



Kauno technologijos universitetas
Statybos ir architektūros fakultetas

Grunto termo-akumuliacinių savybių įtakos pastatų šildymui ir vėsinimui tyrimas

Magistro baigiamasis projektas

Tautvydas Lenkas

Projekto autorius

Prof. dr. Tadas Ždankus

Vadovas

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas
Statybos ir architektūros fakultetas

Grunto termo-akumuliacinių savybių įtakos pastatų šildymui ir vėsinimui tyrimas

Magistro baigiamasis projektas
Darnūs ir energetiškai efektyvūs pastatai (6211EX006)

Tautvydas Lenkas
Projekto autorius

Prof. dr. Tadas Ždankus
Vadovas

Doc. Rokas Valančius
Recenzentas

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Tautvydas Lenkas

Grunto termo-akumuliacinių savybių įtakos pastatų šildymui ir vėsinimui tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Tautvydas Lenkas

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.):
GRUNTO TERMO-AKUMULIACINIŲ SAVYBIŲ ĮTAKOS PASTATŲ ŠILDYMIUI IR
VĖSINIMUI TYRIMAS

Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanų potvarkiu Nr.: ST18-F-09-1

(lietuvių k.):
GRUNTO TERMO-AKUMULIACINIŲ SAVYBIŲ ĮTAKOS PASTATŲ ŠILDYMIUI IR
VĖSINIMUI TYRIMAS

(anglų k.):
RESEARCH ON THE INFLUENCE OF SOIL THERMAL ACCUMULATION PROPERTIES
ON THE HEATING AND COOLING OF BUILDINGS

Pradiniai duomenys darbui (pagal poreikį):

Baigiamojo projekto dalys:

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

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

Vadovas: _____ prof. dr. Tadas Ždankus _____
(indėlis _____ %) *pareigos, vardas, pavardė* *parašas*

Studentas: _____ Tautvydas Lenkas _____
vardas, pavardė *parašas*

Lenkas, Tautvydas. Grunto termo-akumuliacinių savybių įtakos pastatų šildymui ir vėsinimui tyrimas. Magistro studijų baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Tadas Ždankus; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų krypčių grupė: inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: šilumos akumuliacinės savybės, gruntas, įgilintas pastatas, temperatūros profilis, šilumos srautas

Kaunas, 2022. 48 p.

Santrauka

Pagrindinis šio darbo tikslas yra ištirti grunto, supančio įgilintą pastatą, šilumos akumuliacinių savybių įtaką jo šildymui ir vėsinimui, nustatant pastato energijos sąnaudas, priklausomai nuo metų laiko.

Tyrimų metu nustatyti įgilinto pastato, su vienu atviru fasadu, šilumos nuostoliai į gruntą priklausimai nuo metų laiko. Apskaičiuota ir palyginta pastato šildymui ar vėdinimui užtikrinti reikalinga galia įvairiais metų sezonais.

Darbe nagrinėti keturi skirtingi įgilinto pastato modeliavimo atvejai, įvertinant gautus rezultatus žiemos, vasaros, rudens bei pavasario sezonais. Modeliuota skaitiniu būdu, tiriant laike nusistovėjusį šilumos mainų procesą. Imituojant metų laiką, parinkti atitinkami mėnesiai ir jų vidutiniai parametrai, reikalingi modeliavimui. Pasirinkta A++ pastato energinio naudingumo klasė. Grunto ir įgilinto pastato tarpusavio sąveika ir temperatūros pasiskirstymas analizuoti įvairiuose pjūviuose. Įvertintas šilumos srautas iš pastato į gruntą bei per pastato atvirą fasadą į atmosferą. Energijos poreikis visais sezonais susumuotas ir palygintas su antžeminio pastato atveju, esant vienodomis sąlygoms.

Lenkas, Tautvydas. Research on the Influence of Soil Thermal Accumulation Properties on the Heating and Cooling of Buildings. Master's Final Degree / supervisor prof. dr. Tadas Ždankus; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Study field group: Engineering Sciences.

Keywords: heat accumulation properties, soil, underground building, temperature profile, heat flux

Kaunas, 2022. 48.

Summary

The main goal of this work is to investigate the influence of the heat accumulation properties of the soil surrounding an underground building on its heating and cooling by determining the energy consumption of the building depending on the time of year.

During the research, the heat loss to the ground depending on the time of year was determined in the submerged building, with one open facade. The power required to heat or cool a building in different seasons of the year has been calculated and compared.

The paper examines four different cases of modeling an underground building, evaluating the results obtained in the winter, summer, autumn and spring seasons. Numerically modeled by studying the heat exchange process over time. By simulating the time of year, the corresponding months and their average parameters required for the simulation were selected. The energy efficiency class of the A ++ building has been chosen. The interaction between the ground and the underground building and the temperature distribution were analyzed in different sections. The heat flow from the building to the ground and through the open facade of the building to the atmosphere was estimated. The energy demand for all seasons is summed up and compared to the above-ground building under the same conditions.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Įvadas	10
1. Literatūros apžvalga	12
1.1. Skaitinio modeliavimo metodai požeminių pastatų energetiniam tyrimui.....	12
1.2. Grunto šilumos laidumo nustatymo analizė	13
1.2.1. Grunto savybės lemiančios šilumos mainus	13
1.2.2. Šilumos laidumas	14
1.2.3. Konvekcija	15
1.2.4. Spinduliavimas.....	15
1.3. Grunto pradinė temperatūra. Vertikalus išilginis metinis grunto temperatūros profilis	16
1.4. Požeminių pastatų energijos poreikio priklausomybė nuo atitvarų šilumos laidumo koeficiento vertės	16
1.5. Kiti veiksniai įtakojantys požeminių pastatų energijos sąnaudas	18
1.6. Požeminių pastatų potencialūs privalumai ir trūkumai	18
1.6.1. Požeminių pastatų potencialūs privalumai	18
1.6.2. Požeminių pastatų potencialūs trūkumai	19
2. Tyrimų metodika	20
2.1. Pradiniai duomenys.....	20
2.1.1. Pastato parinkimas.....	20
2.1.2. Lauko sąlygos	20
2.2. Tyrimo eiga.....	20
3. Gauti rezultatai	23
3.1. Laboratorinio stendo skaitinis modelis.....	23
3.2. 3 m pilnai įgilinto pastato skaitinis modelis	25
3.3. Įgilinto pastato 3 m po gruntu, su atviru fasadu, skaitinis modelis.....	26
3.3.1. Grunto temperatūriniai profiliai	26
3.3.2. Šilumos srautas per pastato atitvaras.....	34
Išvados	42
Literatūros sąrašas	44
Priedai	47
1 priedas. Dalyvavimo „Advanced Constructon andArchitecture 2020“ konferencijoje sertifikatas	47
2 priedas. Dalyvavimo „SMART BUILT ENVIRONMENT“ konferencijoje sertifikatas	48

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Skaičiavimo metodų, naudojamų požeminių pastatų šilumos perdavimui skaičiuoti, privalumai ir trūkumai.....	12
2 lentelė. Smėlio šilumos laidumo koeficientas esant skirtingam drėgnumui laboratorijos sąlygomis [7].....	14
3 lentelė. Natūralios smėlio dangos gamtoje šilumos laidumo koeficientas esant skirtingam drėgnumui [7].....	14
4 lentelė. Gautų eksperimentinių ir skaitinių rezultatų palyginimas.....	24
5 lentelė. Maksimalaus šilumos srauto skirtumas tarp skirtingo aukšto atitvarų, priklausomai nuo metų laiko.....	36
6 lentelė. Suminiai šildymo galios poreikiai skirtingų sezonų metu.....	39
7 lentelė. Antžeminio pastato suminiai šiluminės galios poreikiai bei palyginimas su įgilinto pastato poreikiais, priklausomai nuo sezono.....	40

Paveikslų sąrašas

1 pav. Požeminių pastatų tyrimų, naudojant skirtingus metodus, skaičius.....	13
2 pav. Smėlio šilumos laidumo koeficiento priklausomybė nuo dirvožemio tankio, esant skirtingam drėgnumui [7]	15
3 pav. Grunto temperatūros pasiskirstymas priklausomai nuo gylio[6]	16
4 pav. Nuspėjami metiniai energijos suvartojimai su skirtingomis stogo U reikšmėmis [2]	17
5 pav. Nuspėjami metiniai energijos suvartojimai su skirtingomis sienų ir grindų U reikšmėmis [2]	17
6 pav. Galimos įgilinto pastato konstrukcinės koncepcijos [18].....	18
7 pav. Vertikalus išilginis sezoninis grunto temperatūros profilis Lietuvoje [26, 27]	20
8 pav. Supaprastinta modeliuojamo pastato schema	21
9 pav. Supaprastintas modeliuojamo pastato su vienu atviru fasadu vaizdas.....	21
10 pav. Modeliuojamo laboratorinio stendo schema.....	22
11 pav. Laboratorinio stendo temperatūrinis laukas skaitiniame modelyje po ($t = 3 \text{ h } 53 \text{ min}$)	23
12 pav. Laboratorinio stendo temperatūrinis laukas skaitiniame modelyje po 1h 57min	24
13 pav. Įgilinto pastato ir jį supančio grunto temperatūrinis profilis	25
14 pav. Įgilinto pastato ir grunto temperatūrinis profilis nr.1, priklausomai nuo metų laiko.....	26
15 pav. Įgilinto pastato ir grunto temperatūrinis profilis nr.2, priklausomai nuo metų laiko.....	28
16 pav. Grunto temperatūrinis profilis grunte, po įgilinto pastato grindimis, priklausomai nuo metų laiko.....	29
17 pav. Horizontalaus pjūvio, per pastato centrą, temperatūrinis profilis, priklausomai nuo metų laiko	30
18 pav. Grunto temperatūrinis profilis virš įgilinto pastato stogo, priklausomai nuo metų laiko	31
19 pav. Grunto temperatūrinis profilis ties įėjimu į pastatą, priklausomai nuo metų laiko.....	32
20 pav. Grunto temperatūrinis profilis už pastato galinės sienos, priklausomai nuo metų laiko.....	33
21 pav. Grunto temperatūrinis profilis ties šoninėmis pastato sienomis, priklausomai nuo metų laiko	34
22 pav. Šilumos srautas per pastato priekinę sieną, besiribojančią su gruntu, priklausomai nuo metų laiko.....	35
23 pav. Šilumos srautas per nulinio aukšto sienas ir grindis, besiribojančias su gruntu, priklausomai nuo metų laiko	36
24 pav. Šilumos srautas per pastato sieną, besiribojančią su oru, priklausomai nuo metų laiko.....	38
25 pav. Šilumos srautas per pirmo aukšto sienas ir lubas, besiribojančias su gruntu, priklausomai nuo metų laiko	39
26 pav. Antžeminio ir įgilinto pastato galios poreikių palyginimas	41

Įvadas

Šiuolaikinis pastatas be inžinerinių sistemų neįsivaizduojamas. Šių laikų aktualijos, remiasi tuo, kad pastato energijos poreikiai, jo gyvavimo ciklo metu, būtų kuo minimalesni. Pereinama prie alternatyvių, atsinaujinančių energijos šaltinių, kad mažinti ir visai eliminuoti CO₂ emisiją į aplinką, taip mažinant klimato kaitos spartą. Alternatyvūs energijos šaltiniai yra vienas iš būdų kaip to galima siekti. Kitas iš būdų yra gerinti pačio pastato šiluminės savybės, kad šildymo sezono metu, turėtume kuo mažesnius šilumos nuostolius, kas tiesiogiai įtakoja ir šilumos šaltinių reikiamą galią.

Dažniausiai pasitaikantys gyvenamosios paskirties pastatai būna antžeminiai. Remiantis Lietuvos klimato sąlygomis, kad tenkinti šių dienų reglamentus ir direktyvas, naujai statomi pastatai turi atitikti A++ energinio naudingumo klasės reikalavimus. Pagrindė ši klasė pasiekama, mažinant pastato atitvarų šiluminio laidumo koeficientą, sprendžiant ilginius šiluminius tiltelius ir diegiant pastate kuo efektyvesnius energijos gavybos šaltinius.

Pastaruosiu metu, dėl didėjančio gyventojų skaičiaus didmiesčiuose, vietos trūkumo problema tampa vis svarbesnė. Norint spręsti šią problemą, alternatyva tampa skatinti požeminių erdvių plėtrą. Jau kurį laiką idėja, statyti požeminius gyvenamuosius pastatus, sulaukia vis daugiau dėmesio. Visgi, sprendžiant šį klausimą, pastatų statyboje susiduriama su architektūriniais ir konstrukciniais sunkumais, taip pat ir pačio pastato energetinėmis bei tinkamų mikroklimato sąlygų užtikrinimo subtilybėmis.

Tradiciniai sprendiniai, šių laikų projektavime ir statyboje, būtų antžeminiai pastatai, kuomet pastato šiluminės savybės gerinamos, didinant atitvarų šiluminės savybes. Vienas iš netradicinių sprendinių, tačiau vis labiau tiriamas ir sulaukiantis daugiau dėmesio, požeminių gyvenamųjų erdvių projektavimas ir statyba. Lyginant grunto šiluminį laidumą su oro šiluminiu laidumu, turime jį geresnį. Iš pirmo žvilgsnio, gali pasirodyti, kad turėsime intensyvesnius šilumos mainus su aplinka, pastatas dar greičiau praras šilumą, nei antžeminis pastatas, tačiau grunto ir oro temperatūros skirtumas gali siekti dešimtis laipsnių, kas tiesiogiai įtakoja šiluminius nuostolius. Kuo mažesnis temperatūrų skirtumas tarp vidaus ir išorės, tuo mažiau energijos reikia patalpose palaikyti projekcinę oro temperatūrą. Reikia atkreipti dėmesį ir į tai, jog grunto temperatūros inertiškumas mažesnis nei oro, taip pat įgilintame pastate eliminuojama neigiama vėjo įtaka.

Darbo aktualumas ir pritaikymas. Požeminių pastatų eksploatacinių aspektų tyrimas, žinių gilinimas apie požeminių pastatų energijos taupymo galimybes. Grunto, supančio įgilintą pastatą, šilumos akumuliacinių savybių įtakos šildymui ir vėsinimui panaudojimas energijos taupymui. Sumažintus pastato energijos poreikius dengiant iš atsinaujinančių energijos išteklių, labiau artėjame prie nulinės CO₂ emisijos, pastato eksploataavimo metu, taip mažindami klimato taršą bei jo kaitos spartą.

Tyrimo tikslas - iširti grunto, supančio įgilintą pastatą, šilumos akumuliacinių savybių įtaką šildymui ir vėsinimui.

Tyrimo objektas - šilumos perdavimo procesas iš atitvaros į gruntą, grunto, supančio įgilintą pastatą terminė analizė.

Uždaviniai:

1. Literatūros analizė susijusia tematika, metodikos sudarymas, kraštinių sąlygų nustatymas modeliui.
2. Skaitinis modeliavimas: grunto temperatūrinių profilių, šilumos srautų per atitvaras ir energijos sąnaudų radimas.
3. Gautų rezultatų analizė, lyginimas ir išvadų formulavimas.

1. Literatūros apžvalga

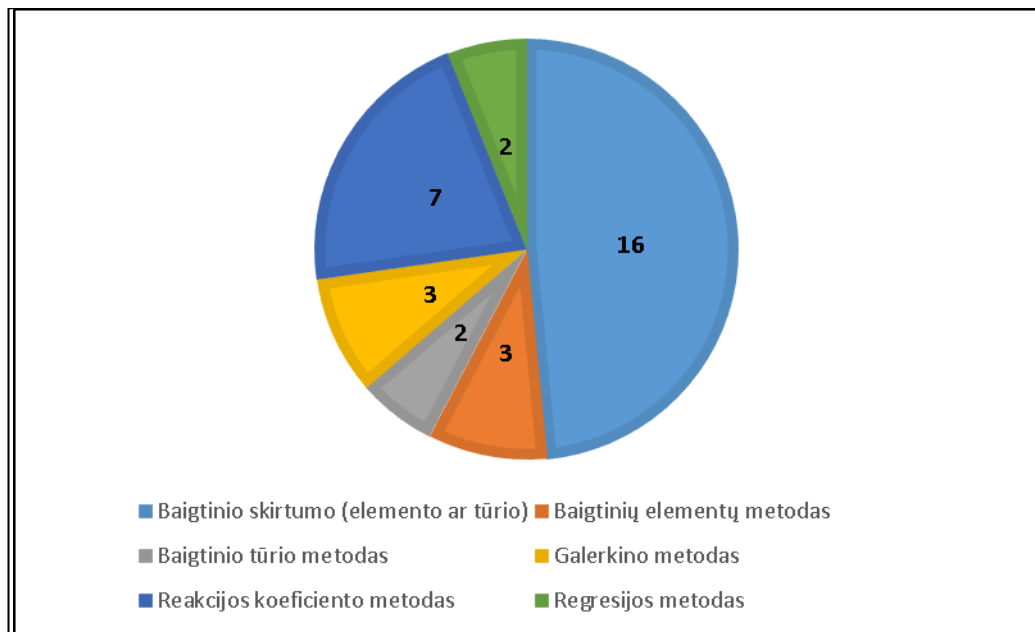
1.1. Skaitinio modeliavimo metodai požeminių pastatų energetiniam tyrimui

Norint numatyti požeminių pastatų šilumos perdavimą su besiribojančiu gruntu, literatūroje siūlomi skirtingi skaičiavimo metodai, įskaitant analitinį (pusiau analitinį) metodą, baigtinio skirtumo (elemento ar tūrio) metodą, reakcijos koeficiento metodą, Galerkinio metodą, rankinį metodą ir regresijos metodą. Kiekvienas metodas turi savo privalumų ir trūkumų, kaip apibendrinta 1 lentelėje. Požeminių pastatų šilumos perdavimas į gruntą yra tipinis netolygus šilumos perdavimo procesas. Siekiant subalansuoti modelio pritaikomumą, skaičiavimo kainą, modelio lankstumą ir skaičiavimo tikslumą, baigtinio skirtumo (elemento ar tūrio) metodas ir atsako koeficiento metodas gali būti laikomi patraukliais, palyginti su kitais, apskaičiuojant su gruntu susijusį šilumos perdavimą. Tačiau atliekant tolesnius tyrimus reikia ieškoti kompromiso tarp skaičiavimo išlaidų ir skaičiavimo tikslumo, nes požeminių pastatų šiluminė charakteristika paprastai vertinama visus metus [1].

1 lentelė. Skaičiavimo metodų, naudojamų požeminių pastatų šilumos perdavimui skaičiuoti, privalumai ir trūkumai.

Skaičiavimo metodas	Privalumai	Trūkumai
Analitinis (pusiau analitinis)	Greitas skaičiavimas; Parodo aiškius ryšius tarp parametrų	Labai limituotos ribų sąlygos ir geometrija
Baigtinio skirtumo (elemento ar tūrio)	Galimos įvairios pastato modelio geometrijos; Didelis skaičiavimo tikslumas	Mažas skaičiavimo efektyvumas
Reakcijos koeficiento	Santykinai didelis skaičiavimo efektyvumas, tačiau prieš simuliaciją, reikia sugeneruoti atsako faktorius	Sunku pasiekti konvergenciją, kai sistemos šiluminė inercija yra didelė
Galerkinio	Nereikalaujamas tinklėlis ar elementas; Didelis skaičiavimo tikslumas ir lankstumas	Didelis darbo krūvis atliekant skaičiavimus
Rankinis (skaitinis, analitinis)	Paprastas skaičiavimas naudojant skaičiuotuvą	Taikoma tik kai kuriais atvejais dėl supaprastinto pobūdžio
Regresijos	Mažas skaičiavimo laikas	Ribota modeliavimo galimybė ir priklauso nuo pirminio regresijos duomenų rinkinio

Literatūroje randama pagrindinių metodų, naudojamų požeminio pastato energinio efektyvumo analizės skaitiniam modeliavimui grupavimas. Taikomi skaitiniai metodai sugrupuoti, kaip parodyta 1 pav. Iš sugrupavimo galima spręsti, kad baigtinio skirtumo skaitinis metodas yra labiausiai pritaikytas požeminių pastatų energetiniam tyrimui.



