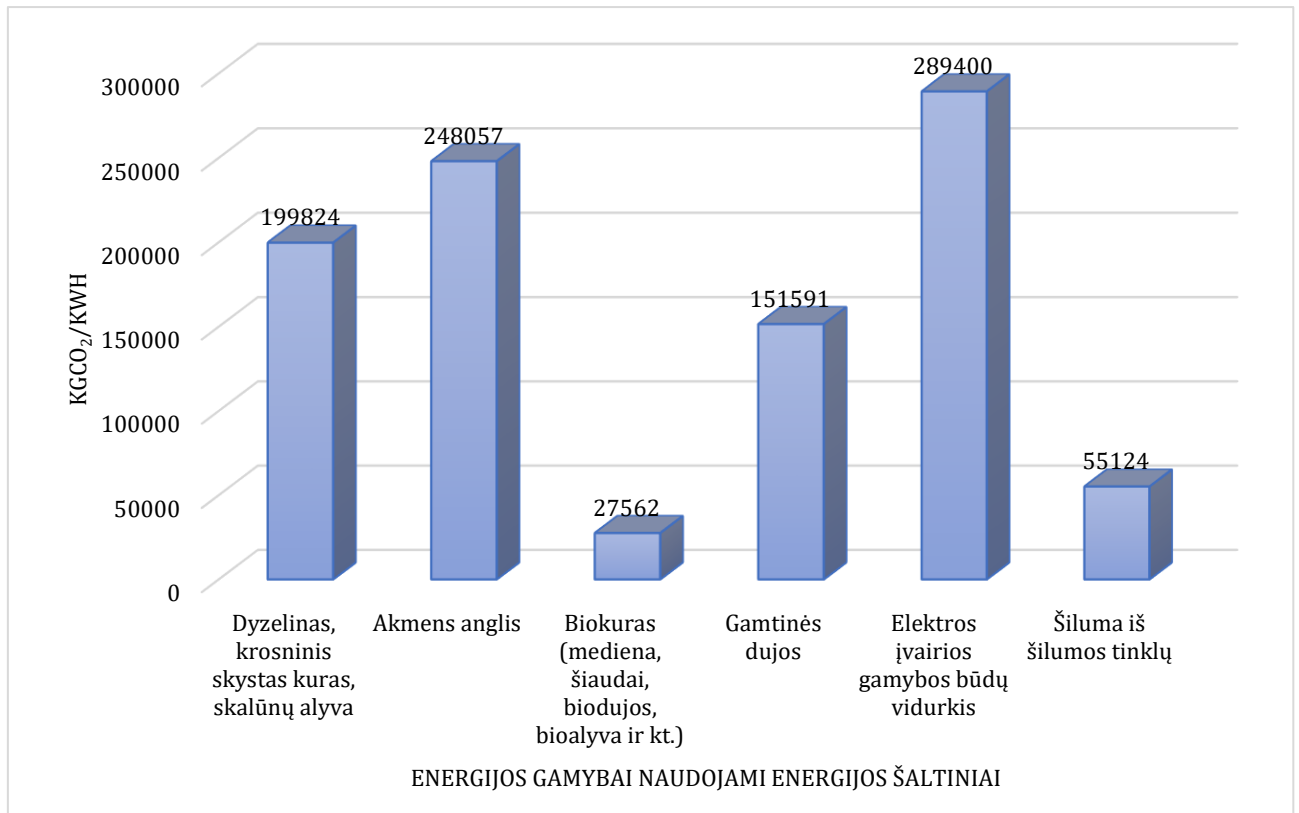
30 lentelė. CO₂ pėdsakas energijos gamybai naudojamų energijos šaltinių. Šildymas.

	Norminė reikšmė MCO ₂ , kgCO ₂ /kWh	Žemas urbanizacijos lygis	Vidutinis urbanizacijos lygis	Aukštas urbanizacijos lygis
Dyzelinas, krosninis skystas kuras, skalūnų alyva	0.29	201218	199824	201303
Akmens anglis	0.36	249788	248057	249894
Biokuras (mediena, šiaudai, biodujos, bioalyva ir kt.)	0.04	27754	27562	27766
Gamtinės dujos	0.22	152648	151591	152713
Elektros įvairios gamybos būdų vidurkis	0.42	291419	289400	291543
Šiluma iš šilumos tinklų	0.08	55508	55124	55532

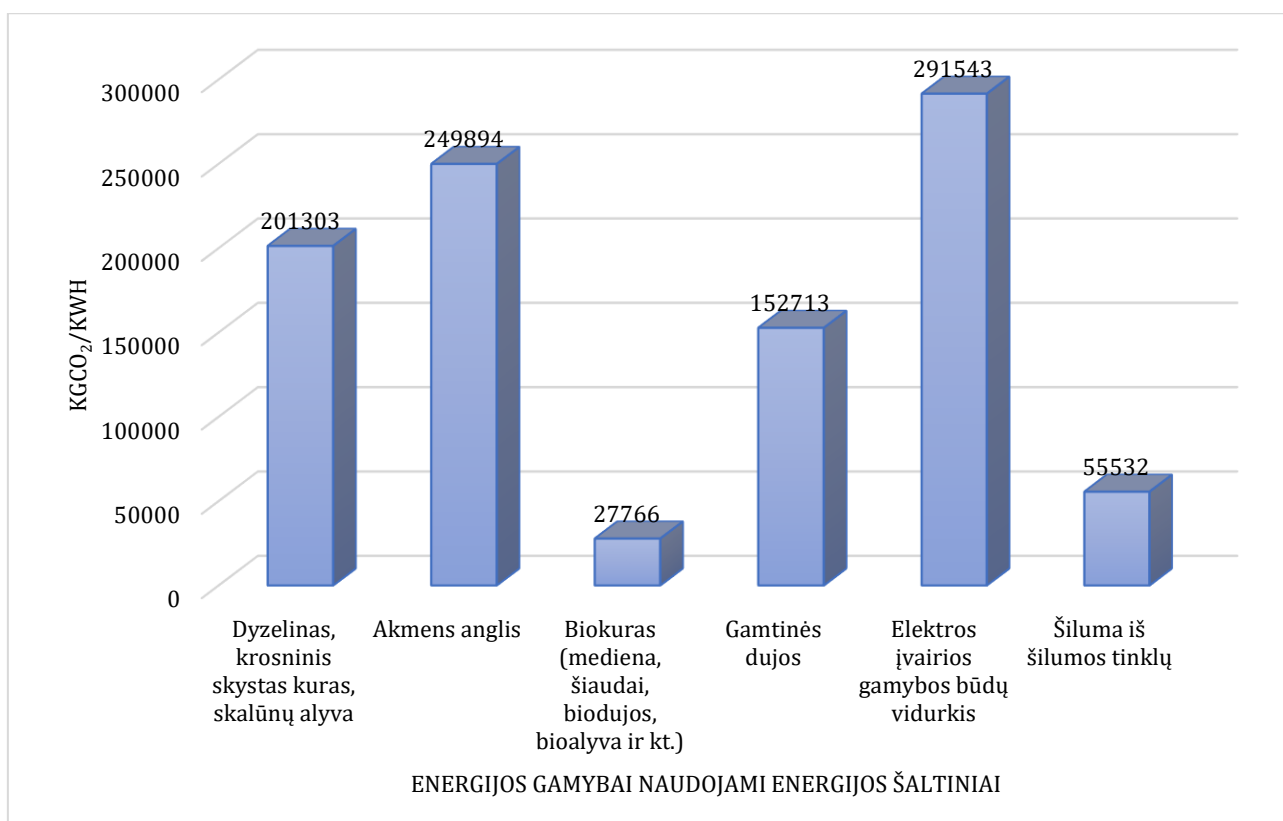
Palyginamieji energijos gamybai naudojamų energijos šaltinių rezultatai pateikiami 12, 13, 14 paveikslėliuose.