1 pav. Požeminių pastatų tyrimų, naudojant skirtingus metodus, skaičius

1.2. Grunto šilumos laidumo nustatymo analizė

Kadangi pastato atitvaras tiesiogiai supa gruntas, veiksnius, turinčius įtakos jam, paprastai galima suskirstyti į dvi kategorijas. Viena iš jų yra grunto šiluminės savybės, kurios priklauso nuo jo tipo, drėgmės kiekio, dirvožemio užšalimo, tirpimo ir kita [2]. Krarti [3] atskleidė, kad gerai izoliuotų pamatų plokščių vidutiniai metiniai šilumos nuostoliai gali padidėti priklausomai nuo dirvožemio paviršiaus temperatūros, net kai žemės šilumos laidumas aplink pamatą yra žemas. Optimalus šiluminės izoliacijos paskirstymas gali sutaupyti iki 35 % visų šilumos nuostolių iš požeminių konstrukcijų, palyginti su vienodu izoliacijos paskirstymu.

Kita kategorija veiksnių, darančių įtaką gruntui yra žemės paviršiaus sąlygos, kaip sniego ar žolės danga, ar paviršius padengtas griuvėsiais, plika dirva, koks augalijos tankis. Analizuojant matavimus, kuomet fiksuojama temperatūra prie žemės paviršiaus, įvairių rūšių dirvožemiams, įskaitant asfalto dangą, pliką žemę, žolę, smėlį, skaldą ir pliką molį. Tyrimai rodo, kad vidutinė maksimali asfalto grunto temperatūra yra 37 °C aukštesnė už birželio mėnesio oro temperatūrą, o žolėmis apaugusios žemės vidutinė maksimali temperatūra yra tik 14 °C aukštesnė nei oro temperatūra tą patį mėnesį. Dirvožemio temperatūros profiliai labai skirsis vertinant šias žemės paviršiaus sąlygas, į kurias reikia atsižvelgti [2].

Salah El-Din atlikęs tyrimus, siekiant įvertinti įvairių parametrų įtaką šilumos perdavimui grunte, padarė išvadą, kad temperatūros ir šilumos srauto amplitudė į gruntą didėja, didėjant santykinei oro drėgmei ir grunto absorbcinėms savybėms. Tuo tarpu didėjant grunto garavimui ir vėjo greičiui grunto temperatūros ir šilumos srauto amplitudė mažėja [4].

1.2.1. Grunto savybės lemiančios šilumos mainus

Esminiai veiksniai įtakojuojantys grunto šilumos mainus – šiluminis laidumas, šiluminė difuzija, savitoji šiluminė talpa, požeminio vandens srautas, drėgmės kiekis dirvožemyje, pradinė grunto temperatūra. Šilumos srauto procesas vyksta dėl temperatūros gradiento tarp objekto ir jį supančio grunto, kol pasiekiamas pusiausvyra. Šilumos mainai ir jų trukmė tarp objekto ir dirvožemio priklauso nuo

anksčiau išvardintų veiksnių. Šilumos perdavimo grunte procesas yra labai sudėtingas, vykstantis skirtingais šilumos perdavimo būdais, įskaitant laidumą, konvekciją ir radiaciją. Kiti fizikiniai procesai, turintys didelę reikšmę šilumos judėjimui grunte, yra garavimas, kondensacija bei užšalimas [5].

1.2.2. Šilumos laidumas

Šilumos laidumas tai šilumos perdavimo būdas kūnuose, kurie liečiasi paviršiais, kuomet kūnuose skiriasi atomų kinetinės energijos kiekis. Tai yra labiausiai vyraujantis šilumos perdavimo būdas dirvožemyje [5] ir kituose kietuose kūnuose, nes dalelės yra išsidėsčiusios tankiai. Kuomet šildomas vienas kietojo kūno paviršius, atomo dalelės kaitinamoje vietoje įgauna kinetinės energijos ir pradeda vibruoti, versdamas šalia esančius atomus elgtis taip pat ir perduoti energiją toliau. Šis perdavimo procesas nuolat vyksta kietajame kūne, jei šildoma nuolat, iki kol visos dalelės judės vienodu dažniu, kitais žodžiais tariant, įgis tą patį šilumos energijos kiekį. Šilumos kiekį, praeinantį per kūną vienoje dimensijoje galima kiekybiškai įvertinti naudojant Furjė dėsnį, o laikas, per kurį šiluma perduodama iš vieno kūno paviršiaus į kitą, priklauso nuo medžiagos šilumos laidumo [6].

Nikiforova Tetiana su kolegomis [7] atliko tyrimus, kuriais nustatė smėlio šilumos laidumą priklausomai nuo jo drėgmės, tiek laboratorinėmis sąlygomis, tiek natūralios smėlio dangos esančios gamtoje. Gauti rezultatai laboratorijoje prie teigiamų ir neigiamų temperatūrų pateikti 2 lentelėje. Natūralios smėlio dangos esančios gamtoje gauti parametrai pateikiami 3 lentelėje.

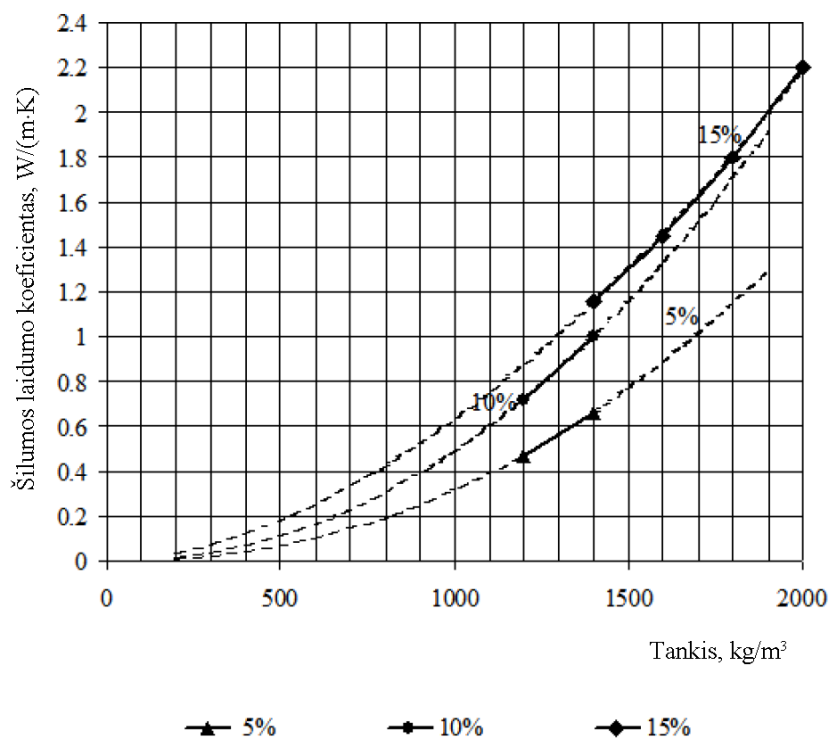
2 lentelė. Smėlio šilumos laidumo koeficientas esant skirtingam drėgnumui laboratorijos sąlygomis [7]

Gruntas	Drėgnumas, %	Tankis, kg/m ³	Šilumos laidumo koeficientas, W/(m·K)	
			Teigiamoje temperatūroje	Užšalimo būsenoje
Smėlis	5	1200	0,47	0,60
	10	1200	0,72	0,92
	5	1400	0,66	0,80
	10	1400	1,00	1,95
	15	1400	1,16	1,57
	15	1600	1,45	1,86
	15	1800	1,80	2,2
	15	2000	2,20	2,56

3 lentelė. Natūralios smėlio dangos gamtoje šilumos laidumo koeficientas esant skirtingam drėgnumui [7]

Gruntas	Tankis, kg/m ³	Drėgmė, vieneto dalimis	Šilumos laidumo koeficientas, W/(m·K)
Smėlis, vidutinio grūdėtumo	1622	0,007	0,442
	1663	0,032	0,849
	1780	0,109	1,361
	1803	0,119	1,768
	1835	0,140	1,512
	2015	0,251	1,733

Smėlio šilumos laidumo koeficiento priklausomybės nuo dirvožemio tankio, esant skirtingam drėgnumui, grafinė išraiška pateikiama 2 paveikslėlyje.



2 pav. Smėlio šilumos laidumo koeficiento priklausomybė nuo dirvožemio tankio, esant skirtingam drėgnumui [7]

1.2.3. Konvekcija

Šiluma konvekcijos būdu perduodama dirvožemyje skysčiui judant per porų erdves, esančias dirvožemio tūryje. Judėjimą sukelia skysčių tankio pokyčiai, atsirandantys dėl temperatūros pokyčių. Skysčio judėjimo greitis porose daugiausiai priklauso nuo dirvožemio granulimetrinės sudėties. Farouki ištyrė, kad šilumos perdavimas konvekcijos būdu yra nereikšmingas dirvožemyje, kurio grūdelių dydis mažesnis už smėlį [8].

Skystis iš dalies prisotintose dirvožemio terpėse egzistuoja dviem būsenomis: skystu vandeniu ir vandens garais. Šildant iš dalies vandeniu prisotintą dirvožemį, šilumos perdavimas laidumu vyksta grunto kietos būsenos karkase, tačiau porose esantis skystis taip pat šyla, jo tankis mažėja dėl padidėjusios temperatūros ir slėgio. Šildomos skysčio molekulės tokiu būdu juda į žemesnės temperatūros zonas ir išstumia tankesnes skysčio molekules. Toliau tankesnės molekulės juda link aukštesnės temperatūros zonos. Šis procesas tęsiasi iki kol kūno masėje būna pasiekta pusiausvyra. Taigi dirvožemyje turėtų būti atsižvelgiama į bendrą šilumos perdavimo konvekcijos būdu poveikį tiek skysčio, tiek garų fazėse [6].

1.2.4. Spinduliavimas

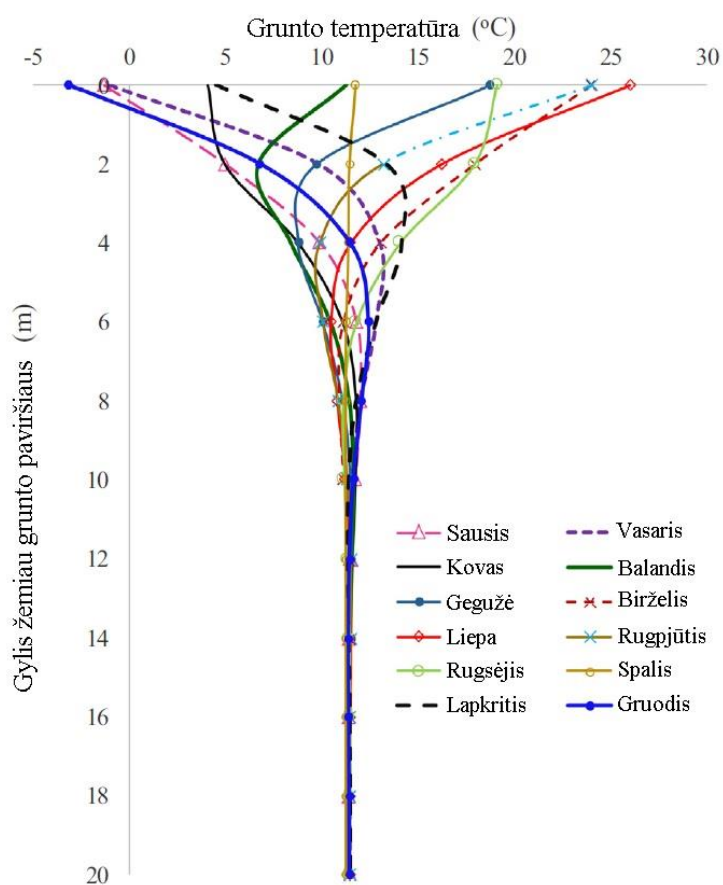
Šilumos spinduliavimas yra šilumos sklidimas elektromagnetinėmis bangomis. Dirvožemyje šilumos perdavimas spinduliavimu yra labai nereikšmingas [5]. Jo poveikis smėlingose dirvose, esant normaliai atmosferos temperatūrai, sudaro mažiau nei 1 % viso šilumos perdavimo proceso [9]. Tačiau stambesnės frakcijos užpilduose, kurių dalelių dydis didesnis, radiacijos poveikis tampa

reikšmingas. Wakao ir Kato [10] parodė, kad normalioje temperatūroje spinduliavimas sudaro 10 % viso šilumos perdavimo stambesnės frakcijos (≥ 20 mm) užpilduose. Todėl dirvožemyje ir smulkios frakcijos gruntuose šilumos perdavimas spinduliuojant gali būti nevertinamas [6].

1.3. Grunto pradinė temperatūra. Vertikalus išilginis metinis grunto temperatūros profilis

Grunto temperatūra, iki 10 metrų žemiau jo paviršiaus, labiausiai priklauso nuo kasdienių ir sezoninių oro sąlygų. Sezoniskumas atsiranda dėl skirtingos saulės spinduliuotės, kuri svyruoja nuo 40 iki 80 W/m² Europoje. Pastaroji gali prasiskverbti nuo kelių centimetrų viršutinio žemės paviršiaus iki 15 metrų gylio, priklausomai nuo dirvožemio terminės difuzijos [11].

Visgi tik 10 m gylyje ir giliau dirvožemio temperatūra išlieka santykinai pastovi, kaip parodyta 3 pav., kuriame pavaizduotas Londone apskaičiuotas molio vertikalus temperatūrinis profilis, remiantis oro temperatūros duomenimis, išmatuotais Guildforde, Surėjuje [6].

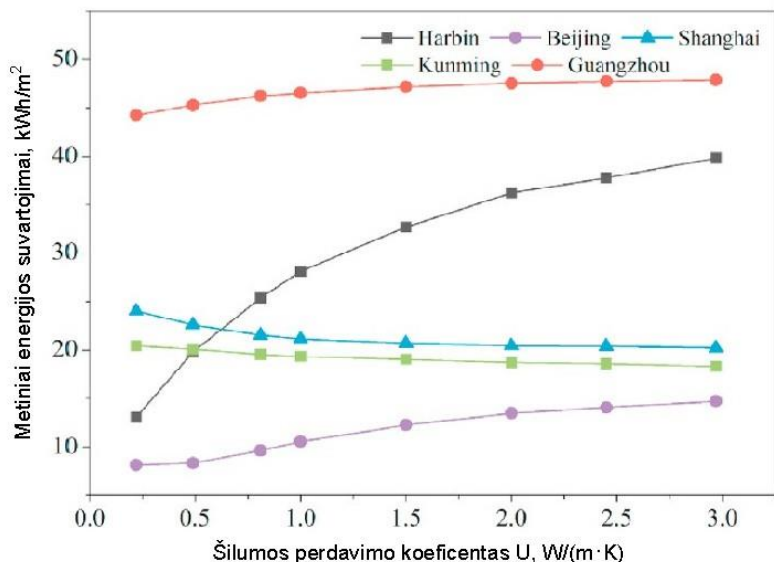


3 pav. Grunto temperatūros pasiskirstymas priklausomai nuo gylio [6]

1.4. Požeminių pastatų energijos poreikio priklausomybė nuo atitvarų šilumos laidumo koeficiento vertės

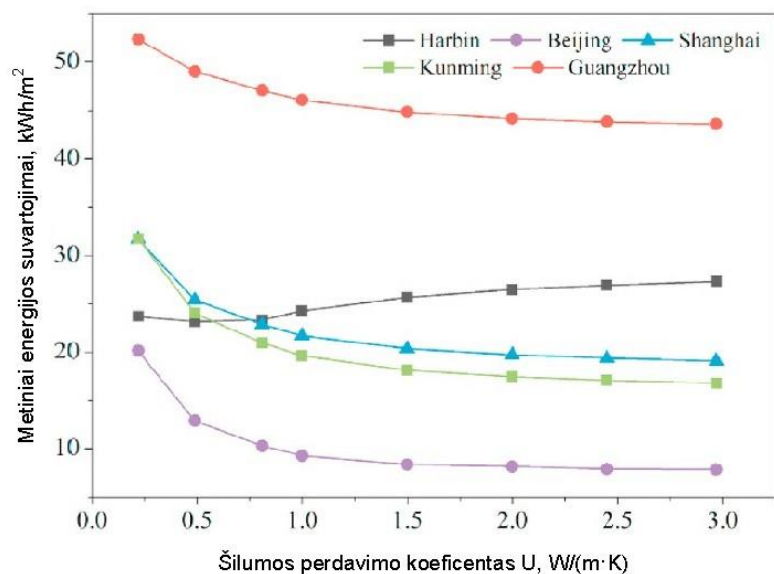
Požeminio pastato šilumos perdavimas per pastato atitvaras, besiribojančias su gruntu, yra esminis uždavinys, norint įvertinti visą pastato energijos suvartojimą. Taip yra todėl, nes požeminis pastatas visu savo išorinio paviršiaus plotu ribojasi su gruntu, tai požeminių pastatų ir išskiria nuo antžeminių konstrukcijų. Be to, šilumos perdavimui tarp grunto ir pastato įtaką daro įvairūs veiksniai, tokie kaip sniego danga, garavimas, žemės užšalimas, drėgmės pernaša, dirvožemio tipas ir pastato funkcija [2].

Pagerėjus antžeminių pastatų atitvarų šiluminei izoliacijai [12, 13], šilumos nuostoliai per pastato atitvaras, besiribojančias su gruntu, tampa santykinai reikšmingesni [14]. Vis dėl to, kaip minėta anksčiau, optimalus šiluminės izoliacijos paskirstymas gali sutaupyti iki 35 % visų šilumos nuostolių iš požeminių konstrukcijų, palyginti su vienodu izoliacijos paskirstymu. Literatūroje analizuojamuose atvejuose, Kinijoje, Harbino mieste modeliuojant supaprastintą biurų pastatą, gaunama, kad didžiausią įtaką požeminio pastato šiluminės energijos poreikiui daro stogo šilumos laidumo koeficientas. Didinant jo reikšmę, skaičiuojami pastato metiniai nuspėjami energijos poreikiai. Kaip matome 5 paveiksle, didėjant U reikšmei, Harbino mieste, energijos poreikis auga ganėtinai drastiškai.



4 pav. Nuspėjami metiniai energijos suvartojimai su skirtingomis stogo U reikšmėmis [2]

Tuo tarpu išorinių sienų bei grindų šilumos perdavimo koeficientas, tokios didelės įtakos kaip stogo, neturi. 5 paveiksle pateikiama, kaip kinta metinis energijos poreikis, didinant išorinių sienų ir grindų U reikšmes.


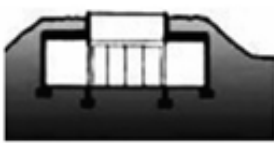








5 pav. Nuspėjami metiniai energijos suvartojimai su skirtingomis sienų ir grindų U reikšmėmis [2]

Su gruntu besiribojančių atitvarų šiluminių charakteristikų gerinimas [15] yra labai svarbus būsimų pastatų projektavimo ir modernizavimo srityse, kurios labai priklauso nuo dinaminio požeminio šilumos perdavimo proceso [16]. J. Szabo ir kt. tirdami sienų ir oro temperatūras požeminėse erdvėse, atlikę tyrimus nustatė, kad storesnė nei 3 cm šiluminė izoliacija nerekomenduojama, nes šilumos srautas į aplinką žymiai nesumažėja padidinus izoliacijos storį [17].