14 pav. Energijos gamybai naudojamų energijos šaltinių paliekamas CO₂ pėdsakas. Žemas urbanizacijos lygis.



15 pav. Energijos gamybai naudojamų energijos šaltinių paliekamas CO₂ pėdsakas. Vidutinis urbanizacijos lygis.

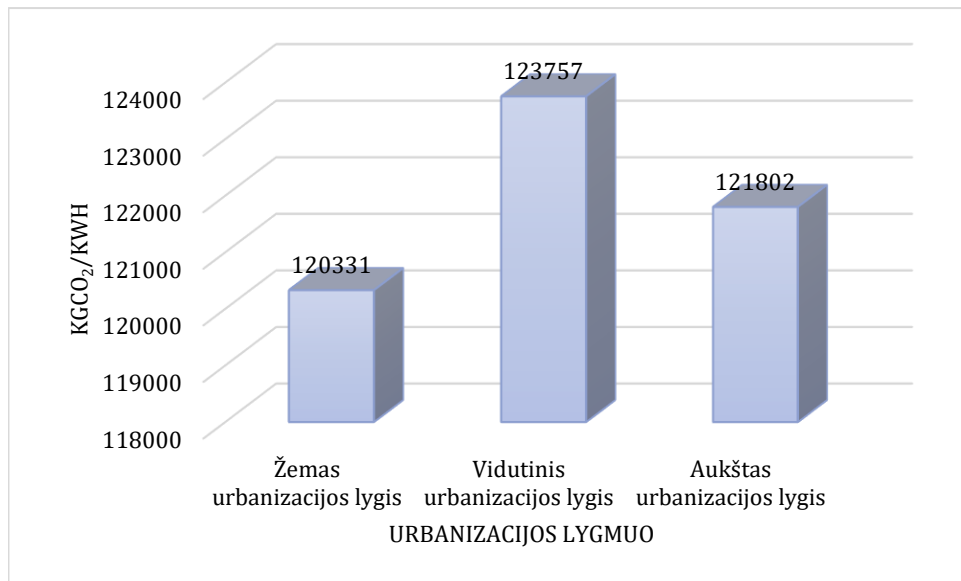


16 pav. Energijos gamybai naudojamų energijos šaltinių paliekamas CO₂ pėdsakas. Aukštas urbanizacijos lygis.

Iš grafikų galime matyti, kad mažiausias CO₂ pėdsakas paliekamas tada, kai šilumos šaltiniu renkama biokurą: medieną, šiaudus, biodujas ar bioalyvą bei naudojant energiją iš šilumos tinklų.

31 lentelė. CO₂ pėdsakas energijos gamybai naudojamų energijos šaltinių. Vėsinimas.

	Norminė reikšmė MCO ₂ , kgCO ₂ /kWh	Žemas urbanizacijos lygis	Vidutinis urbanizacijos lygis	Aukštas urbanizacijos lygis
Elektros įvairios gamybos būdų vidurkis	0.42	120331	123757	121802



17 pav. Energijos gamybai naudojamų energijos šaltinių paliekamas CO₂ pėdsakas. Vėdinimas