1.5. Kiti veiksniai įtakojantys požeminių pastatų energijos sąnaudas

Reikia atlikti geologinį įvertinimą, siekiant nustatyti dirvožemio savybes, tokias kaip šilumos laidumas, tankis, dirvožemio stiprumas, pamatinės uolienos gylis, gruntinio vandens sluoksnis ir dirvožemio pobūdis [18]. Požeminio pastato energinis efektyvumas ir konstrukcinis vientisumas priklauso ir nuo jo konstrukcijos tipo. Galimos įgilinto pastato konstrukcinės koncepcijos pateiktos 6 paveiksle [19].

Požeminių pastatų tipai	Atvirų fasadų tipai		
			
Iškylus	Atriumas	Pakeltas su atvira siena	Dalinai įgilintas su atvira
			
Lygus	Atriumas	Pakeltas su atvira siena	Dalinai įgilintas su atvira

6 pav. Galimos įgilinto pastato konstrukcinės koncepcijos [19]

Dirvožemio ir natūralios ventiliacijos pritaikymas gali reikšmingai sumažinti energijos suvartojimą požeminiame pastate. Įgilintas pastatas yra vienas iš efektyviausių būdų sumažinti vėsinimo ir šildymo apkrovas bei stabilizuoti patalpų temperatūrą esant skirtingam klimatui. Tačiau yra keletas svarbių veiksnių, į kuriuos reikia atsižvelgti projektuojant požeminį pastatą, pavyzdžiui, konstrukcijos tipas (žr. 6 pav.), geologinės savybės, psichologiniai ir fiziologiniai klausimai, taip pat vėdinimo sistemos [19].

1.6. Požeminių pastatų potencialūs privalumai ir trūkumai

1.6.1. Požeminių pastatų potencialūs privalumai

Požeminiai pastatai senovėje daugiausia buvo statomi gyvenimo ir saugumo tikslais, neatsižvelgiant į energijos poreikį. Tačiau dabartinėje, modernioje epochoje, požeminių pastatų plėtra yra viena iš mažai energijos naudojančių pastatų skatinimo strategijų [20]. Literatūroje randama, kad požeminiai gyvenamieji pastatai gali turėti įvairių pranašumų. Atlikus apklausas 30-yje Singapūro statybos kompanijų, paaiškėjo, kad pagrindiniu privalumu laikoma vietos taupymas [21]. Požeminių pastatų plėtra teigiamai veiktų didžiųjų miestų urbanizacijos augimą, jį mažindama. Daugiau vietos būtų

paliekama gamtos ir paveldo kraštovaizdžiams [20]. Toliau išskiriami požeminių pastatų privalumai – mažesnis energijos poreikis pastatui ir pagerėjęs patalpų šiluminis komfortas [20]. Pastatas, esantis po žeme, yra padengtas natūralia izoliacine terpe – gruntu. Dėl grunto šilumos akumuliacinių savybių ir didelio terminio masyvumo, pastato išorėje metinis temperatūrų svyravimas daug mažesnis, nei lyginant antžeminių pastatų atveju. Jiayin Zhu ir kt. tirdami požemines gyvenamąsias erdves Miaoshang kaime, atlikę kokybinę analizę atskleidė, kad į klimatą reaguojančios požeminių būstų strategijos buvo veiksmingos mažinant pastato energijos sąnaudas ir pagerinant jo šiluminį komfortą [22]. A. Bidarmaghz ir kt. tirdami modeliuotą atvejį Londone, nustatė, kad iki 50 % miesto rajono šilumos poreikio gali būti tiekiama naudojant geoterminius įrenginius, panaudojant sukauptą šiluminę energiją po pastatais mieste, todėl CO² emisija sumažėja maždaug 33 % [23]. Energijos naudojimo efektyvumo didinimas ir energijos suvartojimo pastatuose mažinimas yra labai svarbūs siekiant energijos taupymo ir anglies dvideginio išmetimo kontrolės tikslų [24]. Sezoninis šilumos kaupimas grunte, panaudojant sukauptą saulės energiją jame, prireikus kompensuoti šilumos nuostolius iš pastato, suteikia plačias galimybes. Viena iš jų – saulės energija padengti dalines šildymo apkrovas su mažesnės galios sistemomis. Dėl to ateityje būsime ne taip priklausomi nuo iškastinio kuro išteklių, o anglies pėdsakas, paliekamas atmosferoje, artimiausiu metu pradės mažėti [25]. Kaip požeminių pastatų privalumas, taip pat išskiriamas didesnis pastato atsparumas išorės triukšmui ir padidėjęs privatumas.

1.6.2. Požeminių pastatų potencialūs trūkumai

Apklaustos rezultatai atskleidė, kad ribotas natūralios šviesos patekimas į pastato vidų buvo didžiausias trūkumas, po kurio sekė didelės statybų išlaidos. Požeminių gyvenamųjų pastatų statybos išlaidos yra didesnės nei antžeminių gyvenamųjų pastatų, nes požeminiai gyvenamieji pastatai reikalauja daug kasimo, atramos ir ilgalaikės išorinės atramos darbų, kurie yra labai brangūs. Tokių statinių statybos metu gali kilti ir aplinkosauginių problemų, kaip hidrologinių sąlygų pakitimas aplink vietovę, taršos atsiradimas, gretimų konstrukcijų nusėdimas. Klimato izoliacija taip pat išskiriama kaip trūkumas. Požeminiai gyvenamieji pastatai yra izoliuoti nuo išorės aplinkos, todėl tokiems pastatams reikalingas mechaninis vėdinimas, kad būtų užtikrinama tinkama oro kokybė. Galiausiai gyventojų psichologinis nusistatymas ir susirūpinimas – požeminiai pastatai žmonėms asocijuojasi su tamsiomis, niūriomis erdvėmis, baime likti įkalintam, patirti maisto ar deguonies trūkumą [21].

2. Tyrimų metodika

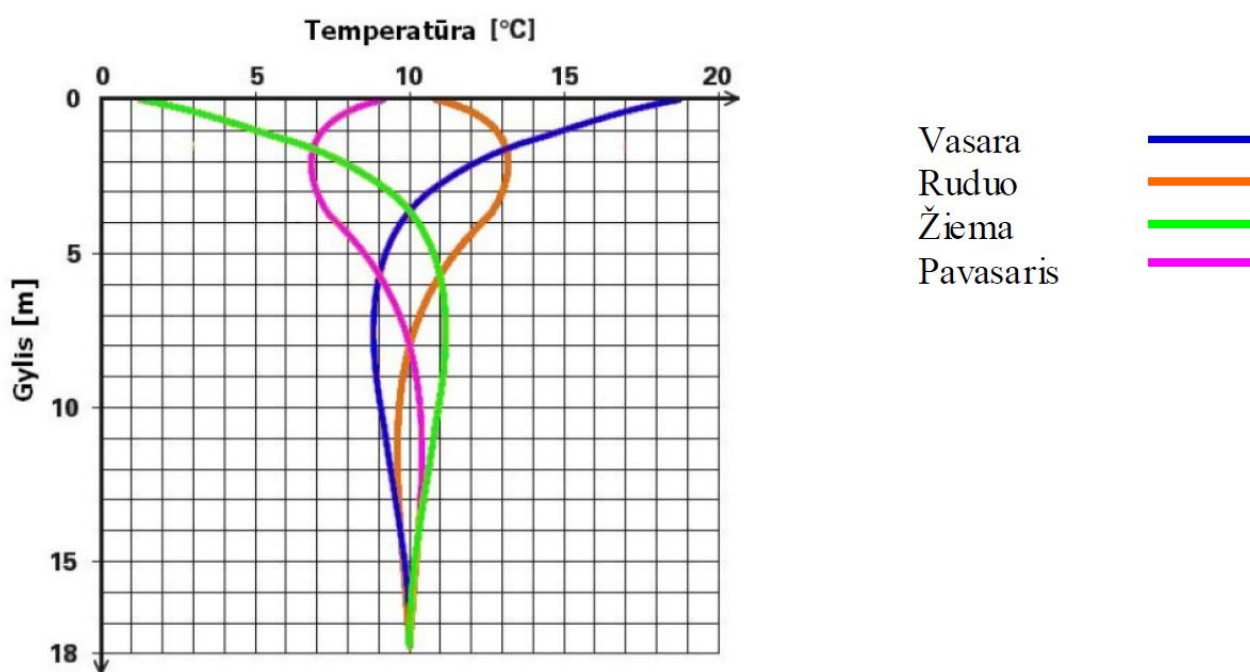
2.1. Pradiniai duomenys

2.1.1. Pastato parinkimas

Tiriamas dviejų aukštų gyvenamosios paskirties pastatas, 9 m pločio ir 9 m ilgio, pastato aukštis 6 m, stogas sutapdintas. Išorinių atitvarų šilumos laidumo koeficientas pasirenkamas pagal reikalavimus A++ klasės pastatams. Numatoma, kad pastate šildomos grindys pirmame ir antrame aukštuose. Pastato šilumos šaltinis šilumos siurblys – „oras - vanduo“. Pastate numatyta mechaninio vėdinimo sistema su rotaciniu šilumokaičiu, šilumos atgavimo naudingumas ne mažesnis nei 85 %.

2.1.2. Lauko sąlygos

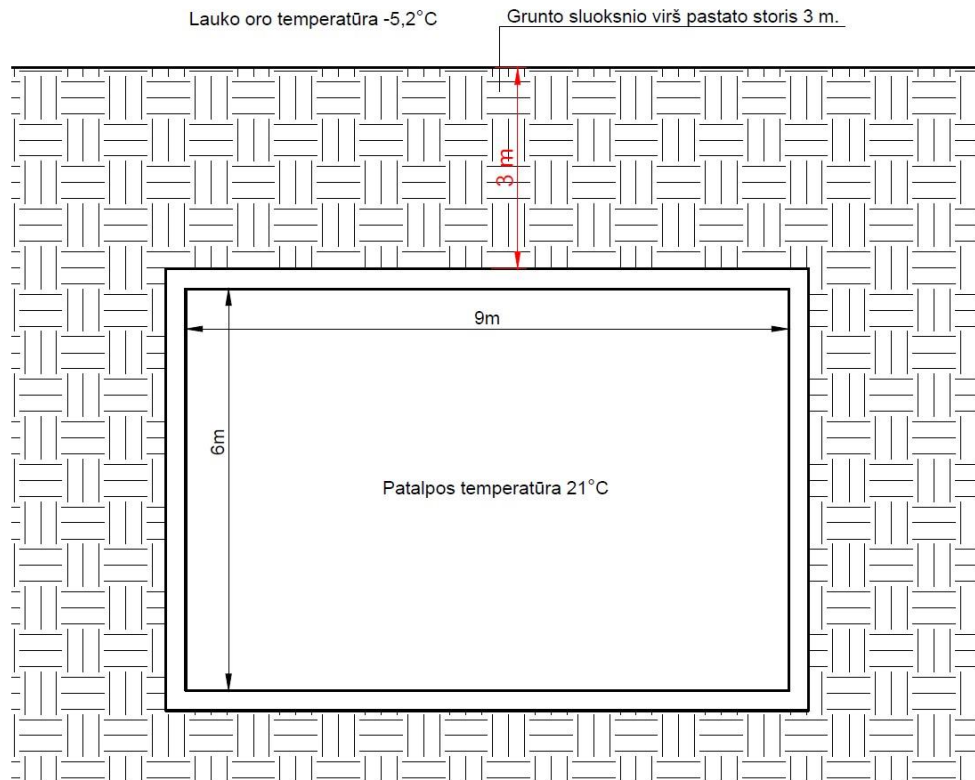
Remiantis RSN 156-94 „Statybinė klimatologija“ [26], pasirenkamos lauko oro sąlygos, Kauno mieste, šaltojo periodo, sausio mėnesio, vidutinė lauko oro temperatūra: $T_{vid} = -5,2$ °C. Šiltojo periodo, birželio mėnesio $T_{vid} = +16,2$ °C. Pereinamojo laikotarpio rudens ir pavasario, atitinkamai spalio ir balandžio mėnesiai, su T_{vid} reikšmėmis $+7,1$ °C ir $+5,8$ °C. Vertikalus išilginis sezoninis grunto temperatūros profilis Lietuvoje pateiktas 6 paveiksle [27, 28].



7 pav. Vertikalus išilginis sezoninis grunto temperatūros profilis Lietuvoje [27, 28]

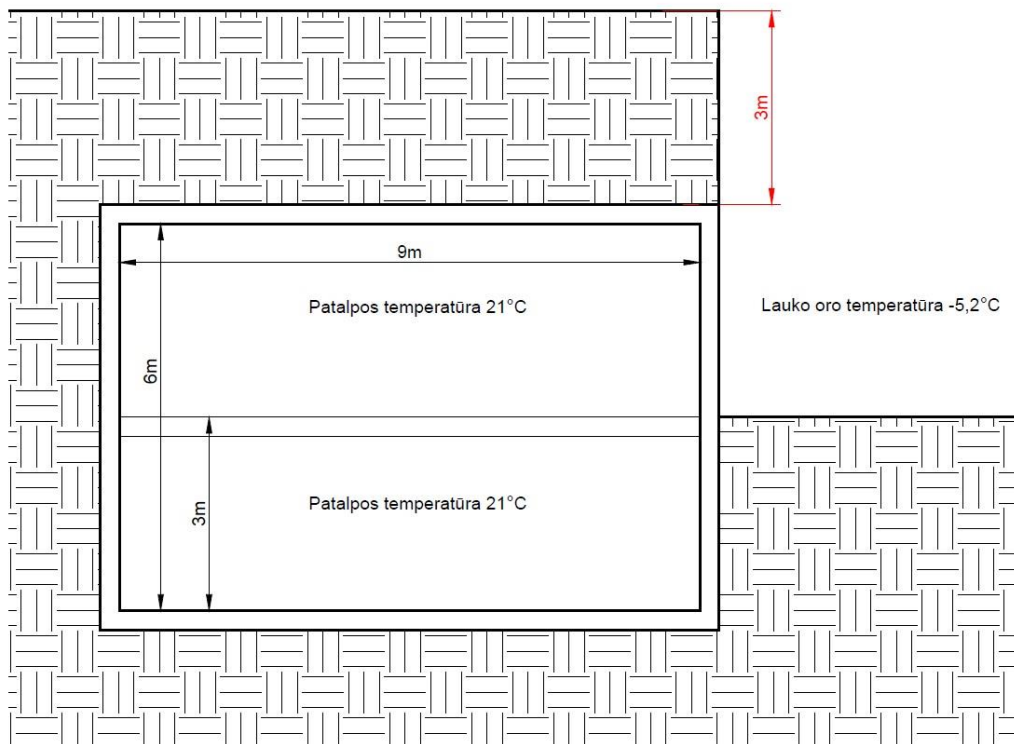
2.2. Tyrimo eiga

Pastatas (žr. 7 pav.) modeliuojamas ANSYS programinėje aplinkoje. Pradinis modelis – kuomet pastatas pilnai įgilintas, o grunto sluoksnio storis virš jo 3 m. Grunto temperatūra pasirenkama remiantis 6 paveiksle pateikta informacija. Modeliuojami pastato šilumos mainai su supančia aplinka ir randamas grunto temperatūrinis profilis.



8 pav. Supaprastinta modeliujamo pastato schema

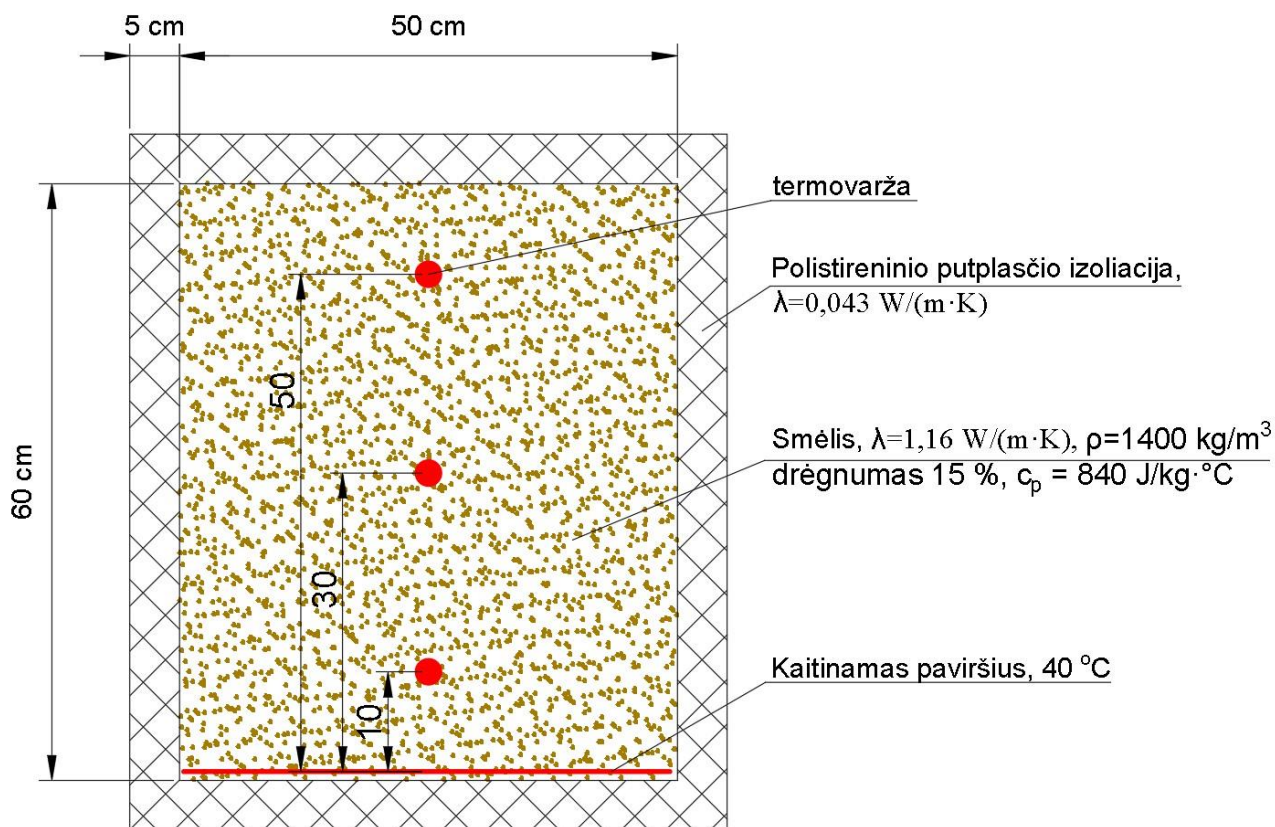
Toliau modeliujamas pastatas, kuris padengtas gruntu, tačiau vienas iš pastato fasadų paliekamas besiribojantis su aplinkos oru. Pastato supaprastinta schema pateikta 8 paveiksle.



9 pav. Supaprastintas modeliujamo pastato su vienu atviru fasadu vaizdas

Modelyje bus analizuojamas laike nusistovėjęs šilumos mainų procesas. Pastate numatoma vidutinė oro temperatūra +21 °C. Skaičiuojami nuostoliai, randamas šilumos poreikis ir lyginamas su antžeminio pastato šilumos poreikiu. Papildomai, keičiamos grunto bei lauko oro temperatūros, imituojant vasaros, rudens ir pavasario sezonus. Atliekami šiluminės energijos poreikių skaičiavimai, gauti rezultatai lyginami su antžeminio pastato šiluminės energijos poreikiais.

Skaitinio modelio patikrai taip pat sumodeliuotas ir laboratorinis stendas, kuriuo atliekami eksperimentiniai tyrimai [29]. Stendas stačiakampio formos, 50x50x60 cm. Visas tūris užpildomas vidutinio grūdėtumo smėliu, o iš išorės apšiltinamas polistireninio putplasčio izoliacija. Pagal užpildo tankį ir drėgnumą pasirenkamas šilumos laidumo koeficientas, remiantis 2 lentelėje pateiktais duomenimis. Modeliuojamo stendo schema pateikta 9 paveiksle. Modeliuojamas laike kintantis šilumos mainų procesas, skaičiuojama proceso trukmė 3 valandos 48 minutės.

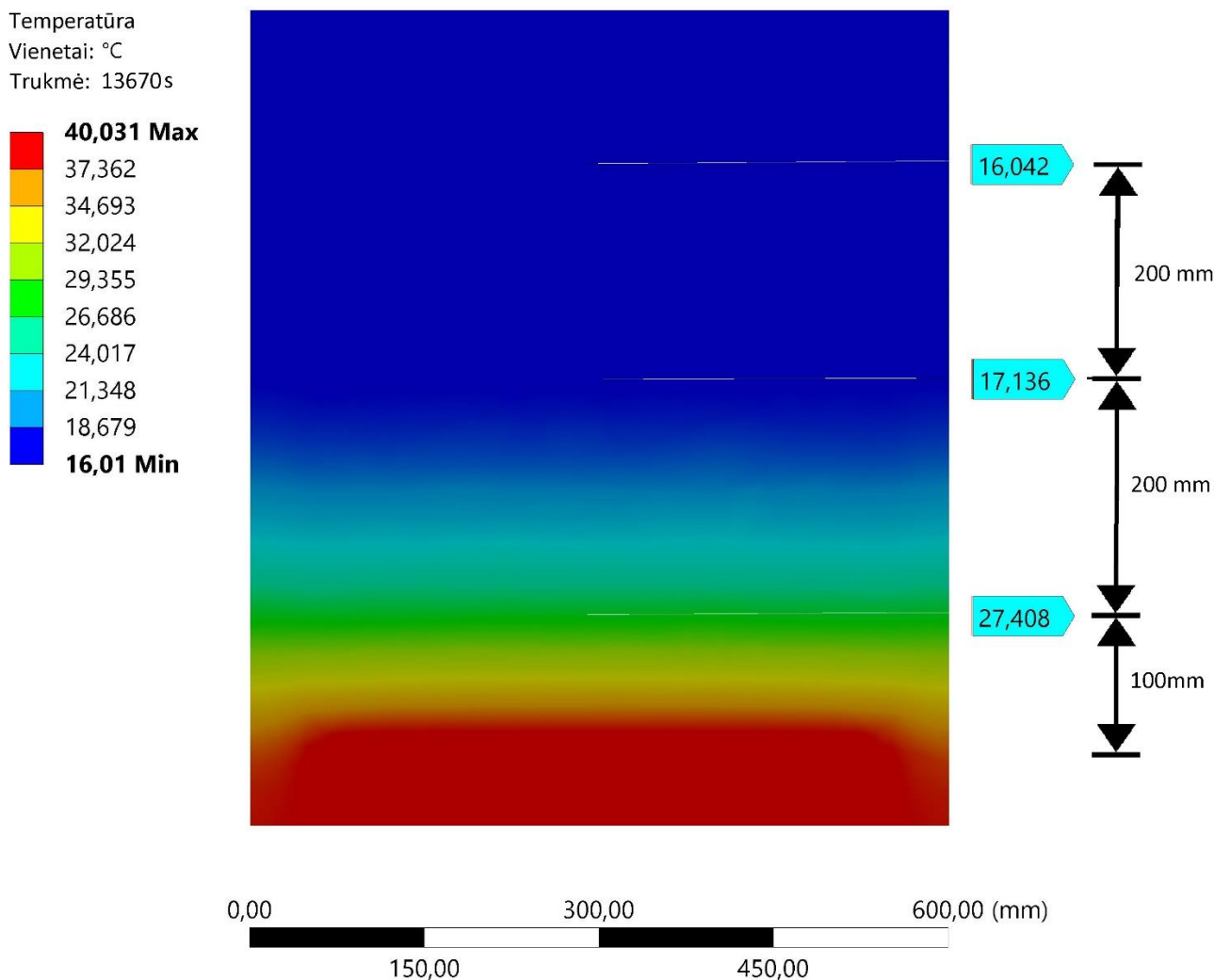


10 pav. Modeliuojamo laboratorinio stendo schema

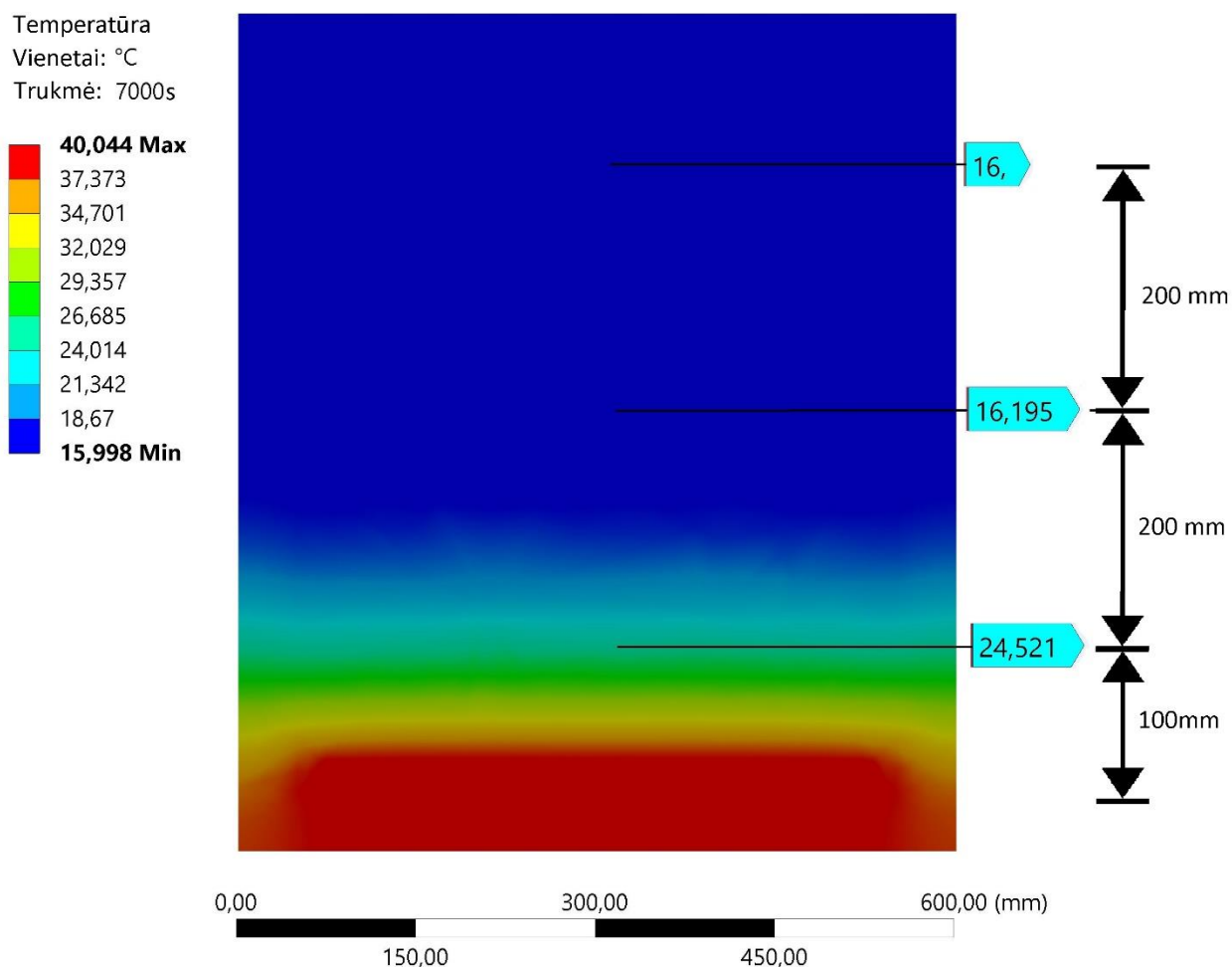
3. Gauti rezultatai

3.1. Laboratorinio stendo skaitinis modelis

Laboratorinio stendo patikrinimui buvo atliktas skaitinis stendo šilumos perdavimo proceso, kintančio laike, modeliavimas pagal pateiktą schemą 9 paveiksle. Gautas grunto temperatūrinis laukas pagal temperatūros jutiklių atstumą nuo kaitinamojo paviršiaus (40 °C) skaitiniame stendo modelyje pateiktas 10 paveiksle. Smėlio užpildo temperatūros reikšmės nustatytos 10, 30 ir 50 cm atstumu, po 3 valandų 48 minučių (žr. 10 pav.). Temperatūrinis laukas ir gautos temperatūros reikšmės nuskaitomos ir po 1 h 57 min. Gauti rezultatai pateikiami 11 paveiksle.



11 pav. Laboratorinio stendo temperatūrinis laukas skaitiniame modelyje po ($t = 3 \text{ h } 53 \text{ min}$)



12 pav. Laboratorinio stendo temperatūrinis laukas skaitiniame modelyje po 1 h 57 min

Remiantis S. Sabaliausko [29] su laboratoriniu stendu atliktu tyrimu, sudaromas gautų eksperimentinių ir skaitinių tyrimų rezultatų palyginimas, rezultatai pateikiami 4 lentelėje.

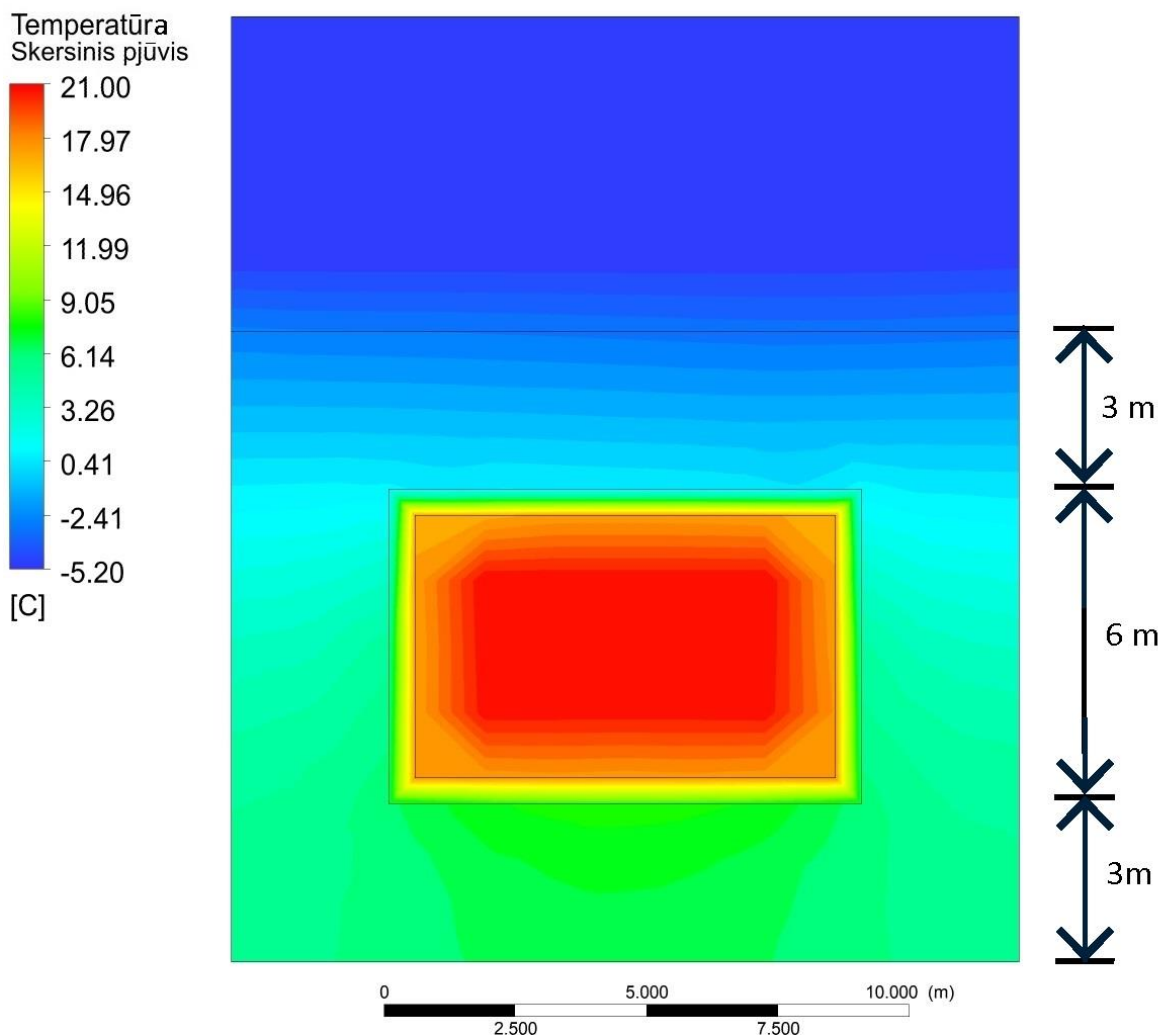
4 lentelė. Gautų eksperimentinių ir skaitinių rezultatų palyginimas

	Rezultatai po 7000 s			Rezultatai po 13670 s		
	10	30	50	10	30	50
Matuojamo taško atstumas nuo kaitinamo paviršiaus, cm	10	30	50	10	30	50
Reikšmė gauta laboratorinio tyrimo metu, °C	24,318	16,049	16,077	26,752	16,678	16,135
Reikšmė gauta skaitiniame modelyje, °C	24,521	16,197	16,000	27,408	17,136	16,042
Gautų reikšmių skirtumas, %	0,835	0,922	0,479	2,452	2,746	0,576

Iš gautų rezultatų nustatyta, kad didžiausias temperatūrų neatitikimas siekia apie 2,75 %. Galima teigti, kad skaitinis modelis patikimas ir pateikia rezultatus, kuriais galima remtis tolimesniuose modeliavimuose.

3.2. 3 m pilnai įgilinto pastato skaitinis modelis

Atliktas pirminis modeliavimas pagal 8 pav. pateiktą schemą. Pastatas įgilinamas 3 metrus, grunto temperatūra pasirinkta +10 °C, išorės oro temperatūra -5,2 °C, pastato viduje +21 °C . Gautas temperatūros pasiskirstymas pjūvyje pateiktas 12 paveiksle. Pjūvis daromas vertikaliai per pastato centrą.



13 pav. Įgilinto pastato ir jį supančio grunto temperatūrinis profilis

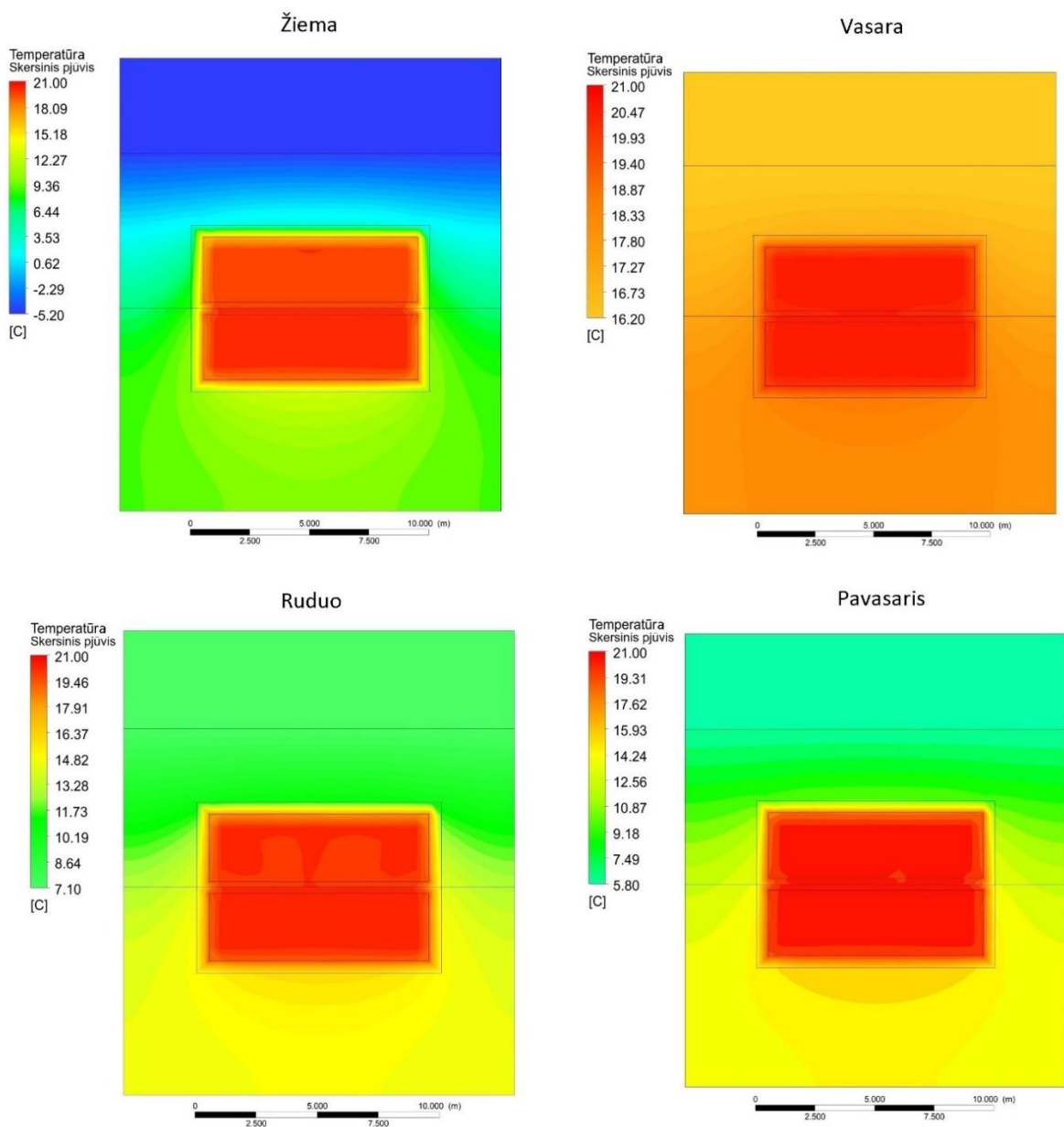
Pateiktame temperatūros pasiskirstymo profilyje, temperatūra pastato viduje išlieka užduota pradinė, tik prie pastato išorinių sienų sumažėja dėl šilumos nuostolių į aplinką. Grunto, trijų metrų gylyje ir žemiau, temperatūra siekia 1,5 °C ir didėja iki modelyje užduotos 10 °C temperatūros. Galima teigti, kad grunto temperatūra iki 3 m gylio labiausiai priklauso nuo lauko oro temperatūros ir kinta ribose: $T = -5,2 \text{ °C} \div +0,41 \text{ °C}$.

Pagal gautą grunto temperatūrinį profilį, daroma prielaida, kad pastato stogo izoliacijai turi būti skirtas didžiausias dėmesys. Tolimesniam įgilinto pastato su atviru fasadu modeliavimui, kaip optimaliausias variantas, pasirenkamas 3 m storio grunto sluoksnis virš pastato.