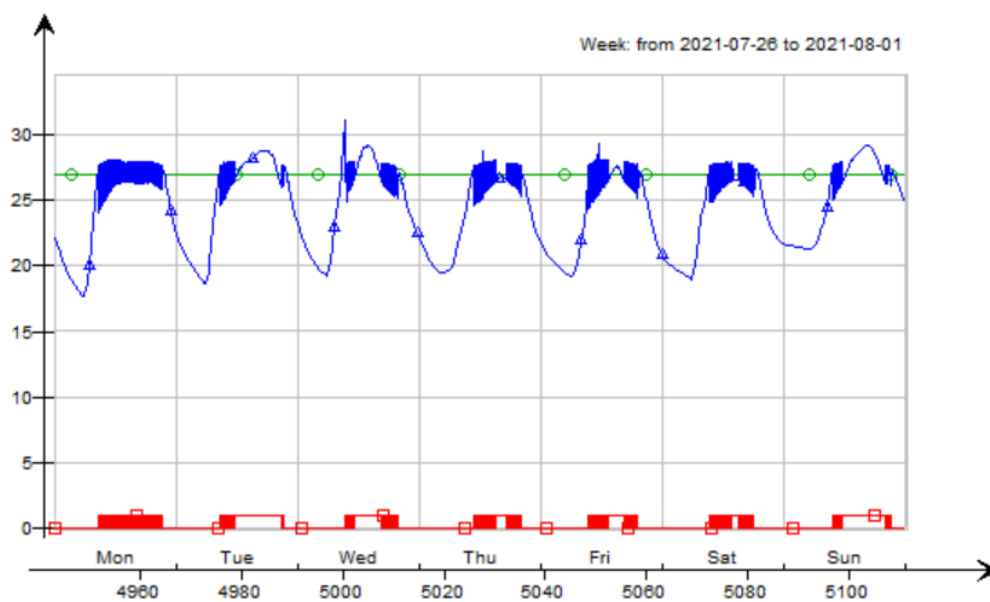
Iš grafiko galime matyti, kad mažiausias CO₂ pėdsakas paliekamas vėsinant šiltnamį tuomet, kai jis pastatytas žemos urbanizacijos lygio vietovėje. Lyginant su vidutinio užstatymo vietoje, CO₂ pėdsakas mažesnis 3 %, o su aukšto urbanizacijos lygio vietoje – 1,5 %.

2.6. Šiltnamio vėsinimas naudojant lauko orą

Komerciniuose šiltnamiuose dažniausiai užtikrinamas tik šildymo poreikis, kad temperatūra nenukristų žemiau kritinės ribos, o vėsinimo problema dažnai lieka nesprendžiama. Remiantis literatūros analize, modeliuotas šiltnamio vėsinimo būdas, naudojant kanalinių ventiliatorių ir vėsinant šiltnamį lauko oru. Ši sistema nereikalauja didelių investicijų ir gali padėti išvengti perkaitimo karštomis vasaros dienomis.

Sistemos veikimo principas: kanalinių ventiliatorių, užtikrinantis vienkartinę oro apykaitą per valandą, tiekia lauko orą į šiltnamį tuomet, kai šiltnamio vidaus temperatūra yra didesnė nei 27 °C. Ventiliatoriui įsijungus šiltnamyje automatiškai atsidaro langai ir šiltas oras yra išstumiamas į lauką. IDA ICE programinės įrangos pagalba atliekami modeliavimai ir stebima, kaip kinta vidaus oro temperatūra šiltnamyje ir koks yra ventiliatoriaus darbo grafikas.

Temperatūros priklausomybės nuo laiko grafikas pateikiamas 18 paveikslėlyje „Temperatūros priklausomybės nuo laiko grafikas“.