3.3. Įgilinto pastato 3 m po gruntu, su atviru fasadu, skaitinis modelis

3.3.1. Grunto temperatūriniai profiliai

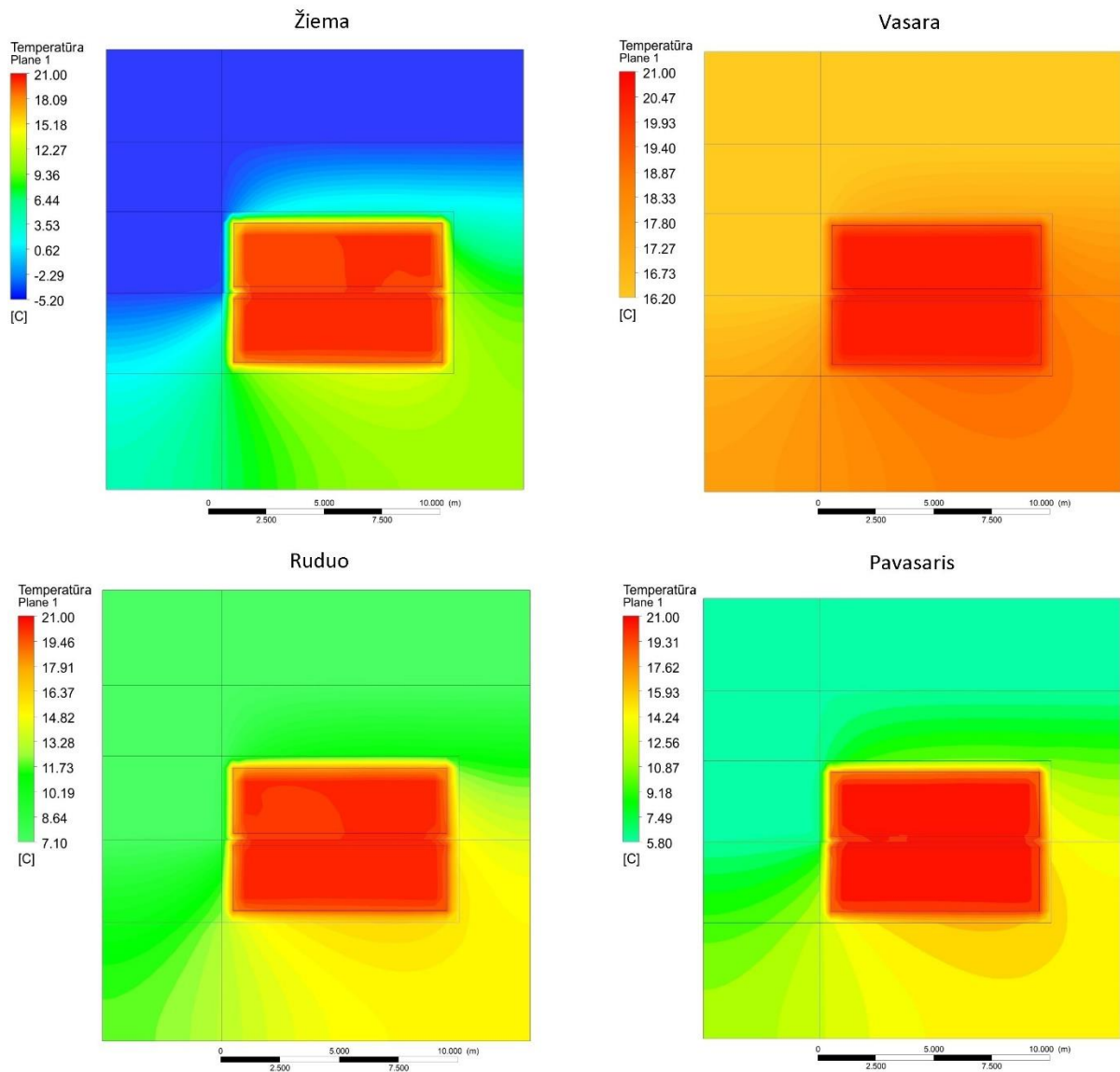
Atlikti keturi skirtingi sezonų modeliavimai ANSYS programinėje aplinkoje. Pastato geometrija ir temperatūros parenkamos pagal 8 paveiksle pateiktą informaciją. Žiemos, vasaros, rudens ir pavasario sezonams vidutinė lauko oro temperatūra parenkama remiantis RSN 156-94 „Statybinė klimatologija“, 2.1 lentelė [23]. Grunto temperatūra pasirenkama iš grafiko pateikto 6 paveiksle. Gauti rezultatai fiksuojami pjūviuose, darytuose per pastato centrą arba grunte, 25 cm atstumu nuo įgilinto pastato sienų, grindų ir stogo. Pjūviai prie pastato sienų daromi 25 cm atstumu, kad fiksuoti grunto temperatūrinį profilį kuo arčiau pastato. Nusistovėjęs laike, šilumos mainų procesas, tarp įgilinto pastato ir grunto, skersiniuose pjūviuose pateikiamas 13 ir 14 paveiksluose.



14 pav. Įgilinto pastato ir grunto temperatūrinis profilis nr.1, priklausomai nuo metų laiko

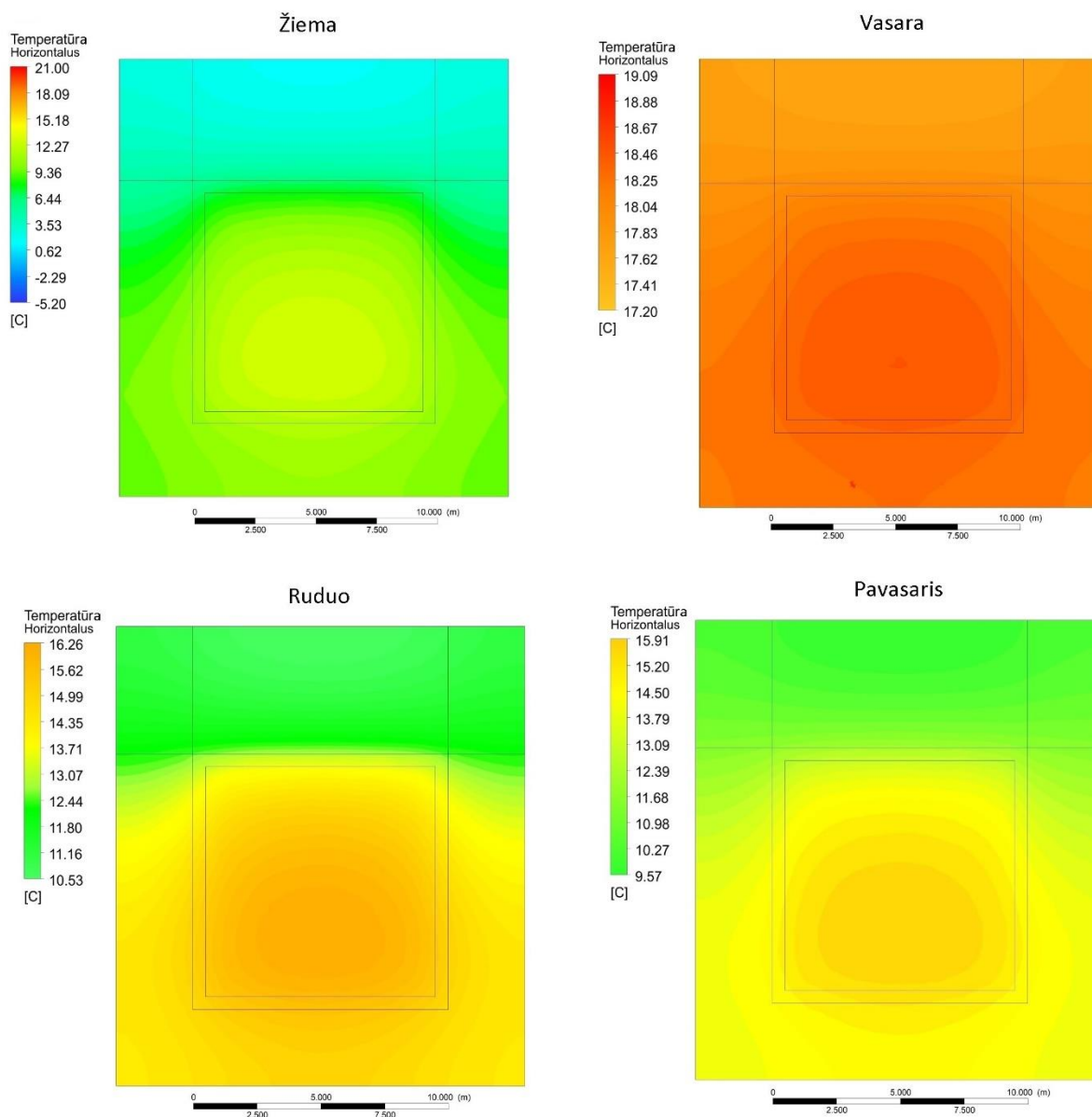
Žiemos metu gaunamas temperatūrų pasiskirstymas apima didžiausią intervalą, nuo $-5,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $+21\text{ }^{\circ}\text{C}$. Žemiausia grunto temperatūra vyrauja iki 2,5 m gylio. Tokią temperatūrą lemia nuolatinis grunto ir lauko oro sąveika. Virš pastato stogo matomas temperatūros profilio linkis, kurį lemia šilumos srautas per pastato stogą į gruntą. Šioje vietoje, dėl didžiausio temperatūros skirtumo tarp pastato ir grunto, šilumos nuostoliai didžiausi, nes šilumos mainų procesas vyksta sparčiausiai. Grunte, aplink pastato pirmą aukštą, temperatūros kitimas ryškiausias, o nuo nulinio aukšto viršaus šilumos mainų procesas vienodėja ir temperatūrų pasiskirstymas gaunamas tolygesnis. Remiantis gautais temperatūriniais profiliais, pateiktais 13 ir 14 paveiksluose, aukščiausia grunto temperatūra gaunama po pastatu ir už pastato apatinio aukšto galinės sienos, ji siekia apie $+12 \div +13\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ties pastato priekine siena, įėjimu į pastatą, lauko oro temperatūra įtakoja ir grunto, esančio priešais nulinio aukšto priekinę sieną, temperatūrą. Gaunamas didesnis temperatūros pokytis, temperatūra prie sienos po gruntu didesnė, o tolstant mažėja dėl aplinkos temperatūros.

Vasaros metu temperatūrų pasiskirstymas apima mažiausią intervalą iš simuliuotų atvejų. Gruntas iki 2,5 m labiausiai įtakojamas išorės faktorių bei lauko oro temperatūros ir pasiekia panašią temperatūrą kaip ir lauko oro. Didesnis grunto šiluminis įkrovimas gaunamas už pastato ir po juo, ties apatiniu pastato aukštu. Tačiau skirtingai nei žiemos atveju, temperatūrų skirtumas, tarp pastato vidaus ir grunto aplink jį, siekia iki $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vasaros modeliavimo atveju, grunte virš pastato stogo, gaunamas temperatūrinio profilio pokytis, tačiau turint nežymius temperatūrų skirtumus tarp pastato ir išorės, šilumos mainų procesas vyksta lėtai, gaunami mažesni šilumos nuostoliai į aplinką.



15 pav. Įgilinto pastato ir grunto temperatūrinis profilis nr.2, priklausomai nuo metų laiko

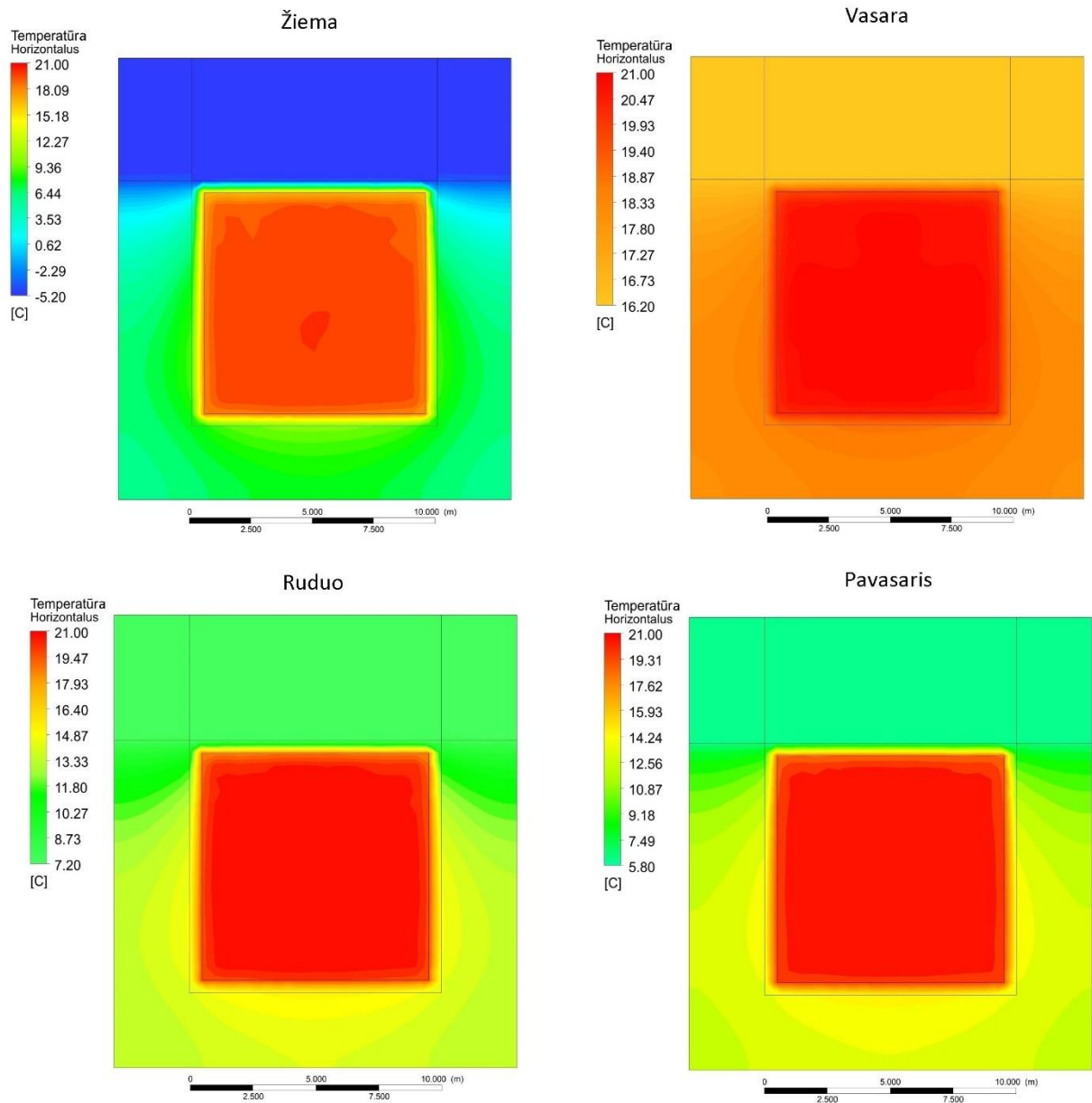
Rudens ir pavasario modelių temperatūriniai profiliai panašūs. Tačiau pavasario metu, kai po žiemos sezono grunto temperatūra būna žemesnė, gaunamas temperatūrinis profilis virš pastato stogo yra panašus į žiemos modelio atveju gautąjį. Tuo tarpu, rudens atveju, toks reiškinys nefiksuojamas. Ryškesnis temperatūrų pasiskirstymas rudens ir pavasario simuliacijose gaunamas grunte, priešais nulinio aukšto priekinę sieną. Tam įtaką daro grunto, esančio giliau, sukauptas šilumos kiekis. Didžiausia grunto temperatūra, analogiškai kaip ir žiemos bei vasaros atvejais, gaunama po pastatu ir už jo.



16 pav. Grunto temperatūrinis profilis grunte, po įgilinto pastato grindimis, priklausomai nuo metų laiko

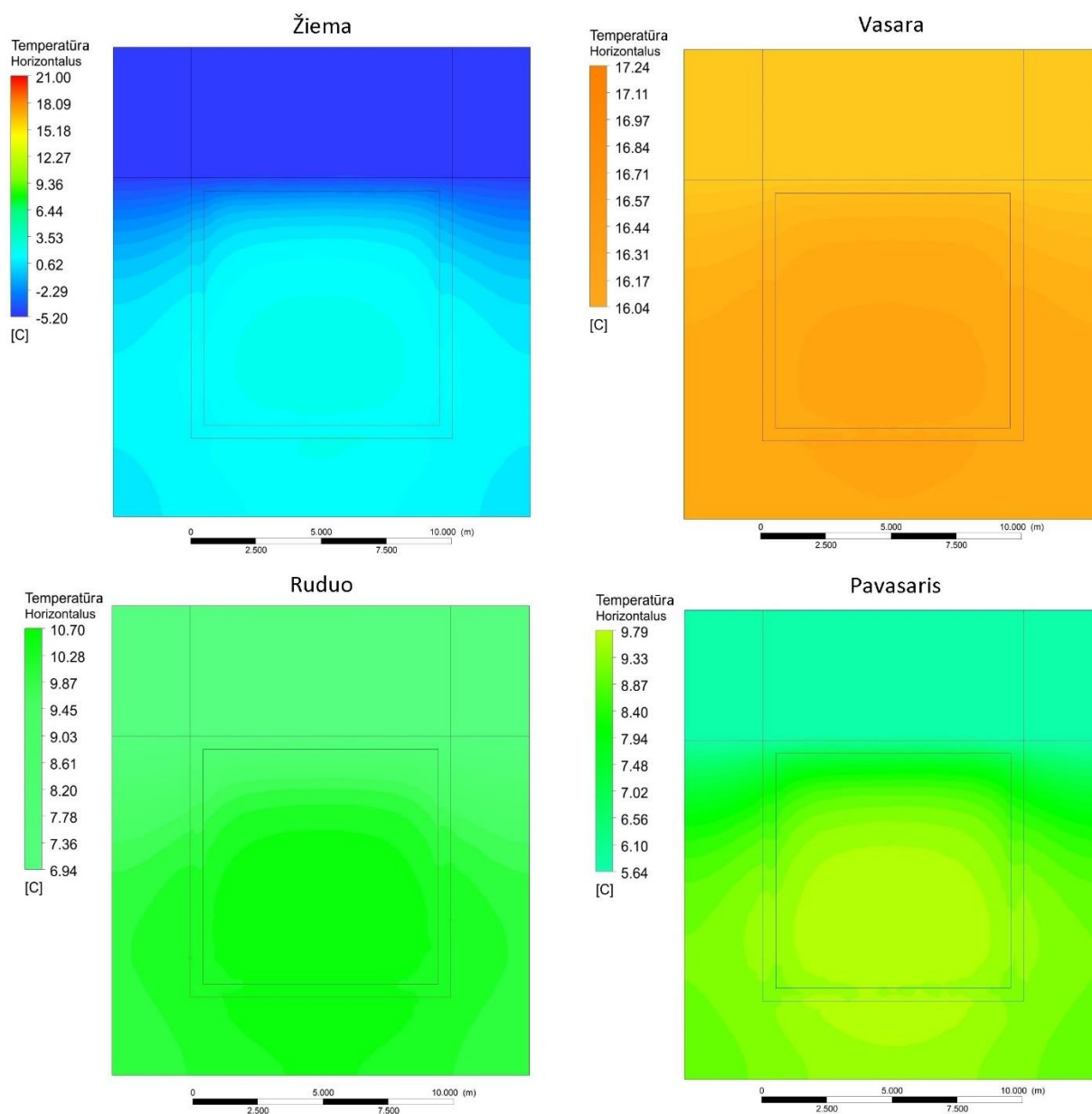
15 paveiksle pateikiami grunto temperatūriniai profiliai po įgilinto pastato grindimis, priklausomai nuo metų laiko. Matoma, kad grunto temperatūra 3,25 m gylyje vis dar labai įtakojama išorės veiksnių, šiuo atveju lauko oro temperatūros. Tai labiau pastebima tolstant nuo nulinio aukšto priekinės sienos. Žiemos metu grunto temperatūra šioje zonoje fiksuojama nuo +2 °C iki +3,5 °C, vasaros metu nuo +17,2 °C iki +17,83 °C, rudenį nuo +10,53 °C iki +12,0 °C, pavasarį nuo +9,57 °C iki +11,33 °C. Iš dalies, toks pat poveikis matomas ir ties šoninėmis sienomis. Tačiau einant gilyn, grunto temperatūra ir suakumuliuotas šilumos kiekis didėja, labiausiai tai matoma po pačiu pastatu bei toliau už jo galinės sienos.

Darant horizontalius pjūvius ties pirmu aukštu (žr. 16 pav.) gaunamas temperatūrinis profilis panašus kaip ir 15 paveiksle, tačiau lauko oro temperatūros poveikis gruntui, esančiam pastatui iš kraštų, prie pirmo aukšto priekinės sienos, stiprėja. Toliau, ties šoninėmis ir galine sienomis temperatūros didėja, tačiau yra žemesnės nei gaunamos 15 paveiksle.



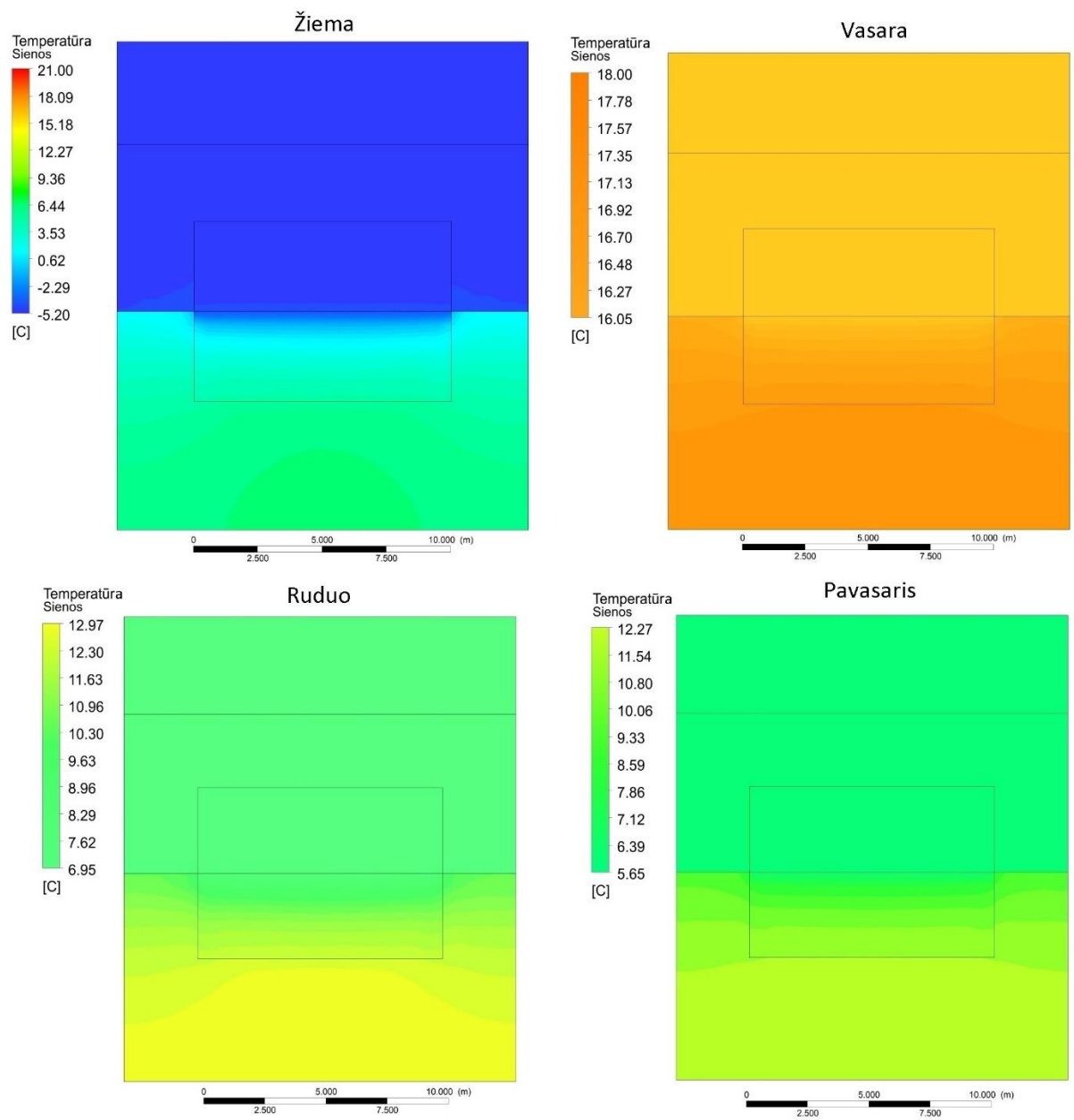
17 pav. Horizontalaus pjūvio, per pastato centrą, temperatūrinis profilis, priklausomai nuo metų laiko

Remiantis gautais grunto temperatūriniais profiliais virš įgilinti pastato stogo, priklausomai nuo metų laiko (žr. 17 pav.) matoma, kad lauko oro įtaka temperatūros pasiskirstymui grunte dar didesnė nei ankstesniais atvejais. Grunto dalis esanti priekyje dar žemesnės temperatūros, o tik nuo vidurio pastato ir giliau į gruntą ji gaunama aukštesnė. Vasaros metu vidutinė lauko oro temperatūra +16,2 °C, temperatūra pastato viduje +21 °C, o grunto 3 m gylyje apie +11 °C. Gruntas esantis virš pastato akumuluoja šiluminę energiją, kuri susideda iš išorės įtakos veiksnių, tiek iš pastato ateinančio šiluminio srauto, todėl grunto temperatūra siekia iki +17,24 °C. Žemiausia temperatūra fiksuojama žiemos sezonu, kuomet turimas didžiausias temperatūrų skirtumas tarp lauko oro ir pastato vidaus bei grunto. Pereinamuoju laikotarpiu grunto šiluminė įkrova taip pat matoma, tačiau ne tokia didelė kaip vasaros atveju.

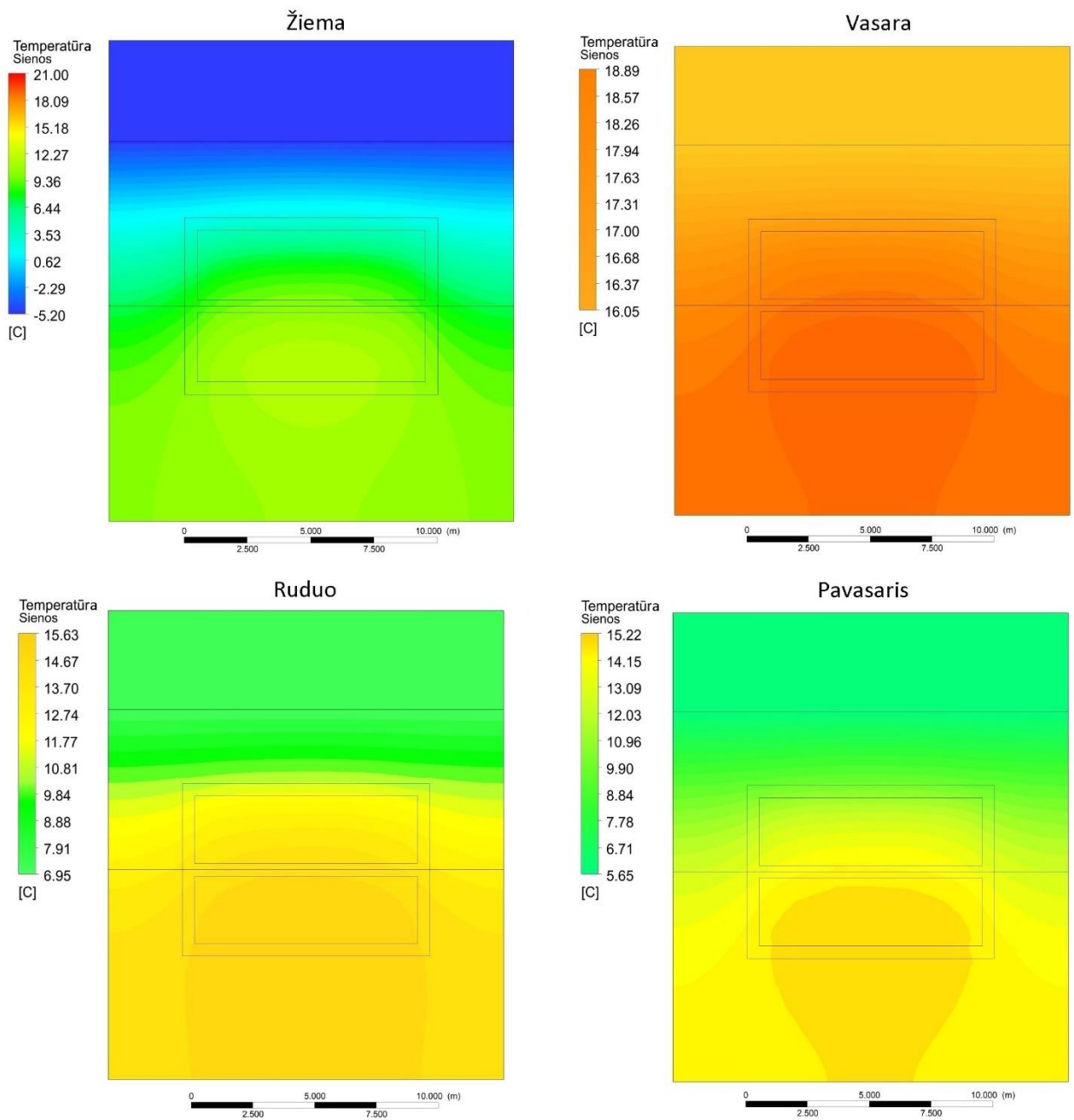


18 pav. Grunto temperatūrinis profilis virš įgilinto pastato stogo, priklausomai nuo metų laiko

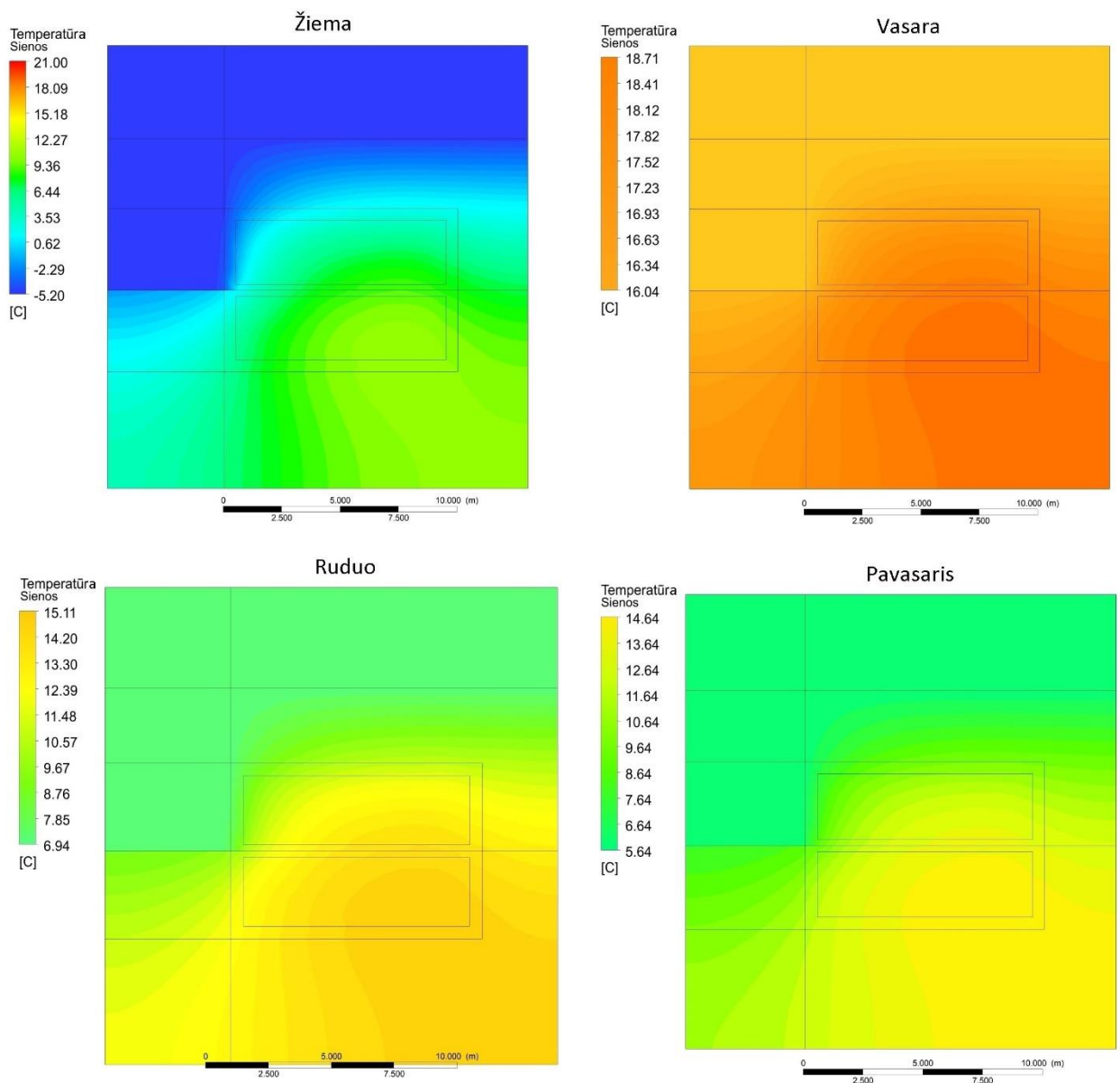
Atsižvengiant į gautus temperatūrinius profilius toliau pateikiamuose 18, 19 ir 20 paveiksluose, ties pastato priekine, galine ir šonine sienomis matoma, kad daugiausiai šilumos grunte suakumuliuojama po pastatu ir už jo. Didžioji dalis grunto įkraunama vasaros laikotarpiu, tačiau šilumine energija gruntas įkraunamas ir nuo pastato šilumos srauto į jį. Šis procesas atrodytų neigiamas, tačiau laikui bėgant grunto temperatūra aplink pastatą didėja, o esant mažesniai temperatūrų skirtumui tarp pastato vidaus ir išorės aplinkos, šiuo atveju grunto, šilumos mainų procesas lėtėja, o šilumos nuostoliai į aplinką mažėja.



19 pav. Grunto temperatūrinis profilis ties įėjimu į pastatą, priklausomai nuo metų laiko



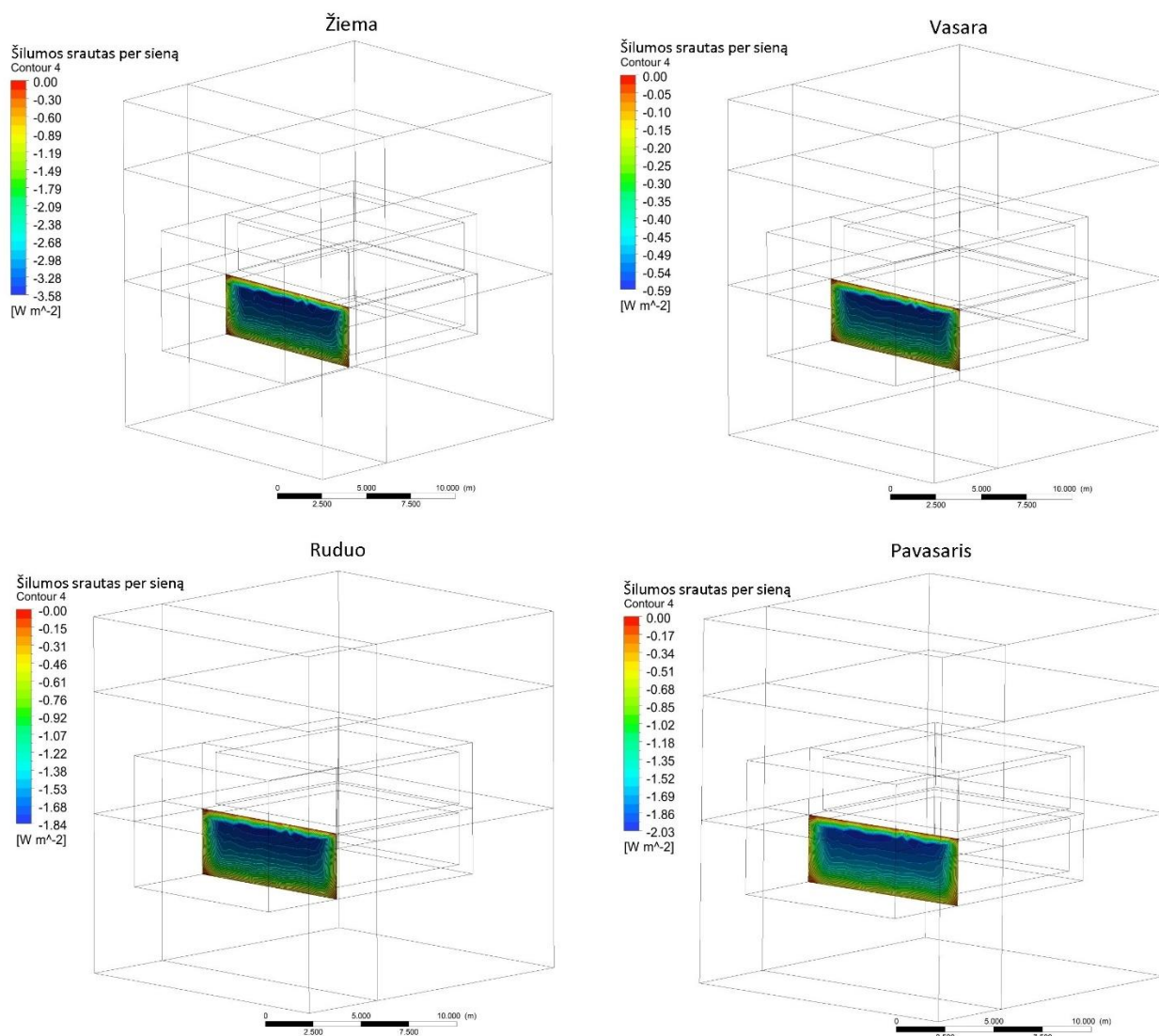
20 pav. Grunto temperatūrinis profilis už pastato galinės sienos, priklausomai nuo metų laiko



21 pav. Grunto temperatūrinis profilis ties šoninėmis pastato sienomis, priklausomai nuo metų laiko

3.3.2. Šilumos srautas per pastato atitvaras

Atlikus modeliavimą ANSYS programinėje aplinkoje, toliau yra analizuojami pastato šilumos srautai priklausomai nuo metų laiko. Šilumos srauto intensyvumas per pastato priekinę sieną, besiribojančią su gruntu pateikiamas 21 paveiksle. Spalvų aprašyme matomos vyraujančio šilumos srauto kitimo ribos nuo minimalios iki maksimalios reikšmės. Visuose variantuose matoma, kad šilumos srautas didėja sienos viršutinėje dalyje, tai labiausiai įtakoja lauko išorinės sąlygos – žemesnė temperatūra nei pastato viduje ar grunte. Didžiausias šilumos srautas fiksuojamas žiemos sezono metu ir siekia $-3,58 \text{ W/m}^2$. Vidutinis šios atitvaros šilumos srautas, paskaičiuotas programoje integruotu skaičiuotuvu: $-2,36 \text{ W/m}^2$. Vasaros laikotarpiu gaunama mažiausia reikšmė, kuri siekia $-0,59 \text{ W/m}^2$, tuo tarpu vidutinė reikšmė lygi $-0,38 \text{ W/m}^2$. Pereinamuoju laikotarpiu, maksimali šilumos srauto reikšmė, rudenį $-1,84 \text{ W/m}^2$, vidutinė visos atitvaros $-1,21 \text{ W/m}^2$, o pavasario metu, atitinkamai maksimali $-2,03 \text{ W/m}^2$, o vidutinė $-1,33 \text{ W/m}^2$.