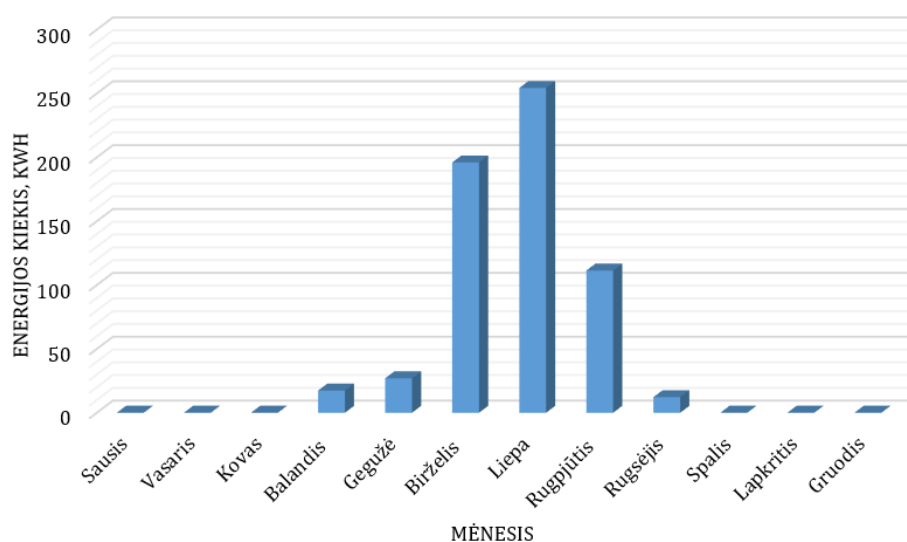


18 pav. Temperatūros priklausomybės nuo laiko grafikas

Iš grafiko matome, kad apie vidurdienį, šiltnamyje temperatūra pakyla aukštesnė nei 27 °C laipsniai, todėl atsiranda vėsinimo poreikis. Ventiliatoriaus darbo grafikas žymimas raudona kreivė. Matome, kad temperatūrai viršijus 27 °C laipsnius, ventiliatorius įsijungia ir pradeda tiekti lauko orą į statinį, praėjus kuriam laikui ir temperatūrai nukritus ventiliatorius išsijungia. Ciklas kartojasi, kai tik temperatūra pakyla aukščiau nustatytos ribos.

32 lentelė. Ventiliatoriaus sunaudojamas energijos kiekis vėsinimui, kWh

	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Ventiliatoriaus naudojamas energijos kiekis, kWh	0.1	0.1	0.1	17.4	27	196	254.3	111.4	12.2	0.1	0.1	0.1



19 pav. Ventiliatoriaus sunaudojamas energijos kiekis vėsinimui, kWh

Žinant ventiliatoriaus sunaudojamą energijos kiekį vėsinimui per metus galime paskaičiuoti kokį CO₂ pėdsaką palieka, ši vėsinimo sistema.

33 lentelė. CO₂ pėdsakas energijos gamybai naudojamų energijos šaltinių. Vėsinimas

	Norminė reikšmė MCO₂, kgCO₂/kWh	Ventiliatoriaus sunaudojamas energijos kiekis, kWh	CO₂ pėdsakas, kgCO₂/kWh
Elektros įvairios gamybos būdų vidurkis	0.42	618.9	259.94

Atlikus skaičiavimus apskaičiuota, kad ventiliatorius vėsindamas šiltnamį sunaudoja 618,9 kWh energijos. Sunaudojant tokį elektros energijos kiekį paliekamas 259,94 kgCO₂/kWh CO₂ pėdsakas. Lyginant šį vėsinimą su idealiu vėsinimu energijos sutaupoma apie 98 % energijos.