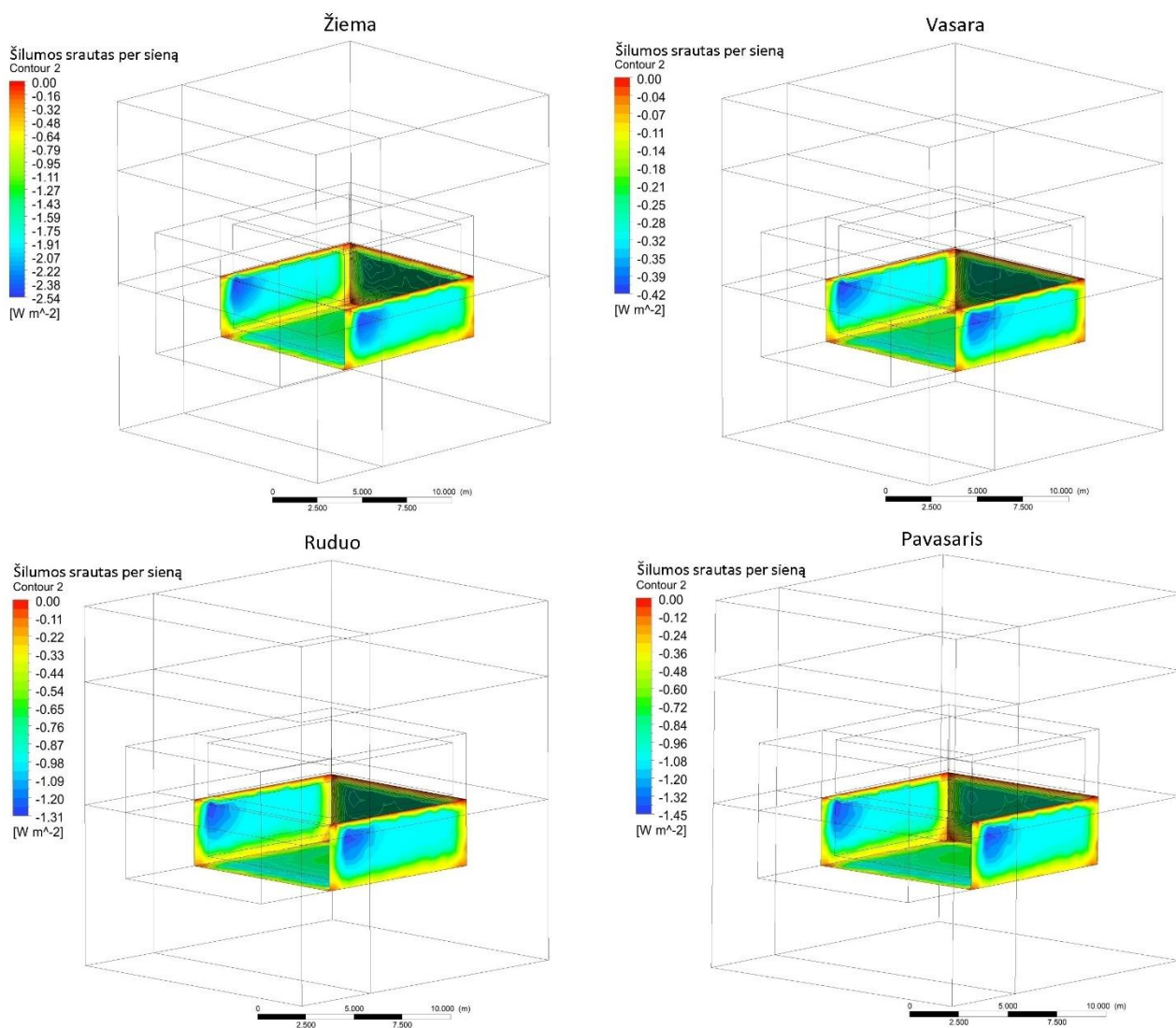


22 pav. Šilumos srautas per pastato priekinę sieną, besiribojančią su gruntu, priklausomai nuo metų laiko

Toliau skaičiuojamas šilumos srautas per nulinio aukšto sienas ir grindis (žr. 22 pav.). Šiuo atveju gaunamos vidutinės reikšmės: šaltuoju metų laiku $-1,31 \text{ W/m}^2$, šiltuoju metų laiku $-0,22 \text{ W/m}^2$, pereinamuoju metų laiku, rudenį $-0,68 \text{ W/m}^2$, pavasarį $-0,75 \text{ W/m}^2$. Vidurkinės reikšmės gaunamos mažesnės, nei anksčiau apskaičiuotu atveju. Galima teigti, kad grunto įkrova šilumine energija teigiamai veikia šilumos mainus tarp pastato ir jį supančio grunto, juos mažindama. Bendrai vertinant visas nulinio aukšto atitvaras, gaunama, kad būtent per priekinę sieną šilumos srautas didžiausias ir turi maksimalią reikšmę, kuri siekia $-3,58 \text{ W/m}^2$, nors pati siena ir yra grunte. Į tai atsižvelgiant galima, teigti, kad ši pastato atitvara turėtų sulaukti daugiau dėmesio parinkinėjant pastato apšiltinimo sluoksnio storį bei šilumos laidumo savybes. Mažindami atitvaros šilumos laidumo koeficiento reikšmę, šilumos srautą būtų galima taip pat sumažinti ir galbūt priartinti prie reikšmių, gaunamų per nulinio aukšto atitvaras (žr. 22 pav.).

Nagrinėjant šilumos srautą per pastato pirmo aukšto sieną, besiribojančią su lauko oru (žr. 23 pav.) bei sienas ir grindis besiribojančias su gruntu (žr. 24 pav.), maksimalios reikšmės gaunamos didesnės lyginant su nulinio aukšto šilumos srautu per priekinę sieną (žr. 21 pav.) bei šonines atitvaras ir grindis (žr. 22 pav.). Didžiausią įtaką didesniam šilumos srautui per pirmo aukšto priekinę sieną lemia

didelis temperatūrų skirtumas tarp pastato vidaus ir išorės. Žiemos metu vidutinė lauko oro temperatūra siekia $-5,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatūra pastato viduje $+21\text{ }^{\circ}\text{C}$, gaunamas temperatūrų skirtumas siekia $26,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. 5 lentelėje pateikiamos pastato pirmo ir antro aukštų, būdingų atitvarų maksimalios šilumos srautų reikšmės, priklausomai nuo metų laiko ir pateikiamas skirtumas išreikštas procentais.



23 pav. Šilumos srautas per nulinio aukšto sienas ir grindis, besiribojančias su gruntu, priklausomai nuo metų laiko

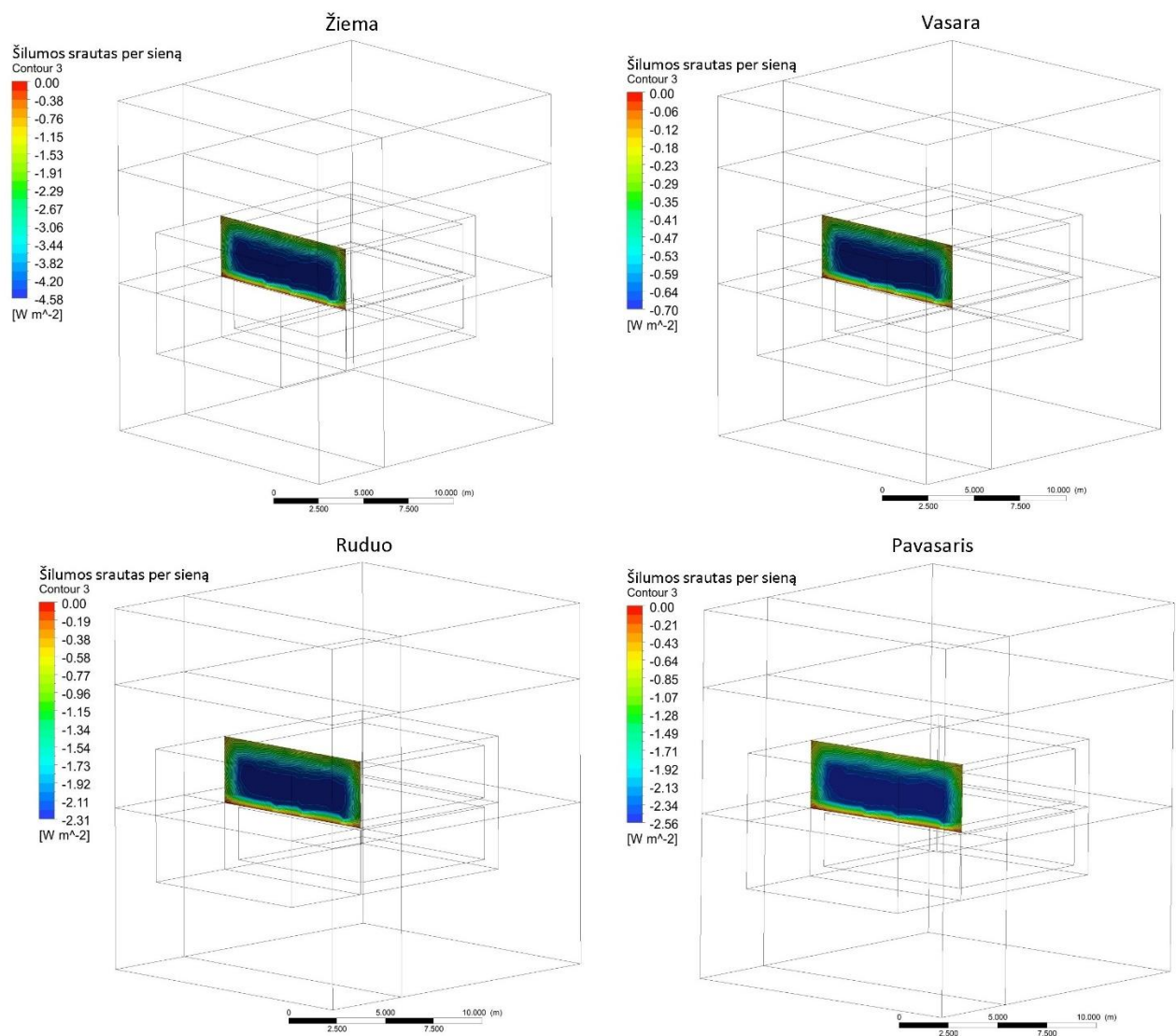
5 lentelė. Maksimalaus šilumos srauto skirtumas tarp skirtingo aukšto atitvarų, priklausomai nuo metų laiko

Pastato aukštas	Atitvaros	Metų laikas	Maksimali šilumos srautas, W/m^2	Skirtumas, %	
				Priekinių sienų	Likusių sienų
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
Nulinis	Priekinė	Žiema	-3,58	21,83	29,64
	Likusios		-2,54		
Pirmas	Priekinė	Žiema	-4,58		
	Likusios		-3,61		

1	2	3	4	5	6
Nulinis	Priekinė	Vasara	-0,59	15,71	26,32
	Likusios		-0,42		
Pirmas	Priekinė	Vasara	-0,70		
	Likusios		-0,57		
Nulinis	Priekinė	Ruduo	-1,84	20,35	27,62
	Likusios		-1,31		
Pirmas	Priekinė	Ruduo	-2,31		
	Likusios		-1,81		
Nulinis	Priekinė	Pavasaris	-2,03	20,70	28,57
	Likusios		-1,45		
Pirmas	Priekinė	Pavasaris	-2,56		
	Likusios		-2,03		

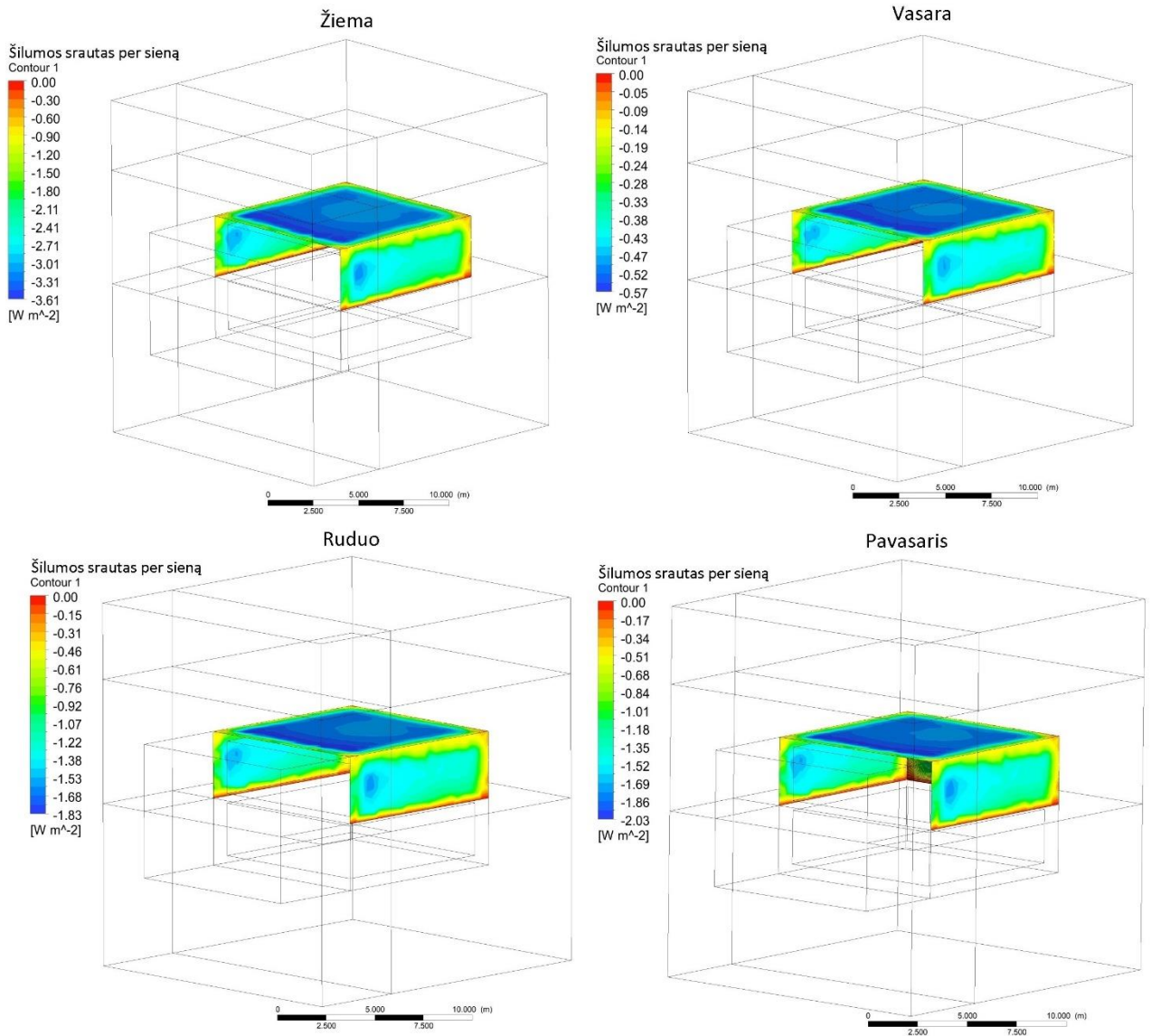
Remiantis 5 lentelėje pateiktais apibendrintais duomenimis, nustatyta, kad žiemos sezono metu fiksuojamas maksimalus šilumos srautas per pastato nulinio aukšto priekinę atitvarą, besiribojančią su gruntu, jis gaunamas 21,83 % mažesnis, lyginant su pirmo aukšto priekine siena, besiribojančia su lauko oru. Tuo tarpu, nulinio aukšto likusių atitvarų maksimali šilumos srauto reikšmė gaunama 29,64 % mažesnė nei pirmo aukšto.

Nors vasaros sezono metu nustatytos mažiausios šilumos srauto reikšmės, tačiau lyginant srautų skirtumus tarp pirmo ir nulinio aukštų, matoma beveik tokia pati tendencija, kaip ir žiemos simuliacijos atveju. Maksimalus šilumos srautas per pastato nulinio aukšto priekinę sieną gaunamas 15,71 % mažesnis nei per pirmo aukšto priekinę sieną, o likusių atitvarų skirtumas tarp nulinio ir pirmo aukšto siekia 26,32 %.



24 pav. Šilumos srautas per pastato sieną, besiribojančią su oru, priklausomai nuo metų laiko

Pereinamo laikotarpio metu, rudens ir pavasario sezonais, taip pat matome tą patį dėsnį, kada lyginamų atitvarų šilumos sruto maksimalių reikšmių procentiniai skirtumai gaunami kaip ir žiemos simuliacijos atveju. Visgi verta pastebėti, kad labiausiai išsiskiriantis palyginimo atvejis yra vasaros metu gaunamų šilumos srautų reikšmių palyginimų skirtumas tarp nulinio ir pirmo aukšto priekinių sienų – 15,71 %.



25 pav. Šilumos srautas per pirmo aukšto sienas ir lubas, besiribojančias su gruntu, priklausomai nuo metų laiko

Naudojantis modeliavimo programoje integruotu skaičiuotuvu, apskaičiuojama reikalinga šildymo galia, kad kompensuoti pastato šilumos nuostolius, priklausomai nuo metų laiko. Suminiai šildymo galios poreikiai skirtingų sezonų metu pateikiami 6 lentelėje.