Išvados

1. IDA ICE programine įranga sumodeliavus ir atlikus skaičiavimus keičiant norminės oro apykaitos koeficientą, energijos poreikis šiltnamio šildymui bei vėdinimui skiriasi iki 0,5 %. Galime teigti, kad oro apykaitos koeficientas galutiniams rezultatams didelės įtakos neturi.
2. Pritaikius artumo idealiam taškui metodą nustatyta, geriausia danga energetiniu ir ekonominiu požiūriu žemo ir aukšto urbanizacinio lygio vietovėse yra 2 mm storio stiklo dangą. Vidutinio užstatymo teritorijoje geriausia rinktis 5 mm storio stiklo dangą.
3. Pritaikius artumo idealiam taškui metodą ir nustačius, tinkamiausias dangas įvairiais užstatymo variantais, apskaičiuotas CO₂ pėdsakas, kurį palieka naudojami energijos šaltiniai šildymui. Mažiausias CO₂ pėdsakas paliekamas, tada kai šilumos šaltiniu yra pasirenkamas biokuras: mediena, šiaudai, biodujos ar bioalyva bei naudojant energiją iš šilumos tinklų.
4. Pagal parinktas šiltnamio dangas, nustatytas ir vėsinimo poreikis šiltnamyje bei apskaičiuotas CO₂ pėdsakas. Mažiausias CO₂ pėdsakas paliekamas vėsinant šiltnamį tuomet, kai jis pastatytas žemos urbanizacijos lygio vietovėje. Lyginant su vidutinio užstatymo vietove, CO₂ pėdsakas mažesnis 3 %, o su aukšto urbanizacijos lygio vietove – 1,5 %.
5. Palyginus idealaus vėsinimo atvejį ir vėsinimą lauko oru naudojant kanalinių ventiliatorių nustatyta, kad ventiliatorius vėsinamas šiltnamį sunaudoja 618,9 kWh energijos. Sunaudojant tokį elektros energijos kiekį paliekamas 259,94 kgCO₂/kWh CO₂ pėdsakas. Lyginant šį vėsinimą su idealiu vėsinimu energijos sutaupoma apie 98 %.

Literatūros sąrašas

- 1) LIETUVOS ŠILTNAMIŲ ŪKIŲ JUNGIMOSI Į KOOPERATYVĄ EKONOMINIAI IR ORGANIZACINIAI PAGRINDAI Julius Ramanauskas, Jolanta Rauluškevičienė, Vytautas Vazonis Lietuvos žemės ūkio universitetas
- 2) Lietuvos Statistikos departamentas <http://estatistika.stat.gov.lt/>
- 3) KAVGA Angelika, Juozas VAIČIŪNAS ir FIOKAIDES Paris. Recent Advancements in the Energy Performance of Intelligent Green Houses: A Case Study [interaktyvus]. 2016, **11**. [žiūrėta 2021 – 03 – 21]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/>
- 4) PRIEŠGAISRINĖS APSAUGOS IR GELBĖJIMO DEPARTAMENTAS PRIE VIDAUS REIKALŲ MINISTERIJOS. Įsakymas dėl gaisrinės saugos pagrindinių reikalavimų patvirtinimo [interaktyvus]. 2010 m. gruodžio 7 d., Nr. 1 – 338. TAR 2020 – 03 – 20, Nr. 05784 [žiūrėta 2021 – 03 – 21]. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.388658/asr>
- 5) MARTINIONIENĖ, Jolanta, Laima LAPINSKAITĖ ir Pranė STANKEVIČIENĖ. Biologija prieš egzaminą. Kaunas: Šviesa, 2010. ISBN 978 – 5 – 430 – 05596 – 7.
- 6) KAVGA A., M. SOULIOTIS, E. P. KOUMOULOS, P. A. FOKAIDES, C. A. CHARITIDIS. Enviromental ant nanomechanical testing of an alternative polymer nanocomposite greenhouse covering material. *Solar energy* [interaktyvus]. 2018, **9** [žiūrėta 2021 – 05 – 01]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/>.
- 7) AL-MAHDOURI A., M. BANESHI, H. GONOME, J. OKAJIMA, S. MARUYAMA. Evaluation of optical properties ant thermal performances of different greenhouse covering materials. *Solar energy* [interaktyvus]. 2013, **12**. 21 – 32 žiūrėta 2021 – 05 – 01]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/>.
- 8) ZANG G., X. DING, T. LI, W. PU, W. LOU, J. HOU. Dynamic energy balance model of a glass greenhouse: An experimental validation ant solar energy analysis. *Energy* [interaktyvus]. 2020, **18** [žiūrėta 2021 – 05 – 01]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/>.
- 9) New polycarbonate roofing material moves greenhouse to energy independence.
- 10) EuroStat.com <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/tai08/default/table?lang=en>
- 11) ALARIFI I. M. Advanced selection materials in solar cell efficiency and their properties. *Materials Today: Proceedings* [interaktyvus]. 2021, **12** [žiūrėta 2021 – 05 – 05]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/>.
- 12) SHARMA D., R. MEHRA, B. RAJ. Comparative analysis of photovoltaic technologies for high efficiency solar cell design. *Superlattices and Microstructures* [interaktyvus]. 2021, **11** [žiūrėta 2021 – 05 – 05]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/>.
- 13) TRYPANAGNOSTOPOULOS G., A. KAVGA, M. SOULIOTIS ir Y. TRIPANAGNOSTOPOULOS. Greenhouse performance results for roof installed photovoltaics. *Renewable Energy* [interaktyvus]. 2017, **8**. 724 – 731 [žiūrėta 2021 – 03 – 21]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/>
- 14) YANG Y., P. E. CAMPANA, B. STRIDH, J. YAN. Potential analysis of roof-mounted solar photovoltaics in Sweden. *Applied Energy* [interaktyvus]. 2020, **14** [žiūrėta 2021 – 05 – 05]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/>.
- 15) CONTANTINO A., L. COMBA, G. SICARDI, M. BARIANI, E. FABRIZIO. *Energy performance and climate control in mechanically ventilated greenhouses: A dynamic modelling-based assessment and investigation. Applied Energy* [interaktyvus]. 2021, 23 [žiūrėta 2021 – 05 – 19]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/>.