6 lentelė. Suminiai šildymo galios poreikiai skirtingų sezonų metu

Atitvaros	Sezonas	Šildymo galia, W	Suminė šildymo galia, W
1	2	3	4
Priekinė siena besiribojanti su gruntu	Žiema	82,4624	937,46
Priekinė siena besiribojanti su oru		118,2710	
Nulinio aukšto sienos ir grindys		269,1720	
Pirmo aukšto sienos ir lubos		467,6000	

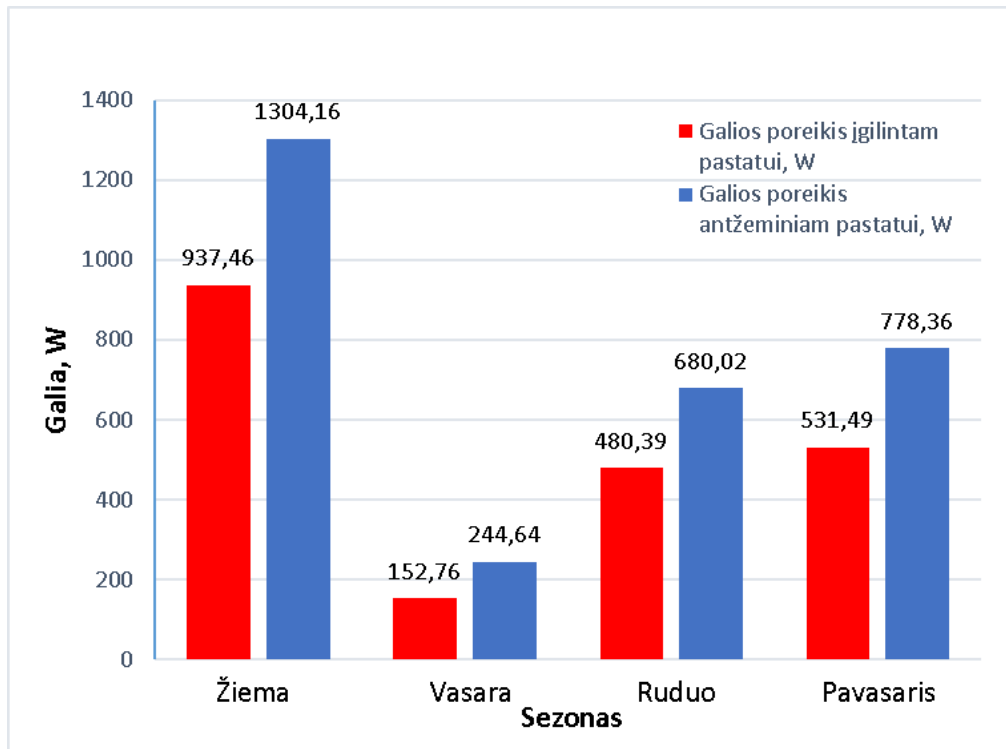
1	2	3	4
Priekinė siena besiribojanti su gruntu	Vasara	13,4353	152,76
Priekinė siena besiribojanti su oru		18,1209	
Nulinio aukšto sienos ir grindys		46,0187	
Pirmo aukšto sienos ir grindys		75,1858	
Priekinė siena besiribojanti su gruntu	Ruduo	42,1731	480,39
Priekinė siena besiribojanti su oru		59,6706	
Nulinio aukšto sienos ir grindys		139,7170	
Pirmo aukšto sienos ir grindys		238,8250	
Priekinė siena besiribojanti su gruntu	Pavasaris	46,6832	531,49
Priekinė siena besiribojanti su oru		66,0814	
Nulinio aukšto sienos ir grindys		154,3690	
Pirmo aukšto sienos ir grindys		264,3540	

Remiantis pradinėmis sąlygomis, kurios buvo parinktos skaitiniam modeliui, skaičiuojami supaprastinti antžeminio pastato šilumos nuostoliai, kada atitvaros šilumos laidumo koeficiento reikšmė dauginama iš jos ploto ir temperatūrų skirtumo tarp pastato vidaus ir išorės aplinkos. Vidutinė pastato atitvarų šilumos laidumo koeficiento reikšmė parenkama $0,11 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, vidutinė lauko oro temperatūra žiemos, vasaros, rudens ir pavasario sezonams parenkama remiantis RSN 156-94 „Statybinė klimatologija“, 2.1 lentelė [23]. Grunto temperatūra pasirenkama iš grafiko pateikto 6 paveiksle. Gauti šiluminės galios poreikiai, atlikus skaičiavimus, ir palyginimas su įgilinto pastato šiluminės galios poreikiu, kompensuoti šilumos nuostolius, pateikiami 7 lentelėje.

7 lentelė. Antžeminio pastato suminiai šiluminės galios poreikiai bei palyginimas su įgilinto pastato poreikiais, priklausomai nuo sezono

Sezonas	Galios poreikis įgilintam pastatui, W	Galios poreikis antžeminiam pastatui, W	Galios poreikių skirtumas, W	Galios sutaupymas, %
Žiema	937,46	1304,16	366,70	28,12
Vasara	152,76	244,64	91,88	37,56
Ruduo	480,39	680,02	199,63	29,36
Pavasaris	531,49	778,36	246,87	31,72

Gaunama, kad įgilintam pastatui šiluminės energijos poreikis, kompensuoti šilumos nuostolius iš pastato, yra mažesnis apie 30 % lyginant su antžeminiu pastatu. Antžeminio ir įgilinto pastato galios poreikių palyginimo diagrama pateikta 25 paveiksle.



26 pav. Antžeminio ir įgilinto pastato galios poreikių palyginimas

Išvados

1. Atlikus literatūros analizę matoma, kad baigtinio skirtumo skaitinis metodas yra labiausiai pritaikytas požeminių pastatų energetiniam tyrimui. Todėl šis metodas pasirinktas atlikti tiriamojo objekto modeliavimą ir analizę.
2. Požeminio pastato visas atitvaras tiesiogiai supa gruntas, veiksnius, turinčius įtakos jam, paprastai galima suskirstyti į dvi kategorijas: grunto šiluminės savybės ir žemės paviršiaus sąlygos. Todėl modeliuojant pastatą būtina atsižvelgti į šiuos veiksnius.
3. Literatūroje randama, kad požeminiai gyvenamieji pastatai turi įvairių pranašumų, pagrindiniai jų – vietos taupymas, mažesnis energijos poreikis pastatui ir pagerėjęs patalpų šiluminis komfortas.
4. Optimalus šiluminės izoliacijos paskirstymas gali sutaupyti iki 35 % visų šilumos nuostolių iš požeminių konstrukcijų, palyginti su vienodu izoliacijos paskirstymu. Labiausiai reikia atkreipti dėmesį į pastato stogo šilumos laidumo koeficiento vertę, nes ji daug labiau įtakoja pastato energijos poreikius, nei sienų ar grindų šiluminio laidumo koeficiento reikšmė.
5. Atlikus eksperimentinio stendo modeliavimą ir palyginimą su laboratorijoje išmatuotomis temperatūrų reikšmėmis, gautas skirtumas tarp jų siekia iki 2,75 %. Iš to daroma prielaida, kad skaitinis modelis patikimas ir galimas naudoti tolimesniuose skaičiavimuose.
6. Atlikus pastato modeliavimą, kuris įgilintas grunte 3 metrus, gautas preliminarus temperatūrų pasiskirstymo laukas. Remiantis juo ir literatūros analize patvirtinama prielaida, kad pagrindinis dėmesys turi būti skirtas pastato stogo izoliaciniam sluoksniui ir šilumos laidumo koeficiento gerinimui. Didžiausias temperatūrų skirtumas tarp pastato vidaus ir grunto matomas virš pastato stogo, kas ir lemia intensyviausius šilumos mainus, dėl to prarandama daugiausiai šilumos energijos iš pastato.
7. Išanalizavus grunto temperatūrinius profilius aplink iš dalies įgilintą pastatą, žiemos atveju gauta, kad 3 metrų viršutiniame grunto sluoksnyje temperatūra žemiausia ir apytiksliai svyruoja nuo +2,29 °C iki +3 °C, dėl sąveikos su lauko oru. Didėjant gyliui temperatūros kyla, o labiausiai už pastato ir po juo. Toje vietoje matoma didžiausia temperatūra (iki +12 °C), nes pastatas dėl šilumos nuostolių į supančią aplinką, gruntą įkrauna šilumine energija. Esant mažesniai temperatūrų skirtumui tarp pastato vidaus ir išorės aplinkos, šiuo atveju grunto, šilumos mainų procesas lėtėja, o šilumos nuostoliai į aplinką mažėja.
8. Rasti ir palyginti maksimalūs šilumos srautai per pastato atitvaras, priklausomai nuo sezono. Didžiausias srautas žiemos atveju rastas per pirmo aukšto priekinę sieną ir siekia -4,58 W/m². Per pirmo aukšto likusias sienas ir stogą gautas srautas -3,61 W/m². Atitinkamai šių reikšmių skirtumas tarp pirmo ir nulinio aukštų gaunamas 22 % ir 30 %. Ši tendencija išlieka panaši ir kitiems modeliuotiems sezonams. Įvertinus maksimalias šilumos srauto reikšmes iš pastato į aplinką, priklausomai nuo atitvarų vietos, remiantis gautais duomenimis, daroma išvada, kad pastato pirmo aukšto atitvarų šiltinimo gerinimui turėtų būti skirta daugiau dėmesio, nei nulinio aukšto.
9. Apskaičiavus šildymo galios poreikius kompensuoti šilumos nuostoliams iš įgilinto bei antžeminio pastatų, buvo atliktas gautų rezultatų palyginimas. Gauta, kad žiemos sezono atveju, įgilintam pastatui reikalingas šildymo galios poreikis yra 28,12 % mažesnis, lyginant su antžeminiu pastatu. Atitinkamai vasaros metu sutapymas būtų 37,56 %, pereinamuoju laikotarpiu, rudenį ir pavasarį – 29,36 % ir 31,72 %.

10. Remiantis paskaičiuotu šildymo galios poreikiu vasaros sezonui, gauta, kad įgilintas pastatas vėsinimo galios poreikio neturi. Skaičiuojant antžeminį pastatą, gauti rezultatai tokie pat – vėsinti pastato nereikia, o priešingai, reikia šildyti ir daugiau nei įgilinto pastato atveju.

Literatūros sąrašas

1. YU, Jia, Yanming KANG ir Zhiqiang (John) ZHAI. Advances in research for underground buildings: Energy, thermal comfort and indoor air quality. *Energy and Buildings* [interaktyvus]. 2020, **215** [žiūrėta 2021-03-14]. ISSN 0378-7788. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109916>
2. YU, Jia, Yanming KANG ir Zhiqiang (John) ZHAI. Comparison of ground coupled heat transfer models for predicting underground building energy consumption. *Journal of Building Engineering* [interaktyvus]. 2020, **32** [žiūrėta 2021-03-14]. ISSN 2352-7102. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101808>
3. KRARTI, Moncef. Effect of spatial variation of soil thermal properties on slab-on-ground heat transfer. *Building and environment* [interaktyvus]. 1996, **31** [žiūrėta 2021-03-17]. ISSN 0360-1323. Prieiga per: [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(95\)00026-7](https://doi.org/10.1016/0360-1323(95)00026-7)
4. EL-DIN, Salah M. M. On the heat flow into the ground. *Renewable Energy* [interaktyvus]. 1999, **18**, 473-490 [žiūrėta 2021-03-31]. ISSN 0960-1481. Prieiga per: [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(99\)00005-1](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(99)00005-1)
5. BRANDL, H. Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique* [interaktyvus]. 2006, **5**, 81-122. [žiūrėta 2021-04-03]. ISSN 0016-8505. Prieiga per: <https://doi.org/10.1680/geot.2006.56.2.81>
6. SANI, Abubakar Kawuwa, Rao Martand SINGH, Tony AMIS ir Ignazio CAVARRETTA. A review on the performance of geothermal energy pile foundation, its design process and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [interaktyvus]. 2019, **106**, 54-78 [žiūrėta 2021-04-03]. ISSN 1364-0321. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.008>
7. NIKIFOROVA, Tetiana, Mykola SAVYTSKYI, Karim LIMAM, Walter BOSSCHAERTS, Rafik BELARBI. Methods and results of experimental researches of thermal conductivity of soils. *Energy Procedia Volume* [interaktyvus]. 2013, **42**, 775-783 [žiūrėta 2021-04-08]. ISSN 1876-6102. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.12.034>
8. FAROUKI, Omar T. The thermal properties of soils in cold regions. *Cold Regions Science and Technology* [interaktyvus]. 1981, **5**, 67-75 [žiūrėta 2021-04-08]. ISSN 0165-232X. Prieiga per: [https://doi.org/10.1016/0165-232X\(81\)90041-0](https://doi.org/10.1016/0165-232X(81)90041-0)
9. REES, S. W., M. H ADJALI, Z ZHOU, M DAVIES, H. R THOMAS. Ground heat transfer effects on the thermal performance of earth-contact structures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [interaktyvus]. 2000, **4**, 213-265 [žiūrėta 2021-04-08]. ISSN 1364-0321. Prieiga per: [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(99\)00018-0](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(99)00018-0)
10. WAKAO, Noriaki, Koichi KATO. Effective thermal conductivity of packed beds. *Journal of Chemical Engineering of Japan* [interaktyvus]. 1969, **2**, 24-33 [žiūrėta 2021-04-12]. ISSN 0021-9592. Prieiga per: <https://doi.org/10.1252/jcej.2.24>
11. BUSBY, John, Melinda LEWIS, Helen REEVES, Russel LAWLEY. Initial geological considerations before installing ground source heat pump systems. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* [interaktyvus]. 2009, **42**, 295-306. [žiūrėta 2021-04-18]. ISSN 2041-4808. Prieiga per: <https://doi.org/10.1144/1470-9236/08-092>
12. HONG, Xiaoqiang, Feng SHI, Shaosen WANG, Xuan YANG, Yue YANG. Multi-objective optimization of thermochromic glazing based on daylight and energy performance evaluation. *Building Simulation* [interaktyvus]. 2021, **14**, 1685-1695 [žiūrėta 2021-10-23]. SN 1996-8744. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s12273-021-0778-7>

13. NA, Ri, Zhigang SHEN. Assessing cooling energy reduction potentials by retrofitting traditional cavity walls into passively ventilated cavity walls. *Building Simulation* [interaktyvus]. 2021, **14**, 1295–1309 [žiūrėta 2021-10-23]. SN 1996-8744. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s12273-020-0740-0>
14. REN, Zhengen, Omid MOTLAGH, Dong CHEN. A correlation-based model for building ground-coupled heat loss calculation using Artificial Neural Network techniques. *Journal of Building Performance Simulation* [interaktyvus]. 2020, **13**, 48-58 [žiūrėta 2021-10-23]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1080/19401493.2019.1690581>
15. MOHAMMADZADEH, Ali, Miroslav KAVGIC. Multivariable optimization of PCM-enhanced radiant floor of a highly glazed study room in cold climates. *Building Simulation* [interaktyvus]. 2020, **13**, 559–574 [žiūrėta 2021-10-23]. SN-1996-8744. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s12273-019-0592-7>
16. KANG, Xuyuan, Da YAN, Xiaona XIE, Jingjing AN, Zhaoru LIU. Co-simulation of dynamic underground heat transfer with building energy modeling based on equivalent slab method. *Energy & Buildings* [interaktyvus]. 2022, **256** [žiūrėta 2021-12-02]. ISSN 0378-7788. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111728>
17. SZABO, J., L. KAJTAR, J. NYERS, B. BOKOR. A new approach and results of wall and air temperature dynamic analysis in underground spaces. *Energy* [interaktyvus]. 2016, **106**, 520-527 [žiūrėta 2021-10-27]. ISSN 0360-5442. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.008>
18. KAUSHAL, Maneesh. Geothermal cooling/heating using ground heat exchanger for various experimental and analytical studies: comprehensive review. *Energy and Building* [interaktyvus]. 2017, **139**, 634–652 [žiūrėta 2021-10-29]. ISSN 0378-7788. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.024>
19. MUKHTAR, A., M. Z. YUSOFF, K.C. NG. The potential influence of building optimization and passive design strategies on natural ventilation systems in underground buildings: The state of the art. *Tunnelling and Underground Space Technology* [interaktyvus]. 2019, **92** [žiūrėta 2021-10-29]. ISSN 0886-7798. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103065>
20. ALKAFF, A. Saqaff, S. C. SIM, M. N. Ervina EFZAN. A review of underground building towards thermal energy efficiency and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [interaktyvus]. 2016, **60**, 692-713 [žiūrėta 2021-03-21]. ISSN 1364-0321. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.085>
21. SHAN, Ming, Bon-gang HWANG ir Kristie Sze Ni WONG. A preliminary investigation of underground residential buildings: Advantages, disadvantages, and critical risks. *Tunnelling and Underground Space Technology* [interaktyvus]. 2017, **70**, 19-29 [žiūrėta 2021-03-21]. ISSN 0886-7798. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.07.004>
22. ZHU, JIAYIN, L. TONG, R. LI, J. YANG, H. LI. Annual thermal performance analysis of underground cave dwellings based on climate responsive design. *Renewable Energy* [interaktyvus]. 2020, **145**, 1633-1646 [žiūrėta 2021-11-25]. ISSN 0960-1481. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.056>
23. BIDARMAGHZ, Asal, Ruchi CHOUDHARY, Guillermo NARSILIO, Kenichi SOGA. Impacts of underground climate change on urban geothermal potential: Lessons learnt from a case study in London. *Science of the Total Environment* [interaktyvus]. 2021, **778** [žiūrėta 2021-11-12]. ISSN 0048-9697. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146196>

24. DAKWALE, A. Vaidehi, Rahul V. RALEGAONKAR. Review of carbon emission through buildings: threats, causes and solution. *International Journal of Low-Carbon Technologies* [interaktyvus]. 2012, **7**, 143–148 [žiūrėta 2021-11-12]. SN 1748-1317. Prieiga per: <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctr032>
25. XU, J., R. Z. WANG, Y. LI. A review of available technologies for seasonal thermal energy storage. *Solar Energy* [interaktyvus]. 2014, **103**, 610-638 [žiūrėta 2021-11-16]. ISSN 0038-092X. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.06.006>
26. LIETUVOS RESPUBLIKOS STATYBOS IR URBANISTIKOS MINISTERIJA (iki 1998 – 04 – 28). RSN 156:94. Statybinė klimatologija. RSN 156 – 94: 1994 m. kovo 18 d. Nr. 76 [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-04-24]. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalActPrint/lt?jfwid=oizvyat3&actualEditionId=mImelqxyJw&documentId=TAIS.14502&category=TAD>
27. VALANTINAVIČIUS, M. Sekliojo geoterminio šildymo sistemų vertikalios kolektoriaus kompiuterinis modeliavimas. Master thesis. [interaktyvus]. 2011 [žiūrėta 2021 – 04 – 24]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/259703765_Sekliojo_geoterminio_sildymo_sistemu_vertikalios_kolektoriaus_kompiuterinis_modeliavimas
28. MACAITIS, M. Skirtingos konfigūracijos geoterminio šildymo vertikalios kolektorių 2D ir 3D modeliavimas. Magistro baigiamasis darbas. [interaktyvus]. 2013 [žiūrėta 2021-04-24]. Prieiga per: <https://vb.vdu.lt/object/elaba:1774453/>
29. SABALIAUSKAS, S. Tiriamojo projekto tarpinė ataskaita_15. 2021 [žiūrėta 2021-05-19]
30. ANSYS. Ansys Student 2020 [programinė įranga]. 2020 [žiūrėta 2020-03-14]. Prieiga per: <https://www.ansys.com/academic/students>
31. AUTODESK. AutoCAD 2020 1.3 [programinė įranga]. 2020 gegužės 26 [žiūrėta 2020-05-30]. Prieiga per: <https://www.autodesk.com/education/edu-software/overview?sorting=featured&filters=individual>
32. MICROSOFT. Office 365 A1 Education [programinė įranga]. 2016 [žiūrėta 2021-03-10]. Prieiga per: <https://www.microsoft.com/en-us/education/products/office>

Priedai

1 priedas. Dalyvavimo „Advanced Constructon andArchitecture 2020“ konferencijoje sertifikatas



CERTIFICATE

**T. ŽDANKUS, L. PAUKŠTAITIS, J. ČERNECKIENĖ,
D. BUNOKAS, T. LENKAS**

Has participated in the 1st International Scientific Conference
Advanced Construction and Architecture 2020.

Has presented scientific report
Development of Ground Heat Utilization in Building Heating Systems

Prof. dr. Andrius Jurelionis
Dean of the Faculty of
Civil Engineering and Architecture



RawMaterials Hub
Regional Center Baltic



FOR FACULTY OF
CIVIL ENGINEERING
AND ARCHITECTURE



This activity has received funding from the European Institute of Innovation and Technology (EIT), a body of the European Union, under the Horizon 2020, the EU Framework Programme for Research and Innovation

2 priedas. Dalyvavimo „SMART BUILT ENVIRONMENT“ konferencijoje sertifikatas