- 16) SEO Y., UN-JONG SEO. *Ground source heat pump (GSHP) systems for horticulture greenhouses adjacent to highway interchanges: A case study in South Korea* [interaktyvus]. 2021, 16 [žiūrėta 2021 – 05 – 19]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/>.
- 17) CIRTEN D.L., B.J. BAILEY. *A review of greenhouse engineering developments during the 1990s*. Elsevier [interaktyvus]. 2002, 22 [žiūrėta 2021 – 05 – 19]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/>.
- 18) XU J., Y. LI, R. Z. WANG, W. LIU, P. ZHOU. *Experimental performance of evaporative cooling pad systems in greenhouses in humid subtropical climates*. *Applied Energy* [interaktyvus]. 2015, 11 [žiūrėta 2021 – 05 – 19]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/>.
- 19) SETHI V.P., K. SUMATHY, C. LEE, D.S. PAL. *Thermal modeling aspects of solar greenhouse microclimate control: A review on heating technologies*. *Solar Energy* [interaktyvus]. 2013, 27 [žiūrėta 2021 – 05 – 19]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/>.
- 20) TANG Y., M. JIA, Y. MEI, Y. YU, J. ZHANG, R. TANG, K. SONG. *3D intelligent supplement light illumination using hybrid sunlight and LED for greenhouse plants*. *Optik* [interaktyvus]. 2013, 27 [žiūrėta 2021 – 05 – 19]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/>.
- 21) ACHOUR Y., AHMED OUAMMI, DRISS ZEJLI. *Technological progresses in modern sustainable greenhouses cultivation as the path towards precision agriculture*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [interaktyvus]. 2021, 19. [žiūrėta 2021 – 10 – 19]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/>.
- 22) XIE X, LIU Y-J, HAO J-J, JU L, DU W-C, YANG H-W. *Feasibility study of a new solar greenhouse covering material*. 2019, 7. [žiūrėta 2021 – 10 – 19]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/>.
- 23) M. C. SUBINA, RAM KARTHIKEYANB, C. PERIASAMYA, B. SOZHARAJANA. *Verification of the greenhouse roof-covering-material selection using the finite element method*. *Materials Today: Proceedings* [interaktyvus]. 2020, 10. [žiūrėta 2021 – 10 – 19]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/>.
- 24) RUIZHOU CAO, Z. YU, Z. LIU, X. CHEN, F. ZHU. *An investigation of snow drifting on low-sloped gable roofs: Wind-tunnel tests and CFD simulations*. *Cold Regions Science and Technology* [interaktyvus]. 2021, 15. [žiūrėta 2021 – 10 – 19]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/>.
- 25) GUANGBIN WANG, Z. ZHANG. *BIM implementation in handover management for underground rail transit project: A case study approach*. *Tunnelling and Underground Space Technology*. [interaktyvus]. 2021, 11. [žiūrėta 2021 – 11 – 19]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/>.
- 26) KHAN RANA, Z. AZIZ, V. AHMED. *Building integrated agriculture information modelling (BIAIM): An integrated approach towards urban agriculture*. *Sustainable Cities and Society* [interaktyvus]. 2018, 14. [žiūrėta 2021 – 11 – 19]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/>.
- 27) NONG DUY, P. Simshauser, D. B. Nguyen. *Greenhouse gas emissions vs CO2 emissions: Comparative analysis of a global carbon tax*. *Applied Energy* [interaktyvus]. 2021, 11. [žiūrėta 2021 – 11 – 20]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/>.
- 28) MAFIZUR RAHMANA MOHAMMAD, N. SULTANA E. VELAYUTHAMA. *Renewable energy, energy intensity and carbon reduction: Experience of large emerging economies*. *Renewable Energy*. 2021, 14. [žiūrėta 2021 – 11 – 23]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/>.

- 29) Pan Yue, L. Zhang. *Automated process discovery from event logs in BIM construction projects*. Automation in Construction. 2021, 17. [žiūrėta 2021-11-26]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/>.
- 30) FITRIATY PUTERI, Z. SHEN. *Predicting energy generation from residential building attached Photovoltaic Cells in a tropical area using 3D modeling analysis*. Journal of Cleaner Production. 2018, 15. [žiūrėta 2021 – 12 – 11]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/>.
- 31) AHUJA RITU, A. SAWHNEY, M. ARIF. *Driving lean and green project outcomes using BIM: A qualitative comparative analysis*. International Journal of Sustainable Built Environment. 2017, 12 [žiūrėta 2021 – 12 – 11]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/>.
- 32) KASNAUSKIENĖ, Gindra. *Demografijos pagrindai: vadovėlis* [interaktyvus]. Vilniaus universiteto leidykla, 2006 [žiūrėta 2021-12-27]. ISBN 9986–19–933–6. Prieiga per: <https://kolekcijos.biblioteka.vu.lt/>
- 33) AUTODESK REVIT. Autodesk Revit 2022 [programinė įranga]. 2021 gruodis [žiūrėta 2021 – 12 – 13].
- 34) AUTODESK INSIGHT. Autodesk Insight 2022 [programinė įranga]. 2021 gruodis [žiūrėta 2021 – 12 – 13].
- 35) IDA INDOOR CLIMATE AND ENERGY. IDA Indoor Climate and Energy 4.8 SP2 [programinė įranga]. 1995 – 2018 [žiūrėta 2021 – 12 – 13].
- 36) MICROSOFT OFFICE. Microsoft Office 2111 [programinė įranga]. [žiūrėta 2021 – 12 – 31].
- 37) LIETUVOS RESPUBLIKOS APLINKOS MINISTERIJA. STR 2.09.02:2005, Šildymas, vėdinimas ir oro kondicionavimas [interaktyvus]. TAR, 2005-06-16, Nr. 75-2729 [žiūrėta 2021-12-05]. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.257930/LXkwyJVROM>
- 38) LIETUVOS RESPUBLIKOS APLINKOS MINISTERIJA. STR 2.01.02:2016, Pastatų energinio naudingumo projektavimas ir sertifikavimas [interaktyvus]. TAR, 2016-12-01 , Nr. D1 – 754 [žiūrėta 2020-05-18]. Prieiga per: <https://eseimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/15767120a80711e68987e8320e9a5185/RVgNNOPiGa>
- 39) „Systemair“ *prekių katalogas 2021*. [žiūrėta 2021-11-06].
- 40) „Pilkington“ *produktų katalogas 2021*. [žiūrėta 2021-12-01].